

目 录

（第一期）

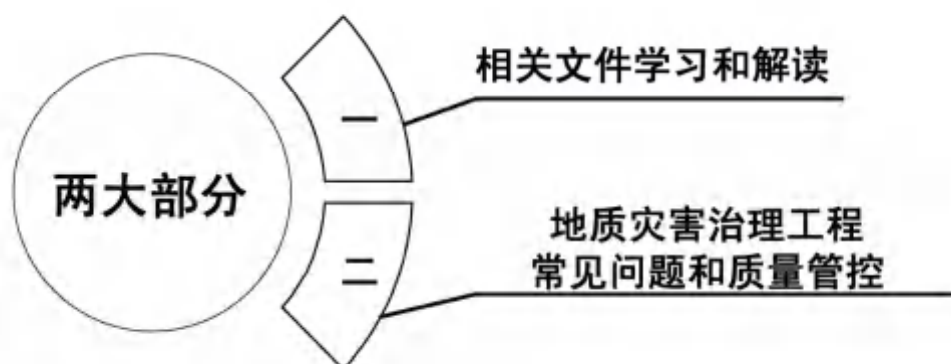
第一讲：地质灾害治理工程质量管控·····	龚新法（ 1 ）
第二讲：城市地质工作进展与展望·····	张达政（ 51 ）
第三讲：隧道地质超前预报技术·····	李建华（ 59 ）
第四讲：杭州城市地质数据库及三维模型建设·····	蔡雄翔（ 122 ）
第五讲：离子色谱原理及在实验测试中应用·····	吴述超（ 138 ）

（第二期）

第一讲：基于地球系统科学范式的浙江省基础地质调查研究··	周宗尧（ 157 ）
第二讲：浙江省乡镇地质灾害风险调查技术要求·····	刘正华（ 185 ）
第三讲：三门县其头山矿矿山地下开拓系统施工方案优化及比选 ·····	朱爱山（ 202 ）
第四讲：城市地下管线探查与监测新技术·····	楼国长（ 236 ）
第五讲：实验测试的误差与不确定度评估·····	闵明方（ 289 ）

地质灾害治理工程 质 量 管 控

龚新法



地质灾害治理工程 基本概念

地质灾害治理工程：对因自然因素或人为活动引发的危害人民生命和财产安全的地质灾害，采取截（排）水、支挡、支护、加固、导流、减载等工程措施，抑制地质体（孕灾体或致灾体）破坏性运动的工程活动。

治理工程和避让搬迁一样，是当前消除地质灾害的最直接手段。

治理工程概况

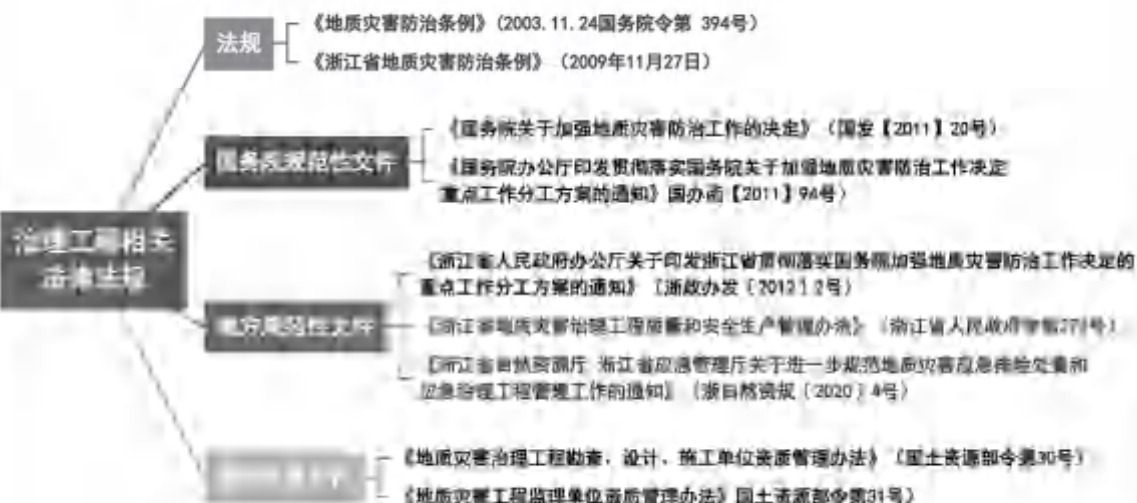
我省地灾治理工程实施卓有成效。“除险安居”三年行动以来，截止2021年底，我省共有2151处治理工程完成交竣工验收并交付使用，主要采用了截排水、削坡减载、抗滑桩、挡墙、锚杆格构、防护网等措施，保护了5.47万群众的生命财产安全。



一、相关文件学习和解读



相关文件解读



相关管理文件

为了更好地提升我省地质灾害治理工程的质量和安全管理水平，保障地质灾害治理工程的质量和安全生产，我省于2018年12月发布了《浙江省地质灾害治理工程质量和安全生产管理办法》（以下简称省政府令373号或《办法》）。《办法》是全国首个就地质灾害治理工程发布的省政府令，而且细分提出了**应急排险和应急治理两个具有地方特色的工程治理方式**。

为进一步规范地质灾害应急排险处置和应急治理工程管理，2020年3月，省自然资源厅、省应急管理厅联合印发《关于进一步规范地质灾害应急排险处置和应急治理工程管理工作的通知》（浙自然资规〔2020〕10号，以下简称《通知》）。

浙江省地质灾害治理工程质量和 安全生产管理办法

浙江省人民政府令

第373号

《浙江省地质灾害治理工程质量和安全生产管理办法》已经省人民政府第14次常务会议审议通过，现予公布，自2019年2月1日起施行。

省长 **袁家军**

2018年12月18日

浙江省自然资源厅文件 浙江省应急管理厅

浙自然资规〔2020〕4号

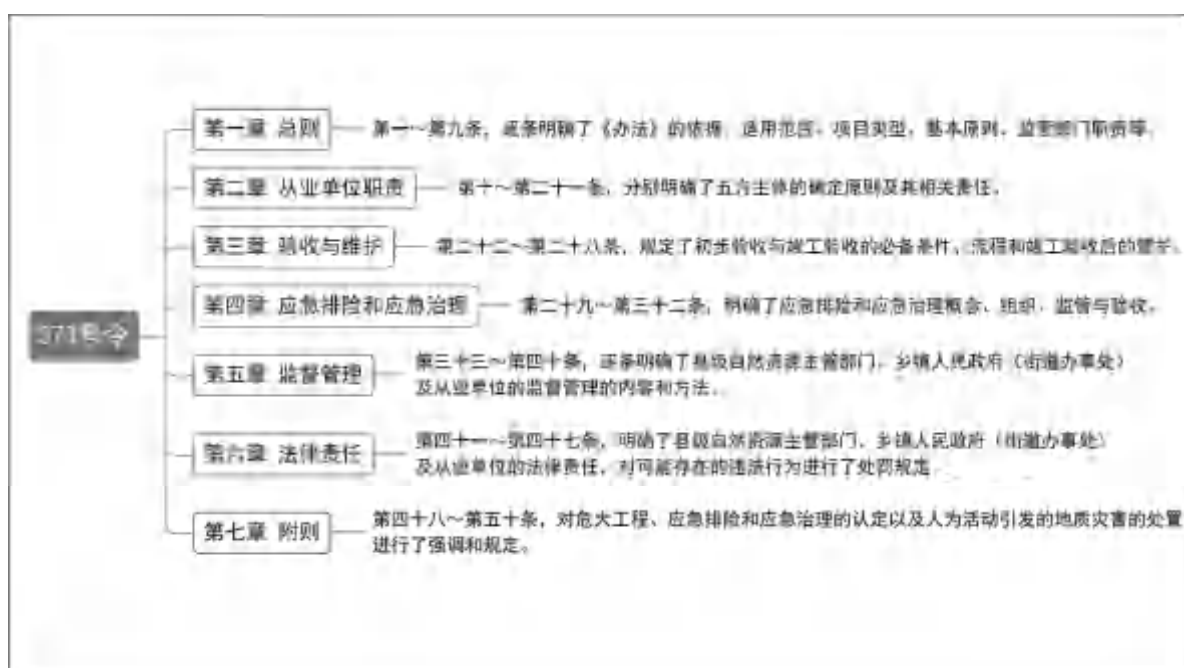
浙江省自然资源厅 浙江省应急管理厅 关于进一步规范地质灾害应急排险处置和 应急治理工程管理工作的通知

各市、县（市、区）自然资源主管部门，应急管理局：

地质灾害排险和应急治理是地质灾害治理的特殊类型，为规范地质灾害治理工程“急事急办”政策，切实提升地质灾害治理工程治理、进一步规范排险处置和应急治理工程管理，现就地质灾害排险处置和应急治理工程管理，按照《浙江省地质灾害治理工程质量和安全生产管理办法》（以下简称《办法》）规定，现就有关事项通知如下：

一、应急排险处置与应急治理工程类型的确定

根据地质灾害灾情险情，由自然资源主管部门



地质灾害治理工程 质量遵循原则

地质灾害治理工程的质量管理遵循安全第一、质量至上、管理规范、及时高效的原则，实行政府领导、属地管理、行业监管、从业单位负责的质量和安全生产管理体系。

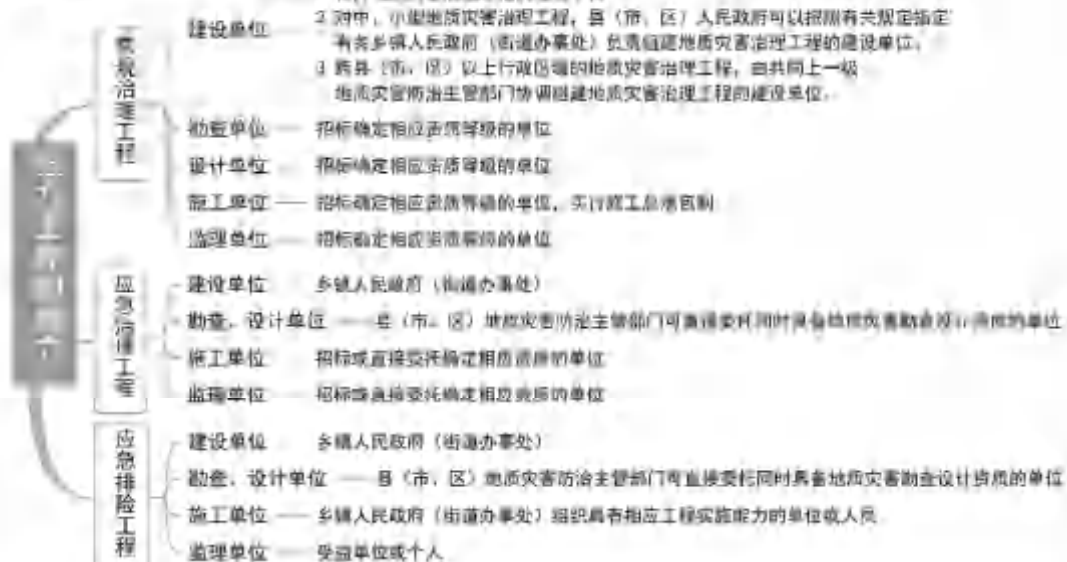
对于地质灾害和地质灾害隐患的工程治理，地质灾害防治主管部门应当在充分调查的基础上确定采取应急排险、应急治理或者常规治理工程等治理方式。

地质灾害常规治理工程分为大、中、小三个类型，其划分标准按照国家有关规定执行。

表 1 常规地质灾害治理工程规模分类表

治理工程 规模	治理经费 (万元)	勘查经费 (万元)	保护人数 (人)	保护财产 (万元)	资质 要求
大型	≥2000	≥50	≥500	≥5000	甲级
中型	<2000 ≥500	<50 ≥30	<500 ≥100	<5000 ≥500	乙级 以上
小型	<500	<30	<100	<500	丙级 以上

第二章、从业单位职责



相关文件解读

14

勘查单位对地质灾害治理工程勘查质量和安全生产负责：

（一）针对地质环境条件、致灾地质体特征和危害程度，制定相应的工程勘查设计书或者勘查方案，其中，中、小型地质灾害治理工程可以合并勘查阶段。

（二）勘查工作应当满足国家规定的规程规范、委托书、勘查合同以及相应阶段要求；各项野外工作应当进行现场验收或者委托第三方复核，勘查成果应当准确、可靠。

（三）参加设计交底，相关重大设计变更、现场验槽、单元工程阶段性验收、质量事故分析以及工程初步验收与竣工验收等工作。

（四）在施工期间验证已有的勘查成果；当出现重大地质勘查结论变化时，应当及时通知建设单位并组织补充勘查。



相关文件解读

设计单位对地质灾害治理工程设计质量和安全生产负责：

- (一) 按照勘查成果和国家规定的规程规范开展治理工程设计。其中，中、小型地质灾害治理工程可以合并设计阶段；设计文件应当符合国家规定的设计深度要求，注明工程合理使用年限。
- (二) 对工程施工可能存在的安全风险进行分析，并提出相应风险防控措施。
- (三) 施工中发现地质条件变化时，应当及时变更设计，对重大设计变更的，应当提供变更相关的设计报告或者设计说明书。
- (四) 负责设计交底、过程设计服务，参加现场验槽、单元工程阶段性验收、质量事故分析以及工程初步验收与竣工验收等工作。
- (五) 在设计中采用新技术、新工艺、新材料、新设备的，应当说明其技术性能和使用注意事项，并提出质量保障措施。



相关文件解读

施工单位对地质灾害治理工程施工质量和安全生产负责：

- (一) 配备项目负责人和相关专业技术人员，明确专职质量和安全生产管理人员，并经监理单位、建设单位认可；项目负责人、技术负责人、施工员、质检员、安全员等主要管理人员在从事业务应当满足施工合同以及有关规定的要求；调整主要管理人员的，应当书面征得建设单位同意。主要管理人员不得同时在其他工程项目兼职。
- (二) 根据施工合同、设计文件以及国家规定的规程规范编制施工组织方案，明确保证质量和安全生产的具体措施，保障工程施工安全生产条件。
- (三) 建立工程质量和安全生产隐患排查治理、风险管控、质量检验制度，及时整改工程质量问题和安全生产隐患，负责返修存在质量问题和验收不合格的工程。
- (四) 施工中发现地质条件变化的，应当及时通知建设单位和监理单位。
- (五) 开展施工安全专项风险评估，对危险性较大的土方开挖、模板及支撑体系、人工挖孔桩等分部分项工程，应当编制安全专项施工方案。
- (六) 采取必要的安全防护措施，防止无关人员和机械设备进入施工现场；设置明显的安全警示标志和防护设施；施工现场的办公、生活区不得设置在地质灾害危险区。



相关文件解读

11

监理单位对监理的地质灾害治理工程质量和安全生产负责：

（一）编制监理规划和监理实施细则，建立与项目规模、专业相适应的监理机构，确定总监理工程师和监理人员。监理人员不得擅自调替，确需调整的，应当符合监理合同约定要求并征得建设单位同意。

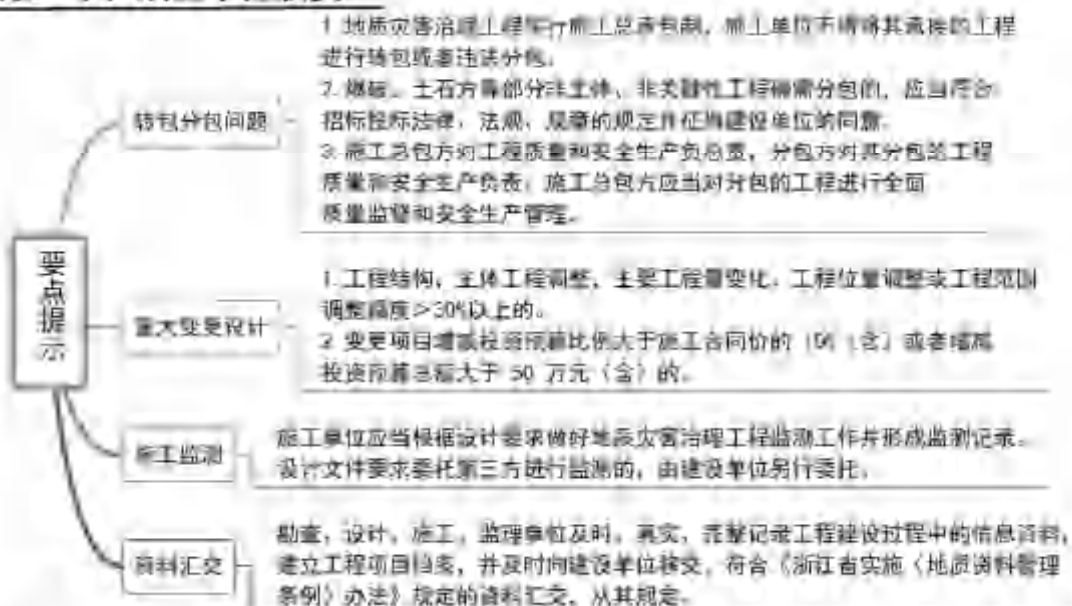
（二）组织设计交底，审查施工组织方案、工程开工报告以及危险性较大的分部分项工程专项施工方案。

（三）检查施工单位的质量和安全生产保护措施落实情况；核查主要管理人员和关键设备到位情况。相关从业人员依法应当取得的执业资格证书或者考核合格证书情况；设备合格证书和施工技术档案情况。

（四）监督施工单位落实施工组织方案、专项施工方案和安全生产措施；督促施工单位及时整改工程质量问题，消除安全生产隐患。

（五）监理工程师应当按照工程监理规范的要求，采取旁站、巡视和平行检验等形式对工程实施监理，并及时、真实、完整地做好监理记录。

第二章、从业单位职责



相关规范标准

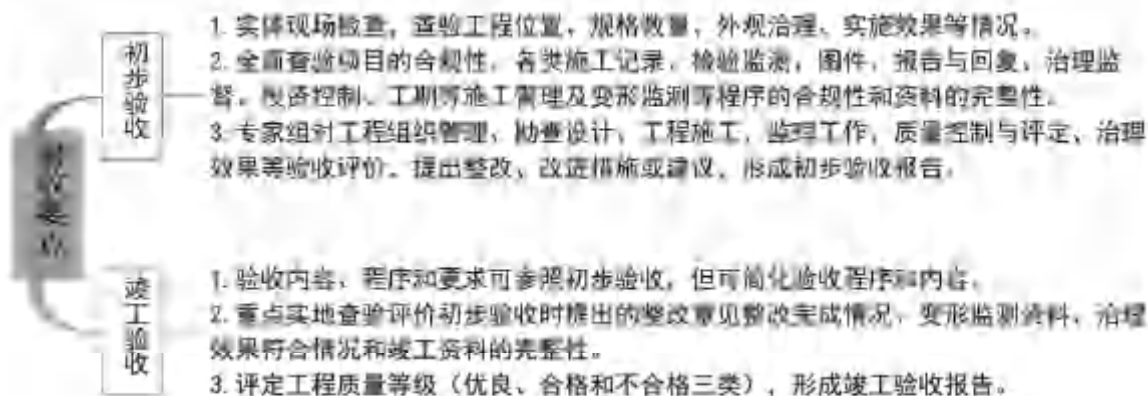
规范和技术要求等：GB国家强制性标准、GB/T国家推荐标准、DB地方标准、DB/T地方推荐标准、DZ地质行业标准、T/行业团体标准 如T/CAGHP 中国地质灾害防治工程行业协会团体标准。

相关规范标准

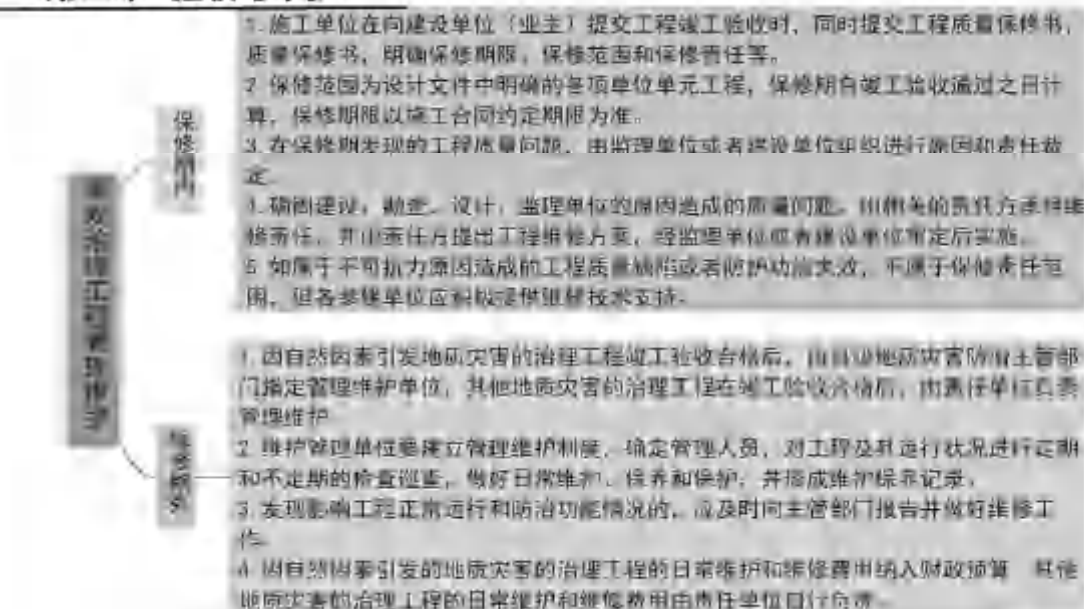
针对地质灾害治理工程的验收，湖北、广东、甘肃、云南、重庆等地均出台了地方性的管理办法或技术规程。我省结合实际正在制定。

第三章 验收与维护

21

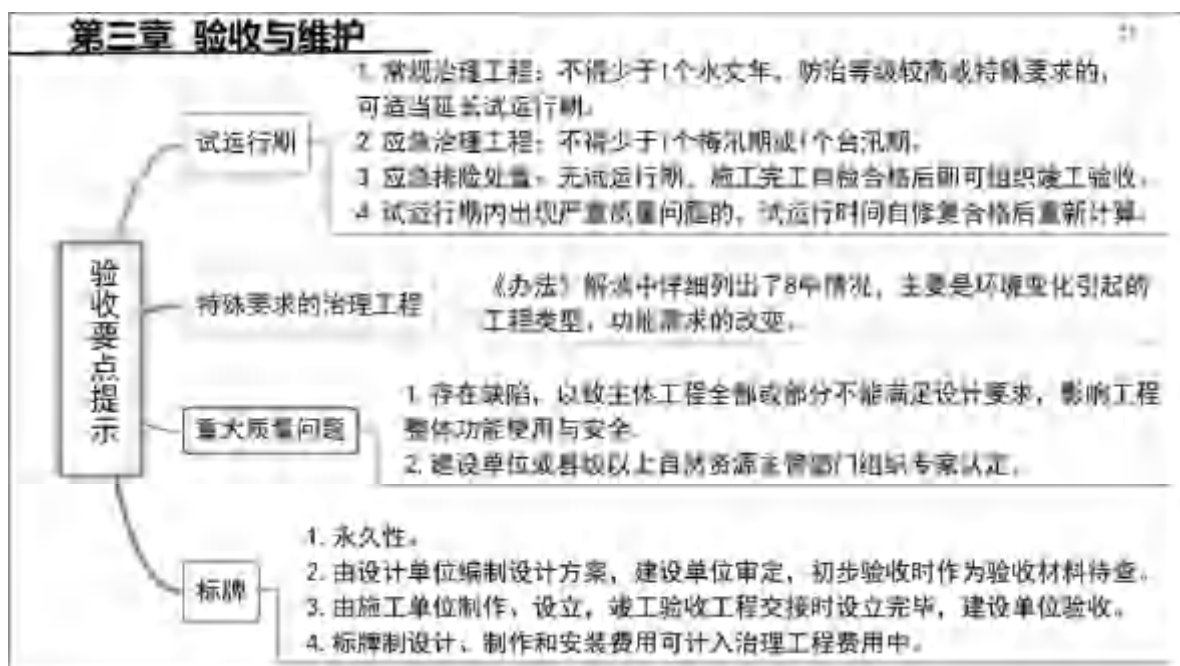


第三章 验收与维护



第三章 验收与维护

21



水文年定义

一个水文年：

工程水文学上的定义是按照同一河流断面一年中第一次涨水时刻，到下一年首次开始涨水时刻，为一完整的水文年。不同于一年。

指与水文情况相适应的一种专用年度。水文年度的开始日期有两种不同的划分方法：

(1) 选择供给河流水源自然转变的时候，即从专靠地下水源转变到地面水源增多的时候：

(2) 根据与地面水文气象相适应的时候，即选择降水量极少，地表径流接近停止的时候。因此，每一水文年度的开始日期是不同的，但为便于整编计算起见，实际划分时仍以某一月的第一日作为年度开始日期。

水文定义

当前地质灾害验收时还有一个需要引起重视的问题是：竣工总结报告材料不规范，个别或由第三方中介帮助编制。涉及隐蔽工程监理、材料检验、抗拔检测、变形监测、地质验槽、设计变更、工程量等重点和关键内容，经常资料残缺或补记。需要今后加强规范。

第三章 验收与维护

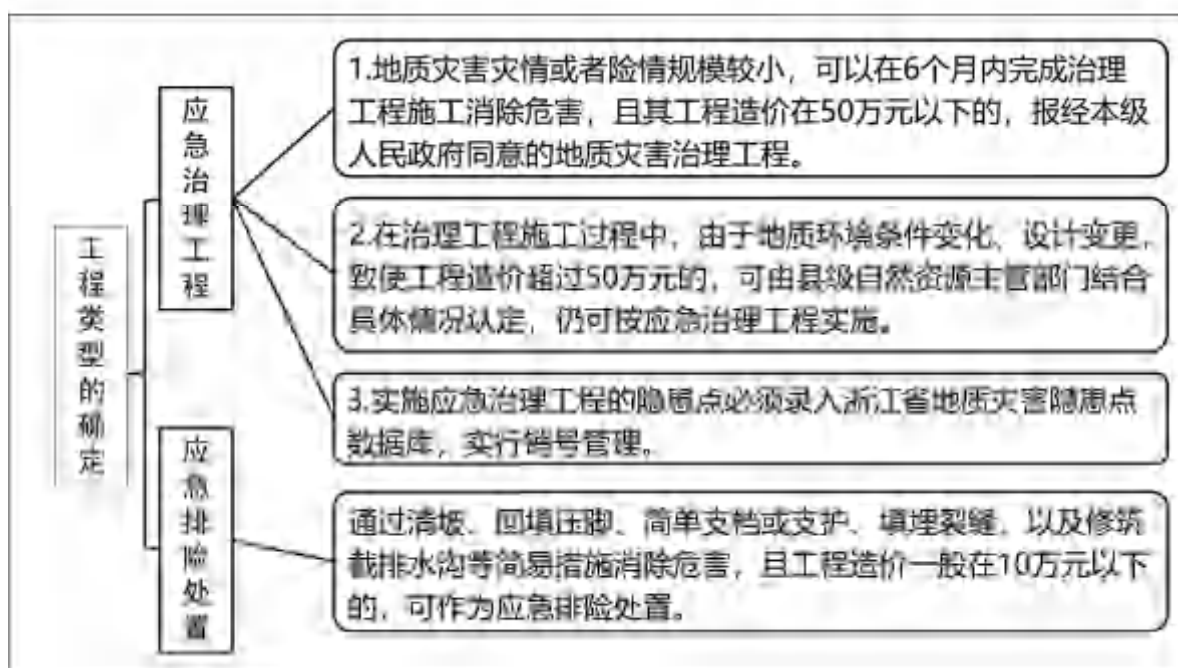
浙江省地质灾害应急排险处置项目验收表

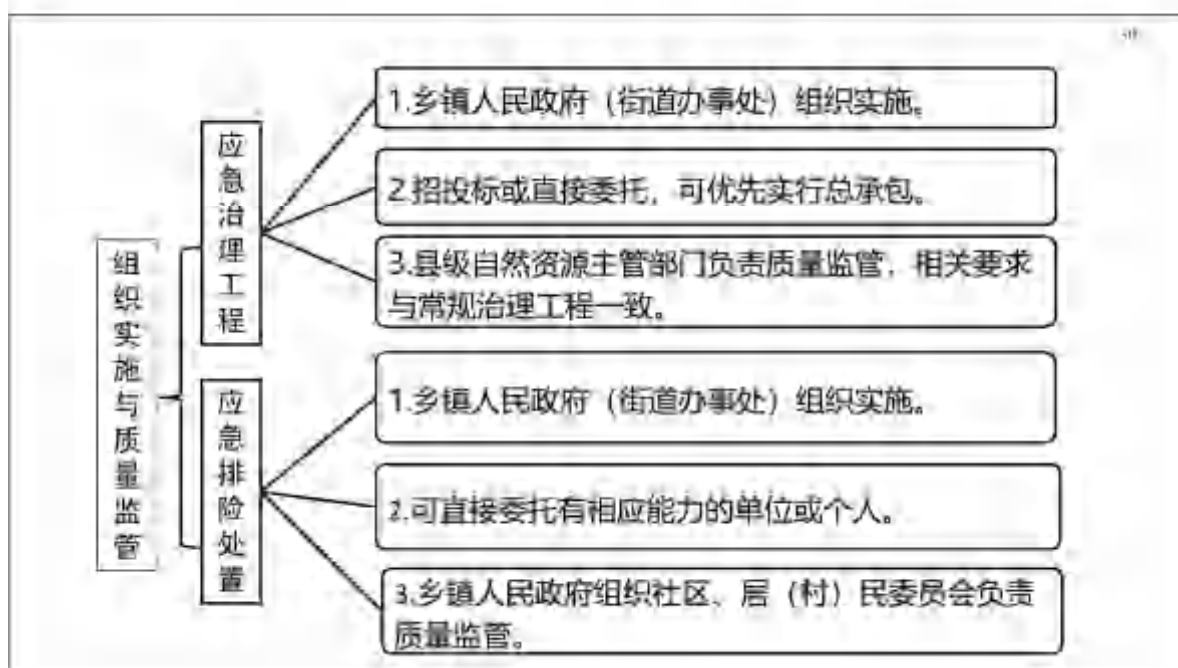
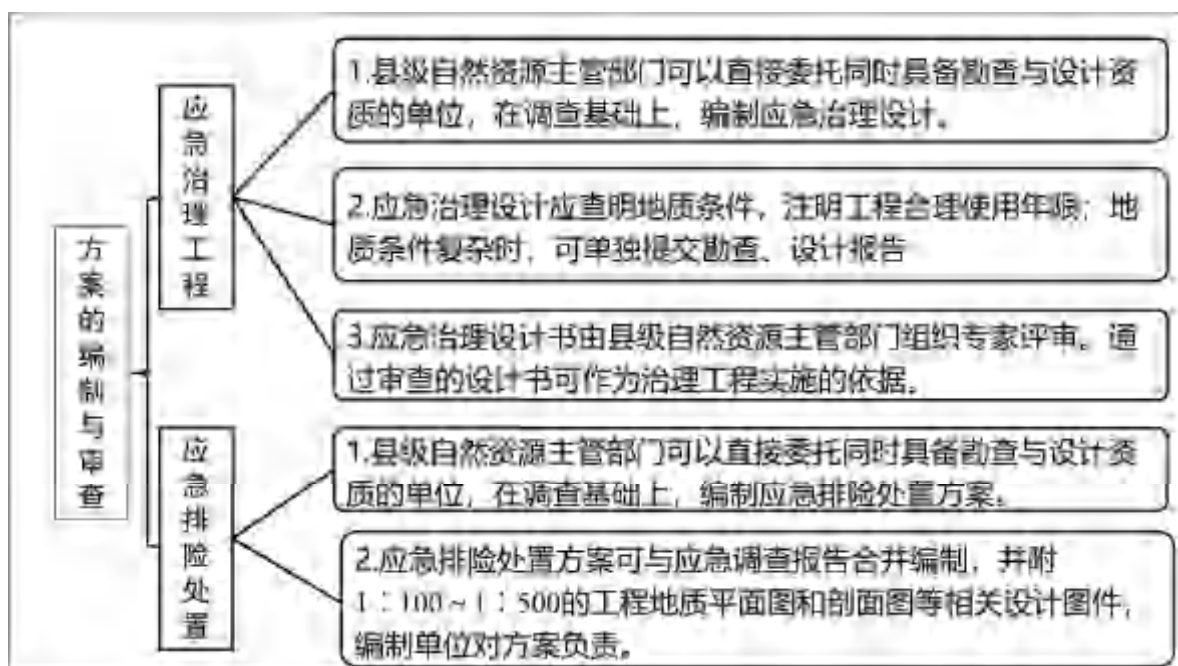
项目名称		经纬度坐标	
乡（镇、街道办事机构）		社区、行政村	
应急排险处置单位（个人）		联系方式	
受益单位（受益人）		联系方式	
项目内容及验收意见			
应急排险措施	(附处置前、后照片)		
管护要求			
社区、居（村）民委员会意见	签名：_____ 年 月 日 (公章)	调查与方案单位意见	签名：_____ 年 月 日 (公章)
乡镇（街道）意见	签名：_____ 年 月 日 (公章)	县镇自然资源主管部门意见	签名：_____ 年 月 日 (公章)

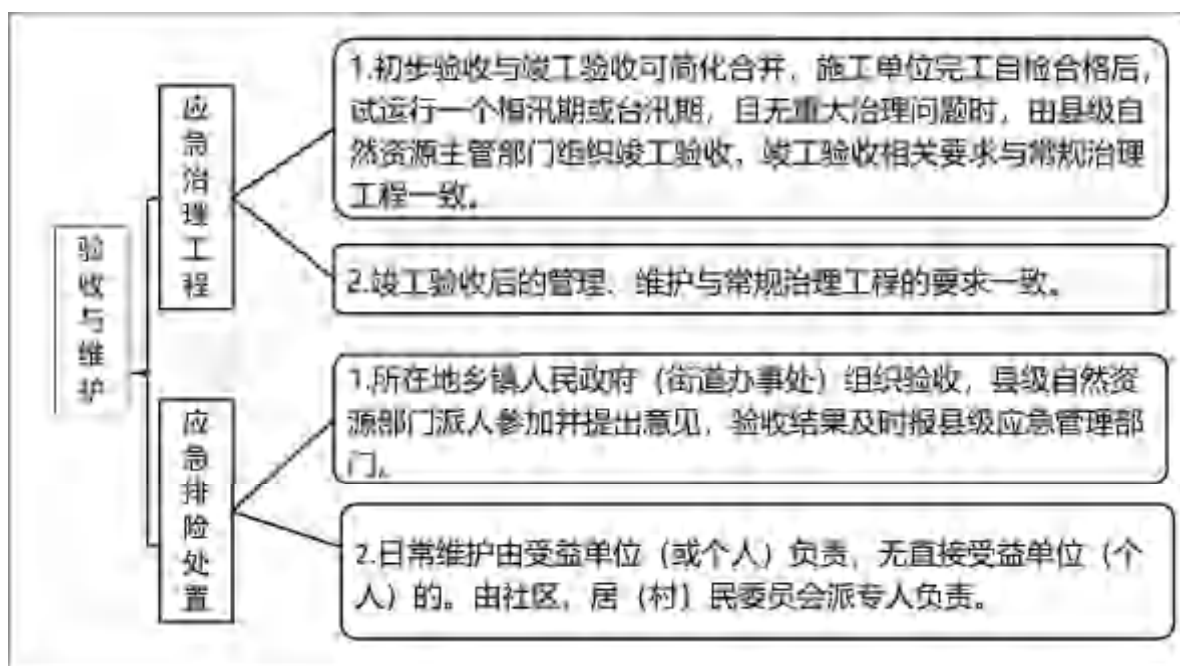
文件要求

2019年2月1日,《办法》正式施行。为进一步规范地质灾害应急排险处置和应急治理工程管理,2020年3月25日,浙江省自然资源厅、浙江省应急管理厅联合印发《关于进一步规范地质灾害应急排险处置和应急治理工程管理工作的通知》(浙自然资规〔2020〕10号(以下简称《通知》))。

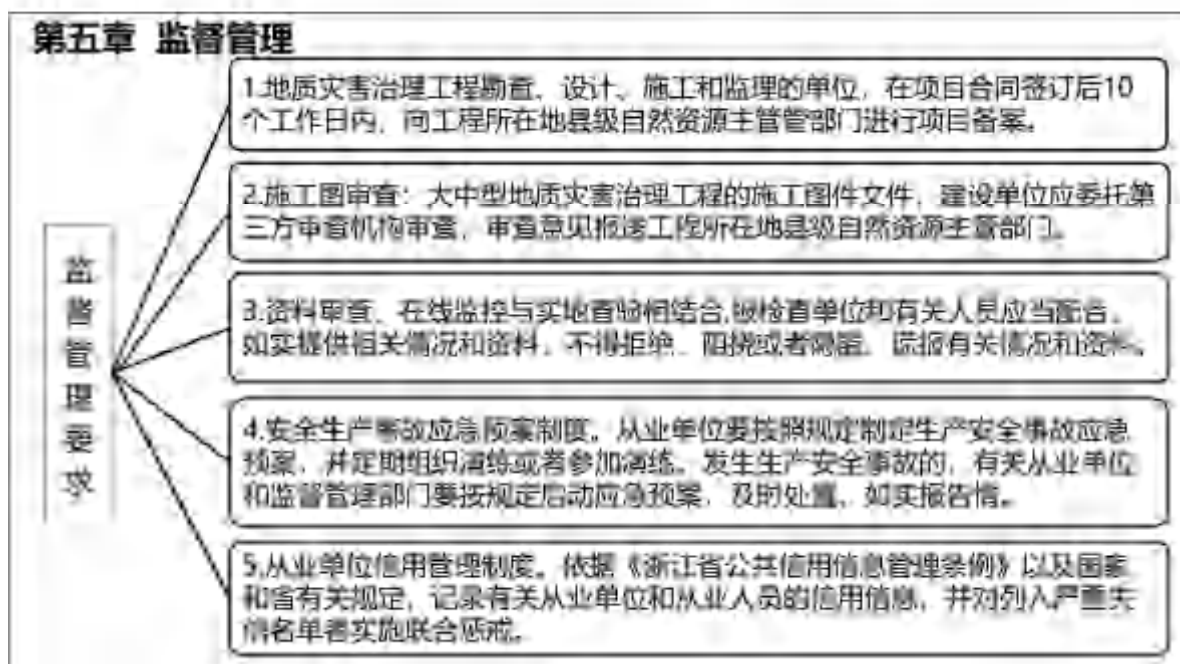
《通知》分别从工程类型的确定、方案的编制与审查、组织实施、验收维护和质量监管等5个部分进行了详细规定。







第五章 监督管理





相关文件解读

33

勘查、设计单位责任

勘查、设计单位有下列情形之一的，由县（市、区）地质灾害防治主管部门责令限期改正；逾期不改正的，处 3 千元以上 3 万元以下罚款；情节严重的，处 3 万元以上 10 万元以下罚款：

- （一）勘查单位的各项野外工作未进行现场验收或者委托第三方复核的；
- （二）设计单位在明知施工地质条件发生变化时，未及时变更设计的；
- （三）设计单位对采用新技术、新工艺、新材料、新设备，未说明其技术性能和使用注意事项并提出相应质量保障措施的。

1

33



相关文件解读

施工单位责任

施工单位有下列情形之一的，由县（市、区）地质灾害防治主管部门责令限期改正；逾期不改正的，处 1 万元以上 5 万元以下罚款；情节严重的，处 5 万元以上 10 万元以下罚款：

- （一）擅自调整主要管理人员或者主要管理人员未按规定在岗履职以及同时在其他工程项目兼职的；
- （二）未按规定编制施工组织方案，明确保证质量和安全生产的具体措施的；
- （三）施工中发现地质条件变化，未及时通知建设单位和监理单位。

1

34



相关文件解读

监理单位责任

监理单位有下列情形之一的，由县（市、区）地质灾害防治主管部门责令限期改正；逾期不改正的，处 5 千元以上 5 万元以下罚款；情节严重的，处 5 万元以上 10 万元以下罚款：

- （一）未征得建设单位同意擅自调整监理人员的；
- （二）未按规定做好监理记录的。

第四十八条 本办法所称危险性较大的分部分项工程的范围和规模，由省地质灾害防治主管部门确定。国家另有规定的，从其规定。本办法第三十一条和第三十二条第一款中所称的特殊情况，由县（市、区）地质灾害防治主管部门认定。

危险性较大工程是指地质灾害治理工程在施工过程中容易导致人员群死群伤或者造成重大经济损失的分部分项工程，包括但不限于如下工程内容：土石方开挖、高大模板及支撑体系、人工挖孔桩、暗挖工程、水下工程、脚手架工程等。《办法》明确施工单位应当在危大工程施工前编制专项施工方案，施工单位技术部门组织本单位施工技术、安全、质量等部门的专业技术人员进行审核，审核合格的，由施工单位技术负责人签字，报经项目总监理工程师审核签字后方可实施。是否组织专家认证由建设单位、监理单位把控，目前建设系统是有要求的，如高大脚手架工程。

二、地质灾害治理工程常见问题及质量管控

主要内容 CONTENTS



1

治理工程措施及其常见问题

汛期防范注意事项

2

绿色勘查、设计与施工



滑坡常见治理措施

滑坡的治理要贯彻“及早发现，预防为主；查明情况，综合治理；力求根治，不留后患”的原则。针对滑坡，除截排水外，一般砍头强腰固脚，采取削坡、固坡和支挡措施。

- 一、放坡：合理坡率，台阶；
- 二、固坡：锚杆（索）格构，挂网（主动网被动网），喷砼；
- 三、支挡：一般为挡墙，抗滑桩或回填反压，挡墙又分了很多类：重力式、衡重式、钢混式、浆砌式、干砌式、扶肋式、毛石类等；抗滑桩又分为方桩、圆桩、微型桩等。

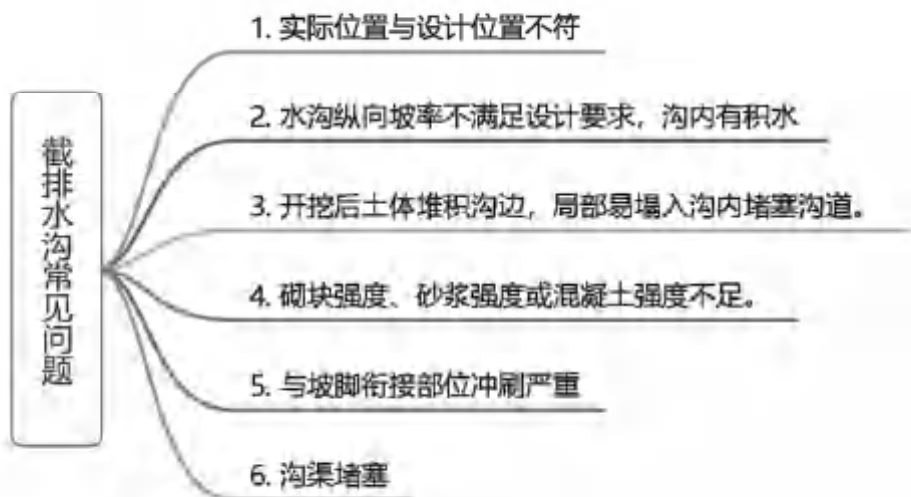
2021年12月14日，住建部印发的《房屋建筑和市政基础设施工程危及生产安全施工工艺、设备和材料淘汰目录（第一批）》明确：基桩人工挖孔工艺存在下列条件之一的区域不得使用：1. 地下水丰富、软弱土层、流沙等不良地质条件的区域；2. 孔内空气污染物超标准；3. 机械成孔设备可以到达的区域。

崩塌、泥石流常见治理措施

针对崩塌，一般通过修坡清理危岩体；或放坡，或挂网（主动防护网、被动防护网）或喷砼；或底部设置落石安全平台；

针对泥石流，一般采取挡砂坝、谷坊、排导槽，然后固源、固岸、固坡。

①截排水工程及其常见问题



②支挡措施及其常见问题

挡土墙常见问题

1. 砌块强度、砂浆强度或混凝土强度不足。
2. 基础持力层与设计持力层不一致，承载力不能满足要求；或开挖过深无支护，存在安全风险。
3. 开挖后未及时施工挡土墙，因地下水或雨水形成积水，持力层软化。
4. 未按设计要求设置泄水孔，或位置与设计不符。
5. 泄水孔未设置反滤层，泄水孔易堵不出水。

③支挡措施及其常见问题

44

抗滑桩常见问题

1. 抗滑桩位置设置与设计不一致。
2. 主筋或箍筋未按设计数量、位置，绑扎不符合要求。
3. 桩底持力层与设计不一致，或地层与勘察报告不符。
4. 桩身混凝土强度不满足设计要求，预留试块强度也不满足要求。
5. 因桩身嵌入中风化岩体人工施工难度大，采用地锚代替抗滑桩嵌固段。
6. 桩身混凝土灌注存在空洞、蜂窝麻面、混凝土离、断桩、缩径等问题。

④固坡措施及其常见问题

锚杆常见问题

1. 砂浆强度不足。
2. 入射角过大或偏小。
3. 排间距过大，不满足设计要求。
4. 孔内地下水流出未经处理灌浆，砂浆未能成形，无有效抗拔力。
5. 钢筋长度、绑扎长度和焊接长度不足问题。
6. 清孔不干净，注浆压力不够，成孔出现塌孔等问题。

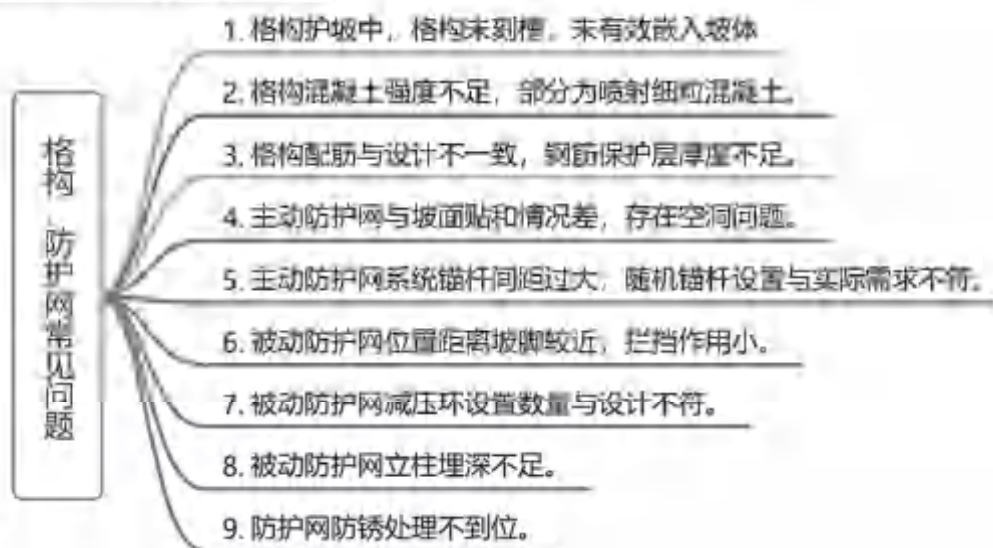
④固坡措施及其常见问题

46

锚喷常见问题

1. 喷射层厚度不满足设计要求。
2. 未设泄水孔，或泄水孔阻塞。
3. 锚杆间距过大，不满足设计要求。
4. 钢筋网片间距过大，不满足设计要求。
5. 喷射混凝土强度不足，不满足设计要求。

④固坡措施及其常见问题



截排水工程及其常见问题

48



排水沟



截水沟

截排水工程及其常见问题



排水隧洞



排导槽

截排水工程及其常见问题



截排水工程及其常见问题

51



截排水工程及其常见问题



拦挡工程及其常见问题

53



分台阶削坡及其常见问题



- 1. 削坡坡面过陡，不满足稳定性要求；
- 2. 削坡台阶宽度不足，整体坡率不满足稳定性要求；
- 3. 坡面清理不平整，存在倒挂、临空危岩体情况；
- 4. 坡顶线和坡脚线变化较大。

支挡措施及其常见问题

55



挡土墙



抗滑桩

支挡措施及其常见问题



挡土墙施工



人工挖孔桩施工

支挡措施及其常见问题



未设泄水孔



泄水孔不出水

支挡措施及其常见问题



泄水孔效果不佳

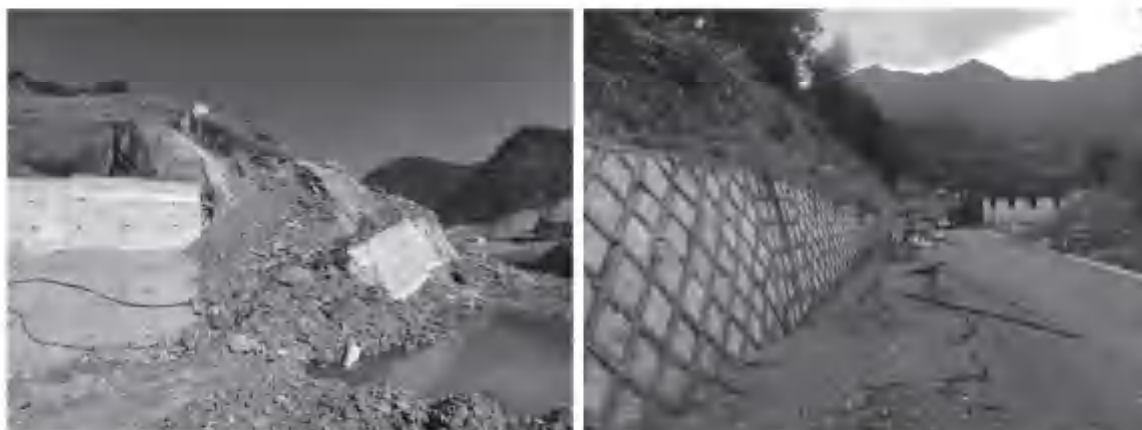
支挡措施及其常见问题



泄水孔不出水

支挡措施及其常见问题

60



挡墙基础埋深问题

支挡措施及其常见问题



抗滑桩断桩

支挡措施及其常见问题



伸缩缝设置不符合设计要求

固坡措施及其常见问题



钻孔施工（角度、
长度、清孔、注浆
问题）



锚索张拉

固坡措施及其常见问题



被动防护网



主动防护网

固坡措施及其常见问题



格构护坡



锚喷护坡

固坡措施及其常见问题

66



锚喷厚度不足，泄水孔未设

固坡措施及其常见问题



格构未嵌入边坡体

固坡措施及其常见问题



格构钢筋设置问题



固坡措施及其常见问题



主动防护网设置问题



固坡措施及其常见问题

70



地质灾害勘查设计施工监理注意重点

熟悉规范、标准

地质灾害防治勘查相关技术规范:

1. 工程测量规范GB50026
2. 工程岩体试验方法标准GB/T50266
3. 土工试验方法标准GB/T50123
4. 岩土工程勘察规范GB50021
5. 工程岩体分级标准GB/T50218
6. 地质灾害危险性评估规程GB/T40112
7. 地质灾害工程勘察规范GB/T32864
8. 泥石流灾害防治工程勘察规范DZ/T0220
9. 滑坡崩塌泥石流灾害调查规范 (1:5000) DZ/T0261
10. 建设工程地质勘察与取样技术规范JC/T
11. 水利水电工程地质勘察规范GB50487
12. 铁路工程地质勘察规范TB10012
13. 公路工程地质勘察规范JTGC20
14. 崩塌防治工程勘察规范T/CAGHP011.....

地质灾害防治设计相关技术规范:

1. 建筑边坡工程技术规范GB50330
2. 建筑地基基础设计规范GB50007
3. 混凝土结构设计规范GB50010
4. 建筑抗震设计规范GB50011
5. 预应力混凝土管桩 夹肋桩连接规范GB/T14470
6. 滑坡防治工程设计与施工技术规范DZ/T0219
7. 注浆工程设计规范GB50286
8. 锚杆设计技术规范GB50863
9. 土体合成材料应用技术规范GB50290
10. 桩外加剂应用技术规范GB50119
11. 建筑地基技术规范/GJ94
12. 水工建筑物荷载设计规范DL5077
13. 混凝土中立坝设计规范D5108
14. 水利水电工程设计洪水计算规范SL44
15. 碾压式土石坝设计规范SL274
16. 坡面防护工程设计与施工规范T/CAGHP027.....

地质灾害防治施工标准:

1. 工程测量规范GB50026
2. 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范GB50086
3. 混凝土结构工程施工规范GB50666
4. 砌体结构工程施工规范GB50204
5. 土体合成材料应用技术规范GB 50290
6. 桩外加剂应用技术规范GB 50119
7. 碾压安全规程GB6722
8. 滑坡防治工程设计与施工技术规范DZ/T0219
9. 水利水电工程地质勘察规范DL/T5083
10. 土料支护技术规范GB5055
11. 建筑地基处理技术规范JGJ180
12. 钢筋机械连接技术规范JGJ107
13. 混凝土配合比设计规程JGJ55
14. 建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范JGJ130
15. 地质灾害治理工程施工组织设计规范T/CAGHP020
16. ...

地质灾害治理工程验收标准:

1. 土方与爆破工程施工及验收规范GBJ 201
2. 建筑地基基础工程施工质量验收规范GB50202
3. 砌体结构工程施工质量验收规范GB50203
4. 混凝土结构工程施工质量验收规范GB50204
5. 混凝土强度检验评定标准GB107
6. 建筑工程施工质量验收统一标准GB50300
7. 钢筋焊接及验收规程JGJ18
8. 普通混凝土用砂 石质量及检验方法标准/GJ52
9. 建筑基桩检测技术规范JGJ106
10. 给水排水管道工程施工及验收规范GB 50268
11. 公路工程施工监理规范JTGF80
12. 铁路混凝土工程施工质量验收标准TB10751
13. 地质灾害治理工程治理后评定标准 T/CAGHP054.....



勘查重点

勘查基本任务：

1. 查明地质灾害体的特征及其形成的地质环境、自然演化过程或人为诱发因素，即查明勘查的对象是什么的问题。
2. 分析研究地质灾害体的成因机制，建立其地质概念模型和地质力学模型，即解决为什么的问题。
3. 预测致灾体的发展趋势，评价其发展趋势，即回答未来怎么样的问题。

质量保障——掌握工作要点

治理工程勘查要点（上游关键）：

1. 工作范围——科学合理的勘查范围
2. 进场勘查——绘图、剖面测绘、地灾要素查找，工作程度要注意
3. 方案确定——合理布设勘查工程（点、线）和手段（钻探、物探等）
4. 规范——钻探和编录、取样
5. 多方法——科学合理查找不利结构面
6. 形成勘查结论
7. 及时分析施工反馈情况
8. 资料归档要及时



设计重点

质量保障——掌握工作要点

治理工程设计关注要点：

1. 设计理念——安全经济美观协调，度的掌握，经济与安全的考量，措施手段的选择，要考虑可行性和可操作性；
2. 现场复核——设计到现场，熟悉勘查结论，要对勘查成果或结论进行复核；
3. 地方需求与方案合理性；
4. 标准化的制图，完整准确用图表达；
5. 计算方法与岩土参数合理性，明确工后稳定性；
6. 参加技术交底、技术指导。关键环节和工序要求，施工反馈及设计变更，动态设计，参加地质验槽。

74



施工重点关注

质量保障——掌握工作要点

治理工程施工单位关注要点:

规范管理、文明施工

- 1.人员到位要重视,规章制度要制定,施工组织方案要可行;
- 2.按照规定和合同约定,不得违法转包分包;
- 3.开工报告、设计交底、工程联系单、施工日志、各类施工表格填写和签名、印章等台帐资料要齐全完整;分部分项验收、隐蔽工程验收、设计变更、材料检测、监测工作、过程照片影像等资料要齐全;
- 4.对治理的地质灾害体要熟悉了解,熟悉设计交底,严格按设计施工信息化施工,并根据施工情况及时反馈变化情况,加强几方沟通协调;
- 5.施工过程中的监测,地质灾害体安全稳定和施工安全措施;
- 6.告示牌、责任牌、警示牌等要齐全。



监理重点

质量保障——掌握工作要点

治理工程监理单位关注要点:

- 1.监理人员要现场到位;旁站监理记录、监理日志等要记录规范完整;
- 2.不能有只管盖章签字,项目质量靠施工单位自己把控的思想;要定好位;
- 3.监理通知单、整改工作联系单、暂停令等监理工作手段要发挥作用。分部分项验收、隐蔽工程验收、设计变更、材料检测、过程照片影像等资料要齐全;
- 4.加强几方合作沟通协调;

主要内容 CONTENTS



1

治理工程、在建工程注意事项

2

绿色勘查、设计与施工



①在建地质灾害治理工程注意事项



①在建地质灾害治理工程注意事项



①在建地质灾害治理工程注意事项



② 其他在建工程注意事项



③ 在建的交通、铁路、市政、水电、农业、旅游、矿山等项目注意事项

82



在建的交通、铁路、市政、水电、农业、旅游、矿山等项目注意事项



1999年9月4日，在建的施工工地工棚由于滑坡致使6人死亡14人受伤。

在建的交通、铁路、市政、水电、农业、旅游、矿山等项目注意事项



2016年5月8日凌晨5时左右，强降雨造成福建三明市泰宁县暴发大型泥石流，中国华电集团所属池潭水电厂扩建工程项目部办公楼和工地宿舍被埋。



在建的交通、铁路、市政、水电、农业、旅游、矿山等项目注意事项

83



2009年7月23日，四川甘孜州响水沟突发泥石流灾害，摧毁了省道211复线建设项目临时工棚186间，造成12人死亡、42人失踪。

在建的交通、铁路、市政、水电、农业、旅游、矿山等项目注意事项



2012年6月28日，凉山州一工地发生特大泥石流灾害，造成40人死亡和失踪。

在建的交通、铁路、市政、水电、农业、旅游、矿山等项目注意事项

2010年6月24日
甘孜州康定某电站
绕坝公路工地，因
强降雨诱发滑坡，
掩埋修建水电站和
绕坝公路项目的临
时施工营地工棚，
造成23名施工人员
死亡，7人受伤。



在建的交通、铁路、市政、水利、农业、旅游、矿山等项目注意事项

88

2020年8月17
日，绵阳某在建
高速公路施工区
九到十九标段遭
遇特大暴雨灾害，
造成10名施工人
员死亡，3人失
踪，1人重伤。



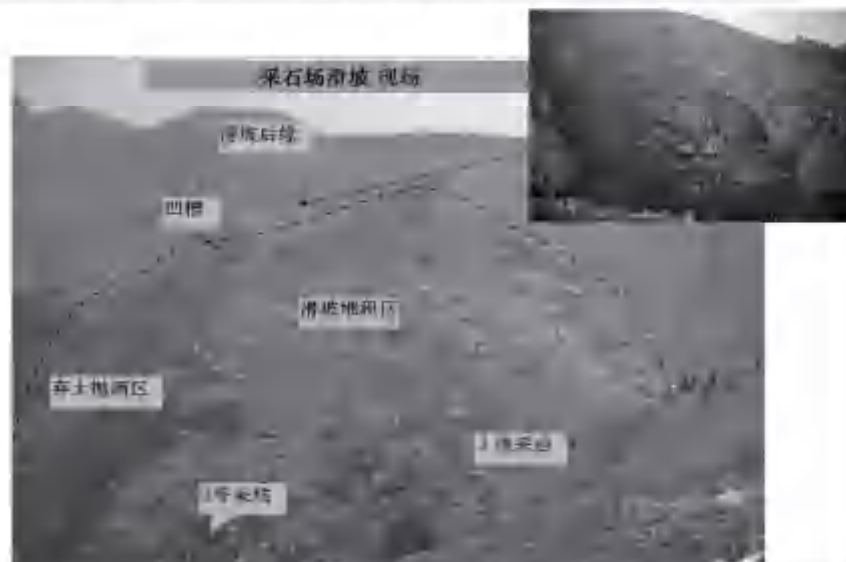
在建的交通、铁路、市政、水电、农业、旅游、矿山等项目注意事项

2021年9月25日，因短时强降雨引发山洪泥石流灾害，冲塌雅安市某水电站库区复建公路工程二标段工棚，造成施工人员7人死亡，7人失踪，2人受伤。



在建的交通、铁路、市政、水利、农业、旅游、矿山等项目注意事项

2010年4月7日13时40分左右，峨眉山市一采石场发生基岩顺层高位、高速山体滑坡，共造成14人死亡和失踪、8辆装载车及1辆挖掘机被掩埋。



④在建工程的几点启示

在建工程
隐患特点



- ① ➢ 工程对地质环境扰动强度大，工程引发或遭受地质灾害频率高。
- ② ➢ 施工营地的选择错误，对灾害链及其危险范围的估计不足。
- ③ ➢ 施工工地人员集中，灾害引发的群死群伤现象广。
- ④ ➢ 人员伤亡的主要区域为泥石流扇与崩塌滑坡堆积区。
- ⑤ ➢ 弃渣不规范堆放，极易导致次生地质灾害。

⑤汛期地质灾害防范重点

- 近来年的年度浙江省地质灾害防治方案提出的防范重点：山区人口集聚区、交通沿线、旅游景区和低丘缓坡开发区是地质灾害重点防范区域；已知地质灾害隐患点，已划定的地质灾害风险防范区，在建地质灾害治理工程以及地质灾害易发区内在建工程，农村房前屋后高陡边坡和小流域沟谷等是地质灾害重点防范地段。
- 目前，截止4月底，省地矿综合监管系统中在建的地质灾害治理工程有342个，主要是利奇马、黑格比、烟花等台风引发的地质灾害点和几次局地强降雨引发的地灾点。汛期工程建设地质灾害防范重点要特别关注在建的高速高铁国省道改扩建、地村镇建设及民宿农家乐建设等。

汛期防范重点工作

- 全面落实“即查即治”制度，进一步加强在建地质灾害治理工程质量和安全生产管理，做好竣工治理工程的管理维护，强化监督检查，确保治理工程有效发挥作用。
- 明确职能职责划分，有关部门和施工建设单位切实履行各自汛期地质灾害和安全生产管理，强化日常检查，制定应急预案，寻找和识别隐患风险点，特别是施工工地工棚管理房等，绝不允许建在地质灾害危险区；建设在各建设单位上报在建工程的基础上，利用近期新老遥感卫片进行对比，以期发现有无新的变化情况。
- 特别要注意的是：地质灾害风险防范区的划定一般以人为本，以村庄为基本单元，针对在建工程施工项目特别是交通、水利水电等野外项目，未必在地质灾害风险防范区内，所以自然资源主管部门要加强针对地质灾害重点防治区的监管，重点指导和督查建设施工单位施工工地特别是工棚遭受地质灾害的危险性，负责指导监督铁路沿线。

其他 遥感影像对比



主要内容 CONTENTS



2

绿色勘查、设计与施工

一、绿色治理

绿色治理工程

基本概念

通过运用高效、环保的方法、技术、工艺和设备等，减少或避免对生态环境造成的不良影响，并对环境扰动进行修复，实现地灾勘查、治理与生态环境保护和谐的治理模式。

基本原则

1. 地质灾害治理全过程中坚持生态环境保护理念，推动绿色发展，促进人与自然和谐。
2. 采用先进适用的技术工艺、设备、方法开展地质勘查工作，有效减少对生态环境影响的程度、范围及持续时间。
3. 针对工作区植被覆盖情况、自然恢复能力等自然地理环境差异情况，采用适宜的修复手段，设计方案、施工组织设计和环境保护、生态恢复措施，分区实施绿色治理工作。

基本要求

治理工程实施前，应就工作部署对水、大气、声、土壤、野生动植物、自然遗迹和人文遗迹等的环境影响进行分析，确定主要的环境影响因素，制定环境保护、环境修复措施，编制经费预算，作为绿色勘查或施工的内容体现在设计中，可以单独成章，也可以融入到相关章节。

绿色治理

场地选择

1. 项目驻地宜优先就近租用当地民居或公共建筑物。新建项目驻地，应综合考虑安全、卫生、生态环境保护等因素，选择在基础稳定，周边无污染源，排水良好，无地质灾害及洪涝安全隐患，对环境影有较小的区域进行建设。
2. 勘查钻探。施工场地的选择：应优先避开耕地和林地。场地平整范围应满足安全施工、表土堆放的需要。减少开挖量，力求挖填平衡，控制场地占用面积。
3. 草地、林地等植被覆盖较多的场地被征用：开挖前对扰动范围内的草皮按适宜的厚度、形状和大小进行人工剥离，并保留足够的护根腐植土。剥离的草皮采用平铺、叠置或支架架空等方式存放于底部铺有腐植土的临时存贮场，并适时进行浇水养护；能移植的林木植被，应移植用于复绿。
4. 耕地、园地等有作物覆盖的场地被征用时：耕作层、覆土层及适宜复垦的壤土层，应集中收集存放管理，作为恢复复土。

绿色治理

生态环境修复

1. 清理：及时撤除施工场地和项目驻地的设备、不再使用的临建房屋及水电管线等各项设施，清理干净场地内的土石、固体废物及垃圾，按相关要求进行分类处置。
2. 复原：恢复至方案中环境修复措施设定的场地平面标高，尽可能与周边自然环境相协调。除复绿的地段，应满足复垦复绿的要求，场地平整不应产生新的侵蚀和压占破坏。对采用浇筑混凝土等方式进行硬化的临时道路，应对混凝土进行拆除和清运（并控建筑垃圾进行处理），并采取深翻、松土、覆土等方式进行地形地貌恢复；对能满足当地经济社会发展的需要道路，经与当地居民协商可不复原。
3. 复垦：耕地、园地复垦采用深翻、松土及覆土换填等方法对耕地进行复垦，复垦后耕地坡度和有效土层厚度及土壤质量应满足当地农作物耕种条件，并移交土地使用者自行耕作及管理。
4. 复绿：移植的林木应全部回植，未成活的进行补植。应将剥离的根系腐植土铺设在覆盖的表土后，再将剥离养护的植被依次紧铺平整复植。植被覆植后应当浇水养护，确保与开挖前状态一致，种植的草皮应确保成活。

绿色治理

垃圾处置

1 生活垃圾、建筑垃圾应分类收集，定期送往就近垃圾处理地；进行分类处理；远离公共垃圾处理地的厨余垃圾可就地掩埋；对有毒有害的垃圾应回收处置。自建厕所应远离水源，防止水环境污染。

2 油料存放和使用场地及易被油料、废浆、废水污染区域的地面和存储坑池、沟槽等地。应铺设防渗材料，厚度小于等于3m，预防施工油料及浆液泄漏污染；对废油、废液必须集中存放管理。可回收利用的按规定处置。

绿色施工的关键

- 总体上，地质灾害治理工程施工现场外观感较好。但也存在建筑垃圾乱堆放，钢丝铁钉木条等乱丢，植被破坏和山体裸露面等未全面复绿，水土流失现象明显等环境问题，需要在今后规范中予以加强现场的绿色施工问题。
- 在绿色施工管理上加强组织管理、规划管理、实施管理、验收管理和评价管理等。
- 今后还应加强在设计中的环保、绿色生态理念和内容。

城市地质工作进展与展望

张达政

一、城市地质学内涵

对城市地质学的内涵界定，以往各国学者有不同的论述，一般概括为以下 3 种：一是界定为属于传统地质学的范畴，不是独立的学科，而是各种地质工作在城市和城市化地区的应用；二是界定为工程地质学的分支，应称为城市工程地质学；三是界定为环境地质学的分支，称为城市环境地质学。但是，随着城市地质工作和技术的进步，城市地质学已发展成为一门独立的分支科学，这个界定已经成为事实，也被各国学者所接受，并对城市地质学主要任务和内容进行了阐述。

主要任务：应用地质科学的理论和方法，以城市地区的地质结构为主要研究对象，将所获得的地质资料和认识，应用于城市的规划、建设和管理，其实质是地质科学和地质学家直接参与城市的规划、建设和管理工作，为城市发展与控制提供可靠的科学依据。

工作内容：包括土地的合理利用、城市供水水源地的勘查和利用、区域地质环境安全性评价、城市矿产资源开发利用与论证、城市地质环境质量综合评价与环境保护以及城市地质环境监测等。

综上所述：**城市地质学**是地球科学中综合性最强的领域之一，涵盖了部分工程地质学、环境地质学及土地管理学等，除此之外还有传统的地层学、构造地质学、岩土力学、水文地质学等。

城市地质工作是在城市及其周围地区或潜在城市化地区的特定空间范围内，综合考虑各种地质要素，研究其对城市发展所提供的资源、所施加的约束条件以及城市发展对其产生的影响，为城市规划、建设和管理服务的地质工作。（资料综合来源：孙培善.城市地质工作概论 [M]. 北京：地质出版社；吕敦玉等：国外城市地质工作进展与趋势及其对我国的启示）

二、国外城市地质工作历史与现状

据联合国经济和社会事务部《2018 年世界城镇化展望》报告：城市发展突飞猛进，全球城镇化率已达 55%，亚洲进步最快，到 2050 年会到达 68%。城镇化的发展，大力推动全世界的城市地质工作。

（一）城市地质工作发展阶段

城市地质活动最早开始于 19 世纪末，德国开展了特殊地质填图，形成了为城市规划服务的土壤图集；二战后，欧洲、北美等国家城市地质活动显著增加，多以大比例尺城市地质填图为主，用于指导城市规划和建设。

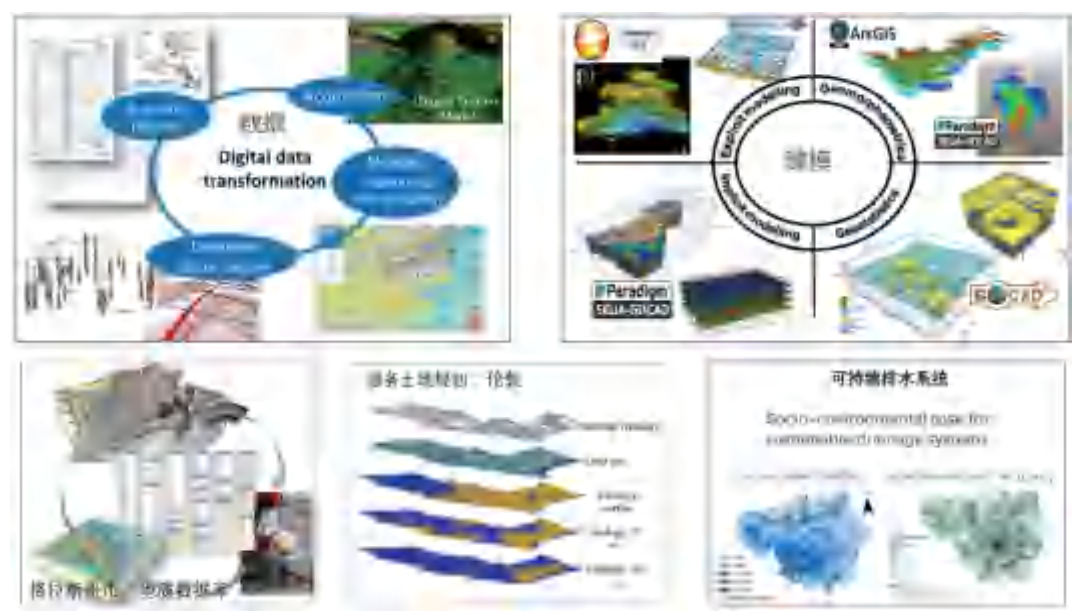
20 世纪 60-70 年代，美国、欧洲各国分别开展了城市地质数据、城市地质信息定量描述和预

测人类活动对城市发展的影响方面相关研究，逐渐发展创立了城市地质学科。20 世纪 80 年代，城市地质迅速受到社会普遍关注，工作典型特征为自动化技术在填图中的应用。与此同时，发展中国家特别是亚太地区纷纷启动城市地质相关研究工作。20 世纪 90 年代开始，城市地质工作进入新的发展时期，以促进城市社会、经济、环境可持续发展的任务目标进一步明确，工作方法也有所创新。

进入 21 世纪，城市地质工作进一步聚焦城市可持续发展，在供水、能源、交通和基础设施以及灾害风险等领域提供地质数据。同时，随着技术的改进和模型模拟技术的发展，在不断增加的三维数据流中加入地质因素。2013 年-2017 年，为了进一步加强对城市地下空间环境的了解，促进地下空间更好地融入城市可持续发展，欧洲多国基于欧洲科学技术合作协会 COST (European cooperation in science-and-Technology)，开展了名为“Sub-Urban”的联合研究。该研究共涉及欧洲十二座城市，重点探讨了基于生态地质、历史保护、产业转型、城市更新等不同视角下的地下空间发展思路、路径及解决方案，探索三维可视化新技术在地下空间科学预测和规划决策中的运用，以期拓展城市空间发展维度，提升城市综合竞争力。

(二) 典型国家城市地质工作现状

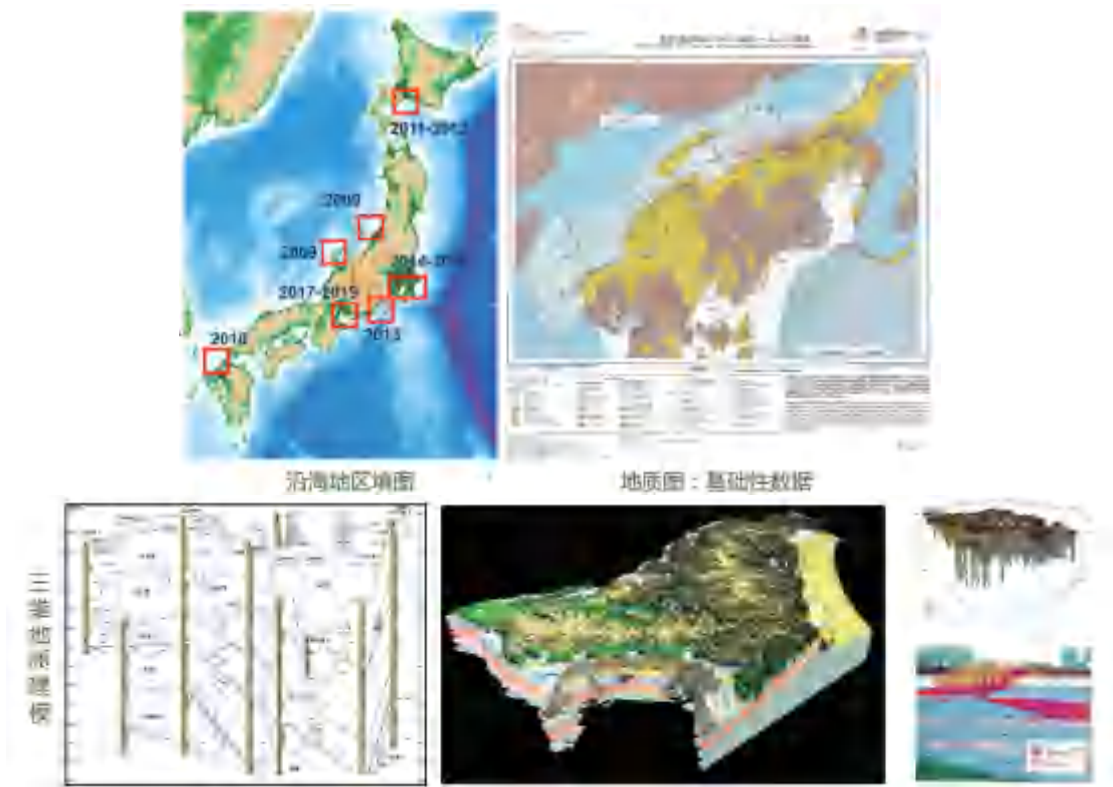
1. 英国。英国的城市地质工作历史悠久，目前，主要是利用水文地质学、工程、数据管理系统、3D 建模、遥感、地质学等专业技术为城市提供服务，如为曼彻斯特、卡迪夫、伦敦和格拉斯哥等城市提供了大量科学技术服务。



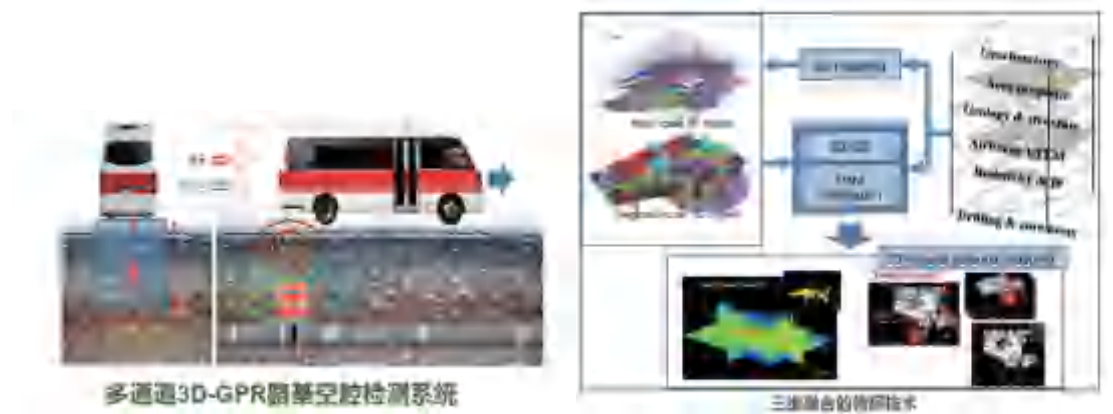
2. 芬兰。芬兰注重土地规划的专业技术人员共同合作，保障城市建设的安全。在城市地下水和水文地质循环方面，关注降雨、地表径流、入渗和地下水流动过程之间相互作用的三维建模以及耦合模拟。在城市物探方面，开展了基于构造和岩石 3D 和 4D 地球物理约束的地下 BIM 基础设施和地质的三维耦合建模。开展了建筑垃圾再利用与工业垃圾在基础设施建设中的应用城市地

球化学研究。

3. 日本。日本的大城市和基础设施主要位于沿海地区。城市地质工作主要目标是解决防灾、地下水利用和地下水污染等问题。日本在城市地区的地质研究活动主要包括活动断层研究、地下地质三维地质填图和地下水研究。



4. 韩国。韩国的城市地质工作聚焦于利用地质环境技术对城市地质灾害进行预测，保护和改善城市环境的可持续发展。基于 ICT（信息通讯技术）的滑坡预警系统、三维融合的物探技术、城市地区第四系三维地质建模与地质图编制、多通道 3D-GPR 路基空腔检测系统、基于 4D 模型的城市地质环境评价与利用技术等。



三、中国城市地质工作进程与现状

（一）国内城市地质工作进程

国内大力度推进城市地质工作始于 21 世纪初。2004 年-2009 年，完成了 6 个城市三维地质调查试点，2004 年-2011 年，完成了 306 个城市地质环境摸底调查，2009 年-局省市合作推进 28 个城市三维地质调查，2010 年-，推进城市群综合地质调查，2014 年-重点服务支撑规划综合调查等。

总体上，城市地质工作发展经历了“查条件和结构的 1.0 时代”、“推进地质信息化的 2.0 时代”，当前正处于“以全要素调查为手段，支撑服务多元化的 3.0 时代”。

（二）国内典型城市地质工作重点

香港城市地质工作十分关注城市地下三维地质模型，服务城市地下空间开发利用与规划；北京城市地质调查对重大地质问题开展论证，为北京城市副中心规划建设服务；雄安城市地质调查以关注基础地质条件和地热资源等为重点，支撑服务雄安新区总体规划；成都城市地质调查重点是地下空间调查，支撑服务成都市地下空间开发利用；广州城市地质调查重点关注大湾区绿色生态农业发展、清洁能源产业发展、用水安全、旅游产业发展和提升防灾减灾能力，支撑服务广州市规划建设与绿色发展；承德城市地质调查重点关注水文地质、土地质量调查和资源环境承载力评价，支撑服务承德生态文明示范区建设。这些城市地质工作为城市建设、发展、生态文明建设提供了基础服务。

（三）浙江省城市地质工作进展

上世纪 80 年代开始，浙江省相继实施了杭州、宁波、温州、湖州、舟山等中心城市的 14 幅 1:5 万图幅水工环地质调查；2002~2007 年，先后开展了温州、义乌、绍兴、江山、金华等中小城市地质调查工作；2006~2008 年，中国地质调查局部署开展 11 个设区市主要城市环境地质问题调查评价工作，分析了地质资源和地质环境问题；2009 年，完成部省合作杭州城市地质调查，对三维地质结构、岩溶地质、地下空间资源开发利用适宜性等方面进行了综合研究；2012~2016 年，在杭州湾南岸、宁波、嘉兴、台州等开展 1:5 万环境地质调查 18 幅，完成海洋示范区嘉兴、台州、舟山等城市地质调查；2018 年至今，深化实施杭州、宁波、温州等城市地质调查，切实为城市发展规划和空间管控决策支撑。

（四）加强城市地质工作的指导意见

2017 年，国土资源部出台了《关于加强城市地质工作的指导意见》（国土资发〔2017〕104 号），开启中国城市地质工作向更精准服务和更广泛应用转变。

总体目标：到 2025 年，实现地级以上城市地质工作全覆盖；建立系统完备的地下空间资源开发利用管理制度；基本构建地质工作与新型城镇化发展深度融合的体制机制；地质工作服务保障更加有力，创新引领作用更加凸显。

坚持问题目标双导向，针对城市发展当前面临的空间不足、环境污染、交通拥堵、城市安全等大城市病问题统筹部署四项重点任务，探索建立三大制度。

四项重点任务：一是全面加强城市地质基础工作，二是主动服务城市开发建设，三是积极推动地质资源绿色开发利用，四是健全完善城市地质安全监测预警体系。

建立三大制度：建立地下空间资源统一规划与用途管制制度，坚持以城市地质调查成果为基础，统一规划地下空间资源开发利用。完善土地出让和矿业权出让合同管理制度，落实城市地质工作要求，推进地下空间、资源的合理开发利用。依托地下空间资源监测大数据平台，建立规划执行、合同履行和空间资源环境监测监管制度。

虽然我国城市地质工作在一步一个台阶基础上推进，尤其是指导意见的出台，让城市地质工作进一步明确了需求和方向。但仍然存在以下几方面的短板：一是城市地质调查工作理念认识需加强，难以适应新型城镇化战略、城市发展要求；二是城市地质信息精度低、更新慢，难以满足城市规划建设管理、国土空间规划、重大工程服务需求；三是未形成标准化产品体系，成果服务难于融入城市行政管理主流程；四是数字化、可视化、智能化程度较低，不能适应数字化改革的需要。

四、城市地质工作面临的形势

（一）城市安全发展需要城市地质工作支撑

党的十九届五中全会关于《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》明确提出，推进以人为核心的新型城镇化，加强城市规划、建设、管理。完善城市化战略，使城市更健康、更安全、更宜居；关键要把人民生命安全和身体健康作为城市发展的基础目标；必须把生态和安全放在更加突出的位置。2018年以来，中共中央办公厅、国务院办公厅先后印发了《关于推进城市安全发展的意见》《关于推进以县城为重要载体的城镇化建设的意见》，浙江省委办公厅、省政府办公厅也印发了《关于深入推进城市安全发展的实施意见》，都对城市安全和城镇化建设提出明确要求。地质体作为城市安全发展的载体，地质安全必将是城市安全的重要组成部分。

（二）浙江城镇化快速发展需要加强城市地质工作

浙江省城镇化进程很快，2020年城镇化率已经达到70%以上，杭州更是超过了80%，大大超过了全球城镇化率55%，甚至超过了2050年68%的目标。城镇化的发展对城市地质工作提出了新的更高的要求，比如，据《2021中国城市地下空间发展蓝皮书》，杭州2020年在地下空间综合实力上排名第4，仅次于北京、上海和南京，而在地下空间建设指标上排名第1。但与此同时，在地下空间发生事故的区域和数量上，浙江在东部地区排名第二，仅次于山东，数量上有17起，排名全国第4位。说明在城镇化进程过程中，尤其是地下空间开发利用中，地质体具有的看不见、危险体、复杂体的特性，是城市治理的难点和痛点，要加强城市地质安全研究和防控。

（三）国外沿海城市针对城市地下空间挑战和应对为浙江提供了良好借鉴

COST（欧洲科技合作组织）高官委员会通过“Sub-Urban”计划，这个计划旨在提高对欧洲城

市地下空间和资源的认识，弥合城市地下空间地球科学专家与城市决策者、规划者之间的知识脱节，为城市规划提供全面有效的支撑，同时致力于将知识和实践推广到整个欧洲和全球。



北欧 12 个城市分别明确了地下空间面临的挑战，并提出了城市应对措施。比如挪威的奥斯陆地下空间面临的挑战是：地面沉降、砂土液化、地下有害气体等地质灾害因素，其主要应对措施是：正在不断收集分散在土地产权人和使用者手中的地下空间数据信息，以着手构建全域地质调查数据库。与此同时，为实现到 2030 年温室气体排放减少 95% 的发展目标，奥斯陆正大量投资地下空间建设，包括建设 4000 处浅层地热能资源井，构建地下电力网络系统和地下可再生能源运输体系，促进地下岩土资源的循环利用等。又如丹麦的欧登塞地下空间面临的挑战主要受地下水环境变化的影响。一方面，地下施工期间进行的降水处理可能会造成一些历史建筑木质桩基的腐烂和破坏；另一方面，由于欧登塞城内大部分地下水开采已经停止，城市范围内的地下水位在过去 25 年中急剧上升，一些地区地下水位已经上升了 12 米，造成一些地下建构筑物的浸泡和失稳。城市应对措施是正在针对地下水文地质环境进行三维模拟研究，探索地下空间开发利用与城市水资源调蓄之间的关系，其中还涉及地下历史文化遗产保护、地下工程建设稳定性等相关问题的研究。再如荷兰鹿特丹地下空间面临的挑战包括：运输隧道（地铁和道路）、污水处理及其他市政基础设施、地下管线、建筑地基和地下室、浅层和深层地热能利用设施、石油和天然气提取设施等。但由于鹿特丹城区的地下水位较高，其中地下潜水水位仅仅低于地面 1 米，地下 10-15 米左右分布着较为敏感的承压水隔水层，局部地区的地表标高甚至低于深层地下水的水头，导致地下水渗流常有发生。较高的地下水位给鹿特丹城市地下空间发展带来了诸多挑战，主要表现在以下几个方面：1）较高的地下水位容易影响城市道路的施工建设，并导致地下空间的积水。2）地下水位的下降则会导致历史建筑的木质地基氧化腐烂。3）非桩基建筑物的建设容易压缩地表与地下水位之间的距离，并导致地下水问题。4）工业/商业活动带来的地下水污染问题。城市应对措施主要是为了加强对地下水位及水质的有效监测与控制，保障地下历史遗存保护环境的稳定性，防范地面沉降、塌陷等一系列工程地质灾害风险，鹿特丹市非常重视地下空间数据平台的建设和信息整合工作。目前，鹿特丹市政府已经掌握了全市约 2000 多个地下水监测井的数据，并构建了一个大型的地表土层和含水层信息数据库，数据信息包括土壤成分、地面和地下水水质、地层活动情

况、地下挖掘情况、土壤调查和修复情况等，这些数据可以通过 GIS 平台进行查阅和共享。更深层的地下空间情况则可以通过石油公司钻井和地震监测数据获得。北欧针对城市地下空间开发利用面临的挑战和采取的措施都值得我们浙江沿海城市借鉴和学习。

五、浙江城市地质安全风险防控工作进展与安排

为了更好地适应城市地质工作新形势发展需求，按照城市地质工作向精准化、智能化服务的要求，新时代的城市地质工作要强化“四个更加”，即城市环境与安全协同发展要摆在更加重要的位置，城市风险防控要将责任落实到具体部门，城市部门协同联动要更加紧密结合，城市治理数字化改革要摆在更加紧迫的地位。

2021 年，为贯彻落实省委省政府关于坚决打赢“遏重大”攻坚战的决策部署，根据《浙江省城市运行安全专业委员会工作方案》《浙江省防范城市路面塌陷行动方案》等文件要求，省自然资源厅高度重视，重点聚焦城市地质本底安全，成立工作专班和技术专班，印发了《浙江省城市运行地质风险防控工作方案》，并认真组织实施；各市自然资源主管部门切实履职，以城市地质风险防控“一库一图、一网一模”建设为核心内容，强化数字赋能和解学决策，稳步推进城市地质风险防控工作。

（一）城市地质安全风险防控工作主要进展

主要体现在以下八个方面：

一是全面完成 114 个地面塌陷“案例库”编制，为地面塌陷形成机理、地质安全风险识别和防控提供科学依据。二是全面完成 5 个亚运举办城市地质安全风险“一张图”编制，为城市岩溶塌陷、采空塌陷和路面塌陷地质安全风险提供了防控靶区。三是全面完成沿海主要城市地面沉降风险图编制，完善地下水和地面沉降“监测网”建设，建立地面沉降风险管控长效机制。四是探索地质安全风险探测与监测预警，为防范区域地面沉降和地下空间开发利用地质安全风险提供决策依据。五是加强城市地质勘查资料汇交，推进城市“地质孪生模型”建设，打造省域空间治理数字化平台三维地质数据底座。六是加强数字赋能，推进城市地质安全风险与“地灾智治”场景融合，开展“城乡一体化”地质安全风险防控。七是发挥地质物探优势，及时应对突发塌陷事故调查处置，为城市地面塌陷做好地质技术支撑。八是加强科学研究，扩大与高校科研机构合作，推进城市地质安全实验室筹建。

（二）下一步工作安排

在 2021 年工作基础上，省自然资源厅、省建设厅等多部门将联合印发《进一步加强城市地质安全风险防控工作的意见》，以此为抓手，全面推进我省城市地质安全风险防控工作。

1. 指导思想

以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，牢固树立安全发展理念，坚持“人民至上、生命至上”，强化城市地质工作的基础性和先行性作用，统筹运用数字化思维、认知和技术，全面推

进城市地质安全风险防控工作，提升城市安全韧性，为实现高质量发展建设共同富裕示范区和推进以县城为重要载体的城镇化建设提供地质安全保障。

2. 基本原则

——以人为本，预防为主。牢固树立以人民为中心的发展思想，始终把保障人民群众生命安全放在第一位，将风险防控挺在隐患前面，强化事前预防，减少隐患发生。

——尊重规律，基础先行。充分认识地质环境的复杂性、差异性和动态性，遵循自然规律和地质规律，按照地球系统科学理论，坚持调查先行，统筹推进全省城市地质调查，不断提升城市地质调查水平。

——部门协同，联防联控。坚持系统观念，统筹推进城市地上、地下一体化地质安全风险管控，加强城市规划、建设和运行各行业之间联动，建立健全部门协同工作机制，共同推进城市地质安全风险联防联控。

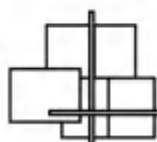
——科技创新，数字赋能。以科技创新为引领，强化数字赋能，推进城市地质安全风险防控理论、技术方法和应用管理等科学研究，加快城市地质安全风险防控数字化改革，提升城市地质安全风险防控智能化水平。

3. 主要目标。

聚焦城镇开发边界范围内的地面塌陷和地面沉降风险，以及不良地质作用产生的其他地质安全风险，到 2025 年，完成设区市及试点县（市）多要素城市地质调查和地质安全风险图编制，并构建三维地质模型；全省地下水、地面沉降监测网络进一步完善，城市地质安全风险预警能力进一步提升；建成城市地质安全风险防控场景，建立城市地质安全风险联防联控机制。

4. 主要任务

主要任务按照进一步加强城市地质安全风险识别、进一步强化地质安全风险监测预警、进一步加强地质安全风险防控、加快推进城市地质数字化改革等四大方面，细化了（1）持续推进城市地质调查，摸清地质安全风险底数。（2）进一步推进三维地质建模，提高地质安全风险识别精度。（3）加强识别成果共享，完善地质安全风险评价指标体系。（4）构建风险监测感知“一张网”，提升监测网覆盖程度和控制精度。（5）加强监测数据分析研判，开展城市安全风险预警。（6）加强规划源头预防，规避地质安全风险。（7）强化建设期控制，防范地质安全风险。（8）加强运行期管理，监控地质安全风险。（9）加快城市地质数据库建设，夯实省域空间治理数字化平台地质底座。（10）加快城市地质安全风险防控子场景建设，发挥实战实效作用。（11）推进数据高质量供给，促进数据高质量发展等 11 项具体任务和牵头单位等。并从加强组织领导、加强实施保障和加强宣传教育等 3 方面提出了具体保障措施。这将为浙江 2025 年之前全面开展城市地质安全风险防控工作提供政策依据，也为浙江开展城市地质安全风险防控工作继续走在先行提供保障。

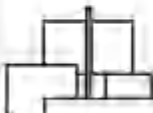


隧道地质超前预报技术

一、地质超前预报的提出

隧道是修筑在岩体、土体或水底的，两端有出入口的，供车辆、行人、水流、及管线等通过的通道。

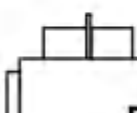
包括交通运输方面的铁路、道路、水（海）底隧道和各种水工隧洞。



隧道设计与施工之前，要对拟建隧道工程地段的工程地质条件进行详细勘察；

但由于岩体的复杂性，使得勘察所获得的资料与隧道开挖后实际揭露出来的情况可能会有较大的出入。

地质超前预报的提出



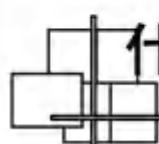
由于对掌子面前方地质条件了解不清，隧道施工就带有很大盲目性，施工中经常出现预料不到的塌方、冒顶、涌水等事故。

这些事故一旦发生，轻则影响工期，增加工程投资；重则砸毁机械设备，甚至造成人员伤亡，而且事故发生后的处理工作难度较大。

如何解决这一难题？

备受世界各国隧道工程界的关注！

隧道施工地质超前预报正是在这种情况下提出的。

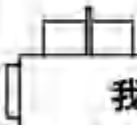


什么是隧道超前地质预报

?!

隧道超前地质预报：就是利用一定的技术和手段收集隧道所在岩体的有关资料，并运用相应的理论和规律对这些资料进行分析、研究，从而对施工掌子面前方岩体情况或成灾可能性做出预报。





我国目前正在进行的大规模的基础设施建设中，包括有大量的铁路、公路、引水等隧道（隧洞）建设，其中有不少隧道处在复杂岩性、构造、高地应力地区，有些地区甚至被专家称为“地质博物馆”。

在我国隧道施工中由于对施工前方地质条件的不了解造成的隧道坍塌、突水等事故时有发生。

因此普遍在隧道施工中采用地质超前预报技术，特别是采用国际先进的地质超前预报技术（TSP等）对提高我国隧道施工技术水平大有裨益。



二、隧洞施工中的主要地质灾害

2.1 突（涌）水、突泥

隧洞内的突（涌）水一般均发生在岩溶地区，赋存有丰富的地下水，由岩溶裂隙、溶洞、地下暗河构成地下水的运移网络。

在隧洞开挖过程中将遇突水及突泥现象，且具有水压力大、突发性的特点。

岩溶突水一直被认为是世界性的难题。

我国境内岩溶分布广泛，约占国土面积的1/3。

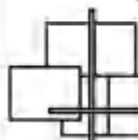
随着技术的进步和交通事业的加速发展，在岩溶地区修建的隧道工程将会越来越多

表 1 我国部分隧道及矿山水文地质灾害一览表

Table 1 The hydrogeology disasters of tunnels and mining areas in China

工程名称	围岩岩性	地下水类型	最大突水量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
大瑶山铁路隧道	灰岩	岩溶水	0.05
南岭 + 207 断裂		岩溶水(断层导水、涌泥)	0.03
铁路 + 269 断裂	灰岩	岩溶水(断层导水)	0.12
隧道 + 745 管道		岩溶管道水(连续三次涌泥)	0.06
武隆铁路隧道	灰岩	岩溶水(地下暗河)	16.2
山东坊子煤矿	片麻岩	基岩裂隙水	0.22
山东淄博大井	灰岩	岩溶水	7.38
山东新博煤矿		断层导水	0.44
开滦范各庄	灰岩	岩溶水	34.22
平顶山九矿	灰岩	岩溶水	1.17
国营 711 钼矿		基岩裂隙水	1.24~1.36
锦屏二级水电站	大理岩	岩溶水	4.91
天生桥二级电站	灰岩	岩溶水	3.00

宜万铁路隧道突水事故



■位于巴东县野三关镇的大山深处，全长3.65公里，所处山体岩溶发达、水系丰富，地质结构异常复杂，是沪蓉西高速公路最为艰难的关键控制性施工项目。

野三关隧道 8.5 突水突泥及整治

2007年8月4日晚，野三关隧道出口I线DK124+602掌子面爆破、排险后正常出碴，5日凌晨0:57分，出碴接近尾声时，装载机司机突然发现掌子面后右侧向上涌水，随即撤离出井报警。

之后，突发大规模突水突泥，峰值涌水量30万方/小时，持续30分钟后稳定，总突水量15.1万方，突泥石5.35万方。

突水点附近约200m被块石、泥沙充满；
距突水点500m处淤积泥沙厚度约3米。

2004年5月31日，齐岳山隧道平导施工至PDK361+870处，采用超前炮眼孔进行超前探测时，探孔中射出高压水，射程5m，单孔涌水量60方/小时。

随后加强探测：前方发育充水溶槽，溶槽由左上向右下发育，最大宽度12m。测试水压力为0.26MPa，预测涌水量为3000方/小时。



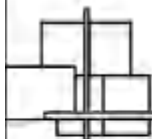
云雾山隧道DK245+617溶腔突水突泥后进洞观察照片

云雾山隧道“617、526溶腔”突水涌砂：2008年7月21日，隧道出口DK245+645超前探孔时发生突水涌砂，瞬间涌水量达780方/小时，涌砂约1000方，涌水造成I线淹井1035m，II线淹井710m。

8月26日完成抽水及清砂。

9月6日，10#横通道超前探孔时又发生突水涌砂，再次造成淹井。

10月12日，隧道进口II线遭遇HDK245+526溶腔，溶腔内充填泥砂，探测期间突出泥砂约250方，涌水量约为90方/小时。



马鹿箐隧道“978溶腔”突水突泥：2006年1月21日，马鹿箐隧道出口平导反坡施工到PDK255+978时，发生突水突泥。平导施工人员立即逃生。

突水经横通道涌入正洞，使正洞作业人员遇难。突水时最大涌水量为30万方/小时，持续7小时后，涌水量稳定为300方/小时。

锦屏二级水电站长探洞内曾发生瞬时涌水量大于等于0.1 m³/s 的突水突泥点10处，最大突水点的最大瞬时涌水量达4.91 m³/s，造成施工设备被淹，严重影响施工工期。

武隆铁路隧道施工过程中遭遇到三条地下暗河，最大平均涌水量达16.2 m³/s，冲毁路基及洞口。

这些涌水点除具有突发性的特点外，其涌水初期均携带有大量砂粘土，造成洞内淤积。且大多隧洞施工过程中所出现的涌水现象，已引起一定的环境地质问题。

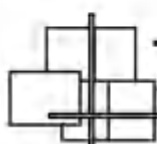
圓梁山隧道是渝怀铁路线上最长的隧道，全长 11.068 km，为已建和在建铁路隧道中施工难度最大的工程之一。

该隧道穿越高压富水的毛坝向斜、桐麻岭背斜和冷水河浅埋段，地貌形态明显受地质构造控制，岩层具带状展布特征。

隧道穿越的可溶性灰岩地层总长约 7100 m，占隧道总长的 64 %。在隧道施工中，先后遇到了 5 个深埋充填型溶洞，充填介质为粉细砂、粉质黏性土和黏土等。

预估正常涌水量为 $9.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，最大涌水量为 $14.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，其中毛坝向斜存在两层承压水，承压水压力高达 4.4~4.6 MPa。

由于受高压、富水、岩溶等诱导因素的影响，多次发生突水事故，施工难度较大。



7•15 珠海隧道透水事故

- 2021年7月15日凌晨3:30左右，珠海市兴业快线（南段）项目石景山隧道施工段1.16公里位置发生透水事故。至7月22日12时17分，救援人员在事故现场发现并确认最后1名遇难者。至此，14名被困人员已全部找到并确认遇难。7月23日，国务院安全生产委员会发布《重大生产安全事故查处挂牌督办通知书》，决定对该起重大事故查处实行挂牌督办，10月，珠海石景山隧道透水事故调查报告发布，事故的直接原因是隧道下穿吉大水库时遭遇富水花岗岩风化深槽，因工程措施不当导致右线隧道掌子面拱顶坍塌透水，涌入左线隧道致作业人员溺亡，27人被问责。



宜万铁路隧道出口岩崩事故

2.2 围岩变形及破坏

(1) 较软弱岩、断层破碎带等由于自身的稳定能力低,其变形破坏则主要表现为大的变形位移和坍塌等。

(2) 高地应力和岩爆是我国西部工程的主要地质问题之一。

岩爆: 是洞内高地应力引起的岩石脆性破坏

形式: 有剥落、松脱、弹射、强烈弹射;

类型: 零星、成片、连续型;

等级: 有弱岩爆、中等岩爆、强岩爆等。

(3) 块状围岩的掉块、崩坍破坏：
主要是受到不同结构面相互组合所控制

2.3 特殊地质问题

(1) 高地温

地下工程若处在高地温梯度或地热异常区，
极可能遭遇高地温；

在各国修建深埋隧洞时，已有不少工点出现不同程度的热害。

(2) 有害气体

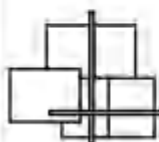
隧洞围岩中产生的有害气体主要为瓦斯
(主要为甲烷 CH_4)、 H_2S 和
施工引起的 CO 、 CO_2 、粉尘等。

特殊地质问题

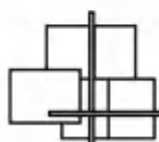
①内昆铁路线朱嘎隧道位于云贵高原的乌蒙山中, 有 240 m 高瓦斯煤系地层;

②意大利亚平宁隧道 (18.518 km) 曾发生4次瓦斯爆炸, 停工长达7个月;

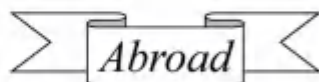
③锦屏二级水电站在施工过程中大理岩会产生 H_2S 气体, 含量较低, 一般不会构成对人员的伤害。



对施工过程中产生的有害气体或有害物质,通过监测、试验,并加强通风,控制有害气体和粉尘含量,满足生产要求。



三、研究历史



隧道施工超前地质预报是隧道施工地质工作最主要的任务。

1972年8月在美国芝加哥召开了快速掘进与隧道工程会议,在迄今为止的十几次的类似会议中,隧道施工超前地质预报一直受到重视。

上世纪80年代世界各国都将这类问题列为重点研究课题。



我国自上世纪80年代在大瑶山隧道、南岭隧道、军都山隧道和其它一些隧道的施工中，才开始其研究和试验工作。

我国铁道部第一勘测设计院是较早研究隧道地震超前预报的单位，其物探队提出了“负视速度方法”。



四 超前地质预报内容

隧道施工超前地质预报主要包括：

地层岩性、褶皱、断层、岩脉、破碎带、长大节理、地下水状况、地应力状况、岩性和围岩类别等。

预报的重点：

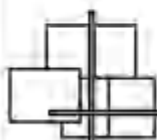
是断层、岩脉、破碎带、溶洞、暗河及其它不良地质体在掌子面前方的出露位置和对施工的影响。

五、预报分类

超前地质预报包括：

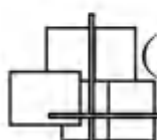
- ➡ 隧道所在地区地质分析与宏观预报
- ➡ 隧道洞身不良地质体及灾害地质超前预报
- ➡ 重大施工地质灾害临警预报





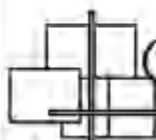
(1) 地区地质分析与宏观地质预报

- 预报开挖面前方的围岩级别、稳定性，随时提出修改设计，调整支护类型；
- 预报洞内涌水量大小和变化规律以及对环境地质与工程的影响。



(2) 不良地质及灾害地质超前预报

- 预报掌子面前方岩性变化和不良地质体的范围、规模、性质，以及突水、突泥、坍塌、岩爆、有害气体等灾害地质的发生概率，提出施工预防措施。
- 预报断层的位置、宽度、产状、性质、破碎带物质状态、充水情况、稳定程度等，提出施工对策。



(3) 重大施工地质灾害临警预报

重大施工地质灾害临警预报：针对掌子面前方有可能引发的大规模突水、突泥、坍塌、冒落、变形、瓦斯爆炸等重大地质灾害建立临警预报系统。

主要预报：隧道洞身所通过的深大富水断裂、富水向斜的核部、富水砂层、软土、极软岩、煤系地层等，评判其危害程度，提出施工方案对策。



六、超前地质预报方法

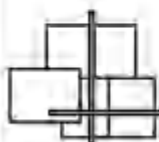
目前常见的地质超前预报方法可归为两类：
一类属破坏法，另一类属非破坏法。

破坏法是指用破坏的方法凿开隧道直接取样，它包括超前平行导坑法和超前水平钻孔法。

非破坏法也就是物理方法，利用岩石的物理性质来判别，它包括有声测法、电测法和波反射法。波反射法也可以分为雷达电磁波反射法和地震波反射法。

- 也可分为直接法和间接法。
- 直接方法：就是通常所说的地质法和钻探法。
- 例如在隧道勘测设计阶段，对隧道沿线进行地质调查，观察地表岩层露头，钻孔勘探，从而获得地质信息，作为隧道预设计的依据。
- 在开挖过程中，采用地质跟踪调查推断法，通过观测已开挖的围岩状况，进行地质描述，做出施工记录，推断前方围岩状况，或进行超前钻探，即在掌子面进行钻孔取芯，直接获得前方短距离地质信息。

- 间接法：就是使用地球物理技术进行勘探，亦称为物探法。
- 目前，国内外采用的物探预报方法主要有：
 - 地面电测深法
 - 地面浅层地震法
 - 地震反射波预报法（包括TSP、TRT等）
 - 洞内地质雷达法
 - 洞内瞬变电磁法
 - 数值模拟分析等。



6.1 地质法

地质法是指用地质锤、放大镜和地质罗盘等野外地质工具直接观察岩石的岩性,并判断周围的岩性。

通过收集分析地质资料,地表详细调查,隧道内地质编录、素描、数码照相、超前风钻、涌水量预测等方法,了解隧道所处地段的地质条件,运用地质学理论,对比、论证、推断,预报特长隧道施工前方的工程地质、水文地质情况。



地表调查及掌子面地质编录法

通过地表地质调查方法,可以补充一些图纸中遗漏或忽视的地质构造,校核原设计图中的地质构造的位置、产状和规模;

通过地质界面、地质体投射技术求得其穿过隧道的位置、规模等,从而对整座隧道的工程地质状况有一个宏观的把握,并确定预报的重点区段。

隧道施工掌子面地质素描是超前地质预报技术中最基本的一种方法,可根据掌子面的地质变化趋势来推测前方地质情况。

隧道掌子面地质素描的内容包括:

①掌子面的地层岩性描述,包括岩石类别、颜色、矿物成分等;

②地质结构及构造描述;

③节理裂隙发育及分布情况,包括节理裂隙发育组数、性质、形态、密度及延伸长度等;

④结构面的性质、产状等;

⑤地下水情况,包括地下水类型、涌出形式及流量等;

⑥工作面的地质展示图等。

涌水量动态变化的长期观测

通过对洞内掌子面涌水量动态变化的长期观测记录,掌握地下水初期涌水量、衰减涌水量和稳定涌水量的变化规律,综合分析地层、断层等构造以及基岩裂隙水的运动特点,查明地下水的补给、径流及排泄途径,预报未开挖段水文地质情况。

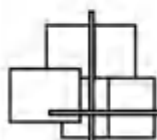
对隧道开挖前涌水量的定量预测,往往与隧道开挖实际涌水量有一定的差距,应进行对比分析,总结经验,提高预报水平。



地质法

地质法有可靠的理论基础,不占或很少占用施工时间,适用性强,成本低,操作简便。

但靠有限之“见”预报范围很有限,特别是在地层岩性变化极为复杂(如强烈褶皱地层)的隧道中预报的难度很大。



6.2 超前导洞(坑)法

超前导洞(坑)法包括超前平行导洞(坑)法和超前正洞导洞(坑)法。



(1) 超前平行导洞(坑)法

超前平行导坑法是在隧道上导洞(坑)或隧道的附近开挖一平行的小断面导洞(坑),对导洞(坑)出露的地质情况进行地质编录、素描、做图,综合分析其地层岩性、地质构造、水文地质情况,根据地质理论预测相应段隧道的工程地质和水文地质条件,以及可能发生地质灾害的位置、性质、规模,并提出防治措施意见。

超前平行导洞(坑) 法

在超前平行导洞(坑) 中辅助以室内物理力学测试、现场点荷载测试、地应力测试、物探地震反射等方法, 可以完善地质超前预报的内容。

超前平行导洞(坑) 法

超前平行导洞(坑) 法最为直观, 精确度很高, 通过直观的地质情况, 施工单位可提前了解主隧道开挖断面的地质情况, 以便采取相应的工程防护措施。

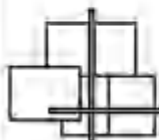
缺点是成本高, 对施工影响大, 且隧道与导洞(坑) 间距过大、地层变化复杂时准确率明显降低, 因此适用于设计间距较小、地层受构造变动小的平行隧道工程。



(2) 超前正洞导洞(坑)法

超前正洞导洞(坑)法:先沿隧道正洞轴线开挖小导洞(坑),探明前方的地质情况,再将导洞(坑)扩为隧道断面。

在国外,在一些特殊地段为了探明地质情况往往不惜花费高昂代价,甚至利用正洞导洞(坑)来进行超前地质预报;但在国内采用正洞导坑法的并不多见,北京八达岭高速公路隧道部分地段的施工过程中采用了超前正洞导洞(坑)法。



6.3 超前水平钻孔法

超前水平钻孔法是用钻探设备向掌子面前方钻探，从而直接揭示隧道掌子面前方地层岩性、构造、地下水、岩溶洞穴充填物及其性质、岩石（体）的可钻性、岩体完整程度等资料，还可通过岩芯试验获得岩石强度等定量指标，是最直接有效的地质超前预报方法。（一孔之见）



DDW-150型水平钻机

超前水平钻孔法

- 目前国内这种方法主要应用于水工隧道工程中，国外已经较为普遍，英吉利海峡隧道、日本青函海底隧道更是大量采用了超前水平钻孔进行施工期地质超前预报。

超前水平钻孔法一次钻探距离短，费用高，且占用施工时间长。超前水平钻孔的方向控制和钻探工艺有一定的技术难度，对施工干扰大。

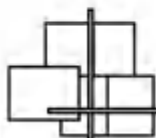


HL518B水平定向钻机



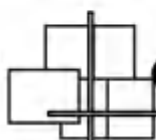
JS8030水平定向钻机





6.4 波反射法

波反射法常见的有地质雷达法和TSP隧道地震波法

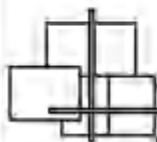


(1) 地质雷达

Ground Penetrating Radar (GPR)

地质雷达属于电磁波探测技术,电磁波通过天线发射,遇到不同阻抗介面时,将产生反射波和透射波。

接收机利用分时采样原理和数据组合方式,把天线接收的信号转化为数字信号,主机系统再将数字信号转化为模拟信号或彩色线迹信号,并以时间剖面的形式显示出来。



地质雷达 (GPR)

地质雷达法是根据物体相对介电常数而产生电磁波的反射和折射（相对介电常数（**relative permittivity**），表征介质材料的介电性质或极化性质的物理参数。其值等于以预测材料为介质与以真空为介质制成的同尺寸电容器电容量之比，该值也是材料贮电能力的表征）。

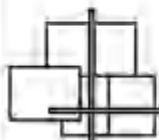


地质超前预报地质雷达

其分辨率高、无损伤、探测和数据处理速度快、机动灵活、操作方便、抗干扰能力强，可对隧道一定范围内进行全方位探测。

但预报距离较短，只能预报掌子面前方40-50m 处的工程地质、水文地质条件，而较准确预报的距离只有十几米。





地质雷达 (GPR)

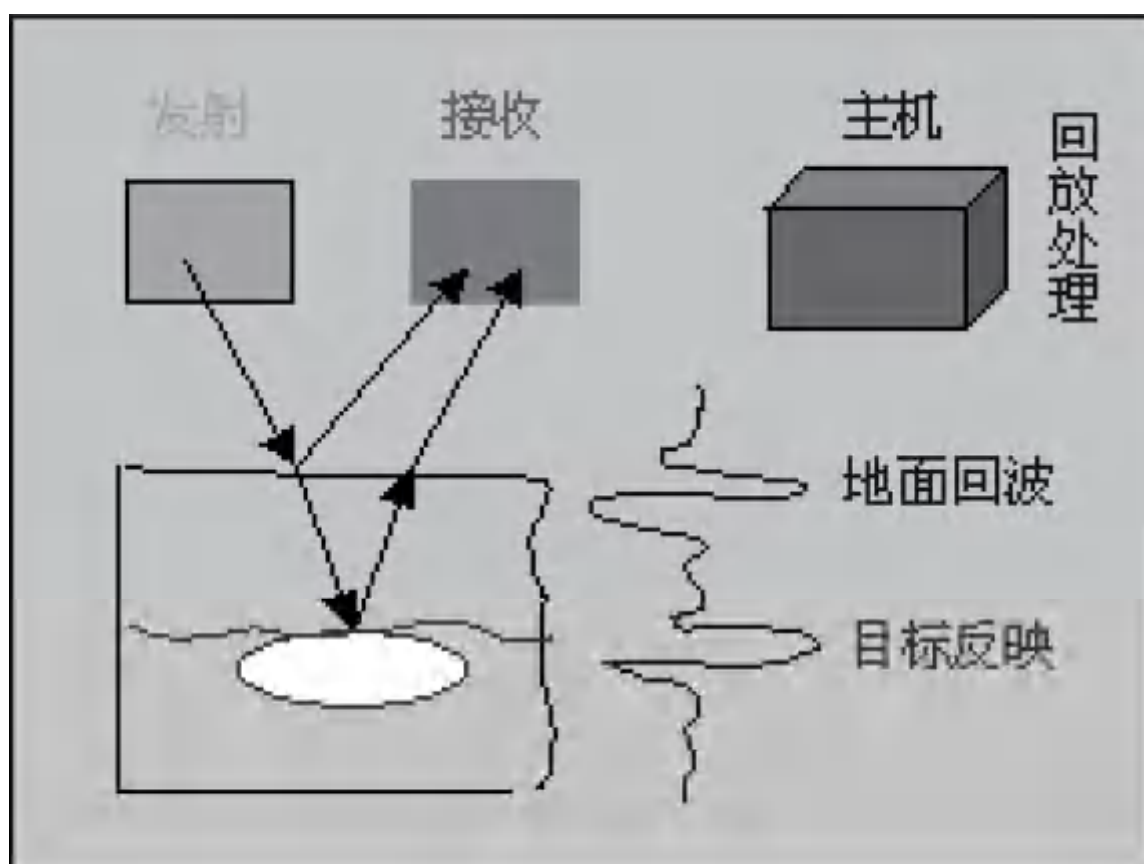
该方法主要是配合地震反射法,通过测定与岩溶含水性有关介电常数的变化来探测充水地质体,如含水的断层、岩性界面和溶洞等。

试验表明,采用地质雷达对隧底、边墙、隧顶外围岩的不良地质探测效果最好,在超前平导中应用可对正洞起到超前预报的作用。

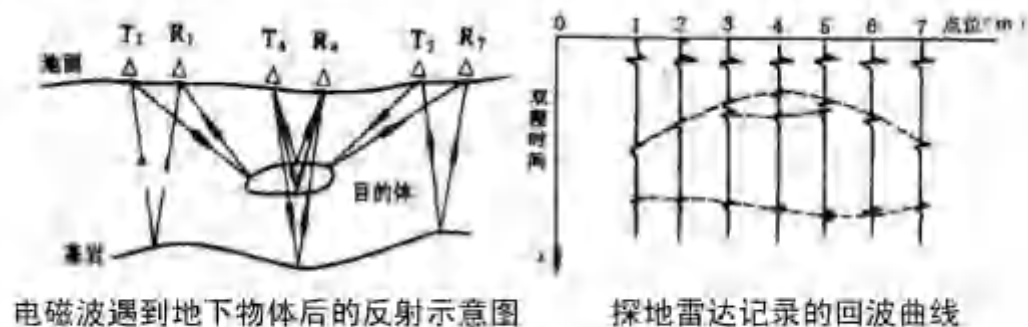


地质雷达 (GPR)

- 地质雷达主要由纳秒或亚纳秒脉冲源,宽带脉冲天线,取样示波器和信号处理部分组成。
- 其工作原理是,宽带脉冲发射天线将纳秒高压脉冲源提供的电脉冲信号转化为脉冲电磁场,并以脉冲电磁波形式射向目标。宽带脉冲接收天线将来自目标体的反射脉冲电磁波转化为电脉冲信号传送给宽带取样示波器后以时域方式显示出来。或再经计算机处理后给出时域、频域特性显示。



在计算机中对信号依照幅度大小进行编码，并以伪彩色电平图/灰色电平图或波形堆积图的方式显示出来，经事后处理，可用来判断地下目标的深度、大小和方位等特性参数。



$$t = \sqrt{4H^2 + X^2} / V$$

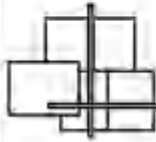
一般的, 当 $x \ll z$, 也即天线距远小于探测目标深度时, 天线距就可以忽略, 上述脉冲波的行程方程就简化为:

$$t = 2H / v$$

常见介质的 ϵ_r 和 μ_r

介质	相对介电常数 ϵ_r	电磁波速度V (m/ns)
水	81	0.033
空气	1	0.3
煤	4—5	0.13—0.15
石灰岩	7(6)	0.11(0.12)
土壤(干)	4(3—5)	0.15(0.13—0.18)
土壤(含水20%)	10(4—40)	0.095(0.05—0.15)
砂岩	4	0.15

地质雷达方法原理

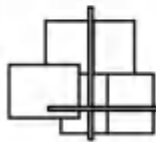


电磁波的反射系数

电磁波在传播过程中，遇到不同的阻抗界面时将产生反射波和透射波，其反射与透射遵循反射与透射定律。反射波能量大小取决于反射系数R，反射系数的数学表达式：

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$

地质雷达方法原理



分辨率（分辨最小异常体的能力）

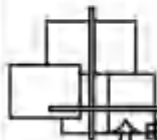
垂向分辨率：区分一个以上反射界面的能力

$$\text{四分之一波长：} B = \lambda/4 = v/4f$$

水平分辨率：在水平方向上所能分辨的最小异常体的尺寸

波的干涉原理，与第一菲涅尔带有关

$$D = \sqrt{\lambda h / 2}$$



地质雷达方法原理

介电常数9

频率 (MHz)	波长(m)	垂直分 辨率(m)	水平分辨率Rf(m)				
			埋深D=1m	埋深 D=2m	埋深 D=3m	埋深 D=4m	埋深 D=5m
400MHz	0.25	0.06	0.36	0.50	0.62	0.71	0.80
200MHz	0.50	0.13	0.50	0.71	0.86	1.00	1.12
100MHz	1.00	0.25	0.71	1.00	1.22	1.42	1.58
50MHz	2.00	0.50	1.00	1.42	1.74	2.00	2.24
1600MHz	0.06	0.02	0.18	0.26	0.30	0.36	0.40
900MHz	0.11	0.03	0.24	0.34	0.40	0.48	0.52



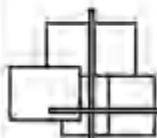
地质雷达方法原理

当地下介质中的波速V为已知时，可根据测得的走时t，由上式求得目标体的深度H。V值可根据如下公式计算：

$$V \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

C 电磁波在真空中传播的速度，也即光速（0.3m/ns）；
 ϵ_r 为地下介质的相对介电常数。

地质雷达探测方法



地质雷达探测的设计

每接受一个地质雷达探测任务需要对目的体特性与所处环境进行分析，以确定探地雷达测量能否取得预测效果。

(1)目的体深度是一个非常重要的问题。如果目的体深度超出雷达系统的有效探测深度，那么探地雷达方法就要被排除。

(2)目的体几何形态(尺寸与取向)必须尽可能了解清楚。目的体尺寸包括高度、长度与宽度。目的体的尺寸决定了雷达系统可能具有的分辨率，关系到天线中心频率的选用。如果目的体为非等轴状，则要搞清目的体走向、倾向与倾角，这些将关系到测网的布置。

地质雷达探测方法



时间窗参数设置

在开展地质雷达工作前，首先需要给出本次探测目标的深度范围。

例子1：假设隧道需要探测掌子面前方40米深范围内隐伏病害，先得判断该地区含水性如何，如果地层干燥。则参考下表选择基岩的近似相对介电常数为 ϵ_r 8.5左右，利用公式计算介质速度，

$$V \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

其中， c 为电磁波在真空中的速度（0.3m/ns）， ϵ_r 为介质相对介电常数。

地质雷达探测方法



如果把介电常数8.5带入到上式就可以计算介质的速度为0.103m/ns。40米需要走时为390ns，由于探地雷达为双程时间计算，双程时间是单程时间的2倍，因此探测前方长度40米需要最大时间延迟量为780ns。在780ns时间窗，有效深度在时间窗底部，这在处理解释上容易造成假象，为此需要增加约20%的时间窗富余量。因此在探测前方40米长度目标体，需要最大的延迟时间为 $780 \times (1+0.2) = 936\text{ns}$ 。

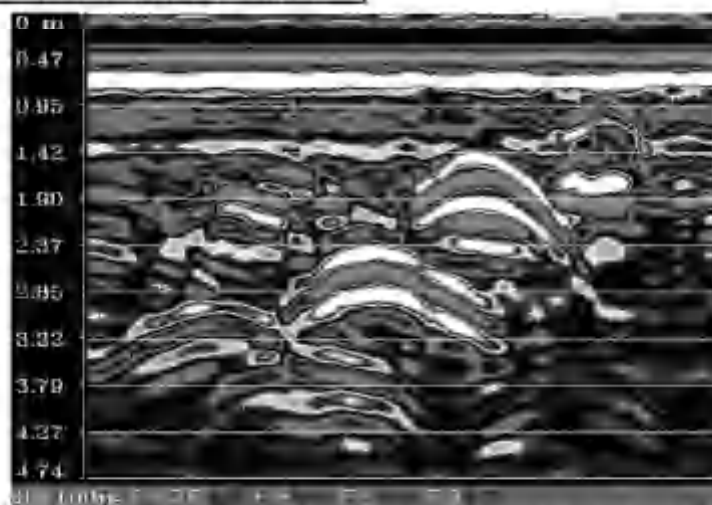
在探测掌子面前方40米目标体，需要设置940ns的时间窗才能达到较好的效果。

地质雷达数据处理及解释



常见特征图像解释

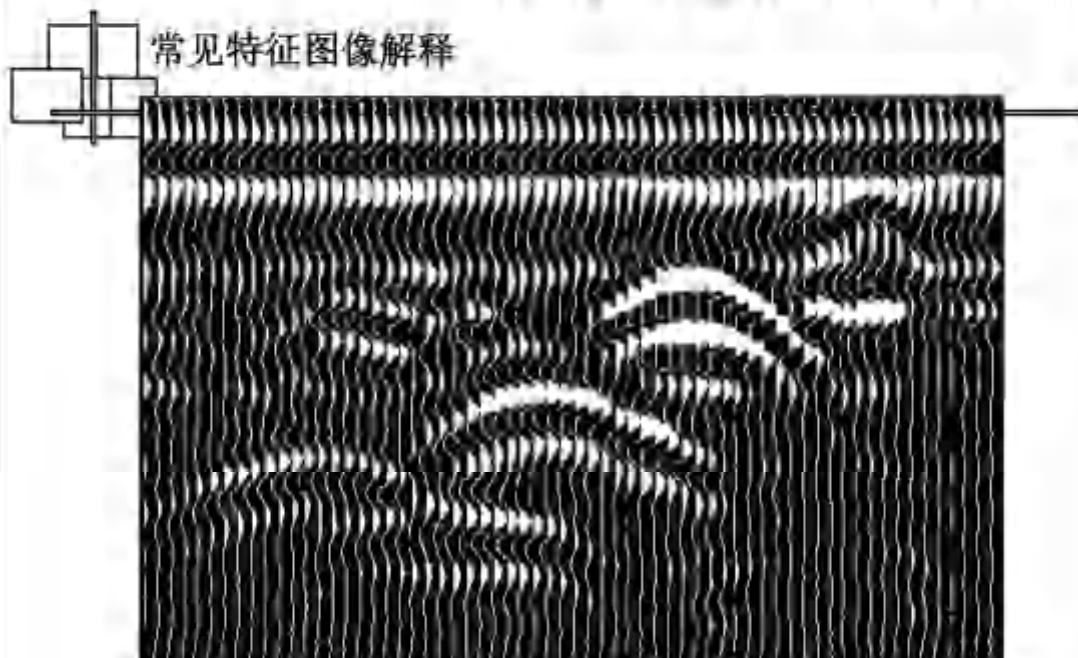
图谱1: 基岩洞穴的检测图象



说明：电磁波在基岩中传播过程中遇到空洞等异常，其强度和相位将有明显变化，典型显示为双曲线。

地质雷达数据处理及解释

常见特征图像解释

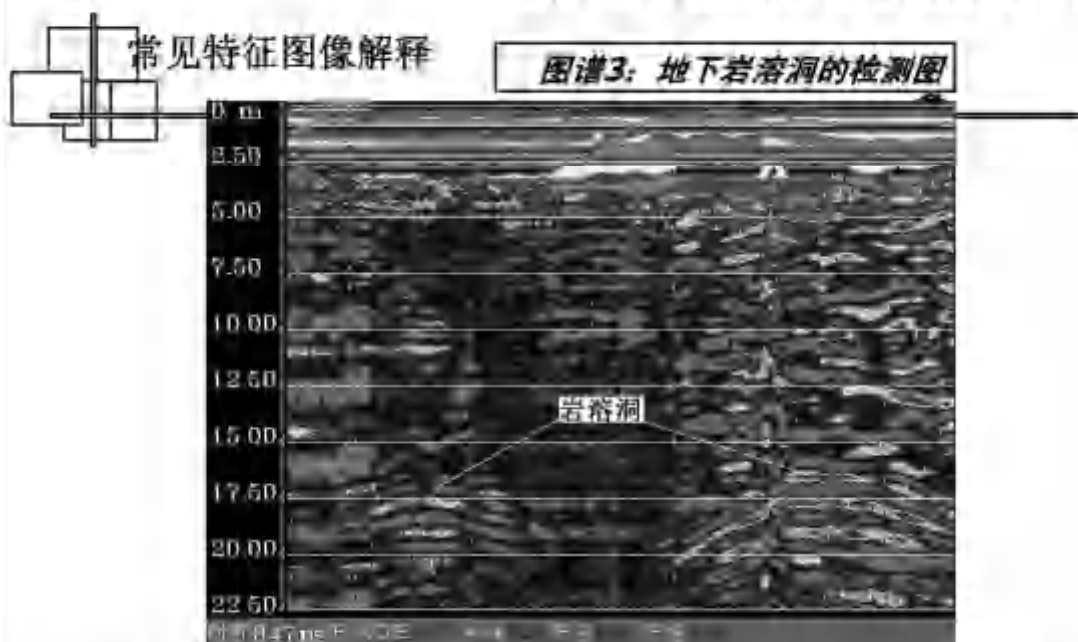


图谱2: 土洞群的波形堆积图象

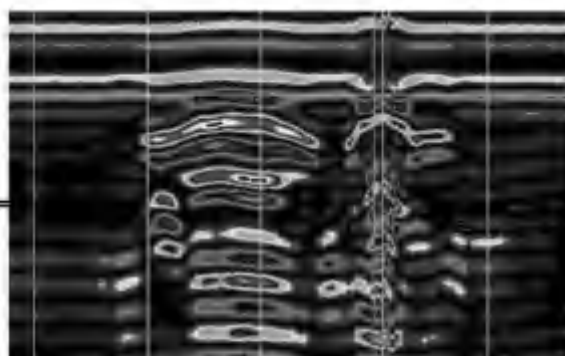
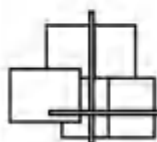
地质雷达数据处理及解释

常见特征图像解释

图谱3: 地下岩溶洞的检测图



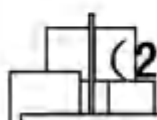
说明: 电磁波在地下的传播过程中遇到岩溶等异常, 其强度和相位将有明显变化, 典型显示为双曲线)。



公路下的脱空检测剖面



五孔小桥的探地雷达伪彩色图



(2) 隧道地震波超前预报

隧道地震波超前预报系统先由瑞士Amberg量测技术公司为隧道及地下工程施工期地质超前预报而研发的，具有适用范围广、预报距离长、时间短、对施工干扰小、费用少等优点。

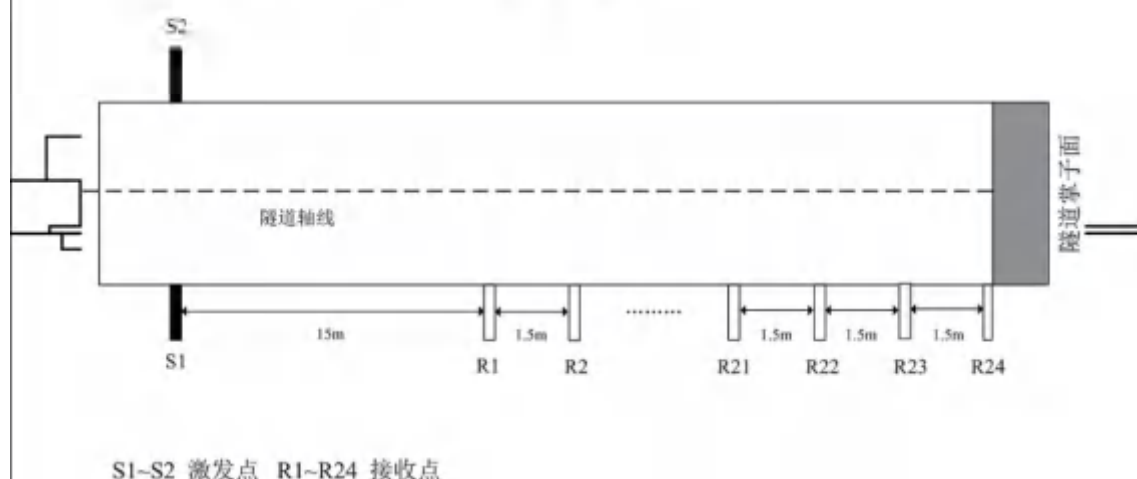
它的预报范围是地质雷达的4-10倍，预报费用是超前水平钻探的1/10—1/20。

TSP隧道地震波超前预报 Tunnel seismic Prediction (TSP)

首先在洞内指定的震源点用小量炸药激发,产生的地震波在岩石中以球面波的形式向前传播,当地震波遇到岩石物性界面(即波阻抗界面,如断层、岩石破碎带、岩性突变等)时,一部分地震信号反射回来,一部分地震信号透射进入前方介质,反射的地震信号将被多个三维高灵敏度的地震检波器接收。

通过对接收信号的运动学和动力学特征进行分析,可推断断层和岩石破碎带等不良地质体的位置、规模、产状及岩石动力参数。

TSP观测系统示意图



由于TSP有诸多优点，它的出现解决了工程界对超前预报的诸多难题，代表了当今世界隧道施工超前预报的最先进技术。

隧道地震波超前预报及TSP技术，已经列入我国《客运专线铁路隧道施工技术指南》TZ214-2005的第5.0.8条中。

TSP优点

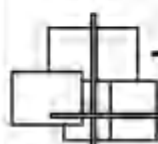
- (1) 适用范围广，即适用于极软岩至极硬岩的任何地质情况。
- (2) 预报距离长，理论上能预报掌子面前方500m，考虑地震波干扰等因素能准确预报掌子面前方100-350m
- (3) 对隧道施工干扰小，它只要求在接收信号时为减少噪音干扰作短暂停工。

TSP优点

(4) 探测时间短，一次完整的探测仅仅需要45分钟，加上探测前的准备工作和探测以后系统清除所用的时间也不过2小时，另外探测前的准备工作可以在施工的同时执行。

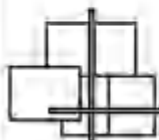
(5) 节约投资费用，据国外隧道施工经验估计，采用TSP 法比不进行预报节省费用是全部工程的15%。

(6) 提交资料及时，在现场采集数据的第二天即可提交正式成果报告。



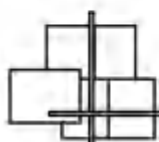
TST隧道超前地质预报

TST (Tunnel Seismic Tomography) 隧道超前地质预报是弹性波法的一种，采用空间阵列系统和速度扫描技术有效地解决了掌子面前方围岩速度分布问题，提高了构造定位精度；数据处理采用二维方向滤波可有效消除了上下、左右的侧向回波和面波干扰，有效解决了复杂地质条件下超前预报问题。



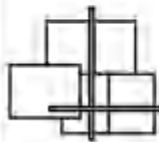
TST法

TST方法超前探测是通过地震波走时测量来确定围岩的波速与反射面位置的，隧道内激发的地震波向全空间传播，检波器接收到的地震回波来自整个空间，多种性质的波叠加在一起。TST技术采用波场分离技术能够有效提取前方回波，同时采用速度扫描技术和偏移成像原理，能准确确定掌子面前方围岩波速分布，保证超前预报的可靠性。



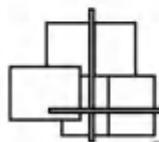
TST法

- TST技术具有探测距离远、分辨率高、解释直观等优点，一次预报能够获取掌子面前方100~150m范围内围岩速度及地质构造分布信息，目前已在国内外多条隧道中得到应用，探测效果显著

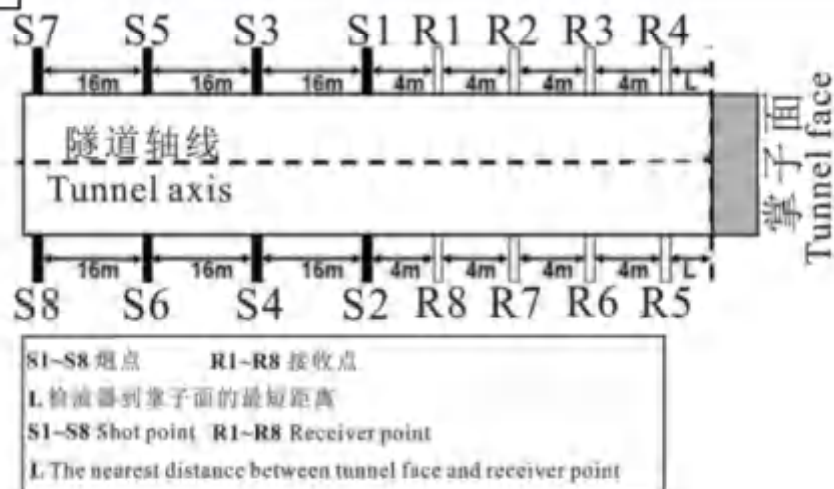


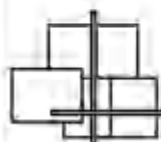
TST法

- 观测系统
- TST技术采用独创隧道双侧观测系统，其走时数据能同时确定围岩波速分布和界面位置，保证超前预报的准确性。数据采集现场布置如图所示，炮点和接收点均在隧道侧壁布置。



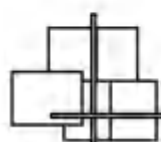
TST观测系统示意图





TST法

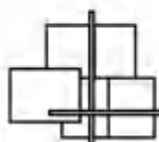
- 根据弹性纵波探测空间采样率要求，检波器间距应小于 $1/4$ 波长，为保证能够滤除侧向回波，排列长度应不小于一个波长。常见岩石纵波速度介于 $2000\sim 4000\text{m/s}$ ，中心频率选择 100Hz ，则波长介于 $20\sim 40\text{m}$ ，为达到空间阵列观测的目的，检波器间距应小于 5m ，排列长度一般为 $40\sim 60\text{m}$ 。一般的，道间距选择 4m ，炮间距为 16m ，采用小炸药量（约 100g/炮 ）激发，炮泥耦合和封堵，每放一炮八个检波器同时接收。



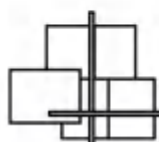
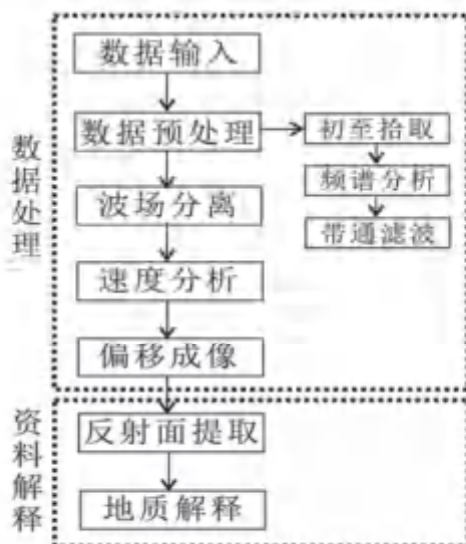
TST法

数据处理

由于隧道内检波器接收的是全空间地震波，地震波包括纵波、横波、面波及转换波等，超前地质预报仅需要从前方返回的地震波，因而首先需要进行波场分离，滤除直达波、面波、侧向回波等干扰波，波场分离后方可对前方回波进行速度分析和偏移成像。

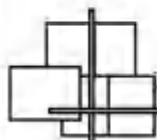


TST数据处理和解释流程图

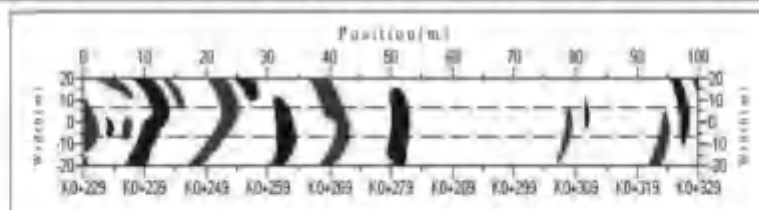


TST法

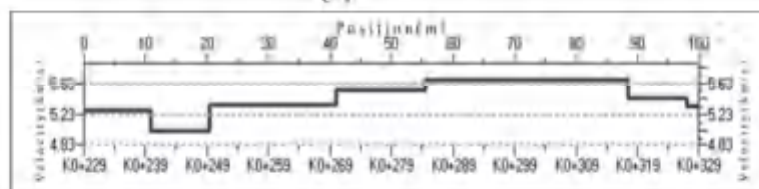
- 应用实例
- 木家隧道位于贵州省遵义市，隧道主体在灰岩发育区，该段隧道位于二叠系吴家坪组地层中，岩层多呈中厚层状，层间结合较差，节理裂隙泥钙质填充或无充填、结合较差，贯通性较好。



木家隧道TST超前地质预报地震偏移图像与波速分布图



(a)



(b)

(a) 地震偏移图像

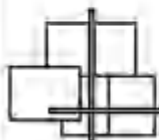
(b) 波速分布图像



TST法

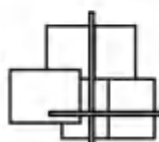


木家隧道K0+239~K0+279段断层破碎带现场照片



TST法

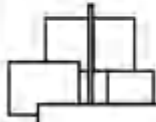
- 采用TST法进行隧道超前地质预报，预报里程为K0+229~K0+329。如图所示地震偏移成像和波速分布图，根据异常特征K0+229~K0+279段，地震偏移图像上表现为蓝红条带阻抗反射界面分布，且该段波速整体较低，推测为断层破碎带。
- 后期隧道施工开挖过程中，K0+239~K0+279段为泥质充填的断层破碎带，溶洞较发育，在隧道拱顶上部形成了较大规模的空腔。开挖地质情况与超前地质预报推断结果吻合较好，验证了方法的有效性。



6.5 声测法

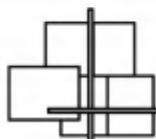
声测法是利用声波在岩石中的传播规律来判别岩石性质的一种方法。

它利用不同岩石(体)有不同的物理力学性质,因而声波传播速度亦有不同,因此可根据岩石(体)的声波传播速度判断围岩的工程力学情况,当岩石(体)的波速越高,则岩体越完整坚硬,岩体质量越好。



声测法占用施工时间短，但预报距离受孔深限制，一般小于15m。

由于该法施工麻烦，而且效果有限，因此实际应用中一般较少采用。



HSP 声波反射法

HSP声波反射法和地震波探测原理基本相同，它是建立在弹性波理论基础上的，传播过程遵循惠更斯-菲涅尔原理和费马原理。

其物理前提是岩体间或不同地质体间明显的声学特性差异。

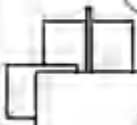
HSP 声波反射法

声波在岩土体中的传播速度和幅度等参数与岩土体的组成成分、密度、弹性模量及岩体的结构状态等有关。

当声波传播路径中存在两种不同固体介质的界面时, 波的传播将发生折射、反射和波型转换。声波由完整岩体传播至碎裂岩或土组成的破碎带时, 就是声波从低阻抗介质到高阻抗介质的典型情况。通过探测反射波信号, 根据不良地质体(带), 如断层、风化破碎带、岩溶洞穴、地下水富集带等, 与周边地质体的声学特性差异明显, 便可了解前方岩体的变化情况。

表 1 若干介质的密度、纵波速度和波阻抗
Table 1 Densities, longitudinal wave velocities
and wave impedances of some media

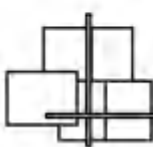
名称	密度 $\rho / (\text{g/cm}^3)$	纵波速度 $\alpha / (\text{m/s})$	波阻抗 $Z / (10^8 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s})$
空气	0.0013	330	0.04
水	0.98~1.01	1 430~1 590	14~16
碎石、干砂	1.4~2.2	300~1 000	2.8~16
湿砂	1.4~2.3	600~1 500	3.8~19
粘土	1.5~2.4	1 100~2 500	18~55
页岩	2.3~2.6	2 000~4 000	36~90
砂岩	2.1~2.8	2 000~4 500	42~112
泥页岩	2.0~2.7	2 000~3 500	70~110
灰岩	2.4~2.8	2 500~6 000	74~165
变质岩	2.4~3.2	3 000~6 500	75~210
花岗岩	2.4~3.1	3 000~6 500	100~200
玄武岩	2.7~3.3	3 000~7 500	100~250



HSP 声波反射法

HSP水平声波探测时,在掌子面或边墙一点发射低频声波信号,在另一点接收反射波信号,可以快速完成声波信号的采集,它具有不受工作面岩体条件限制、作业时间短等特点。

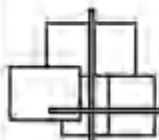
地质预报设备为中铁西南科学研究院研制的ZGS-系列(如ZGS16、ZGS1610、ZGS1610-2)智能工程声波检测仪及采集、分析软件系统。



6.6 电测法

电测法是根据岩石与电阻的关系来推断其性质的一种方法,分为电位法和电阻率法。

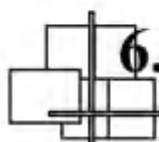
电测法简便、成本低,但必须是以各层间电阻值有一定的差别为前提。



6.7 红外探水法

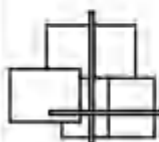
红外探水法: 地下水的活动会引起岩体红外辐射场强的变化, 探测掌子面或洞壁四周这种变化, 可以推测是否有隐伏的含水体。

该方法测量快速, 施工干扰小, 有较高的定性判别准确率, 但无法预报水量和含水体前方具体位置等定量指标。



6.8 现场测试法

- ① 钻速测试
- ② 压水试验
- ③ 地应力现场测量 (试)

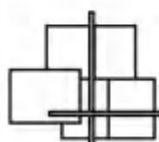


钻速测试

该法是让钻机在钻进过程中保持压力不变，测试钻进速度，根据钻进速度的不同来确定软弱层的位置。

优点：设备简单、操作简单、不占开挖时间。

缺点：在硬岩破碎带中钻速变化不大，预测效果不佳。

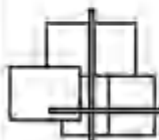


压水试验

该法是通过现场压水试验来测定岩体的单位吸水量，从而了解岩体的破碎情况和裂隙的充填情况。

优点：所需设备简单、操作方便；

缺点：测试时间较长。



地应力现场测量（试）

直接测量法是由测量仪器直接测量和记录各种应力量，并由这些应力量和原岩应力的相互关系，通过计算获得原岩应力值，在计算过程中并不涉及不同物理量的相互换算。

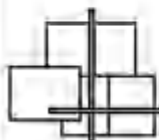
应用较广泛的有扁千斤顶法、水压致裂法、刚性包体应力计法和声发射法等。



地应力现场测量（试）

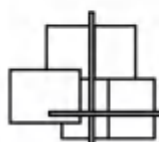
间接测量法不是直接测量应力量，而是借助传感元件或某些媒介，测量和记录岩体中某些与应力有关的间接物理量的变化，然后由测得的间接物理量的变化，通过已知的公式计算出岩体中的应力值。

目前国内外普遍采用的发展较为成熟的是套孔应力解除法。



6.8 数值模拟法

在隧道施工中，为了对隧道整体原始地应力状态以及二次应力场的发育分布规律进行宏观预测，常采用数值模拟的方法来进行反演分析和研究



七、超前地质预报的工作步骤

超前地质预报依据预报距离可分为：
长期（长距离）和
短期（短距离）两种预报形式。

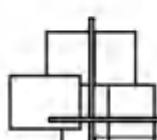


7.1 长期超前地质预报

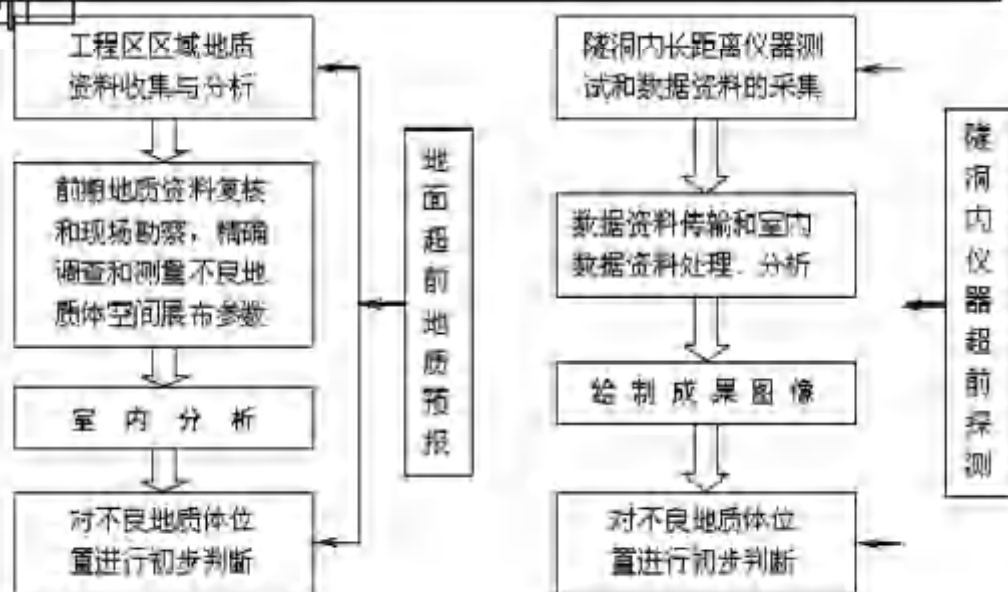
长期超前地质预报分为两个部分：

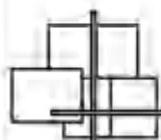
地面不良地质体预报勘察和隧洞内长距离仪器探测，它是由两种或两种以上的勘查技术手段和技术进行的综合预报。

长期超前地质预报分为两步进行。



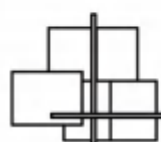
长期超前地质预报的步骤





地面超前地质预报工作方法

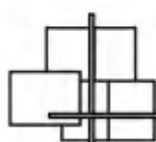
① 首先收集、整理工程区区域地质资料，结合地质调查进行资料分析，研究区域断裂发育规律，从而判断工程区优势断裂发育方向、规模及可能出现的地质灾害；



② 仔细分析前期地质资料，并进行现场复核和勘察，在地表准确鉴别不良地质体的性质、位置、岩体质量，精确调查和测量不良地质体空间展布参数；

③应用地面地质界面和地质体的延展规律及推算理论进行室内分析;

④依据前述的分析结果,对可能出现不良地质体的性质和位置进行初步预报。



7.2 短期超前地质预报

短期超前地质预报是在长期超前地质预报的基础上进行的,预报距离为掌子面前方15~50m。

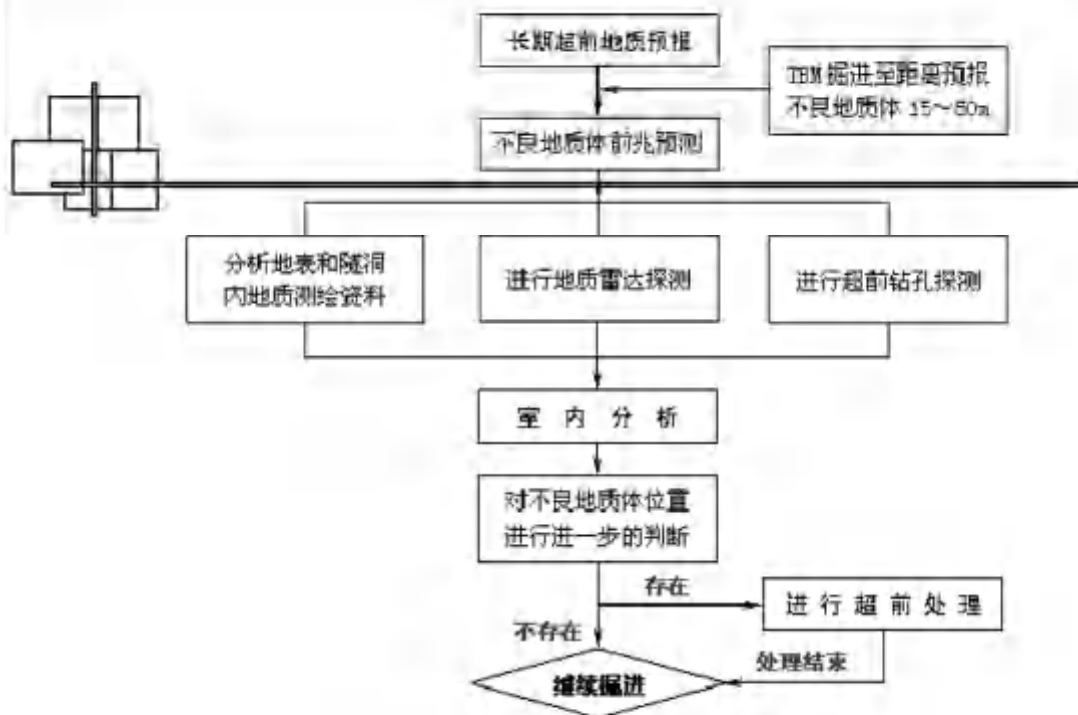
对于短期超前地质预报,主要是通过开挖石渣识别、掌子面地质素描,更重要的是采用地质雷达或超前钻孔进行探测。



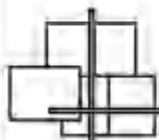
短期超前地质预报

开挖石渣识别、掌子面地质素描，是通过在不同地质体标志的确认，以及不良地质体出现前的前兆标志，对不良地质体可能出露的位置进行预测和判断，必要时辅助进行超前地质钻探；

地质雷达探测属于电磁波物探技术，通过电磁波的反射波和透射波的分时采集和数据组合分析，对不良地质体的类型、规模、位置进行预测。



短期超前地质预报的步骤



一般性超前地质预报是根据掘进的石渣（常规钻爆法还包括掌子面）、洞壁揭露的结构面及岩层与地表结构面及岩层的对应关系、以及揭露的不良地质体的特征，通过类比、推测预报掌子面前方是否存在不良地质体。

不良地质体在被揭露之前往往表现出一些明显或不明显前兆标志，这些标志的出现，预示着隧洞即将临近不良地质体，它们是超前地质预报的重要信息。

因此，仔细观察、描述开挖石渣、洞壁结构面及岩层形态、量测结构面及岩层特征参数，是正确进行超前地质预报的关键。



不良地质体的前兆标志:

①断层破碎带前兆标志:节理裂隙组数及密度剧增、岩石强度降低、出现压裂岩、碎裂岩、岩石风化相对强烈、泥质含量增加等。

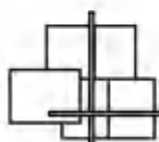
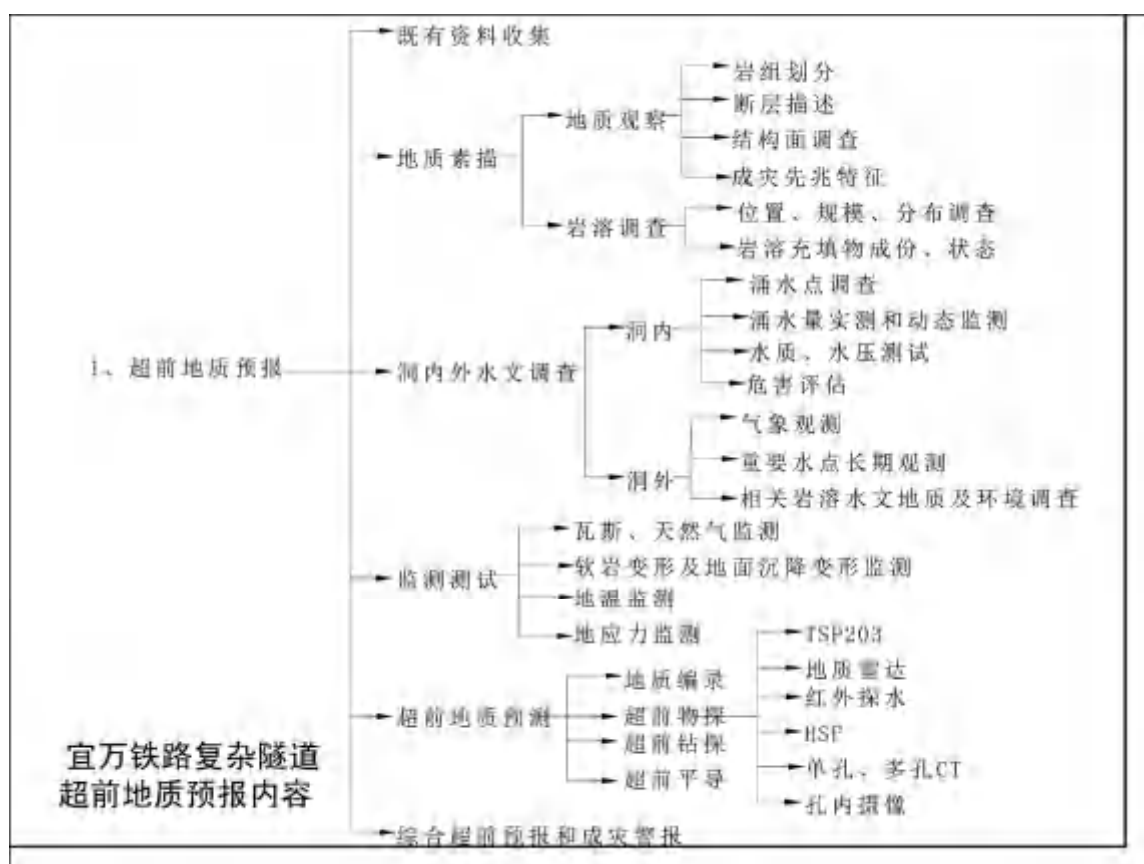
②突水、突泥前兆标志:节理裂隙渗水量和组数增加、且常常含有泥质物或浑浊(常规钻爆法的炮孔中的涌水量剧增、且夹有泥沙或碎石)等。

③岩爆前兆标志:“饼”状开挖石渣的数量增加、洞壁在短时间内出现“饼”状脱落体或出现“片邦”现象、以及轻微的岩石崩裂声等,严重时洞壁出现飞石。

短期超前地质预报的特点:

①由于短期预报是在长期预报的基础上进行的,所以,预报的精度一般要超过长期超前地质预报,特别是对不良地质体性质的预报。

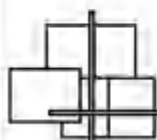
②短期超前地质预报针对性较强,一般不适合在隧洞全程进行,结合长期地质预报适时进行。



8 武广线隧道预测预报

(1) TSP（掌子面岩溶探测）

查断层破碎带、溶洞规模大于3米的岩溶异常等不良地质，适用于地质复杂隧道及长大隧道。按每次100m计算工作量

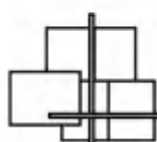


(2) 地质雷达（基底岩溶探测）

主要适用于规模较小的岩溶异常带，一般在隧底中心和两侧各布置一条测线。

地质雷达作连续测量。

主要在隧道仰拱施工前进行。



(3) 地质雷达（掌子面岩溶探测）

主要适用于规模较小的岩溶异常带，考虑到有效探测距离为20米，两次重复探测不小于5米。

主要在隧道施工过程中进行。按井字型或纵、横测线布置，按15米每次计。

(4) 地震反射波法（基底岩溶探测）

探测基底岩溶，主要适用于规模较大的岩溶异常带（一般在隧底中心和两侧各布置一条测线，间距宜为 1 米）。

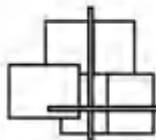
主要在隧道仰拱施工后进行。

(5) 红外探水

应用于长大复杂隧道可能产生涌水涌泥的地段，如断层带或岩溶富水带等。

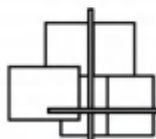
每天进行测量。

红外探水的有效探测距离一般小于10m，考虑每两次探测应重复5m。



(6) 超前水平钻探

- 单孔水平钻探（一般钻孔深度可达40~60米）
- 多孔水平钻探、多孔CT（按6孔计）
- 孔内数码成象



单孔水平钻探：一般浅埋地段、断层、岩溶段。

多孔水平钻探、多孔CT：对隧道工程影响较大的浅埋段、断层、岩溶、暗河、煤层、小煤窑等。

孔内数码成象：应用于长大复杂隧道的岩溶带、破碎带、断层带等。

杭州城市地质数据库及三维模型建设

蔡雄翔

第一章 前言

1.1 城市地质背景

城市地质安全工作是伴随城市化而产生的，是服务城市规划、建设和运营的一项基础性工作。

城市地质安全风险重点是地壳的安全、地面的安全和地球化学的安全；我国特大城市地质安全风险主要表现为区域地壳稳定性，涉及活动断裂（地震），地面塌陷等地质灾害，水土污染等方面。对于杭州来说，目前城市地质安全聚焦于路面塌陷、岩溶塌陷等地面安全方向。

1.2 城市地质安全风险案例

（1）地面塌陷

2020年6月30日上城区下沙路发生一起路面塌陷，导致整辆汽车掉进洞坑；

2019年8月28日拱墅区建国北路路面塌陷，房屋开裂。

地面塌陷的机理

（2）岩溶塌陷

1994年1月，陆军杭州疗养院工程抽水导致的塌陷事故，地表形成一个直径8.4m，深13.1m的塌陷坑；

1995年由于开采岩溶水造成浙江医院1号楼北侧路面坍塌，造成1人死亡的事故。

2021年3月21日富阳区金竺村发生一起岩溶塌陷，造成部分房屋损坏；

（3）浅层气

2007年8月，地铁1号线滨江段施工时曾发生浅层气喷发燃烧情况；

2019年10月，地铁5号线右线过江隧道盾构掘进过程中沼气溢出导致钱塘江面出现巨大漩涡。

1.3 城市主要地质风险

表 1-1 杭州主要城市地质安全风险

	地面塌陷	岩溶塌陷	地面沉降	浅层有害气体	高承压水头
产生原因	工程活动引发砂土流失、淤泥质土流变使得表层土体失稳	岩溶空洞存在，地下水变化，坑道突水、振动致塌等	地下水开采、欠固结土的压缩固结	钱塘江地区在第四纪形成超浅层气藏，压力较高。	古河道两侧发育厚层砂砾石层，下有较高承压水头的承压水
主要危害	砂土液化、砂土流失可导致建筑物沉降或路面塌陷等	施工问题主要是难度度大，地下水作用下易引发地面塌陷灾害	工程扰动易产生变形、侧向滑移，导致地面沉降或地面塌陷	火灾，引发钻探、桩基、地下空间施工灾害	发生流砂、管涌、突涌，地下施工危害

1.4 杭州城市地质特征

- ①基岩起伏最深大于 145 米，自西南往东北由浅变深；
- ②岩溶发育环境复杂，可溶性岩类分布范围极广；
- ③古河道反复变迁，浅部砂土分布广泛且规律性不强；
- ④饱和软土广泛分布，与古河道的沉积犬牙交错；
- ⑤主城区分布有大量杂填土，被填埋河道数量众多；
- ⑥浅层有害气体分布广泛，平面位置复杂；
- ⑦杭州地下水量和类型丰富。

第二章 任务的由来

2.1 项目背景

为促进城市安全运行，杭州市政府先后出台了一系列文件以加强地下空间的管理工作。杭州市政府先后出台了《杭州市地下智慧感知系统建设方案》（杭政办函[2021]28 号）《杭州市地下隐患智防应用体系建设工作方案》两个文件。2021 年 7 月 2 日市政府召开“地下隐患智防应用体系建设”专题会议，部署建设任务，明确要求，落实部门，涉及自然资源部门的内容有：城市地质方面推进地质（工程勘察）资料的收集和地质资料数字化、标准化以及岩土层三维建模等工作。

2.2 项目意义

推进城市地质数据库及三维地质建模项目可发挥城市地质数据的基础性作用，建设城市地质三维模型，为城市地质安全风险识别提供基础支撑。实现数字化、标准化、可视化，全面掌握地质数据、城市风险统一评估。

第三章 数据库及三维模型的建设

3.1 三维地质建模项目介绍

3.1.1 项目建设基础

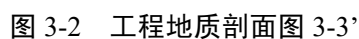
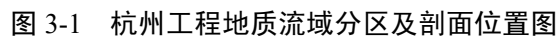
（1）资料是否齐全

项目建设需收集建模区域内大量不同来源的地质钻孔数据。多年城市地质工作及城市建设过程中积累了大量的地质及工程勘察资料，但都分散在各个行业和部门及地勘单位手中，需对分散资料进行收集；另外，数据资料有多部门、多单位、多行业各自的验收标准，标准尺度不统一，且多为扫描件，需对钻孔数据进行整理筛选，进行标准化和数字化工作。

（2）是否有相应的标准

当前城市地质的分层标准较多，存在地质部门的标准、多要素城市地质调查建立的工程地质分层标准、工民建勘察标准以及地铁勘察的分层标准，需明确最终成果使用哪一项标准才能使数据及模型得到有效利用。

下图为杭州多要素城市城市地质调查团队编制的工程地质流域分区(图 3-1)及部分剖面图(图 3-2、图 3-3)。(据杭州多要素城市地质调查项目)



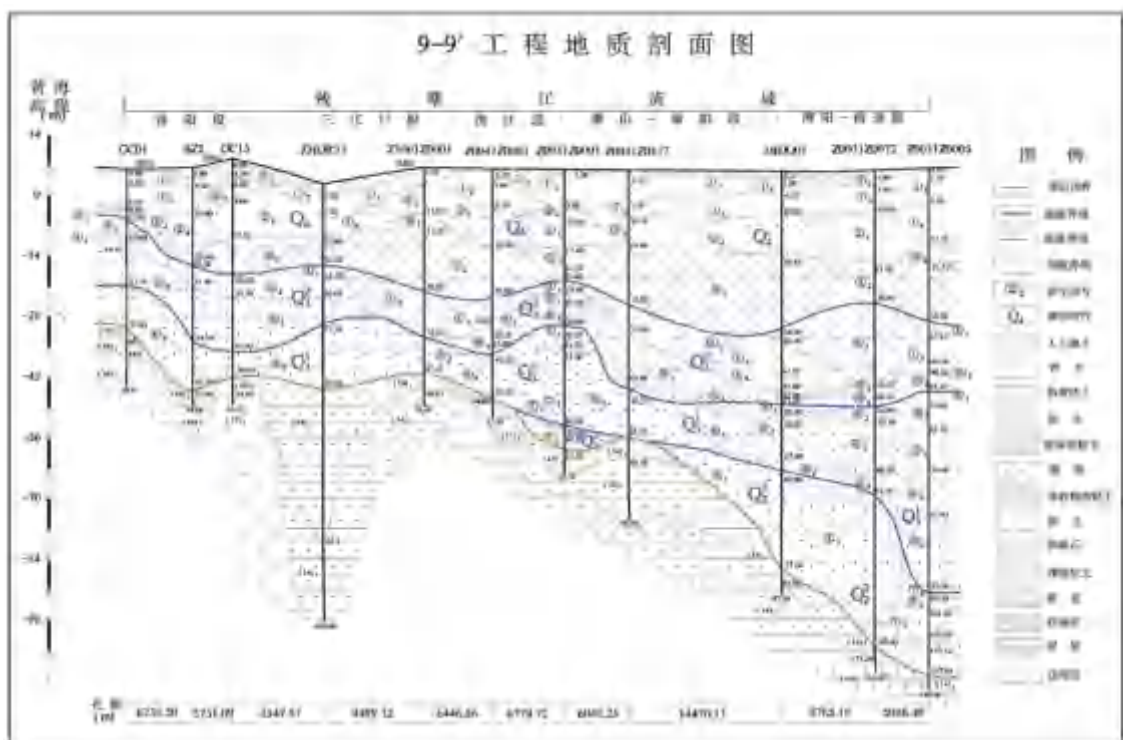


图 3-3 工程地质剖面图 9-9'

针对于杭州存在多种工程地质层分类规范，专家学者针对杭州城市地质调查标准、杭州地铁勘察标准、浙江省岩土勘察规范这三类广泛应用的规范进行了横向对比研究（图 3-4）。

地质年代		年龄 (万年)	时孔成因代号	杭州城市地质调查 (2009)		杭州地铁地质 (2015)		岩土工程 (2019)		备注	主要岩性描述	
系	统	组	代号	组	层	层	层	组	层	组	层	层
第四系	全新统	Q ₄ ¹	全新统	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	全新统	Q ₄ ¹	全新统
			全新统	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	全新统	Q ₄ ¹	全新统
			全新统	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	全新统	Q ₄ ¹	全新统
			全新统	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	Q ₄ ¹	全新统	Q ₄ ¹	全新统
	全新统	Q ₄ ²	全新统	Q ₄ ²	Q ₄ ²	Q ₄ ²	Q ₄ ²	Q ₄ ²	Q ₄ ²	全新统	Q ₄ ²	全新统
			全新统	Q ₄ ²	Q ₄ ²	Q ₄ ²	Q ₄ ²	Q ₄ ²	Q ₄ ²	全新统	Q ₄ ²	全新统
			全新统	Q ₄ ²	Q ₄ ²	Q ₄ ²	Q ₄ ²	Q ₄ ²	Q ₄ ²	全新统	Q ₄ ²	全新统
			全新统	Q ₄ ²	Q ₄ ²	Q ₄ ²	Q ₄ ²	Q ₄ ²	Q ₄ ²	全新统	Q ₄ ²	全新统
	全新统	Q ₄ ³	全新统	Q ₄ ³	Q ₄ ³	Q ₄ ³	Q ₄ ³	Q ₄ ³	Q ₄ ³	全新统	Q ₄ ³	全新统
			全新统	Q ₄ ³	Q ₄ ³	Q ₄ ³	Q ₄ ³	Q ₄ ³	Q ₄ ³	全新统	Q ₄ ³	全新统
			全新统	Q ₄ ³	Q ₄ ³	Q ₄ ³	Q ₄ ³	Q ₄ ³	Q ₄ ³	全新统	Q ₄ ³	全新统
			全新统	Q ₄ ³	Q ₄ ³	Q ₄ ³	Q ₄ ³	Q ₄ ³	Q ₄ ³	全新统	Q ₄ ³	全新统
全新统	全新统	Q ₄ ⁴	全新统	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	全新统	Q ₄ ⁴	全新统
			全新统	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	全新统	Q ₄ ⁴	全新统
			全新统	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	全新统	Q ₄ ⁴	全新统
			全新统	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	Q ₄ ⁴	全新统	Q ₄ ⁴	全新统

图 3-4 杭州市工程地质层分层编号对比图

经过行内专家学者多次开会商讨，认为杭州地铁穿越整个杭州市，涉及地层较为全面，社会接受度高，争议性小，故该类项目钻孔数据采用《杭州地铁岩土工程勘察地层编号规定（2015年修编版）》进行标准化。

所有数据和三维模型的内容、格式、提交形式均由《CIM数据交付规范（地下市政基础设施专篇）》（征求意见稿）、《全空间三维模型数据格式及服务接口规范》（M3D）（T/CIIA 008-2021）规定。

以下为执行标准与规范的具体内容：

①模型建设应充分利用现有调查资料数据构建，现有调查资料数据包括地质图、地质剖面、钻孔、岩层等深线，所建立的模型成果形态能够与现有调查资料数据基本一致。（调查资料）

②地质勘探孔包含地质钻孔和静力触探孔，根据地层分布形态筛选和确定勘探孔，要求勘探孔分布能较好的切合实际地层形态，用于工程地质三维建模的勘探孔原则上每平方公里不少于300个；如项目目标区域收集到的钻孔无法达到，则应做到项目目标区域内地质勘探孔资料应收尽收，充分利用存量资料，且三维工程地质模型必须包含项目目标区域内城建档案馆馆藏的全部地质勘探孔。（钻孔类型、数量）

③勘探孔坐标系采用2000国家大地坐标系，采用椭球体CGCS2000，高斯-克吕格投影，按3°分带，中央子午线120°；高程基准采用1985国家高程基准。（坐标系）

④岩土层命名以现行国家和我省的规范规程中土名称谓、分类及计量单位等规定为依据。建模数据主要按照《岩土工程勘察规范》（GB50021-2001，2009年版）相关规定执行。（岩土命名）

⑤土层划分精度按照大于0.5m的岩土层，单独建立层位。模型表达的岩土分层均为封闭网格，禁止出现开放网格的状态。（土层划分精度）

⑥试点区勘探孔须按《杭州地铁岩土工程勘察地层编号规定（2015年修编版）》进行统一分层和编号，相近勘探孔分层结构形态有差异的根据《杭州地铁岩土工程勘察地层编号规定（2015年修编版）》进行岩土层归一化统一修正，三维模型岩土层形态分布合理。（钻孔分层与编号）

⑦勘探孔岩土层命名、坐标系统、高程系统、岩土层划分等按上述要求标准化。勘探孔编号规则按照《勘探孔编号规则说明》；提供标化处理勘探孔属性附表，具体包含以下excel表格：勘探孔数据包含勘探孔信息表、勘探点地层信息表、标贯信息表、动力触探试验统计表、室内岩土试验成果信息表、抽水试验成果信息表、有害气体探查成果信息表。（表格要求）

⑧三维工程地质模型数据格式要求为“.ifc”和“.hdf或.hdb”。（模型要求）

⑨三维工程地质模型岩土体层分色主要根据岩土层实际颜色及工程力学特性划分，杭州第四系土层分为多个软土层组和硬土层组，对于软土层分色以冷色调为主（如：浅绿色、灰绿色等），对于硬土层以暖色调为主（如：褐黄色、土黄色等）。对于岩层主要按照地质成因分色（如：沉积岩采用红色等），具体详见《杭州第四纪地层编号及配色一览表》和《岩层编号及配色一览表》，岩土层实际颜色可视化效果应通过对模型表面赋予的材质或纹理来表现，采用真实材质图片利用

凹凸纹理显示技术，实现三维模型逼真渲染。（模型岩土体颜色）

⑩模型建设应根据收集的钻孔资料进行建模，道路及道路周边 50m 范围内模型建设钻孔资料间距应小于等于 30m；当钻孔资料无法达到该密度时，模型应进行插值计算生成模型，计算精度应不大于 30m。其他区域模型建设钻孔资料间距可为 80-100m，当钻孔资料无法达到该密度时，模型应进行插值计算生成模型，计算精度不大于 100m。（模型钻孔密度）

⑪三维工程地质模型可支持真实反映岩土体层具有重复倒序、正断层、逆断层、透镜体、夹层、尖灭、褶皱等几何结构特征，模型包含潜水面三维曲面、承压水面三维曲面，模型表达的岩土分层均为封闭的三维体，禁止出现体未封闭的状态，岩层与岩层之间应无缝贴合，无空隙、交叉，满足用于几何结构空间分析，保证三维地质模型的空间结构数据和专题属性数据的正确性。模型各岩层具有对应岩土层编号、岩土层命名两项属性。（模型钻孔属性）

⑫地质三维模型应根据附件“标准网格”进行模型拆分，二次处理划分为小于 6 平方公里的标准网格。各相邻网格数据须保证连接关系正确，接边处数据不得重复，接边处数据完整。（模型切割）

⑬提供原始勘察报告文件资料。（原始勘察资料）

⑭提供数据标准化后勘察软件数据库文件及岩土层三维工程地质模型数据。（数据库、模型）

（3）建设的路径是否可行

当前使用钻孔数据及建模成果的主要为建设部和自然资源两个部门，两部门存在使用模型格式上的不一致，建设部门使用格式为.ifc 格式模型，需利用理正勘察三维地质软件（高级版）V2.0 进行建模，而自然资源部门使用格式为.hdf 或.hdb 格式模型，利用 MapGIS 10 建模软件城市地质二三维一体化分析评价系统进行建模。因此三维建模成果需同时包含.ifc 和.hdf 或.hdb 格式模型，实现在两种格式之间的转换。

3.1.2 项目案例——十区 100 平方公里三维地质模型建设

总体目标：对滨江区、临安区、临平区、萧山区、上城区、西湖区、拱墅区、钱塘新区、余杭区、富阳区 10 个试点区范围内工勘钻孔数据进行资料收集、标准化与数字化工作，完成试点区三维工程地质模型建设工作，并提供相关成果资料。

执行标准与规范：《岩土工程勘察规范》（GB50021-2001，2009 年版）、《杭州地铁岩土工程勘察地层编号规定（2015 年修编版）》、《CIM 数据交付规范（地下市政基础设施专篇）》（征求意见稿）、《全空间三维模型数据格式及服务接口规范》（M3D）（T/CHIA 008-2021）。

（1）工作方法

根据试点区工作经验，现总结三维地质建模项目工作流程如下（图 3-5）：

第一步 收集各类地质资料，作为基础数据，将分散的、形式和标准不一的相关地质资料、工程勘察资料收集、汇总，形成资源池。

第二步 整理筛选钻孔，整理资料，剔除无效数据，保留需要的有效数据，并进行分类归档

整理。

第三步 对钻孔数据进行标准化，按照规范将有效的资料进行归一化修正，保证标准的一致性，使其可用于统一的工作。

第四步 进行钻孔数据录入与数据，将非数字化、无数据库的资料进行录入，形成通用的数据库，保障数据利用的高效、正确。

第五步 进行三维地质建模，使用经过处理的数据，建设对应区域的三维地质模型。

第六步 提交成果 将原始资料、成果数据、三维模型，统一汇交、验收并入库保存。



图 3-5 三维地质建模项目工作流程图

(2) MapGIS 三维地质建模方法介绍 (.hdb 或 .hdf 格式)

.hdf 或 .hdb 格式的三维地质建模基于 MapGIS 10 建模软件城市地质二三维一体化分析评价系统，系统提供多种建模方法，包括三维地质结构建模、矢栅一体地质建模及三维地质属性建模。

1) 三维地质建构建模

主要有基于钻孔数据的地质体自动建模、基于地质分区图的地质体快速建模、基于地质体产状下推的地质体自动建模及基于剖面单元格划分的“分区-拼接”建模。

① 基于钻孔数据的地质体自动建模

一般可通过钻孔数据直接建立三维地质模型，支持加入工程地质剖面、高程点数据、基岩埋深等值线、基岩出露区等多种数据作为建模约束数据，适用于没有夹层透镜体的第四系地层自动建模，不支持夹层透镜体。

该类建模是针对具有标准层序特征的地质区域而开发的。其主要思想是集钻孔、剖面、平面

图等各种多源数据于一体，充分利用已知的数据源，结合地质学的规律和数学算法，模拟未知区域的地质数据，从而建立整个区域的地质模型。基础数据源是钻孔数据，建模的前提是已经建成了钻孔数据库，并进行了钻孔标准化工作，要求标准化后的钻孔数据具有固定的层序。

②基于地质分区图的地质体快速建模

使用钻孔、剖面、物探、岩相古地理、建模边界等，自动追踪不同组段地层边界，建立地层分区图，在建立各组段地层模型。

其数据源为钻孔数据库、地质图，支持的约束数据主要地表高程数据（DEM、等高线），地层深度数据（地层等深线，三维地震解译），剖面，适用于夹层透镜体、建模精度要求高的第四系地层自动建模，支持少量、简单断层，支持夹层透镜体。

③基于地质体产状下推的地质体自动建模

建模数据源为地质图、地形图（地质图区文件、断层分布线文件、产状点文件），支持约束数据为地表高程数据（DEM、等高线），适用于工程地质建模中的基岩部分，支持任意复杂断层，不支持夹层、透镜体。

④基于剖面单元格划分的“分区-拼接”建模

采用“分治”的方法，利用交叉三维剖面将建模区域进行分割，每个单元格独立建模，便于观察与操作，分工合作完成单元格建模后进行模型合并，时间大数据量复杂地质三维结构模型建模。

其属于半自动建模，基础源数据为地质剖面，支持约束数据为钻孔、地质图、地层等深线、地表 DEM 等，适用于复杂地质情况的基础地质框架模型建设，支持任意复杂断层，支持夹层透镜体。

2) 矢栅一体地质建模

矢栅一体地质建模指的是利用网格剖分和属性插值，同一系统中实现结构模型和属性模型的地质模型构建，实现了模型集成，构建了“一个模型，多个表达”的矢栅一体化三维地质模型，具有多精度、快速局部更新、多版本的优点。

MapGIS 全新的快速差值方法可对地质结构模型进行更高效的网格剖分，支持对多级网格动态更新多种属性，如渗透率、孔隙度、地下水温度等，是项目中建模成果得到充分利用。

3) 三维地质属性建模

地质体属性空间分布建模用于地质体内物理、化学属性值和其他地质参数（孔隙度、贮水率、渗透系数、化学元素含量等）的三维空间分布规则化建模。该类建模有带约束条件的三维距离反比差值建模、三维空间统计学的 Kriging 差值建模及基于神经网络的多维地质非线性差值建模，可提供基于面绘制与直接体绘制等可视化方法，提供基于三维剖切、等值面提取、等值线套合等分析功能。

（3）理正三维地质建模方法介绍（.ifc 格式）

表 3-1 理正三维地质建模方法

建模方法	建模基础数据源	限制条件	自动化程度	适用的地质情况
区域整体建模	钻孔数据	具有地形面	全自动	钻孔数量在 800 个以下小范围的三维建模
区域分块建模	钻孔数据	需建立剖面线或辅助剖面	半自动	大于 1000 个钻孔的建模工程
层面法建模	钻孔数据	地层在模型范围内为联通层，地层完整	半自动	地层较破碎、分布范围不均匀，以及有同一地层在多处分布或地层重复
剥层法建模	钻孔数据	导入或创建地形面	半自动	有地层重复、歼灭、多处分布等复杂情况

(4) 示例项目建模流程

本次建模所选的软件为 MapGIS 10 建模软件城市地质二三维一体化分析评价系统，采用建模方法为三维地质结构建模中的基于钻孔数据的地质体自动建模，形成.hdf 格式的模型，再利用该软件进行.ifc 格式的模型格式转换。

具体建模流程如下：钻孔数据导入-多重数据检查-确定建模范围-建立模型标准地层-钻孔数据标准化-添加约束条件和参数-模型的建设与保存。

模型建设规范参照《CIM 数据交付规范（地下市政基础设施专篇）》《全空间三维模型数据格式及服务接口规范》。其中钻孔资料密度要求道路及道路周边 50m 范围内勘探孔间距小于 30m，其他区域勘探孔间距 80-100m；如不能达到时需按此精度插值。同时三维模型的地层编号、称谓、颜色等多项指标都需要符合标准格式。

(5) 模型展示

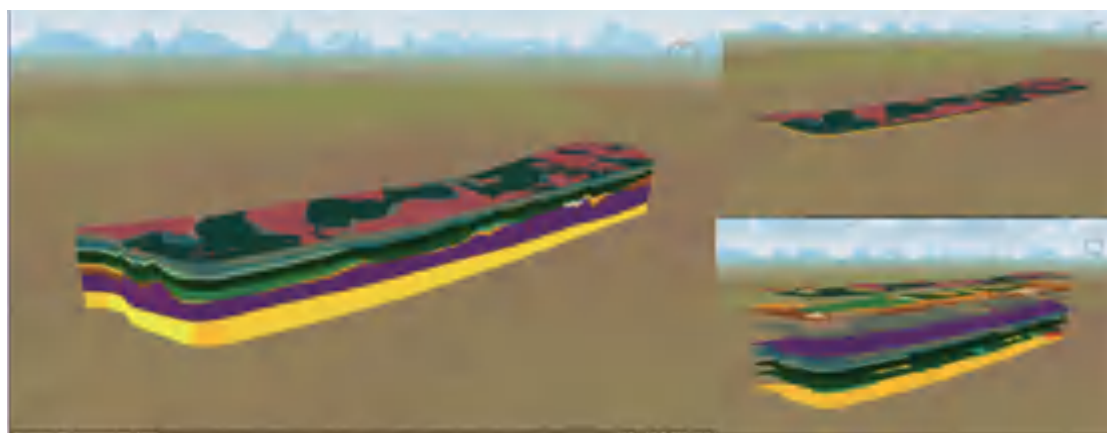


图 3-6 模型展示---.hdf 格式三维模型

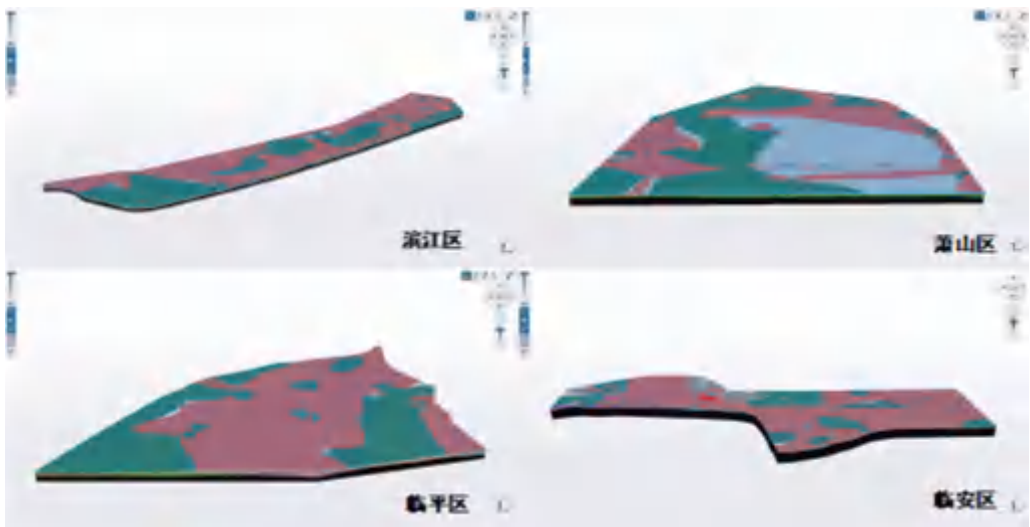


图 3-7 模型展示---.ifc 格式三维模型

(6) 资料汇交

项目汇交时，所需要提交的原始资料及成果资料如下：

表 3-2 原始勘察报告文件资料表

序号	资 料 内 容	文件形式	备 注
1	原始地质勘察资料成果报告	PDF 或扫描图片	要求完全对应最终正式成果报告，包括正文、附图、附表、附件等相关内容
2	原始报告对应的地质勘察软件数据库（如有则提供）	对应工程项目勘察软件数据库	市场常用勘察软件数据库或者备份库文件
3	生成地质勘察资料成果报告所对应的源电子文件汇总打包文件（如有则提供）	.zip 或.rar 或.7z 通用压缩格式	源电子文件主要形式为 Word、EXCEL、CAD 等软件的标准存储格式文档

表 3-3 数据标准化后数据文件及岩土层三维工程地质模型数据表

序号	资 料 内 容	文件形式	备 注
1	试点区标准化处理后对应的地质勘察软件数据库	对应项目勘察软件数据库	市场常用勘察软件数据库或者备份库文件
2	对应的源电子文件汇总文件（详见附表要求）	Excel 表格	按要求提供的全部七张 Excel 表格
3	试点区三维工程地质模型数据	“.hdf 或.hdb”和“.ifc”	.hdf 或.hdb 以三维简单要素类的格式存储在 HDF 或 HDB 空间数据库中；ifc 格式模型中，纹理不是必要条件

3.2 奥体试点介绍

3.2.1 项目概况



图 3-8 奥体中心试点区范围

根据杭州市人民政府办公厅关于印发杭州市地下隐患智防应用体系建设工作方案的通知、杭州市人民政府办公厅关于印发智慧感知建设（杭政办函〔2021〕28号）文件要求，我们开展了奥体中心地下智慧感知系统建设试点工作。试点范围以飞虹路、奔竞大道、钱塘江沿线至杭甬高速的合围区域的奥体核心区，面积约 6.75 平方公里。

本次项目的工作流程是在试点区范围内通过地勘资料收集和地质数据分析评估，建立城市地质数据库，建立地质三维信息模型，编制地质风险图，建立地质环境监测体系，建设地下智慧感知平台，并最终实现与“城市大脑”对接，实现试点区域地下安全的智慧防控。

地下智慧感知系统通过“一库一模一图一体系一平台”的“五个一”建设，实现地质信息可查看，实现地质形态可展示，实现地质风险可评估，初步实现隐患发展可感知，感知数据可传输“五个可”。

3.2.2 感知试验

（1）分布式光纤感知试验

在南京大学团队的支持下，开展了先进监测技术应用试验，探索利用光纤感知技术监测岩土体形变、地下水位、温度等信息。下图为试验现场照片，通过三种不同的试验证明了光纤感知是十分灵敏且有效的。



图 3-9 分布式光纤感知试验现场照片

①水平分布试验（照片左侧两幅）：设计一条 20 米测线，通过气囊放气模拟地表塌陷。

②15m 钻孔试验（照片右下角）：通过注水冲刷砂层，通过对光缆加热，监测掏空；通过应变光缆及位移传感器监测塌陷。

③5m 钻孔试验（照片左上角）：通过千斤顶模拟地层整体塌陷，通过应变光缆及位移传感器监测塌陷量。

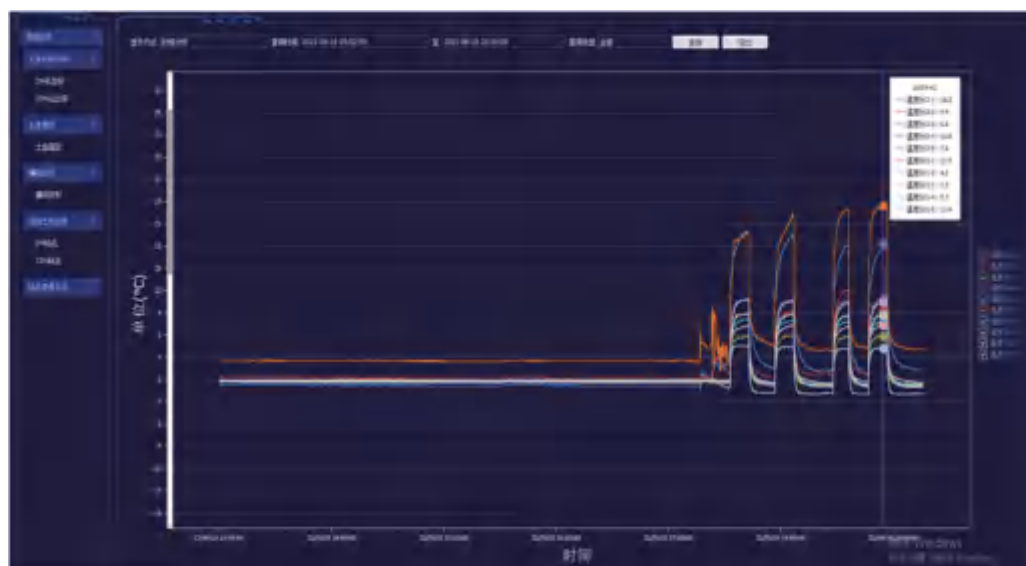


图 3-10 分布式光纤监测成果

此项实验是模拟土层整体塌陷，采用钻孔埋设变形监测光缆及光纤位移传感器，对塌陷进行模拟，其中变形监测光缆可获取沿钻孔深度方向精细化的变形信息，光纤位移传感器可监测局部

产生的大变形。

（2）随机分布电阻率感知试验

在浙江大学团队的支撑下，布设了分布式电阻率监测感知系统。这项技术由浙江大学团队首创，主要就是面向城市地下勘探，已经获得了国家专利，但目前还不能直接投入应用。这项技术在本次试点区同样布置了试验，人工制造了地下 3 米位置的空洞，利用分布式电阻率法对地下空洞进行探测。



图 3-11 随机分布电阻率感知试验现场照片

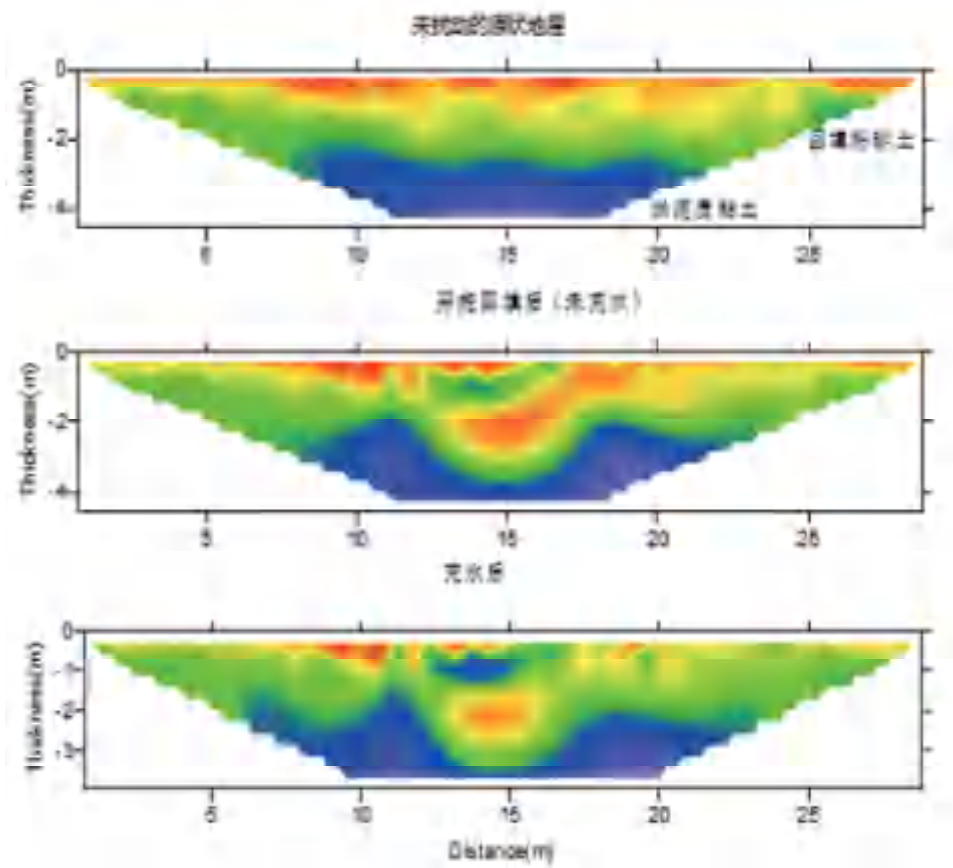


图 3-12 高密度电法试验探测成果

工区位于萧山区盈二佳苑北侧，计划布置测线 1 条，长度 60m，中心点位置布置 3*3*3m 的深坑。坑开挖前布置高密度电法测量一次，坑开挖后在坑中支护形成空洞空间（大约 1*1*1m）后回填回复地表原貌再重复观测一次（用于比较空洞空间产生的异常）。

图 2 与图 1 对比可见，开挖的坑挖穿深度 2m 左右的低阻层，形成下凹，上部回填图呈现高阻夹杂低阻的倾斜层，说明分布式电阻率监测可有效感知地下空洞。

图 3 剖面，与图 2 相比浅部的低阻层（Distance 15 米附近位置）范围逐渐扩大，而稍深一点位置的高阻范围缩小。推测地表喷淋注水影响的是浅部的层，深部位置的预留坑仍然保持空腔状态，呈现出高阻。

3.2.3 试点成果深化完善及应用

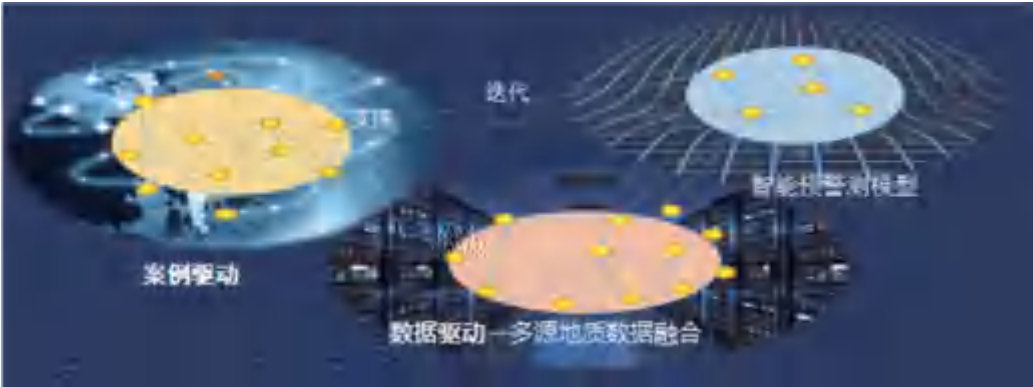


图 3-13 智慧预警模型

下一步试点成果将深化完善，形成智慧预警模型。依托专业团队收集、分析城市地面塌陷案例，加强城市地质的调查，加强成灾机理研究，针对性的加强相关因子监测，建立科学的综合预警模型。

平台能够基于地质灾害领域知识图谱和迁移学习方法，构建地灾场景预测模型。根据场景多参量动态感知信息，采用基于控制论和人工智能集成决策分析框架，为不同地灾风险提供最优的快速预测方案。

杭州市建模主要的应用：为杭州地下隐患智防系统提供支撑，是地下隐患识别的重要基础资料。



图 3-14 杭州地下隐患智防系统

第四章 展望及建议

4.1 相关基础资料查询

三维地质模型应用展望一：相关基础资料查询。三维地质模型初期，仅对钻孔信息进行整合利用和计算，生成的三维模型也只包含钻孔提供的地层信息和相对简单的展示功能。随着理念和技术的不断提升，目前模型的信息整合能力和功能也有了长足的发展，可作为多源信息数据整合的基底和平台，发展为信息容量更大的、更多元的城市地质空间数据库，使不同形式、不同来源的信息交叉融合为一体，实现数据的统一汇聚、标准互通，为决策制定提供更多维度的信息。可将地质模型和地质数据作为城市综合空间数据库载体，在地质模型的基础上整合的行政信息、动态人口、地质风险、灾害评估、地理信息、土地利用、环境状况、水文水利、规划文件、建筑模型、交通网络、矿产资源等信息为打造数字化城市提供了最基础的信息保障。

4.2 城市规划选址与模拟

三维地质模型应用展望二：城市规划选址与模拟。城市的开发建设，其所处的地质环境是一切的基础，同时包含地上工程与地下工程。城市建设既受到地质环境质量制约，地质状况影响着建筑的施工与运行，同时地质环境又受到开发建设的反馈影响，不科学的开发利用会造成一系列环境地质、工程地质和水文地质问题。

基于三维地质模型，可针对重点开发区域的地下三维地质结构、隐伏活动构造、地面沉降、水土质量等，结合规划的功能区和建构筑物类型。结合选址区域地基土层结构及其物理力学性质可以衡量建筑场地适宜性程度，进行城市地质与生态因素的综合分析与评价，为重点地区的综合开发改造、建设规划提供决策依据。

4.3 地下空间开发

三维地质模型应用展望三：地下空间开发。地下空间是城市空间拓展的重要方向，地下空间的开发利用既要考虑到排除软土、液化土等不利条件，也需要查明并统筹保护地下水、地热、地质材料等地下多种资源还需要满足城市发展需求，并且不仅仅局限于平面规划，而且要制定功能细分、层次结构分明的立体规划；然而受制于低可探测性、开发利用复杂性和不可逆性，城市地下空间往往存在缺乏合理利用、地质条件掌握不充分和规划不协调等问题。

通过三维地质模型的建立，结合导入杭州市已开发地下空间，可以建立地下空间开发地质适宜性三维评价方法，整合高程、坡度等地形地貌要素、地基承载力、压缩模量、持力层厚度、基岩面埋深、起伏等岩土工程性质要素，地下潜水层、承压水层埋深厚度等水文地质条件以及填土、软土厚度等不良地质条件，更好的查看和分析地下空间内部地质适宜性编号特征，有效的为地下空间规划提供详细的评价结果和依据，节省开发成本并降低开发风险。

4.4 城市运行风险

三维地质模型应用展望四：城市运行风险。城市建设总是在不同程度的改变与重塑地质环境，比如改变地形地貌、破坏地应力状态、改变岩土性质、改变水文特征等，当具有工程活动性质的

人为再造的地质环境与自然演变不协调时，容易破坏岩土及水体等之间的平衡，诱使城市地质灾害发生。

整合已知风险、地质信息的风险级别、风险提示、预警信息，可以有效保障城市运行安全。钻孔数据等地质资料的汇交整合是开展地质安全风险识别和防控研究的重要基础数据，有助于分析辨别岩溶塌陷风险区、路面塌陷地质风险区等，可以直接用于城市地质安全风险排查和系列风险评估图件编制，也将用于开展地质安全风险预警和防范研究。

离子色谱原理及在实验测试中应用

吴述超

第一章 地质实验测试概述

地质实验测试工作产生的数据是地质科学研究、矿产资源及地质环境评价的重要基础，是发展地质勘查事业和地质科学研究的重要技术支撑。

地质实验测试是人们认识地球的“显微镜”，是地质工作的“眼睛”，是发现矿产资源、检测环境质量和开发矿产的强大武器。

地质科学的发展历史已经充分证明，现代地质科学研究的创新和突破依赖于地质实验测试技术的创新与进步。

在地质调查中，卤素（氟、氯、溴、碘）是经常需要测定的微量元素。氯和溴是一种广泛存在于土壤、岩石中的微量元素，它影响着很多金属元素的地球化学行为。

碘是地壳中痕量元素之一，区域地球化学水系沉积物、土壤和岩石中碘的含量一般在 10^{-6} - 10^{-8} 数量级，要想检测出其准确含量就需要有高灵敏度。

对于低含量卤素离子（氟氯溴碘）的测定，一直是一个难题。目前应用于卤族元素的测定方法有离子选择性电极法、极谱法、分光光度法、间接原子吸收光谱法、等离子体发射光谱法、X射线荧光光谱法。由于卤素是非金属元素，光谱法难以准确测定。应用较多的是离子色谱法（ion chromatography，简称 IC）。

色谱概念和问题的提出：

- （1）利用色谱技术测定离子型物质的一种分析方法。
- （2）什么是色谱？
- （3）色谱包括哪些种类？可以测定哪些物质？
- （4）如何利用色谱技术来进行定量、定性分析？
- （5）如何读取色谱图中的基本参数？
- （6）色谱基础知识——液相色谱——离子色谱

第二章 色谱法基础知识概述

第一节 色谱法的特点、分类和作用

色谱法是一种分离技术，试样混合物的分离过程也就是试样中各组分在称之为色谱分离柱中

的两相间不断进行着的分配过程。其中的一相固定不动，称为固定相；另一相是携带试样混合物流过此固定相的流体（气体或液体），称为流动相。

当流动相中携带的混合物流经固定相时，其与固定相发生相互作用。由于混合物中各组分在性质和结构上的差异，与固定相之间产生的作用力的大小、强弱不同，随着流动相的移动，混合物在两相间经过反复多次的分配平衡，使得各组分被固定相保留的时间不同，从而按一定次序由固定相中流出。

与适当的柱后检测方法结合，实现混合物中各组分的分离与检测。两相及两相的相对运动构成了色谱法的基础

一、色谱法分类

①流动相的不同：

气相色谱 按固定相的不同：气固色谱和气液色谱

液相色谱 按固定相的不同：液固色谱和液液色谱

超临界流体色谱：CO₂ 流动相

②相系流的形式和特征

柱色谱：填充柱色谱和毛细管柱色谱

平板色谱：纸色谱和薄层色谱

③根据色谱分离机理：

分配色谱：不同组分在两相中不同的分配系数。如气液（液液）色谱。

吸附色谱：固体吸附剂对试样中各组分的吸附能力的不同。如气固（液固）色谱。

离子交换色谱：离子交换过程中离子的亲和力 不同。

④色谱的动力学过程

迎头色谱：试样的混合物作为流动相。

顶替色谱：吸附能力或其它作用能力较被分析组分强的组分作流动相。

洗脱色谱：吸附能力或其它作用能力较被分析组分弱的气体或液体作流动相。

色谱法的特点

（1）分离效率高：复杂混合物，有机同系物、异构体、手性异构体。

（2）灵敏度高：可以检测出 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (10^{-6}) 级甚至 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (10^{-9}) 级的物质质量。

（3）分析速度快：一般在几分钟或几十分钟内可以完成一个试样的分析。

（4）应用范围广：气相色谱：沸点低于 400℃的各种有机或无机试样的分析。液相色谱：高沸点、热不稳定、生物试样的分离分析。

不足之处：被分离组分的定性较为困难。

二、线性洗脱色谱与术语

1. 基线：无试样通过检测器时，检测到的信号即为基线，反应检测器系统噪声随时间变化的

线。基线应为直线。

2. 峰高：与被测物的浓度有关（顶点与基线之间的垂直距离），用 h 表示。

3. 区域宽度

用来衡量色谱峰宽度的参数，有三种表示方法：

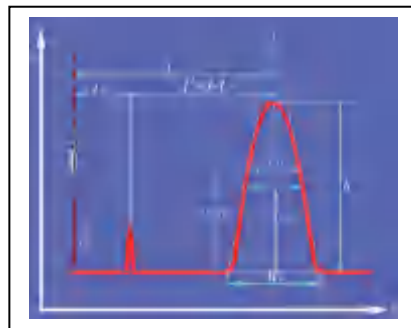
（1）标准偏差（ σ ）：即 0.607 倍峰高处色谱峰宽度的一半。

（2）半峰宽（ $Y_{1/2}$ ）：色谱峰高一半处的宽度 $Y_{1/2} = 2.354 \sigma$

（3）峰底宽（ W_b ）： $W_b = 4 \sigma$

4. 保留值——定性的依据

表示试样中各组分在色谱中滞留时间的数值，在一定的操作条件下，任一物质都有一定的保留值。



（1）时间表示的保留值

保留时间（ t_R ）：组分从进样到柱后出现浓度极大值时所需的时间；

死时间（ t_M ）：不与固定相作用的气体（如空气）的保留时间；

调整保留时间（ t_R' ）： $t_R' = t_R - t_M$

（2）用体积表示的保留值

保留体积（ V_R ）： $V_R = t_R \times F_0$

F_0 为柱出口处的载气流量，单位：mL/min。

死体积（ V_M ）： $V_M = t_M \times F_0$

调整保留体积（ V_R' ）： $V_R' = V_R - V_M$

（3）相对保留值 r_{21}

组分 2 与组分 1 调整保留值之比： $r_{21} = t_{R2}' / t_{R1}' = V_{R2}' / V_{R1}'$

相对保留值只与柱温和固定相性质有关，与其他色谱操作条件无关，它表示了固定相对这两种组分的选择性。1>1，两个组分才可能分开，因此 r_{21} 也用 α 表示，称为选择因子。

5. 分配系数 K 、容量因子（分配比） k 、相比 β

$$(1) K = \frac{\text{组分在固定相中的浓度}}{\text{组分在流动相中的浓度}} = \frac{C_s}{C_m}$$

影响因素：组分的性质、固定相的性质、 T 、 P ，与 β 无关

$$(2) k = \frac{\text{组分在固定相中的质量}}{\text{组分在流动相中的质量}} = \frac{p}{q}$$

影响因素：组分的性质、固定相的性质、 T 、 P 、 β 。又称为容量因子。

$$(3) \beta = \frac{\text{固定相的体积}}{\text{流动相的体积}} = \frac{V_s}{V_m}$$

$$k = K\beta$$

$$r_{2,1} = \frac{k_2}{k_1} = \frac{K_2}{K_1}$$

从色谱流出曲线，可以得到

- (保留值) t_R' 、 r_{21} ——定性的依据
- h 、 A ——定量的依据
- Y 、 $Y_{1/2}$ 、 σ ——柱内的运动情况。

第二节 色谱理论基础

色谱理论需要解决的问题：色谱分离过程的热力学和动力学问题。影响分离及柱效的因素与提高柱效的途径，柱效与分离度的评价指标及其关系。

组分保留时间为何不同？色谱峰为何变宽？

组分保留时间：色谱过程的热力学因素控制；（组分和固定液的结构和性质）

色谱峰变宽：色谱过程的动力学因素控制；（两相中的运动阻力，扩散）

两种色谱理论：塔板理论和速率理论；

1. 分离度

塔板理论和速率理论都难以描述难分离物质对的实际分离程度。即柱效为多大时，相邻两组份能够被完全分离。

难分离物质对的分离度大小受色谱过程中两种因素的综合影响：保留值之差——色谱过程的热力学因素；

区域宽度——色谱过程的动力学因素。

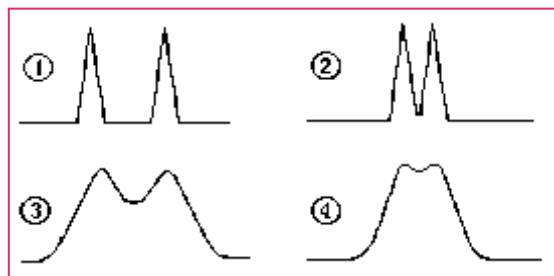
色谱分离中的四种情况如图所示：

① 柱效较高， ΔK （分配系数）较大，完全分离；

② ΔK 不是很大，柱效较高，峰较窄，基本上完全分离；

③ 柱效较低， ΔK 较大，但分离的不好；

④ ΔK 小，柱效低，分离效果更差。



$$R = \frac{2(t_{R(2)} - t_{R(1)})}{W_{b(2)} + W_{b(1)}}$$

分离度的表达式：

$$= \frac{2(t_{R(2)} - t_{R(1)})}{1.699(Y_{1/2(2)} + Y_{1/2(1)})}$$

$R=0.8$ ：两峰的分离程度可达 89%；

$R=1$ ：分离程度 98%；

$R=1.5$ ：达 99.7%（相邻两峰完全分离的标准）。

$$R = \frac{1}{4} \cdot \frac{\alpha - 1}{\alpha} \cdot \sqrt{n} \cdot \frac{k_2}{1 + k_2}$$

• R 受到柱效（ n ）、选择因子（ α ）、容量因子（ k ）的影响。

- 考虑了热力学因素、动力学因素和容量因素的影响。

(1) 分离度与柱效 (n)

分离度与柱效的平方根成正比, r_{21} 一定时, 增加柱效, 可提高分离度, 但组分保留时间增加且峰扩展, 分析时间长。

增加柱长对提高分离度有利 (分离度 R 正比于柱长 L^2), 但组分的保留时间 $t_R \uparrow$, 且柱阻力 $\uparrow$, 不便操作。

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2$$

(2) 分离度与 r_{21}

增大 r_{21} 是提高分离度的最有效方法, 计算可知, 在相同分离度下, 当 r_{21} 增加一倍, 需要的 n 有效 减小 10000 倍。

增大 r_{21} 的最有效方法是选择合适的固定液。

(3) 分离度与 k

增大容量因子可以增加分离度, 但是会延长分析时间, 甚至造成检测困难。其对分离度的提高并不明显。一般控制在 1-5 之间。

第三节 色谱定性、定量分析

一、色谱定性鉴定方法

1. 利用纯物质定性的方法

利用保留值定性: 通过对比试样中具有与纯物质相同保留值的色谱峰, 来确定试样中是否含有该物质及在色谱图中的位置。不适用于不同仪器上获得的数据之间的对比。

利用加入法定性: 将纯物质加入到试样中, 观察各组分色谱峰的相对变化。

2. 利用文献保留值定性

利用相对保留值 r_{21} 定性

相对保留值 r_{21} 仅与柱温和固定液性质有关。在色谱手册中都列有各种物质在不同固定液上的保留数据, 可以用来进行定性鉴定。

3. 保留指数

又称 Kovats 指数 (I), 是一种重现性较好的定性参数。测定方法: 将正构烷烃作为标准, 规定其保留指数为分子中碳原子个数乘以 100 (如正己烷的保留指数为 600)。

其它物质的保留指数 (I_X) 是通过选定两个相邻的正构烷烃, 其分别具有 Z 和 $Z+1$ 个碳原子。被测物质 X 的调整保留时间应在相邻两个正构烷烃的调整保留值之间如图所示:



4. 用经验规律进行定性 $t'_{R(Z+1)} > t'_{R(X)} > t'_{R(Z)}$

在气相色谱中

$$I_X = 100 \left(\frac{\lg t'_{R(X)} - \lg t'_{R(Z)}}{\lg t'_{R(Z+1)} - \lg t'_{R(Z)}} + Z \right)$$

碳数规律: $\lg t'_R = A_1 n + C_1$

沸点规律: $\lg t'_R = A_2 T_b + C_2$

其中 A_1 、 C_1 、 A_2 、 C_2 为常数。

二、色谱定量分析方法

定量依据: 峰高、峰面积。(峰面积更适合)

1. 峰面积的测量

(1) 峰高(h)乘半峰宽($Y_{1/2}$)法: 近似将色谱峰当作等腰三角形。此法算出的面积是实际峰面积的 0.94 倍: $A = 1.064 h \cdot Y_{1/2}$

(2) 峰高乘平均峰宽法: 当峰形不对称时, 可在峰高 0.15 和 0.85 处分别测定峰宽, 由下式计算峰面积: $A = h \cdot (Y_{0.15} + Y_{0.85}) / 2$

(3) 自动积分和微机处理法

2. 定量校正因子

试样中各组分质量与其色谱峰面积成正比, 即: $m_i = f_i \cdot A_i$

绝对校正因子: 比例系数 f_i , 单位面积对应的物质质量: $f_i = m_i / A_i$

定量校正因子与检测器响应值成倒数关系: $f_i = 1 / S_i$

相对校正因子 f'_i : 即组分的绝对校正因子与标准物质的绝对校正因子之比。

当 m_i 、 m_s 以摩尔为单位时, 所得相对校正因子称为相对摩尔校正因子 (f'_M), 用表示; 当 m_i 、 m_s 用质量单位时, 以 (f'_W), $f'_i = \frac{f_i}{f_s} = \frac{m_i / A_i}{m_s / A_s} = \frac{m_i}{m_s} \cdot \frac{A_s}{A_i}$ 表示。

3. 常用的几种定量方法

(1) 归一化法: $c_i \% = \frac{m_i}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \times 100 = \frac{f'_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n (f'_i \cdot A_i)} \times 100$

特点及要求:

归一化法简便、准确;

进样量的准确性和操作条件的变动对测定结果影响不大;

仅适用于试样中所有组分全出峰的情况。

(2) 外标法

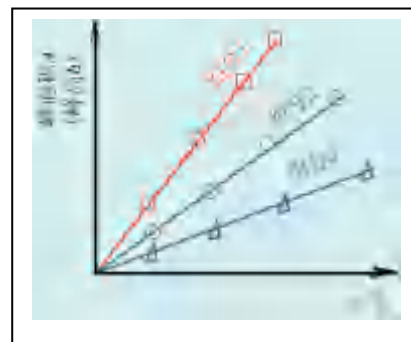
外标法也称为标准曲线法。

特点及要求:

外标法不使用校正因子, 准确性较高,

操作条件变化对结果准确性影响较大。

对进样量的准确性控制要求较高, 适用于大批量试样的



快速分析。

(3) 内标法

只需要测定试样中某几个组分，或试样中所有组分不可能完全出峰时，可采用内标法。内标物要满足以下要求：

- (a) 试样中不含有该物质；
- (b) 与被测组分性质比较接近；
- (c) 不与试样发生化学反应；
- (d) 出峰位置应位于被测组分附近，且无组分峰影响。

试样配制：准确称取一定量的试样 W ，加入一定量内标物 m_s

计算式：

$$\frac{m_i}{m_s} = \frac{f'_i A_i}{f'_s A_s}; \quad m_i = m_s \frac{f'_i A_i}{f'_s A_s}$$
$$c_i \% = \frac{m_i}{W} \times 100 = \frac{m_s \frac{f'_i A_i}{f'_s A_s}}{W} \times 100 = \frac{m_s}{W} \cdot \frac{f'_i A_i}{f'_s A_s} \times 100$$

内标法特点

- (a) 内标法的准确性较高，操作条件和进样量的稍许变动对定量结果的影响不大。
- (b) 每个试样的分析，都要进行两次称量，不适合大批量试样的快速分析。
- (c) 若将内标法中的试样取样量和内标物加入量固定，则：

$$c_i \% = \frac{A_i}{A_s} \times \text{常数}$$

第三章 离子色谱原理及仪器结构

第一节 离子色谱原理

一、离子色谱定义

离子色谱是高效液相色谱的一种，是分析阴、阳离子和小分子极性有机化合物的一种液相色谱方法。

离子型物质：在水溶液中电离，具有 + 或 - 电荷的元素

阴离子： F^- ， Cl^- ， Br^- ， I^- ， NO_2^- ， SO_4^{2-} ， CrO_4^{2-}

阳离子： Li^+ ， Na^+ ， NH_4^+ ， K^+ ， Mg^{2+} ， Ca^{2+} ， Fe^{3+}

极性有机化合物：有机酸、草甘膦（除草剂）、氨基酸、糖类等。

二、离子色谱发展历史

1975 年由 H.Small 等人首次提出抑制型离子色谱。

1979 年 J.S.Fritz 等人提出了单柱型离子色谱（非抑制型离子色谱）。

1985 年厦门大学田昭武院士和胡荣宗教授首次提出电化学抑制原理，采用电解水（电化学抑制）代替化学抑制。

澳大利亚 P.R.Haddad 在离子色谱方面作了大量工作，并获得了 2002 年 Martin 色谱科学金奖。国内离子色谱研究的科研院所。

三、离子色谱特点

（1）溶液中阳离子分析有原子吸收光谱法、电感耦合等离子体发射光谱法、电感耦合等离子体质谱法、X 荧光光谱法，但阴离子分析缺乏同时检测多种阴离子的快速灵敏方法，一般采用容量法、重量法和光度法。

（2）这些方法不能同时分析多种离子，操作步骤冗长费时，需要多种化学试剂，灵敏度低干扰多。离子色谱具有快速、灵敏、选择性好和同时测定多组分的优点，可以测定很多目前难以用其他方法测定的离子。

（3）如果说 ICP-MS 是目前同时测定多元素的快速、灵敏而准确的分析方法，而同时测定阴离子的快速、灵敏、准确的方法就首推离子色谱法。

（4）HPLC 中的固定相主要是硅胶，硅胶稳定的 pH 值是 2~8，而离子色谱所用的有机高聚物基质离子交换剂在 pH0~14 和与水互溶的有机溶剂中稳定，因此离子色谱可用强酸强碱以及有机溶剂做流动相，这是 HPLC 难以实现的优势之所在。

（5）离子色谱仪全部采用 PEEK（聚醚醚酮）材质，可耐强酸强碱，不用担心金属材质的溶出问题。

（6）高灵敏度：分析浓度范围 $\mu\text{g/L} \sim \text{mg/L}$ ；电导法直接进样（ $25 \mu\text{L}$ ）， $\text{LOD} < 10 \mu\text{g/L}$ ；电厂、核电厂以及半导体工业所用高纯水，增大进样量，采用微柱或者在线浓缩技术，LOD 可达 pg/L ；脉冲安培检测器对电活性物质的 LOD 可达 fmol/L 。

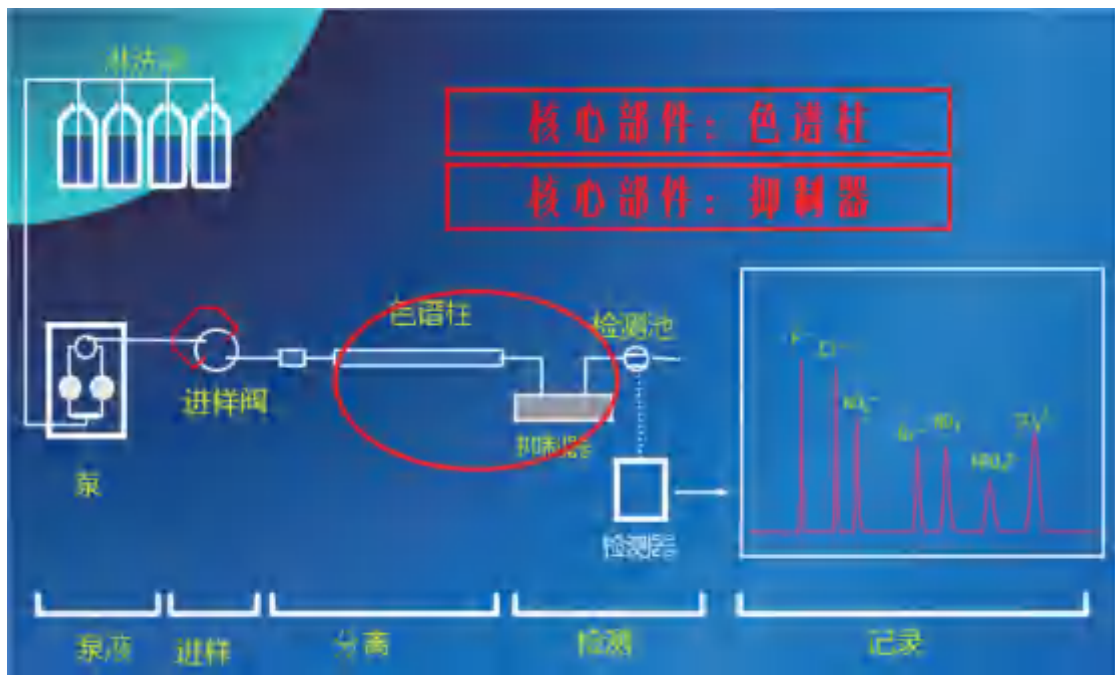
四、真正的绿色色谱分析技术

电解在线淋洗液发生器和高效电解抑制器的使用，使得离子色谱无需配制淋洗液，只需要点击鼠标就可以实现淋洗液浓度的更改，并且，离子色谱很少使用有机溶剂，基本实现“只加水模式”，减少了对工作人员健康的伤害和对环境的污染，是真正的绿色色谱分析技术。

- （1）不同的操作者都可得到好的样品分析重现性；
- （2）经过稀释、过滤后可以测定多种样品；
- （3）独特的选择性（选择分离模式、分离柱、淋洗液、检测器实现对不同离子的分析选择性）；
- （4）多价态可氧化元素（ NO_2^- & NO_3^- ， SO_3^{2-} & SO_4^{2-} etc.）；
- （5）不同价态和形态的离子（ Fe^{3+} & Fe^{2+} ， Cr^{3+} & Cr^{6+} etc.）。

第二节 离子色谱系统简介

一、仪器构成



六通阀进样器具有结构简单、使用方便、寿命长、日常无需维修等特点，正确的使用和维护将能增加使用寿命，保护周边设备，同时增加分析准确度。使用得当的话，六通阀进样器一般可连续进样 3 万次而无需维修，其结构图如下：



二、六通阀使用注意事项

手柄处于 Load 和 Inject 之间时，由于暂时堵住了流路，流路中压力突然增大，再转到进样位，过高的压力在柱头上引起损坏，所以应尽快转动阀，不能停留在中途。

在 HPLC/IC 系统中使用的注射器针头有别于气相色谱 (GC)，是平头注射器。一方面，针头外侧紧贴进样器密封管内侧，密封性能好，不漏液，不引入空气；另一方面，也防止了针头刺坏密封组件及定子。

进样样品要求无微粒和能阻死针头及进样阀的物质，样品溶液均要用 0.45μm 的水相滤膜过

滤（!!）。防止微粒阻塞进样阀和减少对进样阀的磨损。

不同性质（离子半径、离子价态）的离子进入色谱柱后，在固定相中被保留，在淋洗液的作用下，各个离子依次被淋洗液从固定相中洗脱下来，离开色谱柱，完成分离过程。

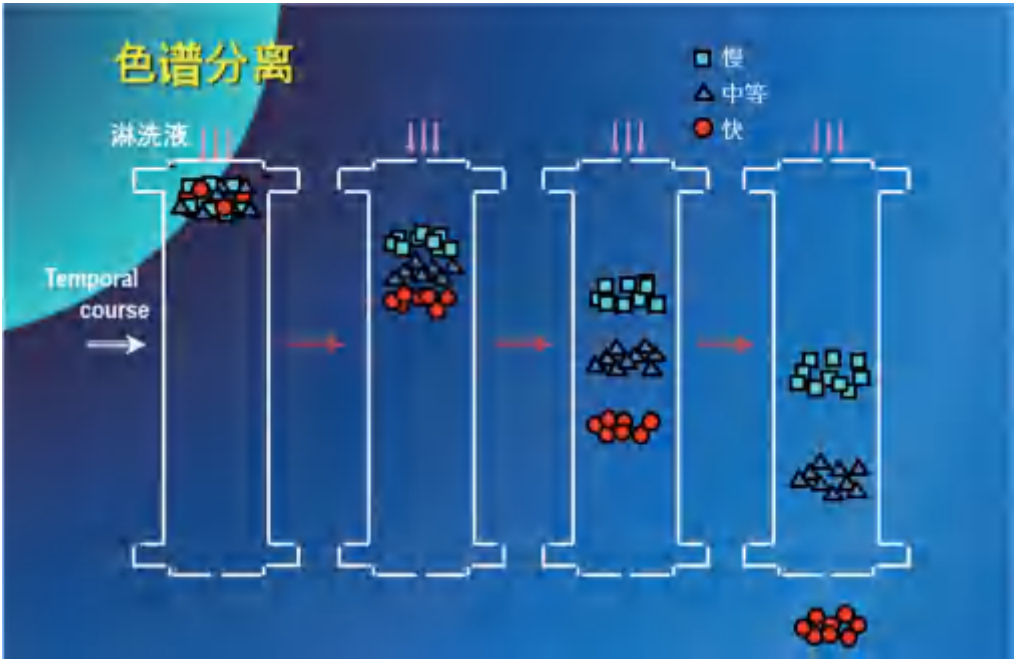
三、分离方式

如下表

分离模式	分离机理	分析对象或应用领域
离子交换	库仑力	无机和有机离子分析
离子排斥	Donnan 平衡	有机酸、氨基酸、醇、醛
离子对	疏水作用	离子性物质分析
离子抑制	疏水作用	有机弱酸弱碱分析

四、分离过程

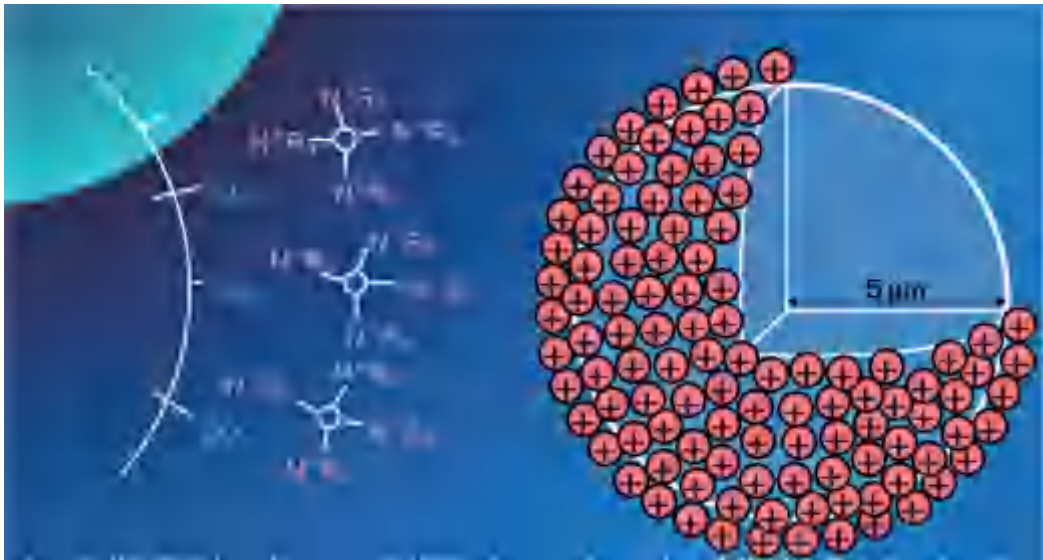
如下图所示，以漂流游戏做比喻：一个堆积大小石块（固定相）的水道（分离柱）里，一群游泳者（目标分析物）在源头起点处，在强大水流（流动相）的作用下，向前方移动，因为个人的体重体型、运动能力不同（目标分析物的性质），被水流（流动相）先后分开（分离），最后在不同的时间内到达终点线。



五、离子色谱固定相

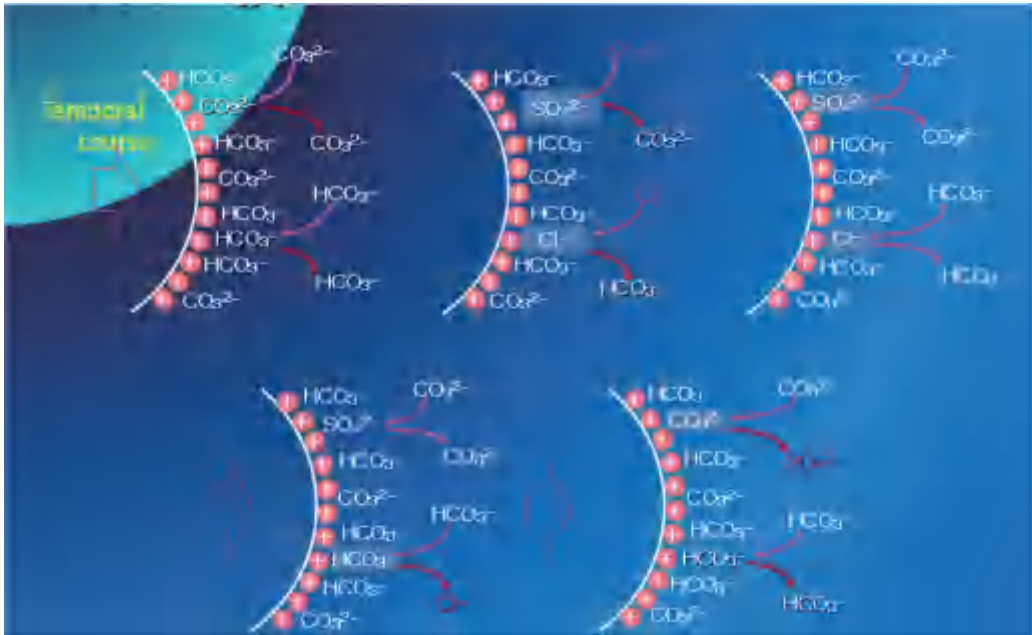
离子色谱的固定相由基质和功能基团两部分组成，阴离子交换树脂是由表面完全磺化的有机聚合物基质（乙烯基苯交联二乙烯基苯 EVB-DVB 或者苯乙烯-二乙烯基苯 PS-DVB）与完全季铵化的功能基团组成的聚合物小球（乳胶微粒）。功能基团在流动相中解离，在固定相的表面形成

带电荷的离子交换点位，与淋洗液/样品中的阴离子发生离子交换，如下图。



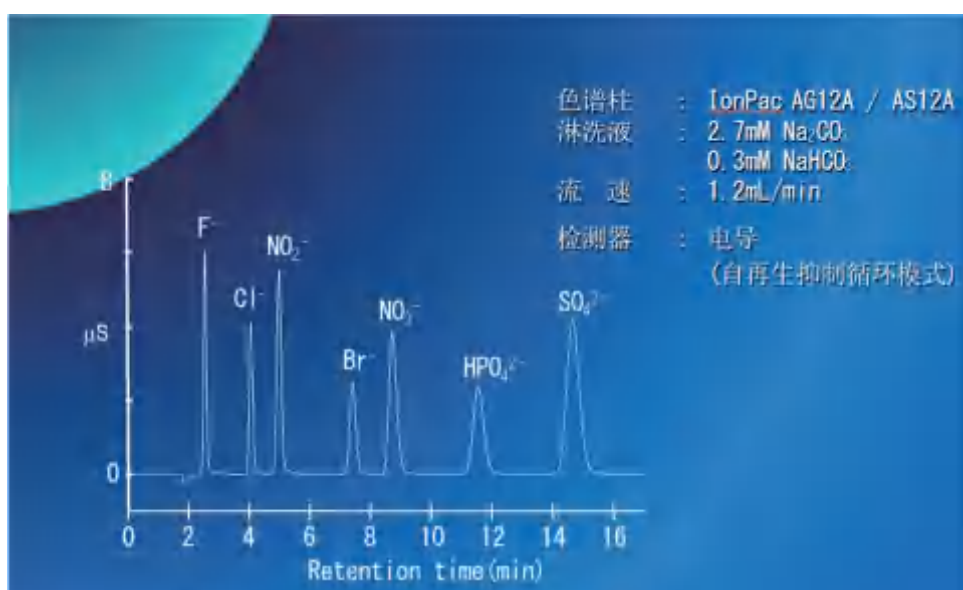
六、淋洗过程

淋洗液连续提供与固定相离子交换位置的平衡离子相同电荷的离子 ($\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$)，这种平衡离子与固定相离子交换位置相反电荷（带正电荷的季铵基团）的基团以库仑力结合，保持电荷平衡。进样之后，样品离子 (SO_4^{2-} , Cl^-) 与淋洗离子 ($\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$) 竞争固定相上的点和位置。当固定相上的离子交换位置被样品离子置换时，样品离子将暂时被固定相保留（库仑力）。接着，被保留的离子又被淋洗液中的淋洗离子置换，并从柱上被洗脱。



七、淋洗分离分析样品案例

自再生一直循环模式测定七种阴离子，如下如：



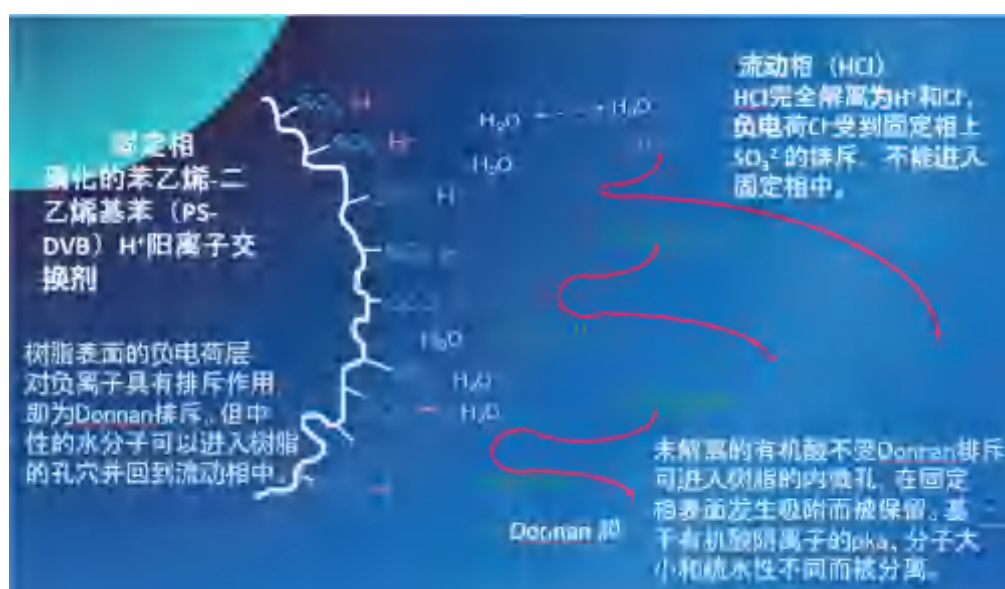
八、离子排斥色谱原理简介

(1) Donnan 排斥作用 – Donnan 膜的负电荷层排斥完全离解的离子型化合物，仅允许未离解的化合物通过

(2) 吸附 – 保留时间与有机酸的烷基链的长度有关。通常烷基链越长，其保留时间也越长。

(3) 空间排阻 – 与有机酸的分子量大小及交换树脂的交联度有关

与离子交换色谱不同，离子排斥色谱中淋洗液的主要作用是改变淋洗液的 pH 值，调节有机酸的解离。离子排斥色谱主要用于无机弱酸和小分子有机酸的分离，也可用于醇类、酮类、氨基酸和糖类的分离。



九、离子对色谱原理简介

(1) 生成离子对 – 待测离子与离子对试剂生成中性“离子对”分布于固定相与流动相之间，

其分离类似传统的反相分离

(2) 动态离子交换 – 离子对试剂的疏水部分吸附于固定相形成动态的离子交换表面, 其分离机理类似于离子交换。

(3) 离子间相互作用 – 除包括以上两种分离机理和固定相表面双电层结构的分离机理。

离子对色谱中的固定相主要是中性无离子交换功能基团的聚苯乙烯大孔树脂, 可用的 pH 范围广。主要用于疏水性可电离化合物的分离, 包括分子量大的脂肪酸、阴离子和阳离子表面活性剂、烷基磺酸盐、可溶性维生素、酚类和烷醇胺类化合物。使用电导或者紫外检测器。



十、电导检测器

测定溶液流过电导池电极时的电导率; 可检测大部分离子型化合物; 将电解液置于施加了电场的电极之间, 溶液将导电, 溶液中的阴离子移向阳极, 阳离子移向阴极。在电导测量中, 电导池电极截面积 A 和两极间的距离 L 固定。 L/A 为常数, 当电导池常数为 1 时, 测量出的电导值为电导率, 单位为微西门子/厘米。

影响电导测定的几个因素:

(1) 浓度: 一般电导与溶液中溶质的浓度成线性关系, 这种线性关系也受离子的解离度、迁移率等因素的影响。

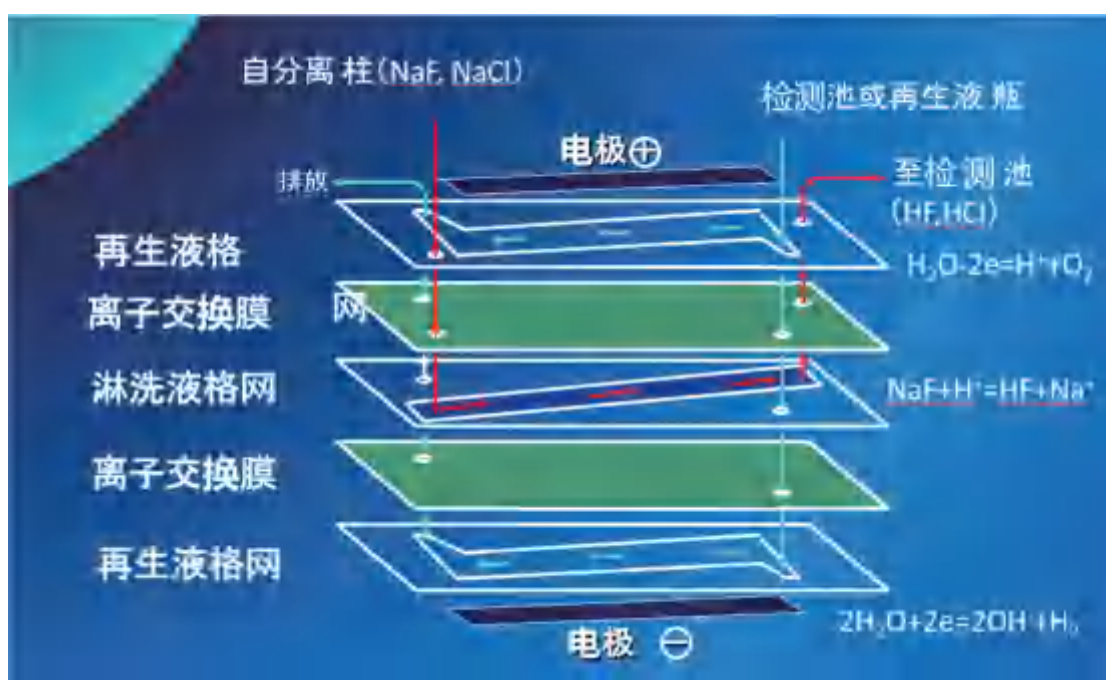
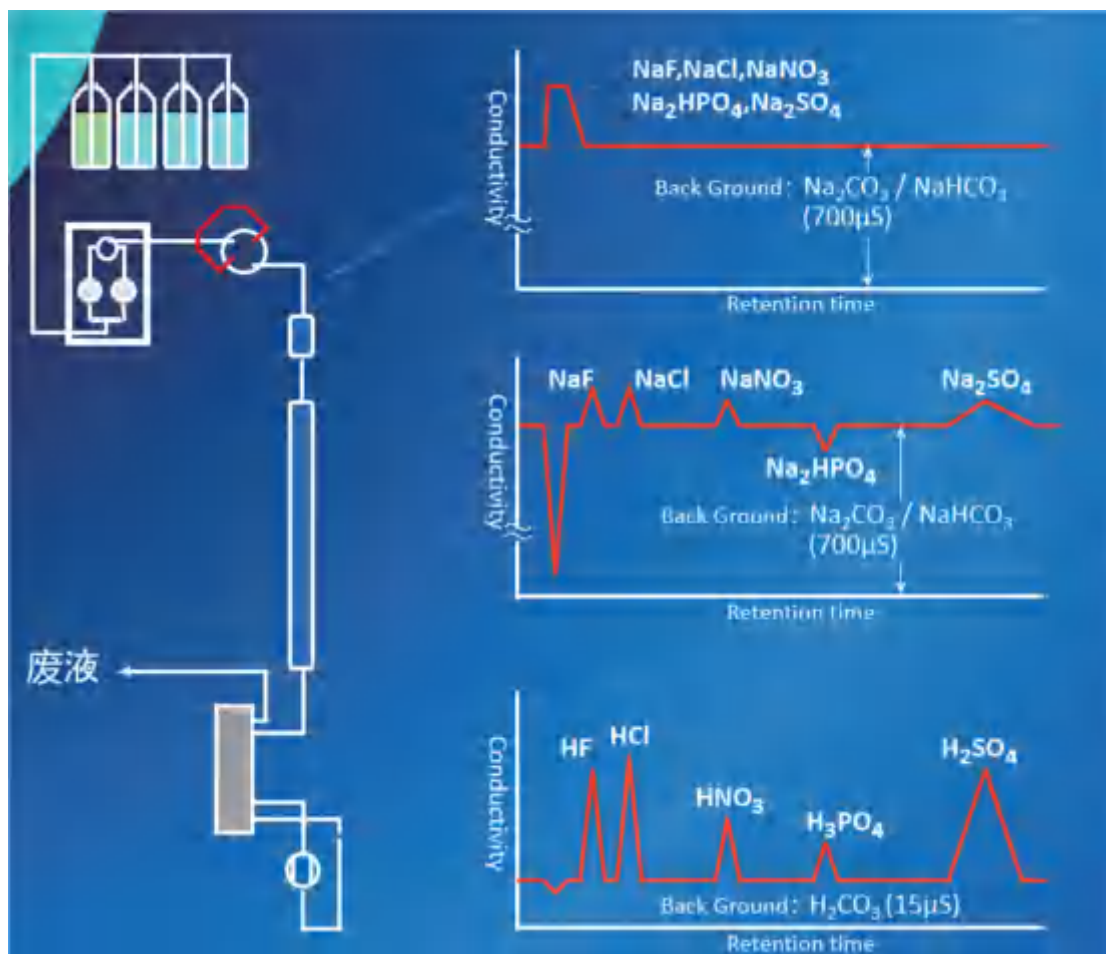
(2) 温度: 温度对离子的迁移率和电导率影响较大, 现在的电导检测器都设计有消除温度影响的功能。在电导池中设计有能对电导池流出液体的温度进行连续自动测定的热敏元件, 通过温度补偿系数来消除温度对测量结果的影响。

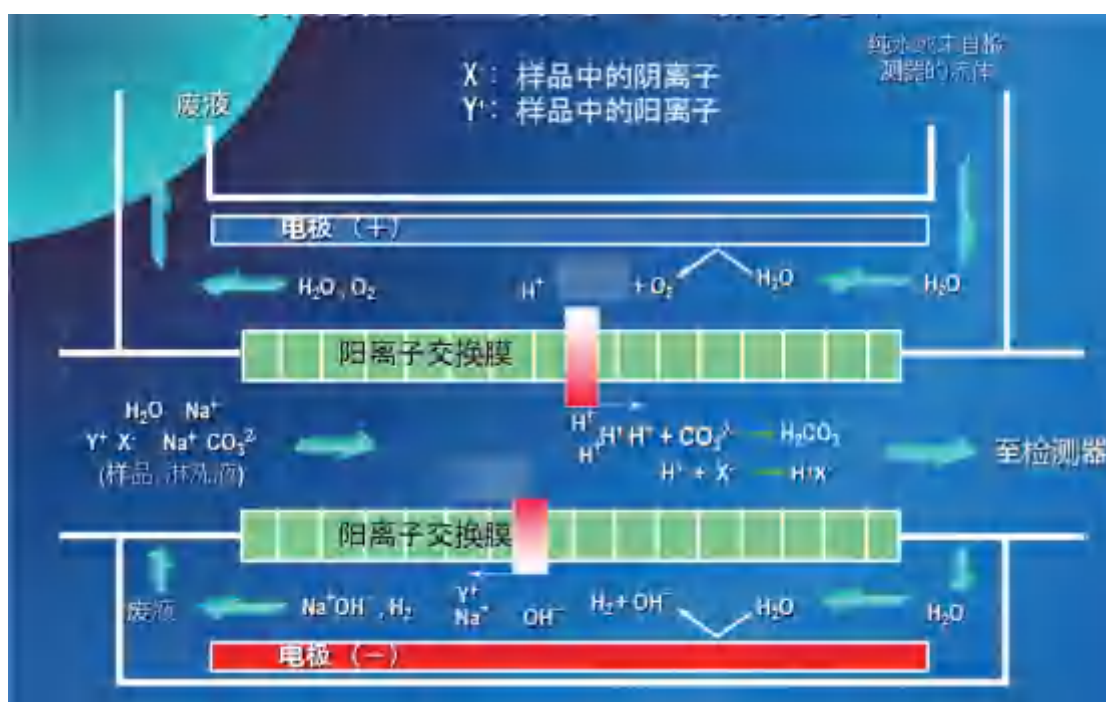
存在的问题及解决方法:

(1) 电导检测器具有高灵敏度, 所以淋洗液自身也具有很高的背景信号, 样品离子产生的信号相对于淋洗液而言很小, 此外, 高背景电导的噪声会极大地影响检测下限。

(2) 20 世纪 70 年代 Small 在离子色谱柱后引入抑制柱 (H^+ 型强酸性阳离子交换树脂填充柱),

阴离子淋洗液中的弱酸盐被质子化为弱酸，将分析离子变成相应的高电导率的酸。





离子色谱分析阳离子、阴离子的分离机理、抑制机理是相似的：

- (1) 分析阴（阳）离子，分离柱填充强碱（酸）性阴（阳）离子交换树脂。
- (2) 在阴（阳）离子抑制器中，采用阳（阴）离子交换膜来实现抑制功能。
- (3) 当改变离子色谱淋洗液的流速时，待测离子（一价或者二价）的保留时间将缩短，但洗脱顺序不会发生改变。

十一、离子色谱仪器日常维护要点

- (1) 分析泵：经常用去离子水清洗，使用强酸强碱后要冲洗，一些正相有机溶剂如二氯甲烷对 peek 材料有腐蚀作用，应避免使用。使用过程中防止淋洗液耗光吸空。
- (2) 检测器：长时间未使用，氢氧化钠会结晶堵在电导池内，造成堵塞，用小流量水慢慢冲洗，至压力正常，无气泡，基线稳定。
- (3) 色谱柱：长时间不用时，往柱内泵入保存液（阳酸，阴碱），从仪器上取下，用无孔接头将柱两端堵死后置于通风干燥处。
- (4) 抑制器：用去离子水保存，其它同色谱柱。
- (5) 仪器短时间不用，建议每周开机 1 次，运行仪器 1-2h。

第四章 离子色谱应用

第一节 应用领域

- (1) 无机化合物分析、
- (2) 环境水、大气无机阴、阳离子

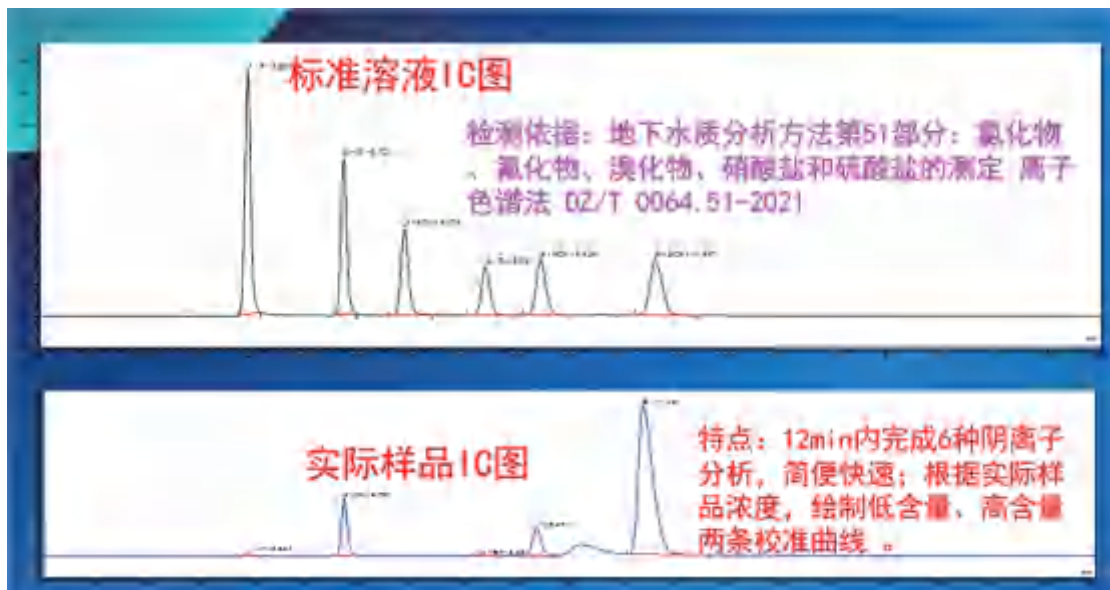
- (3) 超痕量离子分析（半导体、电场、核电场）
- (4) 复杂基体中离子分析（化工原料、海水、卤制品）
- (5) 金属含氧酸的测定（电镀液等）
- (6) 有机化合物分析
- (7) 食品、饮料中的有机酸（酸味剂、防腐剂等）；
- (8) 有机胺类化合物；
- (9) 药物和农药（特别是无紫外吸收的化合物）
- (10) 糖类
- (11) 氨基酸
- (12) 表面活性剂

具体见下表：

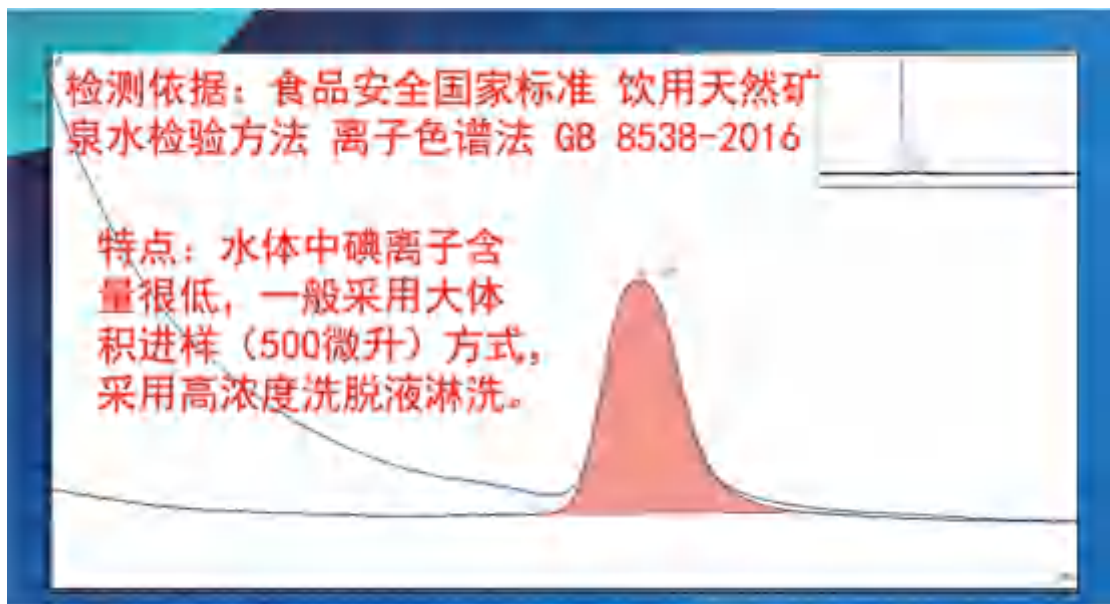
领域	样品	应用
环境 / 污染	雨水 / 河水 / 大气 / 污水	雨水中离子
城市用水	自来水 / 水源	自来水中消毒副产物
化学品	设备提取物 / 聚合物	环氧类粘合剂中的阴离子
电子 / 半导体	高纯水·晶片冲洗水	高纯水中的离子型杂质
金属 / 钢材	表面处理液·银槽·冷却水	电镀槽中的抗坏血酸
农业	肥料 / 土壤 / 植物 / 等	土壤中的离子
医学	血液 / 尿	尿中草酸
化妆品	化妆品 / 清洁剂 / 洗发液	化妆品液体中的阴离子
制药	化学 / 液体	化学品中的重金属
电力	冷却水 / HPW	锅炉蒸汽中的杂质
食品 / 饮料	酒 / 饮料 / 糖果	饮料中有机酸
造纸 / 纸浆	纸浆液·处理水	张纸和液体中的离子

第二节 应用案例（本实验室工作经验）

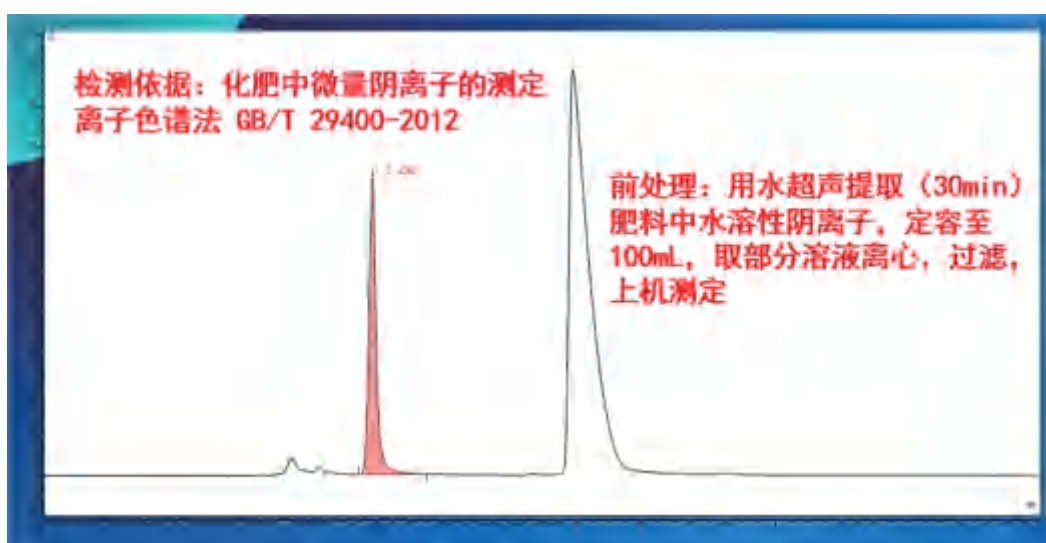
- (1) 水中六种阴离子测定（外检样品）：标准谱图和实际样品谱图



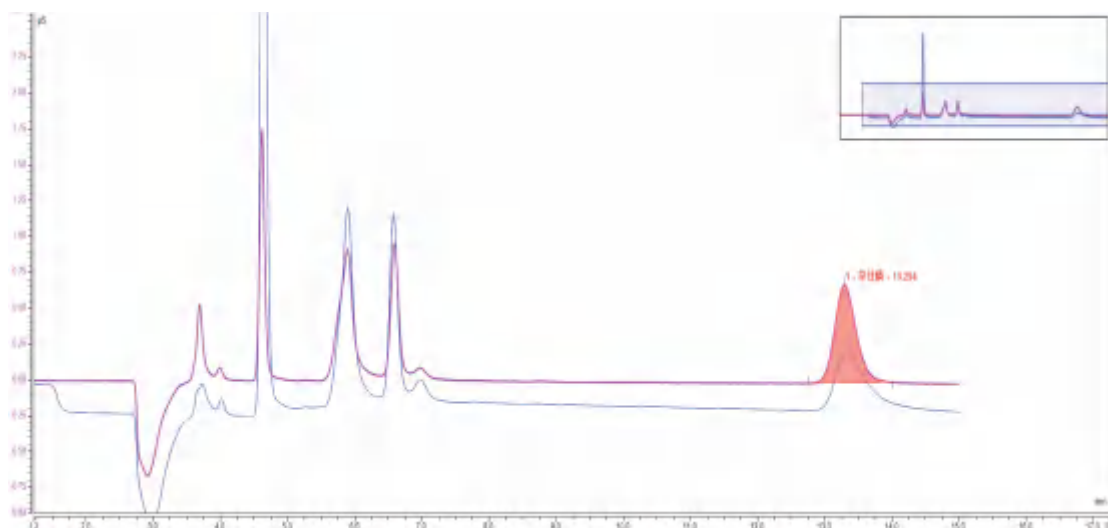
(2) 碘离子测定（能力验证）



(3) 肥料中氯离子测定（标样定值）



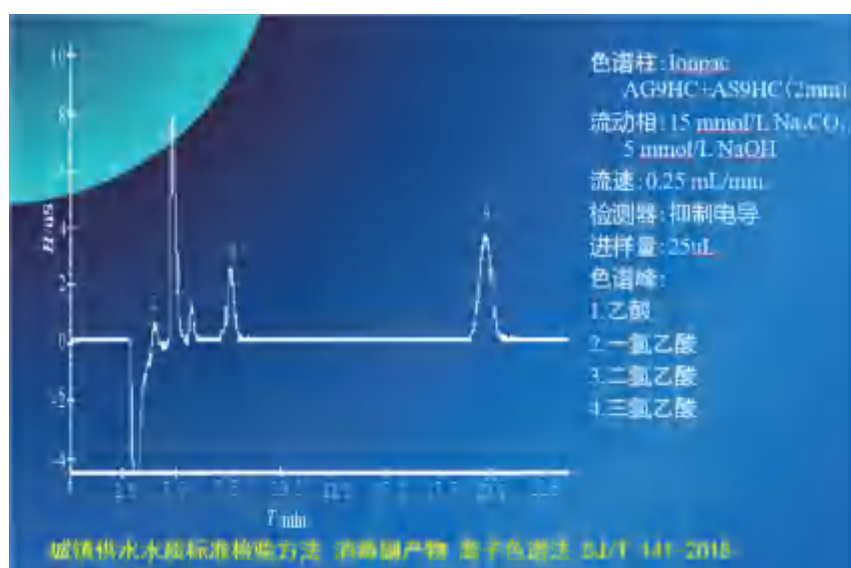
（4）草甘膦（国家地下水工程考核样）



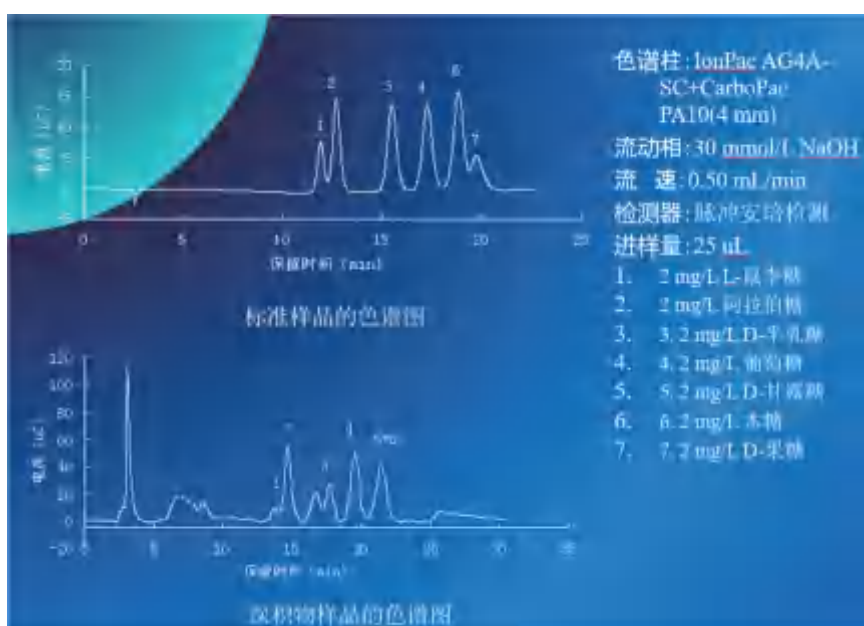
第五章 离子色谱发展趋势

近年来离子色谱发展一个趋势：分析生命科学研究中，有大量水溶性、可电离的有机化合物。目前解决 HPLC 方法难解决的分析问题；糖类分析，比示差折光检测器灵敏度提高几个数量级；氨基酸分析，首次采用非衍生化的直接检测；抑制器除盐使离子色谱与质谱、原子荧光更容易匹配（无机砷、六价铬）；大量无紫外吸收化合物，离子色谱提供了可靠的分析方法（如胺基糖类抗生物类分析已经作为欧洲药典）。

（1）卤代乙酸的分析



(2) 沉积物中痕量糖类分析



第六章 总 结

离子色谱是高效液相色谱的一种模式，主要用于阴、阳离子的分析。对难以用其他仪器和方法分析的常见阴离子、阳离子、小分子有机酸等组分的分析，离子色谱具有选择性独特、可同时分析多组分、很少用有机试剂等突出优点。

离子色谱自 1975 年问世以来发展很快，在自然资源、环境监测、食品分析、工业生产、地质环境、生化医药等领域得到广泛应用。

本教材对离子色谱的定义、发展历史、原理及仪器结构进行了介绍，结合实际测试案例，对离子色谱在地质测试中的应用及发展前景进行了介绍。

基于地球系统科学范式的浙江省基础地质调查研究

周宗尧

一、范式理论与地质学的范式革命

范式的概念和理论由美国著名科学哲学家托马斯·库恩于 1962 年在其经典著作《科学革命的结构》一书中提出，是指科学赖以运作的理论基础和实践规范，是从事某一科学的研究群体所共同遵从的世界观和行为方式。范式从本质上讲是一种理论体系，是一种公认的模型或模式。在科学实践活动中某些被公认的范例——包括定律、理论、应用以及仪器设备统统在内——为某种科学研究传统的出现提供了模型，也是范式（图 1）。



图 1 托马斯·库恩和他的《科学革命的结构》

“范式”的英文“Paradigm”，源自希腊词“Paradeig-ma”，意指“模范”或“模型”。托马斯·库恩对科学发展持“历史阶段论”，认为每一学科发展阶段都有特殊的内在结构，而体现这种结构的模型即范式。Paradigm(范式)是一个领域中主流的行事套路，它包括 philosophy(理念)和 methods (方法)两部分。Philoso-phy (理念)是指，什么该做，什么不该做，以及方式。Methods (方法)就是具体的操作。paradigm (范式) = philosophy (理念) + methods (方法) = 主流认为什么事该做 + 方式 + 方法。

(一) 范式的特点

范式在一定范围内具有公认性，是一个由基本定律、理论、应用以及相关的仪器设备等构成的一个整体，它的存在给科学工作者提供了一个研究纲领，为科学研究提供可模仿的成功先例。

范式归根到底是一种理论体系，范式的突破导致科学革命，从而使科学获得一个全新的面貌。

科学发展有特殊的内在结构，而体现这种结构的模型即“范式”。范式，表示一个科学发展阶段的模式，如亚里士多德的物理学之于古代科学，托勒密天文学之于中世纪科学，伽利略的动力学之于近代科学的初级阶段，微粒光学之于近代科学的发达时期，爱因斯坦的相对论之于当代科学。

库恩认为范式是指“特定的科学共同体从事某一类科学活动所必须遵循的公认的‘模式’，它包括共有的世界观、基本理论、范例、方法、手段、标准等等与科学研究有关的所有东西。”即指在科学领域中的思维的方式。

（二）范式三种类型

英国学者玛格丽特·玛斯特曼（Margaret Masterman）对库恩的范式观作了系统的研究（1987），他从库恩的《科学革命的结构》中列举了 21 种不同含义的范式，并将其概括为三种类型或三个方面：一是作为一种信念、一种形而上学思辨，它是哲学范式或元范式；二是作为一种科学习惯、一种学术传统、一个具体的科学成就，它是社会学范式；三是作为一种依靠本身成功示范的工具、一个解疑难的方法、一个用来类比的图像，它是人工范式或构造范式。

社会学家乔治·瑞泽尔（George Ritzer）看来：“范式是存在于某一科学论域内关于研究对象的基本意向。它可以用来界定什么应该被研究、什么问题应该被提出、如何对问题进行质疑，以及在揭示我们获得的答案时该遵循什么样的规则。”

（三）范式的本质与含义

范式概念是库恩范式理论的核心。库恩指出：按既定的用法，范式就是一种公认的模型或模式。库恩提出这个概念的目的是想说明，在科学实践活动中某些被公认的范例——包括定律、理论、应用以及仪器设备等——为某种科学研究传统的出现提供了模型。在库恩看来，范式是本体论、认识论和方法论的综合体，是科学家集团所共同接受的一组假说、理论、准则和方法的总和，这些东西在思想上形成科学家的共同信念。

虽然范式的首要含义在哲学方面，这是库恩范式的基本部分，但是，库恩的独到之处在于范式的社会学含义和构造功能。与一般科学哲学思维的抽象性相反，库恩特别强调科学的具体性，并把具体性看作是科学的基本特性，因为他认为，一套实际的科学习惯和科学传统对于有效的科学工作是非常必要和非常重要的，它不仅是一个科学共同体团结一致、协同探索的纽带，而且是其进一步研究和开拓的基础；不仅能赋予任何一门新学科以自己的特色，而且决定着它的未来和发展。这样一来，库恩也就把具体性作为自己哲学思想的核心，在实际的“图像”、“模型”和“哲学”之间划了一条界限，使自己的思想与其他科学哲学区别开来。

库恩的范式就是这种实际的“图像”和“模型”，它不仅使常规科学解疑的活动得以完成，从而成为开启新学科的契机和手段，并在应用模型和形而上学之间建立起一种新的相互关系，解决了从一般哲学理论转向实际科学理论的途径问题。

（四）地质学的范式革命

科恩的“范式”理论是现代自然科学和社会科学中的整体观和系统方法论在哲学上的反映(《自然辩证法》)。地质学学科领域，范式革命在大地构造理论的建立、完善与发展中表现得尤为明显。这主要得益于大地构造学专注于全球尺度上的宏观地质构造认识与研究。大地构造学几乎囊括了地质学的所有分支科的研究成果。根据大地构造理论的发展历程与人类地球科学认知思想与方法的变革，地质学的范式革命可以大致划分为以下四个阶段：

1. 早期朴素的地球认知阶段

这一时期自人类的起源到文艺复兴之后、现代自然科学启蒙时期为止，人类对于地球的认知主要是来源于生存的需要。从地表采集岩石与矿物，制造工具，改进生产方式，以获取足够的食物与必要的安身之所，保障生存与繁衍的需要。人类先后经历旧石器时代、新石器时代、青铜器时代、铁器时代，最终发展为成熟的农业文明社会。

2. 地槽-地台理论范式

1857年霍尔首次提出在大陆边缘地壳下拗，开始是接受沉积，继而转化为造山带的观点。J.D. 丹纳在霍尔的认识之上发展形成了地槽学说。地槽是地壳活动强烈的地带，在地表呈长条状分布，升降速度快，幅度大，接受巨厚的沉积并有复杂的岩相变化，褶皱强烈，岩浆活动频繁。地台一词则由奥地利地质学家休斯提出，指地壳较为稳定的区域，升降速度和幅度较小，构造变动和岩浆活动较弱。由于前身系由地槽演化而来，故其下部为紧密褶皱和变质基底；上部沉积薄盖层，常形成宽阔的褶皱，构造形态较地槽简单。地槽经过强烈隆升运动后，活动性减弱，长期剥蚀夷平后逐渐转化为地台。

槽台说的基本论点是：地壳运动主要受垂直运动控制，地壳此升彼降造成振荡运动，而水平运动则是派生或次要的。驱动力主要是地球物质的重力分异作用。物质上升造成隆起，物质下降则造成凹陷。主要的构造单元有地槽和地台两类，地台是由地槽演化而来的。

槽台理论的提出，是地质学发展史上一次重要的范式革命，标志着人类从朴素的地学认知阶段，进入到拥有一套全新大地构造理论指导，采用一套完整的地质研究方法开展地学研究的新阶段。

3. 板块地质学范式

槽台理论尽管直到现在还有广阔的市场，但是由于其极少涉及海底构造，研究的对象主要是大陆地壳表层，具有一定的局限性。特别是新的调查研究发现一系列新的地质现象，槽台理论无法很好地解释，从而催生了地质学的范式革命——板块地学的诞生。

1912年，德国气象学家A·魏格纳（1880—1930）在总结前人有关大陆漂移认知的基础上，提出一种大地构造假说——大陆漂移说，引起球界科学界的重视。20世纪30年代末，尤其是第二次世界大战结束以来，国际海洋考察取得一系列重大发现，迪茨和赫斯据此各自提出了海底扩张假说。为解释大陆漂移的动力学机制，板块地质学理论应运而生。该理论认为，地球的岩石圈是

由板块拼合而成；全球可分为六大板块（1968 年法国勒皮雄划分），海洋和大陆的位置不断变化。板块构造学说可以很好地解释全球火山和地震带的分布和大洋中脊的形成、矿床的分布和各种大型地貌的形成与分布特征等地质现象，从而为地学界所普遍接受。地质学家进一步研究认为，地幔柱的活动与地幔对流，是驱动板块运动的主要动力学机制。

4. 地球系统科学范式

为顺应当代社会全人类面临的全球变化与可持续发展需要，人们越来越清晰地发现，依靠某一单一学科的力量，远不能解决人类面临的全球性环境变化与突发性或累积性的全球性灾害问题。依托于全球变化的观测与研究成果以及地球科学各相关学科的进步，地球系统科学应运而生。目前，这一学科理论尚处于发展阶段，它是基于系统科学思想，针对地球这一复杂的巨系统，融合自然科学与社会科学最新研究成果，形成的关于行星地球的物质组成、结构构造、发展演化与灾害预警的科学，也是地质学的一次全新的范式革命。

进入 21 世纪以来，地球科学发展到“地球系统”新阶段，强调地球岩石圈、水圈、大气圈和生物圈之间的相互作用，进而从整体地球系统的视野，对地球各圈层的相互作用过程和机理进行研究。当前更多的对地观测体系（卫星、地表台站等），更精细的时空分辨率以及更强的数据处理能力（超级计算机），促进了人类对地球的科学认知，增强了人类适应全球环境变化的能力，并服务于可持续发展。

地球系统科学理念与我国正在推进的生态文明建设理念高度契合，已在地矿、国土、测绘、气象等领域与自然资源系统引起广泛影响。2016 年 9 月，原国土资源部发布《国土资源“十三五”科技创新发展规划》，明确提出“三深一土”科技创新目标：即开展“深地探测、深海探测、深空对地观测战略，科技领域创新能力跻身先进国家行列，土地科技水平显著提升……”2017 年，国家机构改革之后，自然资源部成立，根据新使命、新职责、新目标、新任务和新要求，系统内外凝聚共识，2018.10 月出台了《自然资源科技创新发展规划纲要》，首次提出构建地球系统科学核心理论支撑；引领深地探测、深海探测国际科学前沿；打造自然资源调查监测技术体系、国土空间优化管控技术体系、生态保护修复技术体系。即明确了“一核、两深、三系”科技创新方向，标志着地质学的地球系统科学范式革命在我国正式启动。

二、地球系统科学理论简介

（一）基本概念

地球系统指由大气圈、水圈、陆圈（地壳、地幔、地核）和生物圈（包括人类）组成的有机整体（图 2）。

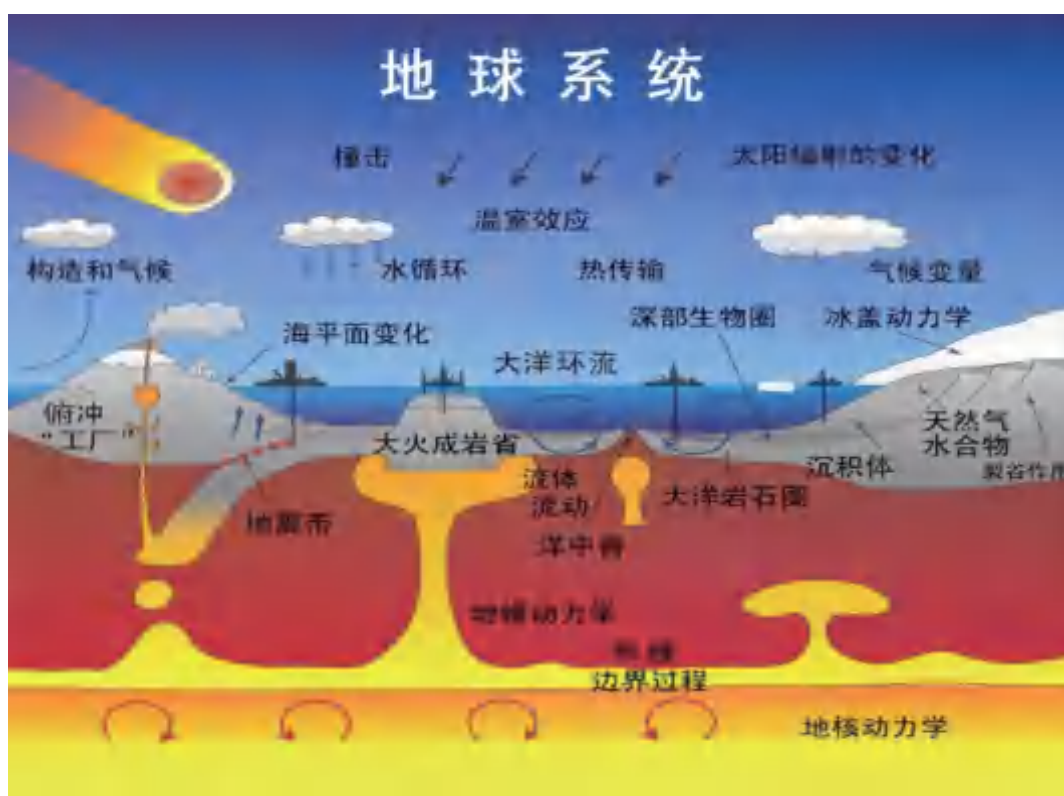


图 2 地球系统的组成与地质作用过程

地质学 (geology) 是关于地球的物质组成、内部构造、外部特征、各层圈之间的相互作用和演变历史的知识体系。是研究地球及其演变的一门自然科学。

地理学 (geography) 是研究地球表层空间地理要素或者地理综合体空间分布规律、时间演变过程和区域特征的一门学科，是自然科学与社会科学的交叉，具有综合性、交叉性和区域性的特点。随着地理信息技术发展与研究方法变革，地理学正在向地理科学转身，研究主题更加强调陆地表层系统的综合研究，研究范式经历着从地理学知识描述、格局与过程耦合，向复杂人地系统的模拟和预测转变。

地球科学 是以地球各圈层相互作用及其资源与环境效应为研究对象，多学科交叉融合的一门科学。地球科学既研究过去，阐述地球演化历史，又面向未来，为人类可持续发展提供解决方案，是一门既能拓展人类知识前沿又能服务于人类社会经济发展的综合性、系统性的科学。

地球系统科学 是利用系统科学理论和方法研究地球各圈层之间的物质和能量交换以及它们的相互作用和反馈的科学，是人类应对可持续发展挑战的科学。主要研究地球各圈层的物质组成、结构分布、各圈层内部及之间一系列相互作用过程和形成演变规律，以及与人类活动相关的全球变化，为人类认知地球和绿色可持续发展提供科学支撑，以应对全球环境变化所带来的挑战。研究组成地球系统的这些子系统之间相互联系、相互作用中运转的机制，地球系统变化的规律和控制这些变化的机理，从而为全球环境变化预测建立科学基础，并为地球系统的科学管理提供依据。地球系统科学研究的空间范围从地心到地球外层空间，时间尺度从几百年到几百万年。

3S 技术是遥感技术（Remote sensing, RS）、地理信息系统（Geography information systems, GIS）和全球定位系统（Global positioning systems, GPS）的统称。

（二）地球系统科学发展的历程

1. 地球系统科学思想的萌芽

生物圈、生物地球化学的创始人，前苏联著名地球化学家维尔纳茨基（1863-1945），认为生物是地质营力的一部分，地圈与生物圈协同演化。他说：“生命并非地表上偶然发生的外部演化。相反，它与地壳构造有着密切的关联，没有生命，地球的脸面就会失去表情，变得像月球般木然。”



图 3 维尔纳茨基及其著作

二十世纪七十年代，英国气象学家洛夫洛克认为生物与地球组成了一个类似生物的有机体，其拥有一个全球规模的自我调节系统，是一个“超级有机体”，强调生物圈对全球环境的调节作用，认为地球表面的气候和化学成分，由生物圈维持在一个最适宜生物圈的动态平衡中，并用希腊神话中大地女神“Gaia 盖娅”命名这个控制系统（图 4）。

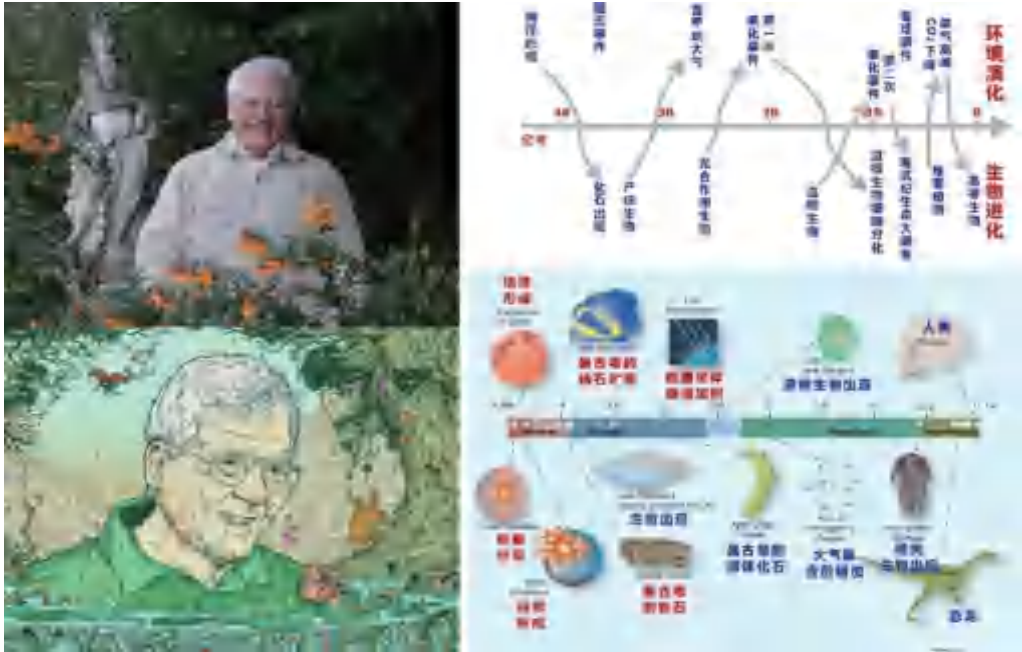


图 4 洛夫洛克及地球演化简史

2. 地球系统科学概念的提出

1980 年代中期以来,地球科学发展迅猛,科学家明确提出地球物理过程与生物过程相互作用的观点,进而形成了地球系统的思想。1983 年美国国家航空航天局(NASA)最早提出地球系统科学的概念,并建立建立“地球系统科学委员会”。1988 年 NASA 出版了“E-arth System Science: A Closer View”。其中著名的“Brethert-on 图”,展示了大气、海洋、生物圈之间,物理过程和生物地球化学循环的相互作用,标志着“地球系统科学”思想正式确立。1990 年代,地球系统观逐渐成为地学界共识,美国、英国、日本等国纷纷制定相关计划,更促使了这一学科的蓬勃发展。美国已有 22 所大学将地球系统科学教育纳入课程体系,联合国的《21 世纪议程》更将地球科学作为可持续发展战略的科学基础之一。

总之地球系统科学脱胎于传统的地球科学,顺应解决人类面临的生存环境危机——全球变化带来的严峻挑战而兴起。

3. 地球系统科学研究现状

要解决地球系统科学的在面临的重大突出问题,需要有跨过学科边界的有效和持续合作。基于这一思想,英国自然环境研究委员会(NERC)于 2002 年 12 月提出了一项地球系统科学研究计划——量化并理解地球系统(QUEST)计划,并于 2004 年 7 月发布了该计划的科学计划和实施计划。QUEST 计划为期 6 年(2003-2009 年),其主要目标是提高对地球系统中大尺度过程及其相互作用的定性和定量理解,特别关注大气、海洋、陆地中的生物、物理和化学过程之间的相互作用以及人类活动与它们之间的复杂关系。QUEST 计划主要集中于三个研究主题:现今的碳循环及其与气候和大气化学之间的相互作用;大气成分在冰期-间冰期和更长时间尺度上的自然变化;全球环境变化对资源可持续利用的影响后果。

德国联邦政府教育与研究部和德国科学基金会(DFG)共同策划制定了 15 年(2000-2015 年)的超大型研究计划——地球工程学,并已于 2000 年 3 月就正式定稿和招标实施。地球工程学是把地球整体作为研究对象,该计划有助于从地史时期的发展过程研究中探索地球的未来状况。在这个计划中,进一步明确了地球科学的任务,即与其他科学进行学科间合作,在工业方面为解决紧迫的、与社会发展关系重大的问题和生态问题做出贡献。该计划的研究目标是认识这些过程及其相互变化关系,以及评估人类对于自然平衡和自然循环的影响。

2001 年 1 月,中国科学院院长路甬祥把对“地球系统整体行为的集成研究”列为 21 世纪科学家要面对的第九大挑战。2002 年 10 月,温家宝在中国地质学会 80 周年纪念大会上讲话时也强调,必须实现传统地质工作向以“地球系统科学”为核心内容的现代地质工作的转变。自然科学基金委地学部也于 2002 年 3 月提出了 21 世纪初的地球科学战略重点,拟定了“以地球系统各圈层的相互作用为主线,从我国具有优势的前沿领域寻找主攻目标”的优先资助领域战略。

（三）地球系统剖析



图 5 地球随时间的演化

地球是一个物质与能量不断相互作用下的一个非常复杂的非线性系统，它可以被划分为几个基本的圈层，各圈层之间彼此交错相互影响，圈层之间及内部随时间的相互作用构成了地球的演化（图 5）。

1. 宇宙的起源与地球的诞生

根据约翰法恩登的《地球百科》（1998，图 6），宇宙形成于约 150 亿年前的大爆炸，银河系约 100 亿年前诞生，太阳系约 50 亿年前形成，地球和月球形成于约 45 亿年前。

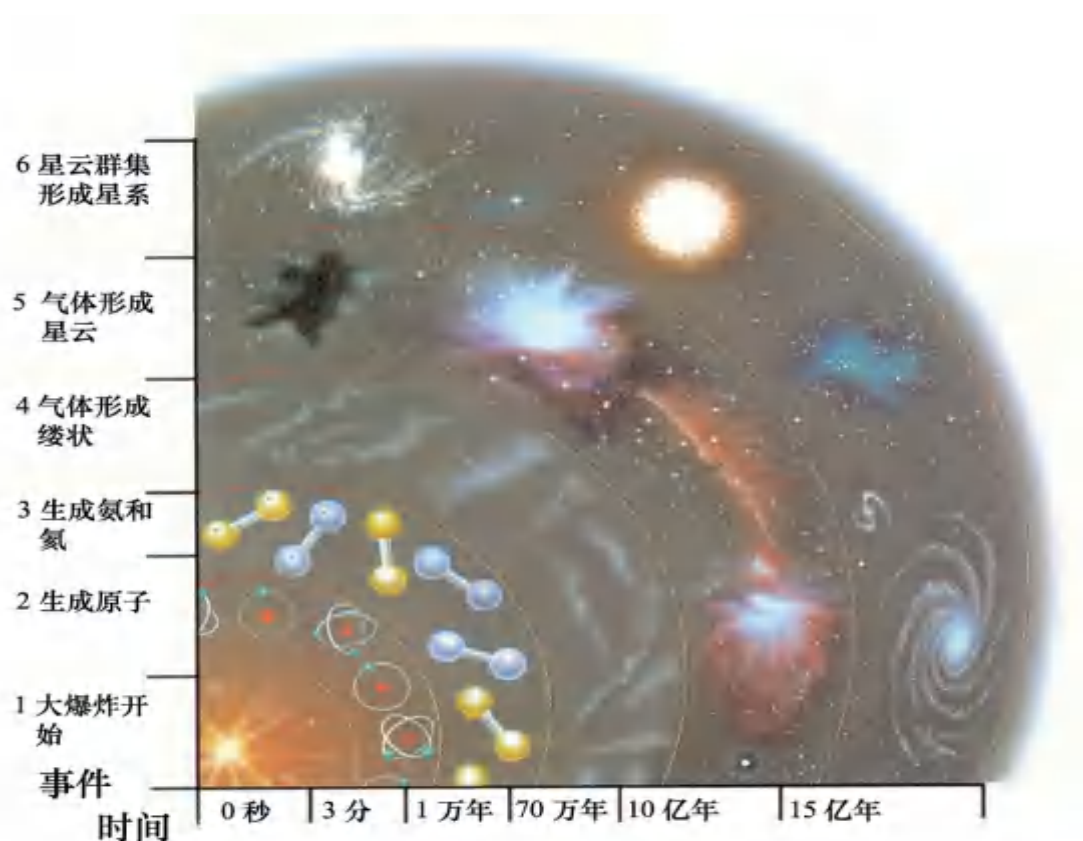


图 6 宇宙大爆炸最初 15 亿年

在经历最初的超新星爆炸、引力塌陷、物质碰撞、结晶、聚集之后，地球最终被太阳俘获，并绕日旋转。大约 45 亿年前，地球斜向受其它星体撞击产生月球。约 44.5 亿年前，最初均质地球形成，表面为岩浆海覆盖，约 43.5 亿年前开始出现大气和海洋。之后地球逐渐分异，形成地核与地幔。至 38 亿年前，陨石激烈撞击末期，地表逐渐变冷，地幔对流开始出现，并出现最早的生命化学印迹。至此，最初的具有明显圈层结构的地球系统初步形成（图 7）。

在地球形成之初，由于小星体加积，星体之间的引力势能及其动能因碰撞转化为热能，加上放射性物质含量高，衰变速率快，产生大量的热能。内动力地质作用十分发育，表层地球被岩浆海所覆盖，逐渐分异出地壳，地幔和地核。相比较而言太阳的较为昏暗，外动力地质作用较弱。现今地球在板块构造体制下，内动力地质作用依然很活跃，同时太阳光度增强，外动力地质作用也非常活跃（图 8、9）。

太阳系中地球的诞生

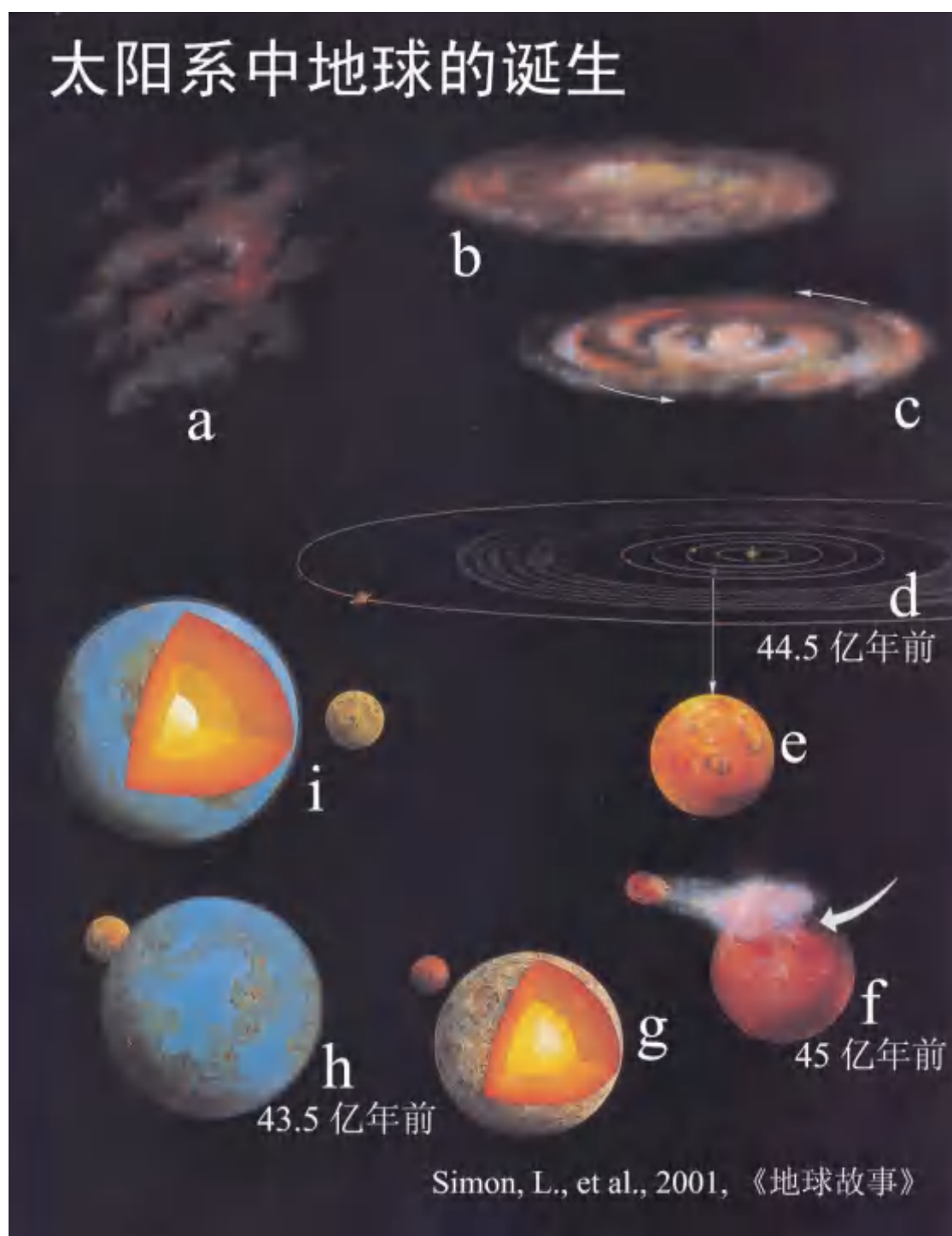


图 7 地球的诞生

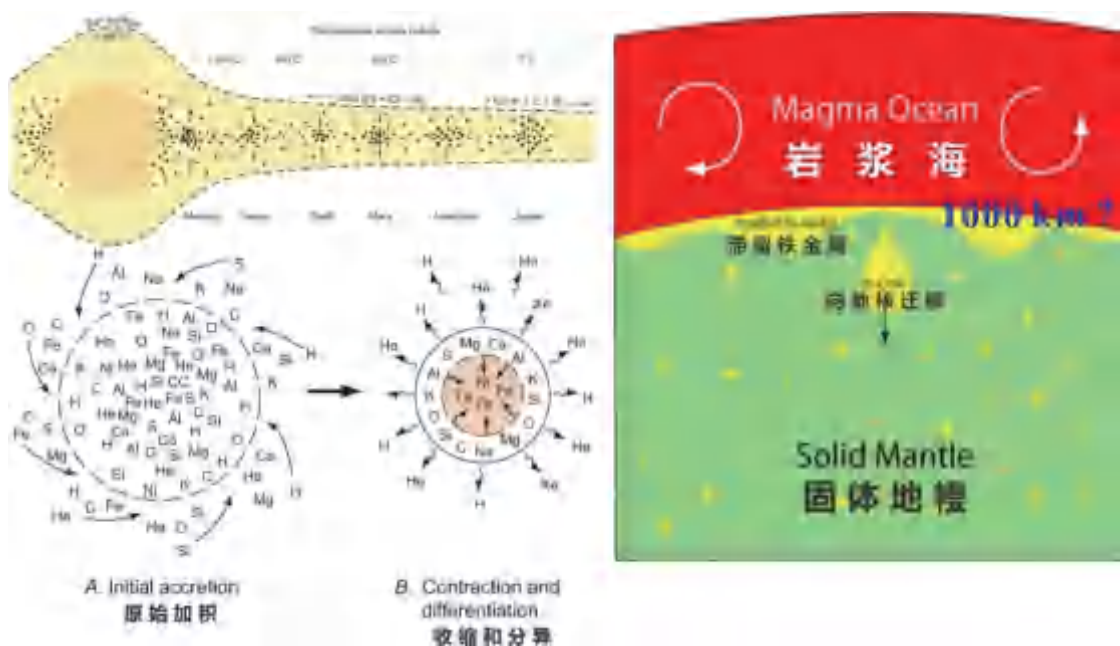


图8 地球形成初期的地质作用

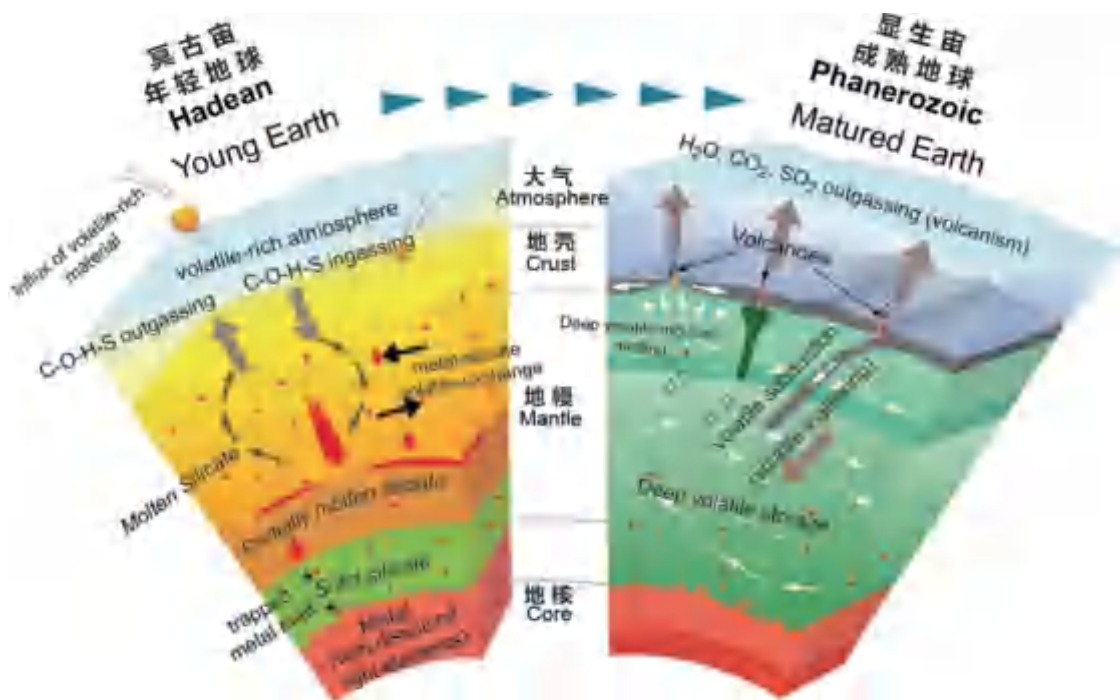


图9 不同时期具有不同的地质过程

2. 地球的圈层结构

地球系统指由大气圈、水圈（含冰冻圈）、地圈（含地壳、地幔和地核，图10）、土壤圈和生物圈（包括人类）组成的有机整体。地球作为一个由多时、空尺度过程构成的复杂巨系统，在空间上表现为多圈层体系。地球各圈层（岩石圈-土壤圈-大气圈-水圈-生物圈）、各过程（生物过程、物理过程、化学过程）、各要素（如：山水林田湖草海）之间相互作用、相互联系、连锁响

应。地球系统科学主要研究各圈层的物质组成、结构分布、各圈层内部及之间一系列相互作用过程和形成演变规律，以及与人类活动相关的全球变化，为人类认知地球和绿色可持续发展提供科学支撑，以应对全球环境变化所带来的挑战。

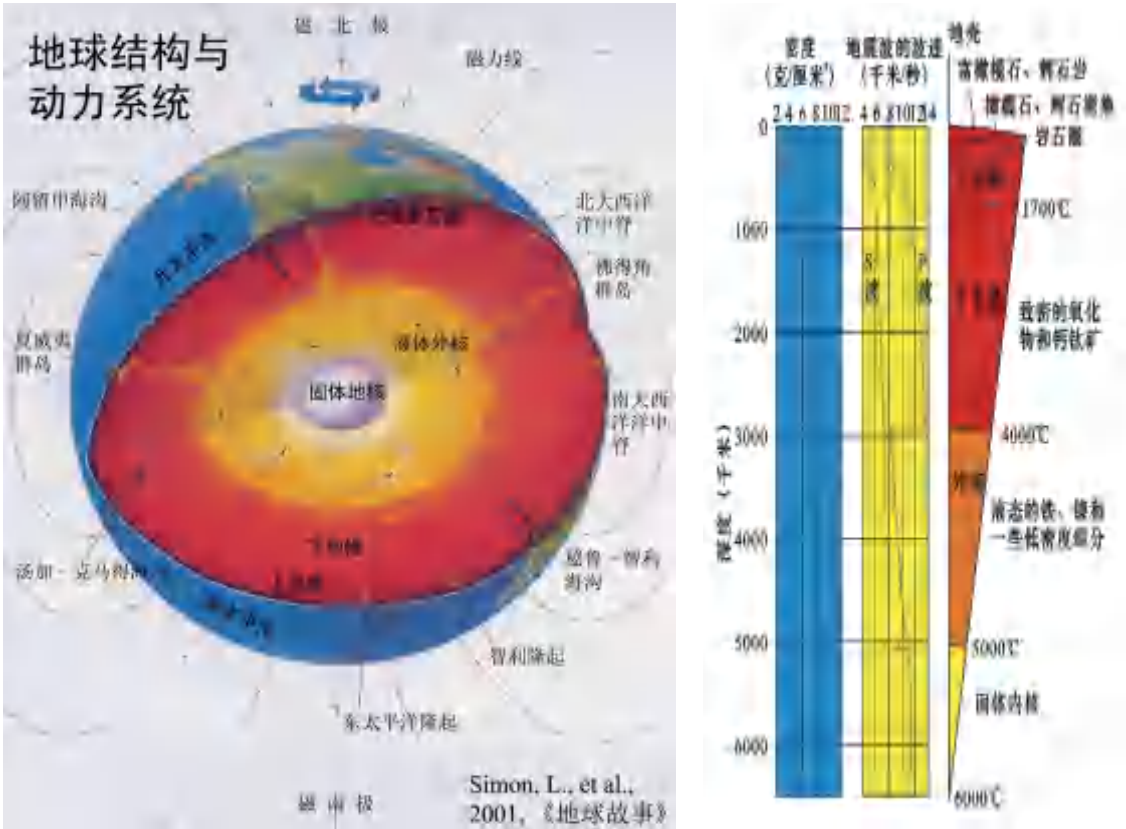


图 10 地球圈层构成

3. 地球系统的能量来源

地球系统的演化主要受内动力地质作用和外动力地质作用的共同驱动，主要有两个能量输入体系：一个是太阳在核聚变过程中向太阳系释放的太阳辐射能量，直接影响着地球气候变化、生物光合作用和岩石风化剥蚀等地球表层系统过程，是外动力地质作用最主要的能量供给；另外一个 是地球内部放射性物质衰变、物质向地球深部迁移释放的重力势能和矿物结晶等释放的热量，对大陆漂移、海底扩张、板块运动、岩浆活动、地震作用、变质作用和构造运动等过程产生影响，是内动力地质作用最主要的能量供给（图 11）。

现为：全球气候变暖（Global Warming）、酸雨（Acid Deposition）、臭氧层破坏（Ozone Depletion）。环境风险包括海平面上升、农业减产和生态灾害、自然灾害加剧、影响人类健康等。一般认为 CO₂、CH₄ 作为最主要的温室气体，是导致全球变暖的主要原因。

美国斯克里普斯海洋研究所的 Charles David Keeling 于 1958 年，在夏威夷 MaunaLoa 火山顶部持续采样，检测大气 CO₂ 浓度，发现 CO₂ 浓度已经由 1958 年的 318ppm 上升到目前的 411ppm，是近 80 万年来 CO₂ 浓度最高值，冰期 CO₂ 浓度最低只有 185ppm，因此这条著名的大气 CO₂ 浓度变化曲线又被称为“Keeling 曲线”（图 12）。

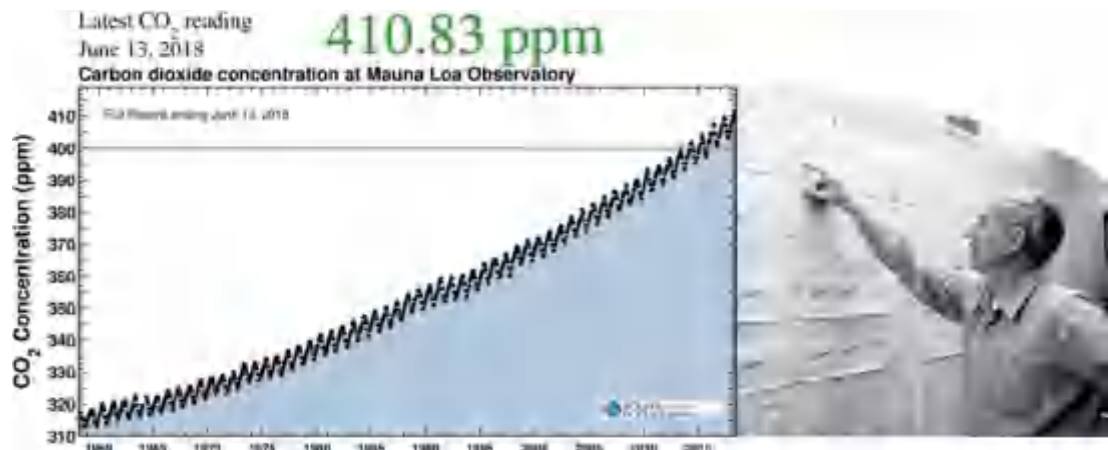


图 12 DavidKeeling 及 Keeling 曲线

对于全球气候变化在气象科学界与地质学界是有争议的，有部分科学家认为其实全球气候的发展趋势是变冷，认为全球气候变暖的科学家们意见也有分歧，有一部分认为这是地球气象周期的规律，一部分认为是太阳辐射变化的影响，人为因素的影响很小，但联合国和主流国家都认为温室气体排放是全球气候变暖的主因（图 13），2012 年，16 位科学家共同发表文章对二氧化碳导致全球变暖一说提出质疑。

大部分科学家都认为全球变暖会使全球降水量重新分配、冰川和冻土消融、海平面上升等，不仅危害自然生态系统的平衡，还威胁人类的生存。由于陆地温室气体排放造成大陆气温升高，与海洋温差变小，进而造成了空气流动减慢，雾霾无法短时间被吹散，很多城市雾霾天气增多，影响人类健康。汽车限行，暂停生产等措施只有短期和局部效果，并不能从根本上改变气候变暖和雾霾污染。

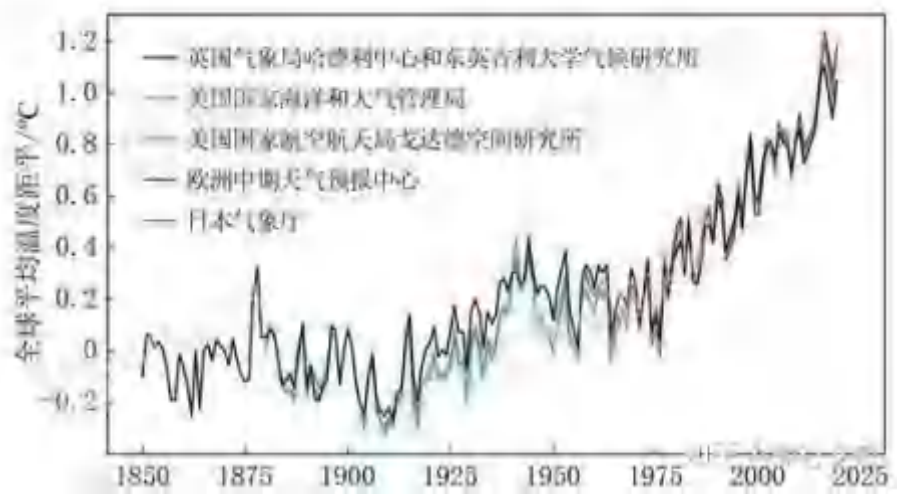


图 13 全球各研究机构对地球平均气温变化的研究

为了控制全球变暖趋势，地球上的各个国家签署了多项联合协议，包括：《联合国气候变化框架公约》《京都议定书》《巴黎协定》。联合国认可温室气体排放导致全球气候变暖的观点，所以控制全球变暖趋势的主要努力目前变成了减少碳排放和实现碳中和这两个主要目标。

（2）南极臭氧层空洞的发现

1985 年，英国科学家 Farman 等人总结他们在南极哈雷湾观测站自 1975 年来的观测结果，发现从 1975 年以来，南极每年早春（南极 10 月份）总臭氧浓度的减少超过 30%，在科学界引起震惊，从而使得南极臭氧层空洞问题广受关注。为此，1987 年世界多个国家签署《蒙特利尔议定书》，1989 年 1 月 1 日正式生效，1996 年，氯氟烃被正式禁止生产，截至目前臭氧层已经稳定下来并逐步开始恢复（图 14）。

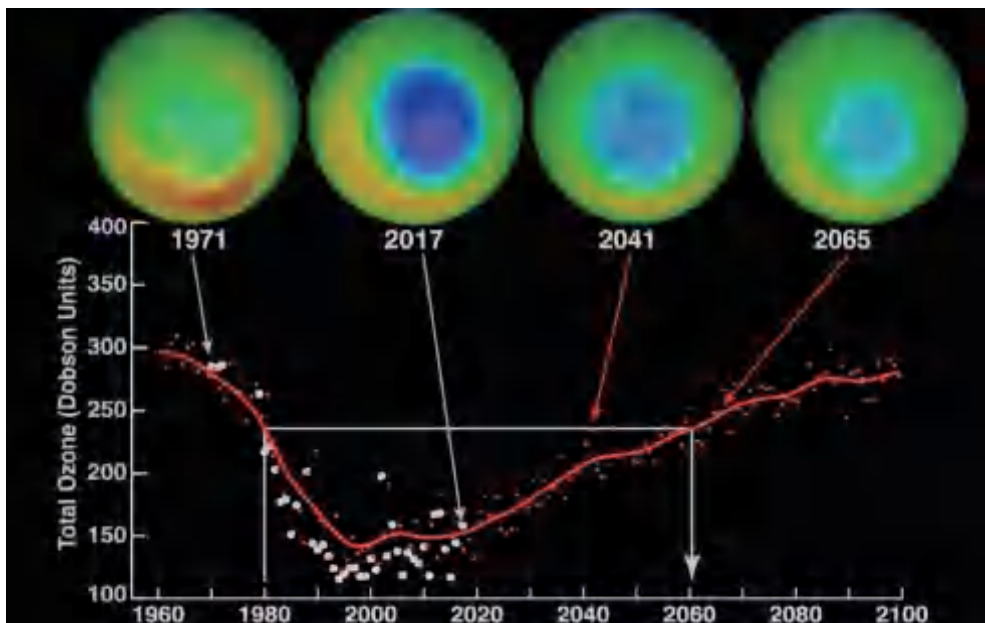


图 14 1971-2017 年南极臭氧层卫星图及其未来趋势预测

（3）火山与地震灾害

长期以来，突发性的火山爆发与高烈度的地震，都是人类面临的主要自然灾害，往往会造成全球性的影响与恐慌。即便是科技高度发达的今天，人类依然无法对火山的爆发与地震活动进行准确的预报，这需要地质科技工作者加强科技攻关，利用现代科技手段，加强火山活动与地震的监测，以减少人员伤亡与经济损失。大规模的火山喷发，火山灰有可能散落全球，并长期滞留大气平流层，影响全球气候与环境。海底地震，引发的海啸可能波及上万千米以远的海岸。这些全球性的灾害事件，仅靠单一的学科与技术力量无法解决，需要发展中的地球系统科学提供科学的解决方案。

2. 可持续发展与生态文明理念的传播向地球系统科学提出了新要求

可持续发展（Sustainable development）理论的形成经历了相当长的历史过程。20 世纪 50-60 年代，人们在经济增长、城市化、人口、资源等所形成的环境压力下，对“增长=发展”的模式产生怀疑。1962 年，美国女生物学家 Rachel Carson（莱切尔·卡逊）发表了一部引起很大轰动的环境科普著作《寂静的春天》，作者描绘了一幅由于农药污染所事业的可怕景象，惊呼人们将会失去“春光明媚的春天”，在世界范围内引发了人类关于发展观念上的争论。

10 年后，两位著名美国学者 Barbara Ward（巴巴拉·沃德）和 Rene Dubos（雷内·杜博斯）享誉全球的著作《只有一个地球》问世，把人类生存与环境的认识推向可持续发展的新境界。同年，一个非正式国际著名学术团体——罗马俱乐部发表了有名的研究报告——《增长的极限》（The Limits to Growth），明确提出“持续增长”和“合理的持久的均衡发展”的概念。1987 年，以挪威首相 Gro Harlem Brundt land（布伦特兰）为主席的联合国世界与环境发展委员会，发表了一份报告——《我们共同的未来》，正式提出可持续发展概念，并以此为主题对人类共同关心的环境与发展问题进行了全面论述，受到世界各国政府组织和舆论的高度关注。1992 年联合国环境与发展大会上，“可持续发展”理论得到了全世界不同经济水平和不同文化背景国家的普遍认同，为《21 世纪议程》顺利通过奠定了理论基础（图 15）。

根据《我们共同的未来》，“可持续发展”被定义为“既满足当代人的需求又不危害后代人满足其需求的发展”，是一个涉及经济、社会、文化、技术和自然环境的综合的动态的概念。该概念从理论上明确了发展经济同保护环境和资源是相互联系，互为因果的观点。

2012 年 11 月，中国共产党第十八次全国代表大会从新的历史起点出发，做出“大力推进生态文明建设”的战略决策，从 10 个方面绘出生态文明建设的宏伟蓝图。生态文明建设本质上就是把可持续发展提升到绿色发展高度。建设生态文明，昭示着人与自然的和谐相处，意味着生产方式、生活方式的根本改变。习近平总书记说，“人与自然是生命共同体，人类必须尊重自然、顺应自然、保护自然”。生态文明建设理念是可持续发展理论的继承和发展，是可持续发展理论在中国的实践，二者对地球系统科学的发展提出了明确的要求。



图 15 可持续发展理论

3. 人类世概念的提出，打破了自然科学与社会科的界限

工业革命以来，人类活动对气候及生态系统造成全球性影响，人类活动已经逐渐成为主要的地质营力（人的地质作用），主要体现在四个方面：**一是**地质沉积率的变化（Changes to Physical Sedimentation）。人类使得陆地上的侵蚀和风化大大加速。地球 30%-50% 的陆地资源已经被人类所占用，大约 12% 的地球表面被用来耕种作物。直接的表现是农业和各类建筑物，间接的表现是修建大坝改变河道。人类引发的风化率比自然风化率高出一个数量级。**二是**生物变化（Biotic Change）。人类造成了很多生物的灭绝。物种的加速灭绝和生物数量的下降，已经从陆地蔓延到了海洋，这种生物种群的变化速度堪与冰河期来临时相提并论。**三是**碳循环的波动和气温变化（C-carbon Cycle Perturbation and Temperature）。大气中的 CO_2 含量是将近 1000 万年以来的最高值。保守预测，到 21 世纪末期，这个含量还将翻倍。大气中的 CH_4 含量已经比工业革命前翻了一倍。预测 21 世末的气温，将比现在高 1.1°C 到 6.4°C ，这将是 6000 万年以来的最高气温。此外，还有酸雨，烟雾和全球气候变暖、臭氧空洞等问题。**四是**海洋的变化（Ocean Changes）。全新世早期，大量冰山崩塌引发海平面快速上升。从全新世开始前到工业革命前，海平面在 1 万多年中，大约上升了 120 米。预测到 2100 年，海平面将比现在上升 0.19–0.58 米。从长期来看，当达到新的均衡状态时，可能气温每上升 1 度，海平面就将上升 10-30 米。相比工业革命前，表层海水的 PH 值变小了 0.1，海水变得更酸性，海洋生态面临新的灾难。

1873 年，意大利地质学家安东尼奥·斯托帕尼（Antonio Stoppani）提出 Anthropozoic Era（人类代），称之为“人类世时代”，他指出人类是“一种全新的地球力量，世界将被这种更伟大的能量

主宰”。现代意义上的“人类世”概念，可以追溯到前苏联地球化学家弗拉基米尔·韦尔纳德斯基（Vladimir Vernadsky），他把人类日益增长的影响力称为“进化发展的自然方向，对周围环境有意识影响的效果越来越明显”，他提出了一个当时看来十分激进的概念——“人类圈”。

一般认为，“人类世（Anthropocene）”这个概念最早由诺贝尔化学奖得主、荷兰大气化学家保罗·克鲁岑（Paul Crutzen）和 Eugene Stoermer 于 2000 年提出。2008 年，英国地质学家、莱斯特大学地质学教授简·扎拉斯维奇和他的团队发动提案，认为地球已经进入“人类世”。2009 年，国际地层委员会旗下的第四纪地层学小组委员会设立人类世工作组（AWG），共由 34 名地质学、考古学、生物学、海洋学、气候学等学科专家组成，由英国莱斯特大学的简·扎拉斯维奇担任主席，负责考察和界定“人类世”。2011 年 5 月，约 20 名诺贝尔奖得主向联合国提交《斯德哥尔摩备忘录》，建议将人类现在所处地质年代定义为“人类世”。2016 年 8 月 29 日，第 35 届国际地质大会在南非召开，会议正式通过“人类纪”、“人类世”和“人类期”的概念。2019 年 5 月 21 日，34 名 AWG 成员投票，29 人同意地球已进入新地质时代——“人类世”，并指出 20 世纪中叶是“人类世”的起点。尽管国际地层委员会（ICS）、国际地科联尚未批准“人类世”这一新术语，然而，对于是否需要在全新世之后专门划分出“人类世”这一最新地质年代，在地层学、地质学、地球科学界，甚至地球系统科学内外，都产生了广泛、深刻的影响，引发了人们对于地球家园过去、现在和未来的深入思考。“人类世”概念的影响已远远超出了地质学界，而更像一个联系过去与未来，跨越自然科学与社会科学的概念。

4. 全球性的地球系统科学研究计划

地球系统科学是以全球性、统一性的整体观、系统观和多时空尺度，来研究地球系统的整体行为，使得人类能更好地认识自身赖以生存的环境，更有效地防止和控制可能突发的灾害对人类所造成的损害。地球系统科学在现代技术，尤其是空间技术和大型计算机发展后出现，致力于对地球的整体探索（观测—获取大数据—处理—共享）。它以地球科学许多分支学科的大跨度交叉渗透，与生命科学、化学、物理学、数学、信息科学以及社会科学的紧密结合为特征。其研究发展的特点是时空尺度大，综合性强，实用空间大，支持有效监测和预测，研究中大量采用高新技术，采集、存储、处理的数据量都极其巨大。为此，国际社会发起多个重大研究计划：

（1）国际全球变化研究计划

自二十世纪八十年代开始，国际科学界先后发起并组织实施了以全球变化与地球系统为研究对象，由四大研究计划组成的全球变化研究计划，即：世界气候研究计划（WCRP, World Climate Research Programme）、国际地圈生物圈计划（IGBP, International Geosphere-Biosphere Programme）、全球环境变化人文因素计划（IHDP, International Human Dimension of Global Environmental Change Programme）、生物多样性计划（DIVERSITAS）。进入新世纪，四大全球环境变化计划又联手建立了“地球系统科学联盟（ESSP）”（图 16）。

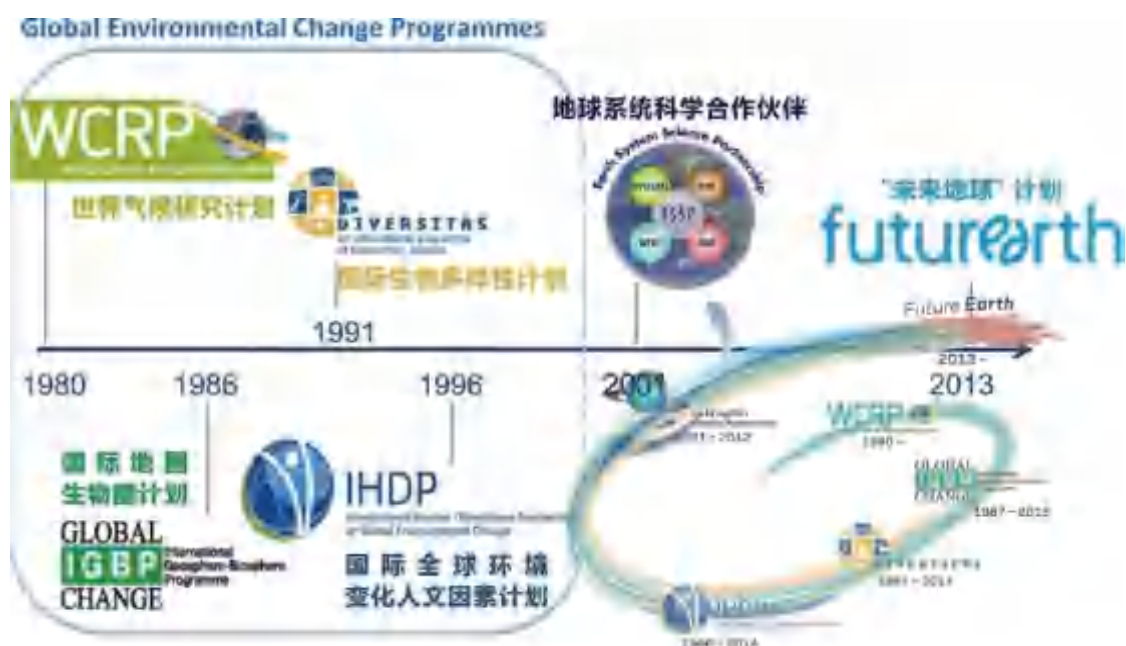


图 16 国际全球变化研究计划历史图解

（2）未来地球计划（Future Earth）

2014 年，为应对全球环境变化给各区域、国家和社会带来的挑战，加强自然科学与社会科学的沟通与合作，为全球可持续发展提供必要的理论知识、研究手段和方法，由国际科学理事会（ICSU）和国际社会科学理事会（ISSC）发起、联合国教科文组织（UNESCO）、联合国环境署（UNEP）、联合国大学（UNU）、Belmont Forum 和国际全球变化研究资助机构（IGFA）等组织共同牵头，组建了为期十年的大型科学计划“未来地球计划（FutureEarth）”。

未来地球计划（Future Earth）不但明确了重整国际全球变化研究组织的时间表和新的组织机构，更是为现有的国际全球变化四大计划和 ESSP 确定了消亡路线图和时间表。该计划旨在为全球可持续发展提供必要的关键知识，打破目前的学科壁垒，重组现有的国际科研项目与资助体制，填补全球变化研究和实践的鸿沟，使自然科学与社会科学研究成果更积极地服务于可持续发展，以应对全球环境变化所带来的挑战。

（3）政府间气候变化专门委员会（IPCC）

为应对全球气候变化及其对社会经济的潜在影响和人类应对策略，1988 年由联合国环境规划署（UNEP）和世界气象组织（WMO）共同成立了政府间气候变化专门委员会（IPCC）。IPCC 负责评审和评估全世界产生的有关认知气候变化方面的最新科学技术和社会经济文献，目前 IPCC 有三个工作组和一个专题组（图 17）。第一工作组的主题是气候变化的自然科学基础，第二工作组是气候变化的影响、适应和脆弱性，第三工作组是减缓气候变化。国家温室气体清单专题组的主要目标是制订和细化国家温室气体排放和清除的计算和报告方法。



图 17 IPCC 运作构架

（五）地球系统科学的理论基础与研究方法

地球系统科学将地球视为一个复杂的巨系统，重点研究地球各组成部分之间相互作用。研究目的是了解地球系统所涉及的过程，各组成部分之间的联系和相互作用，维持充足的自然资源供给，减轻或规避地质灾害，科学调节全球环境变化并使危害降到最小，获取在全球尺度上对整个地球系统的科学认知。

1. 地球系统科学的理论基础

系统科学理论是地球系统科学的核心理论基础。地球系统遵循系统论的整体性、层次性、开放性、目的性、突变性、稳定性、自组织、相似性 8 大基本原理。地球系统科学把地球当作一个系统，分析其结构和功能，研究地球系统、要素、环境三者的相互关系和变动的规律性。

除此之外，传统的地球科学各分支学科理论、现代自然科学理论（物理、化学、生物、数学）、关于人与自然的相互关系的社会科学理论、信息科学基础理论等共同构成地球系统科学的理论基础。总之，地球系统科学是可持续发展战略的科学基础，不仅要研究地球系统的自然规律，而且还要为社会发展规划提供科学依据。

2. 地球系统科学研究方法与技术

地球系统科学研究一般分为四个步骤：一是现象的观测和信息的获取、积累、储存、降噪与共享；二是对数据信息进行统计、分析、管理和解释，从物理、化学和生物学的规律出发，建立

有关地球过程的定量关系；三是建立概念模型和数学（数值）模型，并开展必要的实验；四是验证模型，并用通过检验的模型对未来的变化趋势进行统计预测和预报。

空间信息科学技术与超级计算机是地球系统科学的核心技术，早期以 3S 技术为代表，目前以 ABC 技术为发展方向。具体到研究的各个阶段，涉及以下方法与技术：一是信息获取与定位技术，包括航空航天遥感技术，深地、深海、深空探测技术，高精度、广时空域的测试分析技术，基于物联网的动态实时监测技术，全球定位技术（北斗、GPS 定位）等。二是数据处理技术，包括数据储存与管理技术（GIS），大数据与云计算技术，数值模拟技术，人工智能技术等。三是信息传输与储存技术，包括现代通信技术（5G、量子通讯），数据库技术等。四是信息成果展示技术，如 VR 虚拟现实、AR 增强现实、MR 混合现实、CR 影像现实等技术，元宇宙与可视化技术等。

数字地球是地球系统科学的数字表达。它是以地球系统为原型，以地球（地理）坐标为参考系，以地球系统科学、信息科学和计算科学为理论基础，通过建立一系列不同层次的原型、数学模型、物理模型、力学模型、信息模型和计算机模型并进行集成。以便于地球系统科学从定性向定量化发展。有望带来研究方法，手段的革命性变化。

三、基于地球系统科学范式的浙江省基础地质调查研究

地球系统科学与地质学之间，是整体与部分、全局与局部的关系，二者互为存在与发展前提。地球系统对各圈层子系统起支配、统率和决定作用；地质学的发展与进步反过来影响地球系统科学的发展变化。地质学在发展过程中，不断为地球系统科学注入新的信息、认知与理论成果（时间坐标、深时信息、物质基础）。地球系统科学在对地球系统的科学认识与地球演化的规律总结过程中，不断提出新的需求与思路、方向，引领包括地质学在内的相关学科不断发展进步。

（一）30 年来浙江省基础地质调查研究主要进展

以 1989 年第一轮《浙江省区域地质志》的出版为基点，30 余年来，浙江省基础地质调查研究的过程，也是浙江省地质认识以槽台论、地质力学理论指导，转向板块构造理论指导，由槽台范式向板块范式变革的过程。即将出版的新一代《浙江省区域地质志》，对浙江省 30 余年的基础地质调查成果进行了全面、系统的总结，这是浙江省基础地质调查研究开启地球系统科学范式革命的起点。

30 余年来，浙江省基础地质调查研究，在岩石学、地层学、构造地质学、火山地质学、第四纪地质学等诸多方面都取得了长足进步，主要表现在以下几个方面：

1. 地层学研究进展

地层学研究主要解决地球演化的时间坐标问题。30 余年来，浙江古生代生物-年代地层学研究取得世界领先的成果。国际地科联在浙江相继批准建立常山县黄泥塘达瑞威尔阶（图 18、19）、长兴县煤山长兴阶、印度阶、江山市寒武系江山阶 4 枚“金钉子”，使得浙江是世界上“金钉子”最集中分布的地区（全球 77 枚，中国 11 枚，截止 2021 年 5 月），为中国赢得了极高的学术声誉（中国地质大学武汉，中科院南京古生物所）。



图 18 黄泥塘金钉子剖面素描图（据梁文平绘制，2000）



图 19 黄泥塘金钉子剖面保护长廊及标志碑



图 20 上奥陶统赫南特阶下扬子区标准剖面笔石与海绵化石

2015 年全国地层委员会，批准在浙江安吉建立“上奥陶统赫南特阶下扬子区标准剖面”。该剖

面中首次发现超过 75 个属种的海绵动物群（图 20），为进一步认识全球赫南特期生物圈面貌、了解寒武纪生命大爆发之后海绵生物演化，提供了重要窗口，其成果已在《Current Biology》发表。

2. 古老碎屑锆石的发现及其意义

2015 年，浙江龙泉地区首次发现欧亚大陆最古老的冥古宙碎屑锆石（ $4127\pm4\text{Ma}$ ）和地球上最早的变质事件记录（ 4077Ma ）（图 21）。成果发表于《Nature Scientific Reports》，被评为“中国地质调查局、中国地质科学院年度地质科技十大进展”之一，对研究地球起源和全球早前寒武纪地质具有重大意义。

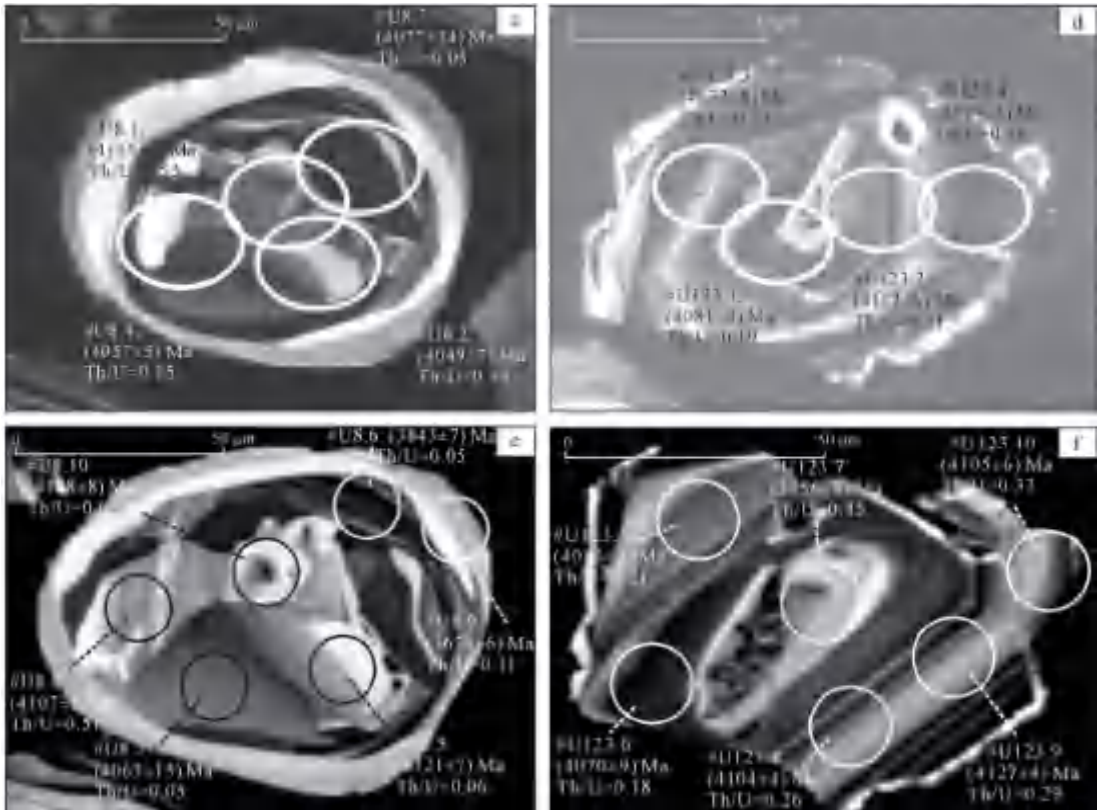


图 21 浙江龙泉地区发现碎屑锆石阴极发光图

3. 板块构造理论引导浙江大地构造认识进入新范式

浙江省矿产资源潜力评价阶段，袁强等人引入大地构造相概念，重新厘定了浙江省成矿地质背景。

地质志编制阶段，项目组引入了“洋板块地质学”理论，认为江山-绍兴、余姚-丽水拼合带为早古生代陆-陆碰撞带，提出浙江早古生代由扬子克拉通、武夷地块、东南地块及夹持其间的上述两条拼合带构成“两带三块”大地构造格局，为浙江深部能源及矿产资源探测提供了全新的理论基础。确定“陈蔡岩群”和“龙泉岩群”主体为新元古-早古生代洋壳地层系统组成的俯冲-碰撞增生杂岩，而非传统上认为的古老基底（图 22、23、24）。李廷栋院士等组成的专家组认为该理论成果“对浙江省地质构造、成矿地质背景调查研究具里程碑意义”。

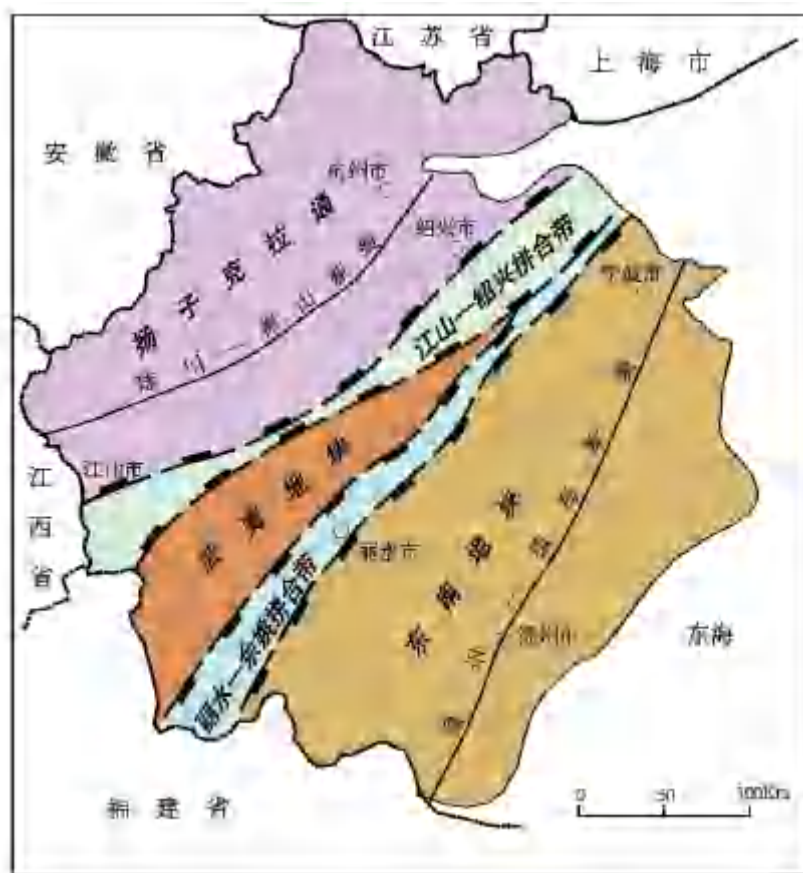


图 22 浙江省早古生代大地构造格架图

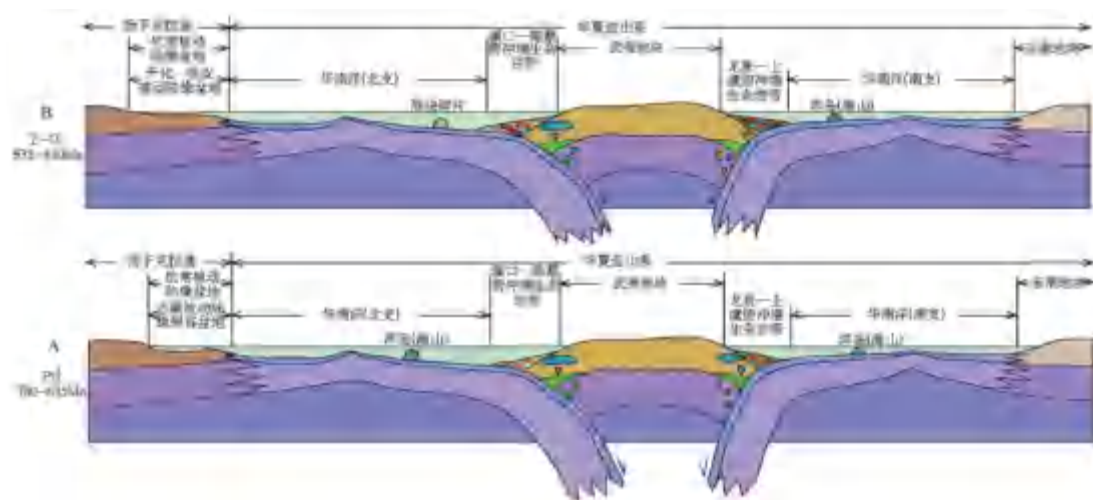


图 23 浙江省南华纪—中奥陶世构造演化模式图

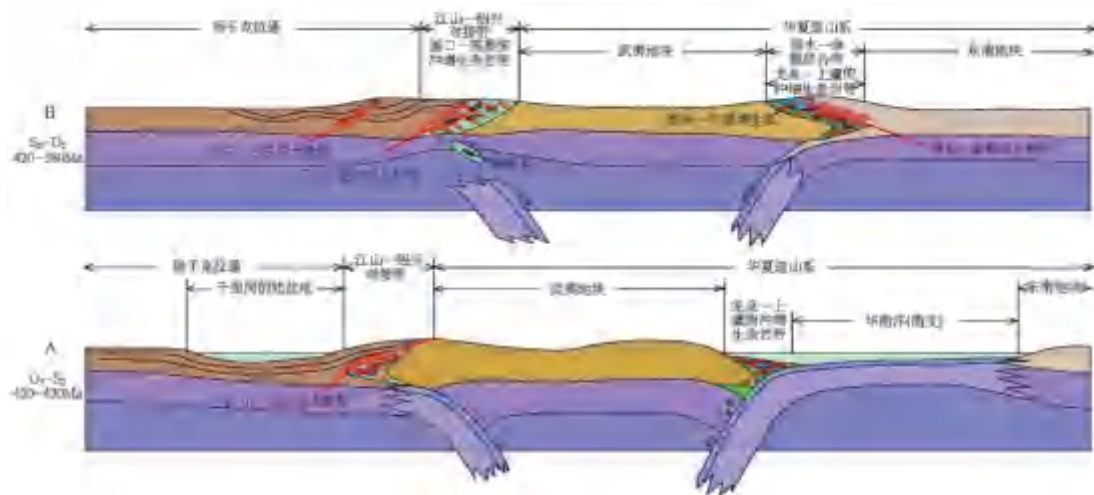


图 24 浙江省晚奥陶世—中泥盆世构造演化模式图

4. 浙江省第四纪多重地层划分与三维建模

通过对杭州湾上万个钻孔、上百千米地震反射剖面 and 数万件样品数据的系统分析，构建了杭州湾多要素多尺度第四纪地质结构模型，实现了主要城市地下地质结构的“透明化”（图 25、26）。

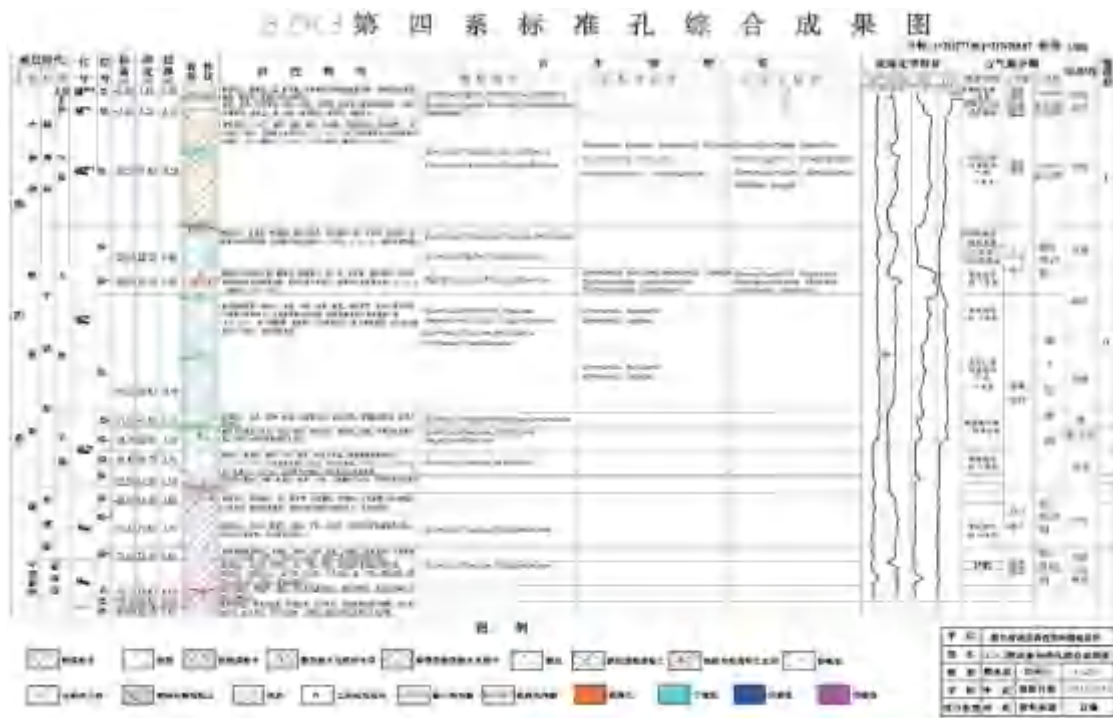


图 25 第四纪多重地层划分标准孔

获取了嘉善-湖州、萧山-球川、马金-乌镇等区域性隐伏断裂空间展布及其活动性、基岩面埋深相关参数，为杭州湾地区地壳稳定性、城市地下空间开发及重大工程建设适宜性评价提供了可靠的地质基础资料（图 27）。

采用多重地层划分方法，重塑了杭州湾第四纪以来海陆变迁过程，构建了“大湾区”第四系三

维结构模型。

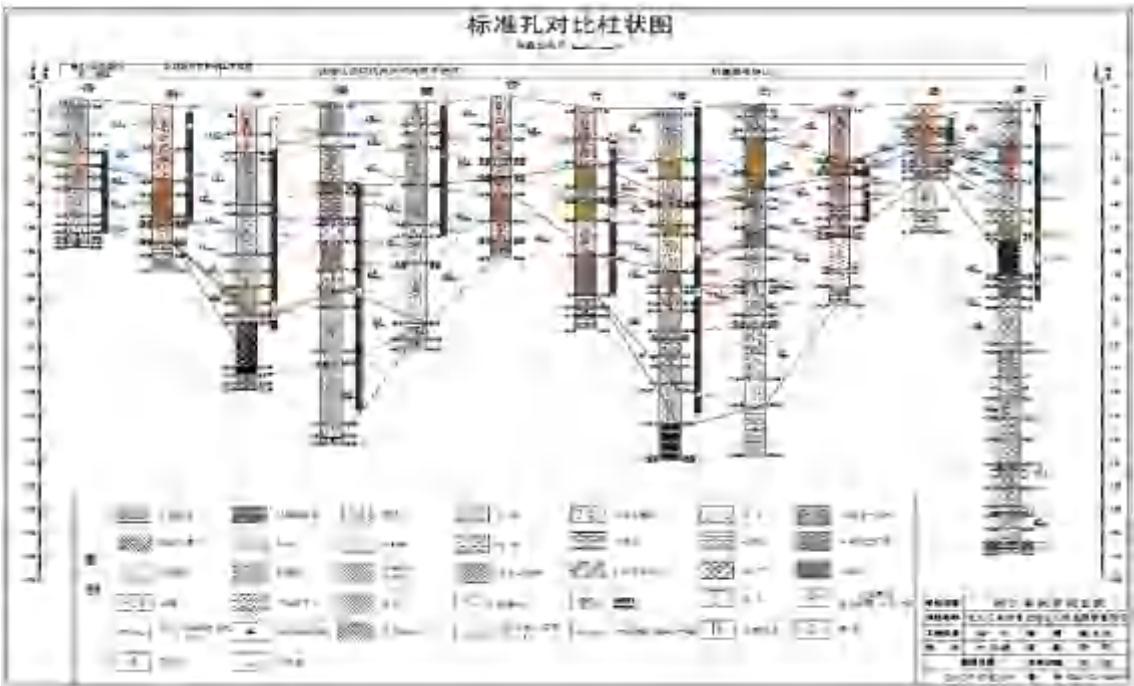


图 26 浙江省第四系标准孔对比

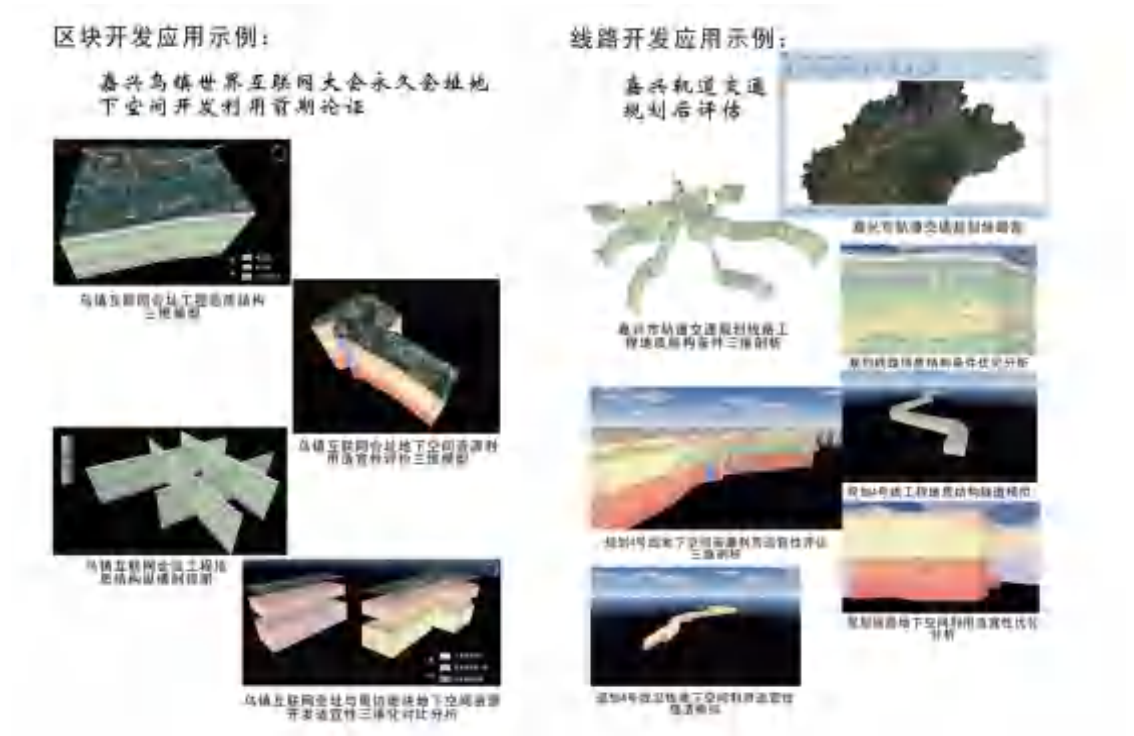


图 26 嘉兴城市地质三级地质建模

(二) 浙江省基础地质研究存在的主要问题及解决思路

30 余年来，尽管浙江省基础地质调查研究成果丰硕，但亟待解决的问题依然很多。最为突出

表现是，21 世纪，地质学的发展全面进入地球系统科学范式革命新时代，随着深地、深海、深空探测工程的实施，地质学家的视野将更加宽泛，微观研究获取的信息也将更加丰富与精细，收集到的地球信息将更加全面，对于地球系统的认识更加全面多元，地质学即将迎来新的范式革命。

1. 重大基础地质问题

浙江 1:20 万区域地质调查上世纪八十年完就已实现全面覆盖，新一轮的 1:25 万区域地质调查也仅剩 3 幅、约 1 万平方千米未完成，1:5 万区域地质调查约完成全省 85% 的图幅；总体上，浙江基础地质调查程度较高。但是，由于以往的基础地质调查工作完成年代较为久远，多以槽台理论、地质力学理论为指导，思想与理论已经过时，有必经以新的地质理论为指导，进行基础地质数据更新。目前来看，存在的主要问题表现在如下几个方面：**一是构造地质**，特别是深大断裂与浙江三维地质结构、推覆构造问题，主要表现为对于断裂构造的空间展布、活动特征的认识及其对于成矿控制作用、对后期盆地发展与地质演化的影响认识不清或错误。**二是中生代火山岩问题**。特别是火山地层的时代归属、晚侏罗世火山地层分布、古火山机构恢复等问题，需要采用火山构造、岩性、岩相填图法，对以往的基础数据进行更新。**三是侵入岩与成矿作用问题**。浙江地处环太平洋火山活动带，中生代岩浆活动频发，成矿作用强烈，准确查明并认识浙江隐伏的侵入岩，对于了解浙江地质演化史及发现新的矿床具有重大意义。**四是变质岩问题**。变质岩记录了浙江大地以往的地质演化史，通过变质岩的研究，恢复浙江古地壳的演化史，从而从更加深邃的视角了解地球系统的演化过程具用重要意义。**五是盆地演化与地层对比问题**。浙江省中生代火山沉积盆地众多，盆地演化历史复杂，大多数盆地现已成为城市聚集发展的核心区，开展专门盆地演化与地层对比调查研究，对浙江经济社会发展和重大工程建设具有重要意义。**六是第四纪地质与地表基质层调查问题**。第四纪地层广泛分布于浙江沿海平原与杭州湾周边，浙江主要城市与港口均分布在这一区域，耕地土壤亦集中连片分布在第四系覆盖区。同时，这一区域也是人类活动扰动强度是大的区域，是体现人类地质作用最为集中的区域。开展第四纪地质调查，查明其三维地质结构及其资源环境承载能力，是保障浙东经济社会可持续发展的主要手段之一。

2. 基础地质成果应用中发现的问题

30 余年来，浙江基础地质调查研究尽管取得了长足的进展，但受行业发展波动起伏的影响，省内的地质队伍专业结构不尽合理、科技实力还不够强大，比如古生物学人才匮乏、构造地质学调查研究力量薄弱、深部地质探测能力不强等问题长期存在，无法满足地质学的地球系统科学范式革命的需要，基础地质数据更新迫在眉睫。

从以往的经验看来，全省基础地质资料使用错误、引用过时问题十分突出。地层代号、地质年表 30 余年来已进行了多轮更新，社会上很多相关行业、甚至地质行业内部，还存在大量引用 1:20 万过时的地质资料问题，表明专业的地质资料使用的宣传与推广存在问题；另一方面，也表明以往地质成果表达方式过于专业，地质知识的科普宣传欠帐太多。

3. 解决思路

要解决浙江省基础地质存在的问题,以满足新时代对于地质成果与地质知识的要,必须以地球系统科学理论为指导,针对自然资源管理中心工作需求,具体问题具体对待,提出相应的解决办法。一是启动知识更新计划,学习新理论、新技术、新方法,更新火山地质理论、了解推覆构造作用模式,加强科技创新,引入深部探测技术,查明浙江地质结构,弄清浙江地壳的演化过程与趋势,为浙江经济社会发展提供地质安全保障。二是设立省级基础地质科技项目,联合科研院所进行科技攻关,站在地球系统的高度,解决浙江省内面临的重大基础地质问题。三是引入引入ABC(人工智能、大数据、云计算)技术,推进基础地质调查的信息化与智能化,建成浙江地质云,使之成为数字地球的重要节点。四是识别行业新需求,加强成果表达内容与形式创新;加强地学科普,更好了普及地球系统科学资知,引导人们更好地珍爱人类共同的地球家园。

(三) 浙江省自然资源中心工作对基础地质资料的需求分析

2017年,国家机构改革之后,“大资源、大地质”概念深入人心。新成立的自然资源部负责履行全民所有土地、矿产、森林、草原、湿地、水、海洋等自然资源“两统一”管理职责,地质工作迎来与国土、测绘、海洋等相关行业融合发展的有利时机。环保、农业、林业、旅游与康养行业对基础地质调查提出了新需求,国家对矿产资源能源保障与安全需求更加强烈。地质灾害防治、地质安全保障与地下空间管理需要地质工作提供更好的技术支撑。自然资源监测与生态修复也离不开地质工程技术。生态文明建设要求查明土壤、地下水环境,国家“双碳”战略与清洁能源供给也离不开地质工作。新的应用地质专业不断拓展,城市地质、农业地质、旅游地质、生态地质、健康地质迎来发展新时机。总之,自然资源中心工作对基础地质提出了新需求,地质学迈入了地球系统科学范式革命新时代。

参考文献:

- [1] 浙江省地质调查院 浙江省深部地质找矿实施方案(2016)
- [2] 浙江省地质调查院 浙江省地质矿产调查报告(2018)
- [3] 浙江省地质调查院 浙江省地质志(2022)
- [4] 中科院地球环境研究所 周杰 搜狐网 一文读懂!什么是“地球系统科学”?
- [5] 汪品先. 地球系统科学:理解与误解[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014(4): 30-30.
- [6] 吴福元, 郭正堂. 青藏高原隆升能引起全球气候变化吗?. 10000个科学难题
- [7] 郭正堂. 黄土高原见证季风和荒漠的由来[J]. SCIENTIA SINICA Terrae, 2017, 47(4): 421-437.
- [8] 王斌, 周天军, 俞永强. 地球系统模式发展展望[J]. 气象学报, 2008, 66(6): 857-869.
- [9] 侯增谦. 立足地球系统科学, 支撑自然资源统一管理和系统修复. 中国自然资源报, 2018.
- [10] IPCC 第五次评估报告(AR5)
- [11] 舒良树. 普通地质学[D]. 北京. 地质出版社
- [12] 部分资料信息来源: 360 百科、百度文库

浙江省乡镇地质灾害风险调查技术要求

刘正华

近年来，在习近平总书记“两个坚持、三个转变”防灾减灾思想指引下和自然资源、省委省政府要求下，我省地质灾害防治工作逐步从隐患点管理向风险防控转变，也取得了较好的成效，并获得了自然资源部和省委省政府的肯定。

风险管理，调查先行。2017 年开始，我省就在谋划全省重点乡镇地质灾害风险调查评价工作。经过近 5 年的探索，出台了《浙江省乡镇（街道）地质灾害风险调查工作方案》和《浙江省乡镇（街道）地质灾害风险调查评价技术要求（1：2000）》。今年，在省厅推动下，正在将该技术要求提升为地方规范。

一、乡镇地质灾害风险调查概况

（一）地质灾害环境特征

1. 地质灾害孕育条件

地形地貌：浙江省山地丘陵占 70.4%，平原和盆地占 23.2%，河流、湖泊占 6.4%，有“七山一水二分田”之称。山区丘陵为地质灾害发育提供了边坡条件。

地质构造：以我省规模最大的江山——绍兴深断裂为界分为浙西北和浙东南两个地层区。浙西北属江南地层区，自元古代以来各时代地层发育齐全，厚度大，沉积比较连续，呈北东向分布。浙东南属华南地层区，基底为元古界变质岩，长期遭受剥蚀，燕山运动火山活动剧烈，同时侵入岩较发育。长期风化剥蚀后，为地质灾害发育提供物质条件。

工程活动：浙江经济发达，人口密集，工程活动频繁，山区城乡、交通、水利、矿山，以及经济作物耕种，造成大量地质灾害隐患。

气候条件：浙江地处亚热带季风气候区，3-6 月的梅雨集中在浙江中西部地区和 8-10 月的台风暴雨集中在浙江中东部地区，极易引发地质灾害。

2. 地质灾害易发区

全省突发性地质灾害易发区面积 7.7 万平方千米，地面沉降易发区面积 1.05 万平方千米。设计 10 个设区市、77 个县（市、区）和 955 个乡（镇、街道）。

3. 地质灾害隐患点

全省现有地质灾害隐患点 520 处，威胁 1.6 万人和 1.3 亿元财产的安全。

4. 地质灾害风险防范区

全省目前入库地质灾害风险防范区 15139 个，影响 57073 户 209800 人。

（二）地质灾害防治要求

1. 2017-2019 年，浙江省实施地质灾害防治“除险安居”三年行动，通过工程治理和搬迁，消除地质灾害隐患点 5665 处，基本消除重大隐患点。

2. 2020-2022 年，浙江开启地质灾害“整体智治”三年行动，要求提升“早识别、精确测、强预警、科学防、整体治、精细管”等六大地质灾害防治能力。

实施地质灾害风险调查工程：全面摸清风险隐患家底，提升“早识别”能力

实施地质灾害监测建设工程：动态掌握风险变化情况，提升“精确测”能力

实施地质灾害预报预警工程：及时发布风险管控清单，提升“强预警”能力

实施地质灾害风险管控工程：大力提升风险管控成效，提升“科学防”能力

实施地质灾害综合治理工程：源头降低地灾发生风险，提升“整体治”能力

实施地质灾害制度保障工程：切实推动防治责任落实，提升“精细管”能力

3. 2020 年 7 月，自然资源部地勘司下发《关于商请探索开展地质灾害风险管理试点的函》，明确要求浙江围绕地质灾害风险管理制度建设、方式方法研究、标准规范建立等开展实践，以期形成可在全国复制推广的成果。

4. 2019 年开始以地质灾害风险识别和风险区划为重点，通过三年左右时间，完成 150 个高、中易发区内乡镇（街道）的地质灾害风险调查评价。进一步摸清地质灾害风险底数，科学评价重点地区地质灾害综合风险水平，编制地质灾害风险评价图。

开展试点：选择杭州市余杭区鸬鸟镇、东阳市马宅镇、泰顺县仕阳镇作为试点。

编制要求：《浙江省乡镇（街道）地质灾害风险调查评价技术要求（1：2000）》

制定计划：2020 年部署 60 个重点乡镇；2021 年部署 60 个重点乡镇；2022 年部署 30 个重点乡镇。

目前全省已部署 307 个乡镇，已完成 166 个，已远超 150 个工作目标。

乡镇（街道）地质灾害风险调查评价项目开展情况一览表

设区市	立项招标	设计审查	野外验收	完成成果情况					总计
				2022	2021	2020	2019	评审	
杭州市	1	15	33	0	17	0	2	19	68
宁波市	0	0	1	0	21	0	1	22	23
温州市	10	11	1	4	9	1	0	14	36
湖州市	2	3	0	1	6	1	0	8	13
绍兴市	2	4	4	0	6	1	0	7	17

设区市	立项招标	设计审查	野外验收	完成成果情况					总计
				2022	2021	2020	2019	评审	
金华市	7	2	3	4	11	2	0	17	29
衢州市	4	10	2	0	9	2	0	11	27
舟山市	2	5	0	0	2	1	0	3	10
台州市	3	1	0	0	38	2	0	40	44
丽水市	0	11	4	6	18	1	0	25	40
总计	31	62	48	15	137	11	3	166	307

二、乡镇地质灾害风险调查技术要求

规划基本框架：5 个板块，16 个部分

规定：适用范围、规范性引用文件、术语和定义、总则（目的任务、调查重点、精度、工作量定额、流程等）、设计书编写

调查：基本调查方法、孕灾地质条件调查、地质灾害及隐患调查、承灾体调查

评价：地质灾害易发性评价、地质灾害危险性评价、地质灾害风险评价、降雨阈值研究与风险管控

成果：资料整理与成果编制、质量检查与成果验收

附录（16 个）。

（一）关键术语

1. 致灾体：可能导致崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷等地质灾害发生的地质体。
2. 承灾体：可能受地质灾害威胁的各种对象的统称，包括人员、构筑物、土地、资源和环境等。
3. 易发性：一定区域内孕灾地质条件所控制的地质灾害发生的可能性。
4. 危险性：某种诱发因素作用下，地质灾害发生的可能性。
5. 易损性：地质灾害以一定强度发生而对承灾体可能造成破坏的严重程度。
6. 地质灾害风险：各类承灾体因地质灾害而遭受损失的可能性和严重程度，包括人员伤亡、经济损失和环境破坏等。

（二）主要目的

进一步模型地质灾害风险底数，为组织开展地质灾害群测群防、监测预警和应急避险，科学

实施避让搬迁与地质灾害综合治理，以及为国土空间规划、村镇规划与建设、重大工程布局等提供依据，全面支撑地方政府的地质灾害防治管理工作。

（三）主要任务

1. 三项调查：地质灾害及隐患调查、孕灾地质环境调查、承灾体调查；
2. 三项评价：地质灾害易发性评价、不同工况危险性评价和风险性评价；
3. 两项研究：成灾机理研究，降雨阈值研究；
4. 两项建议：日常防治措施建议，应急管控措施建议；
5. 两项成果：成果报告（含图表），地灾风险管理数据库。

（四）基本要求

1. 调查层次：一般调查区、重点调查区、重要调查地段；
2. 调查方法：采用遥感调查、地面调查、测绘和勘查（物探、钻探、山地工程）相结合的方法。重要地段必须采用测绘和勘查手段；
3. 调查精度：重点调查区 1：2000，重要地段 1：500-1：1000，一般调查区 1：10000；
4. 调查手段：尽量采用无人机，激光雷达等进行高精度测绘，并可替代部分地面调查。

（五）工作量定额

每百平方千米调查区实物工作量基本定额控制

工 作 内 容		单位	工作量	
			一般调查区	重点调查区
遥感调查	1：10000 遥感调查	km ²	100	/
	1：2000 遥感调查	km ²	0 ~ 10	100
地质灾害测量	1：10000 地质灾害测量	km ²	100	/
	1：2000 地质灾害测量	km ²	0 ~ 10	100
调查点		点	>300	>1000
实测剖面		km	>5	>20
物探		m	0 ~ 300	>1000
钻探		m	0 ~ 150	>300
浅井/探槽		m	0 ~ 30	0 ~ 100
岩土样		组	>5	>20

（六）调查区划分与要求

1. **重点调查区：**具有孕灾和成灾条件，可能危及村庄、居民区、学校、厂矿企业、重要建构

筑物、重要基础设施、重要社会经济发展规划区等区域。

精度：1：2000

面积占比：全乡镇面积 20%~30%

手段：遥感解译，详细调查，适量物探、钻探、山地工程、原位测试、取样测试，实测、草测剖面。

2. 重要调查地段：重点调查区中的地质灾害隐患、高风险斜坡、重要地面塌陷区等区域。

精度：不低于 1：1000（勘查）

数量：一般不小于 3 处

手段：倾斜测量，详细调查，实测剖面，物探、钻探、山地工程、原位测试、取样测试，三维建模。

3. 一般调查区：其他为一般调查区，不划分非调查区。

精度：不低于 1：10000

手段：遥感解译，实地调查，适量山地工程和取样测试，草测或信手剖面。

平原区域可不部署调查工作量

(七) 工作流程与工作路线



图1 乡镇地质灾害识别与评价工作流程

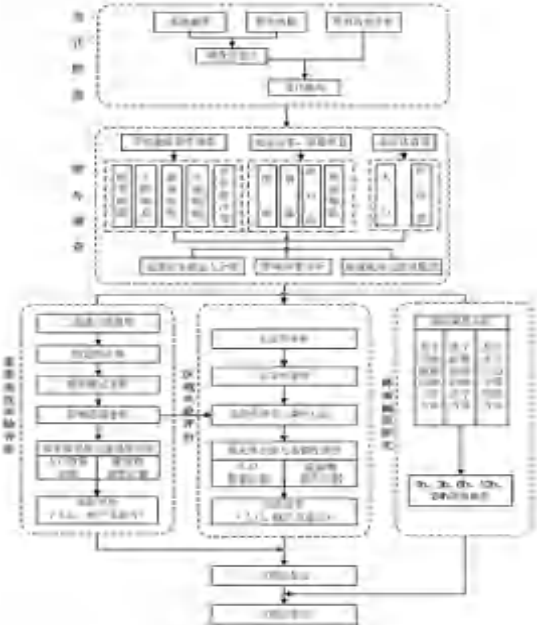


图2 乡镇地质灾害识别与评价工作流程

(八) 资料收集

地质灾害形成条件：地形地貌、地层岩性、断裂构造、工程水文、植被条件等；

已发生地质灾害及隐患：重点是发生地质灾害的准确时间及调查报告等；

地质灾害诱发因素：气象降雨，重点是地质灾害发生前的详细降雨情况；

地质灾害防治：调查评价、勘查、治理，以及防治规划等；

人类工程活动：主要是破坏山体结构的工程活动，如切坡建房、切坡修路、坡地建设、坡地造田等。

要整理分析，选择可利用的资料，编制野外基础用图和表等。

（九）遥感解译

数据处理：将航空正射影像、行政村界线、坡度图、地貌图、地质图等与 DEM 数据套合，形成遥感解译工程文件。数字线划图（DLG）、正射影像（DOM）、数字高程模型（DEM）

斜坡单元划分：根据地形坡度和地层岩性变化情况、居民区分布情况，以分水岭或凹沟为界，划分斜坡单元。**斜坡单元划分原则与要求：**

同一个斜坡单元应有相似的地质环境条件或成灾机制和致灾模式。

一般上方及两侧以分水岭与沟谷为边界，下方包括可能影响的居民区、道路或河流等外侧为界，并考虑微地貌特征和单元间的衔接。

为确保评价的精度，应尽可能控制所划分斜坡单元的大小，具体可结合实际情况划定。

便于政府部门开展斜坡风险管理（一坡一卡管理）。

为便于评价，斜坡自动画好后，一定要参照影像或野外调查情况进行调整，**必须包含完整的致灾体和承灾体**。若存在崩塌、滑坡隐患，要调整大小，包含隐患；若存在泥石流，则需以沟谷为单元；若存在地面塌陷，则要以整个塌陷区域为单元。

调查区划分：将有居民区、村镇规划区、重要工程等分布的斜坡单元和沟谷划分为重点调查区，其他区域为一般调查区。

在斜坡单元的基础上，根据孕灾和成灾条件，可能危及村庄、居民区、学校、厂矿企业、重要建构筑物、重要基础设施、重要社会经济发展规划区等划分重点调查区和一般调查区。

信息提取：提取各斜坡单元的地理位置、地貌类型、地形坡度、斜坡高差、地层岩性、地质构造、植被覆盖率、地质灾害发育情况、承灾体等信息。

建立标志，提取信息，并填写遥感解译表：主要记录解译出来的一些地质灾害迹象或无法判断的迹象，以便在野外调查时核对和追溯查明。

*有人居住斜坡单元均要有表。

（十）地面调查

1. 一般要求

手图：1：2000 地形图+影像图+坡面单元，套合地质背景图，导入 PAD；

调查点：一般区 3 点/km²，重点区 10 点/km²。每一个坡面单元都要有点，有隐患或风险的坡面要对每一种特征定点描述，并在图上勾绘，配合平剖面图。

填表：按照 PAD 中表的内容填写，定点位置，沿途描述；记录内容完整性。建议野外记录本配合，如平面图、剖面图，野外实地圈定影响范围，并路线小结（流域或村或斜坡单元）等；

现场研判：地灾隐患、风险边坡等一定在现场要有个判断，可能出现什么问题等。

替代手段：当人无法到达山坡某区域时，可采用无人机倾斜摄影和机载雷达扫描进行代替，同时做好解译标注和记录。

2. 调查内容

孕灾条件调查：地形地貌、地质构造、岩土体工程地质、斜坡结构、地表地下水、气候、植被与土地利用、社会经济活动；

地质灾害及隐患调查：崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷及其隐患。

承灾体调查：受威胁或影响人员调查、经济载体、经济载体易损性调查。

(1) **人员调查**：利用房屋档案信息化“一户一档”资料的基础上，以行政村为单位，采取 1:2000 正射影像) 人工比对和实地核查相结合的方式，进行房屋确认和户主、人口、房屋结构、面积等信息的统计整理。(建议将山区所有房屋和人口信息提取)

(2) **承灾体经济价值调查**：主要包括工业民用建筑、线性工程和公共设施。只调查直接经济价值，不包含间接影响经济价值。评价标准采用县域内财务价值评估价标准计算。

(3) **承灾体易损性调查**：主要从两个方面评估，一是评估承灾体本身结构抵抗地质灾害的易损性，二是由于距离或阻挡，评估承灾体抵抗地质灾害的易损性。

(十一) 工程钻探

钻探目的：以揭露斜坡地质结构为目的，查明坡面岩土体的岩性、分布和厚度，并确定物理力学性质。了解坡面构造、水文和不良地质现象的分布，特别是滑动面等控制性结构面特征。

工作量：大于 300m/100km²。一般针对地质灾害隐患点、重点风险防范区。均没有也要选择典型坡面进行钻探。

钻探方法：必须是取芯钻，小型背包钻也可，建议配合使用，以便满足取样要求。

钻孔布设：一定要按照滑坡勘查规范布设，不能仅布设在坡面下部。

(十二) 山地工程

山地工程：指浅井(坑探)、槽探等，主要是配合地面调查、钻探、物探等方法使用。

工作量：0-100m/100km²。但我觉得要大量使用，特别是钻机难上的山体上部或陡峭部位。

钻孔布设：尽量沿着钻探剖面线或物探剖面线。

开挖深度：一般 3-5m 以下，根据岩体性质确定。

*特别要注意安全。

(十三) 工程物探

物探目的：探测坡面不同岩土层的界限以及分布形态，重要的是确定不同岩土层的接触关系，特别是与基岩面的接触关系。

物探布设：由于物探需要验证，最好是与钻探、山地工程配合使用。要布设在可能发生滑坡的纵剖面上，覆盖整个滑坡体。

工作量：重点区大于 1000m。

（十四）实验测试

测试：主要是测试岩土体物理力学性质，分原位测试和室内试验。原位测试主要是动力触探和静力触探，动力触探适用于碎石土和砂土，静力触探适用于软土和黏土。旁压试验和渗透测试根据需要使用。

工作量：重点区大于 20 组，一般区大于 5 组。未对动力或静力触探规定，建议对无法取样的碎石土、砂土等采用动力触探的方式测试。

（十五）评价单元尺度和内容

调查尺度：分一般区、重点区和重点地段三个尺度；

评价单元：区域：斜坡单元；重要地段：斜坡单元或隐患点；

评价内容：区域：易发性——危险性——风险性；重点地段：稳定性-危险性-承灾体风险。

（十六）区域风险评价

1. 区域易发性评价

区域易发性评价：通过计算易发性指数来分级评价。

评价方法：综合指数法，信息量法、层次分析法、模糊数学法等，技术要求介绍了综合指数法和信息量法两种。

易发性等级划分：高易发、中易发、低易发、不易发，其中平原区不评价。

综合指数法介绍：

地质灾害易发综合指数计算公式如下：

$$Y_i = \sum_{j=1}^n F_j \times S_j$$

式中：

Y_i ——第 i 个斜坡单元易发性综合指数；

F_j ——第 i 个斜坡单元第 j 类指标权重；

S_j ——第 i 个斜坡单元第 j 类指标赋值；

n ——为项数，取值 1~9。

表 1.1-1 以斜坡为单元的地质灾害易发程度评价指标体系及量化分值表

序号	评价指标				数据准备	
	指标	权重	指标分类	赋值	数据源	获取方法
1	坡度 (°)	0.15	<15	1	DEM	根据 0.2m 精度地表数字模型 (DEM), 生成坡度; 提取斜坡单元数值。
			15~25	4		
			25~35	5		
			35~45	4		
			>45	2		
2	坡向 (°)	0.05	北 (337.5~22.5)	1	DEM	根据 0.2m 精度地表数字模型 (DEM), 生成坡向; 提取斜坡单元数值。
			北东 (22.5~67.5)	2		
			东 (67.5~112.5)	3		
			南东 (112.5~157.5)	4		
			南 (157.5~202.5)	5		
			南西 (202.5~247.5)	3		
			西 (247.5~292.5)	2		
3	高差 (m)	0.1	<20	1	DEM	根据 0.2m 精度地表数字模型 (DEM), 提取斜坡单元数值。
			20~50	2		
			50~100	3		
			100~300	4		
			>300	5		
4	坡形 (按平面曲率和剖面曲率划分)	0.05	凸形	5	DEM	根据 0.2m 精度地表数字模型 (DEM), 生成地面坡度; 提取斜坡单元数值。
			凹形	3		
			直线、折形	1		
5	崩塌层厚度 (m)	0.15	<1	1	工程调查及野外调查	根据工程调查及野外调查成果, 确定调查区域地质灾害等级等值线。
			1~3	4		
			3~6	5		
			6~12	4		
			12~25	3		
6	岩性与岩土结构	0.1	>25	2	工程调查及野外调查	根据野外调查及工程调查成果。
			岩石坚硬, 结构完整	1		
			岩石较坚硬, 结构较完整	2		
			岩体较破碎, 结构较破碎	3		
			岩石破碎, 有连续块状岩体结构	4		
7	斜坡结构	0.1	顺层顺坡	5	工程调查及野外调查	根据工程调查及野外调查成果。
			顺层逆坡	4		
			逆层顺坡	3		
			顺向坡	3		
			逆向坡	2		
			逆斜坡	1		
			近水平层状坡	2		
			块状结构斜坡	1		
8	L ₂ 构造间距 (m)	0.05	<50	5	地面构造分布图、地质解释、野外调查确定。	收集区域近年不同比例尺区域地质构造图, 结合地质解释, 野外调查确定。
			50~100	4		
			100~300	3		
			300~500	2		
9	切坡高度 (m)	0.25	>500	1	调查	根据野外调查或地质调查单元人工开挖高线值, 已支护边坡, 边坡防护措施打新线值; 已支护且稳定的边坡可取 1 分。
			<3	1		
			3~6	2		
			6~12	3		
			12~25	4		

崩塌滑坡易发性指数分级:

- a) 高易发区: $4 < Y_i \leq 5$
- b) 中易发区: $3 < Y_i \leq 4$
- c) 低易发区: $1.5 < Y_i \leq 3$
- d) 不易发区: $1 \leq Y_i \leq 1.5$

泥石流易发性指数分级:

- a) 高易发区 (116-130): $4 < Y_i \leq 5$

- b) 中易发区 (87 -115): $3 < Y_i \leq 4$
- c) 低易发区 (44 - 86): $2 < Y_i \leq 3$
- d) 不易发区 (15 - 43): $1 \leq Y_i \leq 2$

地面塌陷易发性指数分级:

- a) 高易发区 (采深采厚比 < 30 / $4 < K \leq 5$): $3 < Y_i \leq 4$
- b) 中易发区 (采深采厚比 $30 \sim 50$ / $2 < K \leq 4$): $2 < Y_i \leq 3$
- c) 低易发区 (采深采厚比 $50 \sim 100$ / $1 \leq K \leq 2$): $1 < Y_i \leq 2$
- d) 不易发区 (采深采厚比 > 100 / /): $Y_i < 1$

2. 区域危险性评价

区域危险性评价: 通过计算不同工况下的危险性指数分级评价, 并分析圈定其发灾后的最大可能威胁范围等。

评价工况: 大雨、暴雨、大暴雨、特大暴雨 4 种降雨工况。

危险性等级划分: 极高危险、高危险、中危险、低危险, 其中平原区不评价。

ROC 验证: 对危险性评价结果进行检验验证。

危险性评价方法介绍:

$$H_i = Y_i / Y_{\max} \times P_i$$

式中:

H_i ——某种工况下第 i 个评价单元危险性指数 (概率);

Y_i ——第 i 个评价单元易发性指数, $Y_i = [0, 5]$; $Y_{\max} = 5$

P_i ——某种工况下第 i 个斜坡单元的给定时间段内的失稳概率, $P_i = (0, 1]$;

危险性分级	极高危险	高危险	中危险	低危险
危险性指数 H_i	$H_i \geq 0.8$	$0.6 \leq H_i < 0.8$	$0.4 \leq H_i < 0.6$	$0 < H_i < 0.4$

其中: P_i ——基于特定降雨量诱发的斜坡失稳概率

基于假设: 评价区有记录以来 (近 50-60 年左右) 最大 24h 降雨量 $L_{\max/\text{day}}$ 作为评价区最高易发性等级 (易发性指数 $Y_i = 5$ 时) 灾害发生的阈值, 计算不同降雨工况下失稳概率:

$$P_i = L / L_{\max/\text{day}}$$

L : 分别取四种工况的 24h 降雨量 (中值或下限), 即大雨 35mm (25~50)、75mm (50~100)、175mm (100~250)、>250mm。也可以计算任何降雨下的失稳概率;

*沟谷泥石流评价可参照本方法。地面塌陷不用考虑降雨工况, 直接根据稳定性 K 值转换确定 (类似后面重点地段稳定性确定失稳概率方法)。

危险范围确定: 一般有定性分析和定量评价两种方法。

定性分析: 主要是根据斜坡形态, 以及可能破坏的范围和规模, 判定不同工况下的影响范围。

定量评价: 通过经验公式或者二维、三维计算, 确定不同工况下的影响范围。

区域评估情况下，一般采用定性分析估算或经验公式计算。

滑坡或崩塌灾害运动距离关系经验公式

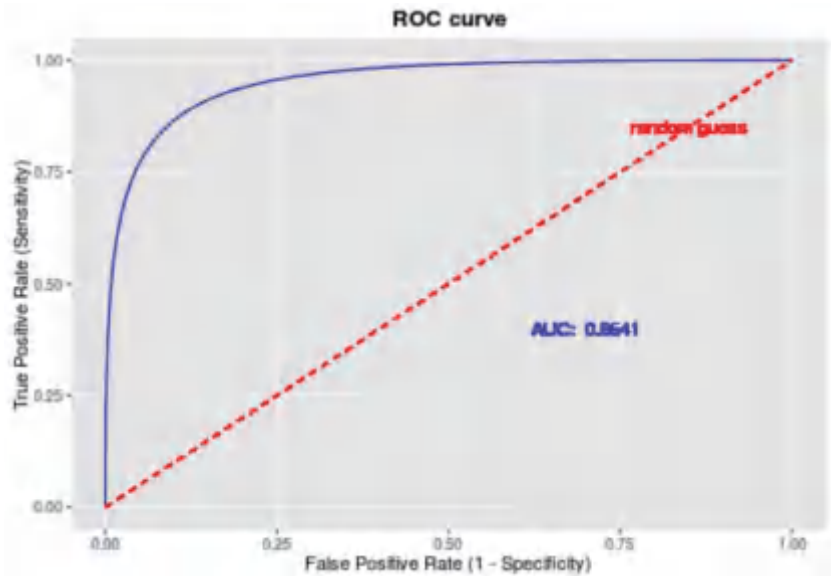
研究者姓名和研究年代	经验公式
Scheiderger (1975)	$\log (H/D) \approx -0.15668 \log (V) + 0.62419$
Ikeya (1981)	$D=8.6 (V \tan \theta)^{0.25}$
Vandri (1985)	$D=aH$
Takahashi (1994)	$H/D=\tan \theta$
Bickensam (1994)	$D=25J^{0.3}$
Bickensam (1999)	$D=50 (JH)^{0.2}$
Lorente (2001)	$D=7.13 (VH)^{0.171}$

注：式中 D 为运动距离； V 为灾害体积； H 为高差； θ 为斜坡的平均坡度； a 为到达角； σ 为经验系数，计算第一次滑移距离时取 0.5

当危险范围有重叠或越过斜坡单元范围时，应按实际估算危险范围调整或重新圈定。

危险性合理性检验：

- a) 80%以上的地质灾害点（灾害面积）在所划定的极高、高和中危险区内。
- b) 40%以上的地质灾害点（灾害面积）在所划定的极高和高危险区。



3. 区域风险评价

区域风险评价：计算斜坡不同工况下对最大范围内承灾体的风险。

评价工况：大雨、暴雨、大暴雨、特大暴雨 4 种降雨工况。

评价对象：人口风险（户籍人口）、经济损失风险和 综合风险。

地质灾害风险按以下公式计算：

$$R_i = H_i \times \sum_{j=1}^n E_j \times V_j$$

式中：

R_i — 为某工况下第 i 斜坡单元承灾体的风险值；

H_i — 某工况下第 i 斜坡单元的危险性系数；

E_j — 某工况下第 i 斜坡单元内 j 号承灾体价值（人员数量或经济价值）；

V_j — 某工况下第 i 斜坡单元内 j 号承灾体的易损性（人口易损性为 1，建筑物易损性按结构情况取值）。

区域风险指数分级

地质灾害风险等级	极高风险	高风险	中风险	低风险
人员伤亡风险 R （人/年）	$R \geq 30$	$10 \leq R < 30$	$3 \leq R < 10$	$R < 3$
经济损失风险 R （万元/年）	$R \geq 1000$	$500 \leq R < 1000$	$100 \leq R < 500$	$R < 100$
综合风险 R	按照人员伤亡风险和经济损失的风险等级，以就高原则确定。			
说明	人员伤亡风险、经济损失风险以单个评价单元内统计。			

（十七）单体风险评价

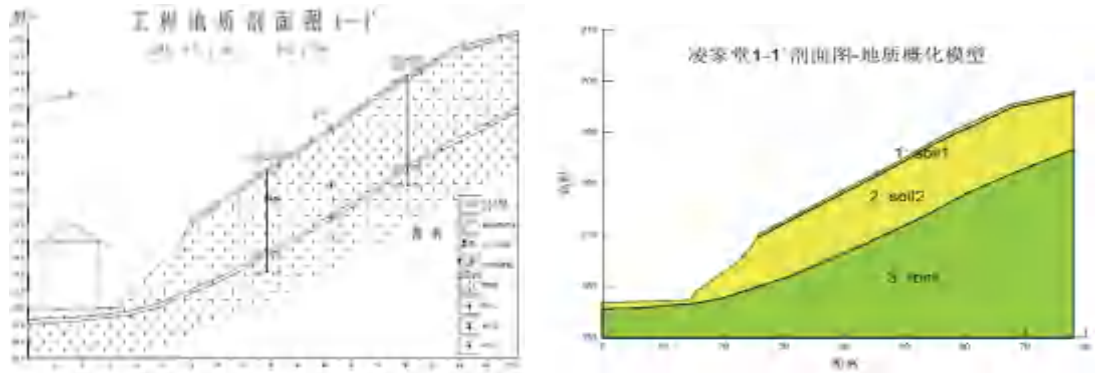
1. 单体稳定性与危险性评价

重点地段评价：实质上是将重点地段作为地质灾害单体进行稳定性和危险性计算，再对单体地质灾害威胁的单个承灾体进行风险评价的过程

建立二维或三维地质模型，采用力学模型计算或数值模拟等方法，分析其在不同工况下的稳定性、失稳-破坏- 运移特征，得出相应的稳定性系数和对应的危险性概率，及最大可能威胁范围。

Geo-studio 岩土工程模拟软件中的 seep 和 slop 模块可进行斜坡稳定性计算分析（需做渗透试验，确定渗透系数函数）。

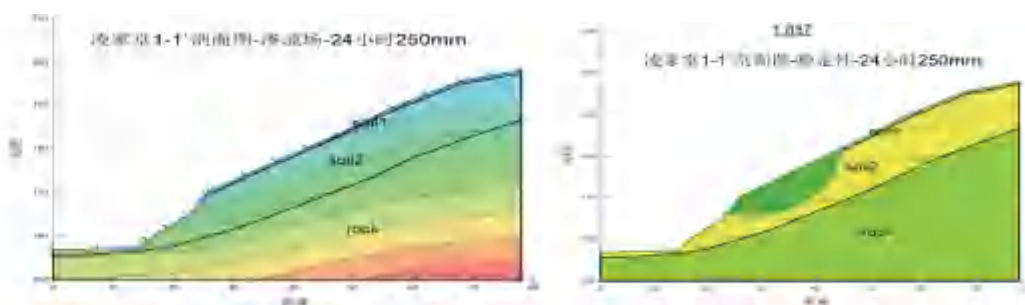
（1）斜坡建模



（2）材料本构模型与渗流设置



(3) 暴雨工况下稳定性计算



(4) 破坏概率计算

H_i——基于各个斜坡稳定性系数 F_s 值判定斜坡危险性概率：利用 Geo-studio 的 seep 和 slop 模块联合计算 4 种不同工况的 F_s 值，分别判定不同工况斜坡危险性概率 H_i 。

稳定系数 F_s	$F_s < 1$	$1 \leq F_s < 1.05$	$1.05 \leq F_s < 1.15$	$F_s \geq 1.15$
稳定性	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定
危险性概率 H_i	$H_i = 1$	$0.8 \leq H_i < 1$	$0.2 \leq H_i < 0.8$	$H_i = 0.2$

(5) 通过区域类似的定性分析和数值模拟的方式获取危险区范围。

(6) 单个承灾体风险

针对危险范围内居住人员和有价值财产进行调查统计，假定人员易损率为 1，财产易损率根据易损性表确定。

地质灾害风险等级	极高风险	高风险	中风险	低风险
人员伤亡风险 R (人/年)	$R \geq 10$	$3 \leq R < 10$	$1 \leq R < 3$	$R < 1$
经济损失风险 R (万元/年)	$R \geq 100$	$50 \leq R < 100$	$10 \leq R < 50$	$R < 10$

地质灾害风险等级	极高风险	高风险	中风险	低风险
综合风险 R	按照人员伤亡风险和经济损失的风险等级，以就高原则确定			
说明	人员伤亡风险、经济损失风险以单个承灾体统计。			

（十八）降雨阈值研究

理论基础：临界降雨预警最早应用于流域山洪预警，而针对复杂的崩、滑、流等地质现象，其区域预警的可行性存在一定的争议，也有待进一步研究。但是，对于单体崩、滑、流等地质现象来说，其确实存在一个临界降雨量值。因此，如何确定地质灾害临界降雨阈值呢？

区域临界降雨阈值：一般采用统计方法，即区域内所有已发生地质灾害的降雨指标来统计确定。

单体临界降雨阈值：一般采用物理方法，通过构建地质灾害二维或三维物理模型，模拟不同降雨情况下的安全系数，根据规范边坡安全系数范围确定不同情况下的降雨阈值。

*均可以通过类比方法确定。

1. 区域降雨阈值

通过统计方法来确定区域风险防范区的降雨阈值，则方便实用，方法较多：

1. 基于总降雨量（R 曲线）/Campbell，1975
2. 降雨强度与降雨历时（I-D 曲线）/Caine，1980
3. 过程累积降雨量与降雨历时（E-D 曲线）/Cannon and Ellen，1985
4. 过程累积降雨量与降雨强度（E-I 曲线）/Jibson，1989
5. 前期降雨量（A）—临界降雨量（C）阈值/改进
6. 前期降雨量（A）—降雨强度（I）—降雨历时（D）/改进。

技术要求中列举了两种降雨阈值确定方法，目前省里使用的为（I—D 曲线）。

2. 单体降雨阈值

三、基于水文和力学模型的降雨量阈值

- (一) 根据斜(边)坡勘查、调查成果或收集调查区已有资料,建立工程地质模型。
- (二) 在建立的工程地质模型基础上,叠加在降雨条件下的地下水渗流场模型。
- (三) 采用极限平衡或数值模拟等方法,计算在不同降雨量条件下的模型稳定性,确定斜(边)坡在临界稳定状态下的降雨量,即为该斜(边)坡发生地质灾害的降雨阈值。
- (四) 对比调查区及周边地区类似斜(边)坡已发生地质灾害时的降雨量,校验降雨阈值精度,调整并优化模型。
- (五) Montgomery (1998) 稳态降雨时的浅层滑坡一维模型

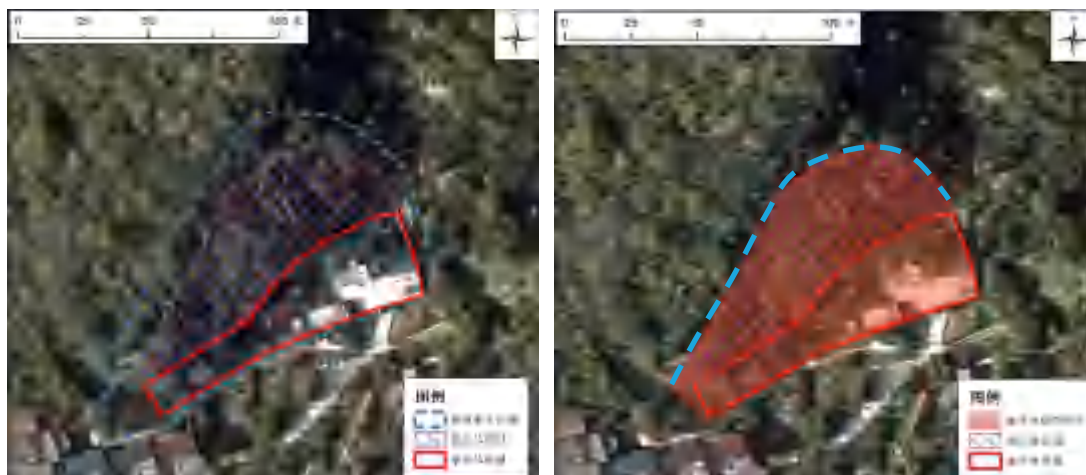
基于无限斜坡稳定性模型和水文模型,忽略土体成机和植被根系侧向加固作用下,引发浅层滑坡的临界稳态降雨量 R_c (mm/d) 表示为

$$R_c = \frac{T \sin \theta}{(a/b)} \left[\frac{c'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \theta} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi} \right) \right]$$

公式中: R_c 是引发浅层滑坡的临界稳态降雨量 (mm/d); T 是饱和时土层的水平水力扩散系数 (m²/d); θ 是斜坡坡度 (°); a 是上坡汇水面积 (m²); b 为流宽 (m); g 是重力加速度 (m/s²); z 为土层厚度 (m); c' 是包含了扎入基底滑移面的植被根系加固作用在内的土的有效内聚力 (MPa); φ 是土的内摩擦角 (°); ρ_s 和 ρ_w 分别是土和水的容重密度 (kg/m³)。

(十九) 风险管控

1. 风险区调整: 包含致灾区域和承灾体的完整区域即为风险区。而评价出来的风险区为斜坡单元,因此,需要进行进一步细化调整。



2. 风险防范区划定: 将特大暴雨工况下的地质灾害极高、高、中风险区(调整后的)确定为风险防范区,进行风险管控。

主要管控建议:

编制风险管控图册,落实群测群防员等日常管控措施;

提出综合防治如工程治理、监测预警、搬迁避让等措施建议。

3. 风险管控措施

规避风险: 气象风险预报预警,群测群防,专业监测(普适性监测)、应急避险……

降低风险：工程治理、搬迁避让，加固承灾体，风险意识提高

源头管控：国土空间规划管控，生态红线划定，禁建、限建区划定……

风险分散：地质灾害商业保险



(二十) 存在问题

1. 技术问题

1) **遥感解译工作不重视：**仅配合斜坡单元划分和承灾体识别，对于一些基础信息和地灾特征未详细辨别，特别是隐形构造等容易引发地质灾害的特征。

2) **斜坡单元划分未优化：**斜坡单元要按照不同的灾种进行优化，重点调查区内的斜坡单元面积不易过大。

3) **重要地段设置不合理：**选择依据不充分，代表性不足；工作量布置不合理，物探与钻探和山地工程要交替布置。

4) **风险防范区未细化：**风险区特别是风险防范区，要从坡面单元细化成致灾区域线和承灾体范围两部分，在风险管控图册中增加避险路线和避灾点。

5) **探索创新性不强：**在评价方法、阈值确定等方面基本未有探索性。

2. 管理问题

行政干预：部分行政领导总是有“地质灾害风险防范区越少越好”的懒政行为，在项目完成后，仍要求技术单位再次详细调查，以减少地质灾害风险防范区数量，导致入库时间延长。

建议各技术单位：不要去调整单个风险防范区数值评价过程，可以直接调整划分极高、高、中、低风险区的界限值。同样可以减少风险防范区数量，但是可以规避技术单位的技术风险。

三、未来展望

一是**实施斜坡单元管理，重构调查评价体系。**按照行政区划将全省山体丘陵划分成坡面，实

施“一坡一卡”的坡面单元管理。不定期对坡面进行影像分析和现场调查，更新坡面内的地质灾害或不稳定体信息，不再实施区域性调查。

二是构建区域标准评价模型，实现全省风险统一计算。基于各地地质灾害分布发育规律和地质背景，建立不同地区地质灾害风险调查评价模型，开发全省统一的地质灾害风险计算平台，实现“数据现场采集、风险自动计算”。

三是基于万物互联，建立风险动态更新机制。随着物联网的发展，通过各种信息传感器与技术，实现对人员的智能化感知、识别和管理，精准判断人员驻留情况，最终实现风险的动态更新。

四是基于数字化改革，实现地质灾害全生命周期管理。进一步梳理地质灾害防治工作流程，引入新技术、新方法和新手段，实现从地质灾害调查识别——入库管理——预报预警——预警响应——监测感知——动态调整——综合治理——核销出库的全程过程数字化，实现全生命周期管理。

三门县其头山矿矿山地下开拓系统施工方案优化及比选

朱爱山

前 言

自 1995 年起至今，公司做了大量的人防和国防工程，这些工程特点：洞口小，内部大，多数有竖井、斜井、天线孔和超大断面硐室。

近两年又承接了多个抽水蓄能电站项目和矿山建设项目，其地下工程建设引入不少新技术、新方法和新装备。

2022 年 4 月浙江省隧道工程集团有限公司（牵头人）与 矿冶科技集团有限公司（设计单位）中标浙江交投浙东矿业有限公司三门县其头山矿矿山开拓系统 EPC 总承包项目。工程总投资 87 亿元，为浙江省首个地下破碎露天矿。

矿石为凝灰岩天然抗压强度 109.00 ~ 148.00MPa，平均 126MPa，属坚硬岩类。

工期：360 日历天（设计工期 40 日历天，施工工期 320 日历天，缺陷责任期 24 个月）。

硐室部分主要工作见表 1-1

表 1-1 硐室部分主要工作

序号	名称	位置或规格	长度 m	断面尺寸 m（长*宽*高）
1	溜井	开挖断面 50.27m ²	183	Φ8
2	矿仓	开挖断面 179.55m ²		15*13.2*12
3	皮带平硐	开挖断面 19.63m ²	545	
4	检修平硐	开挖断面 32.93m ²	466	
5	通风斜井	开挖断面 4.42m ²	236	15.5°/27.729%
6	检修硐室	开挖断面 230.51m ²		54*12*18
7	板喂机硐室	开挖面积 83.83m ²		16.6*20.6*4.5
10	电气硐室	开挖面积 56.26m ²		11.5*9.5*6.3

三门其头山矿开拓系统主要分三部分：场平、道路、硐室。

矿区经水泥道路与 G228 国道相连，可通往三门县及周边城镇，基建期矿区剥离物及宕渣经临时破碎系统破碎，然后再通过汽运送至码头工业场地。

后期矿产品可通过新建约 6km 长皮带廊道直达码头工业场地，加工后进行海运外销，交通便利。



图 1-1 矿区线路及周边环境

本工程主要特点、难点：

1. 工期短；
2. 破碎硐室高，结构复杂；
3. 多功能多结构类型，需多点同步作业。

本工程有平硐、超大断面硐室、斜井、竖井，根据公司积累的经验，及设计、专家意见，把这个项目施工方案及施工方案比选过程作交流。

第一章 工程建模及智慧工地建设方案

1.1 矿山开拓工程建模

1.1.1 建模

建模，就是建立模型，就是为了理解事物而对事物做出的一种抽象，是对事物的一种无歧义的书面描述。

建立系统模型的过程，又称模型化。建模是研究系统的重要手段和前提。凡是用模型描述系统的因果关系或相互关系的过程都属于建模。

1.1.2 建模的意义

分析设计图是否正确可行，并对图纸进行优化。

预测或预报实际系统的某些状态的的未来发展趋势，并对工艺过程进行动态调整。

对系统实行最优控制，方便正确操作与管理。

方便测算工程量，便于管理人员尽快掌握设计内容。

1.1.3 建模软件：对与工程而言，常用两种建模方法：CAD 和 REVIT。

表 1-2 CAD 与 REVIT 的对比表

序号	项目	CAD	Revit
1	建模思路	二维出发，兼顾三维	三维出发，兼顾二维
2	建模布置方面	只能在单一视图进行构件定位，然后才能生成三维模型。	从平、立、剖及三维视图进行多视图二维视图布置，同时有垂直尺寸进行精确定位，从而生成正确无误的整体模型。
3	建模修改方面	二维修改时必须先在平面视图进行更新，然后要手动进行立面、剖面的更新，无法直接从三维模型进行其他视图的自动更新。	联动动态放大，修改模型时，提前相关视图都自动进行更新，同时设备修改时出现自动尺寸提示，可以方便进行模型重新定位。
4	断面视图方面	断面视图是整体式的形式，无法单独编辑，只能查看。	方便的进行断面视图的生成，而且生成的断面视图是活动的，可以对模型进行位置或者添加的设备，同时其他视图会自动进行更新。
5	参数化设计方面	当设备只读数据特性时只能单人手工变化。	参数化构件，通过参数设计三维设备可以由多个属性参数进行定位，能够根据项目的需求进行模型外观样式大小的复杂变化，它直接修改相应项目文件的参数就可以得到想要的模型文件，并且方便设计师在建模过程中文件的调用和存储。
6	设备制作方面	AutoCAD中的设备都是利用程序定制好的，如果新设备是无法自动进行设计制作的。	Revit有丰富的设备库及其用的三维造型能力，可以快速方便的制作出符合项目要求的设备。

1.1.4 CAD 建模

通过建模，让技术人员快速掌握工程意图、主要工作量，关键为图纸优化提供意见！

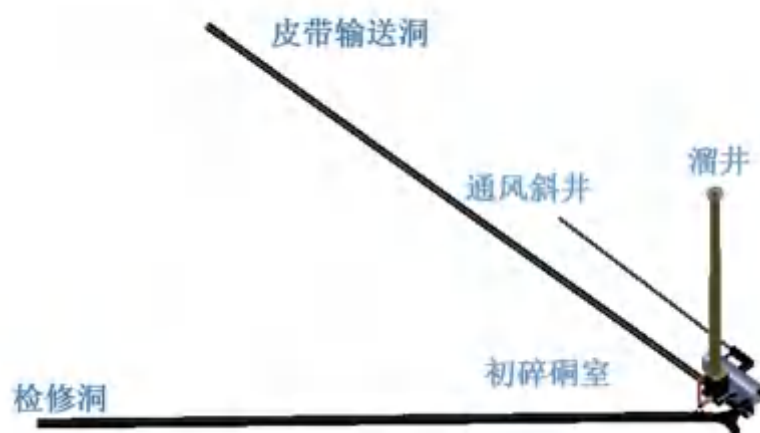


图 1-2 矿山项目 CAD 建模结果图

(1) CAD 建模为图纸优化提供基础

优化 1--布局

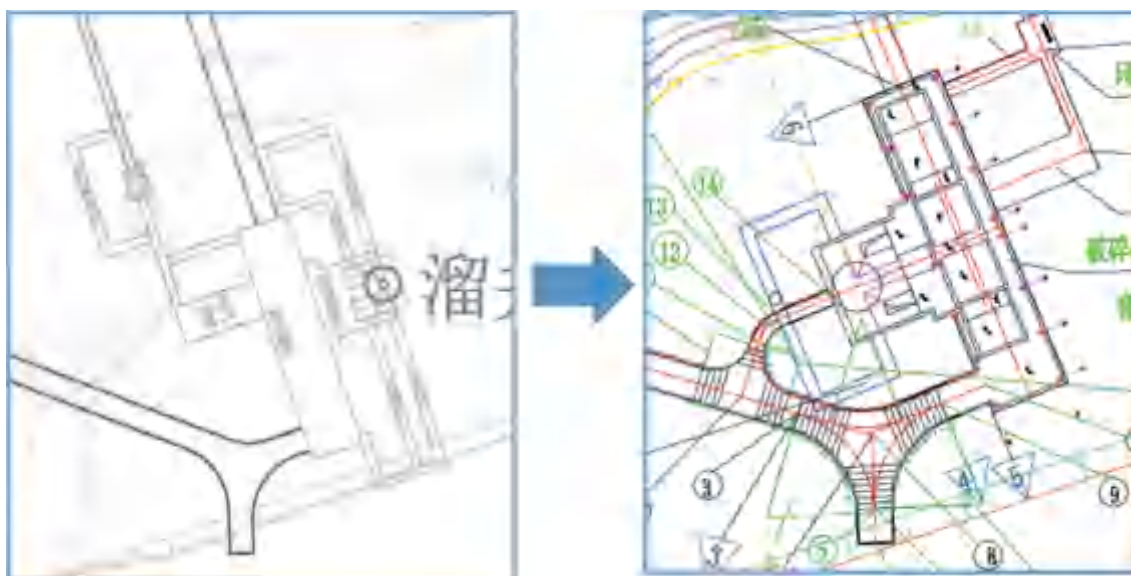


图 1-3 溜井的优化布局对比图

溜井位置不变，调整其它。目的：实现溜井与破碎硐室平行施工，缩短工期。

优化 2--检查巷道

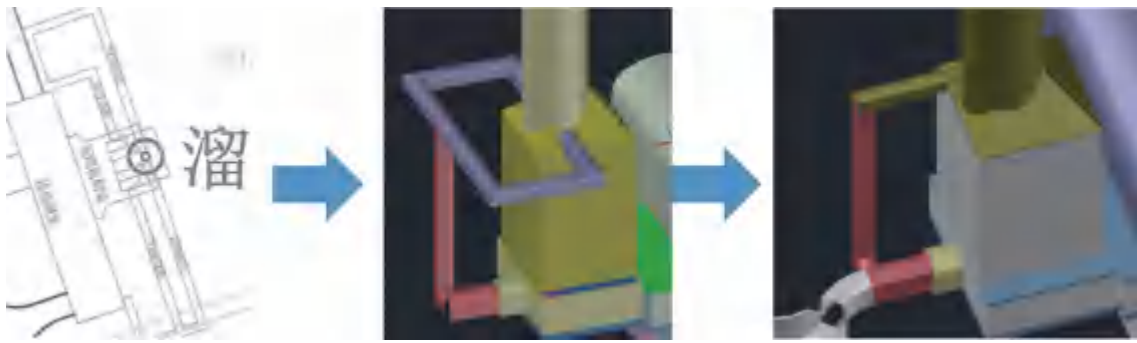


图 1-4 检查巷道的优化布局对比图

优化 3--皮带硐室

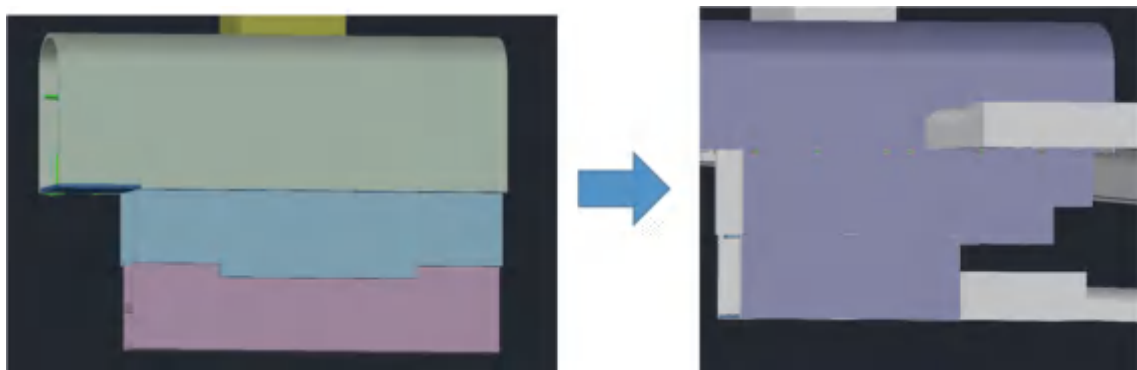


图 1-5 皮带硐室的优化布局对比图

优化 4--硐室结构，如衬砌厚度，构件

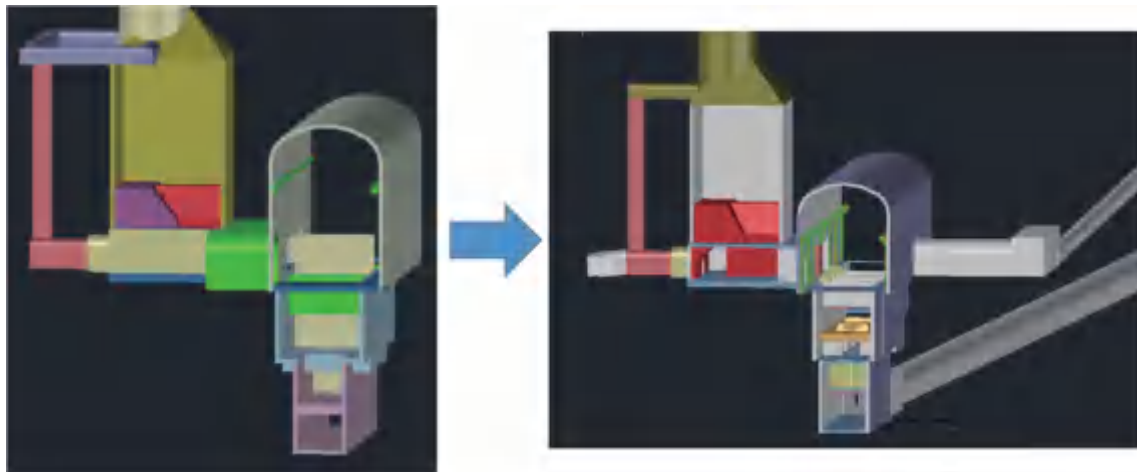


图 1-6 硐室结构的优化布局对比图

1.1.5 REVIT 建模为工程提供数据分析



图 1-7 矿山项目 REVIT 建模结果图

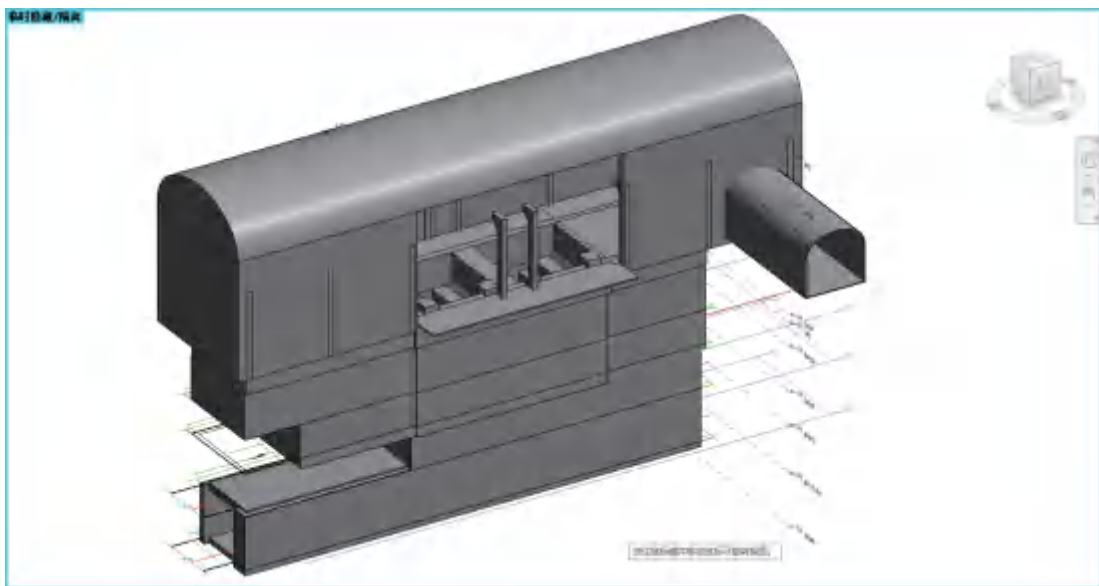


图 1-8 硐室 REVIT 建模结果图

1.2 矿山智慧工地建设

2021 年 11 月 1 日，地质行业推荐性标准《智能矿山建设规范》（DZ/T 0376-2021）发布。对矿山建模、开采、选矿、资源利用、生态保护、智能协同管控等做了明确要求。

浙江省《智慧工地建设标准》DB33/T 1248-2021，《智慧工地评价标准》DB33/T 1258-2021，自 2022 年 3 月 1 日实施。

《智能矿山建设规范》对建设阶段智慧工地建设没有涉及。浙江省《智慧工地建设标准》适用于房屋和市政基础。

2022 年集团公司牵头，经厅同意申报了浙江省矿业联合会团体标准《浙江省智能化绿色矿山

建设标准（露天开采部分）》。

浙江矿联团体标准《浙江省智能化绿色矿山建设标准（露天开采部分）》主要内容有：动态测量、地质模型、开采工程、资源分类利用、生态环境工程、智能协同管控。

从内容上来看，这个标准主要用于露天矿生产阶段智能化建设，故本工程智慧工地建设参照浙江省地标《智慧工地建设标准》实施。

浙江省地标《智慧工地建设标准》主要内容：工地人员、材料物资、机械设备、场地环境、过程控制、平台与接口。

1.2.1 三门其头山矿开拓系统建设阶段矿山智能化建设目标

实现现场动态管理，实时准确统计生产现场数据。

考勤及实时追踪作业人员位置

自动调度车辆

自动抽排水及进、排水量记录

视频监控

环境监测

1.2.2 建设内容



图 1-9 数字指挥调度系统

(1) 建数字指挥调度中心



图 1-10

借助于隧道内的监控与网络，与指挥中心的拼接屏连成一体，可以把施工现场的画面及施工现场的监控数据传入指挥中心。指挥人员可以根据隧道内所发生的情况，包括人员安全，机器运转，工程进度等信息，做出下一步的工作安排。该系统不仅可以用于监控隧道内的设备安全、人身安全、工程进度等，还可以作为演示终端，进行日常演练及会议培训等。

(2) 工况分析

表 1-2 工况分析

隧道 编号	隧道名称	起讫里程		长度 (m)	围岩级别				锚杆 (根)	喷砼	底板混 凝土
		起点里程	终点里程		II	III	IV	V			
1	检修洞	J+00	J+466	466		300	166		110		0
2	皮带硐	P+00	P+545	545	450		95		0	45	20
3	通风斜井	T+00	T+236							45	0
4	溜井	DK00+500	DK00+950	450					120	45	0
5	检修硐室										
	初碎硐室										
5	……..			……							
	小计										

注：XX 位置VI级围岩，有断层，施工风险系数高，应加强管理

(3) 门禁考勤系统

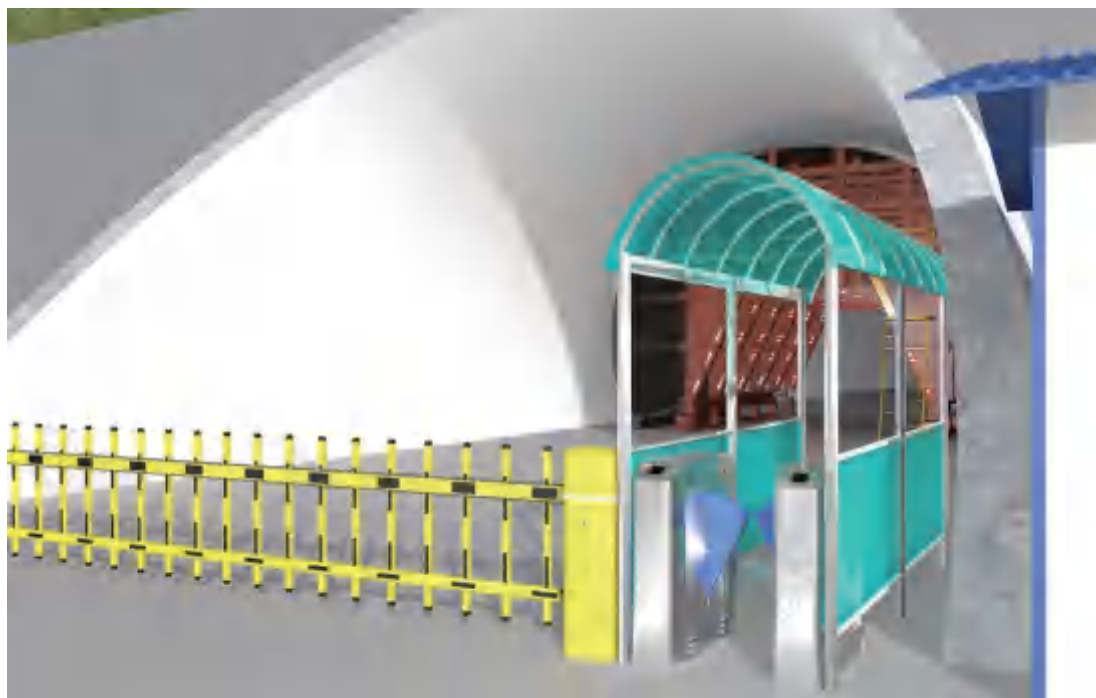


图 1-11 翼闸自动感应进出+栅栏式道闸机

通过各种识别方式限制人员和车辆进入，通过对人员车辆考勤的分析，可了解每天项目上人员及车辆的投入，同时如发生意外事件，可及时得知洞内人员信息，为救援提供数据。

人员自动感应进出

车辆道闸蓝牙开门



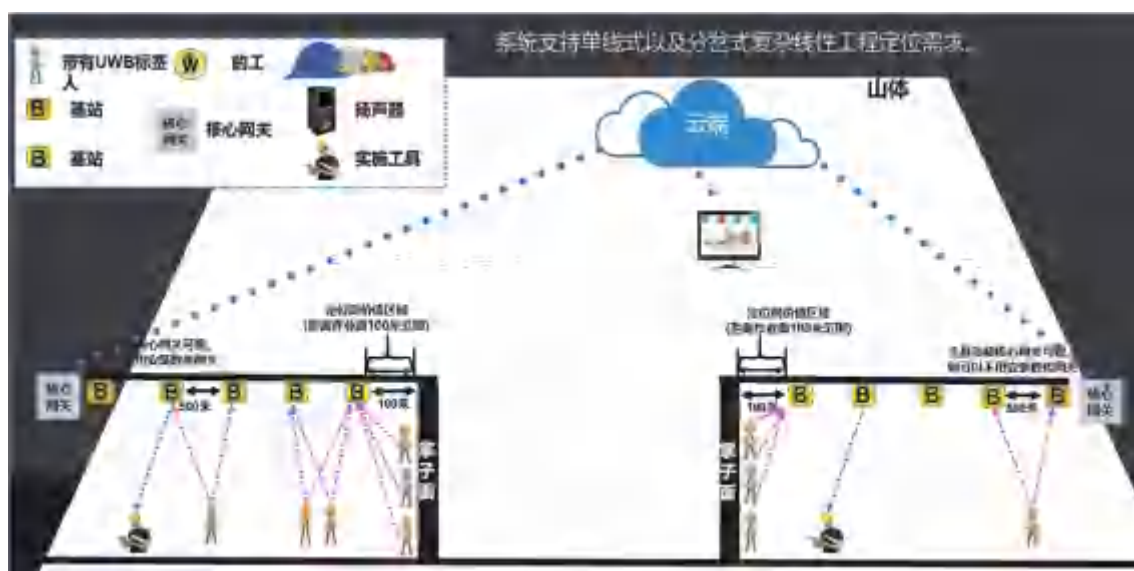
图 1-12 隧道高精度定位系统

(4) 人员定位系统

采用 UWB 高精度定位技术，定位精度优于 30 厘米识别速度 300 张/秒。系统精度高、容量大，实时性好，无漏卡。为管理人员提供位置实时定位、历史轨迹回放、视频联动跟踪、LED 大屏实时统计、跟踪定位指定人员、人车定位考勤、电子围栏、行为分析、多卡判断、灾后急救、日常管理、智能巡检等功能。



(a)



(b)

图 1-13 人员定位系统

(5) 车辆调度系统（与人员定位共用）

在矿卡安装定位系统，可实时监测车辆位置，推送避让信息，方便车辆在有限的隧道空间高效出渣任务，提高矿卡和隧道施工人员的安全及工作效率。

为保证洞内车辆人员的进一步安全性，在装载定位系统的同时，为每一辆矿卡配备一部对讲机，在定位系统的精确度之外提前沟通协调，在确保安全的前提下正常作业。

(6) 视频监控系统

视频监控系统包括前端视频采集设备、通讯传输设备，以及后端的视频处理服务器。该系统

具有实时存储、回放、检索、查询功能，值班人员可时时关注洞内外、钢筋棚、拌和站等重点部位施工情况，从而达到随时随地（可实现手机远程访问）及时准确地对其进行监管，为隧道安全施工保驾护航。



图 1-14

（7）环境监测

防止在隧道施工过程中，环境内各项气体、粉尘超标对人体造成损害，空气中各项气体或粉尘超标时，洞内传感器进行报警，同时值班室也进行报警，通知管理人员及时疏散、撤离人员。气体数据也可联动显示在 LED 屏上，或在指挥部的大屏中。

一般在隧道建设中，除了有毒有害气体，就是空气中粉尘的存在，粉尘对施工人员的身体会造成严重的损害，同时对环境的污染也相当严重。有了该系统监测的功能，使得项目人员能随时查看数据，对施工现场可查可控。



图 1-15

（8）抽排水监测

物联网水表，开通运行后，水表会搜寻到附近的 NB-IoT 通信基站并注册到物联网云平台，云平台就会知晓该水表需要上报和接收数据，之后水表的用水数据通过通信基站上传到智慧工地云平台，同时水表接收来自云平台的校时等数据信息。

管理部门通过云平台可以看到各户用水情况、排水情况，实时的能耗曲线，各种按月按日的统计报表。另外平台上实现仪表数据和数据的提取功能。



图 1-16

（9）应急电话

专门针对各类隧道高潮湿的环境设计，具有高防护、低功耗、防尘防潮、抗噪能力强、声音清晰洪亮的特点。该系统话机经过若干次铃响后（默认 5 次），话机自动接听，主叫方可进行呼叫广播，其声音将通过外置扬声器广播给附近的施工人员。



图 1-17

第二章 超大断面硐室开挖与被复

2.1 超大断面硐室开挖

2.1.1 国际隧道协会对大断面的判断标准如下：

表 2-1 国际隧道协会对大断面的判断标准

划 分	净空断面面积/m ²
超小断面	<3.0
小断面	3.0-10.0
中等断面	10.0-50.0
大断面	50.0-100.0
超大断面	>100.0

2.1.2 硐室特点

硐室是一种未直通地表出口的、横断面较大而长度较短的水平坑道。其作用是安装各种设备、机器，存放材料和工具，或作其他专门用途，如机修房、炸药库、休息室等。

硐室施工与一般巷道相比，具有以下特点：

①硐室的断面大、变化多，长度则比较短，需配备较多机械。
②硐室往往与其他硐室、巷道、井筒相连，加之有的硐室本身结构复杂，故其受力状态不易准确分析，施工难度较大。

③硐室的服务年限较长，工程质量要求高，不少硐室还要浇筑机电设备的基础，预留管线沟槽，安设起重梁等，故施工时要精心安排，确保工程规格和质量。

2.1.3 其头山矿硐室开挖

三门县其头山矿，检修通道断面 32m²，地下硐室 390m²，典型的“口小肚大”。从检修通道开挖检修硐室和初碎硐室，如何由小断面隧道（跨度 6.4m）向大厅（净跨度 12 米，高 35.4m）安全、高效开挖和支护？

根据硐室的形状、规格和结构差别，所穿过的岩石性质，有三种施工方法：全断面一次掘进法、台阶工作面施工法和导硐施工法。

但如何从小断面扩挖成大断面，如何从低处到拱顶才是整个施工的关键。利用成熟的施工工艺，有两种方法可采用。这两种方法都围绕拱部如何开挖展开。

（1）增措施平硐法

沿检修平硐向检修硐室增设曲线措施平硐。

新建措施平硐坡度 18%，长度 80m，开挖断面为 5m*6m。经过爬坡到达检修硐室顶部。

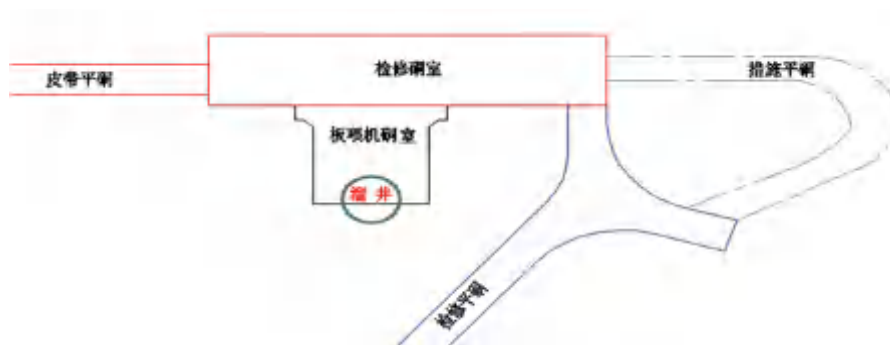


图 2-1

检修硐室分层作业，顶拱层采用渐变段导硐领先、过渡至全断面平巷的方式进行施工，系统支护适时跟进开挖作业完成第 1 层拱顶部分。

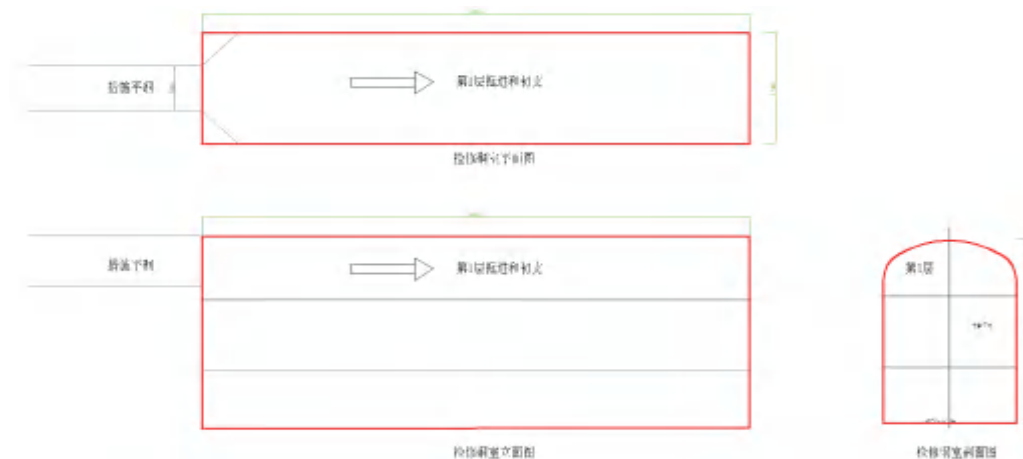


图 2-2 检修硐室，第一层施工

检修硐室拱顶部分形成作业平台后再从措施平硐向检修硐室下斜（坡度 12%）全断面平巷爆破掘进，再回头开挖下斜剩余部分，系统支护适时跟进开挖作业完成第 2 层中部部分。

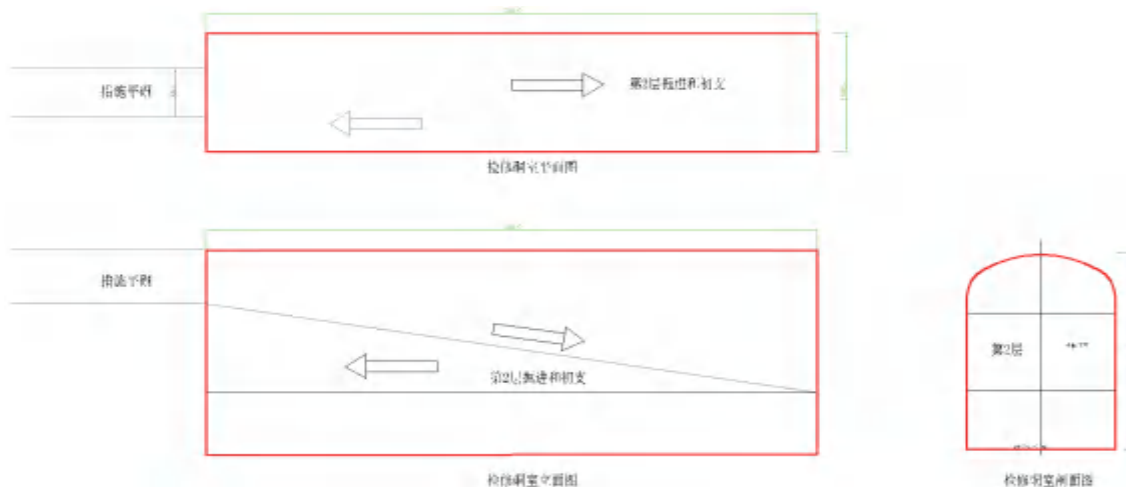


图 2-3 检修硐室，第二层施工

从检修硐室正下方完成检修平硐开挖，第3层再全断面平巷爆破掘进，系统支护适时跟进开挖作业完成第3层底板部分。



图 2-4 检修硐室，第三层施工

(2) 采用大跨小硐室开挖施工工法

十字交叉硐室应先行开挖支护穿过大硐室，避免了另一侧小硐室二次开挖破坏切割及扰动大硐室支护结构。一方面利于围岩及支护结构稳定，另一方面节约了支护工程量，降低了造价。

大硐室上台阶反向扩挖时，上山导硐形成自由面，便于爆破作业。

大硐室扩挖过程中，沿大硐室轴线，开挖及支护顺序采用了两个“之”字形路线，即上、中、下台阶沿立面走了一个“之”字形路线，左右分部开挖在平面上走“之”字形路线，在最大限度上保持了已完成支护结构的稳定受力，避免钢拱架产生较大沉降变形；同时避免了大型机械在已完初期支护仰拱上碾压行走对仰拱支护结构的破坏，更有利于平行施工，及早开始衬砌仰拱施工。

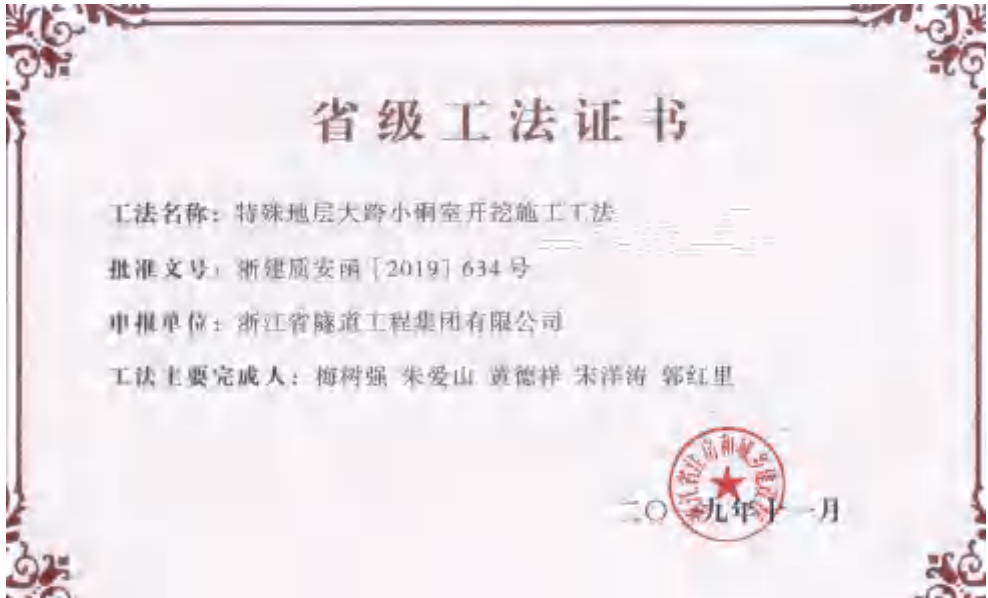


图 2-5

工艺原理

先行开挖支护穿过大硐室超过 1/2 大硐室跨度距离，对丁字口两侧的小硐室进行钢拱架和锚网喷联合支护，形成一个稳定的加固段。

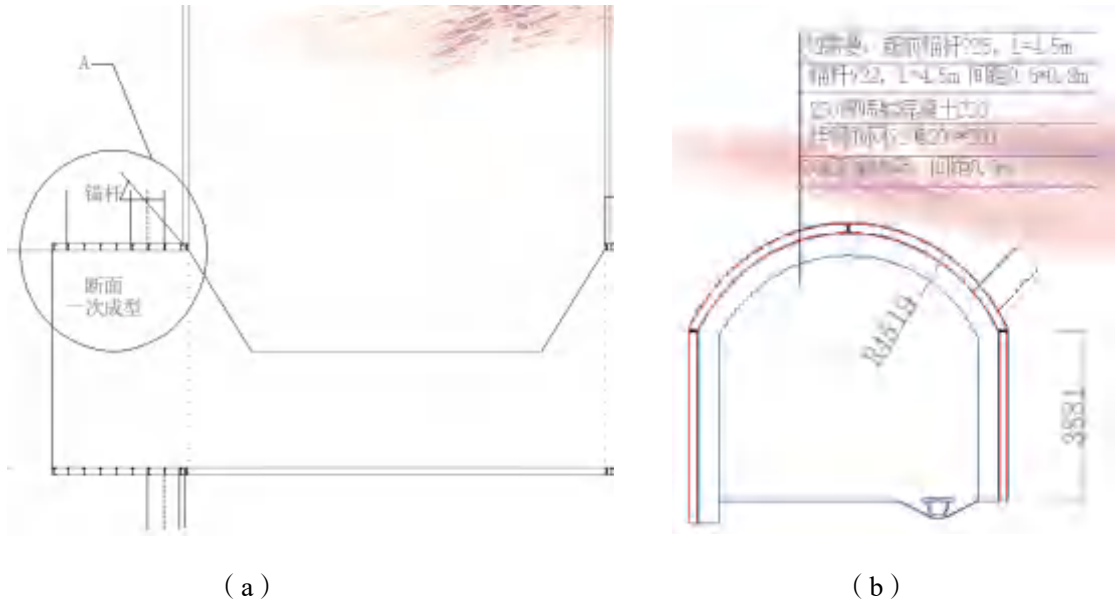


图 2-6

中导洞上山开挖之前，先按照开挖轮廓线测量放线，然后沿开挖轮廓线按进洞方案打设锁口锚杆，防止爆破开挖破坏开挖围岩结构。待中导洞上山洞口施工完成后，按照 15°角上山开挖及临时支护，当中导洞上山开挖到达大硐室拱顶高度后，中导洞顶部支护改为按照大硐室设计支护参数进行支护。如果地层差为防止大硐室拱顶钢拱架下沉，应在中导洞侧墙位置采用临时工字钢支腿对大硐室拱顶钢拱架进行支撑。

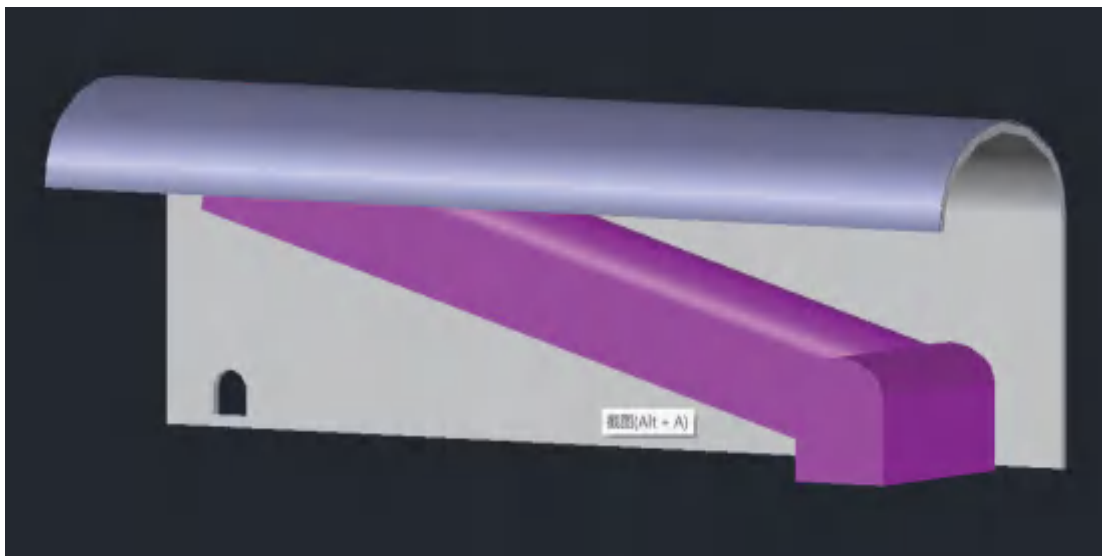


图 2-7

中导洞开挖及支护到大硐室远端墙后，左右两侧交错反向扩挖大硐室上台阶。地层差时为：逐步拆除中导洞两侧临时工字钢支撑，并将大硐室拱部及时支护到位。大硐室上台阶两侧钢拱架施工过程中拱脚一定要落在坚实的基础上，或者加设垫石，保证拱脚不脱空，同时，应严格控制锁脚锚杆注浆质量，并将锚杆与钢拱架进行焊接或者用锚垫板锚紧。当扩挖到中导洞上山部分时，可改为上台阶全宽开挖及支护。但是要按照“短进尺、弱开挖（爆破）、勤量测、强支护”的原则指导施工。在软弱围岩地质条件下，控制每个循环的开挖进尺非常关键，同时也要控制掌子面平整性，不可挖成“锅底”形。拱顶沉降观测和拱脚收敛观测是安全施工的保障。上台阶开挖到小硐室部位后，一方面不要急于拆除小硐室工字钢和网喷支护结构，即使拆除，也只拆除中间部分，保证小硐室强支撑能够对大硐室上台阶掌子面起到支撑的作用。在开挖大硐室中台阶之前，一定要将小硐室范围内大硐室上台阶两侧的拱架接长支撑到小硐室加强段的钢拱架上，并焊接牢固。

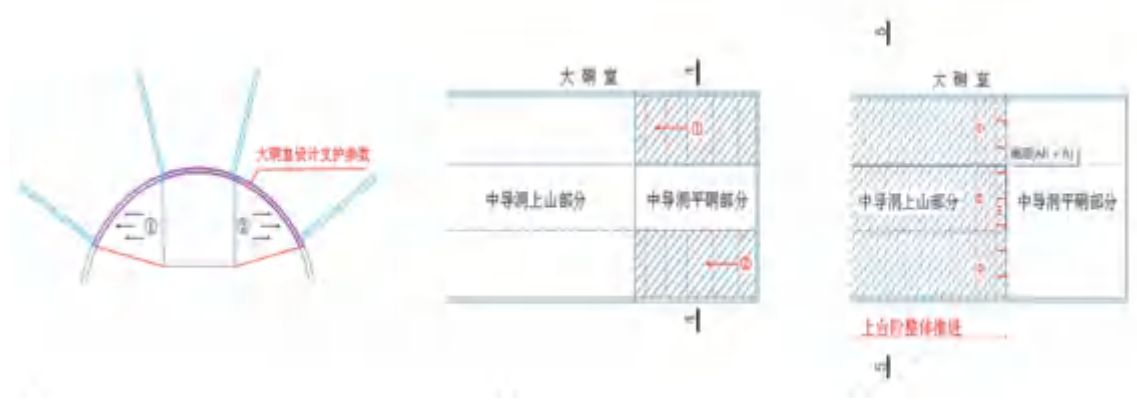


图 2-8

（3）硐室开挖安全注意事项

- 硐室开挖，通风不畅，要采取常规通风加局部通风相结合的方式；
- 做好排水设施，防止底板积水加剧拱脚沉降；
- 大硐室空间大，应增加局部照明，确保围岩和支护情况发生变化及时发现，保证作业人员对周围环境一目了然；
- 导洞预备钢管逃生通道；
- 施工质量决定施工安全；
- 大硐室开挖及支护都必须派专人值班和指挥作业
- 作业脚手架要搭设牢固，剪刀撑必须按规范搭设；
- “丁”字口开挖时，严禁人员从中导洞通行。

2.2 硐室衬砌

隧道衬砌是指支持和维护隧道的长期稳定和耐久性的永久结构物。
其作用是：支持和维护隧道的稳定、保持所需空间、防止围岩的风化、解除地下水的影响等。

因此，隧道衬砌必须有足够强度、耐久性和一定的抗冻、抗渗和抗侵蚀性。

隧道衬砌的种类有：

整体式混凝土衬砌：即模筑混凝土衬砌。多采用木模板、钢模板或衬砌台车等。

装配式衬砌：是指在工厂或现场预先制备成若干构件，运入坑道内，用机械将其拼装成一环接一环的衬砌。盾构隧道多采用这种方式。这种衬砌的优点是一经装配成环，不需要养护时间，即可承受围岩压力。

锚喷衬砌：指锚喷支护作永久衬砌的通称。喷射混凝土衬砌工艺简单，省工省时，投资较低，在结构允许的情况尽可能多采用。

另处还有复合式衬砌，连拱衬砌等都是洞室衬砌的一种特结构形式。

地下硐室多为一个工程的核心，其显著特点是超大断面，洞长短，进出通道小，与通道呈“丁”或“十”交叉。特别是交叉处模板量大，又有端墙，受力大且极不平衡，易造成模架系统失稳。

通常这些硐室衬砌有二种支模方式：钢模台车，或脚手架和钢（木）拱圈组合模架。脚手架和钢（木）拱圈组合模架为硐室传统支模方式，其质量受人为影响较多，易出安全事故。钢模台车因需在洞内组装，安拆受空间限制，以及端墙侧压力影响，且一次性投入极高，据了解仅南京一工地采用。

本工法吸取上述两种支模方法，采用承重脚手架、承重钢桁架支模，形成脚手架和钢桁架组合模架硐室衬砌施工工法。

（1）模架受力原理

碗扣式脚手架水平横杆、螺杆千斤顶、工字钢立柱和模板承受硐室侧墙混凝土浇筑压力，为对称受力结构。

碗扣式脚手架立杆、螺杆千斤顶、方木、工字钢立柱和钢桁架及拱部模板承受硐室拱顶混凝土自重压力及浇筑压力，吸收变形应力。

底部锁脚锚杆，地锚防滑斜拉、八字撑和整个模架支撑体系承受硐室端墙混凝土浇筑压力。

（2）浇筑顺序及工艺

浇筑顺序：由易到难，先洞中段，再内端墙段，最后交叉段。可降低端墙侧压力影响，也有助提高施工经验，完善方案。

混凝土工艺：先浇筑底板，再墙拱，墙拱采用泵送。砼参数同隧道钢模台车混凝土施工工艺参数。

（3）工艺流程



图 2-9 工艺流程图

(4) 施工工艺

施工前期准备一

方案制订，确定分模及浇筑顺序。首模长度为墙标准模板长度的整数倍。

方案制订时要考虑脚手架尺寸是否能租到，交叉处模板最大用量使用时间和高处人工移动整体材料的重量。

施工前期准备二

根据方案委托加工定型钢模板。

计划租用脚手架钢管、扣件、螺杆千斤顶规格及数量。

拱部放大样，利用现场拱架冷弯机弯区桁架工钢，按设计图制作桁架和立柱。



(a) 起拱部位定型钢模



(b) 侧墙自制模板



1-2 边部钢桁架直端拱制作

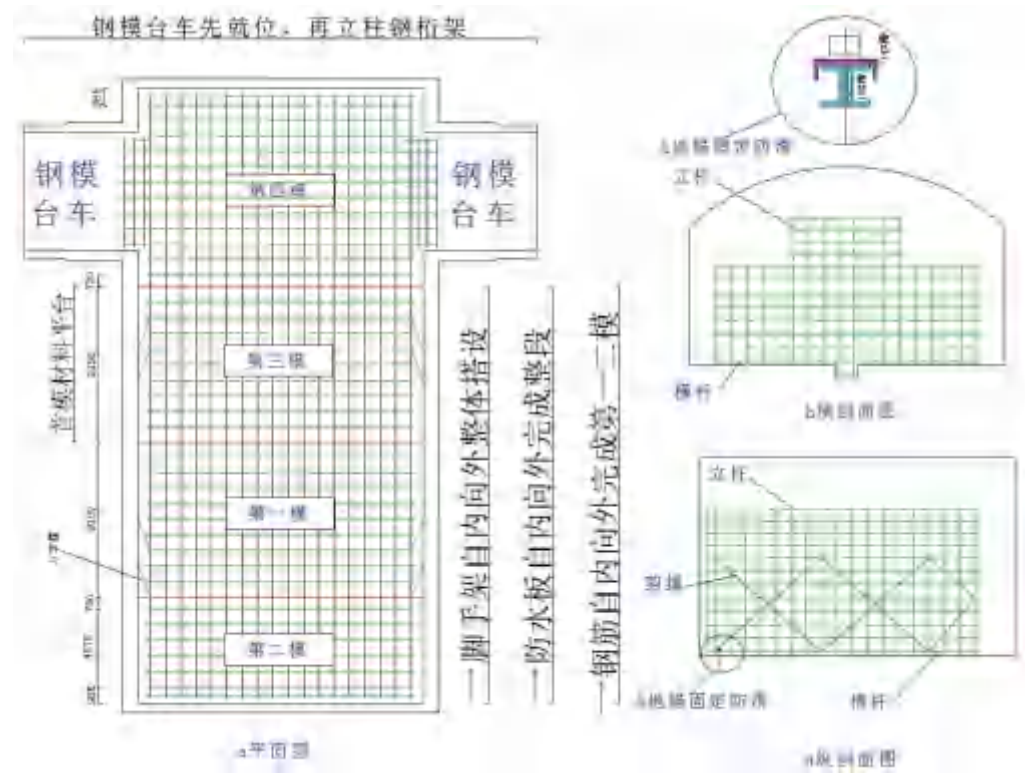


3 中部钢桁架

脚手架搭设



(a) 实际图



(b) 模型图

图 2-11

脚手架搭设要求

承重脚手架横距 0.805m，纵距 0.915m，步距下部为 0.8m，上部为 0.712m，搭设长度不少于 3 模。

立杆连扣纵杆，连扣横杆，自内向外分段搭设。剪刀撑随搭随设。立杆、横杆的接长采用对接法，立杆对接点相邻立杆应上下错开 1 个步距，横杆对接点应顺延长方向，前后左右错开，相互错开长度不得小 1 个纵距或横距。

利用底板预埋锚筋，结合剪刀撑做好端墙斜拉。

钢桁架组装

钢桁架分五部分：两侧墙工字钢支柱（即两侧墙模板拼缝立柱）

拱部钢桁架（考虑到空间和人工搬运又分三部分）。

支柱上部焊接连接法兰，中间依靠脚手架水平杆螺杆千斤顶支撑稳定。拱部钢桁架焊接，每段之间采用槽钢法兰连接，

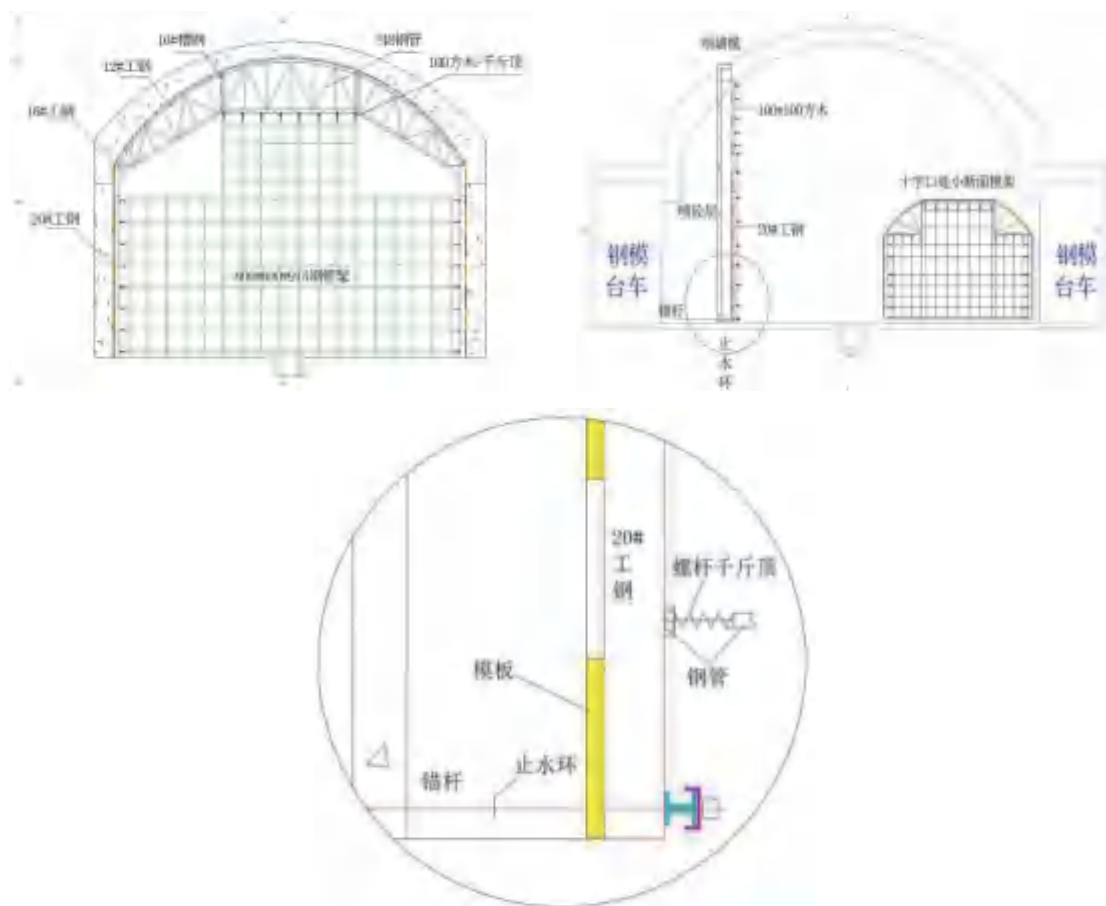


图 2-12

钢桁架组装--墙



(a) 提前摆放工钢立柱



(b) 侧墙模板拼缝与千斤顶对应



(c) 侧墙结构



(d) 端墙底部固定

图 2-13

钢桁架组装--拱



(a) 拱部中段位置钢桁架与千斤顶方木组成受力体系



(b) 拱部中段位置钢桁架与千斤顶方木组成受力体系



(c) 交叉口实际衬砌效

图 2-14

（5）质量控制要点

脚手架施工质量控制要点：

严格按放线位置搭设，特别是端模段纵距要严格控制，防止与模板对缝处不一致，造成重新加横向杆和立杆。

专业架子工电动扳手扭紧不够，需安排专人对扣件逐一再检查扭紧。

利用底板地锚和槽钢固定扫地杆，防止滑动。此外剪撑每两横距一个。

检查安装螺杆千斤顶钢管端头质量，不平齐的更换或专用割刀修整。

混凝土浇筑时用千分表检查位移。

钢桁架施工质量控制要点：

放大样加工，每榀做试验性拼接，每做好榀标记。

焊接质量符合要求，不能虚焊，假焊。

红外线水平仪激光扫射，确保桁架垂直及在同一平面。

钢桁架纵向连接可靠，端部加斜撑防倾。法兰连接螺栓可靠。

（6）经济效益分析

钢模台车与大跨度钢桁架模板施工工法施工成本分析对比，每次大厅模板施工费用可节省 40 万元以上，并且养护期间工人可做其他工作，误工少，有利于项目成本管理。

表 2-2

钢模台车(175m长)(十字交叉处要求最短距离)							
全部项目	制造成本	立模成本(不含摊销)		作业平台增加		可回收费用	
台车重量	145T	摊销重量	1120m ³	平台面积	520m ²	台车重量	145T
加工成本	7500元/T	立模摊销	75元/m ³	摊销成本	25元/m ²	可回收费	1100元/T
合计(元)	1087500	合计(元)	84200	合计(元)	15500	合计(元)	-257000
合计				857100元			
钢桁架和桁架模板施工							
全部项目	材料制造成本	专业队伍钢桁架模板成本		钢桁架月折旧费成本		钢桁架摊销成本	
桁架重量	14.2T	摊销重量	552m ³	钢桁架工	40工	摊销重量	77000元
加工成本	5500元/T	摊销摊销	110元/m ³	工人摊销	220元/工	摊销摊销	10000元
合计(元)	81800	合计(元)	55200	合计(元)	8000	合计(元)	110000
立模成本		摊销成本		钢桁架摊销成本		可回收费用	
摊销重量(不含摊销)	1120m ³	摊销摊销	224m ³	摊销摊销摊销	154m ³	摊销重量	11.2T
立模摊销	180元/m ³	摊销摊销摊销	300元/m ³	摊销摊销摊销	540元/m ³	摊销摊销摊销	2800元/T
合计(元)	201600	合计(元)	17920	合计(元)	30844	合计(元)	-30400
合计				45664元			

第三章 竖井施工

3.1 竖井施工方法

其头山溜井直径 8m，深 210m，常用竖井施工方法有三种可供选择：

- ①爆破开挖：自上而下，自下而上，一次性爆破成井。
- ②反井钻机法：反井钻机法+爆破扩挖。
- ③竖井硬岩掘进机法（SBM）：宁海抽水蓄能电站采用

3.2 宁海排风竖井 SBM 施工法

3.2.1 简介

宁海抽水蓄能排风竖井工程地处浙江省宁波市宁海县，位于下水库竹腰坑左岸山坡，为通风兼安全洞附属洞室，竖井底部为排风竖井下平洞，排风竖井下平洞与通风兼安全洞相连通。竖井总长 198m，开挖直径 7.83m。

排风竖井井身段支护方式为：锚网喷与锚喷支护，锚杆为 $\Phi 22@150\times 150$ ，锚网喷厚度 150mm，砼强度等级 C30。

开工日期：2020 年 7 月 20 日

计划竣工日期：2021 年 2 月 10 日。实际施工一年。

3.2.2 SBM 结构

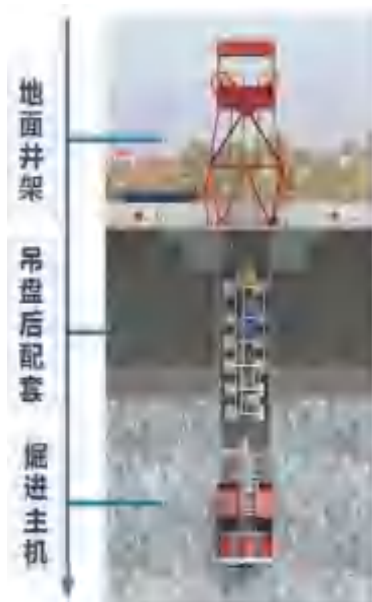


图 3-1

地面配套设备主要由凿井井架、提升绞车、稳车、天轮、钩头、吊桶、混凝土搅拌站、空压机房、风机、蓄水池、污水池等设施，实现吊盘及相应管线的悬吊，地面设施为矿山钻爆法成熟设备。



图 3-2

提升及悬吊系统：

1) 吊盘悬吊；2) 吊桶升降；3) 进水管悬吊 4) 排水管悬吊； 5) 电缆悬吊； 6) 风筒悬吊
7) 模板悬吊；8) 安全梯悬吊；9) 压风管悬吊 10) 溜灰管悬吊

井下设备主要由掘进主机和吊盘后配套两部分组成，两者为分体设计。掘进主机直接与开挖面接触；吊盘后配套通过地面悬吊系统悬吊；掘进主机与吊盘后配套之间通过管线相连。



图 3-3

3.2.3 竖井及掘进机主要参数

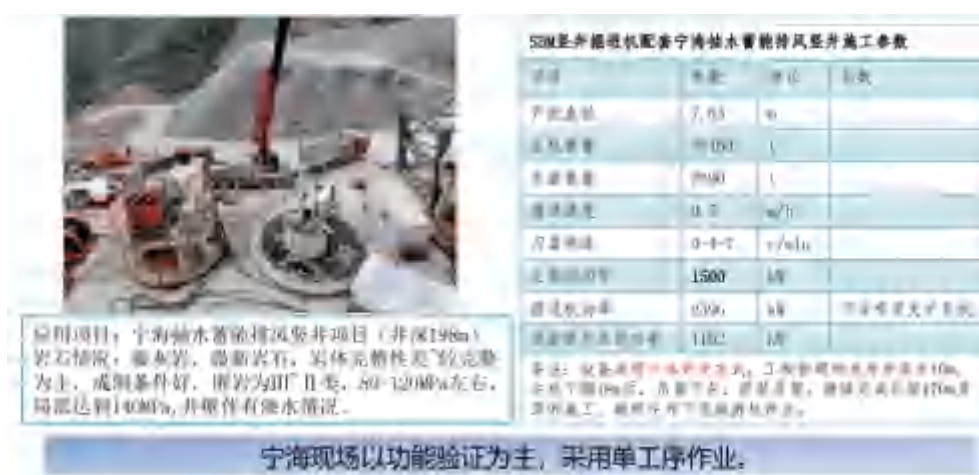


图 3-4

图 3-5

图 3-6



图 3-7



图 3-8



图 3-9



图 3-10



图 3-11

3.3 反井钻机导洞施工

3.3.1 反井钻机选择原则

(1) 工程条件是否满足。主要包括工程性质、用途、主要技术参数(井孔深度、终孔直径、井孔倾角度等)、相关工程状况。根据施工井筒的深度和倾角等要求,结合现有设备及市场情况确定钻机。

(2) 地质条件是否满足。包括岩石的物理力学性质、岩体产状、主要地质构造及参数、水文地质条件等。对于深孔、斜孔,应有钻孔位置的勘探孔资料和地质柱状图。根据施工井位的地质构造及岩性,确定冲洗液为泥浆或清水,从而选择用泥浆泵或水泵。

(3) 施工条件。运输条件,吊装条件以及供电、供水情况。根据井位供电、供水、运输及井下水平巷道开通情况确定钻机的类型。一般在井位处应有供电、供水,具有钻机工作空间,在水平巷道开通的情况下,选择上扩法施工,应选择上扩类全断面反井钻机。在煤矿多选择电驱动液压反井钻机。

3.3.2 可行性和风险评估

对工程施工条件进行分析，包括：

- ①下水平隧道是否具有运输、出渣、排水、供电、通风等生产系统；
- ②对地质条件进行分析，分析围岩在反井钻井施工过程中和扩孔期间能否稳定，不发生较大的涌水和塌方，造成钻孔堵塞和下部设施淹没。因为在反井施工期间，无法进行支护，若围岩不能自稳，发生塌方，将会堵塞钻孔，造成事故；对施工位置安全状况进行分析，包括交通运输、通风、隧道支护情况及稳定情况、洪水、有害气体等是否对施工人员和设备伤害程度。

综合以上分析，其头山矿溜井可以选 用反井钻机施工。

3.3.3 钻机选择：竖井总长 198m，开挖直径 7.83m。选用 AT2000 型反井钻机

表 3-1 AT2000 型反井钻机基本性能参数表

主机	导孔直径	mm	280
	扩孔直径	mm	2000
	钻孔角度	o	60-90
	钻井深度	m	250
	质量	t	15
泵站	额定压力	MPa	副泵：25 主泵：28
	油箱有效容积	L	1100
	外形尺寸（长 X 宽 X 高）	mm	2500x1300x1600
	重量	t	4

3.3.4 工艺流程图

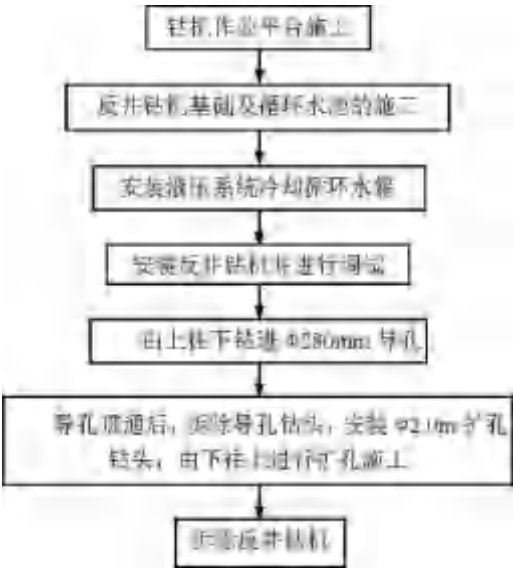


图 3-12 工艺流程图

工艺流程-基座

根据反井钻定位位置，将反井钻机基础位置基岩清理至完整基岩面，然后采用 C25 混凝土浇筑 $5.5\text{m} \times 4\text{m} \times 0.5\text{m}$ （长*宽*高）反井钻基础，并保证表面平整，终凝后，在混凝土表面放样标识出反井钻中心点及控制线。



图 3-13 基座设计图



图 3-14 基座实际图

工艺流程-配套水电要求

(1) 泥浆池制备

在钻机上游边墙位置采用混凝土浇筑一个 4.5m *3.8m *1.5m （长*宽*高）的泥浆池，用于导孔钻孔循环排渣，泥浆池形状尺寸可视现场实际情况进行调整。

(2) 钻机用电

反井钻机钻孔总功率约 200kW （主泵电机 132kW，副泵电机 11kW，以及照明用电 和潜水泵等）。施工期在尾调通气洞避车道内设置一 400kVA 变压器，施工用电满足反井钻施工需求。

(3) 钻机用水

反井钻施工用水是至关重要的，其作用最主要有三点：第一用来冷却液压系统油温；第二在导孔钻进中用于循环排渣；第三在反拉过程中冷却反拉刀盘，所以施工用水必须保证连续不断的充足供应，每小时大约需要 20m³ 左右。施工用水采用原尾调通气洞用水管路供水，该套管路为 2 寸钢管，延伸到工作面时通过接软管至钻机内供水。另可通过布置在洞口上游侧泥浆池内的泥浆泵向导孔内循环供水。

工艺流程-开孔

开孔钻进时，首先将混凝土基础面凿出一个小凹坑，使导孔钻头能垂直平面开孔，开始阶段应采用低转速钻进，开孔钻杆应选用直径与 $\phi 280\text{mm}$ 的导孔钻头同等大小并且加工精细的稳定钻杆，再配合扶正器慢速开孔，第 1 根钻杆完全进入岩石后，再接上第 2 根稳定钻杆继续钻进，第 3 根钻杆换用普通钻杆，这样继续钻进，始终保持稳定钻杆紧紧贴住孔壁，直至第 3 根钻杆完全入岩时，提出所有钻杆，卸下第 1 根和第 2 根特殊稳定钻杆，换上正常的普通钻杆，配合正常的钻具组合，放入孔内继续钻进，直至开孔结束进入正常钻进阶段。

工艺流程-导孔钻进

钻进过程注意事项：

- ①根据岩石地质条件调整合理的钻压和转速，钻进速度必须均匀，切忌忽快忽慢。
- ②密切观察孔内的返水量，发现返水突变时，必须检查处理。
- ③导孔钻进返出的岩屑应及时清理。
- ④当一根钻杆完成后，必须等钻孔内的岩屑全部排出后，方可停泵接卸钻杆。
- ⑤当导孔钻通后，关闭水管停止水循环，但此时钻机不能停转，直到钻机转动平稳，扭矩变化不大、钻杆上下自如时才能停钻。

⑥故障排查：

若孔内返水量极少甚至不返水，则说明遇到了断层、裂隙等地质构造。或者孔内不漏水，但钻具旋转困难进尺不明显，有可能遇到了破碎带或岩层塌落。该两种现象都应停止钻进，进行灌浆处理，将钻杆提出，将高标号水泥浆沿孔壁倒入，直到灌满钻孔，等强 2 天后方可重新开钻。

⑦安装钻机时，保证钻机的垂直度，垂直度偏差应小于 1%。

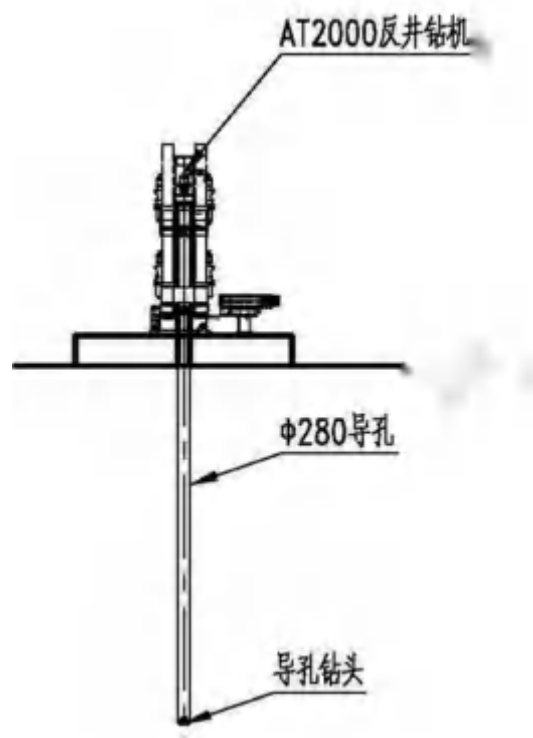


图 3-15

工艺流程-反拉

钻在导孔完成后,在尾水调压室下平洞将反井钻导孔钻头拆卸掉,安装上 2.0m 直径反拉刀盘,自下而上沿导孔方向反拉,开始导井开挖。

反拉开始前，先将动力头出轴转速调整为低速。开始反拉时，慢速上提钻具，直到滚刀开始接触岩石，然后停止上提，用最低转速（5-12rpm）旋转，并慢慢给进、保证钻头滚刀不受过大的冲击而破坏，等钻头全部均匀接触岩石，才能正常扩孔钻进。钻进过程中还需注意：

1) 扩孔钻压和扭矩的大小是根据地层的具体情况及钻井深度而定的，拉力一般不超过 20MPa，扭矩在 15MPa 以下。

2) 钻进过程中，若发现钻头剧烈晃动，扭矩起伏过大，进尺困难时，可能是有大块碎石落在刀具上挤压刀具所致，此时将钻头放下一定距离，多次高速旋转，将碎石甩掉，若还无效果，把钻头下放到底进行处理。施工过程中时刻观察冷却水的供给情况，禁止打干孔，以防损伤刀具。

3) 掉落到下平洞的岩渣应及时利用装载机配合自卸汽车清理倒运至中转料场内暂存，每日反拉结束后，需及时出渣，以防堆积过高堵塞导井口。出渣时严禁反井钻施工。



图 3-16

工艺流程-拆机

导井反拉完成后，将反拉刀盘临时固定在导井中，先将各种油管从主机上拆下，拆掉翻转架，再拆掉钻机的后支撑拉杆，将主机放倒，再拆除刀盘外侧一圈刀头，把刀盘提出井外，全部钻进工作结束，将钻具运离工作面。将泥浆池等各种附属设施拆除，运往弃渣场。

浙江省工程建设标准《城市地下工程施工与运行监测技术规程》

——城市地下管线探查与监测新技术

New technology for urban underground pipeline detection and monitor

楼国长

目 录

第一章 概述

1.1 前言

1.2 监测目的和意义

1.3 第三方监测单位资格

1.4 地下管线基础知识

1.5 参考文献

第二章 地下管线监测等级和项目

第三章 地下管线监测技术

4.1 基本要求

4.2 管线探查（物探和调查）

4.3 监测内容

4.4 测点布置

4.5 监测频次

4.6 监测报警

4.7 工程实例

第四章 结论

本人历年的物探专业继续教育培训 主题

2018年《工程与环境物探》：主要工程地球物理探测方法和其适用范围、物探在工程与环境调查中的应用等新技术和新方法。

2019年《声波探测》：声波探测在工程和环境检测中的应用等新技术。

2020年《波速测试》：单孔法波速测试、跨孔法波速测试、瑞利波法波速测试、工程物探波速测试在岩土工程中的应用新技术。

2021年《跨孔超声波法探测地下障碍物的新技术研究进展》：跨孔超声波法探测地下管道埋深等新技术研究进展，主要解决以下城市地下空间工程设计和安全施工遇到的问题。

物探专业继续教育培训 选题背景

历时八年，浙勘集团参编：

浙江省工程建设标准《城市地下工程施工与运行监测技术规程》（DB 33/T 1266-2021）自2022年05月01日起施行；

- 1 适用于浙江省城市地下工程施工与运行阶段的监测。
- 2 其中第9章的周边环境监测包含了地下管线探查（物探和调查）和监测技术。

新时期阶段：

- 1 我国城市地下空间开发和利用迅猛发展，地下工程的分布越来越密；
- 2 为地勘局系统从事工程勘察、设计、施工、监理等技术人员进行物探知识科普。

地下管线物探和监测目的：

- 1、在地下工程设计、施工前收集有关资料，利用工程物探技术手段查明地下管线平面位置和埋深是一项必不可少的工作，这是监测工作的前期准备阶段。
- 2、监测目的：保护地下管线及其附属设施的安全和正常运行，防止因施工而造成地下管线损坏，也为地下工程的动态设计和信息化施工提供关键依据。

地下空间发展的工程需要

地下空间已成为继宇宙空间、海洋资源之外人类可开拓第三大领域

- 1 节约土地资源、提高城市土地利用率
- 2 发展地下交通，促进公共交通出行，疏导交通，提高出行效率
- 3 减少污染排放、节约能源，改善城市生态环境

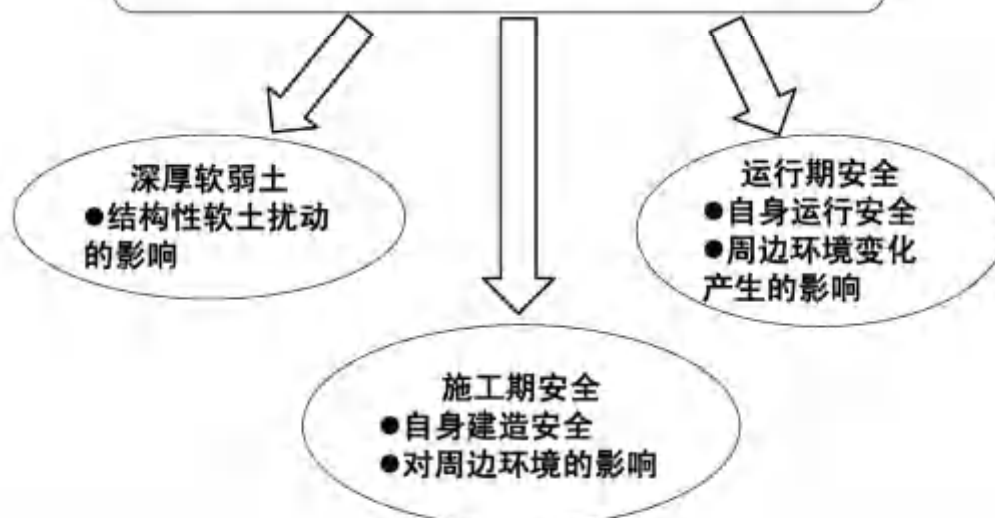


综合体开发



交通枢纽开发

城市地下工程面临的问题



1.1 前言



城市地下工程主要面临的问题



监测术语

地下管线：地下管线是指敷设于地下，用于传送能源、信息和排泄物等的管道（沟、廊）、线缆等及其附属设施，主要包括给水管道、排水（污）管道、燃气管道、热力管道、工业管道、地下通讯管线、电缆、光缆等。

周边环境：城市地下工程施工影响区内的建（构）筑物、轨道交通设施、道路、桥梁、隧道、管线等保护对象的统称。

周围岩土体：城市地下工程施工影响范围内的岩体、土体、地下水等工程地质和水文地质的统称。

监测：采用仪器监测、现场巡查或远程监控等手段和方法，长期、连续地采集和收集反映城市地下工程施工、运行线路结构以及周边环境的安全状态、变化特征及其发展趋势的信息，并进行分析和反馈的活动。

施工影响分区：根据周围岩土体受城市地下工程施工影响程度的大小划分得到的区域。

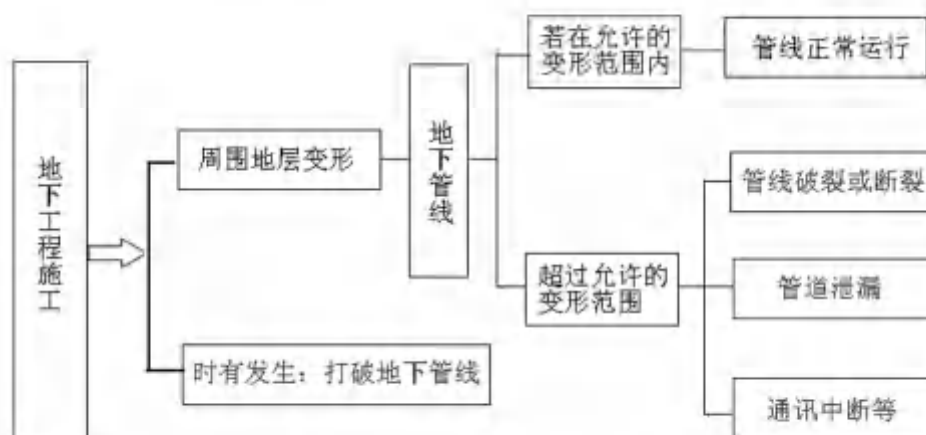
城市地下工程自身风险等级：根据城市地下工程自身发生变形或破坏、周围岩土体失稳等的可能性和破坏后果的严重程度进行综合评估而确定的等级。

周边环境风险等级：根据周边环境重要性类别、服役年限、安全状况以及所受的周边地下工程施工影响分区等因素进行综合评估而确定的等级。

监测等级：根据城市地下工程自身、周边环境和地质条件等的风险大小，对城市地下工程施工阶段与运行阶段的监测进行划分等级。

监测报警值：为确保城市地下工程在施工阶段工程自身和周边环境的安全以及在运行阶段的安全，对监测对象可能出现异常、危险所设定的监测变量警戒值。

1.2 监测目的和意义



施工影响区地下管线安全因素分析

地下管线探查和监测的目的和意义

城市地下工程施工过程中，施工影响区域内使地下管线变形过大或被打破地下管线等安全风险事件时有发生，其原因之一是没有对地下管线实施精细探查和监测。



某工地施工挖断天然气管道受燃起大火



施工挖断燃气管道，造成燃气泄漏



施工挖断天然气管道



施工挖断天然气管道



施工引起燃气管道泄漏现场

在地下工程施工影响范围区域内，对地下管线实施合理的探查、监测：

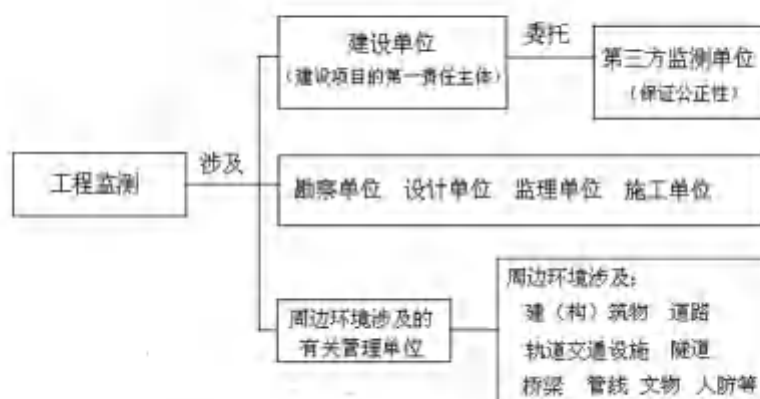
其目的是保护地下管线及其附属设施的安全和正常运行，防止因施工而造成地下管线损坏。

其意义：

（1）为地下工程的动态设计和信息化施工提供关键依据，以保护周边环境安全，具有重大的社会意义；

（2）地下管线探查和监测技术可以推动综合物探勘查技术的创新和发展，提高工程技术人员的解决岩土工程问题的能力。

1.3 第三方监测单位资格



城市地下工程监测涉及单位

《规程》DB 33/T 1266-2021中第9.1.1条：周边环境中的其他各类保护对象都应进行调查并收集相关工程资料。当无地下管线平面位置和埋深的资料时，监测前应对地下管线进行精细探查。

第三方：是指独立于建设方、施工方之外的监测单位。

实施第三方监测有利于保证监测的客观性、公正性。

工程监测技术人员：要有岩土工程、结构工程、工程测量等方面的综合知识和较为丰富的工程实践经验。

检验检测机构的基本条件和技术能力

工程监测单位：应同时具备岩土工程和工程测量等方面的专业能力，具备承担工程监测任务的相应仪器设备及其它测试条件，有经过专门培训的监测人员和经验丰富的数据分析人员，有必要的有效质量管理体系。

1.4 地下管线基础知识

地下管线种类

管线种类	管线按其传输的物质和用途分类
给水管道	生活用水、生产用水和消防用水等管道
排水管道	污水、雨水和雨污合流等管道
燃气管道	煤气、液化气和天然气等管道
工业管道	输油、氢气、氧气、乙炔、乙烯、苯、氯气、二氧化碳、氨气、甲苯等管道
热力管道	蒸气、热水等管道
电力电缆	供电、路灯、电车、交通信号、广告等电缆
通信电缆	电话、广播、有线电视、光缆、信息网络等电缆

施工影响区域内使燃气管道、输油管道、电力电缆等地下管线被打破等安全风险事件时有发生。



长输天然气管道



输油管道



燃气管道埋设现场



破损的液化气管道

地下管线按材质分类

铸铁管、钢管、混凝土管、钢筋混凝土管、塑料管（PE、PVC等）
石棉水泥管、陶土管、陶瓷管、砖石沟等

地下管线特征点

燃气、热力及工业管道的附属设施：

胀缩器、排气（排水、排污）装置、凝水井、各种窨井、阀门等

电力电缆的附属设施：

杆上变压器、露天地面变压器、各种窨井、人孔井等

给水管道的附属设施：

阀门、水表、消火栓、排气阀、排泥阀、预留接头、阀门井等

地下管线的埋深

可分为外顶埋深、中心埋深、内底埋深和外底埋深

地下管线的性质

燃气管道内压力的低压、中压、高压；

工业管道内压力的无压（或自流）、低压、中压、高压；

电力电缆电压的低压、高压和超高压等性质。

管线资料收集

在地下管线监测前，应收集：

地下管线图

地下管线的平面位置(或坐标)、埋深(或高程)、走向、规格

地下管线的性质、类型、材质等

城市地下管线探查的质量检查

- 1 应在测区明显管线点和隐蔽管线点中分别随机抽取不少于各自总点数的5%;
- 2 抽取的管线点应具有代表性并在测区内均匀分布;
- 3 检查应在不同时间、不同作业人员完成;
- 4 检查内容应包括探查的几何精度检查和属性调查结果检查。

地下管线的的探查精度

城市地下管线探测应以中误差作为衡量探测精度的标准,且以二倍中误差作为极限误差。地下管线探查几何精度应符合下列规定。

(1) 在明显管线点上应实地量测管线点的埋深,埋深量测中误差不应大于25mm。

(2) 隐蔽管线点的平面位置探查中误差不应大于0.05h,埋深探查中误差不应大于0.075h,其中h为地下管线的中心埋深,单位为mm,当h<1000mm时,则以1000mm代入计算。

隐蔽管线点的平面位置和埋深的探查限差

计算 δ_{ts} 和 δ_{th} 时,取h为各检查点隐蔽管线中心埋深的算数平均值。

$$h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad \delta_{ts} = 0.1h \quad \delta_{th} = 0.15h$$

式中: h_i 为个各检查点的隐蔽管线中心埋深(mm);

当 $h_i < 1000\text{mm}$ 时,取 $h_i = 1000\text{mm}$;

n为隐蔽管线点的检查点数;

δ_{ts} 为隐蔽管线点的平面位置探查限差(mm);

δ_{th} 为隐蔽管线点的埋深探查限差(mm)。

要求:

隐蔽管线点的平面位置中误差 $m_{ts} \leq 0.5 \cdot \delta_{ts}$

隐蔽管线点的埋深中误差 $m_{th} \leq 0.5 \cdot \delta_{th}$

地下管线详查时,地下管线的平面位置和埋深的探查精度可另行约定

隐蔽管线点的探查精度的验证

根据《城市地下管线探测技术规程》CJJ 61-2017，隐蔽管线点的探查精度的验证应符合下列规定：

- 1 验证点应具有代表性并均匀分布，
- 2 每个测区验证点数不宜少于隐蔽管线点总数的0.5%，且不宜少于2个；
- 3 验证应包括几何精度和属性精度。



管道探查验证

1.5 参考文献

浙江省工程建设标准《城市地下工程施工与运行监测技术规程》DB 33/T 1266-2021

国家行业标准《城市地下管线探测技术规程》CJJ 61-2017

国家行业标准《城市工程地球物理探测标准》CJJ/T 7-2017

国家标准《城市轨道交通工程监测技术规范》GB 50911-2013

国家标准《建筑基坑工程监测技术标准》GB 50497-2019

国家标准《工程测量标准》GB 50026-2020

国家行业标准《建筑变形测量规范》JGJ 8-2016

国家行业标准《城市测量规范》CJJ/T 8-2011

浙江省工程建设标准《建筑基坑工程技术规程》DB 33/T 1096-2014

第二章 地下管线监测等级和监测项目

2.1 监测等级

地质条件复杂程度划分
城市地下工程施工的自身风险等级划分
城市地下工程施工影响分区的划分
城市周边环境(含管线)风险等级划分
城市地下工程施工监测等级划分



明挖基坑(围填)监测

2.2 监测项目

水平位移监测	竖向位移监测	深层水平位移监测
深层竖向位移监测	孔隙水压力监测	土压力监测
地下水位监测	现场巡查	远程实时监控
自动化监测等		

地下工程施工性质

- 1 基坑工程、盾构法隧道工程、矿山法隧道工程和桩基工程等地下工程施工
- 2 还可包括边坡工程、非开挖顶管工程、非开挖定向钻工程、强夯工程、加载预压工程、钻探工程、市政道路工程等地下工程施工。

可供参考的重要地下管线

雨污水主干管道、直径较大的自来水管、中水管道、液化气管道、天然气管道、煤气管道、热力管道、输油管道、电力电缆、通讯电缆等对工程有较大危害的地下管线。

2.1 监测等级

根据《城市地下工程施工与运行监测技术规程》DB 33/T 1266-2021，规定了：

- 1 地质条件复杂程度
- 2 城市地下工程施工（基坑工程施工和隧道工程施工）的自身风险等级
- 3 城市地下工程施工影响分区
- 4 周边环境风险等级
- 5 城市地下工程施工监测等级



轨道交通基坑未开挖

地质条件复杂程度划分

地质条件复杂程度可根据**场地地形地貌、工程地质和水文地质条件**进行划分

地质条件复杂程度	等级划分标准
复杂	地形地貌复杂，不良地质作用强烈发育；存在深厚软弱土层，且软弱土厚度超过基坑开挖深度或隧道埋深与隧道直径（宽度）之和；地下水对工程的影响较大，需要进行专门研究和治理
中等	地形地貌较复杂，不良地质作用一般发育；周围岩土体性质一般；地下水对工程的影响较小
简单	地形地貌简单；不良地质作用不发育；周围岩土体性质较好；地下水对工程无影响

基坑工程施工影响分区

地质情况 分区	基坑周边无软弱土层时	基坑周围岩土体以软弱土层为主时
主要影响区	基坑周边 $0.7H$ 或 $H \cdot \tan(45^\circ - \phi/2)$ 范围内	基坑周边 $1.0H$ 范围内
次要影响区	基坑周边 $0.7H$ 或 $H \cdot \tan(45^\circ - \phi/2) \sim 2.0H$ 范围内	基坑周边 $1.0H \sim 3.0H$ 范围内
轻微影响区	基坑周边 $2.0H$ 范围外	基坑周边 $3.0H$ 范围外

注:

- 1 H —基坑开挖深度, ϕ —岩土体的内摩擦角标准值($^\circ$), 可采用三轴固结不排水抗剪指标或直剪固结快剪指标;
- 2 基坑开挖范围内存在较完整的基岩时, H 可为覆盖土层厚度和基岩强风化层厚度之和;
- 3 表中分区界限 $0.7H$ 或 $H \cdot \tan(45^\circ - \phi/2)$, 取两者的较大值。

土质隧道工程施工影响分区

隧道工程影响分区	区域范围
主要影响区	隧道正上方及沉降曲线反弯点范围内
次要影响区	隧道沉降曲线反弯点至沉降曲线边缘 $2.5i$ 处
轻微影响区	隧道沉降曲线边缘 $2.5i$ 外

注: i —隧道地表沉降曲线Peck计算公式中的沉降槽宽度系数(m)。

隧道穿越基岩时, 应根据覆盖岩土层特征、岩石坚硬程度、风化程度及岩体结构与构造等地质条件, 综合确定工程施工影响分区界线。

施工期间发现地下管线严重变形等异常情况时, 宜根据工程实际情况增大主要影响区范围

周边环境地下管线的风险等级划分

风险等级	等级划分参考标准
特级	主要影响区内的大直径 ($>0.7\text{m}$) 燃气管道或大型压力总水管道等管线设施
一级	主要影响区内的重要管线等设施; 次要影响区内的大直径燃气管道或大型压力总水管等管线设施
二级	主要影响区内的一般管线等设施; 次要影响区内的重要管线等设施; 轻微影响区内的大直径燃气管道或大型压力总水管等管线设施
三级	次要影响区内的一般管线等设施; 轻微影响区内的重要管线等设施

城市地下工程施工监测等级

周边环境 风险等级 地下工程施工 自身风险等级	特级	一级	二级	三级
一级	特级	一级	一级	一级
二级	特级	一级	二级	二级
三级	特级	一级	二级	三级

- 1 监测等级按施工的自身风险等级和周边环境风险等级中最高等级确定
- 2 监测等级应综合考虑工程自身破坏后果的严重程度、周边环境和地质条件等因素进行划分

2.2 地下管线监测项目要求

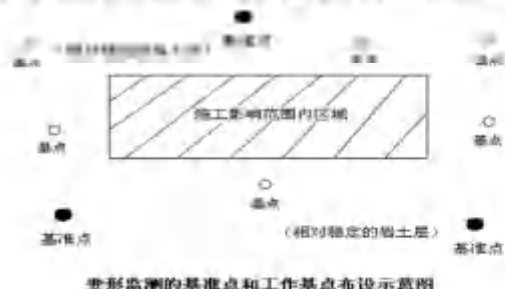
- 1 变形监测的基准点和工作基点布设
- 2 监测仪器、设备和元件
- 3 同一工程的监测项目要求
- 4 竖向位移监测
- 5 水平位移监测
- 6 深层水平位移监测
- 7 深层竖向位移监测
- 8 孔隙水压力监测
- 9 土压力监测
- 10 地下水位监测
- 11 现场巡查、远程实时监控和自动化监测
等等。



明挖基坑(开挖与回填)监测

城市地下工程施工 变形监测的基准点和工作基点布设

- 1 基准点应布设在施工影响范围以外的稳定区域，且每个监测工程的竖向位移监测基准点和水平位移监测基准点应分别不应少于3个；
- 2 当基准点距离监测工程较远而影响监测作业时，应设置工作基点；当使用工作基点时，应与基准点进行联测；
- 3 基准点和工作基点应在工程施工前埋设，并应埋设在相对稳定的岩土层上，经观测确定稳定后方可使用；
- 4 监测期间，应对基准点进行定期复测；
- 5 基准点布设尚应满足现行有效的行业标准《建筑变形测量规范》JGJ 8的有关要求。

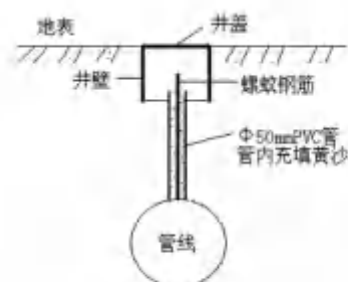


变形监测的基准点和工作基点布设示意图

监测仪器、设备和元件

- 1 监测仪器应通过检定或校准，并应在规定的检定或校准有效期内使用。
- 2 监测项目初始值：
 - (1) 应在相关施工工序之前测定；
 - (2) 取至少连续观测3次稳定值的平均值。
- 3 保护：监测过程中，应做好监测点和传感器的保护工作。 ☆

4 宜固定监测人员



竖向位移监测项目

竖向位移监测可采用几何水准测量、电子测距三角高程测量或静力水准测量方法，技术要求如下：

- 1 竖向位移监测采用的水准仪的视准轴与水准管轴的夹角（ i 角），监测等级特级和一级时不应大于 $10''$ ，监测等级二级时不应大于 $16''$ ，监测等级三级时不应大于 $20''$ ； i 角检校应符合现行国家标准《国家一、二等水准测量规范》GB/T 12897的有关规定；
- 2 采用电子测距三角高程进行竖向位移监测时，宜采用 $0.5''$ — $1''$ 级的全站仪和特制觇牌采用中间设站、布量仪器高的前后视观测方法，并应符合现行行业标准《建筑变形测量规程》JGJ 8的有关规定；
- 3 采用液体静力水准进行竖向位移监测时，应采用2台仪器对向观测，或一台仪器往返观测，并应符合现行行业标准《建筑变形测量规程》JGJ 8的有关规定；
- 4 竖向位移监测应取最初至少3次测值的平均值作为初始值。

水平位移监测项目

测定监测点特定方向的水平位移时，可采用投点法、小角法、激光准直法、方向线偏移法或视准线法，技术要求如下：

- 1 当采用投点法和小角法时，应对经纬仪或全站仪的垂直轴倾斜误差进行检验，当垂直角超出 $\pm 3''$ 范围时，应进行垂直轴倾斜修正；
- 2 当采用激光准直法时，应在使用前对激光仪器进行检校，使仪器射出的激光束轴线、反射系统轴线和望远镜照准轴三者重合（共轴），并使观测目标与最小激光斑重合（共焦）；
- 3 当采用方向线偏移法时，对主要监测点，可以该点为测站测出对应基准线端点的边长与角度，求得偏差值；对其它监测点，可选择适宜的主要监测点为测站，测出对应其它监测点的距离与方向值，按方向值的变化求得偏差值。

测定监测点任意方向的水平位移时，可视监测点的分布情况，采用前方交会法、自由设站法、导线测量法和极坐标法。

边坡生态环境治理应实施：

竖向位移、水平位移监测 + 现场巡视



深层水平位移监测项目

深层水平位移宜通过桩（墙）体内或岩土体内预埋测斜管，采用测斜仪量测各深度处水平位移的方法进行监测。

测斜仪的系统精度不宜低于 0.25mm/m ，分辨率不宜低于 $0.02\text{mm}/500\text{mm}$ 。

测斜管：

- （1）宜采用聚氯乙烯（PVC）工程塑料或铝合金材料制成；
- （2）直径宜为 $45\text{mm}\sim 90\text{mm}$ ；
- （3）管内应有两组相互垂直的纵向导槽。

深层水平位移监测

测斜管的埋设

测斜管应在城市地下工程施工前1周前埋设，埋设时应符合下列规定：

- 1 对埋设于围护桩（墙）内的测斜管，其长度宜与围护桩（墙）相同，并应以上部管口作为深层水平位移的起算点；
- 2 测斜管连接时应保证上、下管段的导槽密封对接、相互对准、保持顺畅，各段接头及管底应保证密封，测斜管管口、管底应采取保护措施；
- 3 对埋设于岩土体中的测斜管，宜以测斜管底作为固定起算点，管底应嵌入稳定岩土层中；当测斜管底部位于土层中时，测斜管长度不宜小于基坑开挖深度的1.5倍，且不应小于桩（墙）的深度；
- 4 测斜管应保持垂直，测斜管的一组导槽应与需要量测的方向保持一致；

深层水平位移监测技术

- 1 对埋设于岩土体中的测斜管，深层水平位移监测前宜采用清水将测斜管内冲刷干净，并采用模拟探头进行试孔检查；
- 2 测斜仪探头应沿导槽缓缓沉至孔底，在恒温10分钟～15分钟后，自下而上以不大于0.5m为间隔，逐段测出需量测方向上的位移；
- 3 每测点均应进行正、反两次量测，并取其平均值作为最终值。
- 4 测斜管埋设后应在城市地下工程施工前2天测定深层水平位移初始值，取至少3次观测的平均值作为初始值。

现场巡查

- 1 城市地下工程施工变形监测，现场巡查可采用人工目测、量尺、照相、摄像等方式；
- 2 对支护结构、施工工况、周边环境和监测设施等进行巡视检查，并将观测到的有关信息做好记录；
- 3 现场巡查信息应与仪器监测数据进行对比分析，及时发现异常或险情。

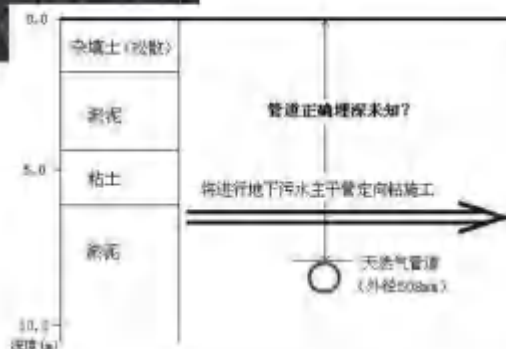
巡视地下管线

- 1 巡视地下管线宜以目视为主，如管线的破损、渗漏，周边施工工况，监测设施完好性等情况；
- 2 可辅以量尺、放大镜等工具以及摄像、摄影等手段进行巡视，并应做好巡视记录。
- 3 如巡视发现异常和危险情况，应与仪器监测数据进行综合分析。



管道定向钻施工前：

- 1 地下管线调查和巡视
- 2 发现一条埋深约8m左右的天然气管道
- 3 后经管线精探核实
- 4 确保了施工安全



远程实时监控

远程视频监控系统应包括前端采集、数据传输、显示等三个部分，并应满足下列要求：

- 1 远程视频监控系统应具有监视、录像、回放、报警、备份等功能；
- 2 实况图像宜采用可通过遥控进行变焦和扫视的摄像头进行采集，摄像头、拾音器等应安装在便于取景和录音的安全部位，并应采取防撞、防水等保护措施；
- 3 视频信号和音频信号可采用无线发送设备或通过有线网络传送到有关部门的监视器中，同时应采用硬盘机或其他大容量的媒介设备记录图像和声音。
- 4 远程实时监控现场应具有合适的照明条件，或采用红外设备进行监控。

自动化监测

- 1 针对城市地下工程结构变形及位移监测，宜采用：

智能全站仪	静力水准仪
激光测距仪	固定式测斜仪
光纤光栅智能传感器	成像识别装置

等自动化监测仪器设备实施自动化监测。

必要时，可采用高精度三维激光扫描仪进行外观巡查和收敛变形计算。

- 2 针对特级监测等级工程：全部或部分关键区域应采用自动化监测技术。

自动化监测系统应具有良好的：

稳定性、耐久性、抗干扰性、兼容性和可扩展性

第三章 地下管线监测技术

- 3.1 基本要求
- 3.2 管线探查
- 3.3 监测内容
- 3.4 测点布置
- 3.5 监测频次
- 3.6 监测报警
- 3.7 工程实例



基坑开挖和周边环境

3.1 监测工作基本要求

- 1 接受委托；
- 2 现场踏勘，收集资料；
- 3 编制城市地下工程监测方案，并报委托方及相关单位认可；
- 4 展开前期准备工作，设置监测点、校验仪器设备；
- 5 设备、仪器、元件和监测点验收；
- 6 现场监测；
- 7 监测数据的计算、整理、分析及信息反馈；
- 8 提交阶段性监测成果和报告；
- 9 现场监测工作结束后，提交完整的监测资料。

监测方案

→ 重要管线的监测方案
应进行专门论证

城市地下管线监测方案应根据城市地下工程施工监测等级、周边环境监测等级等制定，具体应包括下列内容：

- 1 工程概况；
- 2 建设场地水文和地质条件、周边环境状况；
- 3 监测目的和监测依据；
- 4 城市地下工程施工监测等级；
- 5 监测范围、监测项目和测点布置；
- 6 监测方法及其监测仪器设备、元器件及检定要求；
- 7 监测期和监测频次；
- 8 监测报警及异常情况下的监测措施；
- 9 监测数据采集、处理与信息反馈；
- 10 监测人员配备；
- 11 监测质量、安全及其它管理制度。

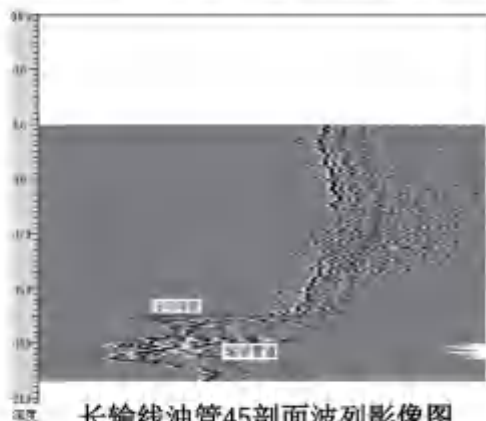
监测单位编制的监测方案，除应经建设、设计、监理等单位认可外，必要时尚应与地下管线管理部门进行沟通和协调后实施。

管线安全专项论证 实例

某隧道工程施工影响区内：存在一根既有外径711mm的输油管道(钢管)，
根据收集到资料：平面位置正确点位不确定，该油管的埋藏深度约16.0m；
管线安全专项论证要求：施工前应对该管道进行精细探查。

探查方法：跨孔超声波法

正确探测结果：该输油管道中心埋深18.5m，确定了平面位置点位。



长输线油管45剖面波列影像图

→ 监测目标准确
确保施工安全

3.2 管线探查

《城市地下工程施工与运行监测技术规程》（DB 33/T 1266-2021）中第9.1.1条：

周边环境中的其他各类保护对象都应进行调查并收集相关工程资料。当无地下管线平面位置和埋深的资料时，监测前应对地下管线进行精细探查。



管道埋深精探现场

地下管线实地调查属性项目

管线类别	埋设方式	埋深		断面		孔 (根)	材质	偏距	附属物	载体特征			权属单位 (埋设年代)
		内底	外顶	管径	宽×高					压力	流向	电压	
给水	管道	—	▲	▲	—	▲	▲	▲	▲	—	—	—	△
排水	管道	▲	—	▲	—	—	▲	▲	▲	—	△	—	△
	沟道	▲	—	—	▲	—	▲	▲	▲	—	△	—	△
燃气	管道	—	▲	▲	—	—	▲	▲	▲	△	—	—	△
	沟道	▲	—	—	▲	—	▲	▲	▲	△	—	—	△
工业	管道	—	▲	▲	—	▲	▲	▲	▲	△	△	—	△
	沟道	▲	—	—	▲	—	▲	▲	▲	△	△	—	△
热力	管道	—	▲	▲	—	▲	▲	▲	▲	—	—	—	△
	沟道	▲	—	—	▲	—	▲	▲	▲	—	—	—	△
电力	管架	—	▲	—	▲	△	▲	▲	▲	—	—	△	△
	沟道	▲	—	—	▲	—	▲	▲	▲	—	—	△	△
	直埋	—	▲	—	—	△	▲	▲	▲	—	—	△	△
通信	管架	—	▲	—	▲	△	▲	▲	▲	—	—	—	△
	沟道	▲	—	—	▲	—	▲	▲	▲	—	—	—	△
	直埋	—	▲	—	—	△	▲	▲	▲	—	—	—	△

“▲”应查明的项目

“△”宜查明的项目

地下管线实地探查记录表

管线点号	管线点类别		材质	管线规格 (mm)	载体特征		隐蔽点探查方法		管线埋深		埋设		备注
	特征	附属物			压力 (电压)	流向 (根数)	定位	定深	外顶 (内底)	中心	方式	年代	

监测单位： 探查者： 校核者： 第 页，共 页

注：激发方式： 定位方法： 定深方法：

地下管线物探应具备的条件

精细探查隐蔽地下管线点平面位置和埋深的地球物理方法应具备下列条件：

- 1 被探查的地下管线与其周围介质之间存在明显的物性（电性、弹性、磁性、密度、温度等）差异；
- 2 被探查的地下管线所产生的异常场有足够的强度，或可从干扰场和背景场中清楚地识别；
- 3 经探查方法试验证明其有效。
- 4 工作现场应具备足够空间，能布置探查装置和开展现场探查工作。

具备：物性差异 有效信号 有效方法 场地条件

场地条件



三维雷达：200MHz、450MHz 等屏蔽天线



二维雷达：70MHz+300MHz、200MHz 等屏蔽天线

如场地条件不满足，
无法开展现场探查？



现场环境照片



探地雷达探测成果图

管线物探工作的基本原则

- 1 从已知到未知，即从已知点开始探查，再去探测查明未知点；
- 2 从简单到复杂，首先应选择管线少、干扰小、条件比较简单的区域开展工作，然后逐步推进到条件相对复杂的区域；
- 3 选用的方法应有效、快捷、轻便，如果有多种方法可选择时，应首先选择效果好、快捷、轻便、安全和成本低的方法；
- 4 在相对复杂条件下，宜采用综合物探方法，以提高探测地下管线的分辨率和探测结果的可靠性。

每种物探方法都有其局限性：

在管线分布复杂的地区，采用相应的综合物探方法；

提高探测地下管线的分辨率和探测结果的可靠性。

地下管线探查的物探方法

电磁感应法（含工频法、甚低频法、直接法、夹钳法、感应法、示踪电磁法）

探地雷达法

直流电阻率法（含高密度电阻率法）

磁法（含高精度磁法、磁梯度法）

浅层地震法（含透射波法、折射波法、反射波法、面波法）

弹性波水声法（旁侧声纳法、浅层剖面法）

红外辐射测温法

弹性波测井法（弹性波CT成像法）

超声成像测井法（跨孔超声波法）

轨迹探测法（三维轨迹惯性定位测量法），等等

地下管线探查应现场设置：

地面管线点唯一性标志、记录探查结果、绘制探查草图

金属管道探查的方法选择

对地下隐蔽金属管道探查，根据任务要求、探查对象和地球物理条件等情况，宜按下列情况选择地球物理探查方法：

- 1 金属管道：宜优先选用电磁感应法的直接法、夹钳法和感应法；
- 2 当金属管道的管径较大、埋深较浅时：宜选用电磁感应法的直接法、感应法，也可选用探地雷达法、直流电阻率法或磁法；
- 3 有高阻抗的金属管道：宜选用频率较高的电磁感应法或探地雷达法；
具备铁磁性的管道且干扰小时，可选用孔中高精度磁法或磁梯度法；
- 4 深埋的金属管道：宜选择综合物探方法
（跨孔超声波法、磁测井法、高密度电阻率法、低频电磁感应法等）；
- 5 热力金属管道或高温输油管道：可选用电磁感应法或红外辐射测温法。

电缆探查的方法选择

对地下隐蔽电缆探查，根据任务要求、探查对象和地球物理条件等情况，宜按下列情况选择地球物理探查方法：

- 1 电缆：宜优先选用电磁感应法的直接法、夹钳法和感应法；
- 2 电力电缆：宜先采用被动源工频法进行搜索，初步定位后再用主动源电磁感应法精确定位、定深，当电缆有出露端时，宜选用夹钳法；
- 3 通信电缆：宜选用主动源电磁感应法；
- 4 电缆管块（空孔）：宜选用示踪电磁法、三维轨迹惯性定位测量法等。



非金属管道探查的方法选择

对地下隐蔽非金属管道探查，根据任务要求、探查对象和地球物理条件等情况，宜按下列情况选择地球物理探查方法：

- 1 有出入口的非金属管道：可采用示踪电磁法、管线三维轨迹惯性定位测量法（轨迹探测法）等；
- 2 钢筋混凝土或带金属骨架的管道：可采用电磁感应法等；
- 3 埋深较大的大口径非开挖管线：可选用弹性波法、高密度电阻率法、示踪电磁法、轨迹探测法等。

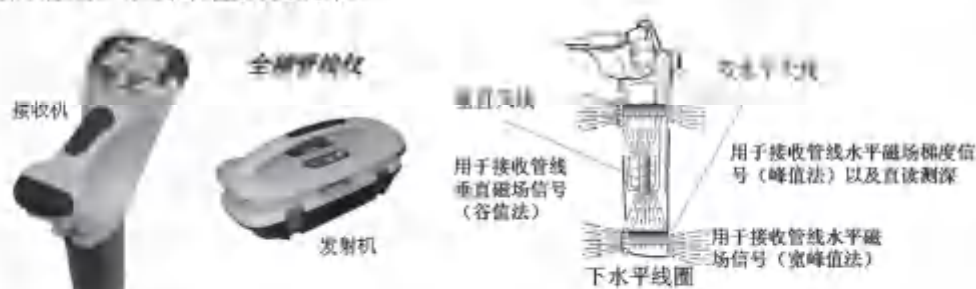


某断面
高密度电阻率法
探测现场

非开挖管道
(直径1500mm)

磁偶极电磁感应法

- 1 在目前技术条件下，简便、有效、快速地搜索金属管线的物探方法是磁偶极电磁感应法；
- 2 这种方法的基本原理是将发射机产生的交变电流信号输入发射线圈，使其周围产生电磁场，当地下存在金属管线时，金属管线在电磁场的激发下产生二次电磁场，用接收线圈接收二次电磁场，就可以发现地下金属管线。
- 3 这种方法发射和接收都不需要接地，因此，操作方便灵活，工作效率高，效果好，而且可根据工作需要灵活改变发射线圈和接收线圈的方位和位置，适应各种不同的情况，取得最佳接收效果。



电磁感应直接法

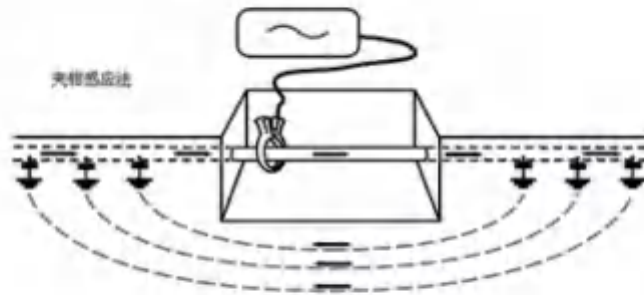


天然气管道



电磁感应直接法探测天然气管道

电磁感应夹钳法



地表接收电磁场信号



电磁感应夹钳法探测管线

红外辐射法

- * 红外辐射法是利用管道或管道内充填物与周围土层之间的热特性差异来探查地下管道的方法。
- * 该探查方法简便，但必须具备地球物理前提条件。
- * 其主要用于探查埋深较浅的暖气管道。

高密度电阻率法

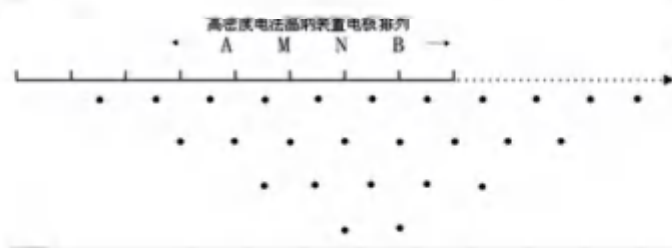
高密度电阻率法其本质与传统的常规电法相同，都是利用待探测体的介电电性差异来实现探测目的；其特点是利用仪器控制多电极自动密集采样，可以一次获得一个断面的视电阻率数据，更加丰富的地电信息和直观可靠的探测结果。

排列一般采用温纳装置测量；

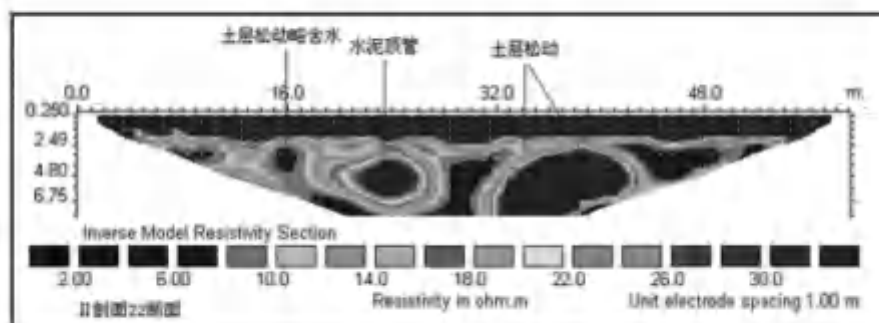
每排列最大电极数为60根及以上；

电极距为0.2m~10.0m可选；最大隔离系数为 ≥ 16 ；

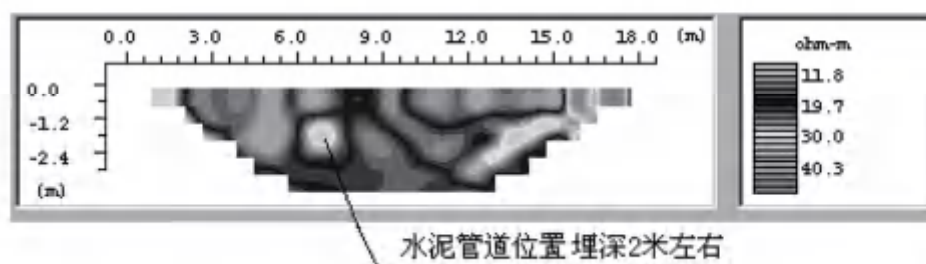
仪器按照设定的程序依次移动供电电极A和B及测量电极M和N并计算相应的装置系数K，通过测读供电电流(I)和测量电极间的电压(ΔV)，计算出对应点的视电阻率值 $\rho_s = K \times \Delta V / I$ 。



高密度电阻率法探测现场



地下水泥管道(直径1500mm)高密度电法探测剖面成果图



某居民小区水泥管道高密度电法探测剖面成果图

电磁感应示踪法

方法原理:

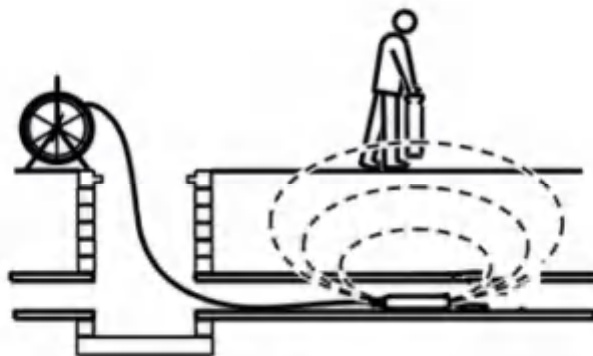
电磁感应示踪法是将能发射电磁信号的电磁示踪探头(或示踪导线)送入非金属管道内,在地面上用仪器追踪电磁信号,探测电磁示踪器(或示踪导线)的位置和深度,间接探测出非金属地下管道的位置和埋深。

适用范围:

对钢筋混凝土结构的非金属地下管道(排水管道、暗渠等)、电缆套管(管块孔等)的探查,当其有出入口时,可采用示踪电磁法。



电磁感应示踪法导线



电磁感应示踪法

将电磁示踪器(示踪导线)送入管道内

在地面接收示踪器发出的电磁场

间接探测出非金属管道的平面位置和埋深

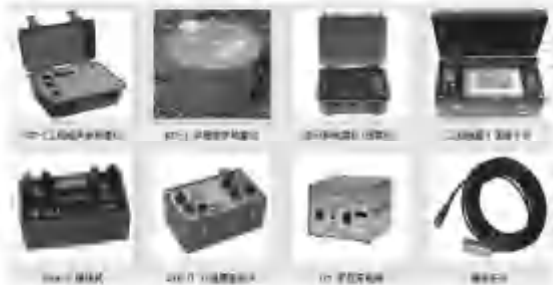
浅层地震波法

方法原理：

浅层地震波法是以地下各种介质的弹性差异（密度及波速）为基础，研究由人工振源（如锤击）产生的地震波的传播规律，用来解决地下介质分布状况的一种物探方法。

适用范围：

其一般用于探测大口径、中等埋深的金属及非金属管道。



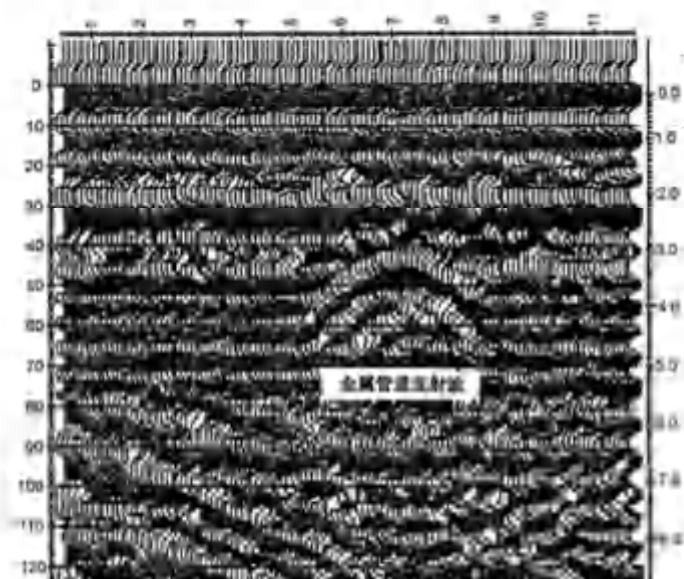
浅层地震波法仪器设备

浅层地震波法是以地下各种介质的弹性差异(密度及波速)为基础,研究由人工振源(如锤击)产生的地震波的传播规律,用来解决地下介质分布状况的一种物探方法。

其一般用于探测大口径、中等埋深的金属及非金属管道。



浅层地震波法仪器设备



浅层地震反射波法成像断面图



人工激振

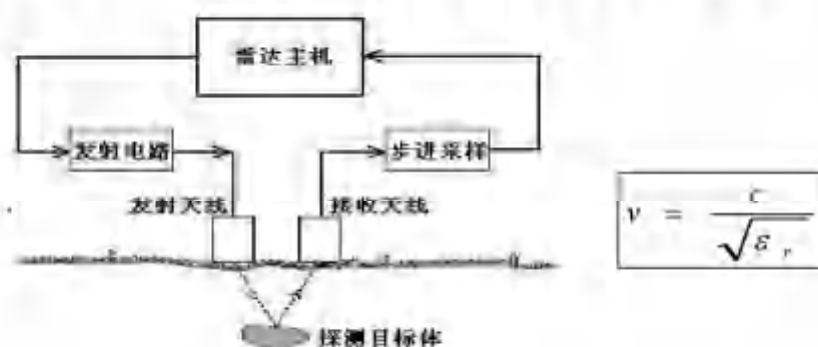


机械激振

探地雷达法

探地雷达法（属于电磁波法）是利用一组天线（主频为十几兆赫至几吉赫）连续向地下发射高频脉冲电磁波，另一组天线接收来自地下介质界面反射的脉冲电磁波信号，根据接收到的电磁波反射时间、幅度、频率和反射波波形特征等，经过数据处理（提高信号信噪比）和分析，可推断地下介质的结构、性质等分布情况。

地球物理前提：介质之间存在明显的电性（相对介电常数 ϵ_r ）差异



探地雷达法探测示意图

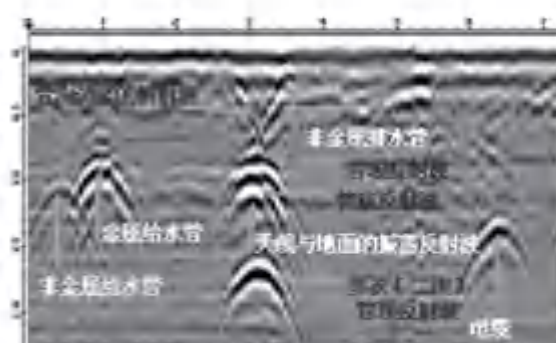
优点：探地雷达法是探查浅埋非金属管道和金属管道都是有效的；

不足：其探测深度有限，频率越高，分辨率越高，而探测的深度越浅；

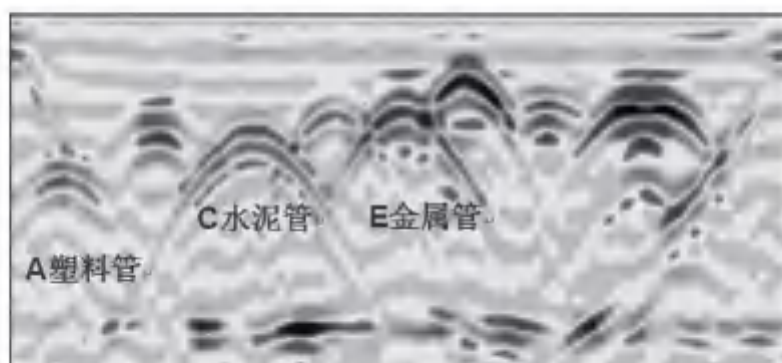
影响因素：探地雷达法探测深度的因素还与地下介质含水量有关。



探地雷达仪器（雷达天线1GHz）



探地雷达探测地下管线成果解释图



A为300mm塑料管 C为600mm水泥管
E为65mm金属管

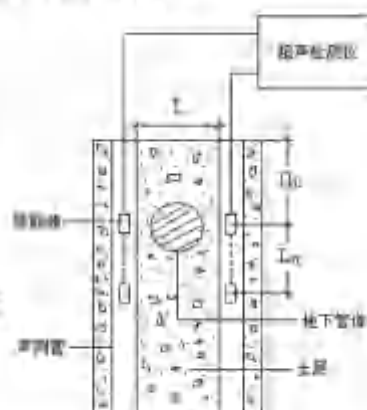
探地雷达探测地下金属和非金属管道成果解释图

跨孔超声波法

跨孔超声波法探测的方法技术，是在被测目标物两侧预埋（利用钻孔成孔埋设）两根竖向相互平行的声测管（铁管或PVC管）作为探测通道，将超声脉冲发射换能器与接收换能器分别置于声测管中，管中注满清水作为耦合剂，由发射换能器发射超声脉冲信号，经接收换能器接收超声波穿过介质的信号，对接收信号的首波声时、波幅、频率等声学参数特征进行综合分析，结合地层情况、介质（如管道）性质，即可评价被测地下介质（如地下管道）的分布特征。

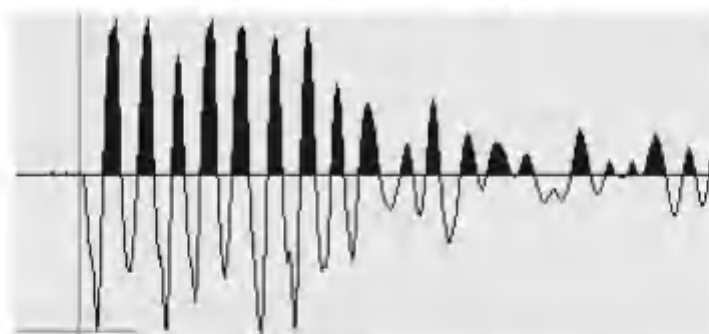
经调查和研究，对于埋深较大的金属管道，可采用岩土跨孔超声波法（属于弹性波法）准确探测地下金属管道埋深。

跨孔超声波法探测示意图



管距2450mm，深度6.5m，在淤泥质粘土层中超声波波形

6.5m淤泥质粘土层超声波波形

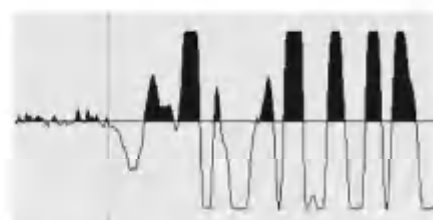


$V_p=1426\text{m/s}$

声时 918.40us 声速 1.426km/s 幅值 139.02dB



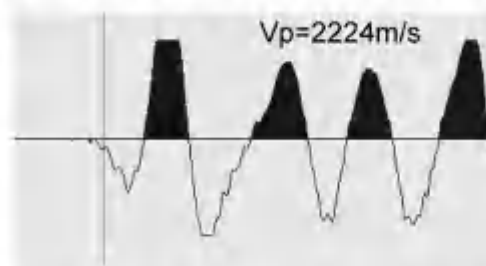
管距2920mm，深度10.3m，在含粘性土碎石层中超声波波形



$V_p=1852\text{m/s}$

声时 1576.80us 声速 1.852km/s 幅值 84.42dB 测距间距 2920mm

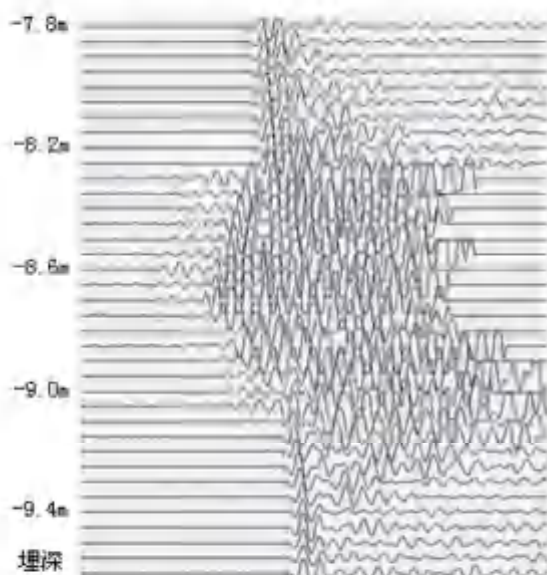
管距3470mm，深度8.4m，在圆砾层中超声波波形



$V_p=2224\text{m/s}$

声时 1580.80us 声速 2.224km/s 幅值 89.09dB 测距间距 3470mm

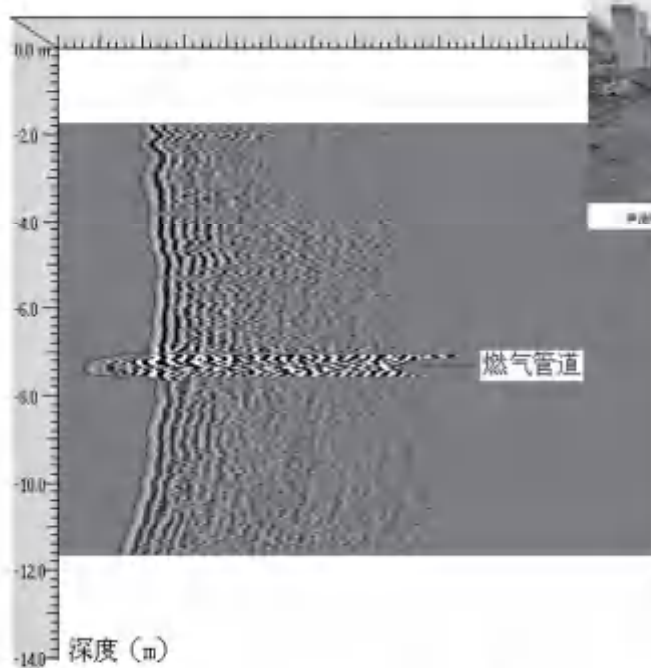
跨孔超声波法探测钢质天然气管道(外径508mm)段波列成果图



(管道中心埋深8.7m)

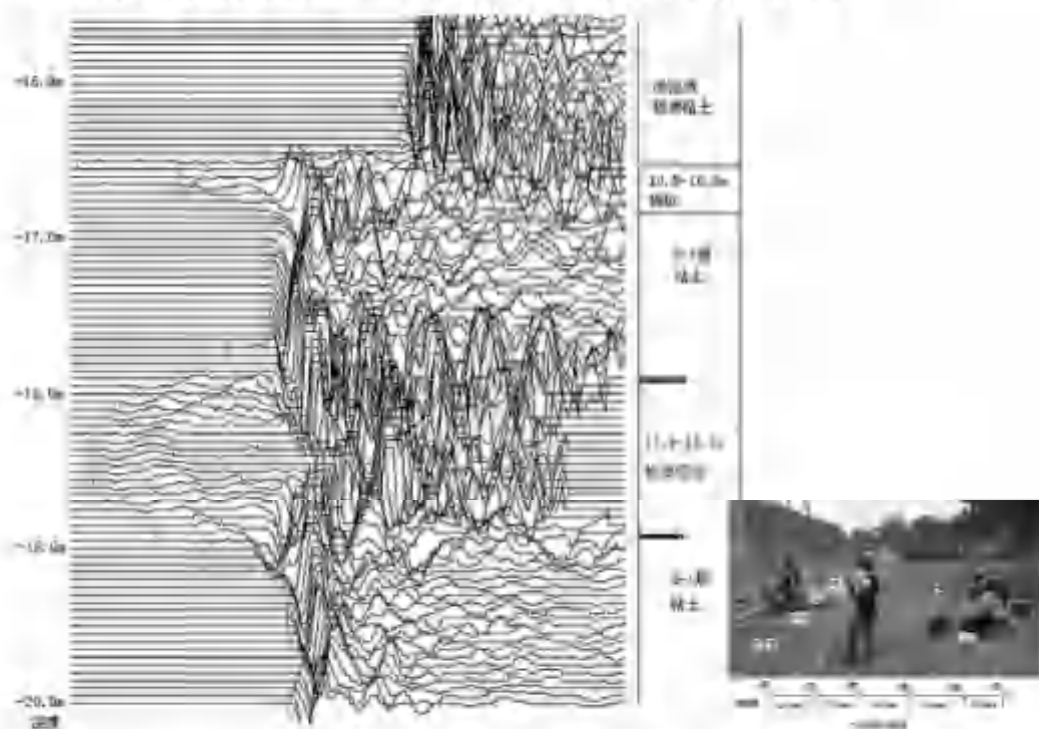


跨孔超声波探测现场

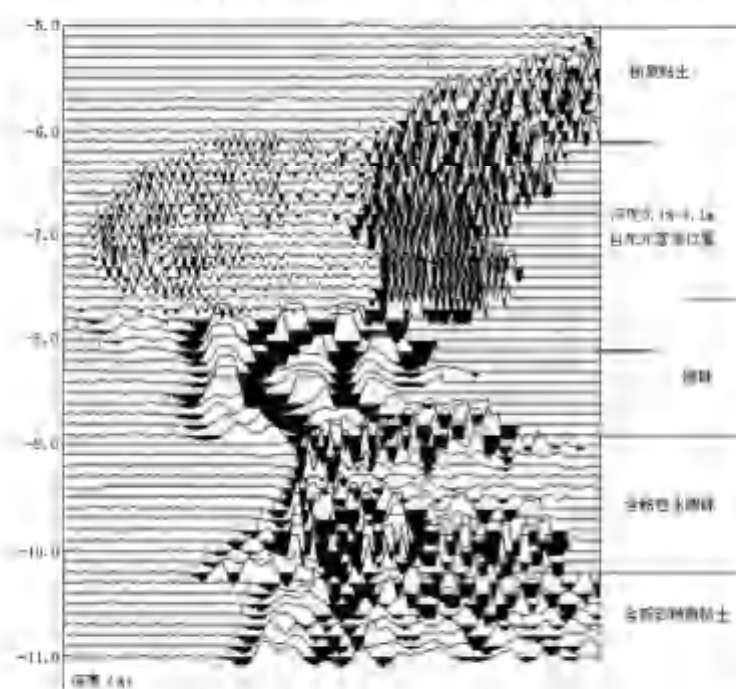


跨孔超声波法探测钢质燃气管道(外径300mm)段剖面波列影像图

跨孔超声波法探测钢质输油管道(外径711mm)段剖面波列成果图



2-3剖面跨孔超声波法探测成果图



跨孔超声波法探测地下管道（钢质）埋深的方法优点和缺点

方法优点：

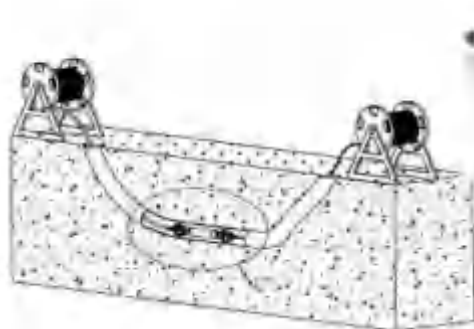
- 1、是能探测较大埋深（大于20.0m）的钢质地下管道，有效地解决了正确探测深埋管道的埋深难题；
- 2、具有探测精度高（深度误差小于20cm）的特点。

方法缺点：

- 1、超声波法探测的跨孔间水平距离受到一定的限制；
- 2、在松散土层，不密实砂土层中，不利于开展跨孔超声波法探测工作。

地下管道三维轨迹惯性定位测量法

地下管道三维轨迹惯性定位测量法是通过惯性传感器（陀螺仪、加速度计）在管道中行进，进行导航与制导，依据测量载体的加速度（惯性），开展惯性定位测量，推算出载体的瞬时速度、位置和姿态，从而获取管道三维轨迹坐标。



地下管道三维轨迹惯性定位测量
获取管道三维轨迹坐标



管道三维轨迹惯性定位

对非开挖地下定向钻形成的
非金属电缆套管（空管）、
非金属燃气管道、
非金属雨污水管道的探查，
可采用：
地下管道三维轨迹惯性定位测量法

管道三维姿态测量非金属天然气管道现场



3.3 监测内容

周边环境仪器监测项目：

应根据各类保护对象的 **风险等级**、**受力特征**、**运行状态** 等因素综合确定



城市地下工程周边环境风险等级为**特级**时：

除按一级风险等级确定监测项目外，尚应根据委托方及相关单位的**特殊要求**增加相应的监测项目，并对**监测方案**进行专门论证。

地下管线仪器监测项目表

周边环境	监测项目	周边环境风险等级			
		特级	一级	二级	三级
地下管线	竖向位移	√	√	√	√
	水平位移	√	√	△	□
	岩土体深层水平位移	√	△	□	□



注：1 表中符号√表示应测，△表示宜测，□表示选测；

2 保护对象风险等级为**特级**时，尚应根据**委托方及相关单位的特殊要求**增加相应的监测项目；

3 对地下管线分布密集的重要部位，抗变形能力差和易渗漏的管线**宜增加**监测项目；

4 隧道工程下穿供水、污水、燃气、热力、输油等地下管线且风险较高时，**应增加**对管线下方岩土体深层竖向位移监测。

✧沿管线轴线附近可综合选用其它项目监测方法，作为管线监测的**辅助监测项目**

地下管线监测内容之一：现场巡查

城市地下工程施工期间，应由专人对周边环境进行现场巡查；

如发现异常和危险情况，应及时通知委托方及其他相关单位。

现场巡查应包括下列内容：

- 1 建（构）筑物。新浇筑台或梁体，既有轨道交通结构等有无新增裂缝以及裂缝的位置、数量和宽度等，混凝土有无剥落以及剥落的位置、大小和数量等；
- 2 地下构筑物有无积水或渗水情况；
- 3 周边路面或地表的裂缝、沉降、隆起、冒浆的位置和范围等情况；
- 4 河道水位变化情况，水面出现漩涡、气泡及其位置、范围，河道堤脚（驳坎）裂缝宽度、深度、数量及发展趋势等；
- 5 工程周边是否存在基坑开挖、堆载、桩基施工等可能影响周边环境安全的情况；
- 6 地下管线是否出现破损、泄漏情况，管线周边地面有无裂缝产生或出现局部沉降等情况；
- 7 监测设施、基准点和监测点的完好状况及保护情况。

现场巡查记录:



基坑开挖：道路开裂（影响地下管道安全）



施工挖破天然气管道



基坑开挖深度

地下工程施工期间：

- 1 各种变化具有时效性和突发性；
- 2 检查结果都必须做好详细的记录；
- 3 任何异常情况都可能是事故的预兆；
- 4 发现问题要及时汇报给建设方及相关单位。

地下管线监测 测点布置

- 1 周边环境监测点数量和布设位置应满足反映环境对象变化规律和分析判断其是否处于安全状态的要求；
- 2 位于重要管线安全保护区范围内的监测点设置，尚应满足相关部门的技术要求。
- 3 对地下管线监测点的布设方案应征求管理部门的意见。
- 4 在整个管线监测过程中，建设单位及施工单位应协助监测单位保护好监测点设；
- 5 在没有特征点的管线段上，应布设合理间距的监测点。

测点布置

地下管线监测点的布置应符合下列规定：

1 监测点水平间距可按下表确定：

地下管线监测点水平间距表

风险等级	特级	一级	二级	三级
间距 (m)	5~10	10~20	20~30	30~50

- 2 地下管线监测点布置应根据地下管线的重要性、修建年份、类型、材质、管径大小、接口形式、平面位置、埋深与地基条件、使用状况等因素综合确定；
- 3 每条地下管线不应少于3个监测点，且不同管线的监测点宜成断面布设；
- 4 监测点宜布设在管线管井、阀门、检查井等特征点位置和受施工影响敏感的部位；
- 5 供水、燃气、供热、工业等压力管道宜设置直接监测点，在无法埋设直接监测点的部位，可设置间接监测点；
- 6 管线弯曲部位的监测点布置应以能反映管线弯曲特征为原则；
- 7 对管线密集重要部位、抗变形能力差、容易渗漏的管线宜加密监测点；
- 8 监测点的布置宜通视良好、便于观测，且不影响地下管线的正常使用。

在管线监测场地的区域内：

- 1 具备条件的供水、燃气、热力、工业等压力管道宜设置直接监测点，或风险等级较高，对工程危害较大，刚性较大的地下管线一般应设置直接监测点。
- 2 柔性管线，刚度与周围土体差异不大的管线，其与周围土体能够共同变形，可设置间接监测点。
- 3 在设置间接监测点时，必须要求地下管线的平面位置和埋深准确。



以上第3条说明了管线探查的重要性

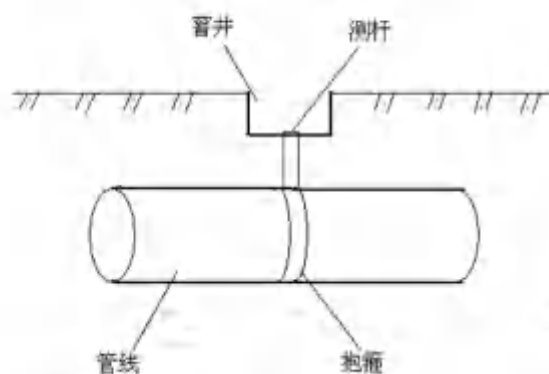
解释：

- ☆ 因为供水、热力管道的损坏会对周边居民的生活带来较大影响；
- ☆ 燃气管道、输油管道可造成燃气泄漏、油体外溢，遇到明火可出现爆炸、燃烧，严重威胁周边人民生命财产安全。



第二标段工后示燃气管位置埋设过大

设置直接监测点的常用方法：抱箍法、套管法、浅挖法



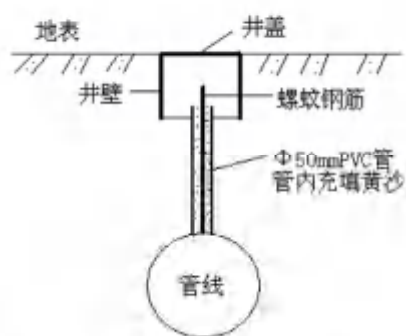
抱箍法直接监测点

抱箍法一般适用于埋深较浅的管线

测杆不超过地面

地面处设置相应的窨井

保证交通和人员的正常通行



套管法设置地下管线监测点

套管法：一般适用于埋深较深的大直径管线

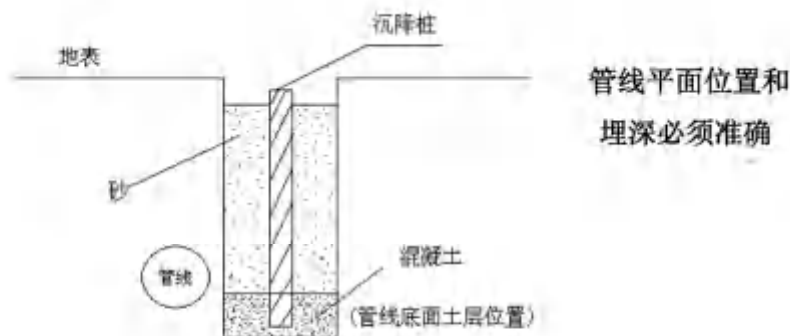
需用钻机成孔，孔径宜为110mm

管线平面位置和埋深必须准确

浅挖法：对于埋深浅、管径较大的地下管线也可以取点直接挖至管线顶表面

设置间接监测点的常用方法：底面观测法、顶面观测法

间接法:就是不直接观测管线本身,而是通过观测管线周边的土体,分析管线的变形



沉降桩间接监测点

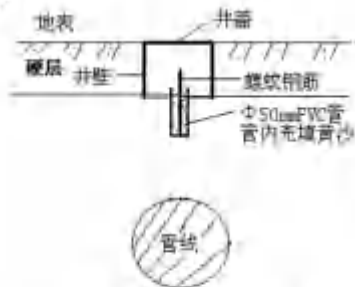
底面观测法:是将测点设置在靠近管线底面齐平的侧向土体中,观测底面的土体位移。

此法常用于分析管线纵向弯曲受力状态, 或监测管线差异沉降位移

顶面观测法: 将测点设置在管线轴向相对应的地表土体里进行观测

当为硬化地面时,监测点标志应穿透路面结构硬层。

此法只有在工程监测等级较低の場合采用，一般情况下不宜采用。



顶面观测法接监测点

3.5 监测频次

城市地下工程周边环境地下管线监测频次原则：

以能系统反映监测对象所测项目的重要变化过程而又不遗漏其变化时刻

监测频次的要求：

- 1 周边环境监测应贯穿城市地下工程施工的全过程；
- 2 监测工作应根据需要延续至变形趋于稳定后方可结束；
- 3 对于沉降是否达到稳定标准，采用最后100天的最大沉降速率是否小于0.02mm/天作为判断标准；
- 4 对于其他监测内容，以变化数据是否趋向于零作为判断标准；
- 5 当出现异常现象和数据，或临近报警状态应提高监测频次甚至进行实时监测。

周边环境的地下管线风险等级划分

风险等级	等级划分参考标准
特级	主要影响区内的大直径（>0.7m）燃气管道或大型压力总水管道等管线设施
一级	主要影响区内的重要管线等设施； 次要影响区内的大直径燃气管道或大型压力总水管等管线设施
二级	主要影响区内的一般管线等设施； 次要影响区内的重要管线等设施； 轻微影响区内的大直径燃气管道或大型压力总水管等管线设施
三级	次要影响区内的一般管线等设施； 轻微影响区内的重要管线等设施

基坑工程施工周边环境（含地下管线）监测频次表

被监测对象的风险等级	基坑工程施工工况		
	关键工况	重要工况	普通工况
特级	2次/1d	1次~2次/1d	1次/1d
一级	1次~2次/1d	1次/1d	1次/2d
二级	1次/1d	1次/1d	1次/3d
三级	1次/1d	1次/1d	1次/（3d~5d）

- 注：1 宜测项目、选测项目的监测频次可视具体情况适当降低；
 2 当监测数据相对稳定时，可适当降低监测频次；
 3 表中被监测对象不包括处于施工影响范围内的运行隧道。

提高监测频次的情况

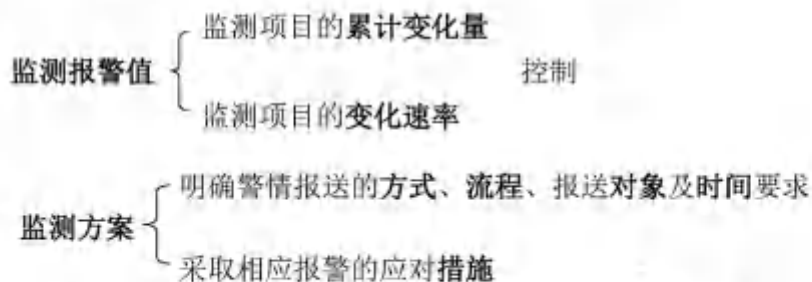
当出现下列情况之一时，应提高地下管线的仪器监测和现场巡查频次：

- 1 监测数据达到报警值时；
- 2 监测数据异常或变化速率较大；
- 3 城市道路和地下管线设施出现变形（沉降）过大、地下管道出现破损、泄漏等现象；
- 4 工程出现异常或工程事故重新组织施工；
- 5 出现其他影响地下管线安全的异常情况。



3.6 监测报警

监测项目报警值是监测方案设计的重要内容之一



地下管线监测报警值

地下管线监测报警值的确定应符合下列规定：

- 1 对有特殊要求或风险等级为特级和一级的地下管线的监测报警值，应在现状调查与检测的基础上，通过计算分析或专项评估进行确定。
- 2 当无地方工程经验和具体报警值时，对风险等级较低且无特殊要求的地下管线，其监测报警值可按下表确定。

地下管线监测报警值

监测项目		累计值 (mm)	日变化速率 (mm/d)	差异沉降 (mm)	备注
竖向位移	燃气管道	10~20	2	$0.30\%L_g$	隧道工程施工的周边地下管线监测
	供水管道	10~20	2	$0.25\%L_g$	
	雨污水管道	10~20	2	$0.25\%L_g$	
竖向和水平位移	刚性压力管道	10~20	2	—	基坑工程施工的周边地下管线监测
	刚性非压力管道	10~30	2	—	
	柔性管线	10~40	3~5	—	

- 注：1 燃气管道的位移报警值适用于管径100mm~400mm的刚性压力管道；
2 差异沉降为两节管线的接头处的沉降差值；
3 L_g 为管节长度。

3.7 工程实例

根据《施工技术》第41卷第379期资料:

地下管线直接监测结果

管线类别	数量(条)	管线外径(mm)	沉降		倾斜率(差异沉降)		管线安全状况
			控制值	沉降最大值	控制值	范围	
钢质燃气管道	3	100~500	10 mm	大多沉降最大值小于30mm, 其中一条沉降最大值92.8mm	2.0‰	0.15‰~1.7‰	未发现管线渗漏、开裂等现象
雨污水管道	1	1550	/	北京地区, 沉降最大值52.1mm	/	2.10‰~3.40‰	
铸铁、钢质供水管道	7	800~1000	/	杭州、南京地区, 大多沉降最大值小于40mm, 其中一条沉降最大值93.0mm	/	0.23‰~3.65‰	
电力管线	2	/	/	一条沉降最大值小于10mm, 另一条(上海地区)沉降最大值140.4mm	/	0.39‰~2.10‰	

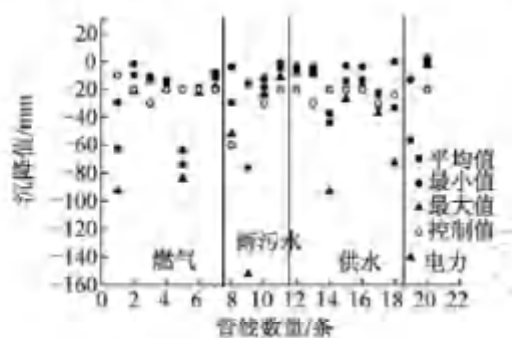
软土地区地下管线地表间接监测结果

管线类别	数量(条)	管线外径(mm)	沉降		沉降速率		管线安全状况
			控制值	沉降最大值	控制值	沉降速率	
钢质燃气管道	19	200~800	10 mm	大多监测点沉降最大值超过控制值, 其中一条沉降最大值92.88mm	/	/	未发现管线有明显的损害
砂质雨污水管道	29	300~1500	10 mm	大多监测点沉降最大值超过控制值, 其中11条沉降最大值为30mm~80mm	/	大多管线最大沉降速率<6mm/d	
铸铁供水管道	10	300~1200	10mm	大多监测点沉降最大值超过控制值, 其中10条沉降最大值为30mm~70mm	/	最大沉降速率<8mm/d	
电力、通信管线	16	300~1500(材质不明)	10mm	大多监测点沉降最大值超过控制值, 其中12条沉降最大值为30mm~75mm	/	最大沉降速率<6mm/d	

建议: 工程实际应注重管线沉降和沉降速率双控

i 地下管线处于相对软弱地层时，地表监测点可能出现较大的沉降和相对较大的沉降速率。

2 建议工程实际应注重管线差异沉降（倾斜率）的控制。



地下管线直接监测结果

1 地下管线抗变形能力受多种因素影响

2 注重已有管线变形监测资料的积累

结 论

—— 通过地下管线变形监测来保证其正常使用和安全：

- 1 地下管线精细探查是地下管线变形监测的重要手段；
- 2 及时报警是控制城市地下工程自身和周边环境安全的重要措施；
- 3 信息化监测城市地下工程自身和周边环境安全的重要保证。



地下管线是城市赖以生存与发展的生命线

实验测试的误差与不确定度评估

闵明方

1

第一章：实验测试的误差

第一节：误差定义及表达形式

第二节：实验测试误差的来源

第三节：实验测试误差的分类

第四节：精度的表述

第五节：实验测试的准确度和精密度

2

一、误差定义及表达形式



“地质、勘探、实验三足鼎立，三分天下有其一。”早在上世纪50年代初，李四光就指出了地质测试在地质工作中的重要地位。

科学始于测量，没有测量，便没有精密的科学。

—— 门捷列夫



3

1、误差（Error）：误差是测量测得的量值减去参考量值（真值）。

误差 = 测得值 — 参考量值（真值）

$$E = x - \mu$$

测得值：代表测量结果的量值，是指从测量仪器直接得出或经过必要计算而得出的量值。

当涉及存在单个参考量值，如用测得值的测量不确定度可忽略的测量标准进行校准，或约定量值给定时，测量误差是已知的。假设被测量使用唯一的真值或范围可忽略的一组真值表征时，测量误差是未知的。

4

2、量值 (quantity value)：全称量的值，简称值，用数和参照对象一起表示的量的大小。

超概念的量		特 定 量
长度, l	半径, r	圆 A 的半径 r_A 或 $r(A)$
	波长, λ	钠的 D 谱线的波长 $\lambda(D; Na)$
能量, E	动能, T	给定系统中质点 i 的动能 T_i
	热量, Q	水样品 i 的蒸汽的热量, Q_i
电荷, Q		质子电荷, e
电阻, R		给定电路中电阻器 i 的电阻, R_i
实体 B 的物质的量浓度, c_B		酒精品 i 中酒精的物质的量浓度, $c_i(C_2H_5OH)$
实体 B 的数目浓度, C_B		血样品 i 中红血球的数目浓度, $C_i(E_{00}, B_i)$
洛氏 C 标尺硬度 (150 kg 负荷下), HRC (150 kg)		钢样品 i 的洛氏 C 标尺硬度, HRC (150 kg)

5

3、量的真值 (true quantity value)：简称真值，与给定的特定量的定义一致的量值。对于测量而言，人们往往把一个量在被观测时，其本身所具有的真实大小认为是被测量的真值，实际上，它是一个理想的概念。

一般说的真值是指相对真值、规定真值、理论真值。

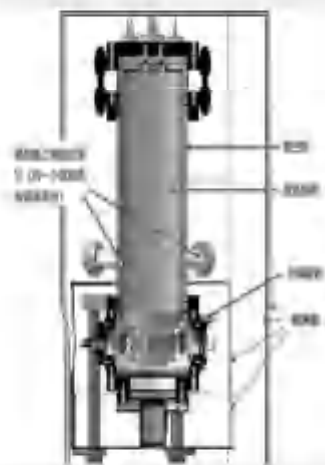
(1) 相对真值：满足规定精确度的用来代替真值使用的值，也称实际值。例如用高一等级精度的测量仪器测得的值或多次测量的算术平均值等。

6

标准器相对真值是：“当高一级标准器的误差比低一级标准器或普通测量仪器误差的比值小于1/5时，可以认为前者是后者的相对真值”。

(2) 规定真值 (Conventional True Value)：是指对于给定用途具有适当不确定度的、赋予特定量的值，也称约定真值（在计量学中常用）、约定值、指定值、参考值。

如法定计量单位中长度单位米的定义、质量单位千克的定义、时间单位秒的定义、电流强度单位安培的定义、热力学温度单位开尔文的定义、发光强度单位坎德拉的定义、物质的量的单位摩尔的定义等。实际上，约定真值也是通过多次测量确定的。



据人民网2022年6月22日的报道，国际计量局官网日前更新了国际“秒”定义候选跃迁频率的推荐值，我国中科院精密测量院高克林团队研发的钙离子光频标的测量结果成功入选，日前该团队掌握的钙离子光频标测量方式堪称我国最精密的时间测量，其精度已经达到105亿年的误差都不到1秒。



在化学测量时，**标准物质**的赋值实际上即是约定真值，它本身也是一种特殊的标准器。标准器真值简称标值，用 m 表示。

化学分析中也常把标准方法的分析结果作为被考察方法分析结果的对照，将有经验分析人员的分析结果作为被考察人员分析结果的对照。这时候可以将作为对照的分析结果作为约定真值。为与一般的约定真值区别，记为 x_0 。

(3) 理论真值也称绝对真值是计算结果，是实现知道的数值。例如：三角形内角之和恒为 180° ，理论设计值、理论公式表达值等。

9

4、相对误差

绝对误差表示测定结果偏离真实含量的绝对大小，绝对误差的单位与测试结果的单位相同。在分析测试中我们很难确定绝对误差 E 值，在实验室的内部检查和外部检查数据中，也只能计算两份结果的差数，而不是具有严格意义的误差。

相对误差是指误差在测定结果中所占的百分率， $R = \text{绝对误差 } E \div \text{真值 } T \times 100\%$ 。相对误差更具实际意义。真值 T 属未知，但有可能作较准确的测定，如选用较准确的方法、多次测定、多方面进行检查等所得结果应是接近于真值的。制作标准矿样的过程，可以说是对真值的测定。

74

5、实验测试的真值估算

只有“当某量被完善地确定并能排除所有测量上的缺陷时，通过测量所得到的量值”才是量的真值。在岩矿分析中任何元素或组分的测定过程，即使所使用的是最可靠的方法、最精密的仪器、操作者也最富有经验而且能最细心地观察、环境控制最严格，每次测定的结果也仍然不会完全相同。在分析过程中误差是客观存在的。在实际工作中，通常以在相同条件下的多次测定结果的作为更可靠的分析结果，并不是真实含量，也只是趋近于真实含量。

在实验测试中用平行多次测量的算术平均值、中位值、几何平均值以及用其他方法都可以估计真值。

11

(1)算术平均值，是n次平行测量值的代数和与测量次数n的商。当测量不存在系统误差，且n趋近无穷大时，算术平均值趋近真值。
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

(2)几何平均值，是将n个测量值的乘积开n次方。几何平均值加强了大的测量值的作用。

$$\bar{x}_g = \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n} \quad \text{或} \quad \lg \bar{x}_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i$$

(3)中位值，是将测量数据从小到大排列，居于中间的值(如果测量次数是偶数，则取中间两位的平均值)。

(4)其他方法的估计值：如两点法估计值，三点法的估计值，极平均值(皮特曼Putmen估计值)等。

12

6、偏差

偏差：测量值与测量平均值的差，表征测量值对平均值的偏离。

绝对偏差：测量值与平均值的差异。 $d_i = x_i - \bar{x}$

相对偏差：绝对偏差占平均值的百分比。 $R = \frac{d_i}{\bar{x}} \times 100\%$

相对偏差可以方便地计算测量过程中的子误差对总误差的影响,从而选择合理的测量方法。例如,用分析天平的相对误差=0.1g/0.0001g(分度)=0.1%,药物天平的相对误差=100g/0.1g=0.1%，两种称量都以0.1%的子误差传递给总误差。

平均偏差：是指单项测定值与平均值的偏差（取绝对值）之和，除以测定次数。 $\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|$

18

7、标准偏差：度量数据分布的分散程度之标准，用以衡量数据值偏离算术平均值的程度。标准偏差的大小可通过标准偏差与平均值的倍率关系来衡量。

总体标准偏差：
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}$$

实验标准偏差(experimental standard deviation)简称实验标准差，对同一被测量进行n次测量，表征测量结果分散性的量。可按贝塞尔公式计算

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

在实际工作中，当排除了系统误差，测量次数大于等于20次时，也可以将平均值作为估计真值,将偏差作为估计误差来处理。

19

准确度	精密度	
误差	偏差	
绝对误差 $\delta = x - \mu$ 或 $\delta = \bar{x} - \mu$	平均偏差 $\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - \bar{x} }{n}$	标准偏差 ($n > 5$) $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$
相对误差 (%) $\frac{\delta}{\mu} = \frac{\bar{x} - \mu}{\mu} \times 100\%$	相对平均偏差 $\frac{\bar{d}}{\bar{x}} \times 100\%$	相对标准偏差 $RSD = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\%$

15

二、实验测试误差的来源

为了减小误差，提高测试精度，就必须了解误差来源。而误差来源是多方面的，在测试过程中，几乎所有因素都将引入测试误差。在岩矿测试中根据误差主要来源划分，可分为：仪器设备误差、方法误差、环境误差、人员误差和其他误差。

1、仪器设备误差

这类误差来源于仪器（包括标准器等设备）的某些缺陷，或因仪器受环境的影响而产生。仪器在制造过程中由于设计、制造、装配、检定等的不完善；以及在使用过程中，由于元器件的老化、机械部件磨损和疲劳等因素而使仪器所产生的误差，数字式仪器所特有的量化误差等。

16

例如：容量器皿有缺陷而未加校正(即使校正了，但受温度影响又使体积改变)，玻璃器皿被腐蚀引入杂质，铂坩埚在强热之下失重等都可带来误差。

测定的精密度不可能超越所用仪器的重复性。重复性的下限是由仪器的灵敏度所限定的。在常量分析中，仪器的局限性不致于影响准确度。但在微量重量分析时，微量天平的灵敏度或重复性便对准确度起决定作用。在用分光光度法测定痕量元素时，仪器的局限性有时显著。

当被测定的成分的量减少，仪器的灵敏度便成为测定的精密度与准确度的决定因素。

17

2、方法误差

由方法内在的缺陷所引起的，是误差中较严重的类型。重量法中沉淀的溶解度、共沉淀、沉淀物的分解等，容量法中反应不完全、干扰离子影响、指示剂选择不当、副反应、诱导反应等引起的误差都属方法误差。

例如，用动物胶凝聚测定二氧化硅，结果总要偏低千分之几。用差减法测定铝时，铝含量是从 R_2O_3 重量减去铁、钛、锆、砷和磷等含量而获得的，因而所有这些元素的误差都落在铝上。高锰酸钾测定水中化学耗氧量，有机污染物氧化不完全使结果偏低。

方法误差是很普遍的。

18

3、环境误差

指各种环境因素与要求条件不一致而造成的误差。环境误差主要来源于气候、仪器环境、电源、场与辐射等。气候条件包括环境温度，大气相对湿度，大气压，太阳辐射的热效应，环境空气的速度，沙与尘，盐雾，污染气体或水蒸气，液态水(凝露、雾、滴水或溅水)，霉菌等。仪器环境包括位置、通风条件、震动、机械冲击、声音等。电源包括电压波动、电流波动、交流电频率波动、失真因数、瞬态干扰、供电电源的源阻抗、保护导体的电位，直流电源的纹波等。对场与辐射包括电场、磁场、电磁场、电离辐射等。仪器在规定的正常工作条件(基准条件)下使用所具有的误差称为基本误差，是随机误差。超出正常工作条件使用所增加的误差可能是系统误差，也可能是粗大误差。

19

4、人员误差：

测试人员的生理感官与心理因素、工作责任心、技术熟练程度、测试习惯等的不同而引起的误差。为了减小测试人员误差，就要求人员要认真了解测试仪器的特性和测试原理，熟练掌握测试规程，精心进行测试操作，并正确处理测试结果。

人员误差也称操作误差，在岩矿分析中除了精心操作仪器，还要注意样品加工、熔矿、分离等环节，如：因烧杯未加盖而引入灰尘，溶液的溅出，沉淀没有完全移至滤纸上，洗涤过头或不足、滴定终点掌握不好，灼烧温度不正确等都属操作误差。

20

5、其他误差

(1) 试剂误差是由试剂不符合要求而造成的误差。如试剂不纯、去离子水含杂质过多等。试剂误差可以通过更换试剂来克服，也可以通过空白试验测知误差的大小并加以校正。

(2) 样品与取样。当内部或外部取样是规定程序的组成部分时，不同样品间的随机变化以及取样程序存在潜在偏差等，可能会产生取样误差，影响最终结果。样品存储条件，分析样品在分析前的储存时间和条件可能影响分析结果。样品的基体，复杂的基体可能影响被测成分的回收率或仪器的响应值。不同的基体可能影响不一样，因而给结果带来误差。

21

(3) 加标准物的影响。所加的标准物与样品中的被分析物不同时，样品被测组分的回收率与加标样品的回收率不同，会引进新的误差。

(4) 计算影响。选用的校准模型与实际不符合，会引入较大的误差。在方法和仪器的选择上要选择适用的“线型”范围和精度。修正能导致最终结果的误差，修正值也会引入较大的不确定度。空白修正，空白修正值和其适宜性都会有误差，在痕量分析中尤为重要。

在岩矿分析中附加误差指不依所测定组分的含量而变动的误差。例如，因沉淀物的溶解度而引起的误差，其数值几乎是固定的。铂坩埚的失重，每次灼烧引起的误差，与沉淀的量无关。

22

三、误差的分类

1. 系统误差 (Systematic Error)

在相同条件下，多次测试同一量值时，该误差的绝对值和符号保持不变，或者在条件改变时，按某一确定规律变化的误差。

常用计算方式：在相同条件(重复性条件)下，对同一被测测试进行无限多次所得结果的平均值与被测试的真值之差。

系统误差也称可定误差：总是可以追索到某一产生的原因，这类误差是单向性的。如称量一吸水性物质，其误差总是带正号的。在计量学上系统误差的估计值称为偏移。在分析仪器上都存在仪器的偏移（或偏畸）。

23

按对系统误差掌握程度，系统误差可分为

(1) 已定系统误差：误差绝对值和符号已经明确的系统误差。

(2) 未定系统误差：误差绝对值和符号未能确定的系统误差，但通常可估计出误差范围。

按误差出现规律，系统误差可分为：

(1) 不变系统误差（恒定系统误差）：误差绝对值和符号固定不变的系统误差。

(2) 变化系统误差：误差绝对值和符号变化的系统误差，按其变化规律，可分为线性系统误差、周期性系统误差和复杂规律系统误差。

24

由于系统误差具有一定的规律性，因此可以根据其产生原因，采取一定的技术措施，设法消除或减小；也可以在相同条件下对已知约定真值的标准物质进行多次重复测试的办法，或者通过多次变化条件下的重复测试的办法，设法找出其系统误差的规律后，对测试结果进行修正。

对估计的系统误差的补偿称为修正。补偿可取不同形式，诸如加一个修正值或乘一个修正因子，或从修正值表或修正曲线上得到。修正值是用代数方法与未修正测量结果相加，以补偿其系统误差的值。修正值等于负的系统误差估计值。修正因子是为补偿系统误差而与未修正测量结果相乘的数字因子。由于系统误差不能完全知道，因此这种补偿并不完全。

2、随机误差 (Random Error)

在相同条件下，对同一样品进行多次测试，由于各种偶然因素，会出现测试结果时而偏大，时而偏小的误差现象，这种类型的误差叫做随机误差。也称偶然误差。它是由许多未能控制的因素造成，以不可预定的方式变化，也称不可定误差。

常用计算方法：测得值与在重复性条件下对同一被测试样品进行无限多次测试结果的平均值之差。

产生原因：实验条件的偶然性微小变化，如温湿度波动、地面振动、气体干扰、噪声干扰、电磁场微变、电源电压的随机起伏等

如在重量法测定中，沉淀的溶解度所引起的误差是单向性的。对溶解度作了校正以后，因温度的改变，洗液的体积的差异，共沉淀的影响等不能控制，误差仍然存在。偶然误差（不可定误差）是非单向性的，可能偏高，也可能偏低。

理论上说，一切误差都是可定误差。只因在实际工作中有许多因素我们不能控制或知识很少，我们把这些不能控制的因素所产生的影响的总和归结为不可定误差。

随机误差有两种：

（1）因系统误差的改变而引起的误差。

例如，灼烧氢氧化铝沉淀至恒重，由于灼烧、暴露于空气中、在干燥器中放置等时间的微小差异都可能使吸水性氧化

27

铝改变重量。以致得到的重量都不完全相同，且无一定方向。这是由许多不可控制的因素或条件而引起的。

（2）意外误差。如在称量时，天平偶然受地面振动而产生误差。误差的大小与受振动的情况有关，但此种情况是不能预防的。在使用分光仪器时，电源电压的改变也可引起测量的误差。在矿石分析中，此类不能预测的干扰因素是很多的。各种预防措施只能使此类干扰的影响减小，但不能完全克服。

经过大量的重复测试可以发现，随机误差是遵循某种统计规律的。因此，可以用概率统计的方法处理含有随机误差的数据，对随机误差的总体大小及分布做出估计，并采取适当措施减小随机误差对测量结果的影响。

28

3、粗大误差

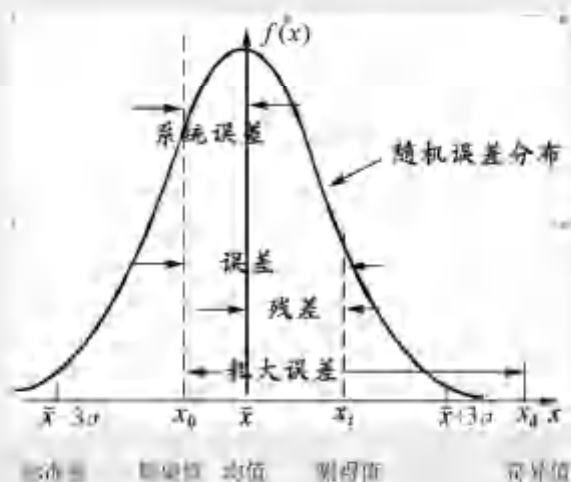
在一定条件下，测量结果明显偏离真值时所对应的误差，称为粗大误差，因而它也是明显歪曲测量结果的误差。

产生粗大误差的原因有主观因素，也有客观因素。客观方面有仪器有缺陷，方法不适用等等，资质认定中注重明确仪器量程、方法认证等工作，能有效防止此类误差。主观方面实验人员错误，错记或错算疏忽失误，其中人为误差是主要的，这可通过提高测量者的责任心和加强测量者的培训等方法来解决。

对粗大完成应按照一定的准则进行判别，将含有粗大误差的测量数据予以剔除。

29

系统误差和随机误差的定义是科学严谨，不能混淆的。但在测量实践中，由于误差划分的人为性和条件性，使得他们并不是一成不变的，在一定条件下可以相互转化。也就是说一个具体误差究竟属于哪一类，应根据所考察的实际问题和具体条件，经分析和实验后确定。



30

四、精度的表述

反映测试结果与真值接近程度的量,称为精度。它与误差的大小相对应,因此可用误差大小来表示精度的高低。

1. 准确度 (Correctness) 是测试结果和真值间的偏离程度。

分析结果是否准确是看其分析结果与真实含量的差异,即误差愈小,准确度愈高;误差愈大,准确度愈低。所以准确度表示测定结果的正确性,直接与误差相联系。

无穷多次重复测试所得量值的平均值与一个参考量值间的一致程度称正确度 (trueness), 它反映测量结果中系统误差的影响,与随机误差无关。测量正确度不是一个量,不能用数值表示。

31

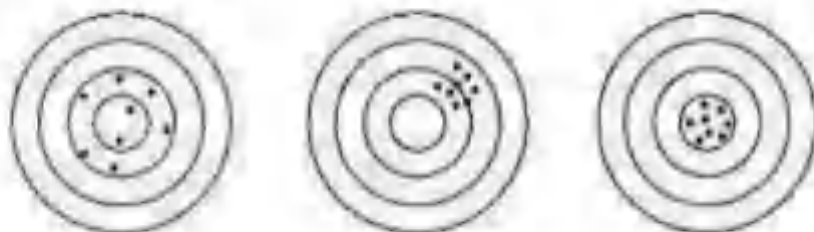
2. 精密度 (Precision) 测试数据之间的分散程度。

反映测试结果中随机误差的影响。精密度通常用不精密程度以数字形式表示。如在规定测试条件下的标准偏差,方差系数。不要用术语精密度代替精确度,精确度指精度。追求更高的精密度往往需要更好的仪器设备,更纯的试剂,更苛刻的环境要求和更繁琐的测试方法。

3. 精确度 (Accuracy) 表示测量结果与被测试真值之间的一致程度。就误差分析而言,精确度是测试结果中系统误差和随机误差的综合;误差大,则精确度低;误差小,则精确度高。精确度 (精度) 在数值上一般多用相对误差来表示,但不用百分数。如某一测量结果的相对误差为 0.001%, 则其精度为 10^{-4} 。

32

准确度、精密度和精确度三者之间的关系



弹着点全部在靶上，但分散。相当于系统误差小而随机误差大，即精密度低，准确度高。

弹着点集中，但偏向一方，命中率不高。相当于系统误差大而随机误差小，即精密度高，准确度低。

弹着点集中靶心。相当于系统误差与随机误差均小，即精密度、准确度高，从而精确度（精度）高。

33

五、实验测试的准确度和精密度

1、实验测试准确度的要求

矿石分析的结果主要是供地质工作计算矿产储量和判断质量之用，单矿物分析、岩石分析等则属于地质和矿物研究所需的资料，目的不同，对准确度的要求也不一样。分析结果的准确度应以能满足需要为标准，不必要地追求准确度则是浪费。对于准确度的要求，均以地质系统允许误差为依据。对于单矿物分析、岩石分析和其他全分析，其总和应按统一规定执行。

具体参见DZ/T 0130-2006《地质矿产实验室质量管理规范》

2、对分析结果的检查

外部检查是对基本分析的准确度的检查,是防止发生系统误差、造成储量计算错误等严重后果的重要措施。因此,外检单位必须选用较可靠的方法,要求有较高的准确度,并尽可能使用不同的方法进行外检分析,以利于发现问题。

以下是几种常用的检查方法,但这些方法只能指示误差的存在,而不能证明没有误差。

(1) 双份平行测定

双份测定当然比单份测定较可靠。两份结果相差很大,说明其中有错误;但两份结果很接近,并不能证明误差不存在。

35

(2) 分析的总和

分析结果百分数的总和无论如何是一种有效的检查方法。虽然百分数总和接近100不一定准确度高,但离开100太远,则说明结果有错误。在全分析系统中,误差相互抵消是经常存在的。二氧化硅分离不完全,便与 R_2O_3 一起沉淀。这种现象在快速分析系统中则较少。总和相加时,有时须注意某些项目的校正,如有氟或硫化物存在时,应减去各自的氧当量。

(3) 电荷平衡

这种检查对水分析适用,对固体样品有时适用。须注意硅酸盐中的二氧化硅不一定都成硅酸盐存在,而可能以聚合物的形态存在。此时二氧化硅不能都作酸根计算。

36

(4) 不同分析方法

用不同方法作检查，对系统误差的发现最有效。平行测定，因两份测定都在同样条件下进行，可能产生相似的偏差，因而误差不能被发现。采用不同方法时，产生相似偏差的机会就少了，因而容易发现误差。在矿石分析中，因其他元素的影响甚为复杂，采用不同方法可以消除这些元素产生相同影响的机会。

37

3、提高准确度的措施

要使测定结果准确，首先须选择适当的方法。选择什么方法是与所测定的元素的含量直接相关的。假使方法的选择是正确的，实验室的一般规则都能遵守，则以下各点可作为提高准确度的措施。

(1) 空白试验

进行矿石分析时，常带做空白试验。但有时也不能硬套，如在用氢氧化铵沉淀 R_2O_3 时，氢氧化铵中可溶性的二氧化硅随 R_2O_3 沉淀，而在空白试验中二氧化硅则不沉淀，氢氧化铵试剂改用塑料瓶包装后，可以免除二氧化硅的污染。

38

标定标准溶液要不要作空白试验，也要看实际情况。在用二苯胺磺酸钠作指示剂，以硫酸亚铁溶液标定重铬酸钾溶液时，或在用重铬酸钾标定硫酸亚铁时，都不应作空白试验。其原因是重铬酸钾氧化二苯胺磺酸钠，有亚铁存在时灵敏，没有亚铁存在，则须有过量的重铬酸钾。重铬酸钾氧化硫酸亚铁，对二苯胺磺酸钠的氧化有诱导作用。

(2) 校正

在某些要求高准确度的分析中，可以对分析结果进行校正。如在磷酸铵镁沉淀中对锰的校正。二氧化硅的分离总是不完全的，可以从其滤液中作比色测定。虽比色法误差较大，但这对二氧化硅总量的影响已很小。

39

(3) 方法的改进

提高准确度的根本措施是改进方法，或创新方法。改进方法总应在快和准方面有所进步。

(4) 控制试验

(a)标准加入法：加入一定量的已知元素于矿样中，然后进行该元素的测定。测定结果与原样(未加入标准)结果比较。两个结果之差是加入元素的回收。如果回收是完全的，则对准确度较为可信，但仍然存在误差。此法在分光光度、极谱方面较为适用。加入的量应接近矿样原来含量，相差太远或太少都失去检查的作用。

增量法亦属标准加入法，但方法内容有差别。主要用来抵消干扰元素的影响。

40

(b)实验因素：在矿石分析中，有少数方法所依据的化学反应不是完全当量反应，此时需用实验因素来代替理论因素，或加校正值。

(c)误差的抵消：草酸钙沉淀溶于硫酸后，用高锰酸钾溶液滴定草酸以测定钙。此时高锰酸钾溶液需用草酸钠标定，而不用三氧化二砷或亚铁盐。因高锰酸钾与草酸的反应不是完全当量的。用过硫酸盐-亚砷酸法测定锰时，亚砷酸须用高锰酸钾标定而不用其他氧化剂。

高锰酸钾与亚砷酸的反应也不是完全当量的。

(d)标准矿样：标准矿样对控制分析质量很有用。不论是操作误差或方法误差都可以从对标准矿样的分析表现出来。

41

第二章：实验测试中的不确定度评估

第一节：不确定度的意义

第二节：不确定度

第三节：实验测试和不确定度

第四节：不确定度的评估

第五节：不确定度的报告

42

一、不确定度的意义

不确定度的处理是由误差处理方法（有时称“传统方法”或“真值方法”）演变成为不确定度处理方法的。在误差方法中，测量目的是要确定尽可能接近该单一真值的量值。由于“误差”的存在，误差方法认为仪器和测试并不能产生该真值，“误差”分为系统的和偶然，并假定这两类误差总是可以被识别的。在“误差传递”中，必须对它们做不同的处理，但是，通常没有一种一致的规则能将它们合成而构成给定测试结果的总误差。通常只能估计总误差绝对值的上限，并不精确地称之为“不确定度”。

43

在不确定度方法中，目的不是要确定一个尽可能接近真值的值，假定由测量信息只可能赋予被测量值一个区间。增加相关的信息可以减小合理地赋予被测量的这组值。因为被测量的定义所固有的细节的有限说明，即使是最精细的测量也不能将该区间缩小到单一值；因此定义不确定度就对任何测量的不确定度固定了一个最小范围。该范围中的一个值可以用于表征这个区间，这个值称之为“被测量量值”。

当我们使用分析结果作为决策依据的时候，必须对结果的可靠性有所了解，必须建立对用户之外的机构所提供数据的信心。现在已经有正式的(或法定的)要求，即实验室通过质量保证措施来确保数据的可靠性。（参考DZ/T0130-2006）

44

这些质量保证措施包括：使用经确认的分析方法，规定内部质量控制程序，参加能力验证计划，基于ISO/IEC 17025的实验室认可和建立计量溯源性。在分析化学中，过去曾把规定方法分析结果的精密度作为重点，而不是结果对已定义的标准或SI单位的溯源性，这导致了必须使用“官方方法”来满足法定要求和贸易要求。而现在则要求建立结果的置信度，因此测量结果必须溯源至SI单位、标准物质(标准样品)等定义的参考标准，即便由操作决定的方法或经验方法也不例外。根据现在的要求，实验室需要证明分析结果的质量，通过提供结果的可信度来证明结果的目的适宜性，这也包括不同分析方法间所得结果一致的程度。其中一个常用的度量参数就是测量不确定度。

45

测试结果是否有用，在很大程度上取决于测量不确定度的大小，报告测试结果的同时须报告不确定度，才是完整的和有意义的。

1993年出版了《测量不确定度表示与指南》(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 简称GUM)。1995年、2008年、2012年进行了修订。1999年国家质量技术监督局批准发布了JJF 1059-1999《测量不确定度评定与表示》，该规范原则上等同采用了GUM的基本内容。

国家认可委员会发布了2006版CNAS-GL006《化学分析中不确定度的评估指南》，2019年进行了修订。

46

二、不确定度

1. 不确定度的定义

与测量结果相关联的参数，它表征了可以合理地赋予被测量的量值分散程度（参考《测量不确定度表示与指南》）。

这个参数可能是标准偏差（或其指定倍数）或置信区间宽度。测量不确定度通常包括很多分量，其中一些分量可由一系列测量结果的统计学分布评估得出；另一些分量是由根据经验和其他信息确定的假设概率分布评估得出，都可以用标准偏差表示。很显然测量结果是被测量值的最佳估计值，不确定度所有的分量，包括那些系统效应所产生的分量，比如与修正和参考标准相关的分量，均会对不确定度的分散性产生贡献。

97

化学分析中的被测量通常为某被分析物的浓度，如质量浓度、数量浓度、数字浓度或体积浓度，也有其他表述，如质量分数、物质含量和摩尔分数等，及其他的量，例如颜色、pH值等，不确定度的重点在于合理赋予被测量的值的范围。没有对测量有效性怀疑的意思，而是表明对测量结果有效性的信心的增加。

2. 不确定度的来源

在实际工作中，结果的不确定度可能有很多来源，例如被测定义不完整、抽样、基体效应和干扰、试剂纯度、环境条件、存储条件、质量和容量仪器的不确定度、参考值、测量方法和程序中的估计和假定（假设的化学计量比）、空白修正、人员的影响、以及随机变异等。

43

3. 不确定度的分量

在评估总不确定度时，有必要分析不确定度的每一个来源并分别处理，以确定其对总不确定度的贡献。每一个贡献量即为一个不确定度分量。当用标准偏差表示时，测量不确定度分量称为标准不确定度。如果各分量间存在相关性，必须通过计算协方差将其考虑在内。但是，通常可以评估几个分量的合成效应，这可以减少评估不确定度的总工作量，并且如果综合考虑的几个不确定度分量是相关的，也无需再另外考虑其相关性了。

对于测量结果 y ，其总不确定度称为合成标准不确定度，记做 $u_c(y)$ ，是一个标准偏差估计值，它等于运用不确定度传播律将所有测量不确定度分量(无论是如何评估的)合成为总

99

体方差的正平方根，或采用替代方法获得(电子数据表和蒙特卡洛模拟法)。

在实验测试中，大多数情况下使用扩展不确定度 U 。扩展不确定度是指被测量的值以一个较高的置信水平存在的区间宽度。 U 是由合成标准不确定度 $u_c(y)$ 乘以包含因子 k 。选择包含因子 k 时应根据所需要的置信水平确定。对于大约95%的置信水平， k 值通常为2。通常应当声明包含因子 k 值，因为只有如此才能复原被测量值的合成标准不确定度，以备在可能需要用该量进行其他测量结果的合成不确定度计算时使用。

99

4、误差和不确定度

在实际工作中，观测到的误差是测得值与参考值之差，误差是一个单个数值，原则上已知误差的数值可以用来修正结果。不确定度是以一个范围或区间的形式表示，如果是为一个分析程序和所规定样品类型做评估时，可适用于其所描述的所有测量值。通常情况下，不能用不确定度数值来修正测量结果。

为了进一步的说明差异，修正后的分析结果，在很偶然的情况下可能非常接近于被测量的数值，因此误差可以忽略。但是，不确定度可能还是很大，因为分析人员对于测量结果与被测量数值的接近程度没有把握。测量结果的不确定度不代表误差本身或经修正后的残余误差。

51

三、实验测试和不确定度

1、方法确认

在实践中，用于日常检测的分析方法适宜性通常通过方法确认研究进行评价。在方法确认过程中产生的表征方法总体性能和个别影响因子的数据可直接用于该测量方法常规使用所得结果的不确定度的评估中。

方法确认的重点在于识别和消除显著影响，因此大多数潜在的显著影响因素均已被识别，单个误差或不确定来源只有在其与总精密度相比较较为显著时才会专门研究。

(1) 方法确认方式：方法开发、实验室间研究、按照实验室内部分方法确认方案。

52

(2) 参数:

精密度:主要精密度测量包括重复性标准偏差 S_r 、复现性标准偏差 S_R 和中间精密度 S_z ,其中 i 表示变化因素的数量。重复性 S_r 表示在短时间内由同一操作人员操作同一设备等在同一实验室观察到的变异性。特定方法的实验室间的复现性标准偏差 S_R 只能用实验室间研究的方法直接评估,表示不同实验室分析同一样品的差异性。中间精密度与实验室内一个或多个因素(例如时间、设备和操作人员)发生变化时所观察到的结果变化有关,所得到的数值可能有所不同,这取决于哪些因素是保持恒定的。无论是通过独立方差合成的方法得到的,还是通过研究完整的操作方法获得的,分析过程所观察到的精密度是总体不确定度的基本分量。

59

偏倚:分析方法的偏倚通常是通过相关标准物质(标准样品)或通过加标研究来确定。在建立与公认标准的溯源性时,重要的是确定与相关参考值的总体偏倚。偏倚可以表示为分析回收率(观测值除以期望值)。偏倚应小到可忽略或加以修正。

线性:线性是用于在一定浓度范围内进行测量的方法的一个重要特性。对于纯标准和实际样品响应能否成线性是可以确定的。通常线性不被量化,而是通过检查或使用非线性显著性检验来检查线性。通常使用非线性校准函数加以修正,或通过选择更严格的操作区间加以消除。残余的线性偏差通常已被覆盖几个浓度的总体精密度估计值所充分考虑,或已在与校准有关的不确定度中得到充分考虑。

60

检出限:通常确定检出限只是为了建立一个方法实际操作区间的下限。虽然接近检出限的不确定度在评估时需要仔细考虑和特别处理,检出限与测量不确定度的评估没有直接关系。

稳健性(灵敏度):很多方法开发和方法确认方案中需要直接研究特定参数的灵敏度。通常通过初步的“稳健性测试”来得到,即观察一个和多个参数变化的影响。如果影响显著就需要进一步研究来确定影响的大小,并因此选择一个所允许的操作区间,可提供关于重要参数影响的信息。

选择性:选择性与分析方法对目标分析物的独特响应程度相关。典型的选择性研究中需要研究可能的干扰物的影响,通常采用在空白和加标样品(标准添加样品)中加入潜在的干扰物并观察其响应值。结果通常用于证明实际影响并不显著。

55

当干扰物的浓度范围已知时,可以使用这些数据来评估与潜在的干扰物有关的不确定度。

2、影响不确定度评估的主要原则

(1) 代表性是最重要的。应当尽可能反映方法正常使用中影响因素数量和范围,并涵盖方法适用范围内的浓度范围和样品类型。

(2) 代表性变异是指影响参数必须具有与该参数的不确定度相适应的数值分布。对于连续参数,这可以是允许的范围或声明的不确定度;对于样品基质这类非连续参数,其范围随着正常实验中遇到的基质类型不同而变化。注意代表性不只表示数值的范围,而且包括其分布。

56

(3) 在选择变化因素时,应当尽可能确保影响较大的因素发生变化。例如,每天的变化(可能来自重新校准的影响)与重复性相比较相当大时,5天中的每天进行2次测量就比2天中的每一天进行5次测量能给出更好的中间精密度估计值。在充分的控制下,在不同的天平进行10次单独的测量可能会更好,虽然它对于日内重复性没有提供额外的信息。

(4) 通常处理随机选取的数据比处理从系统变化获取的数据更简单。例如,在足够长的时间内进行随机次数的试验通常包括代表性的环境温度影响,而有系统地按照24小时间隔所进行的试验,可能由于工作日内有规律的环境温度变化而产生偏倚。前者实验只需要评估总体标准偏差,后者还需要考虑环境温度的系统变化,再按照温度的实际分布进行调整。

57

然而,随机变异这种方式效率最低。少量的系统研究就可以快速确定一个影响量的大小,但是随机变异这种方式通常需要测量30多次才能给出优于大约20%相对准确度的不确定度分量。因此,系统地研究少量的主要影响因素是更好的选择。

(5) 当因素已知或可能产生交互作用时,应当保证交互作用的影响加以考虑了。该影响可以采用随机选取不同水平的交互作用参数来评估,也可以通过缜密的实验设计得到方差和协方差的信息的方式进行评估。

(6) 在对总体偏倚研究时,标准物质(标准样品)和数值应与日常检测的材料相近。

(7) 为调查和检验某个影响量的显著性而进行的研究,应当有足够的检验效能来检测出实际上显著的影响量。

58

3、溯源性

(1) 所有的实验室使用同样的测量尺度或同样的“参考点”进行测量,能够对实验室间或实验室内不同时期的结果进行可靠的比较。通常情况是通过建立能够最终到达国家或国际基准,理想的情况下是国际测量单位制SI(为了长期的一致)的校准链。以分析天平为例,每个天平用标准砝码来校准,而砝码本身最终与国家基准核对,如此直至千克基准。这种最终可到达已知参考值的不间断比较链提供了对共同“参考点”的溯源性,确保不同的操作者使用同一测量单位。在日常测量中,建立对某个测量结果的所有相关的中间测量的溯源性,可极大地提升实验室间或实验室内不同时期的测量结果的一致性。因此在所有测量领域中溯源性极为重要。

99

(2) 计量溯源性定义:通过文件规定的不间断的校准链,将测量结果与参照对象联系起来的测量结果的特性,校准链中的每项校准均会引入测量不确定度。提及不确定度的原因是由于实验室间的一致性在一定程度上受到每个实验室的溯源链所带来的不确定度的限制,因此溯源性与不确定度有紧密联系。溯源性提供了一种将所有有关的测量放在同一测量尺度上的方法,而不确定度则表征了校准链链环的“强度”以及从事同类测量的实验室间所期望的一致性。

(3) 某个可溯源至特定参考标准的结果的不确定度,将由该标准的不确定度与对照该标准所进行的测量的不确定度组成。

60

四、不确定度的评估

不确定度的评估的步骤包括:

第一步:规定被测量。清楚地写明需要测量什么,包括被测量和被测量所依赖的输入量(例如被测量、常数、校准标准值等)的关系。还应当包括对已知系统影响的修正。

内容有:被分析物的浓度或质量分数,待分析的项目或材料及位置,报告结果量值的计算依据。



是否包含抽样环节,是否是经验方法(测量结果取决于所使用的方法)。

第二步:识别不确定度的来源。列出不确定度的可能来源,包括规定的关系式中所含参数的不确定度来源,和其他的来源。必须包括那些由化学假设所产生的不确定度来源。从那些根据中间数值计算被测量的基本表达式开始列出不确定度来源的清单;通过因果图可展示各来源之间的相互关系,以及对结果的不确定度的影响,也有助于避免重复计算不确定度来源;用一个正式的测量模型来表述各个来源对测量结果的影响;可将测量过程看成一系列互不关联的操作;考虑与整体方法性能要素有关的不确定度,例如可观察的精密度和用适当的标准物质(标准样品)/标准样品测得的偏差。

典型的不确定度来源包括：(1) 抽样：不同样品间的随机变异以及抽样程序的潜在偏差等。(2) 存储条件：当测试样品存储时间以及存储条件。(3) 仪器的影响：如分析天平校准的准确度水平；保持平均温度的控温器偏离(在规范范围内)其设定的指示点，受残留效应影响的自动分析仪。(4) 试剂纯度：即使原料已化验过，由于化验程序仍然存在着某些不确定度，所配制的滴定溶液浓度也很难准确获得。例如许多有机染料，不是100%的纯度，可能含有异构体和无机盐。(5) 假设的化学计量比：可能有必要考虑偏离所预期的化学计量比、反应的不完全或副反应。(6) 测量条件：例如，容量玻璃仪器可能在与校准温度不同的环境温度下使用。总的温度影响应当加以修正，液体和玻璃温度的不确定度应当加以考虑。

59

材料对湿度的可能变化敏感。(7) 样品的影响：复杂基体，被分析物的形态会使影响变得更复杂。由于热状况的变化或光分解影响，样品(被分析物)发生变化。当用“加标”评估回收率时，样品中被分析物的实际回收率与加标样品的回收率不同。(8) 计算影响：选择校准模型，例如对曲线的响应使用直线校准，会导致较差的拟合、截断误差和修约误差能导致最终结果的不准确。(9) 空白修正：空白修正的值和合理性在痕量分析中尤为重要。(10) 操作人员的影响：可能总是将仪表或刻度的读数读高或低。可能对方法作出不太一致的解释。(11) 随机效应：在所有测量中都有随机影响产生的不确定度。该影响应当做为一个不确定度来源包含在列表中。这些来源不一定是独立的。

60

第三步:不确定度分量的量化。

即评估识别出的每一个潜在的不确定度来源相关的不确定度分量的大小。

1. 可以使用方法确认研究的数据, 质量保证/质量控制(QA/QC)的数据, 其他为核查方法性能进行的实验工作中得到数据, 方法合成的不确定度, 方法的组合使用、单个分量的量化、基于判断的估计等, 来评估与大量独立来源有关的不确定度的单个分量。使用这些数据可以大大减少不确定度评估的工作量, 因为它利用实际的实验数据, 可以使不确定度的评估结果可信度更高。需考虑现有的数据是否足以反映所有的不确定度来源, 是否需要安排其它的实验和研究来确保所有的不确定度来源都得到了充分的考虑。

89

2、不确定度的评估程序

(1) 程序取决于可获得的方法性能数据, 步骤包括:

a. 协调现有数据与信息需求。首先, 应检查不确定度来源的清单, 并确定哪些不确定度可以利用现有数据计算, 不论这些数据是特定贡献的直接研究数据, 还是整个方法中潜在的(不确定度)变异数据。对照步清单列表核查这些来源, 并列出任何余下的来源, 并提供包括哪些不确定度分量的可供审核的记录。b. 策划获取所需的其它数据。对于现有数据未充分涵盖的不确定度来源, 可以从文献或现有资料(证书、仪器规格等)中获取其它信息, 或策划实验以获取所需的其它数据。附加的实验可具体研究单个不确定度分量, 或采用方法性能研究来确认重要因素的代表性变异。

90

(2) 不是所有的分量都会对合成不确定度有显著贡献。实际上, 只有少数分量才会有显著影响, 小于最大分量三分之一的某些分量无需深入评估。对于每一个分量或合成分量的贡献进行初步评估, 去掉那些不重要的分量。

(3) 使用以前的实验研究数据(包括方法确认数据)研究其相关性、有效性。方法在其适用范围和领域内应用, 达到的精密度与先前所获取的精密度相当; 通过用相关标准物质(标准样品)、适当的加标研究、有关能力验证计划或其他实验室间比对确定偏倚数据的合理性; 通过定期质量控制样品结果表明持续性能统计受控并实施有效的分析质量保证程序。

(4) 量化单个分量来评估不确定度。分别评估每个不确定度分量, 通过详细的试验过程的定量模型合成单个分量。

97

(5) 高度匹配的有证标准物质(标准样品)。在方法确认或再确认中, 对有证标准物质(标准样品)的测量有效地达到了检查整个测量程序的作用, 提供了许多不确定度潜在的来源的综合影响的信息。

(6) 使用以前的协同方法开发和确认研究数据来评估不确定度。例如根据AOAC/IUPAC协议或者GB/T 6379.1为确认公开发表的方法所做的协同研究。这些数据通常包括对于不同水平的响应时复现性标准偏差的估计值 S_R , S_R 与响应水平相关性的线性估计值, 还可能包括基于有证标准物质(标准样品)研究的偏倚估计值。需加以特别关注的来源包括: 抽样、预处理、方法偏倚、条件的变化、样品基体的变化, 由此引入的不确定度需要加以考虑。

98

利用协同研究数据进行测量不确定度评估的一般步骤。a)从关于该方法的公开信息中获取重复性、复现性和正确度的估计值；b)确定该测量的实验室偏倚是否落在该期望的范围内；c)确定目前测量的精密度是否落在期望的范围内；d)识别研究中没有被涵盖的影响测量的因素，并量化这些因素可产生的方差，同时考虑到每一个影响因素的灵敏数和不确定度；e)当偏倚和精密度显示的受控时，将复现性标准偏差估计值与正确度和额外影响因素相关的不确定度合成，生成合成不确定度估计值。要注意实验室的检测能力应与方法期望的检测能力一致。

当“权衡”阶段表明所有已识别的不确定度来源已包括在方法确认研究中，或任何残余来源的不确定度贡献经证明可以₉₉

忽略不计时，将复现性标准偏差 S_R 作为合成标准不确定度使用，必要时可根据浓度进行调整。

(7) 使用实验室内开发和确认研究进行不确定度评估。评估的数据有：现有的最佳总精密度估计值，现有的最佳总体偏倚及其不确定度估计值；对上述整体性能研究中未能充分得到考虑的影响量，量化其有关的不确定度。

精密度的评估应当尽可能在一段较长的时间内，并使影响结果的所有因素自然变化；尽可能由不同的分析人员操作和使用不同的设备；对于多个样品中的每一个样品进行重复分析所得的标准偏差。通过多因素实验设计，获得每一个因素单独的方差估计值。精密度会随响应水平的变化而产生显著变化，应给予调整。

总体偏倚最好使用完整的测量程序对相关有证标准物质(标准样品)进行重复分析来估计。偏倚如果不显著,与此偏倚相关的不确定度就是有证标准物质(标准样品)数值的标准不确定度和与测量偏倚有关的标准偏差的简单合成。当标准样品和待测样品不是高度匹配时应当考虑其他因素,包括成份和均匀性的差别,被分析物浓度的影响。方法的偏倚也可以通过将其结果与参考方法的结果进行比较而得到。如偏倚在统计学上是不显著的,标准不确定度就是参考方法的不确定度与两个方法差值的标准不确定度的合成。后者的不确定度分量由显著性检验中使用的标准偏差表示。总体偏倚也可以在一种以前已研究过的材料中加入被分析物的方法来进行评估。也可以通过比较特定方法和用标准加入法测定的数值来评估。

73

通常要求修正所有已知的显著的系统影响。偏倚显著时,但是又因为某个实际的原因忽略不计了,此时有必要采取其它的措施。可以通过实验变化的方法,也可根据已建立的理论进行预测其他因素。如果与精密度相比,其他因素的影响被证明可以忽略不计时,其不确定度分量可使用该因素进行显著性检验的标准偏差。

(8) 能力验证数据的利用。对于实验室已经长期使用的试验方法,也被称作外部质量保证数据可用于:①对某个实验室利用能力验证的结果检查所评估的不确定度;②评估实验室的测量不确定度。PT样品可能比有证标准物质(标准样品)更接近于实验室的常规样品。对于分发的材料来说公议值出现明显的偏倚的机会并不大。

74

当使用公议值时，材料的种类和被测量的量值范围应适当，频次是适当的，参与能力验证的实验室数量应该充足，以便保证所确定的样品特性可靠。经过，几轮能力验证之后，实验室结果对指定值的偏离可以用来初步评估实验室的测量不确定度。

(9) 经验方法(empirical method)的不确定度评估。是指在特定应用领域内，为比较性测量目的而一致同意使用的方法，其特征是被测量依赖于所使用的方法。相应地，方法定义了被测量。当在规定的适用范围内使用此类方法时，其方法偏倚规定为零。在这种情况下，偏倚估计只和实验室的操作相关，不需额外考虑方法内在的偏倚。利用标准物质(标准样品)可以测量偏倚或者证明偏倚是否可忽略。

72

(10) 临时方法的不确定度评估。是在短期内或为一小批试样进行探索性研究所建立的方法。这种方法通常基于标准方法或实验室内的成熟方法，但做了较大的修改(例如研究不同的被分析物)，并且通常没有对该试样做正式的方法确认研究。需要利用相关系统的已知性能或这些系统内相关步骤的已知性能。不确定度评估因此就应该基于一个相关系统或多个系统的已知性能。至少要得到所讨论方法的总体偏倚的估计值和精密度的表示值。测量偏倚理想的做法是用标准物质(标准样品)，但实际上更常用的做法是通过加标回收率加以评估。总体偏倚，应与有关系统的观察值相当。精密度试验最少为双平行试验，推荐在实际操作时尽可能多的重复分析。与相关系统的精密度比较，临时方法的标准偏差应相当。

(11) 单个分量的量化。需要单独考虑一些不确定度的来源时，或者方法性能数据很少或没有时，应分别评估每个来源，通常用以下方法来评估单个的不确定度分量：输入变量的试验变化；根据现有数据，例如测量和校准证书，通过理论原则建立的模型；根据经验和假设模型的信息作出的判断。

(12) 单个不确定度分量的试验估计。随机效应，可通过重复性试验测量，标准不确定度以被测量值的标准偏差来表示。通常重复试验不超过15次，如需要更高的精密度可增加试验次数。单个参数变化对结果的影响：尤其适合于独立于其他影响的连续、可控的参数，如时间或温度。试验结果随参数变化的变化率可通过实验数据获得。然后将其直接与该参数的不确定度合成就可得到相关的不确定度分量。

75

稳健性研究，系统地研究参数适度变化的显著性。尤其适合于快速识别显著影响，并且通常用于方法优化。该方法也可用于评估离散效应，如基体的变化，或小型仪器配置的变化，它们可能对结果产生不可预测的影响。当发现某个因素是显著的，通常要做进一步研究。当不显著时，与之有关的不确定度是稳健性研究所得到的不确定度。

多因素试验：系统性的多因素实验设计。目的在于估计因素的影响以及因素相互之间的作用。这类研究在分类变量存在的情况下尤其适用。分类变量是一种其数值与该因素大小无直接关联的变量，例如实验室编号、分析人员名字或样品类型等。基体类型变化的影响可从重复的多基体研究中的回收率分析中估计。根据方差分析即可得到回收率的基体内和基体间方差分量。基体间方差分量即为与基体变化有关的标准不确定度。

76

(13) 基于其他结果或数据的估计。使用现有的关于所考虑量的不确定度的相关信息来评估某些标准不确定度。质量控制(QC)的数据,必须保证达到标准操作程序(SOP)中设定的质量标准,测量结果应证明能持续满足该标准,如果用到其他的稳定物质, QC数据可以用于中间精密度的评估,质量控制可以用双平行测试或者类似方法来监测可重复性,通过长期积累,合并重复性数据可用于评估重复性标准偏差。QC数据还可以持续检查不确定度的引用值。对于许多不确定度来源,校准证书或供应商的目录可以提供信息,例如容量玻璃器皿在使用前,其允差可由生产厂商的产品目录上取得,或从针对特定项目的校准证书上获得。

(14) 根据理论原理建立模型。很多情况下,公认的物理理论提供了结果影响量的良好模型。例如:温度对体积和密度的影响,使用不确定度传播方法从关系式评估或计算不确定度。在其他情况下,需要将近似的理论模型与实验数据一起使用。例如当分析取决于限时的衍生反应时,需要评估与计时有关的不确定度。

(15) 基于判断的估计。不确定度的评估依赖于对被测量的性质、测量方法和程序的了解程度。不确定度的可靠性和可用性依赖于对其数值赋值有贡献的那些因素的理解、严格分析和完整性。很多数据的分布可以理解为边界分布较少,中间部位分布较多,对于这些分布及其相关标准偏差的量化可通过重复测量得到。不能进行重复测量或不能提供有意义的测量时,需要对置信区间进行其他评估。

在分析化学中不能进行重复测量或不能提供有意义的测量占主要的情况，因此需要用判断来评估。例如：当回收率及相关的不确定度评估数据不能针对每一个样品获得时，整类样品的相关数据可以应用到相似类型的样品中，由于相似程度本身是未知的，因此会引入不确定度的另一个分量(此分量尚无频率论的解释)。分析程序中规定的测量模型是用来将测量值转换为被测量的值(分析结果)的。正如科学领域的所有模型一样，该模型本身也有不确定度。推荐使用标准物质(标准样品)，但仍有不确定度，不仅其真值有不确定度，分析具体样品时与特定标准物质(标准样品)的相关性也有不确定度。因此，在特定情况下需要判断所声明使用的标准物质(标准样品)与样品性质合理接近的程度。

79

当程序对被测量定义不充分时会产生另一种不确定度来源。比如测定“可氧化的高锰酸盐物质”的情况，地上的水或是城市废水是不同的。有氧化温度、基体组成或干扰等化学影响。在分析化学中通常的做法是加入单一物质如结构接近的类似物或同位素异构体、相关的内在物质等，据此判断回收率甚至整类化合物的回收率。假如研究所有浓度水平，以及任何比例的被测量对加标物和所有“相关”基体的回收率，则其不确定度可通过实验评估。关于下列问题通常采用判断来代替实验：浓度与被测量回收率的相关性；浓度与加标物回收率的相关性；回收率与基体(分)类型的相关性；内源性物质和加标物质结合模式的识别。基于主观(人为)的概率判断，与“可信程度”、“直觉概率”和“可信性”同义。

80

需基于深思熟虑的概率判定。判断的人员应具备常识、一定的专业知识和丰富的经验，会因人而异或则因时而异。

当实验条件的真实、实际的变化性不可模拟。由此导致结果数据的变化不能反映实际情况时本方式特别适用，其可靠性可能会优于重复测量的方式。当需要对长期的变化性进行评估，而又没有协同研究数据时，就会产生这种性质的典型问题。研究人员没有选择用主观概率代替实际观测的概率(当后者不可获得时)，就可能忽略了合成不确定度的重要分量，也就最终不如那些利用主观概率的人客观了。

评估合成不确定度时，可信程度估计值的两个特征是最基本的：可信程度应被视为区间值，即提供了类似于经典概率分布的上下边界；将不确定度的‘可信程度’分量合成为合成不确定度，同其它方法得到的标准偏差一样，用同样的计算规则。

91

(16) 偏倚的显著性

对所有的已知并显著的系统效应进行修正，这是GUM的总要求；

在判定一个已知的偏倚是否可合理被忽略不计时，建议使用下列方法：1)在不考虑相关偏倚的情况下评估合成不确定度；2)将偏倚与合成不确定度比较；3)当偏倚与合成不确定度比较不显著时，该偏倚可以忽略不计；4)当偏倚与合成不确定度比较显著时，需要采取额外的措施。适当的措施可能包括：消除或修正偏倚，并适当考虑该修正的不确定度；除结果外，还要报告所观察到的偏倚及其不确定度。

92

第四步：计算合成不确定度

第三步所述的对总不确定度有贡献的量化分量，它们可能与单个来源有关，也可能与几个不确定度来源的合成效应有关。这些分量根据有关规则进行合成，以得到合成标准不确定度。应当使用适当的包含因子来给出扩展不确定度。

1、标准不确定度

所有不确定度分量必须在合成前应以标准不确定度即标准偏差表示。当不确定度分量是通过重复测量的分散性来评估时，不确定度分量可直接用标准偏差表示。对于单次测量的不确定度分量，其标准不确定度就是所得到的标准偏差：取平均值的结果则为平均值的标准偏差。

53

当不确定度评估是通过已有的结果和数据进行时，其分量可用标准偏差表示。

(1)如有置信区间(用 $\pm\alpha$ 表示，并指明 $p\%$)并给定了置信水平 $p\%$ ，则将 α 值除以与所给出的置信水平相应的正态分布百分点的值就得到标准偏差。

例：规范中规定天平的分度值为 $\pm 0.2\text{mg}$ ，置信水平为95%。从正态分布的百分点标准表上，95%的置信区间是用1.96这个值计算的。使用这个数值得出标准不确定度约为 $(0.2/1.96)\approx 0.1$ 。

(2)当 $\pm\alpha$ 的限值没有给定置信水平，且认为极端值可能时，通常假定其为矩形分布，标准偏差为 $\alpha/\sqrt{3}$ 。

54

例：证书给出10mLA级容量瓶为 $\pm 0.2\text{mL}$ ，则该标准不确定度为 $0.2/\sqrt{3} \approx 0.12\text{mL}$ 。

(3)当 $\pm a$ 的限值没有给定置信水平，且认为极端值不可能时，可假定为三角形分布，标准偏差为 $a/\sqrt{6}$ 。

例：证书给出10mLA级容量瓶为 $\pm 0.2\text{mL}$ ，但日常内部检查表明极端值的可能性极少，则标准不确定度为 $0.2/\sqrt{6} \approx 0.08\text{mL}$ 。

当基于判断方式评估不确定度时，如可能，可用标准偏差表示不确定度分量。如果不可能，则应以实际中可能合理存在的最大偏差(剔除简单错误)进行评估。当认为较小值可能性更高时，此估计按三角形分布处理。如果不认为小误差比大误差更加可能时，应按矩形分布处理。

55

2、合成标准不确定度

在评估了单个的或分组的不确定度分量并将其表示为标准不确定度后，下一步就是要使用下列程序之一计算合成标准不确定度。数值 y 的合成标准不确定度 $u_c(y)$ 和其所依赖的独立参数 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的不确定度之间的总关系式如下：

$$u_c(y(x_1, x_2, \dots)) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u(x_i)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u(y, x_i)^2}$$

其中 $y(x_1, x_2, \dots)$ 为几个参数 $x_1, x_2, \dots$ 的函数， c_i 为灵敏系数，记做 $c_i = \partial y / \partial x_i$ ， y 对 x_i 的偏导。 $u(y, x_i)$ 为由 x_i 不确定度引起的 y 的不确定度，GUM中用 $u_i(y)$ 代替。每个变量的贡献 $u^2(y, x_i)$ 正好是其表达不确定度的标准偏差的平方乘以相关灵敏系数的平方。这些灵敏系数反应了 y 值如何随着参数 $x_1, x_2, \dots$ 的变化

56

而变化。当无法找到可靠的数学表达式时，灵敏系数也可以直接根据实验得出。

变量相关时，关系式更复杂了：

$$u(y(x_{i,j,\dots})) = \sqrt{\sum_{i=1,n} c_i^2 u(x_i)^2 + \sum_{\substack{i,k=1,n \\ i \neq k}} c_i c_k u(x_i, x_k)}$$

其中 $u(x_i, x_k)$ 是 x_i 和 x_k 之间的协方差， c_i 和 c_k 是灵敏系数。协方差与相关系数 r_{ik} 有关

$$u(x_i, x_k) = u(x_i)u(x_k)r_{ik}, \text{ 其中 } -1 \leq r_{ik} \leq 1$$

无论不确定度是与单个参数有关，还是与组参数有关，或者是与整个方法有关，上述通用程序都适用。

57

如果不确定度分量与整个程序有关时，通常表示为对最终结果的影响。在这种情况下，或当某个参数的不确定度直接表示为其对 y 的影响时，灵敏系数等于1.0。

例：结果为22mg/L，其所观察的标准偏差为4.1mg/L。在这些条件下，与精密度有关的标准不确定度 $u(y)$ 为4.1mg/L。为清晰起见忽略其他因素，则该测量所蕴含的模型为：

$$y = (\text{计算的结果}) + \varepsilon$$

其中 ε 代表了测量条件下的随机变异影响，因此 $\partial y / \partial \varepsilon$ 等于1.0

除了上述情形，当灵敏系数等于1外，以及除了下列规则1（加减法）和规则2（乘除法）中所给的特殊例子外，应使用需要进行偏导的通用程序或其它可选择数值计算方法。

58

由克拉格滕Kragten提出的数值计算方法有效利用了电子表格软件, 根据已知测量模型, 从输入标准不确定度得出合成标准不确定度。蒙特卡洛Monte Carlo模拟法是另一个可选择的数值计算方法。除最简单的情况外, 建议使用这些方法或其他一些适合的计算机方法。

有时合成不确定度的表达可以采用更为简单的形式。减法的处理原则与加法相同, 除法与乘法相同。合成标准不确定度的两个简单规则如下:

规则1: 对于只涉及量的和或差的模型, 例如: $y=(p+q+r\dots)$, 合成标准不确定度 $u_c(y)$ 如下:

$$u_c(y(p, q\dots)) = \sqrt{u(p)^2 + u(q)^2 + \dots}$$

59

规则2: 对于只涉及积或商的模型, 例如 $y=(p \times q \times r \times \dots)$ 或 $y=p/(q \times r \times \dots)$, 合成标准不确定度 $u_c(y)$ 如下:

$$u_c(y) = y \sqrt{\left(\frac{u(p)}{p}\right)^2 + \left(\frac{u(q)}{q}\right)^2 + \dots}$$

其中, $u(p)/p$ 等是参数表示为相对标准偏差的不确定度。

合成不确定度分量时, 为方便起见, 应将原始的数学模型分解, 将其变为只包括上述原则之一所覆盖的形式。例如: 表达式 $(o+p)(q+r)$ 应分解成两个部分: $(o+p)$ 和 $(q+r)$ 。每个部分的临时不确定度用规则1计算, 然后将这些临时不确定度用规则2合成为合成标准不确定度。

60

例1: $y=(p-q+r)$, 其中 $p=5.02$, $q=6.45$, $r=9.04$,
标准不确定度 $u(p)=0.13$, $u(q)=0.05$, $u(r)=0.22$.
则, $y=5.02-6.45+9.04=7.61$

$$u(y)=\sqrt{0.13^2+0.05^2+0.22^2}=0.26$$

例2 $y=(op/qr)$, 其中 $o=2.46$, $p=4.32$, $q=6.38$, $r=2.99$,
标准不确定度 $u(o)=0.02$, $u(p)=0.13$, $u(q)=0.11$, $u(r)=0.07$.
则 $y=(2.46 \times 4.32)/(6.38 \times 2.99)=0.56$

$$u(y)=0.56 \times \sqrt{\left(\frac{0.02}{2.46}\right)^2 + \left(\frac{0.13}{4.32}\right)^2 + \left(\frac{0.11}{6.38}\right)^2 + \left(\frac{0.07}{2.99}\right)^2}$$

$$\rightarrow u(y)=0.56 \times 0.043=0.024$$

91

很多情况下, 不确定度分量的大小随着分析物浓度水平的不同而变化。例如, 回收率的不确定度对于高浓度的物质可能要小些, 光谱信号可能会近似按与强度成比例的方式随机地变化(恒定变化系数)。在这种情况下, 必须考虑合成不确定度随被分析物的浓度变化情况。

方法包括: 将规定的程序或不确定度评估限制到被分析物浓度的小范围内; 将不确定度估计值以相对标准偏差的形式给出; 明确计算相关性并对给定的结果重新计算不确定度。

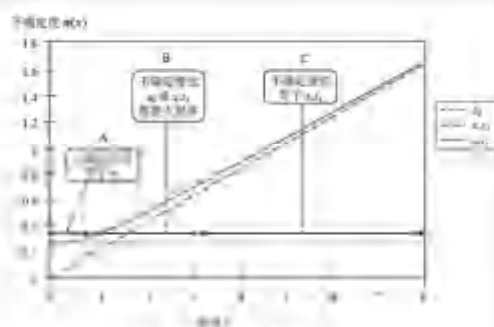


图 8-11 不确定度随浓度变化的情况

92

3. 扩展不确定度

最后一步是将合成标准不确定度和所选的包含因子相乘得到扩展不确定度。扩展不确定度需要给出一个期望区间，合理地赋予被测量的数值分布的大部分会落在此区间内。

在选择包含因子 k 的数值时，需要考虑很多问题，包括：a) 所需的置信水平；b) 对所基于的分布的了解；c) 对于评估随机影响所用的数值的个数的了解。

大多数情况下，推荐 k 为2。如果自由度小于6，选择这个 k 值可能不充分。此时 k 的选择取决于有效自由度。

当合成标准不确定度由某个自由度小于6的分量占决定作用时，推荐将 k 设成与该分量自由度数值以及所需置信水平

92

(通常95%)相当的学生 t 分布的双侧检验数值。学生 t 分布中给出了经常使用的主要数值。

例：称量操作的合成标准不确定度，由标准不确定度分量 $u_{\text{cal}}=0.01\text{ mg}$ 和5次重复实验的标准偏差 $S_{\text{obs}}=0.08\text{ mg}$ 合成。合成标准不确定度 $u_c=(0.01^2+0.08^2)^{0.5}=0.081\text{ mg}$ 。很明显基于5次重复性实验并具有 $5-1=4$ 自由度的重复性分量 s_{obs} 占主要。因此 k 要基于学生 t 分布。对于自由度为4，置信水平为95%，查表双边数值 t 为2.8。因此 k 值设为2.8，扩展不确定度 $U=2.8\times 0.081=0.23\text{ mg}$ 。

对于使用少数几次的测量来评估人的随机影响，JJF 1059.1对 k 值的选择方法给出了额外的指南，当评估有几个

93

显著分量的自由度时应参照此指南。

当所涉及的分布是正态分布时，包含因子2 (或选择包含因子，置信水平设为95%)给出了大约包含95%分布数值的区间。在没有有关分布的信息时，该区间并不意味着是在95%的置信水平下的区间。

t 值修约到一位小数。对于位于中间部位的自由度 ν ，要么使用下一个较低的 ν 值，要么引用表中的 ν 值，要么使用软件。

表1: 95%置信水平下的2倍包含因子

自由度 ν	t
1	31.8
2	9.3
3	3.3
4	2.8
5	2.6
6	2.4
8	2.3
10	2.2
14	2.1
28	2.0

95

五、不确定度的报告

1、报告测量结果所需要的信息取决于其预期的用途。报告应提供足够的信息，以便出现新的信息或数据时可重新进行评估；提供的信息越充分越好。当相关信息描述中不确定度评估引用了已发布的文件时，应保证所获得的文件最新有效且与所使用的方法一致。

2、内容要求：

(1) 完整报告应包括：根据实验观察值及输入数据进行测量结果及其不确定度计算的方法描述；在计算和分析不确定度中使用的所有修正值和常数的数值和来源；所有不确定度分量的清单，包括每一个分量是如何评价的完整文件。

96

(2) 数据和分析的表达方式应能在必要时容易地重复所有重要步骤并重复计算结果:

(3) 如需报告更全面的内容, 包括中间输入数值时, 报告应: 给出每一个输入值的数值及其标准不确定度和获取方法的描述; 给出结果和输入值之间的关系式及其任何偏导数, 用来说明相关性影响的协方差或相关系数; 给出每个输入值的标准不确定度的自由度的评估值(评估自由度的方法见JJF 1059.1)。当函数关系极其复杂或没有明确的函数关系时(例如, 可能仅以计算机程序的形式存在), 可以用通用术语或引用适当的文献来描述上述关系。在这种情况下, 必须清楚地说明结果值及其不确定度是如何得到的。报告日常分析的结果时, 给出扩展不确定度的数值和 k 值即可。

97

(4) 报告标准不确定度

当不确定度是以合成标准不确定度 u_c 的形式表达时(即一个标准偏差), 推荐采用下面的形式:“(结果): x (单位) [和]标准不确定度 u_c (单位) (其中该标准不确定度是GUM中所定义的标准不确定度, 相当于一个标准偏差)”。

当使用标准不确定度时, 不建议使用 $\pm$ 符号, 因为该符号通常与高置信水平的区间有关。括号中的术语根据需要可以忽略或精简。

例: 总氮含量: **3.52g/100g**

标准不确定度: **0.07 g/100g ***

*标准不确定度相当于一个标准偏差

98

(5) 报告扩展不确定度

除非另有要求，结果 x 应跟使用包含因子 $k=2$ （或给出的 k 值）计算的扩展不确定度 U 一起给出。推荐采用以下方式：

“（结果）：（ $x \pm U$ ）（单位） 其中报告的不确定度是第二版VIM中所定义的扩展不确定度，计算时使用的包含因子为2，[其给出了大约95%的置信水平]”。

括号[]中的术语根据需要可以忽略或精简。当然，包含因子应加以调整以反映实际使用的数值。

例：总氮量：(3.52±0.14) g/100g*

*报告的不确定度是扩展不确定度，使用的包含因子是2，对应的置信水平大约是95%。

99

(6) 结果的数值表示

结果及其不确定度的数值表示中不可给出过多的数字位数。无论是给出扩展不确定度 U ，还是标准不确定度 u ，通常不确定度的有效数字不要多于两位的。测试结果应根据所给出的不确定度进行适当修约。

(7) 非对称区间

在某些情况下，特别是结果接近零时的不确定度或按照蒙特卡洛MonteCarlo评估时，结果的分布可能是非常不对称的。将一个单一值引用作为不确定度可能不恰当，而应该给出所估计的覆盖区间的限值。如果结果及其不确定度有可能用于进一步计算，那么应当给出标准不确定度。

100

例：纯度(质量分数)可报告为：纯度：0.995，大约95%置信区间为0.983至1.000，标准不确定度为0.005，自由度为11。

(8) 与法规限值的符合性

法规通常要求被测量(例如：有毒物质的含量)符合规定限值。本文中的测量不确定度明显地有解释分析结果的含义，特别是：评价符合性时可能需要考虑分析结果的不确定度；限值中可能已经给出不确定度的允许量。

在评估中需考虑这两个因素。

EURACHEM指南“不确定度信息在符合性评估中的使用”¹⁴给出了在评估符合性时如何考虑不确定度的详细指导。

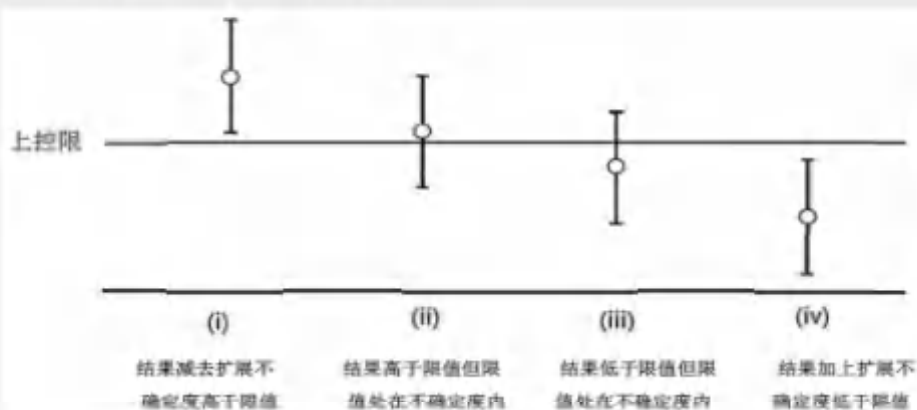
101

决定是否接受测试样品的基本要求是：相关规范给出了受控指标(被测量)的允许上限或下限；相关判定规则说明了当根据规范和测量结果接受或拒绝一个产品时应如何考虑测量不确定度；从判定规则导出接受或拒绝的区间(即结果范围)，根据测量结果所位于的区间做出接受或拒绝的决定。

例子：目前使用比较广泛的判定规则是如果测量值超过上限一个扩展不确定度时结果判定为不符合上限。按照这个规则，下图中只有第一种情况是不符合的。类似的，对于只有结果低于限值一个扩展不确定度时才能判定为符合的判定规则，只有第四种情况是符合的。

102

不确定度和符合性限值



通常判定规则会比上述情况更复杂一些。

102

一点体会：实验测试的误差是日常工作中遇到的问题，不确定度评估是误差的发展和延伸，也是资质认定的需要。目前越来越重视对检测机构资质认定事中事后的监管，市场监管部门随机监督检查力度不断加大，对检测机构的追责问责越来越频繁，最近人民日报健康客户端报道：北京有三家核酸检测机构被查，14人被批捕。

两个月内，北京3家第三方核酸检测机构被查，14人被批捕

人因工程研究中心

11/15/2014 11:14:44 AM

Copyright © 2003 机械工业出版社

DOI: 10.1002/for

bioRxiv preprint doi: <https://doi.org/10.1101/000000>; this version posted January 1, 2016. The copyright holder for this preprint (which was not certified by peer review) is the author/funder, who has granted bioRxiv a license to display the preprint in perpetuity. It is made available under aCC-BY-NC-ND 4.0 International license.

1994-1995 年 10 月 1 日以前



TUA

新闻 | 环境 | 社会 | 政策 | 标准 | 法规 | 产业 | 企业 | 区域 | 专题 | 国际 | 中国 | 世界

出具虚假检测报告！杭州某检测公司被罚

2019.11.15 | 作者：中国环境报 记者：王晶晶 通讯员：王晶晶

近日，杭州某检测公司因出具虚假检测报告，被生态环境部通报批评。该公司在检测过程中，存在篡改数据、伪造检测报告等行为，严重影响了检测结果的真实性和公正性。生态环境部要求该公司立即整改，并对相关责任人进行严肃处理。

通报批评

生态环境部通报批评杭州某检测公司，指出其在检测过程中存在篡改数据、伪造检测报告等行为，严重影响了检测结果的真实性和公正性。生态环境部要求该公司立即整改，并对相关责任人进行严肃处理。

通报批评：生态环境部通报批评杭州某检测公司，指出其在检测过程中存在篡改数据、伪造检测报告等行为，严重影响了检测结果的真实性和公正性。生态环境部要求该公司立即整改，并对相关责任人进行严肃处理。

在我们身边，杭州市场监管部门正在“扎牢数据质量的藩篱”。

工作中遇到的情况：长兴某金矿分析工作液失效；阿里某矿分析电压失稳仪器漂移；某黄金公司载金碳取样失去代表性结果超差；某科研机构耗氧量结果位数超差。