密级：公开

# 综合物探方法在掌鸠河引水工程厂口隧洞的应用

# The Application and Analysis of Synthetic Geophysical Exploration in Zhangjiu River Water Transfer Project Changkou Tunnel

（石家庄铁道学院工程硕士专业学位论文）


培 养 单 位：土木工程分院

专　　业：建筑与土木工程

研 究 生：高　忠　岭

指 导 教 师：刘 志 刚　教授

校外指导教师：刘　雄　高工


二〇〇八年九月

# 独 创 性 声 明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得石家庄铁道学院或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签　名：_____ 日　期：_____

# 关于论文使用授权的说明

本人完全了解石家庄铁道学院有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的铁道部复印件和电子版本，允许被查阅和借阅。同意学校将论文加入《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》和编入《中国学位论文全文数据库》。本人授权石家庄铁道学院，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。(保密的论文在解密后应遵守此规定)

签　名：_____导师签名：_____日　期：_____

# 摘　要

近年来，随着隧道隧洞等地下工程的大量施工，诸如涌水、塌方、岩爆等施工地质灾害问题也日益突出。它严重地影响工程的进展，增加了工程的造价，有的甚至导致整个工程的失败。为了避免或减少施工地质灾害的发生，实现工程快速安全的施工，超前地质预报由此应运而生，而且越来越受到一些工程界人士的重视，并广泛应用于长、大隧道隧洞施工中。

本文以掌鸠河引水工程之厂口隧洞为研究对象。首先对隧址区域的地质条件进行了系统的分析，指出了在今后的施工中需要重点进行超前预报的地段以及相应采用的方法。然后详细介绍了综合物探方法，包括 TSP、地质雷达及红外探水等超前地质预报的原理和实际应用。

结合掌鸠河引水工程之厂口隧洞勘探现场探测成果，论文重点介绍高密度电阻率法勘探、地震 CT 勘探、TSP 等三种超前地质预报方法及其应用情况。主要包括：应用上述三种地球物理方法对厂口隧洞普渡河断裂带区域上覆岩体和隧洞开挖前方的工程地质结构进行综合勘察；并通过对数据的处理和分析解释，查明普渡河断裂带的空间延伸及与隧洞塌方冒顶和衬砌破坏的关系，进而获得隧洞拱顶上方岩体开裂、坍落变形的位置、宽度及延伸等几何形态图像，同时提供隧洞下部的地质情况。

最后，根据综合物探的探测结果，给出了具体的工程施工建议，建议隧洞病害的整治和施工中，应主要是治理和恢复隧道顶部破碎松动区围岩稳定性，同时增加衬砌的厚度和强度。可以作为以后利用综合物探进行隧道地质超前预报工作的参考。

**关键词**：隧洞，综合物探，高密度电阻率，地震 CT，TSP 超前地质预报

# Abstract

In recent years, with the development of tunnel engineering, the question of geological disasters was prominent during the construction，such as water inflow, landslide, crag explodes and so on. These questions influence the progress of the project seriously, and increase the construction cost, some even cause the project to failure. In order to avoid or reduce these questions, and make the construction safe and fast, the geological forecast occurs in the moment. In the project implementation, the geological forecast method was taken into account for its reliable in the field of the engineering, and widely used in the long and key tunnel construction.。

The Zhangjiu river water transfer project Changkou tunnel was studied. Firstly, the area geology condition was analyzed systemically, the geological analysis method was applied to a macroscopically geological prediction, and the key segment and the appropriate methods which must be noticed ware showed. Then the principles and practical application of the main synthetic geophysical exploration methods were introduced particularly, such as TSP fore geological forecast, geological radar, and infrared water detection fore geological forecast.

Combined with the local detected results of Zhangjiu river water transfer project Changkou tunnel, this paper mainly introduced high-density resistivity, seismic CT, and fore geological forecast and the practical application. Main contents concluded these three methods were used in Zhangjiu river water transfer project Changkou tunnel. comprehensive surveyed the coverage rock of Pudu river fault zone and the geological structure in front of the tunnel excavation; checked the space extension of the Pudu river fault zone and the relation between the cave collapse and the lining damage, acquired the geometry image such as the rock mass crack above tunnel arches、the slump distorts position、the width and extension etc, simultaneously provided the geological conditions of the lower part of Tunnel.

The specific construction proposals were provided according to synthetic geophysical exploration results finally. Stability of the broken and loose rock mass

above the tunnel must be treated and restored during the improvement and the construction of tunnel Diseases, and the same time increase the lining thickness and intensity. Some relevant advices which may be useful for the future were brought forward.

**Key words**: tunnel, synthetic geophysical exploration, high-density resistivity, seismic CT, TSP fore geological forecast

# 目 录

第一章 绪论 ..... 1
1.1 选题依据及研究意义 ..... 1
1.2 研究的必要性 ..... 1
1.3 国内外研究现状 ..... 3
1.3.1 隧道综合物探的技术方法研究现状 ..... 5
1.3.2 隧道综合物探的综合分析研究现状 ..... 5
1.4 研究内容及技术路线 ..... 5
1.4.1 主要研究内容 ..... 5
1.4.2 技术路线 ..... 6
第二章 隧道地质调查中常用物探方法 ..... 8
2.1 TSP 超前地质预报方法 ..... 8
2.1.1 理论基础 ..... 8
2.1.2 TSP 超前地质预报系统的特点 ..... 9
2.2 地质雷达探测超前地质预报方法 ..... 10
2.2.1 探测原理 ..... 11
2.2.2 地质雷达方程 ..... 11
2.2.3 地质雷达探测的特点 ..... 12
2.3 红外探水超前地质预报方法 ..... 13
2.3.1 红外超前预报含水层的物质基础 ..... 13
2.3.2 无限长均匀含水圆柱体温度场模拟和分析 ..... 14
2.3.3 温度场的一般规律 ..... 14
2.3.4 红外探水的特点 ..... 15
2.4 其他物探预报方法 ..... 15
2.4.1 隧道 VSP 法 ..... 16
2.4.2 HSP 水平声波剖面预报方法 ..... 16
2.4.3 声波 CT 技术预报原理 ..... 16
2.4.4 陆地声纳法 ..... 16
2.4.5 TST 超前预报技术 ..... 17
2.4.6 BEAM 法 ..... 17
第三章 掌鸠河引水工程厂口隧洞综合物探应用研究 ..... 18

3.1 工程地质条件 ..... 18
3.1.1 工程概况 ..... 18
3.1.2 气象水文 ..... 18
3.1.3 地质构造 ..... 19
3.2 综合物探的准备工作 ..... 19
3.3 高密度电阻率法勘探 ..... 19
3.3.1 高密度电阻率法勘探基本原理 ..... 19
3.3.2 观测系统的布置 ..... 20
3.3.3 高密度电阻率成像法勘探成果 ..... 22
3.4 地震 CT 勘探 ..... 26
3.4.1 地震 CT 勘探基本原理 ..... 26
3.4.2 观测系统的布置及完备性评价 ..... 27
3.4.3 地震 CT 勘探成果 ..... 29
3.5 TSP 超前地质预报 ..... 34
3.5.1 TSP 超前地质预报的基本原理 ..... 34
3.5.2 观测系统的布置 ..... 35
3.5.3 TSP 超前地质预报的勘探成果 ..... 35
第四章 掌鸠河引水工程厂口隧洞综合物探预报对施工的建议 ..... 44
4.1 掌鸠河引水工程厂口隧洞综合物探预报结论 ..... 44
4.2 掌鸠河引水工程厂口隧洞施工建议 ..... 45
第五章 结论 ..... 49
5.1 主要研究成果 ..... 49
5.2 研究展望 ..... 49
参考文献 ..... 51
致谢 ..... 54
个人简历 ..... 55

# 第一章　绪　论

## 1.1　选题依据及研究意义

近年来，世界各国长大隧道的不断建成和拟建，为隧道科学的大发展翻开了崭新的一页，如长度分别为 53.85 km 和 50.50 km 的日本青函海底隧道以及英——法海底隧道已在上世纪末建成通车；再次横穿阿尔卑斯山的长达 35 km 世界最长陆地隧道——瑞士勒奇山隧道 2007 年正式通车，世界最长火车隧道——戈特哈尔德隧道（长 57.6 km）已经开工；1979 年西班牙和摩洛哥共同批准拟建连接欧洲和非洲两个大陆、全长 39 km 的直布罗陀海底隧道的准备工作也于 2007 年展开。

建国以来，我国的隧道建设也取得令人瞩目的成果，已完成的乌鞘岭隧道长度达 20 km，已经建成通车的终南山隧道为世界最长公路双洞隧道长度达 18 km，刚刚竣工的青藏铁路、正在施工的南水北调工程和正在论证的跨越渤海海峡、琼州海峡的海底隧道工程。近年来，随着西部大开发的步伐的加快，西部山区高速公路的建设不可避免的要修建长大隧道，长 4 176 m 的二郎山隧道 2001 年建成通车，海拔 3 400 m 的中国高原最长隧道——鹧鸪山隧道于 2004 年建成通车，全长 10.658 km 的襄渝二线新大巴山隧道于 2007 年底胜利贯通。

这些长大隧道工程都是所属工程的控制性工程，隧道施工建设的安全以及进度很大程度上决定了整条路的通车时间，大而言之对西部乃至国内整个路网建成连通都起着关键性的作用。而纵观隧道的修建史，制约隧道发展的因素包括掘进技术、支护技术、通风技术和不良地质条件等。在现有的技术经济条件下，掘进、支护、通风等技术都已得到了较好的解决，隧道建设面临的主要问题实质就是工程地质问题，隧道的设计、施工、工期、造价无不受此影响。

## 1.2　研究的必要性

不良地质条件，尤其是施工开挖可能诱发的各类地质灾害，由于其不可选择性、复杂性、特殊性、突发性，因而常常成为制约隧道修建的最主要因素。

隧道的修建是一项隐蔽工程，尤其长大隧道往往要穿过多种岩类、多个构造，跨过几个地质单元，工程地质条件复杂，前期勘察往往难以精确查明，隧道建设的问题主要就体现在地质问题上，施工期地质灾害将会严重影响施工安全和进度。因地质灾害使得隧道修建严重受挫的实例在国内外不乏其例[1,2]，如，衡广线上的大瑶山隧道中部两公里处突发涌水涌砂，最大涌出量达 50 000 t/d，淹没坑道，被迫停止施工；湖南省内的南岭隧道，施工中在+745 m～+920 m出现突发性碎屑流，仅 1984 年 11 月 26 日 27 日两天就涌出流塑状泥 7 986 $m^3$，堵塞导洞 177 m淹没多台大型机械设备；渝怀铁路园梁山隧道岩溶地层中出现罕见的涌水突泥现象，造成重大经济损失和人员伤亡；辛普伦隧道在 42 m大变形洞段的施工中耗费了 18 个月工期；艾那山I线隧道 400 m大变形段用了 36 个月才得以通过。

上述实例充分说明了详细查明地质情况对隧道工程的重要意义。但施工前的地质工作由于技术手段和投入经费的限制，加之地质体的复杂性，所取得地质资料往往十分粗略和有限，难以完全满足施工的要求，尤其对于深埋隧道更是如此。如美国科罗拉多州罗伯特隧道，其地面测绘确定的断层和岩脉是隧道开挖中遇到的断层和岩脉的 1%～9%，即使是较大的断层和岩脉，测绘确定的也仅是开挖遇到的 12%～47%。又如，我国襄渝线大巴山隧道勘察阶段预测涌水量 4.14×104 $m^3$/d，但施工时最大涌水量达到 20.55×104 $m^3$/d；川黔线娄山关隧道勘察阶段预测涌水量 6.00×104 $m^3$/d，而施工时最大涌水量为 19.20×104 $m^3$/d，相差达数倍之多。因此，在隧道施工过程中，对掌子面前方的地质条件和可能的地质灾害开展超前地质预报，将对隧道的正常施工和顺利贯通发挥举足轻重的作用。成功的预测促使施工及时采取应对措施，防范于未然；反之，则往往在突发的地质灾害面前束手无策，使施工遭受重大挫折。

以上工程实例充分说明，开展施工期超前地质预报，避免重大的地质灾害，对隧道施工建设具有极为重要的意义。由于前期勘察设计阶段地质资料一般都较为粗略，成果有限、准确度较低，仅仅依靠这些基础性资料几乎无法科学、有效的完成施工期地质预报，安全可靠的指导施工建设。在目前的隧道施工建设当中越来越重视使用地球物理探测手段，但是这些探测技术本身具有多解性，并且各种方法技术都有各自的局限性，相同仪器设备不同的工程技术人员可能得到完全不同的预报成果，同样的技术方法并非放之四海皆准，加之长大隧道本身复杂工程地质特性，如何综合运用这些超前探测方法以地质分析为基础准

确、及时的进行施工期超前地质预报仍然是隧道工程中有待解决的难题。

## 1.3 国内外研究现状

隧道施工期地质超前预报历经几十年的发展，国外如英、法、日、德均已将此列为隧道工程建设的重要研究内容。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，隧道施工地质预报一直受到重视，80 年代世界各国都将这类问题列为重点研究课题。日本曾专题研究开挖工作面前方地质预报；澳大利亚研究隧道施工前方地层状况预报；西德研究掌子面附近地层动态的详细调查；法国则把不降低掘进速度的勘察方法作为重点研究课题。

我国超前预报的研究始于 20 世纪 50 年代末，但真正应用到隧道工程建设当中是在 20 世纪 70 年代初，国内的各高校和科研院所在超前预报技术研究应用中做了很多有益的工作，提出一些新方法，改进了一些技术设备，自 80 年代在大瑶山隧道、南岭隧道、军都山隧道和其他一些隧道的施工中超前地质预报技术开始了初步的应用。如在大瑶山隧道首先成功地采用了浅层地震反射波超前探测、超前 15 m的声波探测和显微构造分析等，并首先引进水平超前钻探，同时结合超前导坑以及洞内素描和赤平投影等方法进行隧道地质预测预报；在军都山隧道施工过程中，由中国科学院地质研究所和铁道部隧道工程局组成的“军都山隧道快速施工超前预报课题组”采用以地质素描为基础配合钻速测试和声波测试，进行掌子面前方短距离的地质预报，编写了《军都山隧道快速施工超前地质预报指南》，为后来的隧道施工超前预报提供了很好的借鉴[3]。

隧道超前预报的根本目的和预报内容分为两个主要部分[4]，一是主要地质条件的预报，二是施工地质灾害预报。通过各种的超前地质预报技术方法（地质分析预测法和地球物理探测法等）进行主要地质条件预报。主要地质条件的预报包括地层岩性、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、煤系地层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等。施工地质灾害预报需要建立在主要地质条件预报的基础之上，因为施工地质灾害一般都是由多种地质条件共同作用而产生的，而且施工工艺也是一个重要相关因素，故施工地质灾害的预测预报往往是采用综合分析方法，必须各种因素综合

考虑，才有可能获得满意的结果。

从目前国内外的研究现状来着，各种超前预报技术方法已经做过很多的研究工作，但是各种超前预报的技术方法各有优缺点[6,7]，如目前常用的预报方法有：地质雷达（GPR），TSP地震法等。

地质雷达是短期超前地质预报方法。它分辨高、无损伤、探测和数据处理快、机动灵活，但其预报距离较短，只能预报掌子面前方 10 m～30 m 以内。而且很难克服施工隧道内的干扰因素，影响探测成果的准确性，而较准确预报距离往往只有十几米。

TSP 是长期超前地质预报方法之一。它利用地震波在不均匀地质构造中产生的反射波特性来准确预报隧道施工前方 100～150 m 范围内的地质条件和岩石特性变化；同时，还可以提供杨氏模量、泊松比等岩石力学参数，也可粗略地预测围岩级别，从而更清晰地反映前方的地质状况，为信息化施工顺利进行奠定基础。但它探测费用高；对隧道施工有细微干扰；明显受探测人员专业技术水平限制。在探测成果图中，断层、节理、软弱岩层界面，都以相近的异常带形式出现，差别甚小，在经验不足或解释水平不高的情况下很难区分，对操作人员技术水平依赖比较大。

尤其针对隧道中经常遇到的岩溶水问题，目前尚没有较为成熟的预报预测技术方法，使用 TSP 弹性波类方法探水难度较大，而地质雷达对水体探测也不敏感，预报成功率低。据此，很多国内一流专家均提出这是应该继续研究的重要内容，新的思路和新的方法应该作为研究的主要对象。

瞬变电磁法是近年来才开始使用的一种新的隧道地质超前预报方法，它具有对低阻充水破碎带反映灵敏的特点，而且接收探头接收到的由激发涡流感应初的二次场，不论目标体产状如何，均能收到有用信号，对目标体进行成像，野外工作效率高；隧道电法超前探测的BEAM法（Bore—Tunnelling Electrical Ahead Monitoring）是另一种引入隧道超前预报的激发极化类方法，通过得到一个与岩体中孔隙（空隙）有关的电能储存能力的参数PFE（Percentage frequency effect）的变化，预报前方的岩体的完整性和含水性。这是两种针对岩溶水问题的新的超前预报办法，结合地质雷达、TSP和地质分析等方法可以完成隧道施工期的主要地质条件预报，在此基础上以这些超前预报方法技术为基础的综合分析方法研究尚处于起步阶段，目前还没有较为成熟的多种技术成果综合分析判别的工作方法体系[8~12]。

### 1.3.1 隧道综合物探的技术方法研究现状

综合物探的技术方法主要有：弹性波反射系列方法，如地震反射负视速度法（隧道 VSP）、陆地声纳法（极小偏移距超宽频带弹性波反射单道连续剖面）、水平声波法、TSP、日本 HSP、美国提出的 TRT，TST，面波法等；地质雷达技术；红外线探水；BEAM 法。

实际上，目前较成功的方法重要有2种[13,14]。第一种是基于弹性波反射法的有隧道VSP法、TSP法、HSP法和陆地声纳法；第二种是基于电磁波反射法的地质雷达法。

### 1.3.2 隧道综合物探的综合分析研究现状

在国内，隧道超前预报综合分析技术还处于起步和探索阶段，如在圆梁山隧道、长岭隧道等一些重大特长隧道中做过一些综合超前地质预报工作，但仅仅局限于某一条隧道，并未形成系统化的工作方法。同济大学的曲海锋提出了隧道信息化施工中综合超前地质预报技术，但整个框架较简单，预报技术方法只采用了地面地质调查法、地质雷达（GPR）和TSP地震法，没有将施工地质综合分析技术和一些新的物探超前预报技术纳入预报方法体系[15]。宜万铁路建设中也提出了综合的地质预报方法，但是主要针对的是超前预报之前的整个超前预报工作系统规划，在综合分析方面仍然没有一种较为系统的方法。

## 1.4 研究内容及技术路线

### 1.4.1 主要研究内容

根据国家现行的相关规范与行业技术标准包括：《岩土工程勘察规范》（GB50021-2001）、《水利水电工程地质观测规范》（SL245-1999）和《地质矿产勘察测量》（GZ/T0091-94）等。

勘察采用的技术手段及方法包括：工程测量、工程地质测绘、高密度电法勘探、地震层析成象（CT）、TSP 地质超前预报等。

主要内容分为两部分：

(1) 使用高密度电阻率法、地震 CT、TSP 超前预报三种地球物理方法对厂

口隧洞普渡河断裂带区域上覆岩体和隧洞开挖前方的工程地质结构进行综合勘察；

(2) 通过对数据的处理和分析解释，查明普渡河断裂带的空间延伸及与隧洞坍方冒顶和衬砌破坏的关系，获得隧洞拱顶上方岩体开裂、坍落变形的位置、宽度及延伸等几何形态图像，同时提供隧洞下部的地质情况。

最后得出的探测结果分辨率高、可靠性好，为山体地质病害治理、隧洞衬砌修复提供科学依据。

### 1.4.2　技术路线

在全面收集掌鸠河引水工程厂口隧洞隧址地质勘察和设计资料的基础上，通过进一步的地面地质调查和隧道内掌子面的跟踪，从宏观和细观的角度掌握掌鸠河引水工程厂口隧洞隧址区工程地质条件基本规律，为综合物探的分析打下坚实的基础，并且通过广泛调研各种超前预报技术，收集大量资料，确认适应于掌鸠河引水工程厂口隧洞的综合物探方法。

以综合物探方法中这些方法（包括：高密度电阻率法勘探、地震 CT 勘探和 TSP 超前地质预报）在掌鸠河引水工程厂口隧洞进行超前预报基本工作原理、工作方式和工作成果作为研究的基础和支撑，实时、动态的利用这些多源信息，通过对这些进行有效的分析和提取，解决掌鸠河引水工程厂口隧洞的超前地质预报综合分析的问题，为工程安全施工提供技术支撑。同时，初步建立科学、合理的掌鸠河引水工程厂口隧洞施工地质预报综合分析方法。

具体说明如下：

(1) 根据地质资料和地质调查，全面掌握掌鸠河引水工程厂口隧洞隧址区的主要工程地质特性，地质规律，对可能发生的地质灾害洞段进行评价，全面开展掌鸠河引水工程厂口隧洞超前地质预报，对预报成果进行整理分析整理。

(2) 重点对高密度电阻率法勘探、地震 CT 勘探和 TSP 超前地质预报进行探测应用研究，深入了解它们在隧道中的适用性、准确性等，同时对高密度电阻率法勘探、地震 CT 勘探和 TSP 超前地质预报在掌鸠河引水工程厂口隧洞的应用提出总结意见。

(3) 以地质分析为核心指导总体预报思路，综合运用各种手段对掌子面前方基本地质情况进行预报，在此基础上完成对隧道地质灾害的预报。综合各种超前预报方法的准确性、适用性，提炼各成果的预报综合分析的解译关键因素，

提出主要预报的基本地质情况，根据各因素对应于这些主要基本地质情况的预报准确性建立综合预报的工作流程方法。

# 第二章　隧道超前地质预报常用物探方法

综合物探方法主要包括 TSP 隧道地震波探测超前地质预报方法、地质雷达探测超前地质预报方法、红外探水超前地质预报方法、HSP 水平声波剖面法预报、声波 CT 技术预报、高密度电阻率法预报等方法。

## 2.1　TSP 超前地质预报方法

TSP（Tunnel seismic Prediction ）隧道地震波探测超前地质预报系统，是由瑞士安伯格测量技术公司（Amberg Measuring TechniqueCo.）开发研制并生产的，是目前国内外在该领域最先进的隧道隧洞及地下工程的探测设备。该系统从数据采集、处理和成果评估高度智能化，相对于其他地质超前预报手段具有适用范围广、预报距离长、对施工干扰小、提交资料及时、预报费用隧道延长米较低等优点。它主要用于开挖隧道工作面（掌子面）前方不良地质体、断裂破碎带、含水带等，进行探测和超前地质预报。适用于公路、铁路、煤炭及水电系统的施工的各种类型的隧道隧洞和巷道。它能够对隧道隧洞不良地质体，如：断层破碎带、水带、岩溶洞穴、岩溶淤泥带和各类软岩的性质、位置、规模和特征进行较准确地探测和判定；为隧道工程的快速掘进、支护材料的提前准备以及灾害事故的有效预防提供可靠的地质资料与信息[16~25]。

### 2.1.1　理论基础

微型爆破引发的地震信号分别沿不同的途径以直达波和反射波的形式到达传感器，与直达波相比，反射波需要的传播时间较长。TSP 系统由测得的从震源直接到达传感器的纵波传播时间换算成地震波传播速度：

$$V_P = X_1 / T_1 \tag{2-1}$$

式中：$X_1$——爆破孔到传感器的距离，m；

$T_1$——直达波的传播时间；

在已知地震波的传播速度下，就可以通过测得的反射波传播时间推导出反射界面与接受传感器的距离以及在隧道断面的距离，其理论公式为：

$$T_2=\left(X_2+X_3\right)/V_P=\left(2X_2+X_1\right)/V_P \tag{2-2}$$

式中：$T_2$——反射波传播时间；

$X_2$——爆破孔与反射界面的距离；

$X_3$——传感器与反射界面的距离；

地震反射波的振幅与反射界面的发射系数有关。在简单情况下，当平面简谐波垂直入射到平面反射面上时，其上的反射波振幅和透射波振幅分别为：

$$A_r/A_I=\left(\rho_2v_2-\rho_1v_1\right)/\left(\rho_2v_2+\rho_1v_1\right)=r \tag{2-3}$$

$$A_t/A_I=2\rho_1v_1/\left(\rho_2v_2+\rho_1v_1\right)=1-r \tag{2-4}$$

式中：$A_I$——入射波振幅；

$A_r$、$A_t$——反射波和透射波振幅；

$v_1$、$v_2$——反射界面两侧介质的速度；

$\rho_1$、$\rho_2$——反射界面两侧介质的密度；

$r$——界面的反射系数；

当入射波振幅$A_I$一定时，反射波振幅$A_r$与反射系数$r$成正比。而反射系数与反射界面两侧介质的波阻抗$\rho v$有关，且主要由界面两侧介质的波阻抗差决定。波阻抗差的绝对值越大，则反射波振幅$A_r$就越大。当介质Ⅱ的波阻抗大于介质Ⅰ的波阻抗，即地震波从较为疏松的介质传播到较为致密的介质时，反射系数$r>0$，此时，反射波振幅和入射波振幅的符号相同。发射波和入射波具有相同的极性。反之如果地震波从较为致密的介质传播到较为疏松的介质，即时，反射系数$r<0$，此时反射波振幅和入射波振幅符号相反，因此反射波和入射波的极性是相反的。从而清楚的判断地质体性质的变化。

TSP 测量系统中采用高灵敏度的具有良好三维动态响应特性的传感器和 24 位的 A/D 转换器保证该测量系统具有很宽的地震波的记录范围，从而可以预报很大范围内的地质条件。

### 2.1.2　TSP 超前地质预报系统的特点

#### 2.1.2.1　优点[26]

(1) 直至目前位置，它仍是最先进的隧道隧洞长期超前地质预报设备。

(2) 适用范围广。即适用于极软岩至极硬岩的任何地质情况；

(3) 预报距离长。理论上能预报掌子面前方 500～1500 m，考虑地震管道波

干扰和地震波曲率半径对预报精度的歪曲等因素，一般人员限定有效预报距离为掌子面前方 100 m，经验丰富者可达掌子面前方 150～200m；

(4) 对隧道施工干扰小。它只要求在接收信号时，短暂停止打钻和放炮等噪音极大的施工作业；

(5) 探测时间短。若准备工作到位，一次完整的探测仅仅需要 45 分钟；

(6) 节约投资费用，按隧道单位长度超前地质预报的投入费用比较是较低的；

(7) 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。

#### 2.1.2.2　缺点

(1) TSP 对于同侧炮眼布设壁的选择要求严格，如果布设错误，将极大地影响预报的质量和精度。

(2) 对测试现场的炮眼、接收点钻孔的位置、长度、角度、水封闭的质量要求严格。

(3) 从目前国内实际使用角度看，由于采用进口设备软件，费用较高。

## 2.2　地质雷达探测超前地质预报方法

地质雷达（Ground Penetrating Radar，简称 GPR）是一种用于探测地下介质分布的广谱电磁技术。地质雷达发射机发射电磁波信号到地下介质中，电磁波在地下介质传播过程中，当遇到存在电性差异的地下目标体，如空洞、分界面等时，电磁波便发生反射，返回到地面时由接收天线所接收。在对接收天线接收到的电磁波进行处理和分析的基础上，根据接收到的电磁波波形、强度、双程走时等参数便可推断地下目标体的空间位置、结构、电性及几何形态，从而达到对地下隐蔽目标物的探测。地质雷达发射高频电磁波在地下介质中的传播速度主要由介质中的相对介电常数确定。

它是近年来发展非常迅速的一项新技术，在隧道施工中的应用较多，因其具有扫描速度快、操作简便、重量轻、分辨率高、屏蔽效果好、图像直观等优点在隧道超前预报中也占有一席之地[27~30]。

### 2.2.1　探测原理

地质雷达是采用甚高频—超高频电磁波检测地下介质的地质特征，不同岩性分布和对不可见目标或地下界面进行扫描，以确定其内部结构形态或位置的电磁波技术。其探测原理是高频率电磁波在介质中传播时，其路径、电磁场强度和波形将随所通过介质的电性差异及几何形态而变化。从各个不同深度返回的反射波与直达波被接收天线所接收，经过接收机放大、滤波等处理并经采样器数字化后输入微机进行处理，取反射波往返路程时间之半再乘以相同介质的电磁波传播速度便得出目标距离，再通过综合分析判断目标性质。因此，应用地质雷达可以探测隧道开挖工作面前方的地质和水文地质情况。

### 2.2.2　地质雷达方程

预测目标性质的判定，即目标识别技术是地质雷达探测方法的主要内容，在判定方法上，主要是根据波的形状、电压幅值及其在横向和纵向上的衰减变化，结合地质原理进行判定。

影响波形、电压的主要因素是仪器性能、地下介质和目标界面特性，根据有关文献，对空雷达方程为：

$$P_{\mathrm{r}}=\frac{p_tG}{4\pi R^2}\times\frac{Q}{4\pi R^2}\times A_r \tag{2-5}$$

对于偶极天线，因 $A_r=\dfrac{G\lambda^2}{4\pi}=\dfrac{Gu^2}{4\pi f^2}$

且由收发天线的互异性，则

$$P_{\mathrm{r}}=\frac{P_tG^2Qu^2}{64\pi^3R^4f^2} \tag{2-6}$$

式中：$P_{\mathrm{r}}$——接收机接收到的功率（w）；

$P_t$——发射机发射功率（w）；

$R$——天线到目标体的距离（m）；

$A_r$——天线有效面积（$m^2$）；

$G$——天线增益（dB）；

$Q$——目标体的截面积（$m^2$）；

$\lambda$——雷达波长（m）；

$f$ ——雷达中心频率（Hz）；

$u$ ——雷达波速（mls）；

在（2-5）式中，第一项因子表示距离为 $R$ 处的功率密度，它与目标截面积 $Q$ 的乘积表示距离为 $R$ 处，截面积为 $Q$ 的目标所截获的反射能量；第一个因子与第二个因子的乘积表示从该目标以球面形式反射到接收天线的总功率；上述三个因子的乘积则为接收天线所截获的能量。

另外，从（2-6）式中还可以看出，在计算接收功率时，除了考虑到仪器性能外，没有考虑介面的反射特性和介质电压幅值的衰减，所以（2-6）式显示不能用来描述地质雷达确切的接收功率。

对于空气一般被看作是一种均一介质，而地层是一种高损耗的非均一导电介质。这种高损耗表现在电磁波能量随距离呈指数衰减，由于非均一性的介面存在，致使界面两侧不同物理特性的介质组合便构成了各种各样的界面。

令 $V$ 为界面功率反射系数，$\alpha$ 为电场衰减系数，由于电场随距离的往返衰减为 $e^{-2\alpha R}$，而功率又与电场呈平方关系，因此，由（2-6）式可导出地质雷达方程为：

$$L_1=\frac{(Z_2+Z_3)(Z_3-Z_1)+(Z_3-Z_2)(Z_2+Z_1)\exp(zjk_2h_2\cos\theta_2)}{(Z_2+Z_1)(Z_3+Z_2)+(Z_2-Z_1)(Z_3-Z_2)\exp(zjk_2h_2\cos\theta_2)} \tag{2-7}$$

综上所述，地下非均匀介质由于介电常数与电导率的明显差异而构成了电磁波反射界面，如含水层、围岩、空洞、陷落柱、断层面以及顶底板等都是良好的反射界面。

### 2.2.3　地质雷达探测的特点

#### 2.2.3.1　优点

(1) 准确可靠、分辨率高，根据不同的地质条件，地面系列的探测深度一般可达 30～60 m，理想的地质条件可更深些，分辨率可达数厘米，高于所有其它地球物理勘探手段；

(2) 工作或数据处理自动化程度高，数据采集和解释实现计算机化，成果直观清晰；

(3) 工作轻便、快速，可缩短工程周期，现场只需 2～3 人即可开展工作；

(4) 工作安全，它是一种非破坏性的探测技术，可以安全应用于城市和各项

正在建设中的现场工作；

(5) 仪器设备轻便。

#### 2.2.3.2　缺点

(1) 对于强磁性岩石（含铁质较高的岩石），地质雷达不适用；

(2) 不适合运用于区分两种电性相差不大的介质；

(3) 现场探测和成果解译的干扰因素太多，增加了成果解译的难度。

(4) 掌子面不平整时（钻爆后）对解释精度影响较大。

(5) 设备较昂贵，在普通隧道施工中应用较少；

## 2.3　红外探水超前地质预报方法

### 2.3.1　红外超前预报含水层的物性基础

地球上部岩体的温度主要受地球地热场的影响。在一定深度上，热场的平均变化为每公里深度增加 30 ℃，而在水平方向，地热场的平均变化远远小于该量。因此，隧道开挖深度的岩体，可视为位于一个均匀温度场中，即为一常温场，温度变化为零（正常场）。当开挖掌子面前方存在含水地层（岩溶洞穴、裂隙水等），且该含水层与岩体存在温差时，岩体中将产生热传导和对流作用，温度场不再为恒温场，而将产生温度异常场。在一定的距离和观测精度条件下，掌子面上存在着温度差异，利用红外辐射测温方法测定这种温度变化差异，可为含水层的超前预报提供依据。这就是红外辐射测温超前预报含水层的物性基础。因此，研究岩体中含水层温差引起的温度异常场的分布规律，对该方法的探测能力、资料解释都是极其重要的。

在隧道中，围岩每时每刻都在向外部发射红外波段的电磁波，并形成红外辐射场，场有密度、能量、方向等信息，岩层在向外部发射红外辐射的同时，必然会把它内部的地质信息传递出来。千燥无水的地层和含水地层发射强度不同的红外辐射，红外线探水仪通过接收岩体的红外辐射强度，根据围岩红外辐射场强的变化值来确定掌子面前方或洞壁四周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[31,32]。

### 2.3.2　无限长均匀含水圆柱体温度异常场模拟和分析

由理论分析，可假设具有一定温差的含水层在岩体中引起的温度场异常分布已趋稳定，为与时间无关的稳定场。若掌子面前方含水层有足够走向长度，并与隧道方向正交或斜交，可视含水层为一半径为 r0，走向无限长的圆柱体，位于热传导率为 k 的均匀围岩中（见图 2-1）。其温度（T）异常分布可归结为求解柱坐标系中的椭圆方程边值问题：

$$\begin{cases} \dfrac{\partial}{\partial r}\left(r\dfrac{\partial T}{\partial r}\right)=0 \\ -k\dfrac{\partial T}{\partial r}=h_l\left(T_{\infty l}-T\right)l_r=r_0 \\ T=T_{\infty 2}l_{r\to\infty} \end{cases} \tag{2-8}$$

其解为：$T=C_1\ln\dfrac{1}{r}+C_2$ (2-9)

其中：$C1=\dfrac{T_{\infty 2}-T_{\infty 1}}{\dfrac{k}{h_1 r_0}+\ln\dfrac{1}{r_0}}$ ；　　$C_2=T_{\infty 2}$

式中$T_{\infty 1}$和$T_{\infty 2}$分别为含水柱体温度和无含水柱体影响，即距离柱体无穷远处的围岩正常温度；$hl$ 为水的热对流系数。由式（2-9）可计算出该含水柱体在围岩内任意一距其轴线为 $r$ 的点所引起的温度。利用上式取 $h_l=2500$ （W/m$^2$K），k=3.56（W/m.K），在岩体处于原始状态（既无开挖）条件下，以 4×4 m$^2$的平面作为虚拟掌子面，我们模拟计算了该虚拟掌子面距含水层不同 $r$ 距离和呈不同交角时的，可观测到的温度异常场的特征和影响因素。

### 2.3.3　温度场的一般规律

(1) 由以上的稳定温度场的椭圆方程解析解式（2-9）可知，当含水层和围岩不存在温度差异，即$T_{\infty l}=T_{\infty 2}$时，$C_1=0$，岩体中温度$T=C_2=T_{\infty 2}=T_{\infty l}$，恒为常数。这时，掌子面若存在数个观测点，则各观测点无温度差，无法预测开挖掌子面前方的含水层。

(2) 当含水层和围岩存在温度差异时，岩体中温度$T$随观测点距含水柱体轴线距离 $r$ 的增大呈对数衰减（或增加，视温差的相对值而定），最终趋于岩体的

正常场温度。因此，对于岩体中与含水柱体走向正交或斜交的平面（虚拟掌子面），若存在数个观测点，由于各点距含水柱体轴线距离 $r$ 不同，各观测点间存在温度差，该差异可用于预测开挖掌子面前方的含水层。

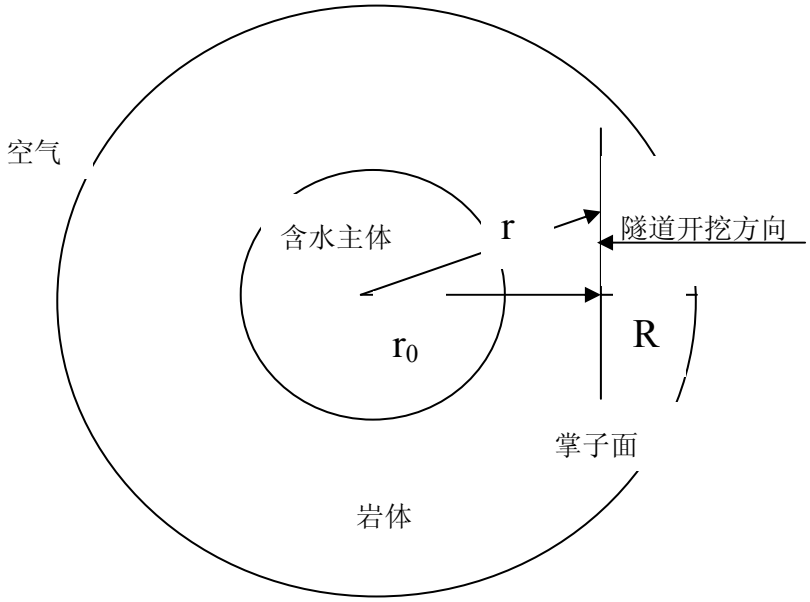



图 2-1　含水圆柱模型界面示意图

### 2.3.4　红外探水的特点

#### 2.3.4.1　优点

测量快速，基本不占用施工时间；资料分析快，测量完毕，即可得出初步结论，室内整理及编写报告也可在 2 小时内完成。

#### 2.3.4.2　缺点

只能测量出含水体的方位，测量不出含水体隐藏深度及水量大小、水压等参数。对湿度较大的隧道隧洞，特别是对基岩裂隙水发育的隧道隧洞，应用效果较差。

## 2.4　其它物探预报方法

其它的预报手段一般有 HSP 水平声波剖面法、声波 CT 技术等这几种方法。

这几种方法各有特点，这里仅仅简单介绍这几种方法的原理。

### 2.4.1　隧道 VSP 法

此方法由中国铁道部第一设计院1991年推出，是在隧道侧墙打孔放置检波器和炸药，炸药爆炸产生振动，传向掌子面前方，通过断层等反射面反射，由检波器接收，经过处理，给出资料判释，作地质预报。它们主要对断层、岩层面、岩脉等反映较好，可预报100 m远。此法在实施预报时不占用开挖工作面，对施工干扰相对较小，在铁路隧洞工程中是常用的预报方法之一[33]。

### 2.4.2　HSP 水平声波剖面预报方法

预报原理和地震波探测原理基本相同，其原理是建立在弹性波理论的基础上，传播过程遵循惠更斯—菲涅尔原理和费马原理。本方法探测的物理前提是岩溶洞穴及充填物与周边地质体间明显的声学特性差异。测试时，在隧道施工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。进一步采用时域、频域分析，通过探测反射波信号，便可了解前方岩体的变化情况[34]。

### 2.4.3　声波 CT 技术预报原理

该方法的基本原理同医学 CT 技术原理，其物理前提是具不同物性差异的介质，声波在其内部的传播速度不同。该方法通过密集对穿的测试方式，计算并模拟测试剖面内部的物性差异情况，结合现场地质分析，从而达到对测试剖面范围内的地质体进行直观的三维图像描述。

### 2.4.4　陆地声纳法

即路上极小偏移距超宽带弹性波超短余震接收系统单点连续剖面法，中国铁道部科学研究院铁建所1990年发明，它是在掌子面上用铁锤敲击岩面产生振动，弹性波遇到断层、破碎带、溶洞等反射，由在掌子面上人手扶紧贴岩面的检波器接收，沿设定的剖面线测若干个点后，经处理绘成图件，再经地质资料判释后作地质预报，它对断层、破碎带、岩脉、层面及洞穴、溶管等均有较好反映，可预报100 m左右[35]。

### 2.4.5　TST 超前预报技术

即Tunnel Seismic Tomography，是通过可视化地震反射成像技术预报隧洞掌子面前方150 m范围内的地质情况，可准确预报断裂带、破碎带、岩溶发育带以及岩体工程类别变化等地质对象的位置、规模和性质。该法数据采集用多道数字地震仪，处理软件为三维地震分析成像系统。它充分运用地震反射波的运动学和动力学特征，具有岩体波速扫描、地质构造方向扫描、速度偏移成像、吸收系数成像、走时反演成像等多种功能，从岩体的力学性质、岩体完整性等多方面对地质情况进行综合预报。

### 2.4.6　BEAM 法

BEAM 法，即 Bore-Tunneling Electrical Ahead Monitoring，由德国GEOHYDRAUL IC DATA公司推出的产品。它是一种聚焦电流频率域的激发极化方法，其最大特点是通过外围的环状电极发射一个屏障电流和在内部发射一个测量电流，以便电流聚焦进入要探测的岩体中，通过得到一个与岩体中孔隙有关的电能储存能力的参数PFE（Percentage Frequency Effect）的变化，预报前方岩体的完整性和含水性；它的另一个特点是所有的装置都安装在盾构挖掘机的刀头（测量电极）和外侧钢环（屏蔽电流）上，也可装在钻爆法施工钻头的前方（测量电极）及两侧钢架（屏蔽电流）上，随着隧洞掘进，连续不断获得成果，并适时处理得出掌子面前方的PFE曲线[36,37]。由此预报前方岩体的性状及含水情况，在我国尚未引进。

# 第三章　掌鸠河引水工程厂口隧洞综合物探报告成果分析

本章结合掌鸠河引水工程厂口隧洞的隧址的岩性、地质构造、地下水特性的情况，使用高密度电阻率法、地震 CT 和 TSP 超前预报两种地球物理方法对厂口隧洞普渡河断裂带区域上覆岩体和隧洞开挖前方的工程地质条件进行综合勘察，并通过对数据的处理和分析解释，查明普渡河断裂带的空间延伸及与隧洞坍塌冒顶和衬砌破坏的关系，获得隧洞拱顶上方岩体开裂、坍落变形的位置、宽度及延伸等几何形态图像，同时提供隧洞下部的地质情况。

## 3.1　工程地质条件

### 3.1.1　工程概况

昆明市掌鸠河引水工程厂口隧洞位于 D74+501.854～D85+655.200 段，全长 11 153.346 m，该隧洞 5 km+000 m～5 km+550 m 段穿过普渡河主干断裂。普渡河断裂是工程区内最大的断裂，属区域性活动断裂，该断裂地貌为常年流水冲沟，探测范围内隧洞埋深 50 m～80 m。

该隧洞设计底坡 i=0.03％，隧洞净宽 3.2 m，净高 3.2 m，为半圆拱直墙式衬砌断面。

隧洞开挖至 D79+803 附近时发生坍塌冒顶，并出现大量涌水。

### 3.1.2　气象水文

厂口隧洞位于云南省昆明市西山区厂口乡，隧洞所属地段地势较高，地处亚热季风气候区。年平均气温 17.8 ℃，年平均降水量 1076 mm，年平均蒸发量 1156.8 mm。5～10 月为雨季，降水量占全年降水量的 80％。11 月至来年 4 月为枯水季，降水量占全年降水量的 20％。

隧道区域属构造侵蚀中高山地貌，气候垂直变化显著，干湿两季分明，冬季寒冷干燥。该隧洞穿越陡峻的山岭，地下水丰富，隧洞位于地下水位线以下。地表为冲沟，沟内有常年流水。

### 3.1.3　地质构造

该隧洞距洞口 5000m 至 5550m 段穿过普渡河主干断裂。普渡河断裂是工程区内最大的断裂，属于区域性活动断裂，它是由数条小断裂组成的断裂带，呈南北向展布，断裂带宽度 2～3 km。断裂西盘地层为寒武系下统的白云岩和奥陶系下统的薄层泥岩、粉砂岩互层，断裂东盘岩性为奥陶系下统的薄层泥岩、粉砂岩互层。断层面产状为：走向 NO°～25°E，倾向 SE 或 NW，倾角 80°～85°。破碎带及影响带在输水线路地段总宽为 500～800 m（其中破碎带宽度约为 500 m），断层破碎带为强烈揉皱或破碎的岩层、碎裂岩、角砾岩、糜棱岩、挤压片状岩及断层泥，有大量泥化夹层。构造透镜体为薄层粉砂岩、泥岩，其内的主要结构面产状与断层的产状一致，破碎带极松散，局部呈土状。

## 3.2　综合物探的准备工作

昆明市掌鸠河引水工程厂口隧洞勘察采用的技术手段及方法包括：工程测量、工程地质测绘、高密度电法勘探、地震层析成象（CT）、TSP 地质超前预报等。

本次探测使用的物探方法有三种：

(1)、高密度电阻率法勘探：主要是探测地表以下 60 m 范围内的地质情况、含水情况，并对地震 CT 观测资料、TSP 超前预报相互补充，进行综合解释；

(2)、地震 CT 勘探：主要是探测地表至隧洞之间有无破碎带、软弱夹层，探明塌方体的空间形态；

(3、TSP 超前地质探测：观测系统布置在隧洞内，主要探测掌子面前方的破碎带、软弱夹层、富水带等不良地质。

各种方法观测系统布置及观测范围示意图如图 3-1 所示。

## 3.3　高密度电阻率法勘探

### 3.3.1　高密度电阻率法勘探基本原理

高密度电阻率勘探是一种阵列勘探方法，也称自动电阻率系统，是直流电

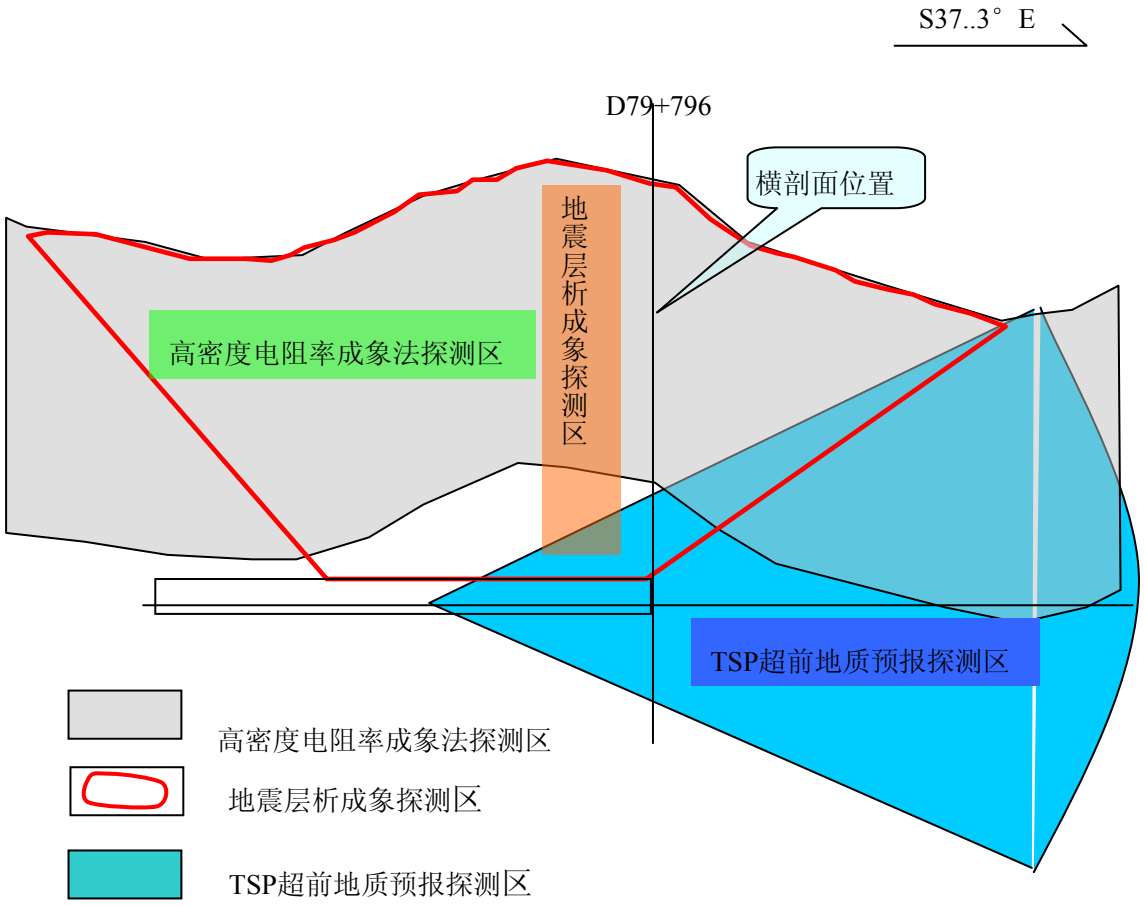



**图 3-1　综合物探观测系统布置示意图**

法的发展，其功能相当于三极测深与电剖面法的结合。通过电极向地下供电形成人工电场，其电场的分布与地下岩土介质的电阻率 $\rho$ 的分布密切相关，通过对地表人工电场的测量，了解地下介质视电阻率 $\rho_s$ 的分布，根据岩土介质视电阻率的分布推断解释地下地质结构。完整干燥的岩块视电阻率明显高于断层带或软弱带内充水或粘土的围岩。这种方法原理简单，应用历史较长，是一种成熟的物探方法。特别是数据采集技术的改进使勘探速度快，增大了剖面覆盖面积，在强干扰的环境下明显提高了信噪比，更准确地探测地质体。该方法在工程地质勘探和矿产资源勘查中有着广泛和成功的应用[38]。

### 3.3.2　观测系统的布置

本次高密度电阻率法探测地表布置两个剖面，其中一条探测剖面沿隧洞轴线布置，剖面长 500 m；另一条探测剖面沿垂直隧洞轴线方向布置，以 D79+803

为中心向两端各延伸 180 m，剖面长 360 m，如高密度电法勘探电极布置示意图（图 3-2）所示。

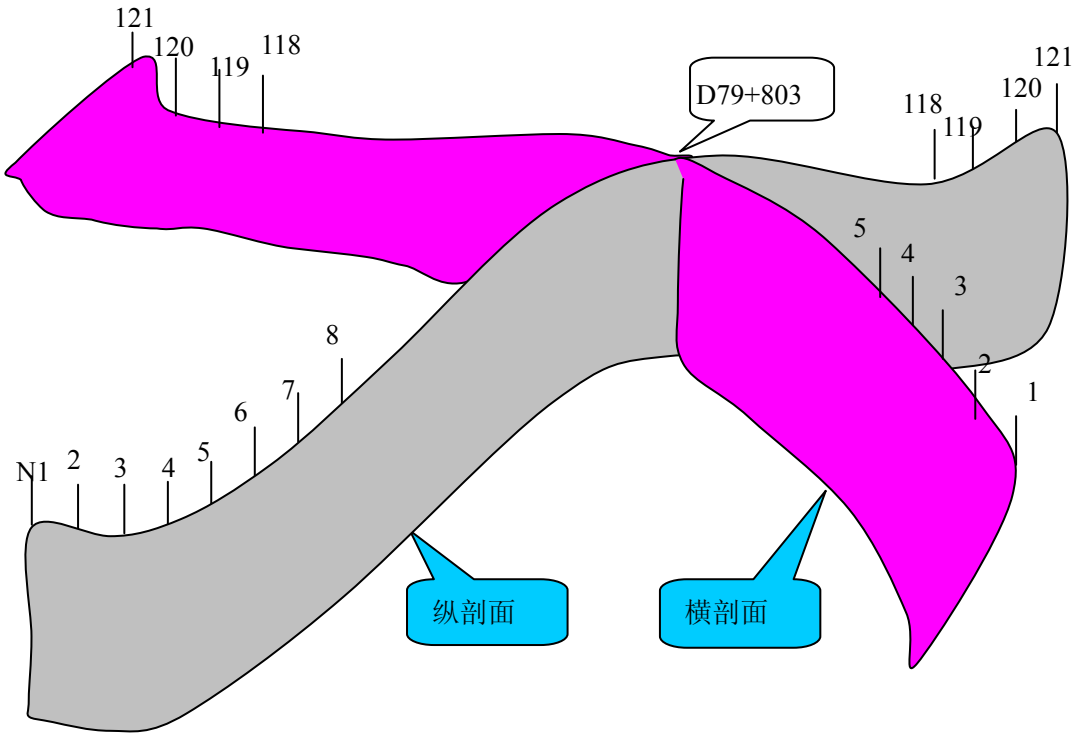



图 3-2　高密度电法勘探电极布置示意图

本次高密度电阻率法探测，每条探测剖面都用施龙贝格和温纳两种方法采集（图 3-3a），数据经格式转换、编辑，校正，最后反演成图。电极布置如图 3-3b



图 3-3a　高密度电法勘探数据采集



图 3-3b　高密度电法勘探电极布置

所示，电极距为 3 m，两个剖面分别布置了 160 和 120 个电极，采集 20 层，剖面探测深度为 60 m。

### 3.3.3　高密度电阻率成象法探测成果

本次高密度电法探测成果主要有：厂口隧洞 D80+020～D79+520 段高密度电法勘探等视电阻率图（图 3-4）、厂口隧洞 D79+803 横剖面高密度电法勘探等视电阻率图（图 3-5）。图中红色表示视电阻率 $\rho_s$ 大于 200 Ω·m，蓝色表示视电阻 $\rho_s$ 小于 60 Ω·m。

从厂口隧洞 D80+020～D79+520 段高密度电法勘探等视电阻率图可以看出：以 D79+803 为中心从地表到隧洞有一个低阻区，这个低电阻区上窄下宽，上部宽约 80 m，下部宽约 200 m；本次塌方松动范围主要在这个区域内。在 D79+803 上方有一个宽 20 m 局部相对高阻区，这是掌子面塌方和涌水疏干的影响区。从水文地质和不同力学性质断层控水理论角度看（这是更主要的），前者属于作为压冲逆断层的普渡河断层（1）的主断面的上盘的裂隙发育区，是压性逆断层破碎带的主要赋水构造；后者位于断层下盘，由于压冲逆断层的主断面起到“隔水层”的作用，下盘形成无水或少水区所致。

D79+900～520 段围岩视电阻率 $\rho_s$ 以小于 100 Ω·m 为主，围岩破碎，节理密集发育并富水，与原设计的普渡河断层带位置基本吻合。其中：

**D79+940～880** 为普渡河断层带（1）的主断面的下盘的裂隙发育区，是压性逆断层破碎带的次要赋水构造；

D79+880～803，位于断层下盘，由于压冲逆断层的主断面起到“隔水层”的作用，下盘形成普渡河断层带（1）的无水或少水区；

**D79+803～740** 为上盘赋水区，为普渡河断层（1）的主要断层水发育区；

D79+740～700，为普渡河断层带（1）与普渡河断层带（2）之间的轻微断层影响带，属于污水或少水区；

**D79+700～660** 为普渡河断层带（2）下盘次要赋水构造区；

D79+660～600，位于断层下盘，由于压冲逆断层的主断面起到“隔水层”的作用，下盘形成普渡河断层带（2）的无水或少水区；

**D79+600～520** 为普渡河断层（2）的上盘赋水区，为另一个主要断层水发育区。

所以，塌方冒顶区（D79+803）前方 200 m 之内的、上述赋水区和断层水发

育区段，即：D79+700～660 和 D79+600～520 区段，具有塌方冒顶的可能，施工中应倍加注意。

从厂口隧洞 D79+803 横剖面高密度电法勘探等视电阻率图可以看出整个横剖面视电阻率较低，说明该剖面基本上由饱水破碎岩体组成，处于断裂破碎带之内。

根据厂口隧洞 D80+995～D79+520 段高密度电法勘探等视电阻率图和 D79+803 横剖面高密度电法勘探等视电阻率图结合地质资料分析：

1、横剖面基本上处于普渡河断层破碎带内，断裂带由饱水破碎岩体组成，节理、裂隙十分发育；

2、沿隧洞轴线方向剖面内视电阻率变化较大，垂直洞轴线方向大角度相交；

3、施工开挖面前方 200 m 范围内围岩电阻率都比较低，以小于 100 Ω·m 为主，这说明该段围岩破碎、节理密集发育、富水，位于断裂破碎带内，施工时应及时支护并加大支护强度，预防坍塌。

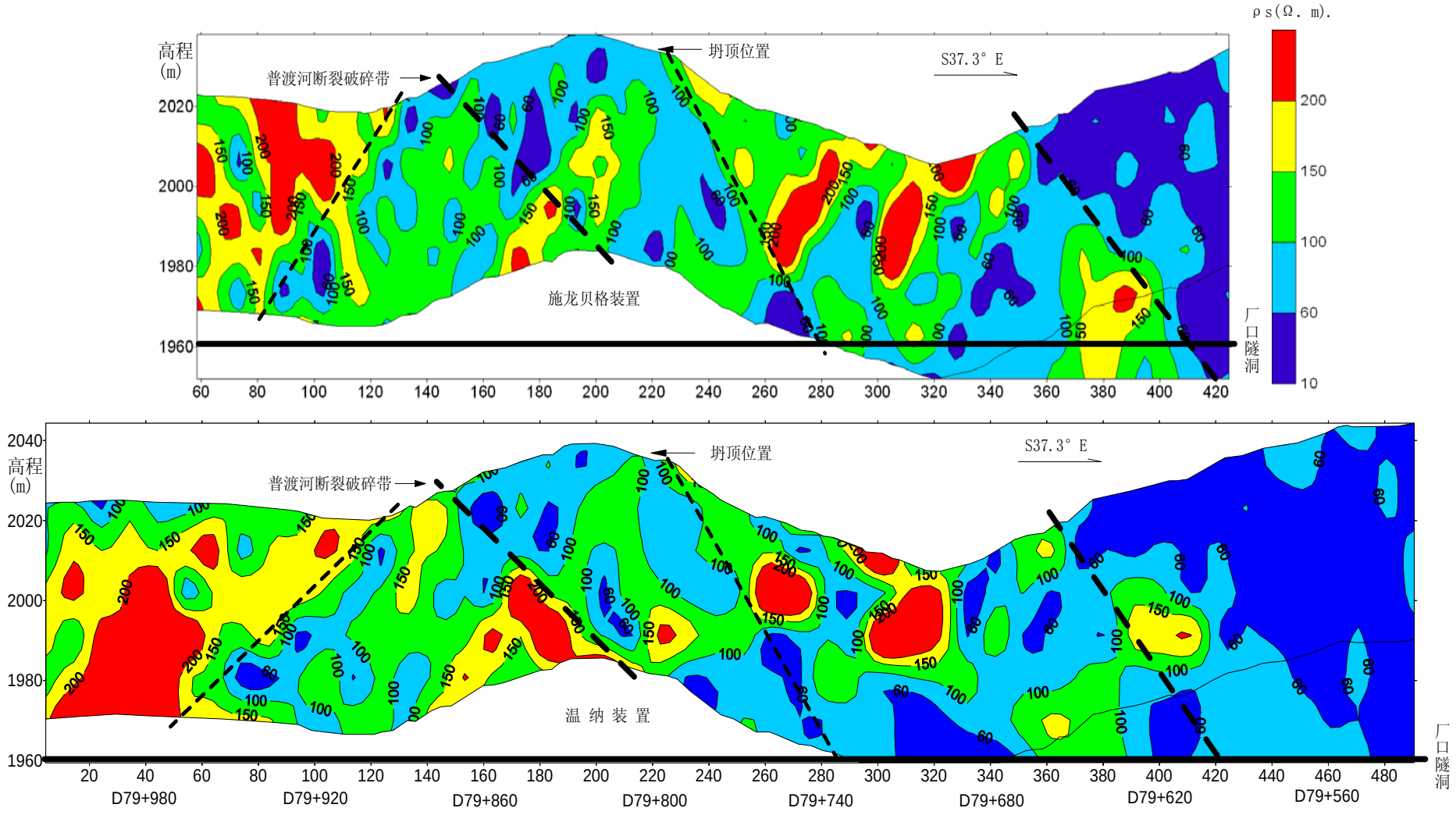



图 3-4　厂口隧洞 D80+020～D79+520 段高密度电法勘探等视电阻率分布图

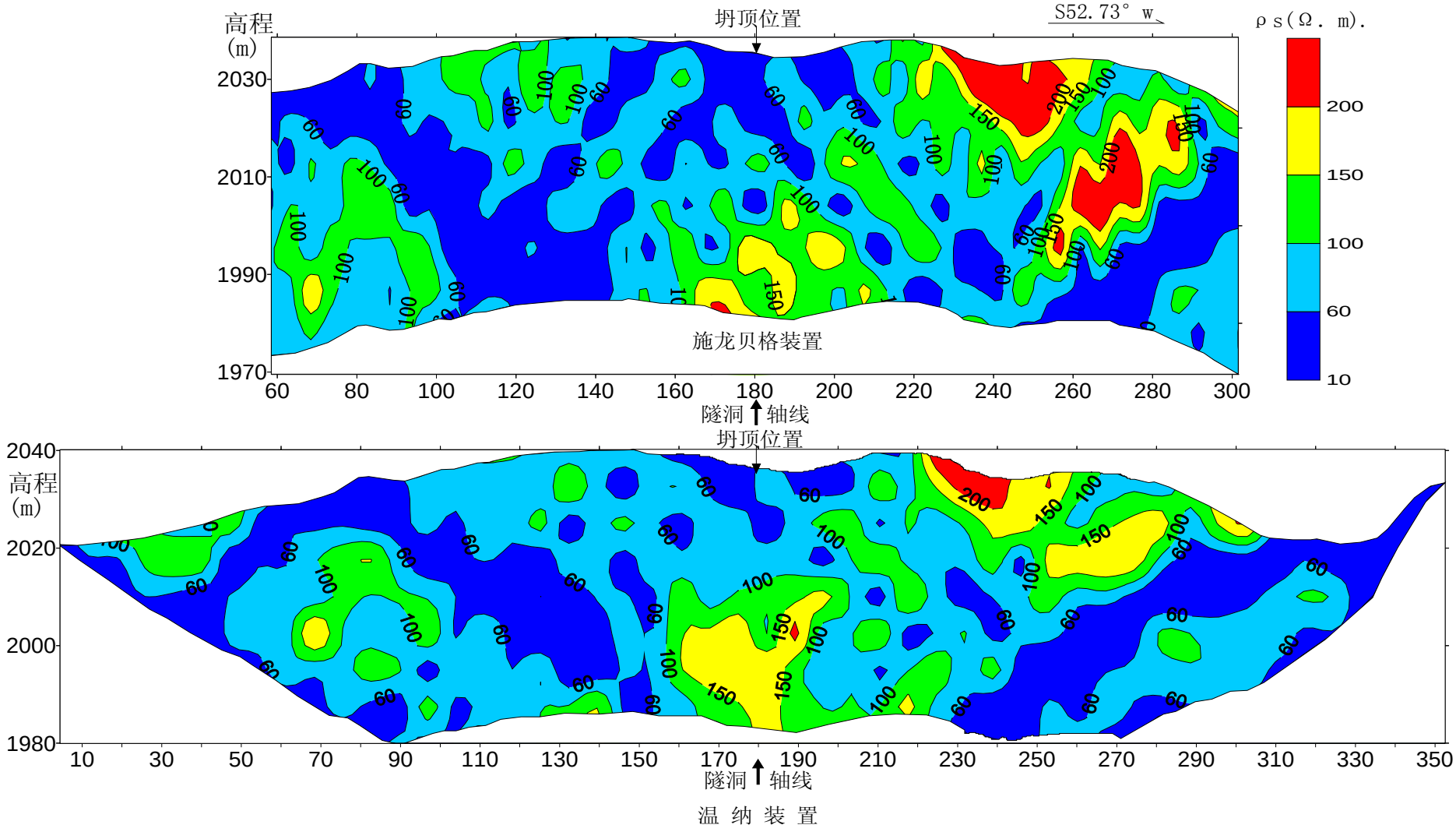



图 3-5　厂口隧洞 D79+803 横剖面高密度电法勘探等视电阻率分布图

## 3.4　地震 CT 勘探

### 3.4.1　地震 CT 勘探的基本原理

地震CT是工程物探的一种新的勘探方法，也称层析成像，是CT技术在地球物理领域应用的一个范例[39,40]。它可以通过从地质体（结构）的外部测量数据，准确、可靠地反演出地质体内部结构的直观图像，具有分辨率高、可靠性好、图像直观等特点，是一种有效的勘探方法。

地震 CT 的工作原理与医学 CT 类似。医学 CT 是利用 X 射线穿透人体，通过射线强度衰减的观测对人体组织成像。地震 CT 是利用地震波射线对地质体（结构）进行透视（图 3-6），通过地震波走时和能量衰减的观测对地质体（结构）成像。

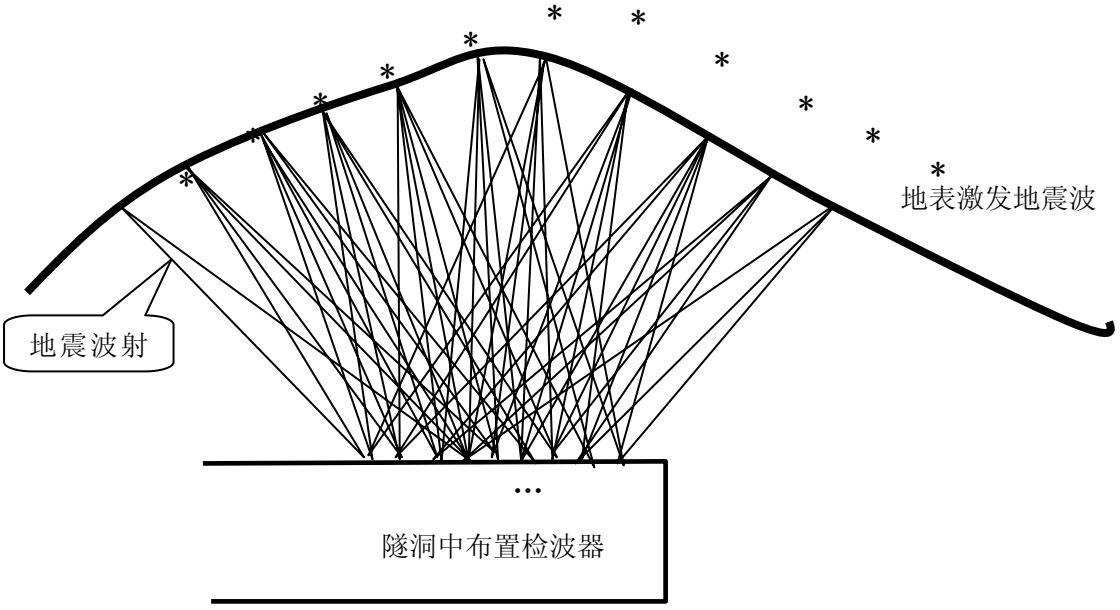



**图 3-6　地震 CT 观测系统布置示意图**

地震波穿透岩土介质时，其速度快慢与岩土介质的弹性模量、剪切模量、密度有关，密度大、强度高的岩石模量大、波速高、走时短，反之亦然。完整坚硬的岩体波速高，吸收弱，破碎岩体和松散的土体波速低，吸收强。孔隙度小的密实岩体地震波的能量衰减小，破碎的岩体和松散的土体能量衰减大。因而地震 CT 图像能可靠地反映各类岩土体的分布界线及破碎岩体的破碎程度和

分布。地震 CT 特别适用于研究各类地层、构造、岩体、土体的分布界线及其力学性状，在工程地质勘查中常被用

来探查断裂带、密集节理带、含水带、溶洞、风化带等不良地质体（结构）的位置、形态及力学强度等。

随着地震 CT 方法研究的深入和日益广泛的应用，地震 CT 目前已经发展成为一个方法系列，成像物理量包括波速、能量衰减、泊松比等多种类型，成像方式可以利用直达波、反射波、折射波、面波等多种形式组合，可利用钻孔、隧道、隧洞、边坡、山体、地面等多种观测条件，进行二维、三维地质成像。在中国西部多山地区的铁路、公路、水电建设中，地震 CT 已广泛地用于线路、场址、隧道、边坡等项目的工程地质勘查和病害诊断，解决众多复杂地质条件问题。

### 3.4.2　观测系统的布置及完备性评价

根据本次勘探目的需要，在隧洞 D79+705～965 段布置了一条地震 CT 勘探剖面。该探测剖面在隧洞的右侧距轴线 1.6 m 处，并且与隧洞的轴面平行，见图 3-7。

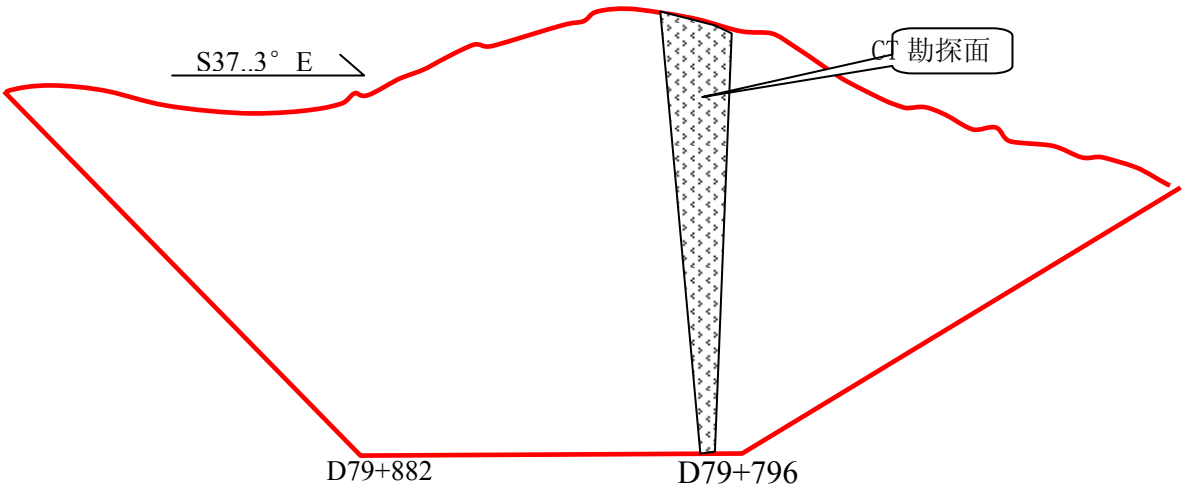



**图 3-7　厂口隧道地震 CT 观测系统统示意图**

为保证观测系统的完备性和可靠性，使观测区域内各单元的射线密度和射线正交性达到观测精度的要求，设计并布置了两组观测系统。第一组观测是山上放炮激发隧洞内接收，沿隧洞右边墙在 D79+796～+882 段拱腰布置了 96 个接

收点（图 3-8b），沿隧洞轴线在山上 D79+705～+965 段地面布置炮点，激发点和接收点布置在与隧洞轴面平行的垂直面内。第二组观测是将接收点和激发点都布置在山上，检波器布置在 D79+871～+965 段地面，炮点布置在 D79+705～+745 段地面，整个观测系统布置在同一垂直面内(图-8)。接收检波器的频率为 100 Hz，使用 GEOPEN 公司生产的 SE2432 型综合工程勘探仪记录（3-8a）。炮点排列长



图 3-8a　地震 CT 数据采集



图 3-8b　地震 CT 洞内检波器布置

250 m，炮间距 2～4 m，共 110 炮。采用爆炸震源，激发点炸药埋深 1.0 m，药量 0.2～0.6 kg。

观测系统的完备性和可靠性是地震CT结果可靠性的基本保障。观测系统的完备性是通过单元的射线密度和射线正交性来衡量的。因而射线密度和射线正交性就成了表征观测系统完备性的两个重要指标，它们是观测系统可靠性评价的有效方法。为保证地震CT结果的可靠性和分辨率，要求研究区内每个单元体内的射线超过 40 条，同时要求每个单元体内通过的射线其交角至少有一组大于 $60^{o}$，其交角的正弦值大于 0.86。工作中按照这样的技术要求对观测系统进行了认真地设计和布置。从地震CT射线密度图（图 3-9）和地震CT射线正交性图（图 3-10）可以看到，剖面内主要研究区的射线密度均大于 100 条，正交性大于 0.86（即射线最大交角大于 $60^{o}$）的面积在 90%以上，这证明了本次地震CT的观测系统的设计是正确的、合理的，所得到的结果是可靠的，分辨率可以达到理论数值，即单元尺度的 1/2。本次地震CT勘探的分辨率达到了 1 m左右。

### 3.4.3　地震 CT 探测成果

掌鸠河引水工程厂口隧洞 D79+707～965 地震 CT 速度分布图（图 3-11）清楚地揭示了隧洞纵剖面的工程地质结构以及岩体的力学强度分布。结合该段隧洞的工程地质情况综合分析可以得出：

1、该段隧洞围岩的波速较低，变化范围较大。地表松散层的波速小于 1.0 km/s，断裂破碎带岩体的波速很低，仅为 1.0～1.6 km/s，浅层强风化岩体的波速为 1.6～2.0 km/s，波速大于 2.0 km/s 的岩体为中风化岩，较完整的整微风化岩体的波速大于 3.0 km/s。探测区内岩体的波速以小于 2.0 km/s 为主，说明整个探测剖面处在普渡河断裂带范围内。

2、剖面图上左右两侧波速相对较高，中部 D79+885～+780 段为明显的低速区，结合地质情况推断为破碎带，该破碎带在纵剖面上呈不规则三角形状，上窄下宽。破碎带地表出露位置在 DK79+803 附近，在埋深 50 m（标高为 1 990 m）处宽约 60 m，再往下分为两支，宽度变窄，分别终止于 D79+885 和 D79+803。破碎带界线明显，破碎带内平均波速为 1.6 km/s～2.0 km/s，具有明显的垂向分带现象，由上至下波速逐渐增大。隧洞 D78+803 附近的塌方涌水就与这一破碎带的存在有关，坍方松动范围如图 3-12 所示，该范围内围岩松散破碎、饱水液化，施工开挖时形成了坍方、突泥沙和涌水。

3、在隧洞的 D79+885～D79+803 段，拱顶以上 2～5 m 范围内的围岩完整性较差，如图 3-11、图 3-12 所示，其波速小于 2.0 km/s。在隧洞拱顶以上 5～20 m 范围内有一呈三角形状、围岩完整性相对较好的区域，区域底部宽约 80 m，波速为 2.0 km/s～2.5 km/s。正是该区域承受了来自断裂破碎带释放的应力，形成应力集中区，使 D79+885～D79+803 段隧洞拱顶的压应力过大，导致初衬变形。该段隧洞应加大衬砌厚度和增大衬砌混凝土强度。

4、波速低于 1.0 km/s 的地表松散层厚度不均，两侧山坡小于 5 m。松散层之下的强风化层波速为 1.6～2.0 km/s，厚度不一。D79+885 向大里程方向较薄，为 5～30 m；向小里程方向较厚，一般可达 40～60 m，局部段落延伸至隧洞基础以下。

5、地表 D79+810～+790 段明显可见坍方冒顶范围，该段地表以下 20 m 范围内有 12～15 m 宽的漏斗状低速区，为坍方后形成的不密实区，这与地表所见坍方位置吻合。从图 3-11 可以看到，坍方冒顶没有在隧洞拱顶以上 50 m 范围内

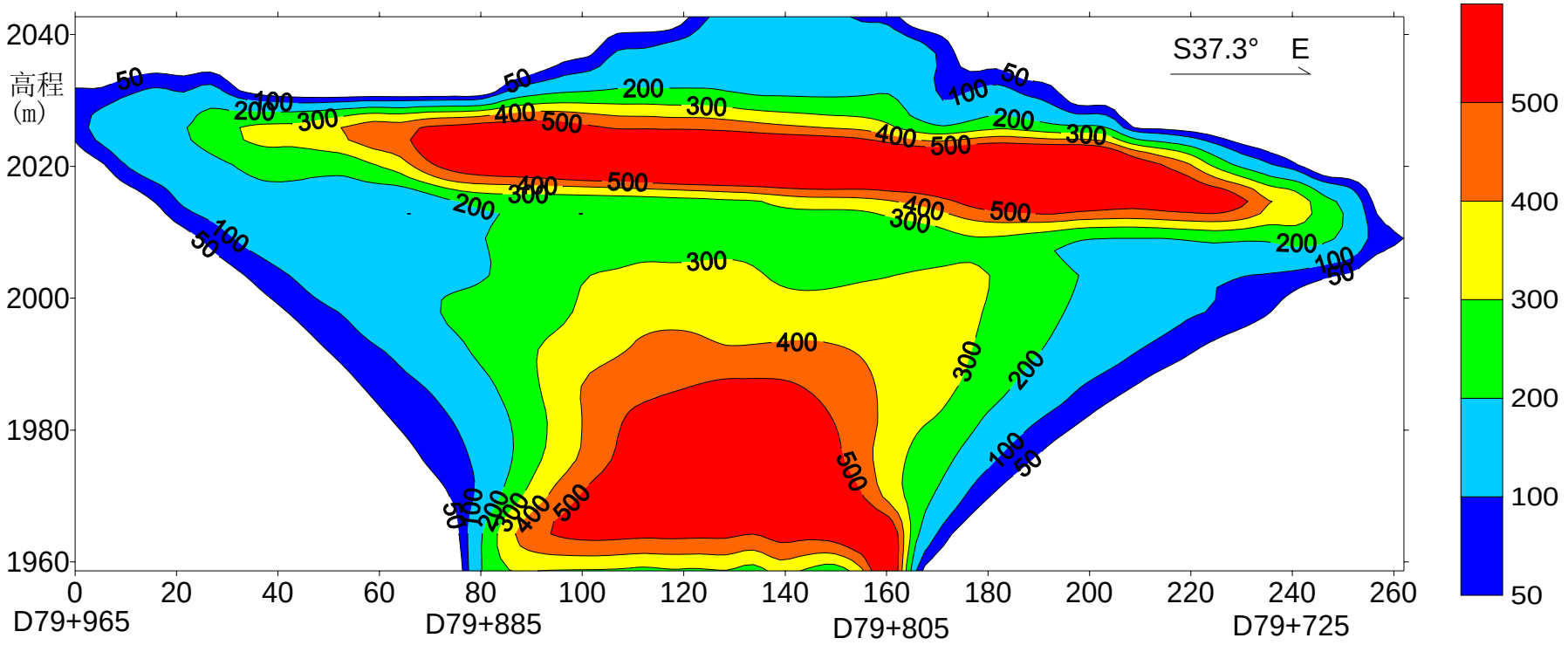



图 3-9　掌鸠河引水水工程厂口隧洞 D79+705～+965 段地震 CT 射线密度图

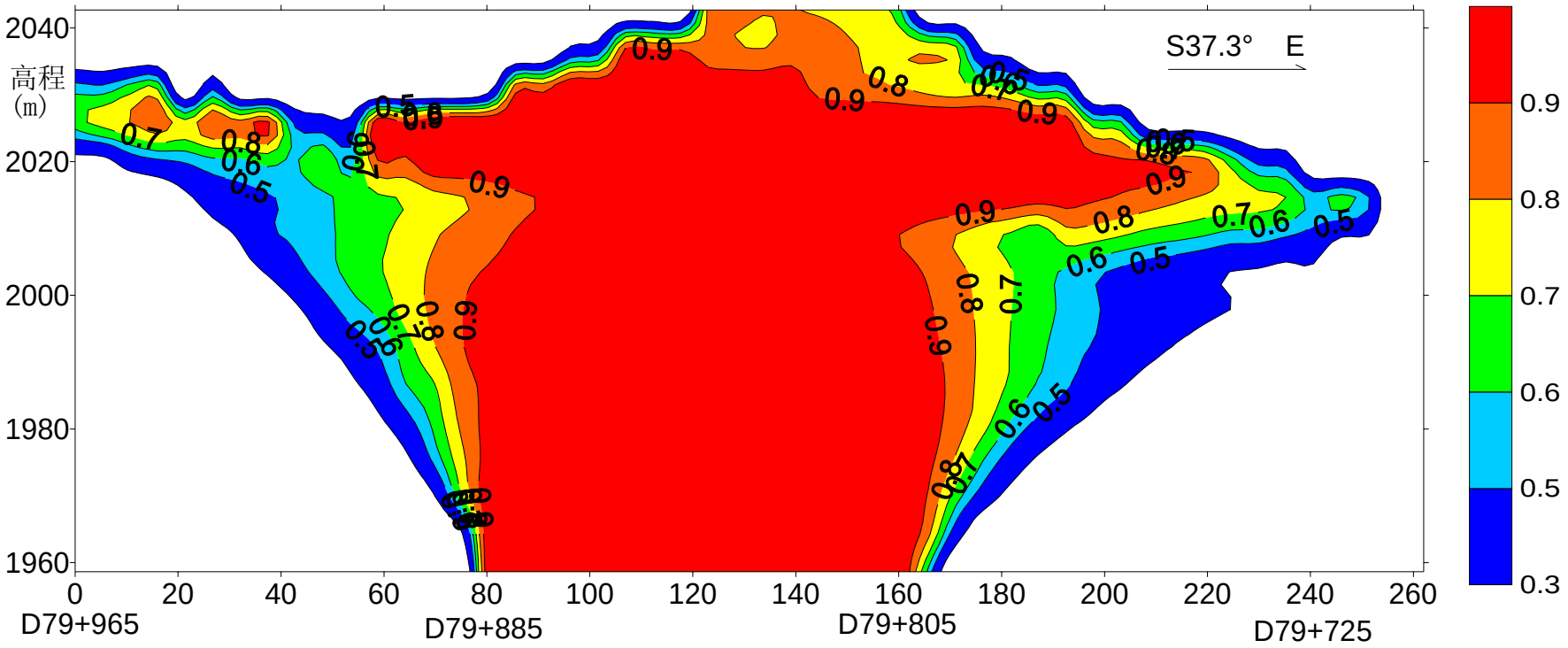



图 3-10　掌鸠河引水水工程厂口隧洞 D79+705～+965 段地震 CT 射线正交性图

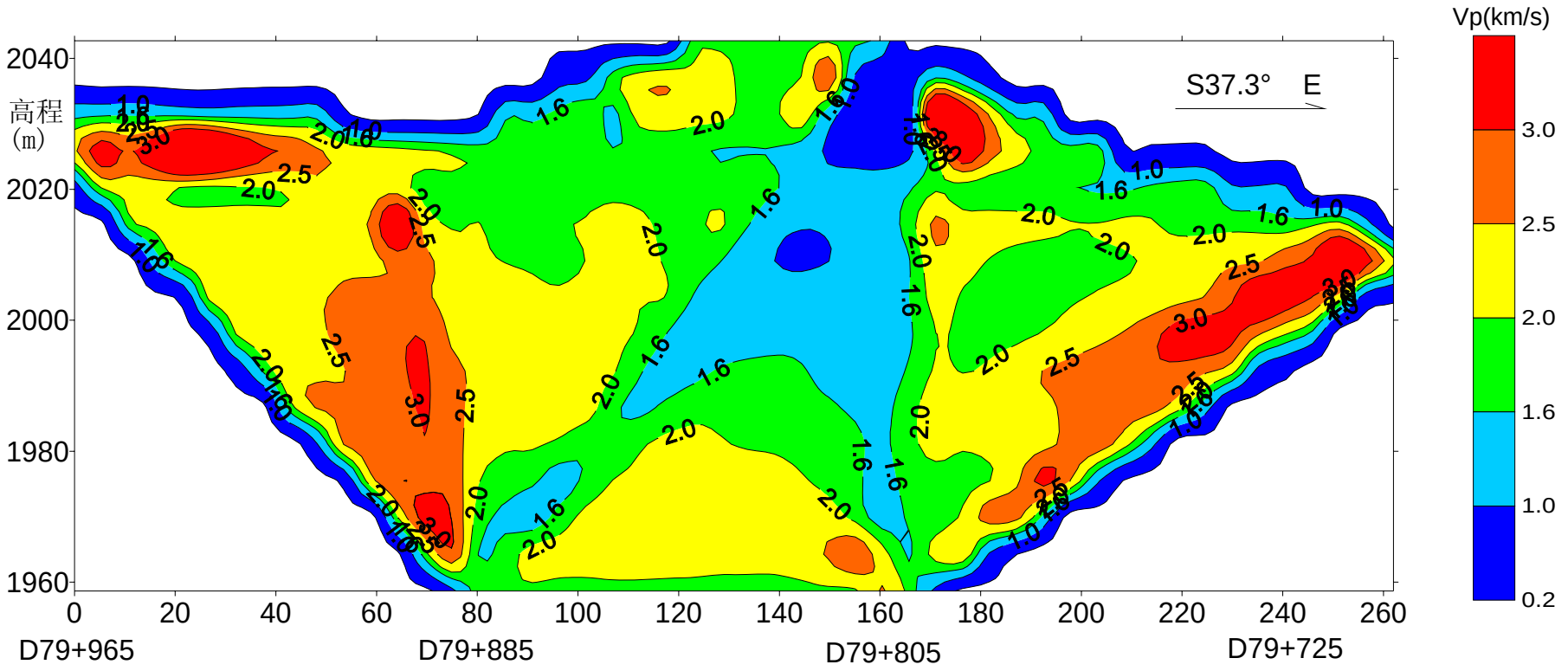



图 3-11　掌鸠河引水工程厂口隧洞 D79+705~+965 段地震 CT 速度分布图

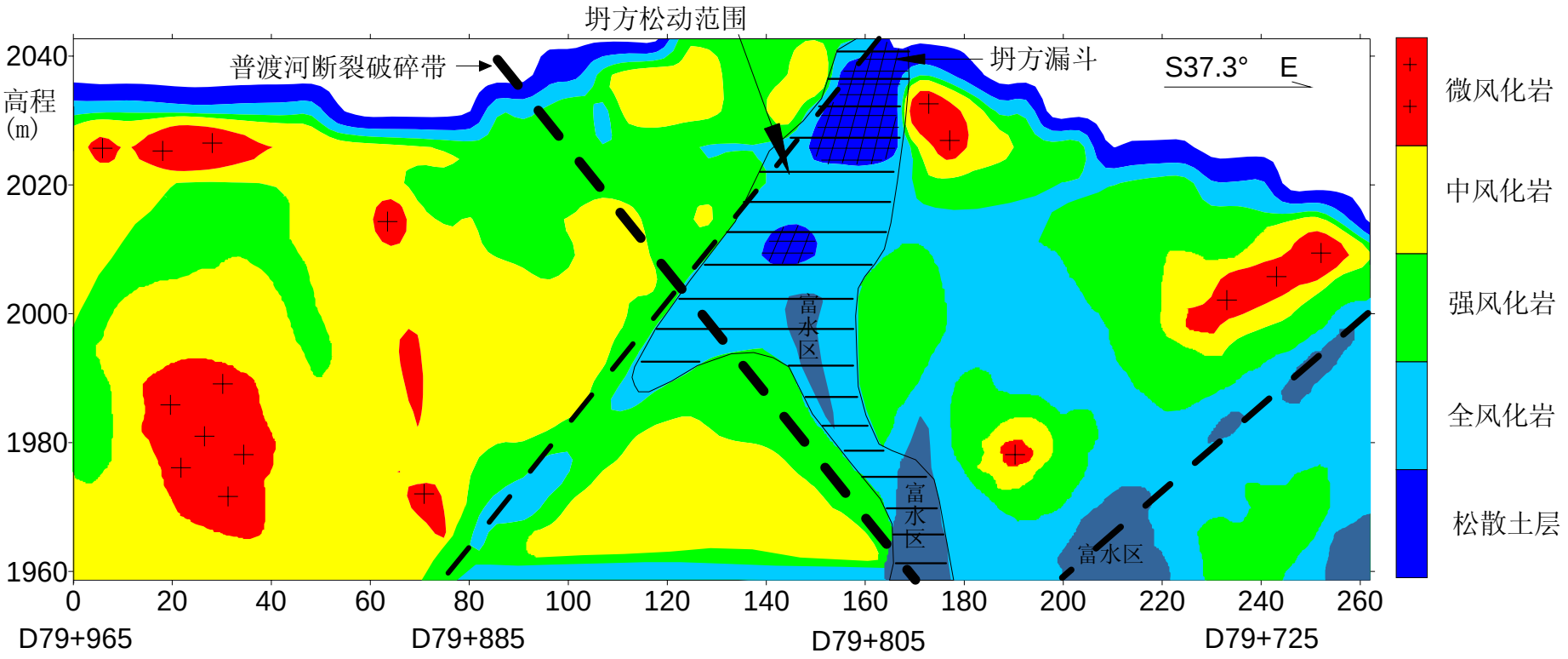



图 3-12　掌鸠河引水工程厂口隧洞 D79+705~+965 段地震 CT 地质剖面图

形成大的空洞，只是在地表至地下 30 m 范围内形成了两处空洞。

6、破碎带之外两侧由地表向深部波速总体上是增大的，但存在局部的不均匀性。在高速的介质中存在低速区，说明剖面处于普渡河断裂带内，断裂带内岩体风化、破碎不均匀，断裂带内存在较大范围的断层角砾或构造透镜体。

## 3.5　TSP 超前地质预报

### 3.5.1　TSP 超前地质预报的基本原理

TSP（Tunnel Seismic Prediction）是一种新颖、快速、有效、无损的反射地震技术[41]。它是为隧道超前地质预报而专门设计的，能在隧道（洞）施工、矿藏开采、洞穴和地下墓穴开挖前提供帮助，其目的在于快速地提供在开挖周围及前方的三维空间的工程地质情况。

TSP 和其它反射地震波方法一样，采用了回声测量原理（图 3-13）。地震波在指定的震源点(通常在隧道的左边墙或右边墙,大约 24 个炮点布成一条直线)，用小量炸药激发产生。地震波在岩石中以球面波形式传播。当地震波遇到地质物性界面（即波阻抗差异界面，例如断层、岩石破碎带和岩性变化等）时，一

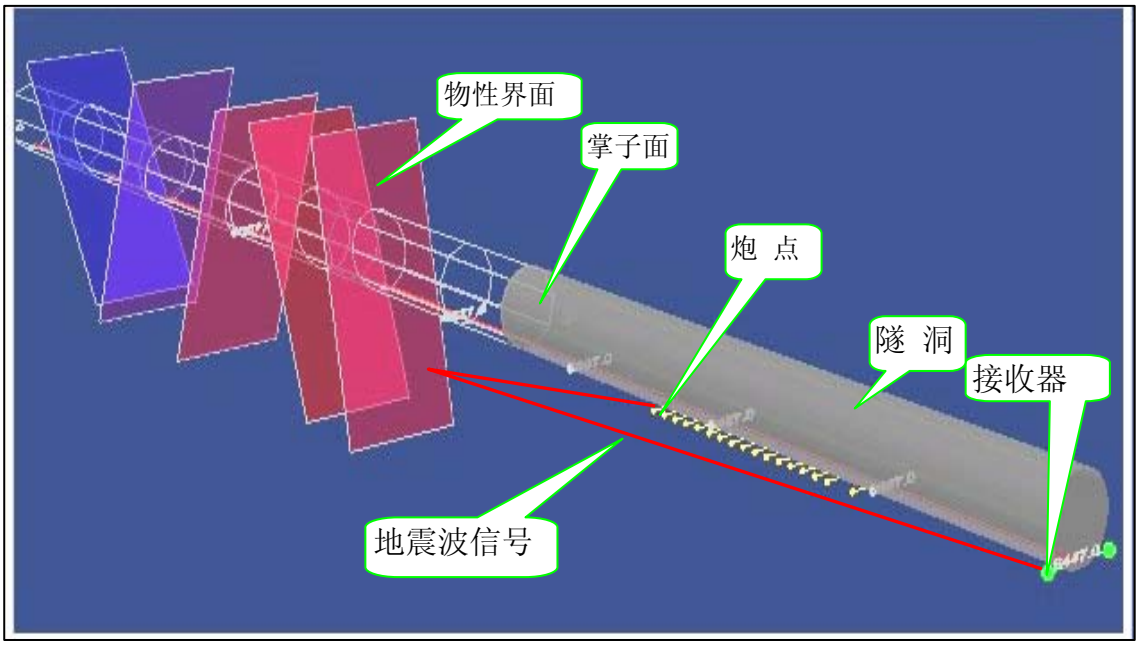



图 3-13　TSP 地 震 勘 探 原 理

部分地震信号反射回来，一部分信号透射进入前方介质。反射的地震信号将被

高灵敏度的地震检波器接收。反射信号的传播时间和反射界面的距离成正比，故而能进行一种直接的探测。

采集的 TSP 数据，通过 TSPwin 软件进行处理。TSPwin 软件处理流程包括 11 个主要步骤，即：数据设置→带通滤波→初至拾取→拾取处理→炮能量均衡→Q-估计→反射波提取→P-S 波分离→速度分析→深度偏移→提取反射层。通过速度分析，可以将反射信号的传播时间转换为距离（深度）。处理结果，可以用与隧道轴的交角及隧道工作面的距离来确定反射层所对应的地质界面的空间位置，并根据反射波的组合特征及其动力学特征解释地质体的性质。通过 TSPwin 软件处理，可以获得 P 波、SH 波、SV 波的时间剖面、深度偏移剖面、提取的反射层、岩石物理力学参数、各反射层能量大小等成果，以及反射层在探测范围内的 2D 或 3D 空间分布。

TSP 探测成果的解释，遵循以下准则：

①正反射振幅表明硬岩层，负反射振幅表明软岩层。

②若 S 波反射较 P 波强，则表明岩层饱含水。

③Vp/Vs 增加或$\delta$突然增大，常常由于流体的存在而引起。

④若 Vp 下降，则表明裂隙或孔隙度增加。

根据上述准则再结合反射特征，便可探明围岩中岩石的软弱、破碎、节理裂隙发育情况以及溶洞和含水情况。

### 3.5.2　观测系统的布置

据隧洞的具体情况，炮点设置在隧洞左边墙（往掌子面方向看），共 24 个，炮点之间距离 1.5 m，深度 1.5 m，第 1 个炮点里程为 D79+916.5。接收器（检波）2 个，分别位于隧洞左、右边墙，深度 2 m，第 1 个接收器位于隧洞左边墙与同侧的第 1 个炮点距离 15 m，里程为 D79+931.5，第 2 个接收器位于右边墙，里程为 D79+920（如图 3-14 所示）。

### 3.5.3　TSP 超前地质预报探测成果

采集时设置的采样率为 62.5 μs，记录样点为 7 218（即记录长度为 451 ms），2 个检波器 X-Y-Z 三分量同时接收。设计 24 炮，实际接收 23 炮。采集的 TSP 数据，通过 TSPwin 专用软件进行处理。处理长度为 200 m（即 D79+931.5～

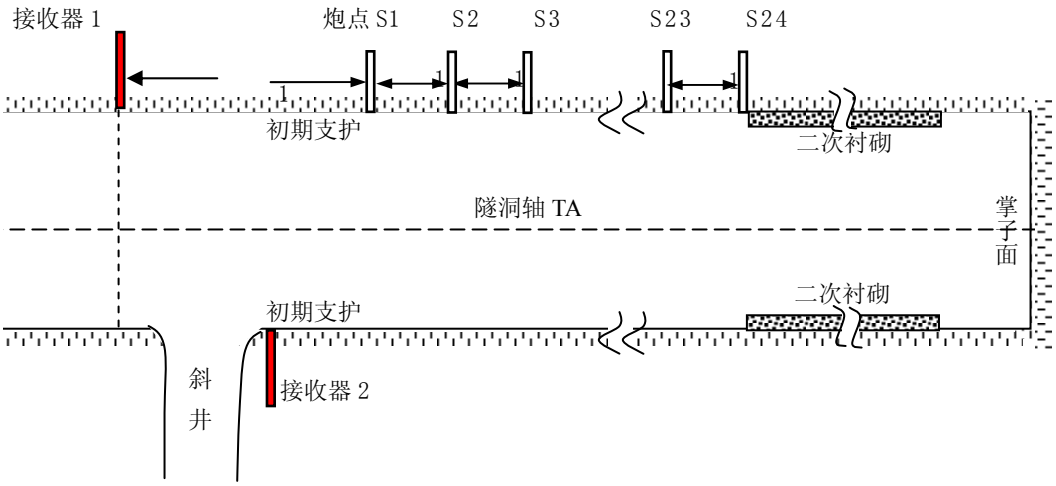



**图 3-14　TSP 观测系统与隧洞关系平面图**

D79+731.5）。在成果评估中，根据 TSP 的解释准则，以 P 波资料（图 3-15）为主对岩层进行划分，结合横波资料（见图 3-16）对工程地质进行评估。

图 3-15 和图 3-16 为处理得出的深度偏移剖面。图中横向为沿隧洞轴向，纵向为垂直隧洞轴线方向，中部的虚线即隧洞中轴线。地震反射事件（同相轴）在深度偏移剖面中以红色和蓝色表示，其中红色表示正振幅反射，表明岩石强度增强，蓝色表示负振幅反射，表明岩石强度变弱。根据有关资料及上述准则，解释成果见表 3-1。

**表 3-1　TSP 超前探测解释成果表**

| 序号 | 里　程 | 长度(m) | 推　断　结　果 |
|---|---|---|---|
| 1 | D79+931.5～D79+891.6 | 39.9 | 硬岩层，破碎 |
| 2 | D79+891.6～D79+879.9 | 11.7 | 软岩层，含水 |
| 3 | D79+879.9～D79+864.8 | 15.1 | 硬岩层，破碎，含水 |
| 4 | D79+864.8～D79+853.4 | 11.4 | 软岩层，含水 |
| 5 | D79+853.4～D79+812.8 | 40.6 | 硬岩层，破碎，含水 |
| 6 | D79+812.8～D79+794.4 | 18.4 | 软岩层，含水（在 D79+810～801 段水量集中） |
| 7 | D79+794.4～D79+764.5 | 29.9 | 硬岩层，破碎，含水（在 D79+764.5 附近水量集中，应注意突泥涌水） |
| 8 | D79+764.5～D79+731.5 | 33 | 软岩层，含水（在 D79+752.5 附近水量集中，应注意突泥涌水） |

注：表中硬岩层为断层角砾岩等较破碎的硬质地层，软岩层为断层泥等软弱的地层。

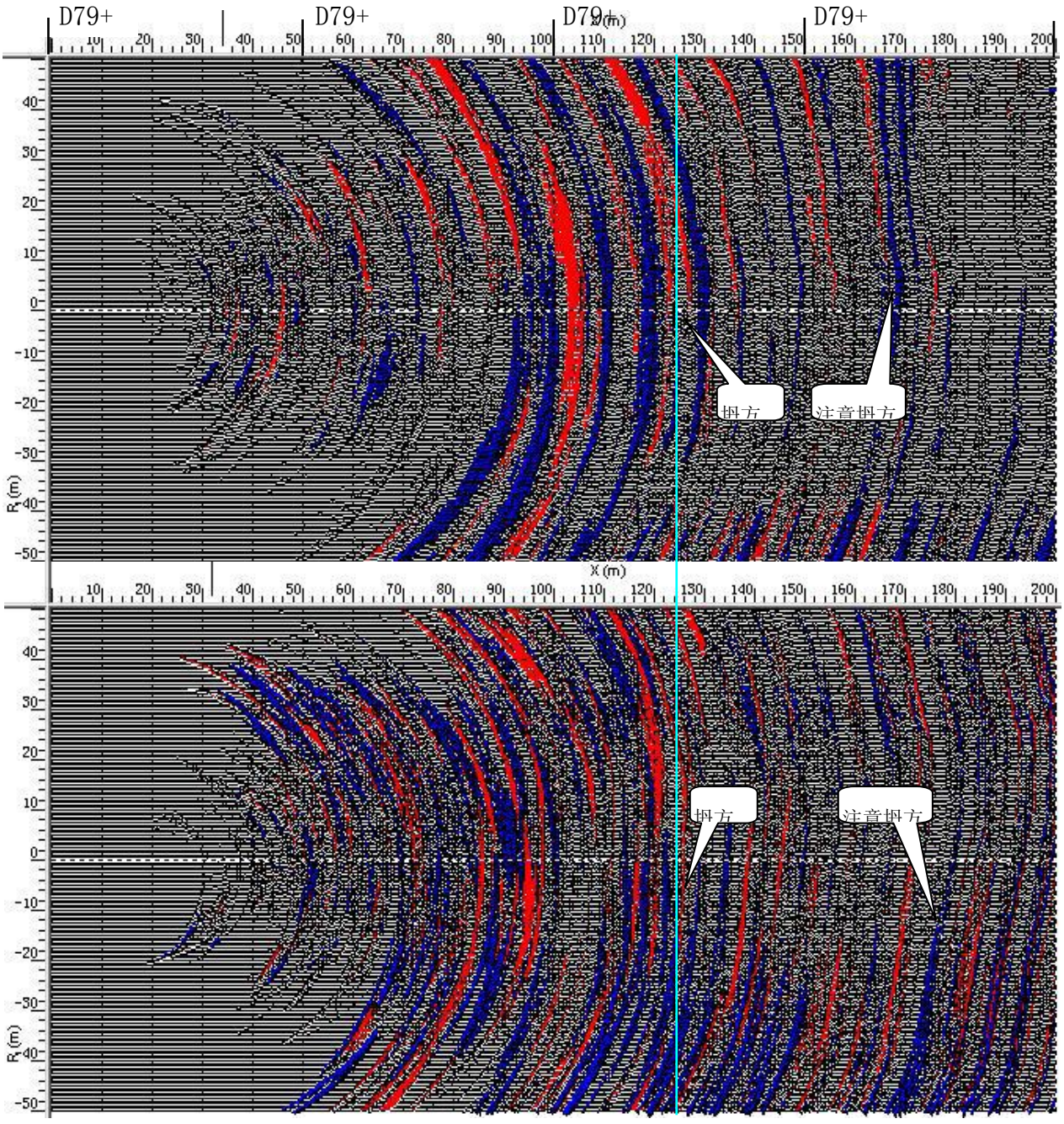



图 3-15　P 波深度偏移剖面（上－第 1 个接收器 下－第 2 个接收器）

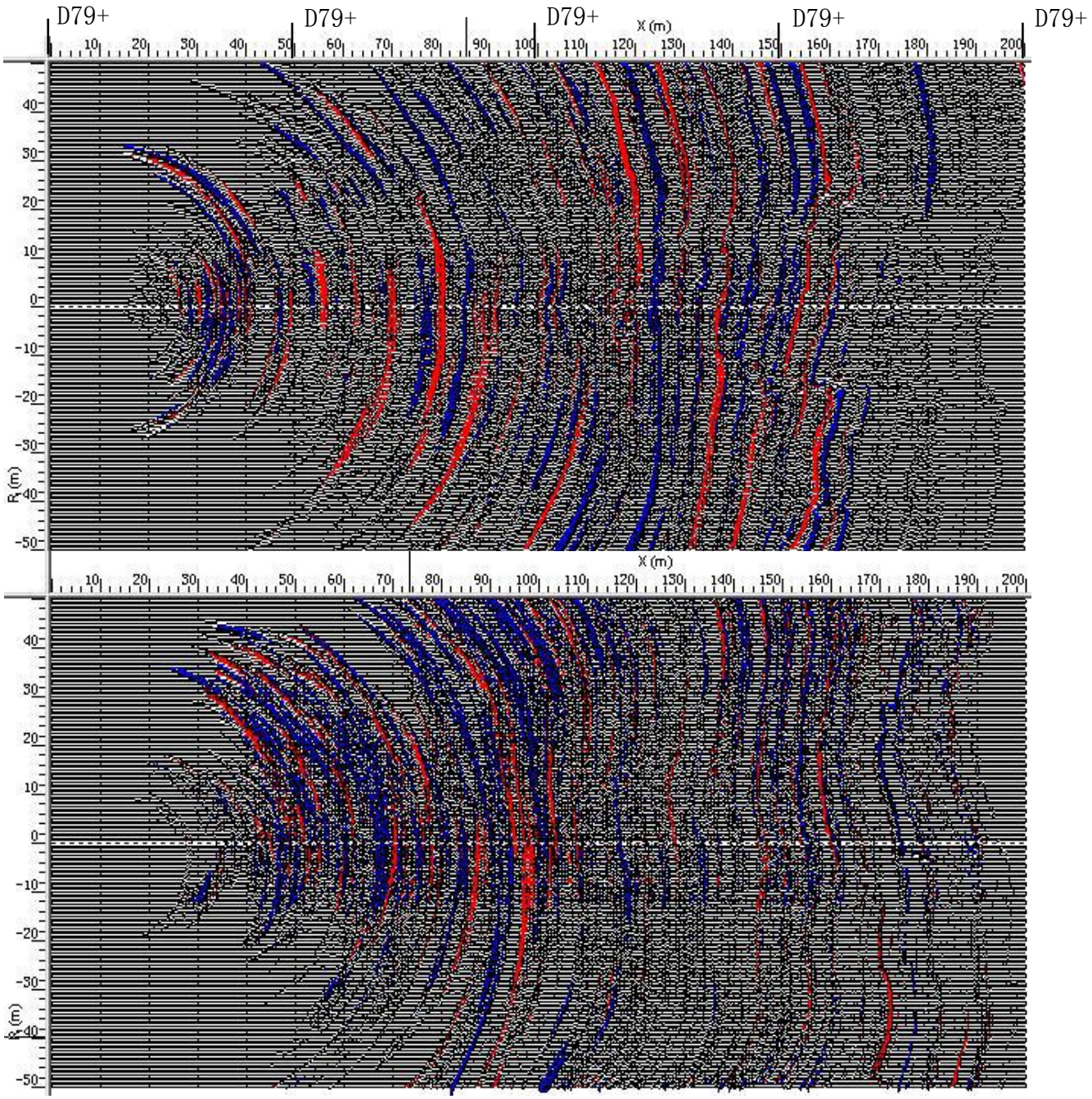



图 3-16　SV 波深度偏移剖面（上－第 1 个接收器 下－第 2 个接收器）

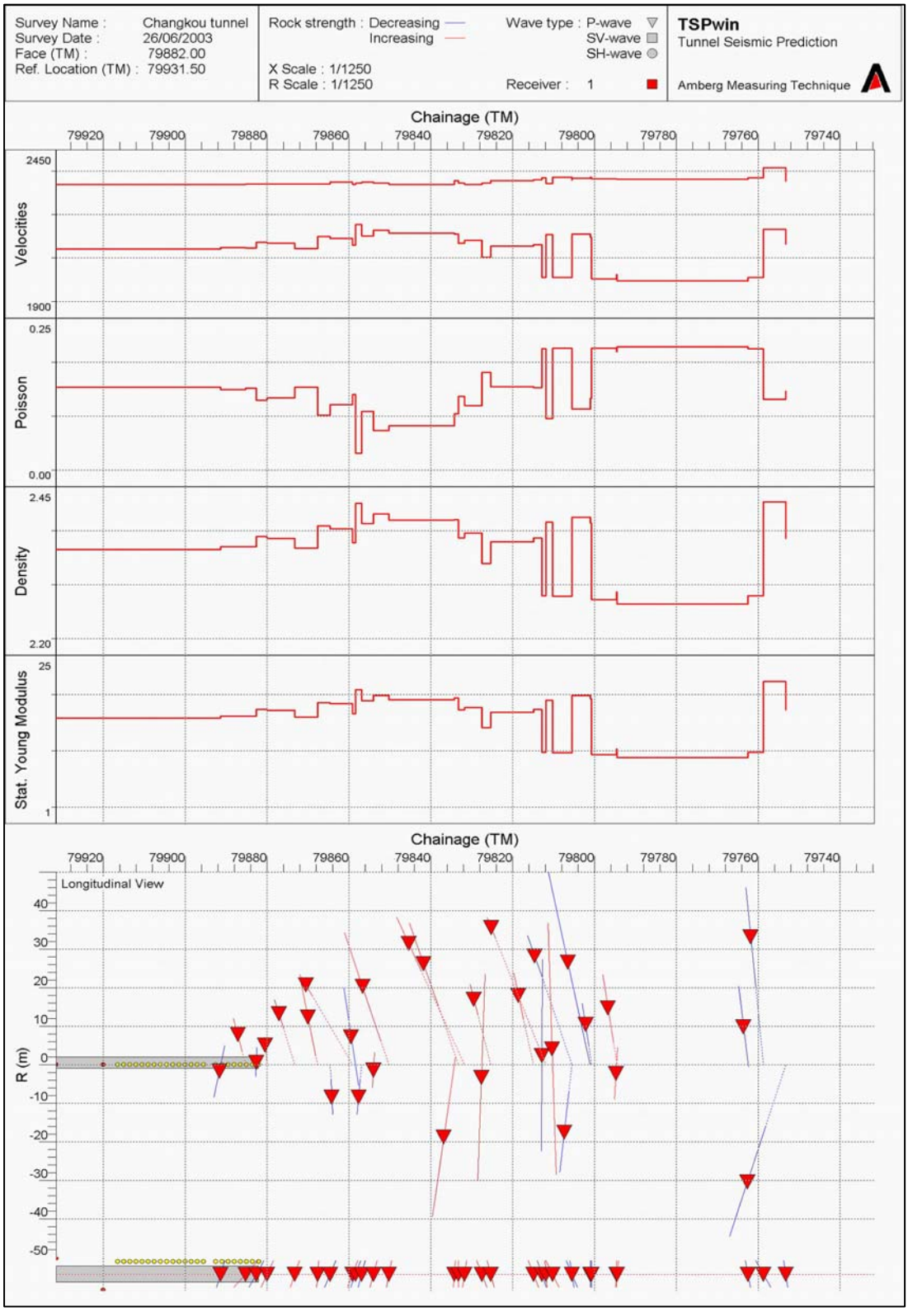



图 3-17　第 1 个接收器的 P 波 2D 成果及岩石力学参数曲线图

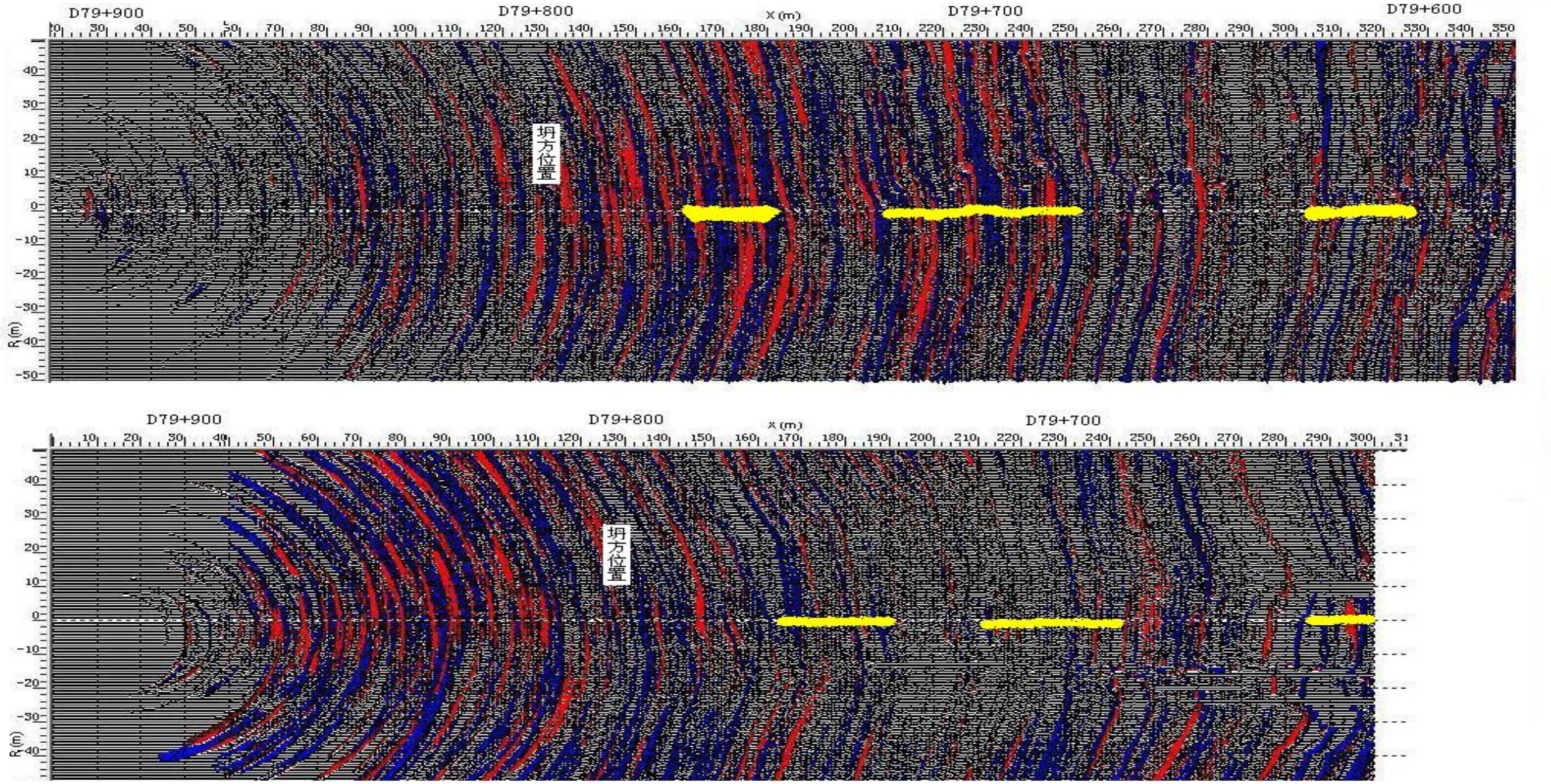



图 3-18　厂口隧洞TSP超前探测成果

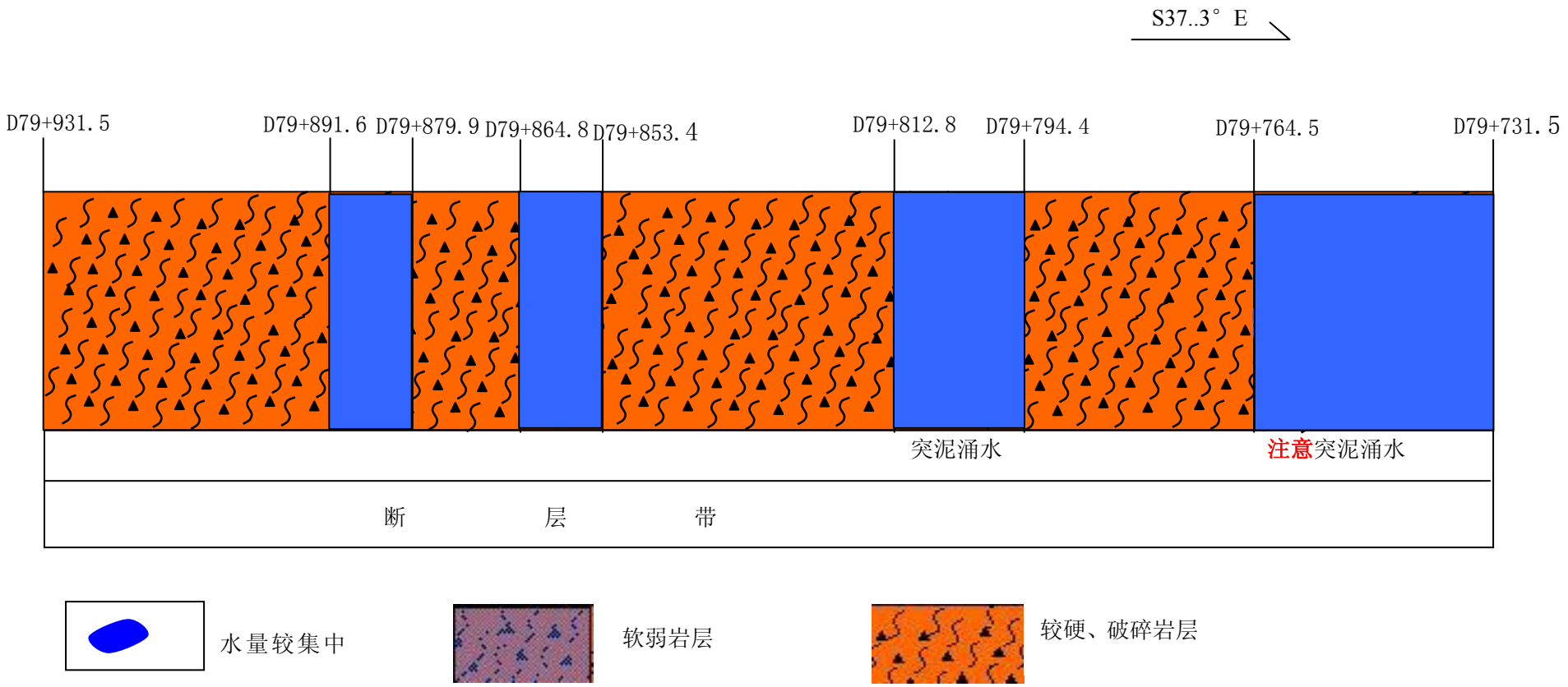



图 3-19　TSP 预报隧洞地质剖面图

图 3-15 表明，D79+931.5～D79+731.5 段 200 m 范围内，地震反射以负反射为主（剖面图中的蓝色），反映出围岩软弱，结合图 3-16 剖面中地震反射较为凌乱的面貌，反映整个地段位于断层带内。其中在 D79+839.5～D79+779.5 段负反射最强，说明该段围岩极软弱、富水，而 D79+803 坍方涌水就位于其中最强的一个负反射同相轴，探测结果与实际施工吻合。图 3-16 是根据探测结果推断的该段隧洞地质剖面图。

通过分析计算，围岩的纵波速度为 1295～2105 m/s，密度为 1.86～2.09 g/cm$^3$（图 3-17）。目前还没有开挖的地段，在D79+764、D79+752、D79+720、D79+700、D79+620 等处出现较强的负反射（图 3-15 中蓝色同相轴、图 3-18 中用黄色表示的段落），表明在该处岩石强度突然变低，围岩破碎、水量丰富。因此，施工时应注意坍方或者突泥涌水（图 3-18、图 3-19），必要时应加强支护工作，以确保质量和安全。

本次 TSP 超前地质预报存在的问题：

1、TSP 主要应用与掌子面前方 100～150m 隧道不良地质的超前预报问题，因此传感器的位置不宜过于靠后。若以 D79+803 为掌子面，传感器的位置已经距掌子面 128m！这样不可以。一般应为 55～60m 为宜。

2、要解决坍塌区段上复岩体的地质构造，以开挖区段的地质观测为主，结合高密度电阻率成像法和地震 CT 法等物探手段较好，TSP 效果不是很好。

3、实践证明，传感器前方若存在超挖或横道，对接受效果影响很小（地震波以球面波形式在岩体里传播），完全没有必要改变右壁传感器的位置。

4、由于两壁传感器里程不同，进行左右壁 P 波深度偏移对比和 SV 波深度偏移对比时，右壁应前移 11m。例如左壁距传感器的距离为 128m（相当 D79+803）时，它应与左壁 117m 对齐（也相当 D79+803）。

5、2D 成果图缺少第二传感器的成果。

6、应预报掌子面前方的、有效预报区段的围岩级别。

7、TSP 超前地质预报应当具体预报隧道不良地质的位置、规模、性质和特征及其对施工的影响。对于本次预报来说，主要不良地质的位置、规模、性质和特征及其对施工的影响如下：

左壁：

①857～853, 带宽 4m，一般多水带。

②846～842, 带宽 4m，一般多水带。

③839～837,带宽 2m，小断层破碎带，破碎。

④831～828,带宽 3m，小断层破碎带，破碎。

⑤821～818,带宽 3m，小断层破碎带，破碎。

⑥813～809,带宽 4m，中型断层破碎带，破碎，多水。易坍塌，小心施工。

⑦803～800,带宽 3m，小型断层破碎带，破碎，多水。易坍塌，小心施工。

⑧762～760,带宽 2m，小断层破碎带，破碎。

⑨758～756,带宽 2m，小断层破碎带，破碎。

右壁：

①854～850,带宽 4m，一般多水带。

②847～845,带宽 2m，一般多水带。

③830～824,带宽 4m，中型断层破碎带，破碎。

⑤808～806,带宽 2m，小断层破碎带，破碎。

⑥805～802,带宽 3m，小断层破碎带，破碎，多水。易坍塌，小心施工。

⑧766～764,带宽 2m，小断层破碎带，破碎，多水。易坍塌，小心施工。

⑨759～757,带宽 2m，小断层破碎带，破碎。多水。易坍塌，小心施工。

# 第四章　掌鸠河引水工程厂口隧洞综合物探预报对施工的建议

## 4.1　掌鸠河引水工程厂口隧洞综合物探预报结论

对掌鸠河引水工程厂口隧洞勘探采用了高密度电阻率、地震 CT 和 TSP 地质超前探测等综合方法对掌鸠河引水工程厂口隧洞普渡河断裂进行勘探。通过对综合物探数据的分析、处理、解释，结合工程地质资料综合分析，基本查清了普渡河断裂带的空间延伸及与隧洞衬砌破坏的关系，获得隧洞拱顶上方岩体开裂、坍落变形的位置、冒顶的范围、坍塌原因、及延伸等几何形态图像，同时提供了隧洞标高以下及施工开挖面前方的地质情况。查清了隧道所处围岩的工程地质结构，为地质病害治理和隧洞衬砌修复提供了可靠依据，此次勘探取得了满意的成果。

探测的主要结论可以归结如下：

1、勘探范围内隧洞处于普渡河断裂带（见图 4-1），断裂带内岩体破碎，构造复杂，隧道穿越的渡河断裂带宽度约 500 m；断裂带由多条大致平行的小断裂组成。主断裂走向 N 0°～25°E，倾向 SE 或 NW，倾角 80°～85°，其走向代表了区域构造线的方向，隧洞轴线与构造线呈大角度相交，围岩稳定性主要受岩性和构造的控制；

2、断裂带内主要为强烈揉皱或破碎的岩层、碎裂岩、角砾岩、糜棱岩、挤压片状岩及断层泥，有大量泥化夹层。构造透镜体为薄层粉砂岩、泥岩，其内的主要结构面的产状与断层的产状一致，岩（土）体结构类型属散体结构、碎裂结构，工程地质条件恶劣，围岩稳定性差；

3、地表常年有流水，隧洞设计的地勘钻孔资料显示，该段地下水丰富，地下水位较高，因此地下水对围岩有软化作用，增强了岩体的流塑性，开挖过程中易形成突泥涌水、片帮、冒顶；

4、隧洞施工开挖扰动在断层破碎带内形成较大范围的松动带，松动带围岩失稳，沉陷使隧道中部发生严重坍塌，山体非稳定区上部围岩下陷导致地面塌陷而使隧洞冒顶；坍方冒顶没有在隧洞拱顶以上 50 m 范围内形成大的空洞，只是在地表至地下 30 m 范围内形成了两处空洞；

5、厂口隧洞上覆围岩按工程地质结构可分为三类（如图 4-2）。一类是地表松散土、断层破碎带内属碎裂结构和散体结构的岩（土）体，波速小于 1.0 km/s，视电阻率 $\rho_s$ 小于 60 Ω·m，岩（土）体自身极不稳定，属非稳定性区，主要分布在浅层和断裂破碎带内；第二类是强风化围岩，节理、裂隙发育，波速为 1.0 km/s～2.0 km/s，视电阻率 $\rho_s$ 为 60 Ω·m～150 Ω·m，围岩稳定性较差，隧洞围岩以此类为主；第三类是中风化岩体，波速大于 2.0 km/s，视电阻率 $\rho_s$ 大于 200 Ω·m，属较稳定区，在本次探测区域内范围较小；

6、D79+839.5～+779.5 段围岩软弱、富水，在施工开挖面前方 200 m 范围内，特别是 D79+764.5～+740 、D79+720～+680 和 D79+620～+600 段，围岩松散破碎，水量集中，开挖时容易发生坍方涌水，施工时应进行超前注浆，及时采取堵、排水措施并加强支护和加大支护强度；

7、普渡河断裂属深大活动断裂，根据 TSP 超前地质探测结果显示，在隧洞基础以下仍有许多软弱夹层，推断该段隧洞基础稳定性差。

## 4.2　对掌鸠河引水工程厂口隧洞施工建议

根据综合物探的探测结果，建议隧洞病害的整治和施工中，应主要是治理和恢复隧道顶部破碎松动区围岩稳定性，同时增加衬砌厚度和强度。具体施工建议如下：

1、对已开挖的 D79+900～+800 段隧洞，采用工程措施在隧洞顶部围岩中形成厚度 2 m 左右的拱圈，使压应力均匀分布，消除应力集中，稳定上伏岩体，保护衬砌结构。对 D79+875～+900 和 D79+810～+795 等软弱地段隧洞底也要进行注浆加固，改善和加强隧道基础的稳定。

2、开挖面至前方 200 m 范围内围岩松散、破碎并且富水，进行隧洞施工时，应进行超前注浆支护，及时采取堵、排水措施，并加强支护和加大支护强度，预防发生坍塌涌水。D79+764.5～+740、D79+720～+680 和 D79+620～+600 段隧洞基础软弱，也应进行注浆加固处理。

3、地表塌陷沉陷部位应采取适当夯实、填埋措施，进行注浆加固处理，并用水泥沙浆封闭，设置地表排水系统，恢复和提高其岩体自身的整体性和稳定性，并且可以防止雨水入渗而影响整个山体的稳定性和隧洞的安全。

4、隧洞开挖过程中应对软弱地段进行超前支护或预注浆，对涌水量较大的

地段，施工时对水的处理要防排结合，综合治理，过多的排水会引起泥沙流失，围岩失稳，对开挖的部分进行径向围岩加固注浆和衬砌后充填注浆，对十分破碎地段隧洞的基础部分也要注浆加固，确保隧洞的质量和施工安全。

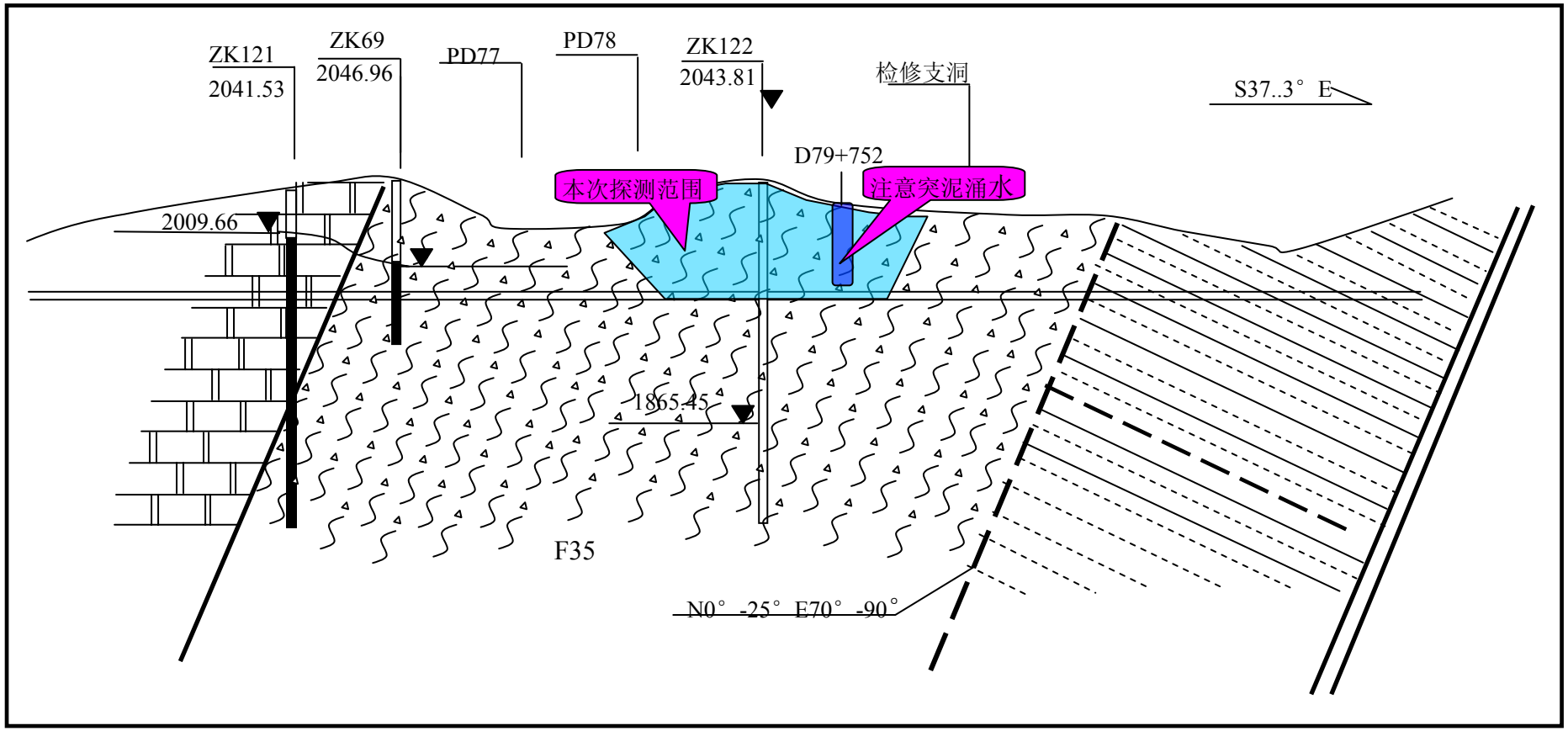



图 4-1　厂口隧洞工程地质纵剖面图（例尺：1:1 000）

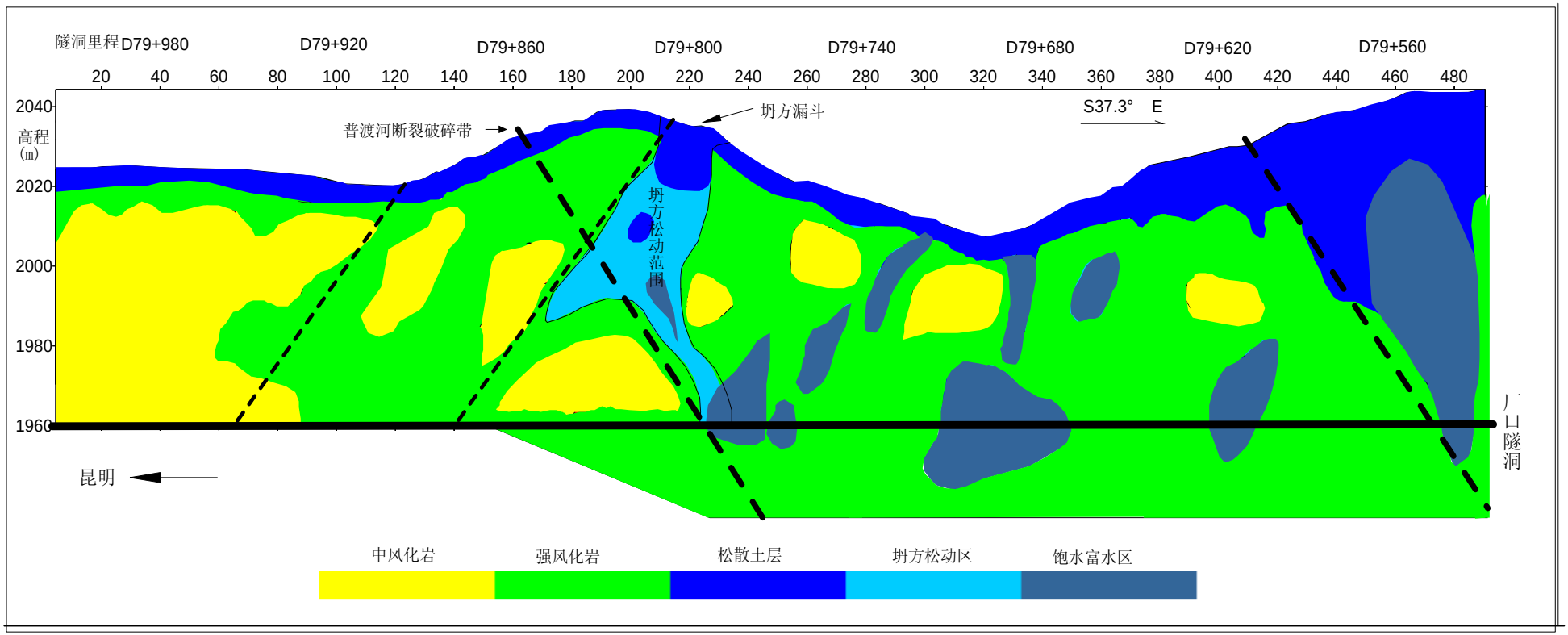



图 4-2　厂口隧洞 D79+705～+965 段综合物探成果剖面图

# 第五章　结　论

随着高速公路及高速铁路的迅猛发展，不可避免的需要修建深、大、长隧道，而山区复杂地质条件引起的施工地质灾害往往是这些隧道在施工建设中需要解决的关键性问题。超前地质预报为隧道施工提供重要技术参数是目前广泛采用的信息化施工方式。预报的方法技术种类众多，但针对岩溶水问题的预报一直是隧道超前探测领域的一个难题。并且，作为隧道超前预报的重要思路，对各种方法技术预报成果进行综合利用和综合分析在国内工程界也没有较为清晰明确工作方法。

## 5.1　主要研究成果

本文以掌鸠河引水工程厂口隧洞为研究对象，收集了大量前期勘察资料及现场测试资料。并以掌鸠河引水工程厂口隧洞的超前地质预报为主要研究对象，通过大量的现场测试的资料分析及现场隧洞的施工情况进行分析，得出的结论如下：

(1) 对掌鸠河引水工程厂口隧洞隧址区域地质条件进行了系统的分析，确定主要使用地震 CT 勘探、TSP 超前地质预报对隧址区域进行地质预报，用高密度电阻率勘探探测地表以下 60 m 范围内的地质情况、含水情况，对地震 CT 观测资料、TSP 超前地质预报相互补充，进行综合解释。

(2) 得出勘测成果，得到掌鸠河引水工程厂口隧洞上覆围岩类型，普渡河断裂带内岩层及岩体情况以及隧址处地下水情况，为工程单位的施工做好准备。

(3) 根据综合物探的探测结果，对于掌鸠河引水工程厂口隧洞工程，建议隧洞病害的整治和施工中，应主要是治理和恢复隧道顶部破碎松动区围岩稳定性，同时增加衬砌厚度和强度。

## 5.2　研究展望

目前，对于隧道超前地质预报工作，国内外的研究尚处于一个初级发展阶段，许多理论技术尚不完善，还有很大的发展空间。对于我国来说，目前在超前地质预报方面存在的问题及建议如下：

(1) 大多单位开展地质预报，目的只为应用，方法理论研究较少。

(2) 目前的超前地质预报工作大多应用在隧道施工中，应用较单一，而在其它领域，如煤矿巷道，地铁开挖等工程中的应用有待进一步的研究。

(3) 在超前地质预报领域，应有相应的标准规范来约束和指导各种预报手段的使用，使其有相应的技术规程和评价标准，以便与进一步推广使用。

# 参 考 文 献

[1] 张悼元, 王士天等. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社, 1994

[2] 刘志刚, 赵勇. 隧道隧洞施工地质技术. 北京:中国铁道出版社, 2001

[3] 中国科学院地质研究所. 军都山隧道快速施工超前地质预报指南[M]. 北京:中国铁道出版社, 1990

[4] 田夏才初. 土木工程监测技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001

[5] 张志龙. 越岭长大公路隧道地质预报中的关键技术问题研究[D]. 成都理工大学博士论文, 2006

[6] 刘志刚. 概论岩溶或地质复杂隧道隧洞地质灾害超前预报技术[J]. 铁道建筑技术, 2004(2): 11～13

[7] 赵勇, 肖书安, 刘志刚. TSP 超前地质预报系统在隧道工程中的应用[J]. 铁道建筑技术, 2003 (5): 18～22

[8] 黄祥志, 佘成学. 概论超前地质预报系统[J]. 建筑技术开发, 2004, 31(11):26～28

[9] 谭天元, 叶勇. 隧道工程超前地质预报中的综合物探技术[J]. 贵州水力发电, 2006, 20(6):13～18

[10] 杨萍, 刘康和. 隧洞施工超前预报现状概述[J]. 红水河, 2006, 25 (1): 89～92

[11] 赵存明, 沈斐敏. 长隧道地质灾害超前综合探测技术的探讨用[J]. 中国安全生产科学技术, 2005, 1(4): 38～41

[12] 肖克华. 综合物探在宋家湾隧道工程勘查中的应用[J]. 资源环境与工程, 2006, 20(1):64～66

[13] 刘文祥, 鲁来玉, 石桂. 综合物探在地铁隧道工程建设中的应用[J]. 物探与化探, 2004, 28(2):181～183

[14] 周孝宇. 综合物探方法在隧道勘察中的应用[J]. 广东公路交通, 2006(6):5～9

[15] 皮开荣, 谭天元. 综合物探方法在公路隧道无损检测中的应用[J]. 物探装备, 2005, 15(3):207～209

[16] 谭天元, 叶勇, 张伟. 隧道工程超前地质预报中的综合物探技术[J]. 贵州水力发电, 2006, 20(6):13～18

[17] 荆志东. 特长隧道地质超前预报方法研究[J]. 铁道勘察, 2005(3):46～48

[18] 杨锋. TSP 隧道超前预报中典型地质异常体的射线追踪数值模拟研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2007

[19] 朱劲. 超前地质预报新技术在铜锣山隧道的应用及综合分析研究[D]. 成都理工大学硕士学位论文, 2007

[20] 吴国晓. 锦屏二级水电站辅助洞超前地质预报技术研究[D]. 河海大学硕士学位论文, 2007

[21] 郭伟伟. 隧道施工超前地质预测预报综合技术方法研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2006

[22] Yeon-Jun Park, K wang-Ho You, Ki-Sun Kim. Prediction of the change in ground condition ahead of tunnel faceusing 3-dimensional displacement monitoring[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006(21):230～235

[23] Tetsuo Ito, Wataru Akagi, Hiromichi Shiroma. Evaluation of tunnel support basedon seismic velocity before excavation[J]. Tunnelling and Underground SpaceTechnology, 2004(19):513～514

[24] Y Ashida. Seismic imaging ahead of a tunnel face with three-component geophones[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001(38):823～831

[25] 曲海峰, 刘志刚, 朱合华. 隧道信息化施工中综合超前地质预报技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6):1246～1251

[26] 刘志刚, 赵勇, 李忠. 隧道施工地质工作方法[J]. 石家庄铁道学院学报, 2000, 13(4):1～5

[27] 戴武奎. 地质雷达在隧道超前预报中的应用[J]. 中国科技信息, 2006(21):52～54

[28] 王连成, 王应富. 地质雷达技术在公路隧道工程中的应用[J]. 公路隧道, 2005，50(2):32～36

[29] 方建立, 应松, 贾进. 地质雷达在公路隧道工程中的应用[J]. 中国岩溶, 2005，24(2):160～163

[30] 代高飞, 夏才初, 毛海河. 地质雷达在隧道超前预报中的应用[J]. 西部探矿工程, 2004，100(9):118～120

[31] 张宗贵. 综合地质勘察在关山隧道中的应用[J]. 建筑设计, 2005，34(6):121～122

[32] 罗卫华, 肖书安, 李德久等. TSP 系统在隧道工程施工地质预报中的应用和发展[J]. 中南公路工程, 2006，31(1):135～138

[33] 匡文龙, 古德生, 周科平等. 大湾隧道掌子面前方岩石结构的 TSP 超前预报[J]. 公路, 2005 (1):216～218

[34] 李喻九. 超前探孔在复杂地质开挖中应用[J]. 西部探矿工程, 2005, 105(2):107～108

[35] 刘秀峰, 刘志刚. 岩溶地质超前预报方法研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2003, 16(2):71～73

[36] 赵永贵. 隧道地质超前预报研究进展[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3):460～464

[37] 王齐仁, 杨天春. 隧道地质灾害超前预报的地震反射法[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2):643～649

[38] 周天福. 工程物探[M]. 南京:河海大学出版社, 1992

[39] 汪志成. 超前地质预报在长大隧道施工中的应用[J]. 施工技术研究和应用, 2006(2):43～46

[40] 李文新. 隧道物探法预报进展及回顾[J]. 山西建筑, 2007, 33(7):316～318

[41] 王青海, 李晓红, 夏彬伟等. 超前地质预报在笔架山隧道施工中的应用[J]. 岩石力学, 2005, 26(6):951～954

[42] 王兴泰. 工程与环境物探新方法新技术[M]. 北京:地质出版社, 1996

[43] GB50021-2001, 岩土工程勘察规范[S]

[44] SL245-1999, 水利水电工程地质观测规范[S]

[45] GZ/T0091-94, 地质矿产勘察测量[S]

# 致　谢

本文是在尊敬的导师刘志刚教授的热心关怀悉心指导下完成的。刘老师丰富的实践经验、严谨的治学态度、崇高的敬业精神、求实的工作作风以及渊博的学识在我心中留下了深深的烙印，给我树立了做人的榜样，令我受益匪浅。刘老师对本论文的写作倾注了大量心血，审阅了论文的每一细节，提出了许多宝贵的意见和建议，在论文完成之际，谨向刘老师表示衷心的感谢和崇高的敬意!

在此还要感谢李瑞杰、邢春焕、房士波、冀胜利等，还有我的同学和朋友们，他们在我就读期间给予我的关照和支持。

本文在写作过程中参阅了大量的文献资料，在此向作者表示感谢!

感谢石家庄铁道学院所有老师在学习上给予我热情的关心和帮助!

最后感谢我的父母和我的爱人，感谢他们多年来对我的理解和在学习及工作中给予我的大力支持和帮助。

# 个 人 简 历

## 个人简历

高忠岭，男，1977 年 10 月出生，工程师。2000 年 7 月毕业于黑龙江科技学院资源与环境工程系，采矿工程专业，获工学学士学位。同年进入中铁二十局集团第四工程公司工作。2005 年考入石家庄铁道学院建筑与土木工程专业攻读工程硕士学位。