

TRT CHAOQIAN DIZHI YUBAO JISHU YU
YINGYONG YANJIU

TRT超前地质预报技术与 应用研究

主编 王建林 副主编 米 健 楚建伟



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

TRT超前地质预报技术与应用研究

主编 王建林 副主编 米 健 楚建伟



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书在丰富的 TRT 超前地质预报实践的基础上,总结了 TRT 超前地质预报三维成像的基本特征,并提出了优化探索。

本书共 8 章,包括概述,TRT6000 超前地质预报原理及操作流程,TRT6000 在隧洞工程地下水、空腔、断层破碎带和围岩分类等地质体超前预报中的应用,TRT6000 超前地质预报的优化探索等内容,具有一定的学术和应用价值。

本书主要供从事隧洞工程建设管理、勘察、设计和施工的技术人员阅读,也可作为隧洞超前地质预报人员的培训教材和大专院校相关专业的师生学习参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

TRT超前地质预报技术与应用研究 / 王建林主编. --
北京: 中国水利水电出版社, 2016. 12
ISBN 978-7-5170-4953-1

I. ①T… II. ①王… III. ①隧道工程—工程地质—
预报 IV. ①U452.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第305323号

书 名	TRT 超前地质预报技术与应用研究 TRT CHAOQIAN DIZHI YUBAO JISHU YU YINGYONG YANJIU
作 者	主编 王建林 副主编 米 健 楚建伟
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	170mm×240mm 16 开本 7.75 印张 108 千字
版 次	2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	48.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《TRT 超前地质预报技术与应用研究》

编 委 会

主 编 王建林

副 主 编 米 健 楚建伟

参编人员 张天明 沈 晓 李 靖 梅 伟

邓东明 赵永川 陶忠平 吴正昆

苏正猛 田 毅 林 红 王红伟

杨 红 陈德平

序

近年来,随着国家对基础设施的大量投入,水利工程、公路工程 and 铁路工程都在突飞猛进地发展。在这些基础设施的建设过程中涌现了大量的隧洞工程,并且隧洞工程的地质条件也越来越复杂,特别是一些深埋长隧洞,尽管施工前进行了大量的地质勘察工作,但由于前期地质勘察工作受到勘察技术手段和方法以及勘察经费的限制,期望在施工前完全查明工程岩体的状态和特性,准确地预测隧洞施工中可能发生地质灾害的位置、性质和规模是十分困难的。因此,伴随隧洞施工的逐步开展,涌水、突泥、坍塌、疏干地下(表)水影响环境等事故频繁发生也就在所难免,如宜昌—万州铁路马鹿箐隧道在施工过程中发生“1·21”涌水事故,最大涌水量达 $30\text{万 m}^3/\text{h}$,此次事故造成 11 人死亡,事故处理长达 1 年多的时间;2002 年株六复线大竹林隧道发生大规模地下水突涌灾害,突涌总量达 $16000\text{m}^3/\text{d}$,造成隧道施工停工 132 天之久,直接经济损失 455 万元等,不胜枚举。所以,如果能在施工过程中采取有效的方法,对隧道前方的不良地质体进行准确的超前预报,并针对前方存在的不良地质体进行工程地质评价,提出相应的处理和防范措施,避免地质灾害的发生,保证人员和环境安全,减少经济损失,就显得十分必要。

云南省水利水电勘测设计研究院(以下简称云南水院)于 2009 年引进 TRT6000 超前地质预报系统,是我国水利部门以及云南省首家引进该项先进技术的使用单位。迄今为止,云南水院应用 TRT6000 超前地质预报系统,累计在牛栏江—滇池补水工程的输水隧洞以及相关工程进行超前地质预报 350 次,累计预报里程 51.1km,其中超前探测地下水的预报准确率平均为 70%,超前探

测空腔的预报准确率为 66.7%，超前探测断层破碎带的预报准确率为 100%，取得了很好的应用效果，填补了我国水利部门以及云南省在应用 TRT 技术进行隧洞超前地质预报方面的空白。由于 TRT6000 面世时间短，应用其进行隧洞超前地质预报尚处于初级阶段，目前国内应用 TRT6000 进行隧洞超前地质预报多以厂家提供的《应用手册》为基础进行，具有较大的应用前景和超前预报技术水平提升空间，因此，云南水院利用已开展的生产试验取得的大量数据开展 TRT6000 在隧洞施工中地质超前预报应用研究十分必要，也是可行的。

云南地质条件十分复杂，在云南进行隧洞围岩地质条件超前预报研究有着非常充分的试验条件，并且研究的地质问题可涵盖全国各地隧洞围岩所出现的绝大部分问题，具有广泛的代表性，也有着较为重要的实际意义。云南水院结合所进行的生产实践，专门成立了 TRT6000 应用研究课题组，对 TRT6000 超前地质预报系统在云南地区的应用进行了有益的尝试和探索，特别对破碎带、地下水、岩溶进行了全面的应用研究，从理论上和实践上都取得了丰硕的成果。为消化和吸收 TRT6000 先进技术，以及指导生产都有着积极的意义。希望课题组继续探索、研究，使这一先进技术的应用能更好地服务于社会。

云南省水利水电勘测设计研究院院长



2016 年 8 月 18 日

前 言

随着我国建设事业的发展和不断深入,出现了越来越多的隧洞工程,并且隧洞工程的地质条件也越来越复杂,特别是一些深埋长隧洞,尽管在施工前进行了大量的地质勘察工作,但由于前期地质勘察工作受到勘察技术手段和方法以及勘察经费的限制,期望在施工前完全查明隧洞围岩的状态和特性,准确地预测隧洞施工中可能发生地质灾害的位置、性质和规模是十分困难的。随着隧洞施工的逐步深入,其安全隐患会逐渐暴露出来,这时需要在隧洞施工过程中采取有效的方法,对隧洞前方的不良地质体进行准确的超前预报,并针对前方存在的不良地质体进行工程地质评价,提出相应的处理和防范措施,避免地质灾害的发生。因此,超前地质预报已被列为隧洞施工必不可少的技术环节。

隧道反射层析扫描成像技术(Tunnel Reflection Tomography),简称TRT。20世纪60年代,在美国先进技术发展计划基金支持下,美国国家安全局网罗了众多资深地球物理学家应用地震波勘测技术来研究地层应力释放现象及地层结构扫描成像,在此过程中形成了TRT技术。TRT技术的基本原理是利用了地震波在岩土体传播过程中,遇到具有不同震动特性的岩土区带间的界面时,部分地震波能量将产生反射的特性,绝大多数地质结构异常及岩性变化,在地震信号可及的距离范围内,均可形成可探测的地震反射。在为美国国家安全局管辖单位及海外客户服务的过程中,TRT技术飞速发展,在震源上先后采用炸药爆炸、风镐或挖掘机、电磁波发生器、锤击等作为震源,使勘测成本越来越低,操作越来越方便;在软件上,成功实现了由2D成像到3D成像的跨越,使得勘测结果显示更为准确、全面、直观。为了更好地推广这一业界独有的先进技

术，美国 C-ThruGround 工程有限公司从美国国家安全局继承了相关资产，进行独立的商业运作，推出了 TRT6000 超前地质预报系统。

TRT6000 超前地质预报系统采用地震层析成像及全息岩土成像技术，该技术是常用的利用信号波形变化来估计介质性质变化的位置和范围的反演技术，其基本原理是基于地震能量在不同种类介质中以不同的衰减率和速度传播。通常，与破碎或裂隙发育的岩土体或空洞条件相比，地震波在完整坚硬的介质中传播时，具有更高的传播速度和更低的衰减。

云南地处特提斯—喜马拉雅构造域与滨太平洋域的交接部位。岩浆活动强烈，变质作用广泛，地质构造复杂。云南的西北部与青藏高原连接，地壳的后期演化受着喜马拉雅和青藏高原的强烈影响，自晚第三纪以来，云南一直保持着很强的活动性，并且是我国现今强烈地震活动区之一。复杂的地质条件为云南省的隧洞工程建设带来了极大的困难，同时也为云南的隧洞施工中超前地质预报应用和研究提供了肥沃的土壤。

早在 2010 年 10 月，云南省水利水电勘测设计研究院向主管部门提出申请，把“TRT6000 在隧洞施工中地质超前预报应用研究”作为云南省重大水利科技项目，获主管部门批准后，于 2010 年 11 月成立了课题组。在历时五年多的时间里，课题组调研了许多国内相似工程，查阅了大量国内外相关资料和文献，咨询了许多国内外知名专家和学者，并且在牛栏江—滇池补水工程的输水隧洞以及相关工程进行超前地质预报 350 次，累计预报里程 51.1km，获得了宝贵的隧洞超前地质预报素材，取得了丰富的工程实践经验，为课题研究打下了扎实的基础。

本书共 8 章。第 1 章介绍了地质超前预报的现状，阐述了项目研究意义、研究内容以及研究思路；第 2 章介绍了 TRT6000 超前地质预报基本原理以及操作流程；第 3~6 章针对地下水、空腔、断层破碎带以及围岩分类等隧洞工程中常见的工程地质问题进行研究，从基本地质特征、地震波特征等方面入手，通过图像对比，总

结出不同地质体的图像特征；第7章以工程实践为基础，提出TRT6000超前地质预报的优化探索；第8章介绍本书研究的主要结论，并对TRT6000在隧洞施工中超前地质预报应用中存在的主要问题进行了阐述，以期在今后的工程实践中加以研究和解决。

研究工作及本书的撰写得到了水利部水利水电规划设计总院、石家庄铁道大学、美国C-Thru Ground工程有限公司、中国铁道科学研究院、山东广信工程试验检测集团有限公司的大力支持，研究过程中得到了牛栏江—滇池补水工程协调领导小组办公室、云南建工集团有限公司、中铁五局集团有限公司、中铁十四局集团有限公司、中铁十六局集团有限公司、福建水利水电工程建设有限公司、中国水利水电第五工程局有限公司、中国水利水电第十四工程局有限公司的大力帮助，在此致以诚挚的谢意。

由于编者的学识和水平有限，书中难免存在疏漏和不妥之处，恳请读者和专家指正。

编 者

2016年8月

目 录

序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 研究意义	1
1.2 现状调查	4
1.3 研究内容	6
1.4 研究思路	7
第 2 章 TRT6000 超前地质预报原理及操作流程	8
2.1 TRT6000 超前地质预报的理论基础	8
2.2 TRT6000 超前预报工作原理	12
2.3 TRT6000 超前预报解译原理	14
2.4 TRT6000 超前预报设备主要技术参数	17
2.5 TRT6000 超前预报数据采集	18
2.6 TRT6000 超前预报数据处理	22
第 3 章 TRT6000 在隧洞工程地下水超前预报中的应用	26
3.1 地下水对隧洞围岩的作用	27
3.2 地下水工程地质特征	29
3.3 地下水的地震波特征	32
3.4 地下水预报的特殊性和复杂性	34
3.5 地下水预报的主要思路	35
3.6 TRT6000 超前探测地下水的工程实例	35
3.7 TRT6000 超前探测地下水的图像特征	44

第 4 章	TRT6000 在隧洞工程空腔超前预报中的应用	62
4.1	空腔对隧洞工程的危害	62
4.2	岩溶空腔基本地质特征	64
4.3	采空区基本地质特征	65
4.4	空腔的地震波特征	66
4.5	TRT6000 超前探测空腔的工程实例	67
4.6	TRT6000 超前探测空腔的图像特征	74
第 5 章	TRT6000 在隧洞工程断层破碎带超前预报中的应用	78
5.1	断层破碎带对隧洞工程的危害	78
5.2	云南地区地质构造特征	80
5.3	断层破碎带的基本地质特征	81
5.4	断层破碎带的地震波特征	83
5.5	TRT6000 超前探测断层破碎带的工程实例	84
5.6	TRT6000 超前探测断层破碎带的图像特征	90
第 6 章	TRT6000 在隧洞工程围岩分类超前预报中的应用	93
6.1	影响围岩分类的地质因素	93
6.2	围岩稳定性及支护类型	95
6.3	TRT6000 超前探测围岩分类工程实例	96
第 7 章	TRT6000 超前地质预报的优化探索	103
7.1	测量坐标的优化	103
7.2	激发震源的优化	103
7.3	布置参数的优化	104
7.4	资料解译的优化	106
第 8 章	结论及存在问题	107
8.1	结论	107
8.2	存在问题	108
参考文献		110

第 1 章 概 述

1.1 研 究 意 义

在隧洞的开挖施工过程中，由于前方地质情况不明，经常会因遇到断层、破碎带、暗河和溶洞等不良地质体而导致塌方、地下泥石流、涌水、流砂和冒顶等地质灾害发生。这些地质灾害的发生，往往会造成人员伤亡和设备损坏，并严重影响工程施工进度，给国家和人民带来严重的损失。

随着我国建设事业的发展和不断深入，出现了越来越多的隧洞工程，并且隧洞工程的地质条件也越来越复杂，特别是一些深埋长隧洞，尽管在施工前进行了大量的地质勘察工作，但由于前期地质勘察工作受到勘察技术手段和方法以及勘察经费的限制，期望在隧洞施工前完全查明隧洞围岩的状态和特性，准确地预测隧洞施工中可能发生地质灾害的位置、性质和规模是十分困难的。随着隧洞施工的逐步深入，其安全隐患会逐渐暴露出来，这时需要在施工过程中采取有效的方法，对隧洞前方的不良地质体进行准确的超前预报，并针对前方存在的不良地质体进行工程地质评价，提出相应的处理、防范措施，避免地质灾害的发生。因此，超前地质预报已被列为隧洞施工必不可少的技术环节。

在国内外已进行施工或已建成的隧洞工程中，对掌子面前方待开挖的隧洞围岩、地质构造和地下水等进行较准确的预报，特别是对不良地质体（如地下水、破碎带、软岩等）的准确预报，指导隧洞开挖过程中进行有效支护，对有效防止工程事故的发生，保证工

程进度,减少工程投资具有重要的意义。如宜昌一万州铁路马鹿箐隧道在施工过程中发生“1·21”涌水事故,最大涌水量达 $30\text{万}\text{m}^3/\text{h}$,此次事故造成11人死亡,事故处理长达1年多的时间,为施工人员的生命安全和工程的施工进展带来了极大的损失;2002年株六铁路复线大竹林隧道发生大规模地下水突涌灾害,突涌水总量达 $16000\text{m}^3/\text{d}$,造成隧道施工停工132d之久,直接经济损失455万元;渝怀线关键性控制工程圆梁山深埋特长隧道发生了大规模地下水突涌灾害,泥石流状物质瞬间充满了整个超前导坑,坑道内用于出渣的钢轨发生严重扭曲,造成隧道停工33d,直接经济损失201万元;云南昆明牛栏江—滇池补水工程输水隧洞大五山隧洞6号斜支洞,开挖过程中,发生涌水量约 $2000\text{m}^3/\text{d}$ 的大涌水,已开挖洞段被水淹没100多米,人员遇险,工期延误,并导致地表泉水疏干,严重影响了当地居民的生产、生活;牛栏江—滇池补水工程的输水隧洞大五山隧洞8号斜支洞发生涌水和大面积坍塌,已开挖洞段被淹埋100多米,开挖机具被埋,人员遇险,花费大量的资金进行处理,工期延误达半年;牛栏江—滇池补水工程输水隧洞金奎地隧洞6号支洞由于采信了超前地质预报对隧洞K0+150~K0+170段预报的“涌水量大,围岩稳定性极差”的结果,施工过程中采取了超前排水措施,并进行了超前管棚支护,安全穿过了该破碎带洞段;牛栏江—滇池补水工程干河泵站引水隧洞开挖过程中,同样采纳了超前地质预报结果,提前做好了人员、设施安全撤离方案,并做好强排水措施,虽然隧洞开挖至K2+470时,揭露了涌水量达 $1.4\text{m}^3/\text{s}$ 的地下暗河,但对人员和设施安全未造成影响。类似的工程实例不胜枚举,可见采用和不采用超前地质预报,并积极做出相应的工程措施处理,在隧洞施工过程中带来的人员、机具、环境安全和工期的保证、资金的投入效果是大不相同的,超前地质预报的社会效益、经济效益和安全保障是显而易见的。

隧道反射层析扫描成像技术(Tunnel Reflection Tomography),简称TRT。20世纪60年代,在美国先进技术发展计划基金支持下,美国国家安全局网罗了众多资深地球物理学家应用地震波勘测技术

来研究地层应力释放现象及地层结构扫描成像,在此过程中形成了 TRT 技术。TRT 技术的基本原理是利用了地震波在岩土体传播过程中,遇到具有不同震动特性的岩土区带间的界面时,部分地震波能量将产生反射的特性,绝大多数地质结构异常及岩性变化,在地震信号可及的距离范围内,均可形成可探测的地震反射。在为美国国家安全局管辖单位及海外客户服务的过程中,TRT 技术飞速发展,在震源上先后采用炸药爆炸、风镐或挖掘机、电磁波发生器、锤击等作为震源,使勘测成本越来越低,操作越来越方便;在软件上,成功实现了由 2D 成像到 3D 成像的跨越,使得勘测结果显示更为准确、全面,直观。为了更好地推广这一业界独有的先进技术,美国 C-ThruGround 工程有限公司从美国国家安全局继承了相关资产,进行独立的商业运作,推出了 TRT6000 超前地质预报系统。

TRT6000 超前地质预报系统采用地震层析成像及全息岩土成像技术,该技术是常用的利用信号波形变化来估计介质性质变化的位置和范围的反演技术,其基本原理是基于地震能量在不同种类介质中以不同的衰减率和速度传播,通常,与破碎或裂隙发育的岩土体或空洞条件相比,地震波在完整坚硬的介质中传播时,具有更高的传播速度和更低的衰减。

虽然 TRT 技术也是基于地震波反射原理,但在观测方式和资料处理方法上与其他常规的反射地震法有很大不同,它采用的是空间多点阵列接收和激发。检波器和激发的炮点呈空间分布,以充分获得空间波场信息,提高波速分析和不良地质体的定位精度。在这方面较其他常规的地震反射法有明显的改进。TRT 资料处理的主要的技术环节是速度扫描和偏移成像,不需要读走时。这种方法对岩体中反射界面位置的确定、岩体波速和工程类别的划分等都有较高的精度。TRT 技术勘测成本低廉,操作简单,结果准确、全面、直观,代表了隧道超前地质预报领域最新领先的技术,是隧道超前地质预报技术发展的方向。

TRT6000 超前地质预报系统具有以下优点:①使用锤击作为

震源,安全性高,不需要炸药,在煤层、含瓦斯地层中也可以进行测试;②使用锤击作为震源,可在同一点作多次锤击,通过信号叠加,使异常体反射信号更加明显;③用锤击作为震源克服了爆炸产生的高能量对周围岩体产生挤压、破坏现象,从而保证能接收到真实的地震波信号;④采用空间多点激发和接收观测方式,其检波器和激发的炮点呈空间阵列分布,能够获得足够的空间波场信息,从而使前方地质缺陷的定位精度大大提高;⑤数据处理关键技术是速度扫描和偏移成像,对岩体中反射界面位置的确定、岩体波速和工程类别的划分都有较高的精度,具有较大的探测距离,并且可以获得3D成果图像;⑥能描绘到隧道水平和垂直方向的所有地质信息;⑦成本低廉,预报快速,准确率高。

由于 TRT6000 具有其他物探方法难以企及的优越性,在欧美国家获得了广阔的市场,在国内也得到广泛的应用,但由于 TRT6000 面世时间短,应用其进行隧洞超前地质预报尚处于探索阶段,具有较大的应用前景和超前地质预报技术水平提升空间,因此,开展 TRT6000 在隧洞施工中地质超前预报应用研究十分必要。

云南水院于 2009 年引进 TRT6000 超前地质预报系统,是我国水利部门以及云南省首家引进该项先进技术的使用单位。迄今为止,云南水院应用 TRT6000 超前地质预报系统,累计在牛栏江—滇池补水工程的输水隧洞以及相关工程进行超前地质预报 350 次,累计预报里程 51.1km,取得了很好的应用效果,填补了我国水利部门以及云南省在应用 TRT 技术进行隧洞超前地质预报方面的空白。与此同时,云南水院结合云南地区地质构造复杂的具体情况,对 TRT6000 超前地质预报系统在云南地区的应用进行了尝试和探索,以期将该项先进技术进行消化和吸收,并转化为先进生产力。

1.2 现状调查

隧洞建设过程中对隧洞工程地质条件的认知和掌握程度是确保

隧洞快速、安全修建的决定性因素之一。尽管施工前进行了大量的地质勘察工作,但由于当前勘察技术手段和方法的限制,加上地质条件的复杂多变,期望在隧洞施工前完全查明隧洞围岩的状态和特性,准确地预测隧洞施工中可能发生地质灾害的位置、性质和规模是十分困难的。因此,世界各国隧洞工程界都十分重视超前地质预报工作。

隧洞开挖中引发地质灾害的因素是多种多样的(如地下水、有毒或有害气体、高地温、高地应力等),而由于人们对隧洞地质特性认识不足、施工方法不当也可引起地质灾害(如塌方冒顶等)。人们对岩土物理、力学、化学性质的了解和岩体本身结构状态的认识,需通过多种勘探试验手段,才能获得定性和定量分析的依据。

超前地质预报主要是加强隧洞施工期间的地质工作,是在隧洞开挖之前,除根据开挖时揭露出来的实际地质情况,校正、补充地勘时未能查到的地质资料外,还要根据这些成果资料,分析推断掌子面前方的地质情况,是否存在前期勘察时没有查到的不良地质体,以便预先采取措施。尽管隧洞施工超前地质预报已引起国内外隧洞工程界的重视,也做了许多卓有成效的研究工作,但到目前为止还没有一套系统的普遍适用的方法,国内外隧洞工程的重大地质灾害仍时有发生。因此,准确预报隧洞前方的地质条件是隧洞建设者的迫切要求,20世纪80年代以来世界各国都把这类问题列为重点研究课题。但是隧洞施工超前地质预报又是一项复杂而艰难的任务,尚需在工程实践中不断创新、优化、总结、完善和提高,要真正搞好隧洞施工超前地质预报任重道远。

目前常见的超前地质预报方法主要有直接预报法、地质分析法、物探法以及地质物探综合分析法等。直接预报法主要有水平钻孔、超前导坑;地质分析法主要有断层参数预测法、地质体投射法、正洞地质编录与预报等;物探法主要有TSP超前预报技术、地震负视速度法、TST超前预报技术、水平声波剖面法(HSP)、TRT超前地质预报技术、陆地声纳法、面波法、地质雷达技术、红外探水法、BEAM法等;地质物探综合分析法是以地质工程师

为主、物探及相关工程技术人员共同完成超前预报工作，地质和物探有机的结合。

当前国内水工隧洞受施工环境、施工场地以及施工设备的限制，水工隧洞内难以采用爆破震源进行超前地质预报，且水工隧洞通常断面尺寸较小，采用人工爆破震源需占用掌子面，影响工程施工进度；目前国内外常用的超前地质预报设备大多存在探测距离短、预报精度不够的缺陷，且没有三维成像技术。TRT 技术采用锤击震源、探测距离远、预报精度高，而且具有三维成像技术，弥补了上述超前预报技术的不足。

美国 C-ThruGround 工程有限公司于 2006 年推出 TRT6000 超前地质预报系统，TRT6000 的面世极大地推进了隧洞超前地质预报技术。但由于 TRT6000 面世时间短，应用其进行隧洞超前地质预报尚处于探索阶段，目前国内应用 TRT6000 进行隧洞超前地质预报多以生产厂家提供的《应用手册》为基础进行，应用 TRT6000 进行隧洞超前地质预报并没有取得突破性的进展。

1.3 研 究 内 容

本书共完成了以下几项研究内容：

(1) 调研分析了国内外隧道超前地质预报的应用现状，结合现有的超前地质预报技术特点，对 TRT 技术的应用进行消化和吸收。

(2) 依托牛栏江—滇池补水工程的输水隧洞以及相关工程，在云南地区进行超前地质预报 350 次，累计预报里程 51.1km。

(3) 结合云南地区工程地质、水文地质的特点，总结了云南地区隧洞施工中常见不良地质体（地下水、空腔以及断层破碎带等）的图像特征。

(4) 对 TRT6000 超前地质预报系统的应用进行了优化探索。

(5) 提出了 TRT6000 超前地质预报系统目前存在的不足，并通过分析研究，找出不足的原因。