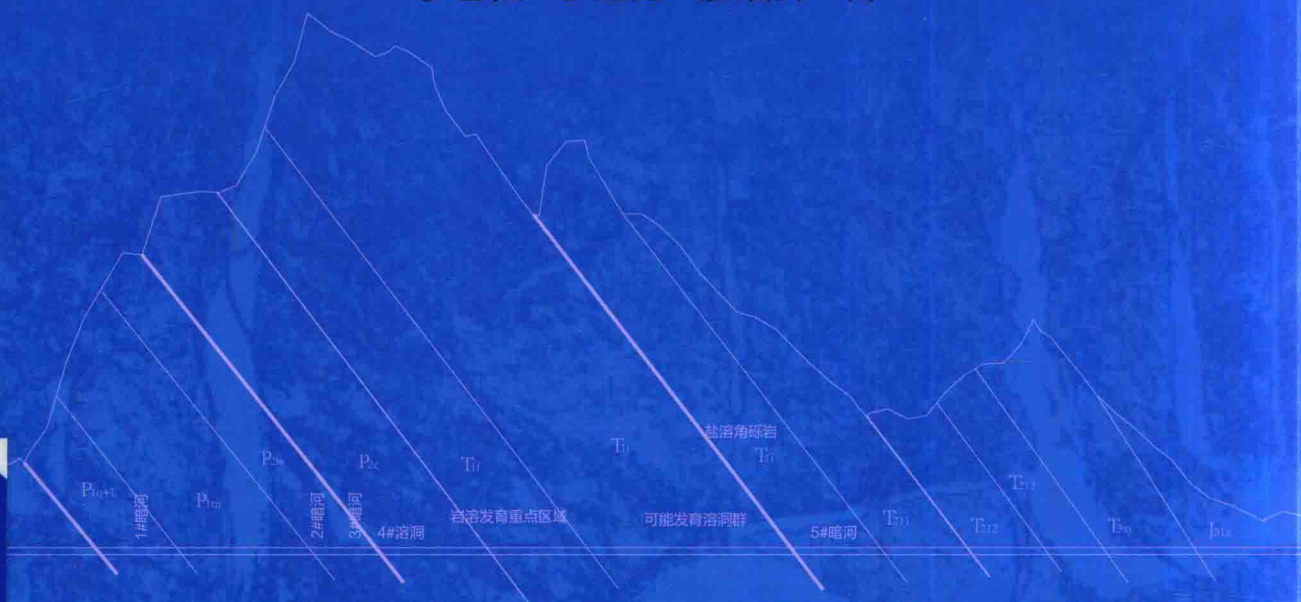


Groundwater Chemical Kinetics and
Fractal Characteristics of Karst Tunnel

岩溶隧道地下水化学动力学 及分形特征

李苍松 丁建芳 廖烟开 著



张外借



科学出版社

国家自然科学基金委员会面上项目（项目批准号：41372334）资助

岩溶隧道地下水化学动力学及分形特征

李苍松 丁建芳 廖烟开 著



科学出版社

内 容 简 介

本书在大量的工程实践基础上,针对严重危及隧道工程施工和运营安全的岩溶涌水、突泥等地质灾害问题,分析指出岩溶及地下水的准确预报或探测是解决问题的关键。在此基础上,以隧道开挖揭露的岩溶形态和岩溶地下水为研究对象,深入开展岩溶含水介质特性及其作用机理研究。通过现场监测、理论分析和室内模拟实验等手段,将岩溶地下水动力学、水化学、水-岩相互作用理论和分形理论相结合,在岩溶动力系统环境效应分析基础上,开展岩溶地下水的化学动力学特性、岩溶形态的分形特征,以及岩溶地下水化学成分与岩溶形态之间的相关性研究,建立基于水化学动力学参数和岩溶形态分形指数的岩溶发育程度评价模型,提出岩溶发育程度的水化学动力学-分形指数评价技术,对岩溶及地下水预报具有重要的工程实际指导意义,为提高岩溶及地下水预报准确性提供了新的理论和方法。

本书可供从事隧道及地下工程的科技工作者参考,也可作为高等院校工程地质水文地质专业的研究生及本科生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

岩溶隧道地下水化学动力学及分形特征 / 李苍松, 丁建芳, 廖烟开著.
—北京: 科学出版社, 2017. 6

ISBN 978-7-03-053580-1

I. ①岩… II. ①李…②丁…③廖… III. ①隧道工程-岩溶水-地下水动力学 IV. ①U452.1②P641.134

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 131950 号

责任编辑: 韩 鹏 刘浩旻 姜德君 / 责任校对: 何艳萍
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 北京图阅盛世文化传媒有限公司

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京科印技术咨询服务公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 11 1/2

字数: 277 000

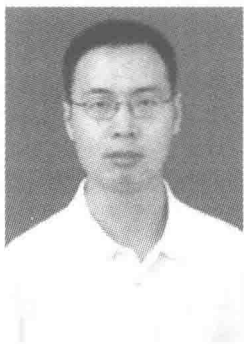
定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介



李苍松，男，1971年生，重庆人，博士，教授级高工，中铁西南科学研究院有限公司副总工程师。茅以升铁道工程师奖获得者，中国中铁青年科技拔尖人才、突出贡献专家，第十一批四川省学术和技术带头人后备人选。1997年7月原长春地质学院水文地质与工程地质专业硕士毕业，2007年1月获西南交通大学桥梁与隧道工程博士学位。长期从事隧道工程地质、水文地质及物探技术研究工作，在隧道施工期地质超前预报、岩溶及地下水作用机理研究方面有较深造诣。主持或主要参加完成省部级以上科研项目10项，其中国家自然科学基金2项、国家863项目1项。成果获省部级科学技术特等奖2项、一等奖1项、二等奖4项，国家发明专利1项、实用新型专利2项。现任中国物理学会铁道分会、工程物探专委会、国际环境与工程地质学会（IAEG）中国国家小组等多个学会会员。发表学术论文80余篇，其中第一作者30余篇。出版第一作者专著1部《岩溶及地下水超前预报技术》，参与编写《隧道地质超前预报》《隧道工程岩体分级》等专著4部。



丁建芳，男，1979年生，河南商丘人，高级工程师，中铁西南科学研究院有限公司工程地质研究所所长。2002年7月西南交通大学土木工程专业本科毕业进入现单位。长期从事工程地质、隧道超前地质预报、工程物探工作。近年来主持或主要参加完成国家、省部级重点科研课题8项，在TBM施工隧道超前地质预报、岩体温度法涌水预报和大跨距跨孔声波探测等技术方面实现了多项突破，研究成果获省部级以上科技奖一等奖3项、二等奖5项。在《现代隧道技术》《声学技术》《工程地质学报》《工程地球物理学报》等刊物发表论文10余篇，参与编写《岩体温度法隧道施工掌子面前方涌水预报》《隧道工程地质学》等专著3部。



廖烟开，男，1980年生，广东人，硕士，中铁西南科学研究院有限公司工程地质研究所高级工程师。2005年7月于吉林大学建设工程学院工程地质专业毕业进入现单位，2011年7月获西南交通大学地球探测与信息技术硕士学位。主要从事隧道超前地质预报、隧道风险评估及咨询项目和围岩监控量测工作，在隧道超前地质预报、监测及物探新技术应用、隧道施工地质和隧道施工安全控制技术方面有较深入的研究。主持或主要参加完成省部级以上科研项目6项，研究成果获省部级以上科技奖特等奖1项、一等奖3项、二等奖2项，实用新型专利1项。公开发表学术论文15篇，其中第一作者发表论文6篇。

序

中铁西南科学研究院有限公司水文地质工程地质专业的后起之秀李苍松博士等三位年青学者，完成承担的国家自然科学基金有关科研项目实验研究的内容，并在与该院工程地质研究所同仁多年共同合作、进行大量工程实践的基础上，总结提炼而形成该书。著作者就隧道岩溶的相关课题，进行了新的探索，取得了可喜的成果。

该书首先对相关课题的国内外研究现状和发展趋势作了简要的评述；通过实验研究了隧道开挖条件下岩溶溶蚀作用机理；对隧道所处地表及洞内开挖揭露的岩溶宏观和微观形态，均应用分形理论进行研究；也研究了岩溶隧道地下水化学动力学特征和相关参数；然后着重对岩溶地下水化学动力学与岩溶分形特征的相关性开展研究，并进行耦合，最后得出隧道岩溶发育程度的评价技术方法。使隧道岩溶发育程度的判别方法有较客观的、可衡量的标准，这是该书的新贡献、新亮点。这对可溶岩地区各种地下工程（交通隧道、输水隧洞等）的修建、预防和治理岩溶地质灾害，具有实用和指导意义。

任何科学技术的点滴进步，无疑都是在前人研究成果基础上的进步和提高。著作者继承和发展了他们的老师和前辈的理论和研究成果，是站在前人的肩膀上继续提高，取得新的进步。该书提出的隧道岩溶发育程度的地下水化学动力学与分形指数评价技术，对提高隧道岩溶地质灾害（涌水、涌泥等）的地质预报准确性，提供了新的理论和方法。对从事隧道和地下工程的工程技术人员、水文地质工程地质专业人员和大专院校学生，均有参考价值。

余从事工程地质工作数十载，曾经主持过原铁道部部控岩溶科研项目的工作，深知有关岩溶课题难度之大，非一朝一夕可以攻克。“长江后浪推前浪，世上新人赶旧人”，这是自然规律。在老夫耄耋之年，喜见新一代茁壮成长，又有新作问世，真是“雏凤清于老凤声”！特作序致贺并推荐之。

陈戌宗 2017.4.8

前 言

在我国已建成的多条铁路、高速公路，尤其是在我国中西部地区，不可避免会穿越复杂的岩溶地区，大量的长大岩溶隧道在施工及运营期间常常遭遇岩溶涌水、突泥等岩溶地质灾害问题，严重危及施工人员和施工机具的安全，影响施工安全和进度，严重时会导致整个施工的失败，并给隧道运营留下安全隐患。曾经发生岩溶地质灾害的隧道包括：大瑶山隧道、南岭隧道、梅花山隧道、圆梁山隧道、武隆隧道、野山关隧道、齐岳山隧道等。近年来建设完成并已开通运营的贵广铁路、兰渝铁路重庆段、沪昆铁路、云桂铁路、成渝客运专线等，以及正在建设的成贵铁路、成昆铁路、蒙华铁路、渝怀铁路二线、黔张常铁路等均存在多条长大岩溶隧道，并将要遭遇甚至已经遭遇不同程度、不同规模的岩溶问题及岩溶涌水、突泥等地质灾害。

从20世纪50年代开始，国内特别是路内科研、设计、施工、运营等单位 and 部门，对岩溶地区新建和既有铁路隧道的岩溶地质灾害治理做了大量工作，取得了一定成效，并积累了不少经验，对以后的科研和工程灾害防治工作，无疑是颇有助益。然而，我国铁路建设中因岩溶涌水、突泥等地质灾害引起的安全问题、经济损失和环境影响等教训也相当深刻。众多工程实践表明，长大隧道岩溶及地下水问题始终是一个老大难问题，并已成为一个国际性难题。可以说，岩溶地区长大隧道工程中，岩溶及地下水的危害及其防治，特别是事前的预测预报问题，还远远没有解决。

解决隧道岩溶及地下水难题的关键在于岩溶及岩溶地下水的准确预报或探测。其中，急需解决的问题包括：岩溶地质体的位置、规模及性质等预报准确性尚需进一步提高，复杂岩溶地质体是否含水、是否会发生涌水、突泥等灾害的预报需要进一步加强。工程实践表明，解决复杂的岩溶及地下水预报技术问题，应用现代先进的物探技术是必需的，但目前仅靠物探技术仍不能从根本上解决问题。为此，需要在现有预报技术的基础上深入开展岩溶及岩溶地下水作用机理研究，特别是从岩溶含水介质的特性研究入手，探索岩溶地下水与岩溶形态之间的作用规律及相关性，利用水化学动力学参数和岩溶形态分形指数等参数进行岩溶发育程度评价，从而为岩溶及地下水预报或探测，以及岩溶及地下水治理提供地质参考依据。

在国家自然科学基金委员会的资助下，中铁西南科学研究院有限公司的李苍松博士及其研究团队，通过开展国家自然科学基金面上项目“岩溶隧道地下水化学动力学及分形特征研究”（项目批准号：41372334），获得相应的研究成果，为解决岩溶及地下水预报或探测准确性问题从机理方面提供了新的理论和方法，具有重要的理论和工程实际指导意义。于是，在项目研究成果基础上进一步总结提炼撰写本书。

作者在大量的工程实践基础上，针对严重危及隧道工程施工和运营安全的岩溶涌水、突泥等地质灾害问题，分析指出岩溶及地下水的准确预报或探测是解决问题的关键。在此基础上，以隧道开挖揭露的岩溶形态和岩溶地下水为研究对象，深入开展岩溶含水介质特

性及其作用机理研究。通过现场监测、理论分析和室内模拟实验等手段,将岩溶地下水动力学、水化学、水-岩相互作用理论和分形理论相结合,在岩溶动力系统环境效应分析基础上,开展岩溶地下水的化学动力学特性、岩溶形态的分形特征,以及岩溶地下水化学成分与岩溶形态之间的相关性研究,建立基于水化学动力学参数和岩溶形态分形指数的岩溶发育程度评价模型,提出岩溶发育程度的水化学动力学-分形指数评价技术。

本书主要分七章:第1章绪论;第2章典型地区隧道岩溶动力学系统的环境影响因素分析;第3章岩溶隧道地下水动力学及水化学动力学特征;第4章隧道开挖揭露岩溶形态及其分形特征;第5章隧道开挖条件下岩溶溶蚀作用机理实验研究;第6章岩溶形态分形特征与水化学动力学特征的相关性研究;第7章岩溶发育程度的水化学动力学-分形指数评价技术。

本书中所展现的研究成果是在中铁西南科学研究院有限公司工程地质研究所全体同仁的共同努力下完成的,是大家辛勤劳动的结晶,在此表示衷心的感谢!在完成国家自然科学基金项目过程中,吉林大学环境与资源学院的曹玉清教授、王福刚教授、赵岩杰硕士等给予了大力支持,中铁西南科学研究院有限公司的高菊如教授级高工、何发亮教授级高工、陈成宗研究员也给予了指导和帮助,在此一并表示感谢。最后,还要特别感谢国家自然科学基金委员会的指导和帮助。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏及不足之处,衷心希望读者批评指正!

李苍松

2017年3月18日

目 录

序

前言

第1章 绪论	1
1.1 国内外研究现状及发展动态分析	1
1.1.1 岩溶隧道涌水突泥地质灾害治理的技术现状	1
1.1.2 关于岩溶及地下水预报技术	2
1.1.3 关于岩溶及地下水作用机理研究	4
1.1.4 关于岩溶形态的研究	5
1.1.5 研究技术分析小结	6
1.2 主要研究内容及其创新性	6
1.3 应用前景分析	7
第2章 典型地区隧道岩溶动力学系统的环境影响因素分析	9
2.1 我国岩溶区域划分概况	9
2.2 不同地区岩溶隧道统计及岩溶发育情况	10
2.3 典型地区隧道岩溶动力学系统划分	17
2.3.1 岩溶动力学系统的基本理论概述	17
2.3.2 北方地区岩溶动力学系统划分	18
2.3.3 南方地区岩溶动力学系统划分	20
2.4 典型地区岩溶隧道施工地质灾害统计及其环境影响因素	21
第3章 岩溶隧道地下水动力学及水化学动力学特征	29
3.1 岩溶发育的地下水动力条件及岩溶垂直剖面分带	29
3.1.1 岩溶发育的地下水动力条件	29
3.1.2 岩溶地下水动力条件作用下的岩溶垂直剖面分带	30
3.2 岩溶地下水的水文地球化学简化模型	33
3.3 典型地区岩溶隧道地下水化学成分的变化特征及水化学动力学特征	40
3.3.1 典型地区岩溶隧道地下水化学成分的变化特征	40
3.3.2 岩溶地下水的水化学动力学特征	44
第4章 隧道开挖揭露岩溶形态及其分形特征	50
4.1 隧道地表及洞内开挖揭露的岩溶形态	50
4.1.1 隧道地表岩溶形态	50
4.1.2 隧道洞内开挖揭露的岩溶形态	50
4.1.3 岩溶填充物的多样性	51

4.2	应用分形理论开展岩溶研究的可行性	51
4.3	岩溶形态的宏观规律与微观规律研究的辩证关系	54
4.4	隧道开挖揭露岩溶形态的分形计算方法	54
4.4.1	岩溶元概念	54
4.4.2	岩溶分形维数计算方法	55
4.4.3	岩溶分形维数计算实例	56
4.5	岩溶发育程度的分形指数评价方法	72
4.5.1	岩溶发育程度的分形评价指数	72
4.5.2	岩溶发育程度分形指数评价方法	73
第5章	隧道开挖条件下岩溶溶蚀作用机理实验研究	75
5.1	溶蚀实验研究技术现状	75
5.2	溶蚀实验方案设计	77
5.2.1	实验目的、内容及预期目标	77
5.2.2	实验原理及装置设计	77
5.2.3	实验方法及步骤设计	78
5.3	溶蚀实验的具体实施	82
5.3.1	实验装置及水样选取	82
5.3.2	实验步骤	83
5.3.3	实际工作量统计	85
5.4	实验结果初步分析与讨论	85
5.4.1	不同 pH、温度与流速状态下的溶蚀量	85
5.4.2	不同 pH、温度与流态下的微观结构分析	88
5.4.3	不同 pH、温度与流速状态下的水化学成分	89
5.4.4	实验小结	93
第6章	岩溶形态分形特征与水化学动力学特征的相关性研究	95
6.1	溶蚀磨片的微观岩溶分形特征研究	95
6.1.1	溶蚀磨片微观分析工作简述	95
6.1.2	电镜实验结果分析	95
6.1.3	偏光显微镜实验结果分析	105
6.2	岩溶地下水的水化学动力学参数及水化学分形特征	118
6.2.1	溶蚀液水化学三线图	118
6.2.2	溶蚀液的水化学动力学参数特征	121
6.2.3	溶蚀液的水化学分形特征	127
6.2.4	岩溶地下水的水化学动力学参数及水化学分形特征	136
6.3	微观岩溶分形特征与水化学分形特征的相关性研究	142
6.3.1	水化学成分及水化学动力学特征与岩溶发育程度的相关性	142
6.3.2	岩溶水水化学动力学参数与岩溶发育程度分形指数的相关性	143
6.3.3	水化学分形指数与微观岩溶分形指数的相关性	147

第7章 岩溶发育程度的水化学动力学-分形指数评价技术	150
7.1 岩溶发育程度评价的指标体系	150
7.1.1 岩溶发育程度的概念	150
7.1.2 岩溶发育程度评价的定性指标	153
7.1.3 岩溶发育程度评价的定量指标	155
7.1.4 岩溶发育程度的综合评价指标	156
7.2 基于水化学动力学-分形指数的岩溶发育程度评价模型及评价标准	157
7.2.1 基于水化学动力学-分形指数的岩溶发育程度评价模型	157
7.2.2 基于水化学动力学-分形指数的岩溶发育程度评价标准	158
7.3 岩溶发育程度评价技术的工程实践	158
参考文献	164

第1章 绪 论

1.1 国内外研究现状及发展动态分析

针对岩溶及地下水这一国际性老大难问题,国内外许多专家、学者分别从岩溶隧道涌水突泥地质灾害治理技术、岩溶及地下水预报技术、岩溶及地下水作用机理研究、岩溶形态研究等方面进行大量实验、研究工作,既积累了丰富的生产实践经验,又在机理及理论研究方面取得大量成果,为后续研究奠定了基础。

1.1.1 岩溶隧道涌水突泥地质灾害治理的技术现状

在隧道施工过程中,常常遭遇大型断层、破碎带、岩溶暗河、煤层瓦斯等不良地质引起的施工地质灾害,如塌方、涌水、突泥、瓦斯爆炸等。其中,隧道涌水、突泥是最常见的施工地质灾害。

长期以来,岩溶隧道涌水、突泥问题是国内外隧道工程施工所面临的重大难题,我国铁路建设中因岩溶涌水、突泥等地质灾害引起的安全问题、经济损失和环境影响等教训相当深刻。据不完全统计(陈强,2005),国内外隧道大型突水事件(涌水量 $>1.0\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$)中,70%为岩溶隧道;而在我国,约40%的长大岩溶隧道发生过大于 $1.0\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ 的严重突水,在我国西南、中南地区则达到甚至在50%以上。2003年以前,发生岩溶涌水、突泥的典型岩溶长大铁路隧道包括:大瑶山隧道、南岭隧道、大巴山隧道、中梁山隧道、梅花山隧道、平关隧道、胜境关隧道、燕子关隧道、梅子关隧道、娄山关隧道、岩角寨隧道、新排隧道、华蓥山隧道、圆梁山隧道、武隆隧道等。在最近十年内,已建成或在建的长大岩溶隧道发生涌水、突泥地质灾害的实例有宜万铁路的野山关、齐岳山、马鹿箐、大支坪等隧道,石太客运专线的太行山隧道,龙厦铁路的象山隧道,西格二线的关角隧道等,尤以宜万铁路最为典型。期间,众多隧道、地质专家或学者(蒋国云,2012;资宜、马士伟,2011;张梅等,2011;陈绍华,2010;李利平等,2010;黄鸿建、张民庆,2009)在岩溶及地下水灾害治理方面做了大量工作,分别从风险评价、灾害来源、发生机理、灾害预警及灾害治理等角度开展研究,积累了不少经验,对以后的科研和工程灾害防治工作具有重要的借鉴作用。

在对隧道施工可能发生的涌水、突泥等地下水灾害进行风险评估的基础上,隧道施工对地下水灾害的防治主要集中在两个方面:一是采用超前地质预报技术准确探测掌子面前方的各种不良地质条件;二是针对超前地质预报结果采取合理有效的防治措施。

针对隧道地下水的处治技术或防治措施,首先在隧道设计理念上主要经历了三次较大的转变(李苍松等,2012):20世纪90年代前的“以排为主”;20世纪90年代至21世纪

初的“以堵为主”；21世纪初至今的“以堵为主、限量排放”。不同部门在不同时期和社会经济条件下，提出不同的规范和不同的地下水处理措施。目前，尽管各部门规范对地下水处治的设计还不完全一致，但基本趋向于在不影响环境的情况下因地制宜、综合治理，并更多地考虑环境保护理念，根据隧道工程结构与地下水本身规律之间的相互作用，采取适合于环境的防排水措施及隧道结构设计。目前，“以堵为主、限量排放”的指导思想普遍应用于隧道工程实践中，但在隧道限排量的计算方法及限排标准的研究方面还不够深入。中南大学程盼（2014）在此方面进行了有益探索。杨会军和李丰果（2005）结合新七道梁公路隧道进行深埋长大隧道地下水处理技术探讨，根据地下水渗涌特性提出相应的防排水设计原则。张小华等（2007）针对铁路隧道防排水现状提出相应的措施和建议。卓越（2013）依托我国已修建的浏阳河水下隧道、厦门翔安海底隧道、青岛胶州湾海底隧道和营盘路湘江水下隧道工程，系统开展了钻爆法浅埋水下隧道防排水理论及应用研究。李苍松（2012）等提出的隧道地下水处治理念为：根据隧道所处环境和地下水敏感性、地层岩性等条件，充分考虑隧道工程周边的地下水环境效应，针对隧道不同埋深段及地下水发育状况采取不同的处理策略，因势利导、辩证排堵、防排合理，以排水不会对地表水环境产生较大负面影响、同时又能有效降低隧道衬砌外水压力为准则。在隧道施工地下水灾害防治技术实践方面，众多的隧道工程师在建设中付出了大量的心血甚至是代价，取得了大量实践性强的经验或技术（梁斌鑫，2014；何优，2012；陈运东，2009；黎庶、林胜利，2006；张浩，2014；汪海滨，2002；潘海泽，2009）。

从前面的分析可知，由于隧道工程地质、水文地质条件，特别是岩溶及地下水条件的极端复杂性，隧道施工地下水灾害（特别是隧道涌水、突泥地质灾害）防治技术方面还存在很大提升空间。隧道施工地下水灾害防治技术的提高为隧道施工安全、工程质量和工程运营安全等提供了可靠的技术保障，但正因为隧道施工期间不能完全有效地防治地下水灾害问题，于是给隧道工程质量和工程运营安全留下隐患，也就是说，工程运营后将产生大量的隧道病害及隧道地下水病害。

1.1.2 关于岩溶及地下水预报技术

大量的工程实践表明，岩溶及地下水的准确预报或探测仍然是一个亟待解决的难题。目前，隧道施工地质超前预报技术和方法很多，尤其是物探方法种类繁多（李苍松，2003）。应当说，对于一般不良地质体界线的超前地质预报技术是比较成熟的，但对岩溶及地下水超前预报技术来说，尽管已形成“以地质法为基础的综合物探技术”实施岩溶及地下水超前预报的共识，但在工程具体实施过程中，岩溶地质体的位置、规模及性质等预报的准确性还有待进一步提高，至于这些复杂的岩溶地质体是否含水，是否会发生涌水、突泥等灾害的预报难度更大（王洪勇，2004）。针对综合预报技术，中铁西南科学研究院有限公司何发亮及其团队做了大量前期研究和工程现场实验，以及预报工作（何发亮等，2001，2006；陈成宗，何发亮，2005）；王公忠（2010）在武广客运专线新大瑶山隧道采用了以野外地质调绘、洞内 CCD 地质编录、超前水平钻探、TSP203 及直流电法为主要探测手段的综合预报技术；张建设（2012）结合长昆线隧道施工采用了综合超前地质预报技术

体系。

隧道地下水预报的内容主要包括三个方面,也可以说是需要回答三个问题:是否存在含水的不良地质体?涌水量大小?水压力大小?

(1) 针对地质体是否含水问题,目前用于地下水预报的物探方法主要有电磁波反射法、瞬变电磁法、红外探测法、电法等,这些方法应用于隧道内的探测受到多种条件限制,应用效果较差,特别针对岩溶水预报来说,就更难达到预期效果(李苍松等,2013)。众多岩溶水文地质及物探专家、学者在此方面进行了不懈努力,如何发亮及其团队在应用岩体温度法预报是否有水方面做了大量探索性研究(何发亮等,2007,2009;李富明、何发亮,2011)。

(2) 对于涌水量的预测预报问题,特别是岩溶涌水量预测预报问题,始终是一个难以准确量化的问题(何发亮等,2001)。隧道施工期地下水涌水量的预测技术研究,经历了从最初的定性分析到定量评价和计算方向发展的历程,先后出现了隧道涌水量计算的确定性数学模型和随机数学模型两大类方法,得出一系列理论或经验解析公式,出现了多种计算方法和模型,如比拟法、水均衡法、井泉补给法、评分法、同位素氡(T)法,以及各种有限元数值模型、渗流-应力耦合模型等数学模拟系统分析法,在很大程度上促进了隧道涌水量预测理论研究的发展(林传年等,2008;贺玉龙等,2012;郭纯青等,2010;李苍松等,2003,2005)。近年来,国外在此方面的研究新进展主要为解析法与数值方法相结合进行隧道涌水量预测。例如,Song等(2006)基于地下水位变化和地下水补给率经验公式,分别采用解析法和数值模拟方法进行隧道地下水涌水量预测;Butscher(2012)根据解析法和数值模拟法计算结果,对稳态地下水渗入圆形隧道的涌水量进行对比分析;Jordi等(2011)以巴塞罗那地铁9号线为依托,建立准三位数值模型对TBM施工城市隧道的地下水涌水量进行预测。在国内,还有曾科(2012)、黄涛和杨立中(1999)、王建秀(2001)、康小兵等(2006)、刘文剑(2008)、蒙彦和雷明堂(2003)、张亦龙(2013)等众多隧道或地质专家、学者近年来对隧道涌水量预测理论及方法进行了深入研究,取得了大量研究成果。但是,在实际工程应用中仍然存在着尴尬的局面,预报准确性受到很大的质疑,预报精度能够在数量级上大致相当就已经是很好的结果了,至于分段准确预报的精度就更难评判了。分析原因认为,每一种预报方法都有其适用条件,关键在于研究人员对研究区水文地质模型、边界条件和初始条件等的把握,然后选择合适的涌水量预测模型和可靠的水文地质参数,只有这样才能进一步提高涌水量预测预报的准确性。

(3) 至于水压力预测问题,矿山工作者在矿坑顶底板涌突水方面有所研究(齐跃明,2009;白建军,2010;乔伟,2011)。隧道工程专家或学者针对隧道工程设计、施工过程中所遭遇的地下水问题,尤其是隧道衬砌水压力荷载问题,曾开展过大量研究工作,但该问题几十年来基本处于争论状态,各行业部门对富水地层中地下水压力对支护结构的影响认识并不一致,尤其是对外水压力能否折减仍存在一定争议,对地下水作用的认识仍未达成共识(张有天、张武功1980;王建宇,2008;陈林杰等,2008;郑波,2010)。徐则民等(2004)提出了充水水源为地下暗河、充水通道为管状、板状及裂隙网络3种条件下深埋岩溶隧道涌水水头压力的近似计算公式。张民庆等(2008)对渝怀铁路、宜万铁路重点岩溶隧道进行水压力实测研究指出:岩溶隧道水压力与上、下排泄基准面高程和排泄能力有

关,不能采用折减系数法确定。李苍松等(2011, 2012a)、郑波和王建宇(2011)在富水隧道设计理论和方法研究方面做了大量工作,系统研究了隧道施工对地下水流场的影响,提出不同埋深和岩性条件下、典型地形地貌及构造条件下隧道开挖对地下水流场的影响分析表,提出适合于不同防排水模式下隧道水荷载的计算模式,并指出隧道设计、施工应针对不同工程地质、水文地质条件下区别处治地下水问题,对今后的深入研究具有一定参考价值。

1.1.3 关于岩溶及地下水作用机理研究

长期以来,隧道施工地下水问题一直困扰着隧道工程界,其中岩溶地下水问题更是最棘手。众多专家、学者为了从根本上解决问题,开展了大量的隧道施工地下水作用机理研究,特别是岩溶及地下水作用机理研究,取得了丰硕的研究成果(李扬红等, 2009; 邓英尔等, 2004)。

对于一般的山岭隧道基岩裂隙水问题,研究内容主要包括隧道衬砌水压力、隧道结构-水荷载问题,山岭隧道地下水处理等方面的机理分析、数值模拟、设计理论及方法等,其中研究得最多的就是隧道地下水渗流场及渗流规律。刘福胜等(2012)开展了山岭隧道地下水渗流及加固参数的解析研究。付圣尧(2008)进行了深埋引水隧洞高水头渗流场模拟系统及关键技术研究。刘擎波(2011)开展了隧道地下水渗流模型研究。张浩(2014)开展了武都西隧道地下水渗流分析与涌水控制措施研究。刘志春(2015)开展了裂隙岩体隧道与地下水环境相互作用机理及控制技术研究,并应用于石太客运专线石板山隧道和贵广铁路东科岭隧道。事实上,隧道地下水压力对支护结构的影响认识并未达成一致,外水压力能否折减仍存在争议,对地下水作用的认识仍未达成共识。在开展富水隧道设计理论与方法研究过程中,李苍松等(2012b)在隧道开挖对地下水流场影响及隧道地下水处治原则方面取得一些成果和技术积累,但理论研究还不够深入,处置方法尚需在工程实际中验证和修正,尚需将地下水与围岩-衬砌结构之间的联合作用机理与地下水致灾构造的作用机理相结合,从而更深层次地开展隧道施工地下水作用机理研究,以及隧道病害地下水作用机理研究。

相比于一般的山岭隧道基岩裂隙水问题或城市地铁孔隙水问题,岩溶隧道施工过程中的岩溶地下水问题则复杂得多,其带来的岩溶涌水突泥等地质灾害风险极大。为此,国内外众多专家、学者针对岩溶及岩溶地下水作用机理方面开展大量的研究工作,特别是关于水-岩作用机理研究。水-岩相互作用是研究地下水中化学物质的形成与迁移、环境污染防治的主要基础理论,地下水与岩土体之间可发生离子交换、氧化还原、吸附解析等复杂的物理化学过程,地下水记录了流经途径的水文地质条件等环境信息,进行地下水化学分析,可研究地下水中化学组分的形成、分布、迁移和富集等规律。国外在岩溶泉域保护和岩溶含水层地下水开发等方面的大量研究尤为突出,其研究方法主要包括数值模拟、物理模型实验和现场监测及示踪实验等。一是数值模拟方面,Ryu等(2006)采用MODFLOW三维有限元软件,开展了基于非确定性水力传导系数的隧道施工地下水影响概率评价,Anwar和Sukop(2009)提出岩溶的水流及溶质运移的波兹曼单元模型;二是物理模型实

验方面, Angelini 和 Dragoni (1997) 以意大利北 Apennines 的 Bagnara 为例, 对岩溶泉模拟问题进行探讨。Faulkner 等 (2009) 对岩溶管道及裂隙中水流及溶质运移进行了物理模拟实验和数值分析研究。Ghasemizadeh 等 (2012) 以 Puerto Rico 北部海岸带灰岩含水层系统为例, 开展岩溶含水层的地下水流动和运移模型研究; 三是现场监测及示踪实验方面, Powers 和 Shevenll (2000) 根据抽水实验资料计算岩溶裂隙含水层的导水系数。Vincenzi 等 (2009) 应用多种示踪实验和水文地质监测研究意大利北 Apennines 一座铁路隧道对地表水和地下水的影响, Turner 等 (2010) 应用水的同位素示踪法研究加拿大 Old Crow Flats 湖的水均衡过程, Zuber 等 (2011) 应用环境示踪法估算水文地质参数, 并对水流运移模型的几个数学方法问题进行了讨论。另外, Goldscheider (2012) 从保护自然岩溶资源、生物多样性和生态系统服务需要的角度进行综合方法研究, Bicalho 等 (2012) 以法国的 Lez Sping 为例, 开展岩溶含水层中水流特征及水动力学反应的地球化学证据研究。可以看出, 针对岩溶及岩溶水作用机理的研究, 国外学者将水动力学和水化学紧密联系, 并尽可能采用环境同位素、水化学成分、示踪实验等分析水文地质参数, 研究水文地质条件。

国内工程应用领域, 不少专家对水-岩化学作用的宏观力学效应或岩体损伤等方面进行了大量有益的实验研究。彭永伟和梁冰 (2005) 开展了水化学对岩石损伤的实验研究。汤连生等 (2002) 开展了水-岩化学作用对岩石的宏观力学效应研究。王鹰等 (2004) 结合圆梁山隧道涌水实例, 运用地球化学和断裂力学有关理论分析了岩溶区深埋隧道的水岩相互作用机理, 探讨了水岩相互作用对岩溶地区隧道施工发生涌水、突泥的影响。王广才等 (2000) 开展了平顶山矿区岩溶水系统水-岩相互作用的随机水文地球化学模拟。曹玉清和胡宽谿等在地下水化学动力学方面进行了比较深入研究, 初步建立了“岩溶化学环境水文地质学”, 其实质是将理论化学和水文地质学结合, 将水动力学和化学反应融合在一起, 把地下水化学成分随径流路径增加或减少的运移形式和结果看成“物质”示踪过程, 利用物质运移变化具有空间和时间上的特点及规律, 计算并获取不同的水文地质参数, 定性、定量地评价地下水资源、水文地质条件, 以及评价组成碳酸盐岩矿物的溶蚀特点, 为开展岩溶地下水化学动力学研究奠定了较好的理论基础 (胡宽谿、杨青云, 1990; 曹玉清、胡宽谿, 1994; 曹玉清等, 2000, 2009)。山西煤田水文地质 229 队的李振拴 (1995) 在应用地下水化学动力学基本理论计算水文地质参数、开展矿区水文地质条件定量评价方面做了大量实践性工作。在应用水化学动力学法开展岩溶地下水评价、预报及水文地质参数等研究的还有黄勇等 (2007)、孙晋玉等 (2004)、王楠等 (2004)、邹鹏飞 (2012) 等。然而, 将地下水化学动力学应用于隧道工程实践的文献并不多见。李苍松等 (2003, 2005) 在渝怀铁路圆梁山隧道和武隆隧道岩溶地质预报中, 在应用常规水化学成分计算水动力学参数并进行隧道施工分段涌水量预测方面做了一些探索性研究, 并将该方法应用于贵广铁路三都隧道、沪昆铁路茅坪山隧道、四川南-大-梁高速公路华蓥山隧道等岩溶地下水预报项目中, 对工程施工防治岩溶地下水问题起到了积极的指导作用。

1.1.4 关于岩溶形态的研究

从表面上看, 不同的岩溶形态, 其发育分布形状极不规则, 甚至是杂乱无章的。但事

实上,改变观察的尺度,不同的岩溶形态又具有明显的自相似性和标度不变性。为此,国内外不少专家、学者应用分形理论开展岩溶问题研究,特别是在岩溶地貌及形态方面取得不少研究成果。李文兴等(1995a, 1995b, 1997)开展了岩溶介质分形理论及水资源评价应用研究,对岩溶洞穴进行了深入研究,如洞穴的分形弯曲度、洞穴形态空间的数学描述及分形计算、岩溶管道介质空隙率变化(视表征体元)及分形研究等,归结起来主要是对岩溶管道(洞穴)形态的数学描述和分形计算。郭纯青(1996)、胡章喜和沈继方(1994)、许模等(2011)、蒋忠信和王衡(2002)等专家学者在岩溶分形研究方面也曾进行过深入研究。郭纯青(1996)对岩溶含水介质与地下水系分形理论有所研究。胡章喜和沈继方(1994)利用等高线分维-高程曲线确定岩溶台面高程,对岩溶形态系统的分形特征及其机理进行了探讨。许模等(2011)采用分形方法对云贵高原东部丘北区的峰丛洼地的岩溶形态特征进行了分析。蒋忠信和王衡(2002)针对南昆铁路大量的岩溶问题,以地质为基础,以综合物探技术为主要手段,结合多种数学理论包括分形理论对岩溶洞穴预报技术进行有益的探讨。

以上众多的岩溶专家应用分形理论在岩溶形态研究方面做出大量的有益探索,为应用分形理论开展岩溶研究开拓了新的研究思路,提供了一种新的研究方法,在工程实践中具有较好的应用前景(李苍松, 2006; 李苍松等, 2006, 2007)。但如何将分形理论应用于隧道工程实践,并指导岩溶隧道地质预报(或探测),特别是如何提高岩溶地下水预报(或探测)的准确性等问题,尚需开展深入研究。

至于综合研究岩溶地下水化学成分与岩溶形态的相关性,将岩溶地下水化学动力学与分形理论相结合的问题,目前尚未见到国内外相关文献或报道。

1.1.5 研究技术分析小结

综合以上分析,岩溶隧道涌水突泥地质灾害的防治技术尚需进一步提升,其中一个非常关键的环节是岩溶及地下水的准确预报或探测。然而,岩溶及地下水预报是一个非常复杂的系统工程,需要在地质、水文地质分析技术基础上,应用现代信息技术及先进的物探测试技术,将二者有机结合起来。同时,还需要深入开展岩溶及地下水作用机理研究,特别是岩溶地下水与岩溶形态之间的内在关系研究。

1.2 主要研究内容及其创新性

本书的主要研究内容包括五个方面:典型地区隧道岩溶动力学系统的环境影响因素分析;岩溶隧道地下水化学动力学特征及相关参数研究;隧道地表及洞内开挖揭露岩溶形态及其分形特征;岩溶地下水化学动力学特征与岩溶形态分形特征之间的相关性研究;岩溶发育程度的水化学动力学-分形指数评价技术。

(1) 典型地区隧道岩溶动力学系统的环境影响因素分析包括:典型地区隧道岩溶发育分布宏观规律的统计分析;基于水动力学和水化学动力学条件的岩溶垂直剖面分带理论研究;隧道开挖揭露岩溶对环境影响因素的敏感性研究;岩溶发育程度分类及定性评价。

(2) 岩溶隧道地下水化学动力学特征及相关参数研究包括:岩溶地下水动力学及水化学指标的确定;隧道开挖揭露或排泄岩溶地下水的水化学成分及其水化学动力学参数变化特征;岩溶地下水动力学参数的水化学动力学表达形式。

(3) 隧道地表及洞内开挖揭露岩溶形态及其分形特征包括:隧道地表及洞内开挖揭露岩溶形态的分类;岩溶形态的宏观及微观发育分布特征;岩溶形态的分形特征研究;岩溶发育程度的分形指数评价方法。

(4) 岩溶地下水化学动力学特征与岩溶形态分形特征之间的相关性研究包括:隧道开挖条件下的岩溶溶蚀作用机理研究;岩溶地下水化学成分的分形特征研究;岩溶地下水化学动力学特征与岩溶发育程度的相关性研究;岩溶地下水化学动力学参数与岩溶发育程度分形指数的相关性研究。

(5) 岩溶发育程度的水化学动力学-分形指数评价技术包括:岩溶发育程度定量评价的指标体系研究;岩溶发育程度的水化学动力学-分形指数评价数学模型;基于水化学动力学-分形指数的岩溶发育程度评价标准研究。

本书所展现的研究成果创新性主要集中在以下几个方面:

(1) 基于原长春地质学院(现吉林大学)曹玉清、胡宽璐教授等提出的“岩溶化学环境水文地质学”理论,提出岩溶隧道地下水动力学参数的水化学动力学表达形式,利用隧道开挖揭露岩溶地下水的常规水化学成分计算折算渗透系数等岩溶地下水动力学参数,并进一步采用定量方法进行岩溶涌水预测预报;

(2) 在分别开展隧道开挖条件下的岩溶溶蚀作用机理、岩溶地下水化学成分的分形特征、岩溶地下水化学动力学特征与岩溶发育程度的相关性等研究基础上,通过探索岩溶地下水化学动力学参数与岩溶发育程度分形指数的相关性,指出隧道揭露岩溶水的水化学动力学特性与岩溶形态分形特征的相关性;

(3) 建立基于水化学动力学参数和岩溶形态分形指数的岩溶发育程度评价模型,提出岩溶发育程度的水化学动力学-分形指数评价技术,包括岩溶发育程度评价的分级标准、指标体系和评价方法。

1.3 应用前景分析

在过去十多年里,我国客运专线和城际铁路建设中已涉及多条复杂地质条件的长大隧道工程,如宜万铁路、渝怀铁路、兰渝铁路、贵广铁路、云桂铁路、沪昆铁路、成渝客运专线等。目前正在我国西部高山峡谷地区建设的大理-瑞丽铁路、成兰铁路、成贵铁路、成昆铁路、蒙华铁路、渝怀铁路二线、黔张常铁路等,大量长大隧道施工正在遭遇复杂难治的岩溶及岩溶地下水问题,施工处治不当则可能引发涌水、突泥等地质灾害,对施工安全产生极大影响,并对隧道运营安全埋下较大隐患,甚至可能严重影响地表生态环境。大规模的铁路、公路、水利水电等基础工程建设拉动了国家及地方经济的发展,但又不同程度地影响自然环境。为此,针对西部大开发中的突出难题——岩溶地区深埋长隧道的涌水、突泥问题的解决开展基础理论研究具有重要意义。

本书所介绍的研究成果基于岩溶系统对气候环境因素响应的敏感性、水-岩相互作用