

铁道部重大科研课题——隧道围岩稳定性及其控制技术研究项目
(项目编号: 2009G005-D) 资助

国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发
联合基金项目(项目批准号: 50539080) 资助

岩溶及 地下水 超前预报技术

YANRONG
JI DIXIASHUI
CHAOQIAN YUBAO JISHU

李苍松 高 波 梅志荣 著



西南交通大学 出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

铁道部重大科研课题——隧道围岩稳定性及其控制技术研究项目
(项目编号: 2009G005-D) 资助

国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发
联合基金项目(项目批准号: 50539080) 资助

岩溶及地下水超前预报技术

李苍松 高 波 梅志荣 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

岩溶及地下水超前预报技术 / 李苍松, 高波, 梅志荣著. —成都: 西南交通大学出版社, 2013.3
ISBN 978-7-5643-2225-0

I. ①岩… II. ①李… ②高… ③梅… III. ①岩溶—
预报②地下水—水文预报 IV. ①P642.25②P641.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 042052 号

岩溶及地下水超前预报技术

李苍松 高波 梅志荣 著

责任编辑	杨 勇
特邀编辑	姜锡伟
封面设计	墨创文化
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	成都蜀通印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	16.25 (其中彩页: 3 印张)
字 数	404 千字
版 次	2013 年 3 月第 1 版
印 次	2013 年 3 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-2225-0
定 价	65.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序一

岩石地下工程在修建过程中,存在许多工程地质、水文地质问题,诸如:软弱围岩的坍塌、冒落失稳变形;高地应力下硬脆围岩的岩爆;特殊岩类中的瓦斯突出、膨胀变形;等等。而在可溶岩类岩体中的地下工程,岩溶及其地下水对地下工程构筑物 and 周围环境的危害,是较为普遍且严重的水文地质、工程地质问题。至于岩溶灾害的防治,特别是预测预报,更是一个国际性的难题。

早在 20 世纪 50 年代,在修建川黔铁路的过程中,贵州省境内的娄山关、虾子河等隧道就遇到了存在大量涌水危害和架空结构,需在隧道内架桥的问题。在可溶岩地区修建铁路,岩溶及地下水的危害问题,引起了人们的重视。60 年代初,国家科委铁道组即将“喀斯特(即岩溶)发生发展分布规律及铁路修建技术的研究”列入科研规划中,责成铁道部内有关单位开展研究工作。半个多世纪以来,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的铁路隧道如大瑶山隧道、南岭隧道、梅花山隧道等的岩溶地质灾害治理,做了大量工作,取得了成效,积累了不少经验,并有相应的专著和论文问世。对以后的科研和工程灾害防治工作,无疑地颇有助益,这是应该肯定的。

近年来,随着路网建设的进一步发展,我国中西部地区,许多铁路或高速公路的长大隧道工程,穿越复杂的岩溶地区,仍然出现了如渝怀线圆梁山隧道、武隆隧道,宜万线野山关隧道、齐岳山隧道等的岩溶地质灾害问题。这说明岩溶地区铁路、公路长大隧道工程中,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。须知,岩溶在宏观上,其发生发展和分布是有一定规律可循的;然而对于具体工程细部而言,其出现却是随机的。这是一个极其复杂的课题,不可能“一蹴而就”,更不可能“毕其功于一役”。

十分欣喜本书作者在前人研究的基础上,以敢于“啃硬骨头”的精神,从室内理论研究到深入现场工地进行测试,探索岩溶及地下水的预报技术,取得了可喜的成绩。本书即是作者多年来课题研究成果的体现。

本书分四大部分:首先综述了课题研究的国内外现状;然后论述岩溶及地下水的主要特征;再着重就岩溶的地质预报技术和地下水的预报技术分别给予详细论述。本书的最大特点是:在岩溶基本地质特征分析的基础上,将岩溶地下水化学动力学与分形理论相结合,辅以地球物理勘测手段,探索岩溶地区长大隧道工程地质超前预报的新技术方法;宏观与微观结合,定性与定量结合,经典地质分析与新科技测试技术结合;理论联系实际,紧密结合工程实践,并附很多工程实例。本书既体现作者新的思维,也与地下工程地质超前预报多元化、综合化和技术现代化的总趋势相吻合。所以,本书对于从事岩溶水文地质、工程地质工作的同仁和从事地下工程的工程技术人员来说,是很有实用价值的参考书,相信读者可以从中获得理论上的提升和间接经验的累积。

仅作此序,以表第一读者之心声。

陈成宗

2003.2.24.

序二

众所周知，由于岩溶地质本身的复杂性，长大岩溶隧道开挖经常随机揭露岩溶及岩溶地下水，而相应的超前预报工作却受到地质条件制约，其预报准确性和可靠性受到影响，以致隧道施工期间极可能遭遇岩溶涌水、突泥等地质灾害，严重危及施工人员和财产的安全，阻碍施工进度，严重时会导致整个施工的失败，给工程建设造成灾害性损失，进而引发隧道工程质量和地表生态环境破坏等问题，并给隧道运营留下安全隐患。为此，无论设计还是施工单位，都非常重视隧道施工期的地质预报工作，特别是岩溶及岩溶地下水的施工期超前预报。多年来，众多专家、学者在岩溶及地下水超前预报、岩溶及地下水处理等方面曾做过大量研究工作，也取得了不少研究成果。但是，岩溶及地下水问题始终伴随着隧道工程施工的整个过程，并已成为一个亟待解决的技术难题。

本文作者结合渝怀铁路、遂渝铁路、渝黔高速公路、贵州镇胜高速公路等多座长大铁路或高速公路隧道施工期岩溶及地下水超前预报工作实践，针对工程实际问题，在总结前人经验教训的基础上，对长大岩溶隧道施工地质预报技术的发展提出了自己的构想，包括长大岩溶隧道施工地质预报应注重宏观与微观相结合、定性与定量相结合、基础理论与现场测试相结合等综合方法或技术路线。

本书从岩溶及地下水超前预报的技术现状出发，在分析岩溶及地下水主要特征的基础上，针对岩溶及地下水预报的共性与特殊性，以具体工程实例为依托，分别对岩溶地质预报技术和地下水预报技术进行了详细介绍。其中，岩溶分形地质预报、岩溶围岩分级、基于区域水文地质条件分析和物探相结合的地下水预报技术、基于化学动力学水文地质方法的隧道涌水量及水压力预测等内容颇具新意，为作者多年来理论研究与工程实践的结晶，希望对读者无论从理论方面还是实践经验上的能力提升均能有所帮助。

本书涉及的一些重要技术、方法或理论是在王建宇研究员、曹玉清教授、胡宽裕教授、陈成宗研究员、王石春研究员、何发亮教授级高工等前人研究基础上创造性提出的，在此对先生们表示特别感谢，同时也对所有支持帮助我们的同事、同仁及领导表示感谢！

梅志华

2012.12

目 录

1 前 言	1
2 岩溶及地下水超前预报的技术现状	3
2.1 长大隧道岩溶水系统的研究现状	3
2.2 岩溶地质体的预报技术研究现状	4
2.3 隧道地下水预报技术现状	6
2.4 关于岩溶及地下水作用机理的研究	7
2.5 岩溶地质分形预报方法的国内外研究现状	8
3 岩溶及地下水的主要特征	9
3.1 岩溶的主要特征	9
3.2 地下水的主要特征	19
4 岩溶地质预报技术	23
4.1 区域地质条件分析及基础地质工作	23
4.2 物探方法的选择	28
4.3 地质预报综合分析方法——结合工程实例	39
4.4 岩溶分形地质预报技术	67
4.5 岩溶围岩分级	106
5 地下水的预报技术	119
5.1 地下水预报的特殊性和复杂性	119
5.2 地下水预报的主要内容及预报的主要思路	119
5.3 基于区域水文地质条件分析的地下水预报	120
5.4 地下水预报的物探方法	126
5.5 应用化学动力学的隧道涌水量预测技术	144
5.6 隧道水压力的计算方法	165
5.7 岩溶地下水预报工程实例	170

6 结 语 195

参考文献 196

附图 1 205

附图 2 232

附图 3 242

作者简介 250

1 前 言

随着我国路网建设的进一步发展，特别是西南地区，不可避免地会出现越来越多穿越复杂岩溶地质条件的长大隧道，如成渝公路中梁山隧道、缙云山隧道，广渝公路华蓥山隧道，渝怀铁路圆梁山隧道、武隆隧道及宜万铁路野山关隧道、齐岳山隧道、别槽岩隧道等，以及正在建设的贵广铁路、兰渝铁路、沪昆铁路、成渝客专等均存在多条长大岩溶隧道。

长大岩溶隧道施工存在的主要问题包括两个方面：一是工程地质及施工安全问题；二是因隧道工程施工引起的环境问题。

长大岩溶隧道施工开挖可能随机揭露岩溶及岩溶地下水，极可能遭遇岩溶涌水、突泥等地质灾害，严重危及施工人员和施工机具的安全、阻碍施工进度；严重时会导致整个施工的失败，进一步产生隧道工程质量问题，并给隧道运营留下安全隐患。

岩溶隧道施工可能存在的主要工程地质问题包括：岩溶水的侵袭、岩溶空洞或洞穴对工程稳定性的影响、岩溶填充物对工程的影响、地表岩溶塌陷等。

岩溶水的侵袭分地表水、地下水两种情况。岩溶地表水对工程的危害，主要表现在岩溶洼地、谷地，洪水时冲刷、淹没桥涵及路基；岩溶洼地积水浸泡路基，引起路堤下沉或坍塌。岩溶地下水对工程的危害，主要表现为雨季时路基基底涌水使路堤坍滑或冲毁；桥基坑涌水增加排水困难或基坑坍塌，妨碍施工；隧道大量涌水或突水，且伴随涌泥、涌砂，增加施工、运营困难；又因水位、水量变幅大，致使排水工程不易奏效；以及地下水位下降造成地面塌陷而危及工程建筑安全。西南岩溶地区铁路施工和运营期间，由于雨季岩溶地下水涌水量增大，造成淹没坑道、冲毁路基，以致中断施工及行车的事例，连年皆有发生。

岩溶空洞或洞穴对工程的影响主要表现为建筑物基础悬空、洞穴顶板过薄，不能承受负荷而发生突然坍塌，引起建筑物破坏。

岩溶填充物对工程的影响：当隧道开挖揭穿黏土充填溶洞时，极有可能发生涌泥的危害；当隧道顶部岩层中有填充大量堆积物的落水洞、竖井等垂直洞穴时，一旦被切穿，便会引起坍塌。尤其当填充物含水量高、洞穴直径大，在施工震动时易发生大规模坍塌，威胁性更大。

地表岩溶塌陷：当基岩岩溶发育时，地下水流动、水位下降或其他原因，均可能引起地面塌陷。塌陷在时间上具突然性，空间位置难以预测。

岩溶工程的环境问题主要包括两大部分，即地下工程环境问题和地表工程环境问题。地下工程环境问题，通常指前述的岩溶工程地质问题；地表工程环境问题，主要指生态环境问题。生态环境问题常常与水，尤其是地下水有关，其发生、发展或由于地下水的活动，或由于原有天然水均衡和水循环被改变的影响效应。因岩溶隧道工程引起的地表生态环境问题包括大面积地表水干涸、地表沙土流失、地面塌陷、不均匀沉降、漏水、植被减少或植被枯竭等，甚至给当地居民的生活和生产造成了极大困难和损失，这在我国铁路建设中已有深刻教

训，如大瑶山隧道、南岭隧道、歌乐山隧道、圆梁山隧道等。

众多工程实践表明，交通工程（铁路、公路隧道）、水电工程（地下厂房、输水隧洞）等地下工程建设过程中，面临一系列突水、突泥等地质灾害问题，包括溶洞、溶缝和断层带等的涌水、涌泥（砂）、冒顶、塌方等问题，施工处理不当则会造成重大安全问题和财产损失。分析其原因，主要是长大隧道岩溶及地下水问题本身的复杂性、随机性，致使岩溶及地下水的探测或预报准确性受到严重影响，甚至发生误判。多年来，众多专家、学者在岩溶及地下水超前预报、岩溶及地下水处理等方面曾做过大量研究工作，也取得了不少研究成果。但是，岩溶及地下水问题始终伴随着隧道工程施工的整个过程，始终是一个老大难问题，已成为一个国际性难题。如何经济、合理地处理好地下水问题，往往关系到隧道工程的成败，也是隧道工程界一直探讨的问题。此外，问题始终存在、悬而未决，且因地下水造成的灾害、质量和安全问题似有增加趋势。

本书作者有幸参加了渝怀铁路、遂渝铁路、宜万铁路、渝黔高速公路、贵州镇胜高速公路等多座长大铁路或高速公路隧道施工期岩溶及地下水超前预报工作，在此进行总结分析，以便为本难题的解决奉献自己的微薄之力，并在此基础上进一步提高。

本书主要分4个部分：岩溶及地下水超前预报的技术现状、岩溶及地下水的主要特征、岩溶地质预报技术和地下水的预报技术，分列第2、3、4、5章。其中，第2章岩溶及地下水超前预报的技术现状，包括：长大隧道岩溶水系统的研究现状、岩溶地质体的预报技术研究现状、隧道地下水预报技术现状、岩溶及地下水作用机理研究现状、岩溶地质分形预报方法的国内外研究现状分析。在第3章对岩溶及地下水主要特征分析的基础上，针对岩溶及地下水预报的共性与特殊性，分别在第4章和第5章对二者的预报技术进行了详细介绍，并辅以大量的工程实例，希望能对读者无论从理论还是实践经验上均有可鉴之处。同时，书中的不当之处，也请不吝赐教并斧正。

本书中大量的工程实例或工程实践，作者虽有亲自参与，但更多是在中铁西南科学研究院有限公司工程地质研究所（2010年以前称工程地质研究室或地质预报中心）全体同仁的共同努力下完成的，在此对同事们表示衷心感谢！对所有支持和帮助我们的同仁、领导表示感谢，并特别感谢王建宇研究员、曹玉清教授、胡宽榕教授、陈成宗先生、王石春研究员、何发亮教授级高工等，在本书所介绍的研究成果中，有不少是在他们的研究基础上取得的。例如：在王建宇研究员开展隧道衬砌水压力及隧道围岩稳定性研究的基础上开展隧道水压力计算方法研究；在陈成宗先生的“混流带”理论、曹玉清教授和胡宽榕教授提出的“岩溶化学环境水文地质”理论的基础上，结合王石春研究员几十年的岩体质量分级技术，开展了岩溶及地下水预报、岩溶围岩分级等研究。所以，本书所介绍的研究成果或研究方法，均是在先生们的“肩膀上”取得的，在此对先生们表示特别感谢。

2 岩溶及地下水超前预报的技术现状

2.1 长大隧道岩溶水系统的研究现状

对于岩溶问题，不同的研究领域存在着不同的研究侧重或立足点^[1]。矿山领域多集中于矿岩边界和顶底板突水问题^[2-4]；水文地质领域多集中于岩溶地下水运移规律和水资源评价、开发与利用^[5-7]；工程地质领域，特别是隧道或引水洞更关心岩溶涌、突水问题^[8-14]；环境地质领域则主要关心地表水土流失和植被保护等问题，即岩溶阻水盖层的研究^[15-17]。但无论如何，首先都应研究岩溶水系统的规律。根据不同的立足点，国内外学者提出了多种岩溶水系统模型。归纳起来主要有以下几种：黑箱模型（集中参数模型）、水箱模型、岩溶泉流的解析模型、分布参数层流数值模型和三重空隙介质地下水流模型等^[18-26]（表 2.1.1）。

表 2.1.1 各种岩溶水系统模型的主要特点和优缺点

岩溶水系统模型	主要特点	优缺点
黑箱模型 (集中参数模型)	该模型主要考虑降雨入渗及地表水入渗对泉流量的影响，仅考虑简单的输入输出	模型中难以考虑人为干扰因素的作用、不同流态对地下水的影响等，不能准确给出研究区内的水头分布，不考虑不同流态对地下水运动的影响，故其应用尤其是在岩溶水运动机制方面受到很大限制
水箱模型	为了解决非线性问题，该模型在一定程度上反映了岩溶水的紊流特征，大体能刻画个别岩溶竖井等的地下水动态	难以表征共存于岩溶介质中的紊流与层流，难以考虑人为因素的干扰，也不能准确给出水头在空间上的分布
岩溶泉流的解析模型	该类模型可以预测不同流态（紊流与层流）的泉流量动态，给出衰减系数 α 的结构与物理意义	难以考虑人为作用的影响，不能准确给出空间水头分布，受解析方法的限制，难以解决复杂边界与非均质区的水资源评价问题
分布参数层流数值模型	该模型可用于非均质及复杂边界的区域，既考虑了区内人为抽、排因素的作用，又能给出水头的时空分布，因而它成为地下水资源评价与管理的强有力工具，许多学者将其用于岩溶水运动的模拟	对强岩溶化的含水系统，目前见到的数值模型基本假定为水流遵守达西线性定律，与事实不太相符

续表 2.1.1

岩溶水 系统模型	主要特点	优缺点
三重空隙 介质 地下水流 模型	陈崇希等将岩溶空隙划分为三重空隙介质, 建立了一个能反映岩溶水各种流态的线性—非线性流的三重空隙介质模型。三重空隙介质的划分如下: (1) 储水介质: 广泛分布的细小孔缝, 占岩溶介质空隙率的主要部分, 渗透性远远小于后两种介质, 主要起储水、释水作用, 遵循达西定律。 (2) 导水介质: 介于另两种介质之间的不同级次裂隙构成的网络, 占岩溶介质空隙率的比例不大, 透水性比基质孔隙、微裂隙大得多, 主要起导水作用, 其水流仍服从达西定律。 (3) 控水介质: 岩溶管道和宽裂隙, 占岩溶介质空隙率的比例小, 其透水性比前两者大若干个数量级, 水流处于紊流状态, 极大的导水能力对地下水位(水头)起控制作用(但非第一类边界)	事实上, 由于岩溶发育的极不均匀性, 岩溶水系统的地下水运动规律与由空隙中小裂隙含水介质的含水系统相比, 其运动特征发生了显著的变化, 岩溶地下水除了存在与空隙或中小裂隙含水介质一致的达西流外, 在岩溶管道中还存在非达西流。因此, 在用达西流来刻画管道流时, 应该同时考虑非达西流的存在

2.2 岩溶地质体的预报技术研究现状

岩溶隧道不良地质体超前预报的内容主要有: 掌子面前方断层破碎带及岩体破碎带的超前预报, 包括破碎带的产状、厚度、含水情况及力学特性等; 掌子面前方的岩性分界, 特别是可溶岩与非可溶岩的分界, 以及软弱夹层的超前地质预报; 前方可能发生的岩溶形态、范围、部位及充填物性质等的预报, 尤其是岩溶涌水、突泥的可能性预报等。

随着信息化设计施工技术的推广和发展, 长大岩溶隧道不良地质体超前预报无论在方法上、仪器设备上, 还是在数据处理方面都有了长足的发展^[27-28]。隧道施工地质超前预报技术主要包括 6 个方面(表 2.2.1), 进一步可归为两大类: 地质法和地球物理方法。

这些地质预报方法各有其优缺点和适用条件。其中, 地质法是基础方法^[29-31]; 地球物理方法探测不良地质体(尤其是反射界面)在方法上比较成熟。因岩溶地质问题的复杂性、岩溶形态的多样性、隧道开挖揭露岩溶及地下水的随机性等特点, 于是形成利用“以地质法为基础的综合物探技术”实施岩溶地质超前预报的共识^[18, 32, 33]。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就更大了。由于不同隧道地质条件各异, 需解决的重点问题也不一样, 具体选用的物探方法应有针对性, 不能一概而论, 更不能简单理解为“综合预报就是将各种预报方法都用上”。所以, 从某种意义上说, “岩溶综合地质预报技术是一门多学科交叉的艺术”。

表 2.2.1 各种超前地质预报技术的主要特点及优缺点

超前预报方法		主要特点	优缺点
地质法	地质法	主要根据隧道施工掌子面地质条件,如岩体结构面产状及发育状况、岩体破碎程度、岩石变质程度等变化特征,预报掌子面前方可能的断层、不同岩性界面、围岩稳定性及失稳破坏形式等	该方法是隧道施工期超前预报最基本的方法,方法简单、适用性强,其他任何一种预报方法均以其为基础
	超前平行导坑(隧道)法	利用已有平行隧道的地质资料进行隧道地质预报或利用超前施工的平行导坑所遇地质情况推测正洞将遇到的地质情况。当两平行隧道间距较小时,预报效果更佳	该方法直接、有效、准确率高、平导超前对正洞施工的指导作用强。曾在秦岭特长隧道施工中进行了有益尝试,并在渝怀铁路圆梁山隧道以此方法作为主要预报手段之一
	超前水平钻孔法	通过钻孔钻进速度测试和采取岩芯观察及进行相关试验的方法获取隧道掌子面前方岩石(体)的强度指标、可钻性指标、地层岩性资料、岩体完整程度指标及地下水状况等诸多方面的直接资料	该方法是隧道施工期地质超前预报方法中最直接的方法。但因掌子面超前钻孔数量有限,有时可能会导致“一孔之见”,判断失误,且钻孔费用昂贵。国内采用此方法主要在水工隧道(洞)工程中进行预报,国外已较为普遍,渝怀铁路圆梁山隧道已将其作为主要预报方法之一
地球物理方法	超前钻孔声波测井及跨孔声波透射法	利用凿岩台车在隧道施工掌子面加接钻杆施作微倾角超前钻孔,通过孔中测井或跨孔声波测试结果进行隧道掌子面前方地质条件(情况)的超前预报	在超前水平钻孔法基础上结合声波透射,效果更好,需占用一定施工时间,且需钻孔
	波反射法	利用声波、超声波、电磁波及地震波等在地层中传播、反射的原理,通过信号采集系统接收反射信号,判识掌子面前方反射界面(断层、软弱夹层等)距掌子面的距离。相应仪器设备有:声波仪、地质雷达以及地震仪、TSP地质预报仪等	地质雷达探测精度高,但预报距离短(10~20 m),在隧道内受水、电、金属等干扰较大; 地震法用于地表浅层勘探效果较好,需打孔放炮; 声波反射法占用施工时间小于 0.5 h,无须打孔放炮,预报距离中等(一般 50~70 m),预报效果好; TSP 实质上属于地震法,预测距离相对较远,一般为 100~200 m,但需施工配合钻孔,工序较复杂,并采用放炮方式激发信号,占用施工时间 1.0 h 左右,略影响施工
	电阻率法	BEAM 电法超前探测系统是国外主要针对掘进机系统的地质预报系统,在掘进机系统的适当部位安装电极,激发并接收探测前方的电阻率信号,并据此分析探测前方的地质条件	预报距离为隧道洞径的 5 倍(30~50 m),激发与接收探头安装在掌子面附近,能够实施连续探测,不受施工影响,也不干扰施工

2.3 隧道地下水预报技术现状

隧道地下水预报的内容主要包括 3 个方面或回答 3 个问题：是否存在含水不良地质体？涌水量大小？水压力大小？在这里，重点讨论岩溶地下水预报问题。本问题能够得到解决，则一般的基岩裂隙水预报问题就会迎刃而解。

通常情况下，岩溶及岩溶地下水预报二者密不可分，在进行岩溶地质体界限（或位置）、规模及性质（岩溶形态及填充物情况）等预报的同时，还需要对岩溶地下水进行预报（包括岩溶涌水量及水压预测等）。

针对是否含水问题，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。

在岩溶地下水预报问题中，岩溶涌水量及水压预测预报问题始终是一个难以准确量化的问题^[18]。常见的隧道涌水量预测方法主要有水文地质比拟法、水均衡法、井泉补给法、数学模拟系统分析法等（表 2.3.1）。在这些隧道涌水量计算方法中，除了水均衡法的应用比较普遍以外，其余各种方法因地质条件限制，难以准确把握各种边界和初始条件，计算结果的可参考性受到较大影响。至于水压预测问题，矿山工作者在矿坑顶底板涌突水方面有所研究^[34-36]。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，曾开展了大量研究工作。但该问题几十年来基本处于争论状态，各行业部门就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^[37-40]。中铁西南科学研究院在渝怀铁路圆梁山隧道和武隆隧道岩溶地质预报中^[41, 42]，应用三重空隙介质理论和化学动力学理论建立了岩溶涌水量及水压预测模型，应用常规的水化学成分计算水动力学参数，并进行了隧道施工分段涌水量的预测。

表 2.3.1 岩溶隧道涌水量主要预测方法的优、缺点

预测方法	主要优缺点
水文地质比拟法	更依赖于参与比较的两个工程地质条件的相似程度，只要选择的相似因子吻合度较高，不失为简便有效的方法。但事实上，不同的工程其水文工程地质条件是复杂多变的
水均衡法	是目前用得最多、最容易让人接受且应用效果最好、最可靠的一种隧道涌水量计算方法。多座隧道实践表明，采用该法预测涌水量较符合实际，尤其是对地质结构相对简单的向斜盆地。但是其只能是对整个隧道宏观估算，无法进行分段计算
井泉补给法	应用于隧道局部地段，效果虽然良好，但适用性较差
数学模拟系统分析法	关键是建立合理的水文地质概念模型，进而建立岩溶水系统数学模型，进行涌水时间与涌水量的预测。鉴于岩溶水系统的复杂性、岩溶管道分布的随机性，该方法在边界条件的把握上受到一定的限制

2.4 关于岩溶及地下水作用机理的研究

岩溶隧道施工地质预报是一个非常复杂的系统工程,它首先应在宏观上对区域岩溶地质条件进行把握,同时也需要先进的物探测试技术,并将二者有机结合起来。为了达到准确预报的目的,更需要强调对水-岩作用的基础理论研究。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^[43-44]。

针对岩溶及岩溶地下水作用机理的研究,国外主要在岩溶泉域保护和岩溶含水层地下水开发等方面开展了大量研究,应用方法主要采用了数值模拟、物理模型试验和现场监测及示踪试验等。如 Paola Angelini 等(1997)以意大利北 Apennines 的 Bagnara 为例,对岩溶泉模拟问题进行了探讨^[45]; Christopher R. Omelon 等(2005)对连续泉的地球化学评估和矿物沉淀进行了分析研究^[46]; Shadab Anwar 等(2009)提出了岩溶的水流及溶质运移的波兹曼单元模型^[47]; Jonathan Faulkner 等(2009)进行了岩溶管道及裂隙中水流及溶质运移的物理模拟试验和数值分析研究^[48]; Vincent Bailly-Comte 等(2010)对具有暗河系统的两个 Karst 地层进行了溶管与裂隙间的水流交换、压力传递和水动力学影响等的研究^[49]; Jeffrey G. Powers 等(2000)根据抽水试验资料计算了岩溶裂隙含水层的导水系数^[50]; Valentina Vincenzi 等(2009)应用多种示踪试验和水文地质监测研究了意大利北 Apennines 一座铁路隧道对地表水和地下水的影响^[51]; Kevin W. Turner 等(2010)应用水的同位素示踪法研究了加拿大 Old Crow Flats 湖的水均衡过程^[52]; Andrzej 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^[53]。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、示踪试验等方法分析水文地质参数、研究水文地质条件。

国内工程应用领域,不少专家在水-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、梁冰等开展了水化学对岩石损伤的实验研究^[54]。汤连生、张鹏程、王思敬等开展了水-岩化学作用对岩石的宏观力学效应研究^[55]。王鹰、陈强等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^[56]。王广才、陶澍等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^[57]。曹玉清、胡宽裕教授等在地下水化学动力学方面作了比较深入的研究^[58-61],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是“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。山西煤田水文地质 229 队的李振拴等同仁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^[62]。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、周志芳、孙晋玉、张强、曹剑锋、王楠、沈媛媛、冯波、白建军等^[63-66]。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。

2.5 岩溶地质分形预报方法的国内外研究现状

至 20 世纪末,分形理论已成为一门重要的新学科,被广泛应用到自然科学和社会科学的众多领域。它使研究者有一种新的手段来分析扑朔迷离的、无序的混乱现象和不规则的形态,揭示隐藏在复杂现象背后的规律、局部和整体之间的本质联系。

分形理论在地学研究中的应用非常广泛^[67]。刘承祚等^[68]认为,分形理论正是研究广泛存在的、具有自相似性“层次”结构的地学研究对象的新理论和新工具,因而近年来在地球科学中得到了广泛的应用,并在构造断裂、褶皱形态、含油气构造分布、矿体形态、金矿品位、碎裂岩、砂岩、泥岩、岩溶、粒状土结构、岩体和土体的力学性质、岩体结构面粗糙度、地表水系、水文时间序列、渗流系统中的多孔介质、准晶结构、地震以及宇宙中的星云分布等方面取得了一系列有价值的研究。上述的一系列重要研究进展使分形理论成为在地学中很有应用前景的高新技术之一,并初步形成了分形地质学^[69]。

分形理论在岩溶研究方面的应用,最早是关于岩溶洞穴延伸的线性特征的研究^[70],也就是喀斯特地貌的分形研究。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。国内外不少专家、学者应用分形理论开展岩溶问题研究,取得了不少研究成果。中科院桂林岩溶所李文兴研究员在岩溶分形研究领域做了大量工作,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^[71-73],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。在岩溶分形研究方面曾做过深入研究的专家、学者还有郭纯青、胡章喜、沈继方、蒋忠信、王衡等^[74-77]。郭纯青等对岩溶含水介质与地下水系分形理论有所研究^[74]。胡章喜、沈继方等对利用等高线分维-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^[75]。许模、王迪等采用分形方法对云贵高原东部丘北区风丛洼地的岩溶形态特征进行了分析^[76]。蒋忠信、王衡等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了有益的探讨^[77]。

以上众多的岩溶专家,应用分形理论在岩溶形态研究方面作出大量的有益探索,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^[78-80]。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。为此,提出综合研究岩溶地下水化学成分与岩溶形态的相关性,将岩溶水化学动力学与分形理论相结合。

综合以上分析,本书提出,在坚持岩溶工程地质及水文地质分析的基础上,加强宏观与微观相结合、定性与定量相结合、理论分析与现场探测相结合,有针对性地开展岩溶及地下水预报(或预测)。

3 岩溶及地下水的主要特征

3.1 岩溶的主要特征

3.1.1 岩容发育的区域分布规律

岩溶发育在宏观上是有规律的，主要表现在区域分布和垂直剖面分布两个方面。归结起来，岩溶发育分布的宏观规律主要受岩石性质、地质构造、地下水动力条件及气候等因素的控制。其中，前三个因素即岩性、构造和地下水，它们是岩溶发育的三个必要条件。

3.1.1.1 可溶岩

可溶性岩石（简称可溶岩）是岩溶发育的前提条件。可溶岩包括：卤化物类岩石（食盐、钾盐、镁盐等）、硫酸盐类岩石（石膏等）及碳酸盐类岩石（石灰岩、白云岩、大理岩等）。其中，以卤化物类溶解度最大，而碳酸岩类溶解度最小；但是，碳酸盐类岩石的分布最为广泛，几乎遍及全国，尤以西南地区较为集中，且绝大部分岩溶均发育于此类岩石中。因此，通常所说的岩溶主要是指发育于碳酸岩类岩石中的岩溶作用与现象。

碳酸盐岩由不同比例的方解石和白云石组成，并含有泥质、硅质等杂质，其化学成分主要为 CaCO_3 、 MgCO_3 、 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 等，进一步可细分为灰岩、含白云质灰岩、灰质白云岩、白云岩、含泥质灰岩、泥灰岩、硅质灰岩等。在通常情况下，方解石的溶解速度约为白云石的两倍，故纯灰岩要比白云岩容易溶蚀。

岩石的可溶性越强，就越有利于岩溶发育。在各种碳酸盐类岩石分布地区，沿着厚层纯灰岩层面更易发育岩溶；在碳酸盐类岩石中，不溶于酸的物质（黏土、二氧化硅、沥青等）含量越多，岩石的可溶性就越低，就不易于岩溶发育。在泥灰岩中一般很少发现有强烈的岩溶现象；当存在有非可溶性岩石夹层时，对岩溶发育也不利。但需指出，岩溶多沿着可溶岩层与非可溶岩层接触带分布。当产状倾斜的可溶岩层与上覆或下伏的非可溶岩层接触时，常在其上覆接触带形成一系列溶井、落水洞等垂直形态的岩溶，在下伏接触带形成一系列岩溶接触泉。

这里着重从可溶岩成分的纯度进行了简要分析。事实上，影响可溶岩岩性的因素除了化学成分的含量或纯度外，还应考虑不同成分的结构形式以及不同矿物的粒度等因素。在地下水的作用下（包括冲蚀和溶蚀），不同结构成分、不同粒度组合的碳酸盐岩，常常发生差异性溶蚀。

3.1.1.2 地质构造

实践表明，地质构造与岩溶发育的关系极为密切，它不仅控制着岩溶发育的方向，而且

还影响着岩溶发育的规模和大小。

(1) 不同性质的断裂对岩溶发育的控制不同。岩溶沿断层破碎带发育, 断层与裂隙对岩溶发育起控制作用。

张性断裂带岩溶化程度通常很强烈, 可溶岩层的断层破碎带, 特别是张性断层破碎带, 利于地下水的运移, 地下岩溶特别发育, 常发育有地下暗河等大型岩溶, 在断层交叉部位常形成大型溶洞、地下河天窗及地下湖、池等。

压性断裂带的岩溶一般不发育, 因压性断裂带多由压碎岩、糜棱岩和断层泥组成, 一般呈致密胶结状态, 孔隙率低, 不利于岩溶水的流通。但是, 有时在压性断裂带的上盘(或下盘)也可能出现强烈的岩溶化现象。

扭性断裂带岩溶发育的深度一般较大, 因断裂面多陡倾或近直立, 有利于岩溶水向纵深方向活动。

构造节理与层间裂隙的交接处岩溶作用强烈, 实践表明, 很多岩溶现象是沿节理或层面裂隙发育的。

(2) 岩溶沿着褶皱轴部发育。在褶皱构造轴部, 纵张裂隙(断层)较多, 有利于地下水活动, 地下水易沿着张裂隙溶蚀扩展, 形成溶蚀裂隙和溶洞, 进一步发展成为大型岩溶或暗河。

(3) 岩溶沿着层面构造裂隙发育。在产状水平的岩层的褶皱过程中, 岩层往往发生层间错动或滑动, 在层间可产生层面张裂隙或层面扭裂隙, 为地下水活动提供运移通道, 易发育顺层岩溶。

(4) 另外, 在可溶岩与非可溶岩接触带部位附近, 特别当非可溶岩为相对隔水层时, 由于地下水条件的汇聚、运移, 易沿接触带部位发育岩溶。

3.1.1.3 地下水的动力条件

在具备前两个条件的基础上, 还需要地下水的溶蚀、溶解或冲蚀等水动力作用, 才可能发生岩溶。

地下水动力条件是控制岩溶最活跃最关键的因素。地下径流越强烈, 地下水的侵蚀性越强, 输入的化学能及溶解携走的 CaCO_3 便越多, 在可溶岩中留下的空洞的总体积越大。

3.1.2 岩溶的垂直剖面分带

在分析了解岩溶发育区域分布规律的基础上, 进一步分析岩溶垂直分带规律对隧道施工具有重要的指导意义。根据岩溶垂直分带规律, 可以判断隧道是否穿越岩溶区以及所处岩溶垂直分带的标高位置, 有效地分析确定隧道所在区位的岩溶和岩溶水发育分布状况, 并及早做好岩溶地质灾害的预测预报和防治工作, 避免盲目施工^[81]。

岩溶垂直分带的前提条件是岩溶侵蚀基准面和岩溶发育深度的确定^[82]。

岩溶侵蚀基准面是岩溶区内控制岩溶发育的一个界面, 它有三种形式:

(1) 岩溶区最低地形表面, 如河面、海面、大型泉口、坡立谷等。

(2) 岩溶区内部物性分界面, 如碳酸盐岩与非碳酸盐岩分界面、隔水与透水岩分界面等。