

“黔中水利枢纽工程重大关键技术研究与应用”
(黔科合重大专项字[2012]6013号)项目资助

褶皱带隐伏型岩溶发育特征 及防渗技术

刘子金 向国兴 袁代江 武兴亮 曾永军 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

“黔中水利枢纽工程重大关键技术研究与应用”
(黔科合重大专项字〔2012〕6013号)项目资助

褶皱带隐伏型岩溶发育特征 及防渗技术

刘子金 向国兴 袁代江 武兴亮 曾永军 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书以兴建于强岩溶区的黔中水利枢纽工程平寨水库库首区为背景,研究了褶皱带隐伏型岩溶发育特征及相应的防渗技术,并在平寨水库库首岩溶防渗中加以实践。本书首先描述了库首自然地理及地质概况,开展了岩溶层组及地下水类型划分;其次,研究了褶皱构造与岩溶发育特征,进而研究了岩溶水文地质构造与岩溶水特征,包括岩溶水文地质结构、岩溶水动态特征、左岸褶皱带岩溶地下水运移特征等,构建了三维岩溶水文地质模型;第三,分析研究了渗漏通道与渗漏形式、库首防渗边界,提出了库首防渗方案和特殊岩溶处理技术要求;最后,根据工程实践,总结了隐伏型岩溶区的防渗处理技术,以供其他工程参考。

本书理论联系实际,技术新颖、经验可鉴,可供工程勘察、工程设计、建设管理等领域的专业人员借鉴,也可供水文地质专业的高等院校师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

褶皱带隐伏型岩溶发育特征及防渗技术 / 刘子金等
编著. — 北京:中国水利水电出版社, 2018.8
ISBN 978-7-5170-6508-1

I. ①褶… II. ①刘… III. ①褶皱带—岩溶区—水文地质—研究—贵州 IV. ①P641.627.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第141753号

书 名	褶皱带隐伏型岩溶发育特征及防渗技术 ZHEZHOU DAI YINFUXING YANRONG FAYU TEZHENG JI FANGSHEN JISHU
作 者	刘子金 向国兴 袁代江 武兴亮 曾永军 等 编著
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	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10.5印张 249千字
版 次	2018年8月第1版 2018年8月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	60.00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

《褶皱带隐伏型岩溶发育特征及防渗技术》

编 撰 人 员 名 单

刘子金 向国兴 袁代江 武兴亮 曾永军
官长华 欧阳孝忠 张 磊 陈 军 欧 波
侯 迪 刘荣富 吴 波 张 斌 兰光裕
罗 平 潘盛泽 潘长贵 陈敏涛

编 撰 单 位

贵州省水利水电勘测设计研究院
贵州省喀斯特地区水资源开发利用工程技术研究中心

贵州省科技计划

黔中水利枢纽工程重大关键技术研究与应用

(黔科合重大专项字〔2012〕6013号)

项目承担单位：贵州省水利厅、贵州省水利水电勘测设计研究院

项目负责人：杨朝晖 项目牵头人：向国兴

课题牵头单位及课题负责人如下表：

编号	课题名称	课题牵头单位	课题负责人
1	库首褶皱带隐伏型岩溶发育特征及其渗漏研究	贵州省水利水电勘测设计研究院	官长华 刘子金
2	峡谷区高面板坝综合变形控制与防裂研究	贵州省水利水电勘测设计研究院	罗代明 欧波
3	山区长距离大流量输配水综合节水技术研究	黔中水利枢纽工程建设管理局	成雄 罗亚松
4	峡谷山区高墩大跨连续刚构渡槽技术研究	贵州省水利水电勘测设计研究院	向国兴 徐江
5	长藤结瓜水库群优化调度及智能监控技术研究	中国水利水电科学研究院	尹明万 邱春华
6	黔中岩溶山区水资源可持续利用关键技术研究	贵州省水文水资源局	舒栋才 吴平
7	水资源水质保障技术研究与应用	贵州大学	吴攀

序

PREFACE

黔中水利枢纽工程是贵州省首个大型水利枢纽，是贵州人民半个世纪的水利梦，是贵州西部大开发中的标志性工程，是地处贵州岩溶山区的跨区域、跨流域、长距离调水大型民生水利工程。工程以灌溉、城市供水为主，兼顾发电、县乡供水、农村生活供水等，并为改善区域水生态环境创造条件。工程建成后可解决贵阳市区、安顺市区的城市供水，以及六枝北部和东部、普定南部、镇宁北部、关岭中部、西秀南部和东部、平坝南部、长顺东北部等7县（区）49个乡镇的65.14万亩农田灌溉、5个县城和36个乡镇供水、农村41.84万人生活用水，年供水量为7.67亿 m^3 ，并利用坝后落差修建装机容量为136MW的平寨电站发电。黔中水利枢纽工程开发的直接目标是解决贵州政治、经济、文化、旅游的核心区——黔中经济区用水安全问题，间接目标是保障粮食生产安全、促进区域社会可持续发展，它是黔中经济区可持续发展的生命线工程，及全国构建和谐社会的重大民生水利枢纽和战略性扶贫工程之一。

工程由水源工程、输配水工程组成，分两期建设。其中，一期工程包括水源工程、一期输配水工程，建成后可解决贵阳市区近期城市供水，以及7县（区）42个乡镇的51.17万亩农田灌溉、5个县城和28个乡镇供水、农村35万人生活用水，年供水量为5.50亿 m^3 ，并利用平寨电站年发电3.6亿 $kW \cdot h$ ，为遏止区域水生态环境恶化创造条件。开发目标是缓解黔中经济区用水安全、粮食生产安全问题，促进区域经济社会快速发展。水源工程由库容10.89亿 m^3 的平寨水库，高157.5m的面板堆石坝，装机容量136MW的平寨电站组成；一期输配水工程由平寨水库自流到桂家湖长63.4km的总干渠，桂家湖取水经革寨水库到凯掌水库长84.8km的桂松干渠，总长247.5km的25条支渠，总长35.9km的2段以河代渠，以及田间配套工程组成，干支渠总长431.6km，串联了十余座“长藤结瓜”水库，是典型的跨越岩溶峡谷山区长距

离输配水工程。工程于2009年11月30日动工兴建，水源工程于2015年4月14日实现导流洞下闸蓄水，2016年6月24日平寨电站并网发电，2016年8月28日实现正常蓄水位1331.00m下闸蓄水，2016年12月28日左岸灌溉引水系统成功完成了试通水，2018年1月28日干渠试通水到贵阳，标志工程开始发挥综合效益。

工程的显著特点是地处长江与珠江分水岭地带的跨流域调水、岩溶峡谷区高坝大库建设、峡谷山区长距离输配水、“长藤结瓜”水库群联合调度等，需要研究库首褶皱带隐伏型复杂岩溶发育特征及其防渗、狭窄河谷区高面板坝变形综合控制与防裂、山区长距离大流量输配水综合节水、峡谷山区高墩大跨渡槽、长藤结瓜水库群优化调度及智能监控、黔中岩溶山区水资源可持续利用、水资源水质保障等重大关键技术。

为保障工程顺利建设，依托工程带科研、科研促项目、产学研结合的方式，由贵州省水利厅、贵州省水利水电勘测设计研究院（以下简称贵州水利院）牵头，贵州省水文水资源局、黔中水利枢纽工程建设管理局、贵州省水利科学研究院、中国水利水电科学研究院、武汉大学、南京水利科学研究院、贵州大学等单位参与，联合申报贵州省科技计划目“黔中水利枢纽工程重大关键技术研究与应用”（黔科合重大专项字〔2012〕6013号）并获批立项。项目包括库首褶皱带隐伏型岩溶发育特征及其渗漏研究、峡谷区高面板坝综合变形控制与防裂研究、山区长距离大流量输配水综合节水技术研究、峡谷山区高墩大跨连续刚构渡槽技术研究、长藤结瓜水库群优化调度及智能监控技术研究、黔中岩溶山区水资源可持续利用关键技术研究、水资源水质保障技术研究与应用等7个课题。贵州水利院牵头各参研单位联合开展上述重大关键技术攻关，解决了工程遇到的重大技术问题和难题，进一步完善并创新发展了适用于贵州岩溶山区的现代水利技术，为加快解决贵州工程性缺水问题提供了技术支撑。

研究工作结合工程建设进展推进，2017年3月基本完成各课题验收，成果丰硕，研究成果充分应用于工程实践，取得了良好效果。为推广黔中水利枢纽重大关键技术创新和研究成果，丰富岩溶山区特色的现代水利工程技术，贵州水利院策划并组织各课题参研单位和参研人员上百人，在各课题研究成果的基础上编著了系列著作，分别是《褶皱带隐伏型岩溶发育特征及防渗技术》《狭窄河谷区高面板坝变形综合控制技术》《山区长距离输配水综合节水技术》《高墩大跨连续刚构渡槽技术指南》《长藤结瓜水库群优化调度及智能监控》《岩溶山区水资源可持续利用关键技术》《贵州喀斯特地区煤矿矿山环

境生态问题及治理对策》。

该系列著作既有工程设计的基础理论和技术方案措施，又兼具解决问题的新思路、新方法和技术上的新突破，理论联系实际，技术新颖、经验可鉴。系列著作各册自成体系，结构合理、层次清晰，资料数据翔实，内容丰富，充分体现了黔中水利枢纽工程的重要研究成果和工程实践效果，完善了岩溶山区现代水利技术，可供类似工程的勘察、设计、施工、监理、建设管理、运行调度、科研等领域的专业人员借鉴参考，也可供相关高校师生阅读。

早在 20 世纪 50 年代末期贵州水利院建院之初，老一辈水利人就提出了引三岔河之水润泽黔中这一贵州水利梦想，经过 60 年的不懈努力奋斗，黔中水利枢纽一期工程建成并蓄水和通水，这一贵州水利梦想终得实现。该工程的成功建设，承载着贵州几代水利前辈的夙愿，凝聚着贵州几代水利专家和领导的追求与奋斗，饱含着这一代勘测、设计、科研、建设管理等贵州水利人的智慧和汗水，促进了一大批年轻水利工程师的成长，大幅提升了岩溶山区水利工程勘测设计和科技创新能力，提振了贵州建设大型水利工程的信心和勇气。谨以此系列著作献给他们，献给贵州水利院建院 60 周年，并推动岩溶山区现代水利技术的提升和发展。

由于研究和应用周期长、资料及研究成果庞杂、参研单位及人员较多，系列著作从组稿到出版经历了 3 年多，限于作者水平，书中难免有不妥之处，敬请同行专家和读者批评指正。

贵州省水利水电勘测设计研究院

2018 年 3 月

前言

FOREWORD

岩溶即喀斯特 (karst), 是水对可溶性岩石进行以化学溶蚀作用为主, 以流水的冲蚀、潜蚀和崩塌等机械作用为辅的地质作用, 以及这些作用现象的总称。目前, 隐伏型岩溶没有统一分类标准, 本书将基岩裸露或土层零星覆盖、地下水位随季节在基岩管道内波动岩溶现象统称为隐伏型岩溶。

受地貌、气候、岩性、构造等因素影响, 岩溶发育复杂多变, 不同地域、构造环境与地层组合条件下发育的岩溶形态千变万化, 特别是褶皱带隐伏型岩溶, 平面位置多变、空间形态复杂。水库工程遇到岩溶问题, 尤其是隐伏型岩溶, 对水库成库、大坝基础稳定、施工安全等影响很大, 需认真研究并加以技术处理。

黔中水利枢纽平寨水库坐落在乌江干流三岔河中游平寨河段, 建有 157.5m 高的面板堆石坝挡水, 正常蓄水位为 1331.00m, 总库容为 10.89 亿 m^3 。大坝区处于三塘背斜和鸡场向斜交接的褶皱带, 主要分布三叠系下统永宁镇组 (T_{1yn}) 灰岩夹泥质灰岩, 地表可见岩溶洼地、落水洞、竖井等岩溶现象发育, 属于岩溶强烈发育区, 库首岩溶渗漏问题特别复杂, 是影响平寨水库库首防渗的主要不良地质问题。设计的库首防渗帷幕投影长度约 3.2km、最大防渗深度为 235m、防渗面积达 37.3 万 m^2 、灌浆总进尺 25.7 万 m, 左岸分四层灌浆, 右岸分三层灌浆, 防渗处理复杂、工程量巨大。

在平寨水库规划设计和实施过程中, 贵州省水利水电勘测设计研究院开展了 15 年的岩溶水文地质勘察, 进行了大量地质测绘与调查、钻探物探、连通试验、洞穴调查与岩溶沉积物分析检测; 针对地下隐伏岩溶开展了电法勘探、瞬态面波勘探、浅层地震反射波勘探、地质雷达、EH-4 连续电导率成像系统探测、磁电阻率法探测。实施过程中根据揭露的岩溶地质情况及时进行动态分析评价, 积累了丰富的岩溶地质资料, 绘制了三维地质模型图, 分析了溶洞形成的物质基础、外水来源、地下水流动通道, 查清了防渗帷幕线

上岩溶系统的具体位置及溶洞特征，采取了针对性的岩溶处理措施，确保工程顺利建成蓄水。

本书以强岩溶区的平寨水库库首防渗为背景，描述了库首自然地理及地质概况，开展了岩溶层组及地下水类型划分；分析了褶皱构造与岩溶发育特征，进而研究了岩溶水文地质构造与岩溶水特征，包括岩溶水文地质结构、岩溶水动态特征、左岸褶皱带岩溶地下水运移特征等，构建了三维岩溶水文地质模型；分析研究渗漏通道与渗漏形式、库首防渗边界，提出库首防渗方案和特殊岩溶处理技术要求；根据工程实践总结了隐伏型岩溶区的防渗处理技术，以供其他工程参考。

全书共分为7章：第1章绪论，介绍了课题研究的意义、相关研究现状综述、研究区范围和主要成果；第2章自然地理及地质概况，介绍了场地自然地理及地质概况；第3章岩溶层组及地下水类型划分，分析了研究区岩溶层组及地下水类型；第4章褶皱构造与岩溶发育特征，主要分析研究区褶皱构造形态，按褶皱部位分析岩溶的发育特征以及褶皱核部、转折部位和翼部，结合本区水文件特征，分别研究了各部位的岩溶发育特征，总结和论述了岩溶发育的基本规律和岩溶水运动特点；第5章岩溶水文地质结构与岩溶水特征，分析了场区岩溶水文地质结构与岩溶水特征，根据工程建设需要，划分了场地岩溶水文地质结构单元、分析了岩溶水动力，阐述了岩溶水动力单元、岩溶水动力单元及其水文地质意义，在水文地质钻孔地下水位长期观测的基础上，分析了场地岩溶水动态特征及地下水位变化与附近地下洞室开挖的关系，最后总结了本工程左岸防渗帷幕端点鸡场一带岩溶地下水运移特征；第6章水库渗漏与渗控处理，是水利工程地质工作最后的落脚点，重点和难点在于防渗帷幕线上各类岩溶洞穴（隙）的处治技术；第7章结论与展望，提出了一些结论，并对一些新发现的地质问题研究提出了一些展望，希望能对后续工作有所借鉴。

本书依托平寨水库建设实践开展研究，得到了项目业主、施工单位的大力支持，得到了水利部水利水电规划设计总院的技术指导，也得到了贵州省科学技术厅“黔中水利枢纽工程重大关键技术研究与应用”（黔科合重大专项字〔2012〕6013号）的资助，在此向所有支持和关心研究工作的单位和个人表示衷心的感谢，也感谢中国水利水电出版社付出的辛勤劳动。在本书编写过程中，参阅了大量有关岩溶研究的文献资料，部分内容已在参考文献中列出，但难免仍有遗漏，在此一并向参考文献的各位作者致谢。

本书由向国兴、刘子金总体策划，刘子金组织并牵头编著，武兴亮负责

施工现场地质工作并参与编著，袁代江、向国兴、官长华负责技术把关和审稿，欧阳孝忠参与审稿，刘子金统稿。

限于作者技术水平及工程实践经验，本书虽几经易稿，但不足仍在所难免，欢迎广大同仁不吝赐教。

作者

2018年4月

目录 CONTENTS

序 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究的意义	1
1.2 相关研究现状综述	2
1.3 研究工作范围	4
1.4 研究内容和方法	5
1.5 技术路线	5
1.6 主要成果	7
第 2 章 自然地理及地质概况	9
2.1 自然地理条件	9
2.2 气象及水文	9
2.3 地形地貌	10
2.4 地层岩性	11
2.5 地质构造	13
2.6 地震	18
第 3 章 岩溶层组及地下水类型划分	19
3.1 研究区岩溶层组的分布及富水情况	19
3.2 地下水类型划分	20
第 4 章 褶皱构造与岩溶发育特征	21
4.1 褶皱核部	22
4.2 褶皱核部构造与岩溶发育的关系	26
4.3 褶皱转折部位	27
4.4 褶皱转折部位与岩溶发育关系分析	30
4.5 褶皱翼部	30
4.6 褶皱翼部构造与岩溶发育的关系	80

4.7	溶洞沉积物特征研究	80
4.8	褶皱构造与岩溶育关系小结	86
第5章	岩溶水文地质结构与岩溶水特征	89
5.1	岩溶水文地质结构	89
5.2	岩溶水动态特征	99
5.3	库首左岸褶皱带岩溶地下水运移特征	103
5.4	地下洞室开挖施工涌水情况	113
5.5	岩溶水文地质特征小结	115
第6章	水库渗漏与渗控处理	117
6.1	水库渗漏通道与渗漏形式	117
6.2	库首防渗处理边界研究	118
6.3	防渗帷幕边界复核综述	131
6.4	水库防渗处理	132
6.5	防渗帷幕线主要岩溶处理	132
6.6	渗控处理小结	144
第7章	结论与展望	145
7.1	结论	145
7.2	研究展望	148
附图		149
参考文献		150

1.1 课题研究的意义

黔中地区是贵州省政治、经济、文化、交通中心，是贵州省城市最密集、交通最发达、工业基础最好、人口最集中、耕地资源集中成片的地区，是贵州省经济社会发展核心地区和最有基础、最有发展潜力的地区，区位优势突出，在全省占有举足轻重的地位。但因地处苗岭宽缓山脊、两江分水岭河源地带、岩溶强烈发育的山区，山高谷深水源低，雨多水少不易蓄，坡陡土薄涵水弱，旱灾频繁单产低，水资源开发利用难度极大，加上水资源时空分配不均，人均水资源量少，可利用水资源非常紧缺，缺水成为发展的首要瓶颈。黔中区属于用水紧张地区，总体表现为资源型缺水，也存在水质型缺水和工程型缺水。缺水表现为：一是供水能力不足，供需矛盾尖锐，以牺牲发展速度和质量为代价维系生存；二是无大型骨干工程支撑，灌溉面积小，供水保证率低；三是旱灾严重而频繁，抗旱能力极差；四是当地水生态遭破坏，治理和保护任务繁重。

根据黔中区周边水源点比选研究，从乌江上游三岔河平寨河段取水解决该地区缺水问题的布局方案具有提水耗能最低、投资和年运行费最省、输水线路最符合区域用水布局、工程布局最符合区域水资源优化配置等优点，由此提出从三岔河引水的黔中水利枢纽工程解决该地区的缺水问题。平寨水库工程即为黔中水利枢纽工程水源点。

平寨水库工程位于乌江上游南源三岔河六枝北部与织金交界处的木底河段，属长江流域，发源于贵州西部高原威宁县盐仓镇西南的乌蒙山东麓，河流由西北向东南流经威宁、水城、纳雍，至六枝的龙场转向东北向，流经织金、普定、平坝县境，于平坝县吴家渡附近折向北流，在清镇市、黔西县、织金县交界的化屋基和六冲河汇合后始称乌江。三岔河干流全长 325.6km，落差 1339.8m，平均比降 2.83‰，集水面积 7264km²。

水库设计正常蓄水位 1331.00m，总库容 10.89 亿 m³，混凝土面板堆石坝最大坝高 157.5m，为 I 等大 (1) 型水利枢纽工程。工程全部建成后可解决黔中灌区 7 县 49 个乡镇 65.14 万亩农灌用水、5 个县城和 36 个乡镇供水、农村 41.8 万人和 36.4 万头牲畜饮水以及贵阳、安顺城市供水，总的毛供水量 7.67 亿 m³/a。

水库坝址区主要出露三叠系下统永宁镇第四段 (T_{1yn}⁴) 为中至厚层白云岩、泥质白云岩、角砾状白云岩夹少量灰色白云质灰岩及泥灰岩；第三段 (T_{1yn}³) 为极薄至中厚层灰岩、泥质灰岩夹 4 层黄灰色泥质白云岩；第二段 (T_{1yn}²) 为薄至中厚层泥质灰岩、钙

质泥岩夹灰岩；第一段（ T_1yn^1 ）为灰色中厚层灰岩。帷幕线上、下游分别发育三塘向斜、鸡场背斜，主要为短轴式褶皱。

库首一带强岩溶透水层与弱岩溶弱透水层相间分布的渗透结构型式，形成了本区复杂的岩溶水文地质条件。水库近坝右岸河间地块分水岭区存在马场垭口、上下岩冲垭口地下水水位低于水库正常蓄水位地段，水库蓄水后有向懒龙河低邻谷渗漏的可能；左岸在永宁镇组的第一段、第三段强岩溶化灰岩中发育有 Ks_1 、 Ks_3 、 Ks_4 、 Ks_6 等岩溶系统。平寨水库库首岩溶渗漏问题复杂，库首防渗是该工程的核心，近坝库岸的岩溶渗漏问题不仅是本工程的难点，也是水源工程最大的工程地质风险点，是工程成败的关键。

为总结以往岩溶渗漏勘察及防渗处理经验及教训，在工程建设前研究平寨水库库首岩溶渗漏机理、型式、规模，提出可靠的防渗对策，并尽可能优化原水库防渗结构，为此，贵州省水利水电勘测设计研究院向贵州省科学技术厅申请贵州省科技计划项目“黔中水利枢纽工程重大关键技术研究与应用”（〔2012〕6013）对工程建设中所遇重大关键技术开展研究，研究课题为“黔中水利枢纽工程重大关键技术研究与应用”课题1“库首褶皱带隐伏型岩溶发育特征及其渗漏研究”。

1.2 相关研究现状综述

岩溶即喀斯特（Karst），是水对可溶性岩石（碳酸盐岩、石膏、岩盐等）进行以化学溶蚀作用为主，流水的冲蚀、潜蚀和崩塌等机械作用为辅的地质作用以及由这些作用所产生的现象的总称。在岩溶作用过程中，经常伴随地表侵蚀、地下潜蚀、冲蚀以及崩塌与滑动和化学与物理的风化、搬运、堆积与沉积等作用，因而产生沟槽、裂隙和空洞以及由于空洞的顶部塌落使地表产生陷穴、洼地等现象。岩溶作为一种不良地质现象，广泛分布在美国、中国、法国、南斯拉夫、德国、俄罗斯、英国等国家，是水库渗漏、地面建筑物基础稳定及地下工程施工所要面对的困难及需要解决的问题之一。

2004年8月，伍法权在中国地质学会工程地质专业委员会等单位举办的西部水利水电开发与岩溶水文工程地质学术研讨会术总结报告中指出：继续深化岩溶发育规律的研究仍然是摆在我们面前的艰巨任务。岩溶问题的水文地质工程地质研究与工程处理，难点在于对岩溶分布规律性的认识。这一问题几十年来一直是学术界和工程界，特别是水利水电行业的一个国际性难题和热点问题，目前还有许多基础性和应用性问题没有得到解决。例如，岩溶作用受介质特征与构造特征影响的规律性问题、受水动力学等条件影响的差异溶蚀作用规律问题、岩溶探测技术与成果解译方法等问题，都有待进一步的深入研究。同时，岩溶水文地质工作有着十分广阔的发展前景，岩溶水文地质及工程地质中，查清渗漏通道及其分布规律是解决水库岩溶渗漏问题的关键，也是瓶颈问题；说它是关键，是因为岩溶渗漏决定工程成败；说它是瓶颈，是因为它是难点，是国际国内学术界和工程界共同的难点。

目前，国内外有关岩溶研究的部分成果大致有以下几方面：

（1）向斜区的岩溶研究。朱峰等2014年对北京西山奥陶系岩溶水资源进行评价时，认识到研究区褶皱断裂对奥陶系岩溶水的补径排条件起着重要的控制作用，采用地下水水位曲线法、地下水水化学方法及数值模拟方法，着重分析了香峪向斜及永定河断裂对奥陶

系岩溶水径流模式的影响,提出了西山奥陶系岩溶水径流模式的新认识:香峪向斜具有明显的阻水作用,军庄地区奥陶系岩溶水不能以深循环的形式通过该向斜,永定河断裂则是重要的导水通道,军庄地区奥陶系岩溶水接受补给后,约有75%的水量会沿着该断裂向八宝山断裂进行径流,并最终向玉泉山地区进行排泄,其余25%的水量则沿着香峪向斜北翼向温泉地区径流。王勳等2006年在对渝怀线铁路圆梁山隧道深部岩溶与岩溶水发育特征进行研究时,经过对毛坝向斜段揭露的深埋岩溶、表层岩溶发育特征及水源环境、深部岩溶水流的穿层运移形式及径流模式、岩溶水流的连通特征等进行了系统研究,提出了隧道建设中需要考虑的三个岩溶集中发育带。主要研究结论如下:

1) 毛坝向斜是多期地质构造综合作用形成的船形的构造形态,在向斜中形成了独立的地下水循环系统。

2) 毛坝向斜深部岩溶与表层岩溶的分布特征及影响因素具有一致性,可以通过表层岩溶发育环境推定深部岩溶基本分布规律。

3) 针对隧道高程揭露的几个大型溶洞(埋深800m),通过隧道排水对地表水的影响监测和溶洞沉积物的物源研究证明:浅表层与深部岩溶的关系密切,深部岩溶水来自向斜现代槽谷洼地汇水和一级、二级夷平时期发育的溶洞管道汇水;而且深部岩溶水水化学成分及CO₂含量分析结果表明,深部岩溶仍在继续发育。

4) 通过表层岩溶和溶洞的调查分析认为:管道流是毛坝向斜深埋地下水的主要运移形式,循环途径主要为:槽谷、洼地等汇水系统—落水洞等水流补给系统—暗河管道径流系统—排泄系统。该区充沛降水补给和深部大型管道溶洞水是产生隧道突水的主要原因。

5) 隧道施工揭露的几个深埋大型溶洞,在发育深度上远远低于地下水在向斜区内的最低排泄点,而主要发育在深部含水层的底板或相对隔水层顶板附近,最易出现在核部区岩层产状由水平转变为倾斜岩层的部位。因此,岩溶发育深度不能简单地用当地侵蚀基准面或排泄基准面笼统地确定,而是受含水层与隔水层界面的分布、构造形态、岩溶发育阶段、附近地表水系的分布等因素综合控制。

(2) 断裂对岩溶的控制作用研究。杨荣丰等2006年在对地下径流通道的形成、特征及其探测技术研究时,通过分析岩石介质中由水头高处向水头低处流动的地下水流,认为地下水流主要通过断裂带等连通的空隙流动并带走空隙中的物质,淘空断裂带,形成地下径流通道。分析了地下径流通道的主要类型、特征。研究了每种类型的形成机理、影响因素及其与地下水运移的关系。提出了与矿山防治水、地下水开发等关系密切的地下径流通道的类型(亚类)及其作用方式。

(3) 岩溶顶板稳定研究。石祥锋等2006年在进行岩溶区桩基荷载下隐伏溶洞顶板稳定性研究时,评价了隐伏溶洞顶板稳定性所需确定的顶板最小安全厚度。针对实体工程,运用定性、半定量和数值模拟方法进行分析评价,青溪大桥4号墩所在位置的溶洞顶板在岩土自重和桩基的外荷载作用下,其溶洞顶板安全厚度大于7.5m,溶洞顶板处于稳定状态,确定大桥桥基采用明挖扩大基础,溶洞顶板的设计安全厚度为8.5m,突破了《公路路基设计规范》的规定。

(4) 岩溶形态空间分布规律研究。薛倩倩等在《岩溶槽谷地下河系统动态变化及含水介质各向异性对比研究——以重庆青木关与南山老龙洞地下河为例》中,根据2012年水

文资料对重庆南山老龙洞地下河流量和青木关地下河流量进行相关分析,表明研究区含水介质是一个具有不同等级储水空间的多层次结构,自上而下是大管道和溶洞,裂隙和溶蚀裂隙,孔隙三种层次,但以裂隙-孔隙含水空间为主。通过流量变化和水文地球化学变化分析了南山老龙洞地下河和青木关地下河岩溶系统,并结合前人研究成果得出南山地下河系统是除主管道外,还有 U 字形弯曲支岔以及向下发育的倒虹吸式管道;而青木关地下河系统岩口落水洞至姜家泉段地下径流为典型的紊流流态,且无岔道,含水介质极不均匀,是以单一岩溶管道系统为主。杨立铮在《中国南方地下河分布特征》一文中,讨论了地下河的分布特征、发育强度富水区结构形态、主要的发育层位和构造部位等方面的问题。

(5) 岩溶与水库渗漏研究。邹成杰在《猫跳河四级水电站水库、坝址岩溶渗漏及防渗处理的研究》一文中,讨论了猫跳河四级水电站水库、坝址岩溶发育的基本特征问题,进行了含水层与隔水层划分、渗漏带的划分,论述了含水层的透水性、水库蓄水前岩溶水文地质特征、水库蓄水后岩溶水文地质情况、渗漏下限的论证,并就水库防渗处理方案进行了研究。

1.3 研究工作范围

研究工作范围大致以平寨水库坝址为中心,北至约 6km 外的三岔河上游纳雍河、扈家河汇口,东侧至白泥塘—打牌寨—周家梁子—箐口—大田一带约 8km 外,西侧至库首右岸懒龙河邻谷约 4~6km 外,南侧至龙家冲—张家大坡—高家梁子—梭戛—牛角山一带约 4km 外,研究区范围约 140km² (图 1.1)。

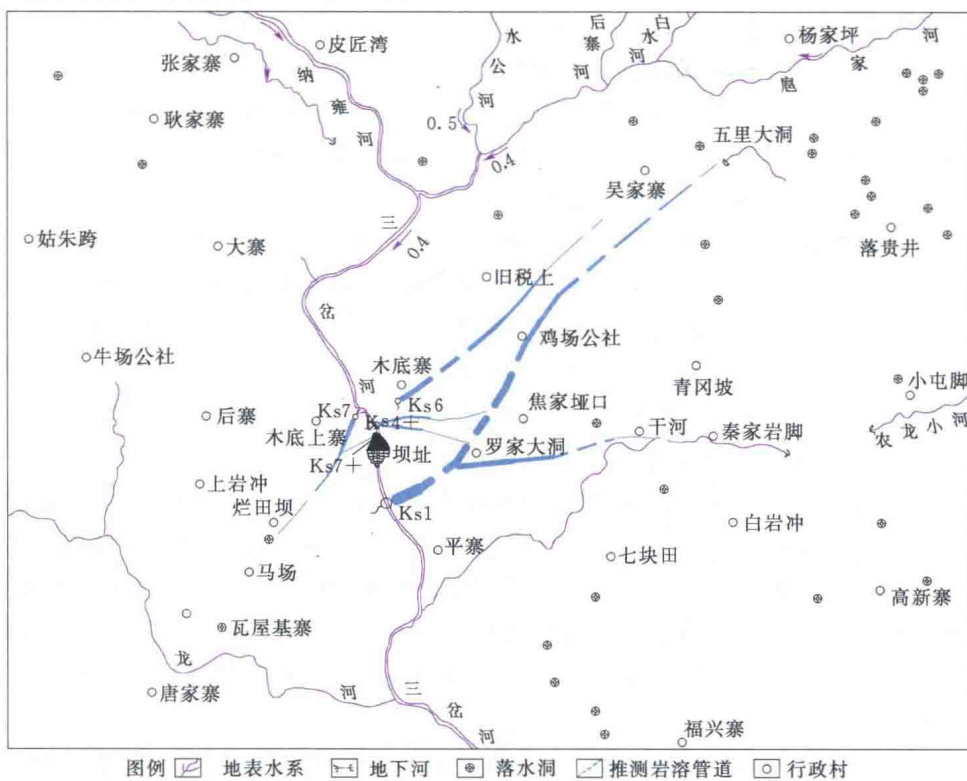


图 1.1 研究范围及水系示意图