



中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

雅砻江大河湾岩溶水文地质 及工程效应研究

单治钢 周春宏 荣冠等著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

雅砻江大河湾岩溶水文地质 及工程效应研究

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

单治钢 周春宏 荣冠等著

科学出版社

北京

内 容 简 介

岩溶水文地质是工程建设中十分重要的问题,本书以雅砻江大河湾岩溶水文地质及工程效应研究为主题,全面总结高山峡谷区水电工程岩溶水文地质的勘察方法,系统研究雅砻江大河湾地区基本地质条件、岩溶发育特征与规律、岩溶水动态与均衡、岩溶水化学、岩溶水同位素等内容,深入开展锦屏二级水电站工程区大理岩高压低温溶蚀试验、数次大型岩溶水示踪试验。在此基础上,进行工程区岩溶发育程度分区、岩溶水文地质单元划分的工作,揭示各水文地质单元岩溶地下水补径排关系,对工程区深埋长隧洞群的瞬时最大涌水量和稳定涌水量进行合理预测,并对工程效应进行分析,为锦屏二级水电站的顺利建设提供科学依据及技术保障。

本书可供水利水电、交通、矿山等行业从事水文地质和工程地质研究的科研人员及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

雅砻江大河湾岩溶水文地质及工程效应研究 / 单治钢等著. —北京: 科学出版社, 2018. 3

ISBN 978-7-03-055895-4

I. ①雅… II. ①单… III. ①水利水电工程-岩溶水-水文地质勘探-研究-四川 IV. ①P641.134

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 306244 号

责任编辑: 张井飞 韩 鹏 陈姝姝 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

河北鹏润印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 3 月第一次印刷 印张: 30 3/4

字数: 729 000

定价: 398.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

我国西南水电开发所处的高山峡谷区多具有海拔高、河谷剥蚀强及地质作用、气候与水文条件随高程变化大等特点。受区域特殊构造背景的影响，高山峡谷区岩溶的发育规律有别于平原剥蚀区。因此，需探索研究针对高山峡谷区岩溶及其地下水的勘察技术，进一步研究高山峡谷区岩溶地下水运动规律，并结合水电工程建设开展岩溶地下水预测与工程处理措施研究。进行高山峡谷区岩溶水文地质研究对丰富岩溶地下水理论和水能资源开发具有重要的理论和实践意义。

雅砻江大河湾地区碳酸盐岩类地层分布广泛，为典型的高山峡谷地貌，地表及地下均发育不同程度的岩溶。雅砻江大河湾河间地块的岩溶水文地质条件是决定锦屏水电开发方式最重要的依据，同时也是解决锦屏山深埋隧洞优化设计、地质条件预报、涌水预测及治理等重要工程问题的基础。西南地区区域地质条件复杂、构造活动频繁、地形差异大，区域岩溶作用和地下水与普通地质条件下的规律存在差异，这给我们认识该条件下的岩溶作用规律及地下水循环条件提出了挑战。中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司依托锦屏二级水电工程，从20世纪60年代中期以来，围绕雅砻江大河湾岩溶地质发育规律和岩溶地下水循环条件等方面开展了深入研究。具体包括：采用大范围综合岩溶定性调查方法对岩溶发育情况进行研究；开展长时段岩溶水动态观测、岩溶水示踪试验、岩溶水化学与同位素分析及水均衡等研究工作；结合岩溶区岩溶发育规律及水文地质条件的分析评价，采用多种方法对深埋长隧洞的涌水点、涌水量及外水压力进行预测和评价；开展隧洞开挖对环境水文地质的影响分析评价；提出深埋长隧洞施工期地下水的处理措施。其研究工作在复杂地质条件下的水文地质勘察研究方法、深埋岩溶地下水示踪试验及其分析方法、岩溶发育程度和深度综合分析方法等理论方面具有创新性。

《雅砻江大河湾岩溶水文地质及工程效应研究》一书作者对雅砻江大河湾岩溶地区进行了长期调查、勘察、试验及系统研究，取得了丰硕的成果。该书系统地介绍了作者多年来对雅砻江大河湾岩溶地质规律和岩溶地下水循环条件等方面的研究成果，包括：高海拔和高山峡谷区岩溶勘察分析的基本方法、雅砻江大河湾岩溶地区岩溶发育规律、岩溶水文地质单元划分、岩溶地下水循环分析、隧洞涌突水及外水压力预测研究、岩溶水文地质的工程效应问题等。这些内容对读者掌握高山峡谷区岩溶水文地质特征及工程效应具有重要帮助。同时，也可为西南地区类似地质条件的水电工程建设提供宝贵经验。该书是一部关于岩溶及其地下水

研究的优秀著作，可为水利水电、交通、矿山等建设提供难得的研究数据，在理论研究和工程实践中均能起到重要的指导作用。

中国工程院院士

王恩敬

2017年6月12日

前 言

雅砻江大河湾已建的锦屏二级水电站总装机容量为 4800MW，是雅砻江流域中装机规模最大的水电站，为低闸、长引水式开发，其引水隧洞长 17.5km，埋深大多在 1500m 以上，最大埋深达 2525m。雅砻江大河湾区碳酸盐岩类地层分布广泛，占总面积的 70%~80%，为典型的高山峡谷区岩溶。岩溶及高压涌水是锦屏二级水电站深埋长引水隧洞的关键工程地质问题之一。

对于典型岩溶地区，常态条件下的勘察研究方法、岩溶发育规律与影响因素、岩溶区工程地质问题及处理、岩溶区旅游资源的利用和岩溶区灾害防治等已有较多的研究成果，但对高海拔、高山峡谷区岩溶的系统研究较少，其中对高水头溶蚀型岩溶含水层的研究更少。中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司自 20 世纪 60 年代以来，联合中国地质科学院岩溶地质研究所等单位，对雅砻江大河湾地区的岩溶地质作用、岩溶水文地质条件和岩溶地下水工程效应等进行了长达数十年的研究。本书系统总结了该方面的研究成果，为雅砻江大河湾开发方式的确定和锦屏二级水电站的顺利建设提供了科学依据。

本书共分为 10 章：第 1 章概述雅砻江大河湾岩溶水文地质问题的研究背景、研究现状、研究方法及研究成果；第 2 章简要介绍雅砻江大河湾地区自然与地质条件；第 3 章系统总结高山峡谷区岩溶水文地质勘察与分析方法；第 4 章分析影响雅砻江大河湾地区岩溶发育程度的主要因素，揭示岩溶发育特征与规律；第 5 章研究锦屏工程区水化学同位素特征，分析工程区岩溶发育特征与地下水补径排规律；第 6 章系统介绍锦屏二级水电站工程区历次岩溶水示踪试验的实施过程和试验结果，分析岩溶含水介质特征，以及水文地质单元间的水力联系；第 7 章介绍锦屏工程区岩溶地下水动态、水均衡分析方法及成果；第 8 章介绍锦屏工程区水文地质单元划分，并概述各单元岩溶水循环特征；第 9 章总结深埋隧洞涌突水及外水压力预测技术；第 10 章介绍岩溶水文地质条件对工程选址、设计和施工的影响，简述岩溶与涌突水的工程治理措施。

本书在编著过程中，参考了国内外专家学者的相关专著，在书后均已列出，作者在此一并表示感谢。由于作者能力有限，书中难免存在不妥之处，请同行专家不吝赐教，以便纠正和改进。

作 者

2017 年 3 月 24 日

目 录

序	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 雅砻江大河湾自然与工程背景	1
1.2 水电工程岩溶水文地质研究现状	3
1.3 雅砻江大河湾岩溶水文地质与工程效应研究	8
第 2 章 雅砻江大河湾自然与地质条件	14
2.1 雅砻江大河湾区域地质背景	14
2.2 地形地貌与气象条件	18
2.3 地层岩性与地质构造	19
2.4 岩溶发育基本特征	29
2.5 水文地质基本条件	29
第 3 章 岩溶水文地质勘察与分析方法	33
3.1 工程地质测绘及岩溶调查	33
3.2 遥感技术	39
3.3 地球物理勘探技术	42
3.4 地质钻探与洞探	54
3.5 岩溶水文地质试验与分析方法	57
3.6 深埋隧洞涌水预测方法	85
第 4 章 雅砻江大河湾岩溶发育规律研究	93
4.1 岩溶发育条件分析	93
4.2 岩溶发育与演化规律	121
第 5 章 雅砻江大河湾岩溶水地球化学特征研究	158
5.1 岩溶水化学研究	158
5.2 岩溶水同位素研究	168
5.3 岩溶水地球化学研究成果分析	187
第 6 章 雅砻江大河湾岩溶水示踪试验研究	192
6.1 岩溶水示踪试验	192
6.2 岩溶水示踪试验成果分析	242
6.3 岩溶水示踪试验研究结论	307
第 7 章 雅砻江大河湾岩溶水动态和均衡分析	314
7.1 地表、地下水观测布置	314
7.2 岩溶水动态分析	317

7.3	岩溶水均衡分析	345
7.4	岩溶水动态与水均衡分析结论	356
第8章	雅砻江大河湾岩溶水文地质分区及循环特征	357
8.1	岩溶水循环总体规律	357
8.2	岩溶水文地质单元划分	364
8.3	各单元地下水循环特征	369
第9章	深埋隧洞涌突水及外水压力预测研究	393
9.1	深埋隧洞稳定涌水量预测	393
9.2	深埋隧洞突发涌水量预测	406
9.3	深埋隧洞外水压力预测研究	407
9.4	深埋隧洞岩溶裂隙水地质超前预报	421
第10章	雅砻江大河湾岩溶水文地质工程效应分析	427
10.1	工程效应	427
10.2	地下洞室群岩溶特征及工程处理	440
10.3	地下洞室群高压涌水特征及工程处理	459
10.4	开挖验证及评价	477
	主要参考文献	480

第1章 绪 论

锦屏二级水电站位于雅砻江干流雅砻江大河湾上。为满足水电站引水、施工及交通需求，共布置了7条横穿锦屏山的深埋隧洞，隧洞长17.5km，最大埋深达2525m。

雅砻江大河湾地区存在海拔高、峡谷陡峻、河谷温差及气候变化明显、第四纪以来河谷切割迅速等特殊自然地质条件。中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司依托锦屏二级水电工程，自20世纪60年代中期以来，围绕雅砻江大河湾岩溶发育规律和岩溶地下水循环条件等方面开展了长期深入的系统研究。主要研究工作包括：区域基本地质条件、岩溶发育规律、岩溶水化学特征、岩溶水示踪试验、大理岩溶蚀试验、岩溶水文地质单元划分、岩溶地下水循环分析、岩溶水动态与均衡分析、隧洞涌突水及外水压力预测研究、岩溶水文地质的工程效应问题等。研究成果为雅砻江大河湾开发方式的确定和锦屏二级水电站的工程建设提供了重要的科学依据，并且可为西南地区类似地质条件的水电工程建设提供宝贵经验。

1.1 雅砻江大河湾自然与工程背景

1.1.1 雅砻江大河湾概况

雅鲁藏布江大河湾、金沙江大河湾和雅砻江大河湾是我国三大著名的河湾及峡谷。雅砻江是金沙江的第一大支流，发源于青海省玉树境内的巴颜喀拉山南麓，干流流经四川省西部，于攀枝花的保果处汇入金沙江，全长1670km，流域面积12.8万 km^2 。雅砻江干流总体流向为平行于金沙江由北向南，雅砻江下游段与理塘河汇合后，河流流向急剧转变为向北东流，至九龙河口下游窝堡乡又急转变为向南流。雅砻江由此在该河段形成了由东、西雅砻江切割，中间横亘锦屏山脉的著名的雅砻江大河湾（图1.1）。

雅砻江大河湾地处青藏高原向四川盆地过渡的两级地貌阶梯部位，河湾区为高山峡谷地貌。河间地块（锦屏山）近SN向展布，山势雄厚，沟谷深切，峭壁陡立。根据山川地势、相对高差、切割程度等，雅砻江大河湾内存在高山、中山、峡谷、夷平面、阶地、岩溶和冰蚀等地貌类型。雅砻江大河湾北端至南端火炉山一带长度在90km左右，由东、西雅砻江切割形成的大河湾河间地块宽12~24km。东、西雅砻江间的河间地块（锦屏山）地表分水岭高程多为3500~4000m，最高山峰海拔为4488m（三堂山）。东、西雅砻江水面高程为1250~1635m。雅砻江150km长的大河湾存在310m的天然落差，加上雅砻江流量大，对其进行截弯取直引水发电可获得丰富的水能资源。

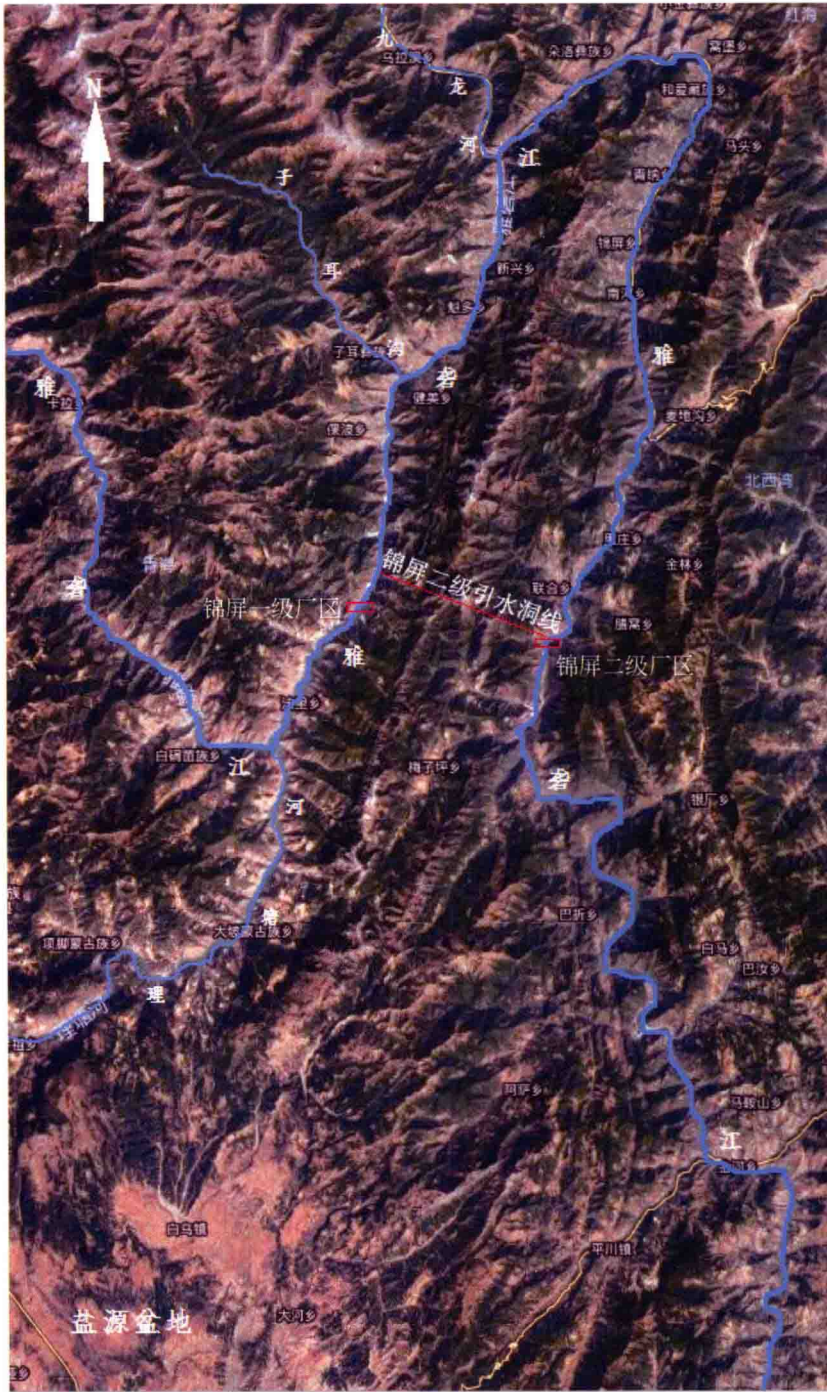


图 1.1 雅砻江大河湾地理位置示意图

1.1.2 锦屏二级水电工程背景

雅砻江下游河段（从卡拉至江口段）全长412km，天然落差达930m，该河段水能蕴藏量巨大，占雅砻江全流域可开发水能资源的50%，其中锦屏水电枢纽工程是该河段的核心水电工程。锦屏水电枢纽工程由一级、二级两个梯级水电站组成：锦屏一级水电站位于四川省凉山彝族自治州盐源县和木里藏族自治县交界的雅砻江畔洼里乡灯盏窝，是雅砻江干流下游河段的控制性水库梯级电站；锦屏二级水电站位于四川省木里、盐源、冕宁三县交界处的雅砻江干流雅砻江大河湾上，上距锦屏一级水电站坝址7.5km，系雅砻江下游的第二座梯级电站。锦屏二级水电站利用雅砻江150km长大河湾的天然落差，截弯取直开挖隧洞引水发电，额定水头288m，为雅砻江上水头最高、装机规模最大的水电站，主要由首部低闸、长大引水系统、尾部地下厂房等三大部分组成。首部闸址位于雅砻江大河湾西端的猫猫滩，最大闸高34.0m，取水口集中布置于闸址上游2.9km处的景峰桥右岸，地下厂房位于雅砻江大河湾东端的大水沟。电站总装机容量为4800MW（8台×600MW），工程建设总工期为8年3个月。锦屏二级水电站于2007年1月30日正式开工，2012年12月30日首台机组投产发电，2014年11月29日8台机组全部投产发电。

为满足锦屏二级引水、施工及整个锦屏枢纽交通的需求，共设计了7条横穿锦屏山的深埋隧洞，为世界上最大规模的水工隧洞群。其中，4条引水洞线自景峰桥至大水沟，采用“4洞8机”布置，平均长度约16.7km，开挖洞径13m，上覆岩体最大厚度为2525m，具有埋深大、洞线长、洞径大的特点。沿线除了引水隧洞外，还开挖了两条辅助洞用于交通和勘探，辅助洞与引水隧洞之间为一条施工排水洞，用于排出引水隧洞开挖过程中揭露的涌突水。

雅砻江大河湾区碳酸盐岩类地层广泛，占总面积的70%~80%，为典型的高山峡谷区岩溶，岩溶水文地质条件是深埋长引水隧洞的关键工程地质问题之一。在已有的岩溶研究成果中，关于典型岩溶地区，一般条件下的勘察方法、岩溶发育条件和影响因素、岩溶区工程地质问题及工程处理措施等的研究较多，但对高海拔、高山峡谷区岩溶发育规律及岩溶地下水循环的研究较少，尤其是对高水头溶蚀型含水层的研究在国内外极少。因此，从工程建设和岩溶水文地质学发展的角度，需对雅砻江大河湾岩溶发育规律、岩溶水文地质条件、深埋隧洞涌水量及外水压力等进行深入研究。

1.2 水电工程岩溶水文地质研究现状

1.2.1 岩溶基础地质研究

我国系统性的基础地质、水文地质调查始于20世纪60年代，至80年代，全国大部分地区已经完成了1:20万区域地质和水文地质普查工作，这些基础地质研究成果是我国西部大部分地区迄今为止最为完整和详尽的地质资料，为我国西部水电工程建设提供了最

为权威、可靠的基础资料。但在西部高海拔人烟稀少区域,仍有相当范围的区域未开展过1:20万区域水文地质调查工作。80~90年代,针对我国“北旱南涝”、岩溶干旱(北方地区为“资源性缺水”,南方岩溶区为“结构性缺水”)和区域性贫困等问题,国家启动了一些局部范围的扶贫攻坚基础研究工作,如地质部门在湖南洛塔、广西地苏地下暗河等地区开展了以开发地下水资源为主要目的的综合水文地质调查。

“十五”以来,我国启动了新的国土资源大调查。从1999年开始,地质行业以西南岩溶地区为重点开展了1:5万岩溶流域水文地质、地质环境、水资源评价等调查与研究。到2011年共完成了63个典型岩溶流域的岩溶水文地质与地质环境调查,调查面积达14.82万 km^2 ,对各流域的边界条件,岩溶含水层组类型和水文地质结构,岩溶地下水的补径排进行了详细的调查和研究。对西南岩溶区可采地下水资源量和地下水资源开发潜力进行了评估。选择典型岩溶流域,实施地下水开发与环境治理示范项目12项,取得了显著的成效。在工程地质调查与研究方面,重点围绕三峡水利枢纽库区及影响带开展工作,以危岩体、滑坡和泥石流等地质灾害的调查、监测、机制研究和灾害预报为主要内容,形成了较成熟的重大地质灾害防治与监测的技术方法。

在北方地区,主要针对“资源性缺水”开展水资源开发与保护性调查、监测和研究工作,完成了11个主要盆地和平原的地下水资源及其环境地质调查。例如,在鄂尔多斯盆地,查明了盆地含水层系统结构,发现并圈定了18处特大型地下水富集区,为鄂尔多斯盆地能源基地建设规划提供了水源保障;在山西主要开展以岩溶大泉保护性开发和地下水系统修复为目标的调查、监测和研究工作。2000年以来,对19处岩溶大泉进行了深入研究,查清了各岩溶泉域范围,研究了各岩溶泉域的地下水循环,分析了水资源环境问题及其成因机制。初步建立和优化了地下水位、水量与水质监测网,提出了水资源保护的目标与措施,为山西地下水资源的开发与保护奠定了基础。

在上述十多年研究的基础上,我国完成了地下水资源第二轮评价,查明地下水可开采资源量3257亿 m^3 ,建立了1:20万和一些重点地区的1:5万区域水文地质数据库,完成了1640个山地丘陵区(市)650万 km^2 的地质灾害调查和区划,查出地质灾害隐患点24万处。这些研究成果为西部水电工程建设提供了最新的基础资料。同时,水文地质研究已经从传统单一的对水文现象的认识阶段发展到以地球系统科学思路为指导进行研究的阶段。一些新的理论和研究方法逐渐形成,并应用于西部水电工程建设的地质研究中。例如,岩溶动力学理论,即以碳-水-钙相互作用来认识岩溶动力系统的结构、功能和运行规律;岩溶水温度、同位素和水化学“三场”理论等。岩溶动力学理论初步奠定了岩溶地质调查、勘察和监测的理论基础。一系列新仪器和新技术方法在地下水调查中得到应用,如遥感技术、核磁共振及多功能电磁法等技术,为地下水的调查与开发利用提供了技术保障。

国土资源行业主要是以区域性的普通地质与水文地质调查研究为主,总体研究程度较低。例如,1999年以来西南岩溶地区实施的重点岩溶流域1:5万岩溶水文地质及地质环境调查主要集中在滇东、川东及其以东地区,滇中、川西地区只有1:20万区域水文地质调查资料。一些地形复杂的偏远高山峡谷区,如三江并流区上游地区,相关水文地质、工程地质和地质环境调查工作程度低,1:20万水文地质调查工作尚未开展。对于西南主要

流域中上游及高海拔区,普通地质及水文地质缺乏系统研究,难以满足西部重大水电工程建设的需要。因此,西部大型水电工程建设均需在上述工作的基础上,开展更为详细的地质、水文地质调查工作,包括符合工程要求的岩溶水文地质研究工作。针对特定工程需进行岩溶与水文地质调查专题,以查清库坝区岩溶发育、分布规律和地下水循环运移规律。例如,锦屏二级水电站可行性研究阶段的“岩溶水文地质专题研究”、滇中引水工程的“滇中引水工程沿线岩溶发育规律性研究”等。

从已有的岩溶及岩溶地下水研究成果来看,主要集中在地质、气候、水文与岩溶形成的关系,岩溶作用和碳循环,岩溶地质及其相关生态系统全球对比等理论研究方面。在岩溶工程地质和水文地质研究方面,国内研究成果主要包括:①万家寨水库右岸岩溶渗漏试验研究,通过微量元素多元示踪环境同位素及水化学分析和数值模拟,对万家寨水库右岸岩溶渗漏问题进行综合研究,查明渗漏途径和渗漏强度,为水库渗漏治理提供依据,探索北方水库岩溶渗漏调查的有效途径。②中国北方岩溶区水库渗漏综合试验研究,采用示踪试验与地下水化学成分、地下水同位素监测相结合的方法研究岩溶发育规律。主要内容有岩溶发育规律研究、示踪试验(示踪元素、试验时机、试验区选取)、数据分析与模拟计算、现场调查等。③云南石林岩溶形成机制与地下水库渗漏问题前期研究,它从岩溶含水层结构、洞穴学、岩石学、岩石微形态、地质构造、水文地质和水化学等多方面深入和定量地探讨云南石林地区岩溶发育过程和影响因素,主要内容有石林地下水库区岩溶含水层结构及作用,石林地区地表形成研究,洞穴系统探测研究及人类活动对石林的影响和保护,得出了建设石林地下水库不可行的结论。④陇东盆地西部岩溶地下水形成机制研究,通过运用构造控水分析、水化学同位素等方法,对岩溶裂隙水系统进行了深入的分析和讨论。根据岩溶水的空间分布与水动力条件及其补径排条件,全区可划分为3个相对独立的岩溶水系统。

结合我国西南水电工程建设的经验,对相关的岩溶问题进行了较系统的总结,其中代表性的成果有《水利水电岩溶工程地质》(邹成杰,1994)。近20年来,西南大型水电工程建设先后开展了库坝区岩溶渗漏、库坝稳定、涌水突泥及水环境问题等研究,这些研究成果对西南水电工程建设发挥了重要作用。雅砻江大河湾突出的特点是海拔高、河谷深切及地质作用、气候与水文条件随高程变化大。由于高山峡谷区通行困难,常规岩溶水文地质研究工作难以全面开展,锦屏二级水电站岩溶水文地质研究主要采用大范围综合岩溶定性调查,重点开展长时段岩溶水动态观测,进行岩溶水示踪试验和岩溶水化学与同位素分析研究,采用水均衡等方法研究大河湾区不同单元的岩溶水文地质特征。采用地下水动力学理论和通过长探洞的施工实践对深埋长隧洞的涌水水文地质作出预测和评价,同时开展隧洞开挖对环境水文地质的影响分析研究。在勘探技术上配合钻孔揭露,重点通过超深平洞勘察查明研究区复杂的岩溶发育规律及其水文地质系统特征。锦屏二级水电站岩溶水文地质研究突出了高海拔、高山峡谷区和高压低温状态的岩溶作用和水文地质条件,以大范围岩溶调查、勘探钻孔长探洞,以及长时段的岩溶水流量、水化学、水同位素动态和示踪试验、溶蚀试验为基础,利用多方法获取的信息研究岩溶发育特征和水文地质格局,无论其勘察研究方法、手段还是取得的成果,都是目前为止最深入和最系统的,弥补了我国甚至世界上高海拔、高山峡谷区岩溶水文地质系统性研究方面的不足。

1.2.2 水电工程岩溶及地下水研究

地球 71% 的面积为水圈, 陆地面积占 29%, 地球陆地中碳酸盐岩占 15%。全球碳酸盐岩主要分布在中国南部, 以及地中海沿岸、欧洲东部、东南亚和美国东南部等地区, 40 个国家有岩溶发育。中国的碳酸盐岩层分布面积为 344.3 万 km^2 , 约占陆地面积的 36%, 出露面积约 91 万 km^2 , 占陆地面积的 9.4%。岩溶地貌从温带到热带、从半干旱到湿润气候均有分布。我国岩溶类型发育齐全, 是全球少有的天然岩溶档案馆。岩溶地貌及岩溶作用蕴藏了地质历史时期以来环境和生态变化的信息, 同时还包含了不同地质、气候、水文、生物条件下, 不同岩溶动力系统的特征及发育规律。由于我国具有齐全的岩溶动力系统类型, 通过研究者近几十年的努力, 我国的岩溶研究水平处于国际前沿, 同时也推动了世界各国的岩溶研究。目前, 岩溶研究的主要方向集中在地质、气候、水文与岩溶作用的关系, 碳循环、岩溶地质对生态系统的影响等方面。

法国的阿朗坝是最早在岩溶地区修建的土坝, 该坝建于 1845 年, 坝高 13m。由于存在岩溶渗漏问题, 1860 年开始进行防渗灌浆并取得了成功。在之后的 150 多年间, 世界上不少国家先后在岩溶地区兴建了规模不等的水库和大坝, 在开发岩溶区的水能资源方面取得了显著成就。据不完全统计, 在国外岩溶地区已建大中型水电工程 130 座以上, 其中坝高在 100m 以上者有 20 余座。1970~1985 年, 岩溶工程地质研究发展迅速, 在岩溶地区修建水库和大坝的国家越来越多, 而且规模越来越大。例如, 苏联 1978 年建成的英古里坝, 坝高 271.5m, 是目前在岩溶地区修建的最高大坝; 土耳其的凯班水库, 总库容 106 亿 m^3 , 是目前在岩溶地区建造的最大水库。

岩溶区兴修水库由于岩溶工程地质研究不清楚或由于防渗处理不妥将有可能发生严重的渗漏问题。例如, 美国 1920 年修建的赫尔斯巴尔坝, 坝高 25m, 水库渗漏量达 $50\text{m}^3/\text{s}$, 防渗处理持续 26 年之久, 最后因处理无效而被迫放弃。土耳其的凯班水库建成于 1974 年, 由于岩溶地质条件未查清, 水库蓄水后渗漏量达 $26\text{m}^3/\text{s}$ 。经过复杂的防渗处理, 后期的渗漏量已减少至 $8.7\text{m}^3/\text{s}$ 左右。防渗帷幕线路长、深度大, 是岩溶区防渗处理的基本特征。例如, 伊拉克的多康坝, 坝高 116.5m, 防渗帷幕总长达 2541m; 南斯拉夫的斯拉诺水库, 坝高 22.5m, 防渗帷幕总长达 7000m; 南斯拉夫的腊马若坝河床防渗帷幕深度达 200m。

我国地域辽阔, 江河纵横, 蕴藏着丰富的水能资源。20 世纪 50 年代前, 我国的水电工程屈指可数, 岩溶地区的水电工程几乎是空白。自 20 世纪 50 年代以来, 特别是 80 年代末期以来, 我国水能资源开发进入快速发展阶段。据统计, 在岩溶区已建水电工程中, 装机在 1 万 kW 以上的水电站 38 座; 库容在 1 亿 m^3 以上的水库 32 座。除此之外, 还有数千座小型水库分布在我国不同的岩溶地区。

根据我国岩溶区水电工程建设历程, 水电工程岩溶研究的主要进展如下:

第一阶段, 1951~1960 年, 岩溶工程地质研究起步阶段。主要包括六郎洞、水槽子及新安江水库的勘察研究工作。1956 年建成官厅电站, 1958 年建成水槽子电站, 1960 年建成六郎洞电站, 这是我国在岩溶地区最早兴建的一批水电站。同时, 在长江三峡的南津关

灰岩坝址,开展了三峡工程的前期勘察工作。

第二阶段,1961~1982年,岩溶工程地质研究发展阶段。在西南和华中广大地区,进行了较多的岩溶水库及坝址勘察研究,包括广西的龙江、拉浪、拔贡、六甲等电站的勘察设计和工程建设。1958年贵州全面开展了猫跳河梯级开发规划和岩溶工程地质研究,经过20年的研究,1979年猫跳河梯级开发完成,成为我国岩溶区梯级开发的典范,也是流域岩溶研究较系统、全面的河流。

1958年,在乌江干流上开展了乌江渡电站的勘察设计工作。1982年,建成了我国岩溶地区的第一座高坝(165m)、大库容(23亿 m^3)的大型水电站(630MW)——乌江渡水电站。乌江渡水电站在深岩溶高压防渗帷幕灌浆和高坝地基岩溶处理方面取得了成功,为之后的岩溶工程处理提供了经验。1975年,红水河下游的大化水电站开工;水库左岸亮山分水岭地区岩溶发育比较强烈,地下分水岭低于库水位9~12m;经过科学分析,论证了水库渗漏问题较小且建库可行。黄泥河的阿岗和鲁布革等电站也进行了细致的岩溶工程地质研究工作。乌江流域的东风、彭水,清江流域的隔河岩,红水河的天生桥一级和二级、龙滩、岩滩,黄河万家寨,澧水流域的江垭,太子河上的观音阁等多个大中型水电站工程,先后开展了岩溶工程地质研究。此阶段,在研究岩溶作用和岩溶地下水等方面,采用遥感技术、无线电波透视法、水文网分析法、电网络模型试验、同位素地质学等方法来研究岩溶发育及地下水循环规律。

第三阶段,1983年至今,岩溶工程地质研究深入阶段。本阶段是岩溶区水电工程建设高速发展阶段,在此期间,完成了鲁布革、天生桥二级、岩滩、东风、隔河岩、观音阁、高坝洲、洪家渡、构皮滩、思林、光照、恶滩、江垭等大型水电工程建设。在金沙江上,溪落渡巨型电站(水库及坝基深部均为岩溶化地层),还有雅砻江上的锦屏一级、二级电站,均已建设完成。举世瞩目的长江三峡水利枢纽建成,电站大坝虽在非可溶岩地区,但水库区域却分布较多的碳酸盐岩,为研究水库岩溶发育规律和渗漏问题,开展了大量岩溶地质研究工作。

现阶段,岩溶工程地质研究工作,不论在勘察方法还是研究理论方面,均有较大的进展。在勘察方法方面,除常规的勘察手段之外,大力发展了瞬变电磁法、微重力法、地质雷达、红外探测、地震勘测、陆地声呐等地球物理勘探技术;在研究理论方面,不断趋于科学化、理论化和模型化。例如,采用地下水渗流场、水化学场、水温场和同位素场的分析方法,应用逻辑信息法、模糊数学评判法,对水库进行渗漏计算和预测。在岩溶水均衡、水动态及衰减变化规律方面也取得了新进展。岩溶区水电工程主要问题包括岩溶、岩溶水渗漏和防渗处理。在勘测技术方面,主要综合采用多种物探、钻探、洞探等测试技术,来查明岩溶洞穴和岩溶水补径排条件。

目前我国水电开发主要集中在西南地区,该区域自然条件差、地形差异大、地质条件复杂。区域岩溶作用和地下水条件与常规地质条件下的规律存在差异,给我们认识该条件下岩溶作用规律及地下水条件提出了挑战。例如,高海拔、高山峡谷区由于存在地壳迅速抬升、降雨高程效应、积雪入渗补给、低温高压溶蚀、地下水循环相对独立等特征,与低海拔山区河流一般岩溶发育地质条件相比,有显著不同。

以雅砻江大河湾为例,高山峡谷区岩溶作用与地下水条件存在如下特征:①受河谷迅

速切割及地质构造控制,岩溶作用发育不充分,岩溶发育期次与夷平面、河流阶段等地壳运动过程关联性较差;②受地形高差影响,地下水在空间上往往存在高程补给差异明显、多重排泄基准等现象;③河间地块由于受岩溶含水层组空间分布与控水构造的影响,工程区不同地带水文地质条件差异明显,导致水文地质单元及亚单元划分复杂;④受雅砻江大河湾两岸深切河谷的隔离,河间地块与河谷对岸缺乏水力联系,使雅砻江大河湾内的地块具有除大气降水降雪补给以外,无其他水流补给的相对独立水文地质环境。

因此,综合各种勘探和分析方法深入系统地研究高山峡谷区的岩溶水文地质具有重要意义。针对高山峡谷区岩溶水文地质特点,需综合采用大范围的岩溶水文地质调查、长时段岩溶水动态观测、水化学及同位素分析、岩溶水示踪试验、水均衡分析研究等方法,配合钻孔、超深勘探平洞的勘察研究技术,来查明岩溶发育规律及其水文地质特征,以达到高山峡谷区岩溶水文地质勘察技术及研究方法的创新,并为工程建设服务的目的。

1.3 雅砻江大河湾岩溶水文地质与工程效应研究

为开发雅砻江大河湾丰富的水能资源,20世纪60年代中期,国家科学技术委员会组织由地质部水文地质工程地质研究所、中国科学院地质研究所、四川省水文地质工程地质大队、锦屏水电工程指挥部和原水利电力部上海勘测设计研究院等单位组成锦屏水电工程岩溶水文地质专题研究组,对锦屏地区进行了历时两年的岩溶水文地质调查研究工作,取得了丰富的现场水文地质资料,1968年提交了“锦屏水电工程岩溶水文地质研究报告”。1989年10月,中国电建集团华东勘测设计研究院邀请地质矿产部岩溶地质研究所,在60年代研究成果的基础上,共同继续进行岩溶水文地质专题研究工作,开展了岩溶调查,水化学、水同位素、岩溶水示踪试验和岩石矿物及其溶蚀性等项目的测试研究,1992年12月完成了“岩溶水文地质专题研究报告”。自1991年锦屏二级水电站大水沟长探洞开挖以来,随着工程的逐步推进,中国电建集团华东勘测设计研究院不间断地开展了锦屏工程区高海拔、高山峡谷区岩溶水文地质的系统研究,主要研究内容及成果如下。

1.3.1 研究内容

1.3.1.1 雅砻江大河湾岩溶地质作用研究

(1)大河湾区基本地质条件研究。主要包括区域地形地貌、地层岩性、区域构造、第四纪地质和新构造运动、区域气象与水文条件等。这些研究是锦屏工程区岩溶水文地质条件分析的基础,也是工程选址及相关水工建筑物枢纽布置的依据。

(2)大河湾岩溶发育特征与规律研究。主要包括对锦屏河间地块大范围岩溶的地表与地下形态、平面与高程分布规律的调查、岩溶发育程度分区、岩溶介质类型和低温高压条件下大理岩的可溶蚀性研究,目的是为掌握岩溶含水介质特征及含水岩组空间分布、分析工程区岩溶发育程度及岩溶发育规律提供基础。

1.3.1.2 雅砻江大河湾水文地质条件研究

(1) 大河湾区岩溶含水介质类型的划分。确定岩溶水文地质边界条件;划分岩溶水文地质单元及亚单元。

(2) 岩溶水化学和同位素研究。通过采用长时段水化学和水同位素观测试验,研究各类水的物理、化学特征和变化规律及其影响因素,各地表沟水、泉水的关系和水力联系;研究各类水同位素($\delta^{18}\text{O}$ 、T值)的平面分布、动态变化特征和 $\delta^{18}\text{O}$ 高程效应,建立地下水的年龄模型,分析各单元泉水的补给区范围和来源,从水化学、水同位素角度论证雅砻江大河湾区岩溶水文循环规律。

(3) 岩溶地下水示踪试验研究。由于雅砻江大河湾为高山峡谷区岩溶,地下水埋藏深、露头少,以大泉集中排泄为主。同时大河湾区地形陡峻,多数地段通行困难,常规水文地质勘探手段受到很大限制,此时地下水示踪试验是勘察岩溶水文地质条件最为有效的手段之一,20世纪60~90年代研究者先后在雅砻江大河湾进行了7次岩溶水示踪试验。采用元素痕量级异常追踪岩溶水运动的三元先进示踪方案,试验分析引入现代地下水运移理论、稀疏裂隙网络统计模型等理论与方法,大幅度提高示踪信息解释程度。示踪试验在分析不同水文地质单元分水岭划分、水力联系;含水层的结构与补给、地下水的运动速度与水力坡降等方面发挥了关键作用。

(4) 岩溶水动态与均衡研究。通过实测资料分析岩溶水水温、水量的长期变化规律,研究含水层地下水位的衰减变化,分析地下水含水介质分布特征;通过降水量的高山效应和泉水、地表水的长期观测资料进行水均衡分析;通过岩溶水的动态与均衡研究,分析各水文地质单元补给、排泄、含水介质的组成、入渗系数及工程施工对含水层的影响。

(5) 大河湾各水文地质单元岩溶水循环特征研究。根据岩性组合、岩溶发育程度、地貌特征及水文地质条件等综合因素,将大河湾区与引水隧洞直接有关的地层划分为4个水文地质单元,各单元均为具有各自的补给、径流、排泄特征的含水体系。在上述相关研究工作的基础上,深入研究各单元岩溶水补给、径流、排泄等地下水循环规律,并对各水文地质单元之间的水力联系进行评价,为工程选线、洞室涌水预测及防渗措施等提供依据。

1.3.1.3 锦屏岩溶地下水工程效应研究

雅砻江大河湾岩溶水文地质研究的主要目的是指导锦屏二级水电站长大隧洞群的设计、施工与工程运营。针对雅砻江大河湾隧洞群最突出的涌突水工程地质问题及其防治,围绕复杂岩溶水文地质条件下的工程效应先后开展了以下研究:

(1) 引水隧洞线岩溶发育程度研究。综合采用大范围岩溶水文地质调查、长时段岩溶水文地质观测、人工法和天然法示踪试验、水均衡研究等方法,配合钻孔、超长探洞等勘探技术,查明研究区复杂的岩溶发育规律及其水文地质系统特征。

(2) 隧洞群涌水量和外水压力预测预报研究。以大河湾工程区岩溶发育规律和水文地质格局为基础,采用水文地质比拟法、水均衡法、三维渗流场分析方法预测引水隧洞的最大总稳定涌水量;采用水力学和类比法预测引水隧洞的最大瞬时突发性涌水量和涌水点数量。结合地下洞室群的水文地质条件特点,采用宏观预报、长距离预报、短距离预报等方