

陕西某抽水蓄能电站下水库右岸岩溶渗漏问题探讨

冯磊¹, 郭宏洋², 李晓², 李桦柳², 杨艳娜²

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065;

2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059)

摘要: 陕西某抽水蓄能电站位于秦岭造山带中段, 受岩性、构造和地下水影响, 库区岩溶发育具有明显差异特征。本文依据该项目岩溶专题研究成果, 分析库区岩溶发育特征及对水库渗漏影响。研究表明: (1) 区域岩溶发育受岩性和地层控制, 岩溶发育主要集中在三叠系金鸡岭组等质纯、厚层块状碳酸盐岩地层; (2) 库区地下水系统发育, 发育溶洞、干沟, 库区及邻近区发育规模较大的暗河系统; (3) 水库正常蓄水位高于两侧排泄基准面高程; (4) 水库存在向邻谷渗漏的水动力条件, 但在各渗漏途径中均存在高于水库正常蓄水位高程的地下分水岭, 水库向邻谷渗漏的可能性较小, 渗漏途径主要为坝基渗漏与绕坝渗漏。

关键词: 抽水蓄能电站; 岩溶发育特征; 水文地质; 水库渗漏

中图分类号: P642; P642.25; TV12; TV74; TV697.3⁺2 **文献标识码:** A

CHARACTERISTICS OF KARST DEVELOPMENT AND LEAKAGE ANALYSIS IN THE RESERVOIR AREA OF MILIANG PUMPED STORAGE POWER STATION

FENG Lei¹, GUO Hong-yang², LI Xiao², LI Hua-liu², YANG Yan-na²

(1. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. College of Environment & Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: A pumped storage power station in Shaanxi is located in the middle part of Qinling orogenic belt. Influenced by lithology, structure and groundwater, karst development in reservoir area has obvious difference characteristics. Based on the research results of karst in this project, the characteristics of karst development in reservoir area and its influence on reservoir leakage are analyzed. Research has shown that: (1) Regional karst development is controlled by lithology and stratigraphy, and karst development is mainly concentrated in pure and thick layered block carbonate rock formations such as the Triassic Jinjiling Formation; (2) The groundwater system in the reservoir area is developed, with karst caves and dry ditches, as well as large-scale underground river systems developed in the reservoir area and adjacent areas; (3) The normal water level of the reservoir is higher than the elevation of the discharge reference plane on both sides. (4) There are hydrodynamic conditions for the reservoir to leak into adjacent valleys, but there are underground watersheds in each leakage pathway that are higher than the normal water level elevation of the reservoir. The possibility of leakage from the reservoir to adjacent valleys is relatively

low. The main leakage path includes dam foundation leakage and leakage around the dam.

Key words: pumped storage power station; characteristics of karst development; hydrogeology; reservoir leakage

水库渗漏是碳酸盐岩地区修建水库经常遇到工程水文地质问题,渗漏不仅影响水库的正常运行,降低工程效益,而且成为水资源持续利用与生态环境安全的不稳定因素。陕西某抽水蓄能电站位于商洛市境内,上水库为围挖山顶洼地成库,下水库位于河道内,截断上下游河道成库,下库正常蓄水位 735 m。电站装机容量 1 400 MW,最大额定水头 516 m,电站平均毛水头为 519.8 m,单机容量为 350 MW,机组台数 4 台。

工程区地处华北板块与扬子板块之间的秦岭复合型造山带中段(秦岭南麓中段),区域内断裂构造发育,岩溶地层广泛分布,岩溶发育。下水库坝址地层为三叠系下统金鸡岭组(T_{1j})鲕状灰岩。区域性断层米粮川-店子断层从右岸坝肩以 NNW-EW 向穿越库区,库区内的三叠系下统金鸡岭组(T_{1j})鲕状灰岩及二叠系下统熨斗滩组(P_{2y})灰岩层溶蚀形态发育、岩溶水富集。库区邻谷有岩溶暗河系统、断头河发育。黑龙洞暗河系统位于坝址右岸,暗河出口距离坝址 6.5 km。暗河出口高程 632 m,低于河水水位高程 650 m。

本文根据勘察和试验资料,结合地下水水化学、同位素资料分析,对右岸坝址岩溶渗漏条件和蓄水后黑龙洞地下水系统渗漏可能性和途径调查,以期为进一步深入研究和水库防渗处理措施提供科学依据。

1 库区右岸水文地质条件

工程区位于秦岭山脉腹地,属中山区,海拔高度

500~1 500 m。山脊一般狭长平缓,起伏较小,深切河谷发育,切割深度 500~1 500 m。区域属亚热带气候,年均气温在 15℃左右,年平均降水量 770 mm,降水夏秋季节多,春季稳定,冬季最少。工程区所在的米粮川河,流量较大含沙量小,无冰期,河床比降大,水能资源丰富,全长约 20 km,整体呈南北走向,河道平均宽度约 10 m,水量呈季节性变化,沿线发育有南沟、门里沟、芋园沟、干沟等支流。

工程区区域地层属扬子区、南秦岭分区,留坝-白河小区。区域广泛分布碳酸盐岩,主要地层有:三叠系金鸡岭组(T_{1j}),二叠系龙洞川组(P_{2l})、熨斗滩组(P_{2y})、西口组(P_{2x})、水峡口组(P_{1s})、南沟河组(P_{1n});石炭系羊山组(C_{2-3y})、袁家沟组(C_{1y})地层,岩性主要为灰岩、白云岩,其分布情况见图 1。

工程区在构造上位于秦岭复合造山带-南秦岭造山带-凤县-镇安断褶带,镇安-板岩镇断裂南侧,金鸡岭复式向斜北翼。区域内断裂呈东西向、北西向(北西西向)、北东向和南北向发育,主要断裂多具韧性推覆、剪切和多期活动特征,个别大断裂还具同沉积断裂特征。工程区内主要的构造有金鸡岭-郧西岭复式向斜、宁陕-南宽屏断裂及米粮-店子断裂。

碳酸盐岩类岩溶水主要赋存于三叠系、二叠系、石炭系地层的灰岩、白云岩中。按岩性及组合特征,分为酸盐岩类裂隙溶洞水和碳酸盐岩夹碎屑岩岩溶裂隙水。酸盐岩类裂隙溶洞水主要赋存于质地较纯的碳酸盐岩中,发育岩溶暗河、大泉等,流量 100~1 000 l/s,水量丰富。碳酸盐岩夹碎屑岩岩溶裂隙水主要存在于碳酸盐夹碎屑岩组中,岩溶发育中等,

表 1 区域含水层富水性

系	统	地层名称	地层代号	主要岩性	含水层组划分	富水性质
三叠系	中统	岭沟组	T_{2l}	深灰色钙质页岩、砂质页岩、砂岩	基岩裂隙含水岩组	弱(隔水)
	下统	金鸡岭组	T_{1j}^2	泥灰岩夹页岩	碳酸盐岩裂隙溶隙含水层组	中
			T_{1j}^1	含铁质钙质页岩夹薄层泥灰岩	碳酸盐岩夹碎屑岩裂隙含水层组	弱
二叠系	上统	龙洞川组	P_{2l}	灰、浅灰色厚层灰岩	碳酸盐岩溶洞管道含水层组	强
		熨斗滩组	P_{2y}	灰色钙质页岩夹泥灰岩	碳酸盐岩溶洞管道含水层组	强
	下统	西口组	P_{2x}	灰岩、含燧石灰岩夹页岩	碳酸盐岩夹碎屑岩裂隙含水层组	弱
		水峡口组	P_{1s}	浅灰色厚层灰岩及燧石灰岩	碳酸盐岩溶洞管道含水层组	强
上统	羊山组	C_{3y}	浅灰白色厚层灰岩	碳酸盐岩溶洞管道含水层组	强	
石炭系	中统	四峡口组	C_{2s}	黑色炭质页岩夹砂岩、砾岩、燧石灰岩	碎屑岩夹碳酸盐岩裂隙含水层组	弱(相对隔水)
	下统	袁家沟组	C_{1y}	深灰色含燧石灰岩	碳酸盐岩溶洞管道含水层组	强

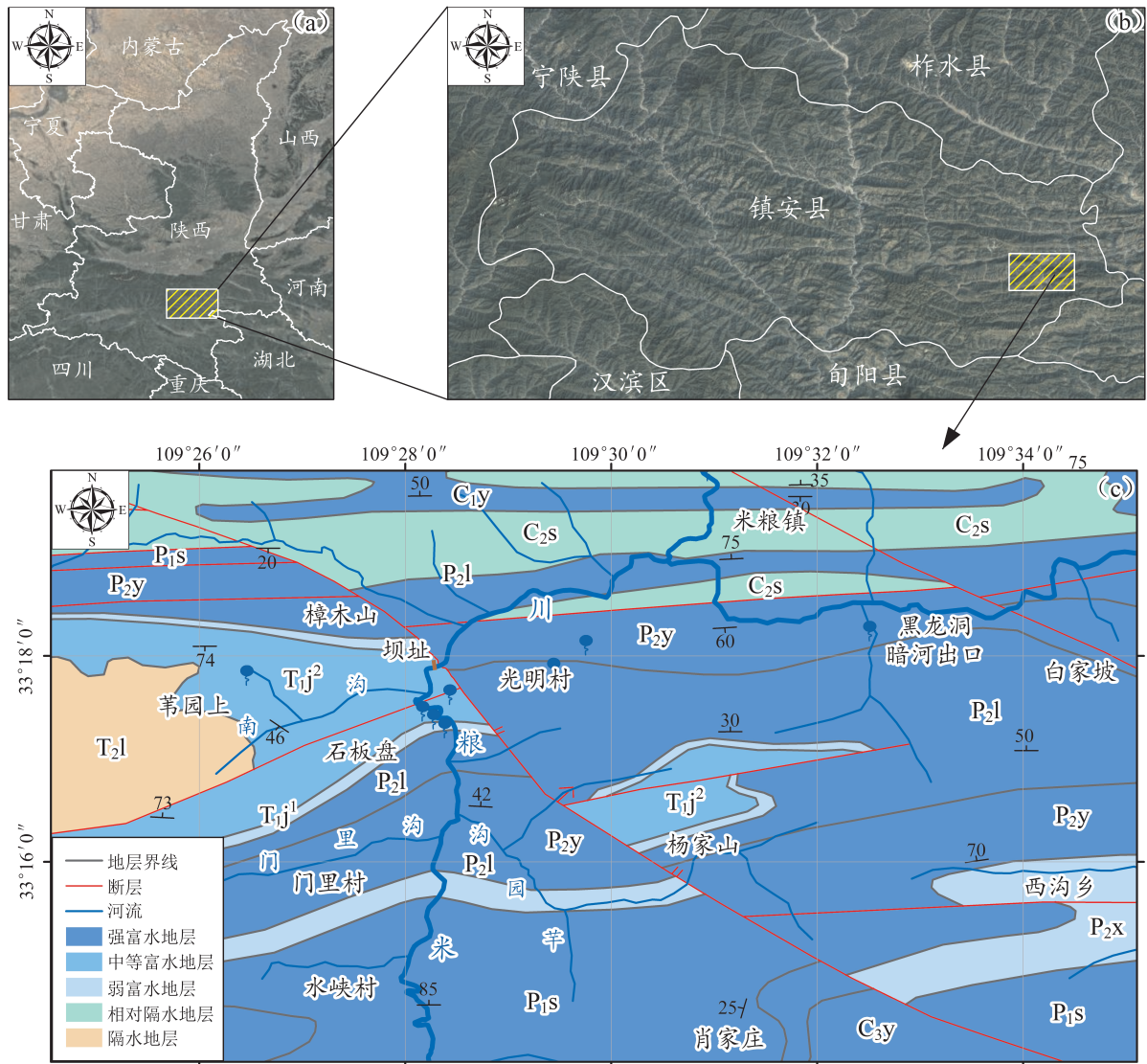


图 1 下水库库区水文地质图

泉水流量 10~30 l/s,水量中等。地层富水性见表 1。

区域内地下水主要接受大气降水的补给。在碳酸盐岩裸露地区,由于区内岩溶洼地、落水洞发育,大气降水通常以灌入式补给地下水。通过地下水暗河、泉等通道迅速向河流或溪流排泄,具有快速补给、径流快、排泄迅速、动态变化大的特征。

2 岩溶发育特征

2.1 坝址岩溶

该抽水蓄能电站水库正常蓄水位为 735 m,坝顶高程为 740 m,河水位高程为 665 m 左右,调查主要针对高程在 1 000 m 以下岩溶的发育分布状况进行。坝址区岩溶调查范围主要集中在坝址上游 500 m 到坝址下游 1 000 m 处。区内可溶岩出露条件较

好,地表覆盖较浅,因此主要为裸露型岩溶,规模大小不一、各种形态类型的岩溶均有发育。调查表明,坝址两侧地表岩溶漏斗、落水洞、岩溶峰林等强岩溶化区域的典型岩溶类型发育,坝址溶洞、溶孔、晶洞等岩溶类型均较发育。各种尺度岩溶形态的发育特征如下:

在下库拦河坝左右岸地表 735 m 高程以上均发育有较为大型的溶洞(图 2a、图 2b),根据左岸钻孔 ZK301 揭露和孔内摄像成果,在孔内 719~738 m 之间高程揭露一溶洞,基本低于正常蓄水位,钻孔岩芯(图 2c)揭露溶洞洞顶为方解石钟乳(图 2d),下部多为空腔,仅底部充填粘土夹碎石。据走访调查,左右岸地表溶洞向内有一定延伸,但洞内无水。两个溶洞岩溶相对发育,可能会成为水库渗漏的通道之一,但其高程高于正常蓄水位,因此认为水库蓄水从地表溶洞渗漏的可能性小。

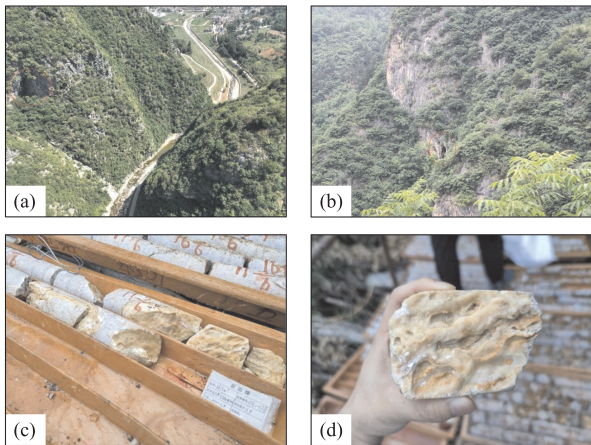


图2 下水库坝址左右岸溶洞及钻孔岩芯

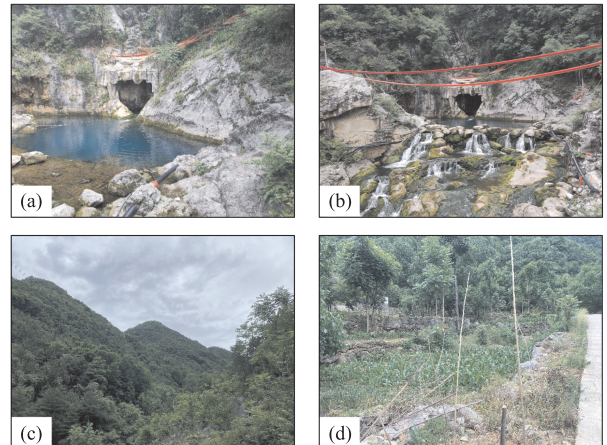


图3 黑龙洞暗河出口及顶部地表岩溶形态

2.2 库区岩溶

库区地表岩溶发育形态展现为溶隙、溶孔、溶沟、峰丛洼地、溶洞、断头河等。溶沟、溶槽、溶隙是地表岩溶的普遍类型之一,受岩性和裂隙发育差异影响,溶蚀裂隙宽度大小不一,常沿节理裂隙面发育,局部地区有方解石充填,微小裂隙在降雨冲刷作用下逐渐被溶蚀,形成大裂隙。在坝址区,出现较多隙宽 2~3 cm 的溶隙。地表溶隙、裂隙发育带通常为地下水运移提供良好的通道,是构成岩溶发育的重要因素。工程区岩溶峰丛、洼地十分发育,峰丛一般呈圆锥状或塔状,洼地多呈漏斗状,深度可达 100~150 m。工程区的碳酸盐岩在地下水长期溶蚀作用下,对灰岩形成差异性溶解,并在节理、裂隙的控制下,不断溶蚀扩大,并形成大小不一、形态多样的溶洞,米粮川河道两侧溶洞一般含水,为地下水排泄出口。在坝址区米粮川河、南沟、门里沟均有伏流现象,出现“断头河”。

2.3 黑龙洞流域岩溶发育特征

米粮电站下水库东侧发育有区域大型岩溶暗河,黑龙洞暗河(图 3a、图 3b)距离工程区约 6.8 km,流量约 200 l/s。暗河口南部是一条南北向干沟(图 3c),根据调查访问,干沟几乎全年无水。黑龙洞流域范围内岩溶十分发育,在分水岭地带发育大量洼地和落水洞(图 3d)。

3 黑龙洞暗河地下水系统

3.1 黑龙洞地下水出露特征

黑龙洞暗河出露在镇安县米粮镇树坪村,距坝址区以东约 5 km,暗河出口为一溶洞,溶洞高程 650 m,地貌单元属于滑水河右岸山体半坡,高出河面高度约 70 m,泉口地层岩性为二叠系上统熨斗组灰黄色泥灰岩夹薄层钙质页岩,出露溶洞高约 3.5

m,最宽处约 3 m,泉水温度 15.8℃,现场调查(6月中旬)流量在 200~300 l/s,调查期间水质清澈,历史最高流量达 750 l/s。据访问,该暗河雨季流量剧增且水质混浊,2021 年雨季降雨后最大流量可达调查期的 2~3 倍。目前地下水流出后未有直接利用,向下游唐家河汇流(图 4)。

3.2 黑龙洞暗河水文地质条件

根据对黑龙洞暗河的野外调查,对其水文地质特性与补径排特征得出认识。补给范围向地表分水岭以外的地区的地下水进行水量袭夺,补给范围向南东延伸至石灰坪-木竹机一线,南部边界大致以朱家垭-龙洞垭-后山一线,向西延伸岩子-萝卜园。

(1) 水化学和同位素组成特征

黑龙洞暗河水主要阳离子为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} , Ca^{2+} 含量 52.10 mg/l、 Mg^{2+} 含量 11.0 mg/l,主要阴离子为 HCO_3^- ,含量为 239.0 mg/l, Cl^- 含量为 1.45 mg/l。化学类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}$, TDS 值为 215.5 mg/l。水化学组成显示其所处水化学环境,主要水岩反应为水与碳酸盐岩的作用,水中 Cl^- 含量很低,揭示地下水系统交替条件良好。水的同位素组成如图 5 所示。黑龙洞暗河泉水的 δD 为 -66.28% , $\delta^{18}\text{O}$ 为 -9.996% ,揭示来源于大气降水,同位素组成偏贫,表明补给高程较高。其同位素组成与米粮川左岸泉水同位素组成相似。

(2) 地下水均衡分析

以黑龙洞流域范围的地表分水岭为界圈定流域,汇水面积为 6.45 km^2 。利用降雨入渗法对水文地质单元内地下水补给水量进行计算,其中降雨量取米粮镇多年平均降雨量 770 mm,降雨入渗系数根据区域地层岩性取 0.4。经计算黑龙洞岩溶暗河水文地质单元地下水补给水量为 5 442.74 m^3/d ,而现场测得洞口出水流量约为 200 l/s,即 17 280 m^3/d 。

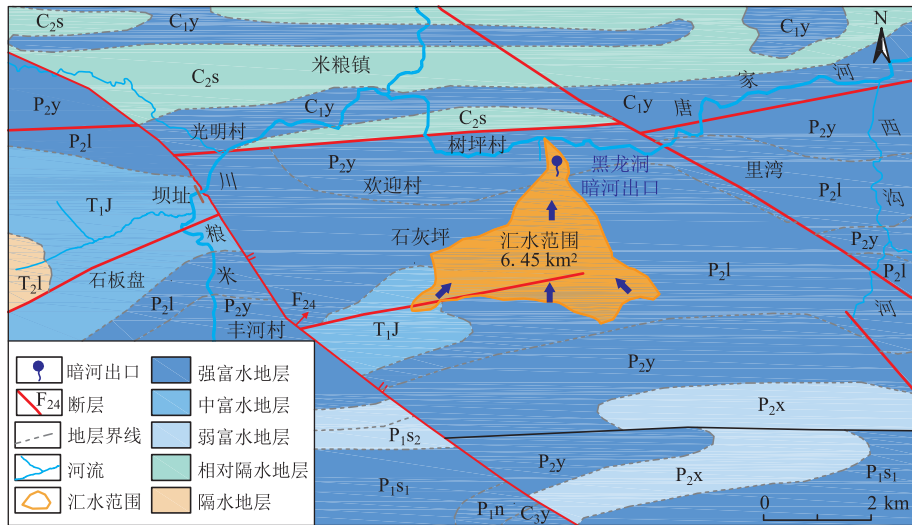


图 4 黑龙洞暗河系统水文地质图

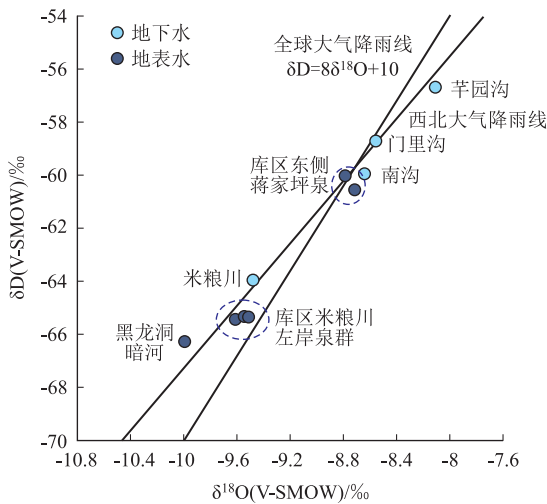


图 5 某抽水蓄能电站水样 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系图

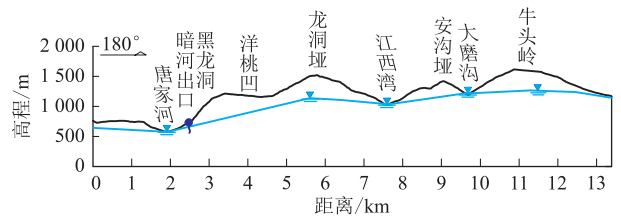


图 6 黑龙洞暗河成因示意图

根据水均衡分析,黑龙洞暗河流量远大于地表分水岭圈定的流域补给量,揭示黑龙洞地下水有其他流域地下水的补给。

(3) 补径排条件及成因

黑龙洞暗河性质属于接触下降泉,南部龙洞川组灰岩质地较纯,为暗河的发育提供了基础。暗河的补给主要来源于大气降雨,因此受季节降雨流量动态变化明显;向斜下部地层为岩性不纯的熨斗组,成为水流悬托层,阻止地下水向下的入渗和岩溶向深的发育,形成向斜型蓄水构造,为暗河丰季储水枯季释水提供水源保障。地下水经暗河管道系统的袭夺作用汇集后,在沟谷切割处沿接触带流出(图 6)。

4 岩溶渗漏分析

4.1 右岸坝肩岩溶渗漏分析

水库通过坝下绕坝或通过坝肩渗向坝下游的渗

漏称为枢纽区渗漏,或坝区渗漏。而枢纽区渗漏又分为坝基渗漏及坝肩绕坝渗漏。

坝基渗漏主要受岩体裂隙发育程度控制。米粮川河床处坝基为冲洪积孤石、块石、卵石,岩性多为灰岩,河床覆盖层厚度为 2~3 m。根据坝址钻孔压水试验成果资料分析,坝基岩体的透水性具有显著的不均匀性,坝基在 650 m 以上吕荣值变化较大,部分段属高渗透介质,该段可能成为坝基渗漏的主要通道,但在 650 m 高程以下吕荣值均小于 0.5。因此,水库坝基岩体渗透性较弱。

坝址右坝肩山体单薄,正常蓄水位以上山体厚度 150~190 m,坝肩岩体受断层影响,构造裂隙和溶蚀裂隙均较发育,岩体渗透性较强。钻孔揭示地下水水力坡度小,坝轴线位置地下水埋藏情况见图 7,河床附近钻孔 ZK312 测得水位基本与河床齐平,右岸坝肩钻孔 ZK303 钻孔地下水埋深 117.97 m,水位 674.09 m,ZK311 距离河床水平距离 50 m,水位高程 705.10 m,地下水水位抬升缓慢。F5 断层沿右坝肩从库内通过,F5 断层为右旋张性断裂,因此,右坝肩的绕坝渗漏问题更为复杂。

4.2 向黑龙洞岩溶水系统渗漏

如图 8、图 9 所示,建坝蓄水后,库区地下水位上升至 735 m,黑龙洞暗河出口位于米粮川库区北

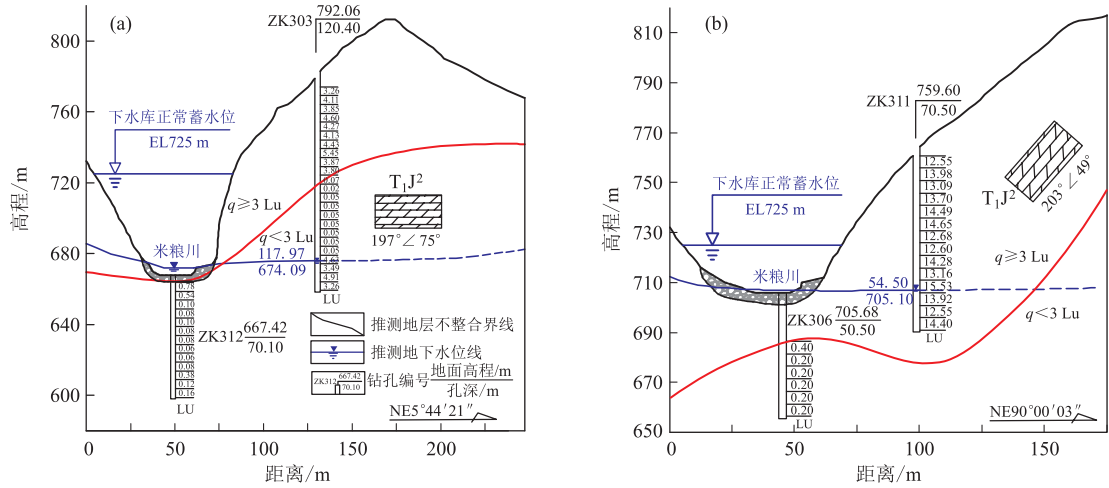


图 7 下水库坝址、拦砂坝右坝肩地下水位埋深

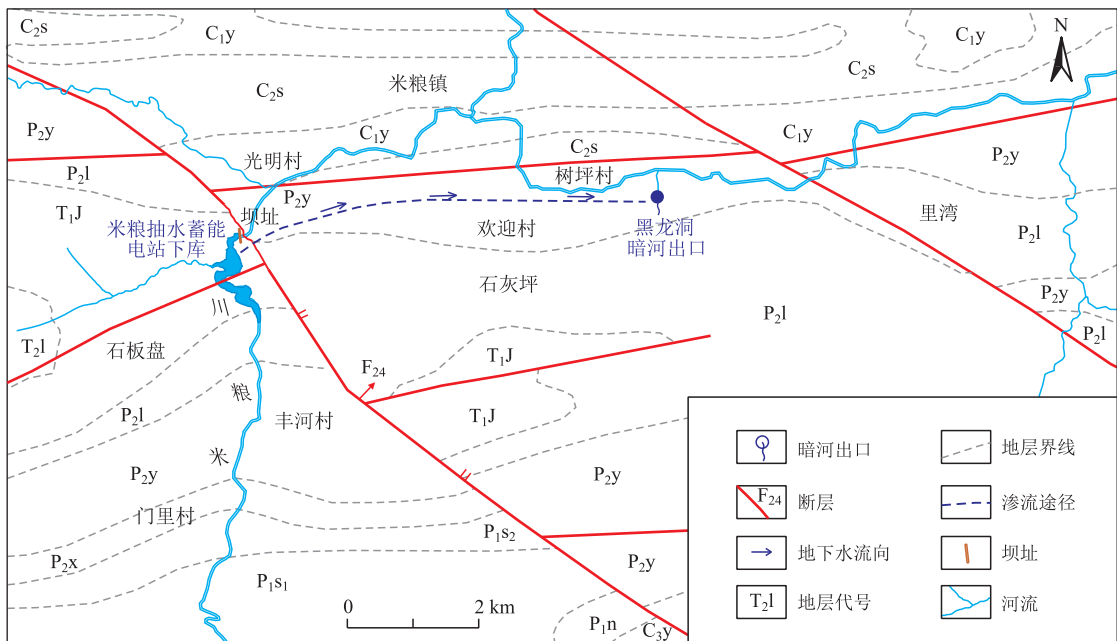


图 8 坝址-黑龙洞渗漏途径平面示意图

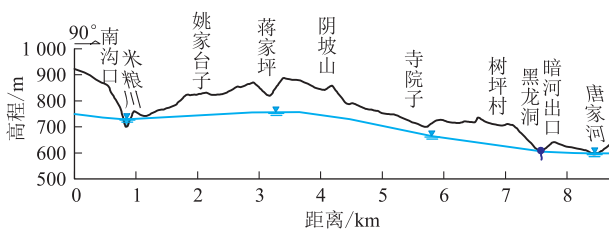


图 9 坝址-黑龙洞渗漏途径剖面示意图

东方向,直线距离 6.5 km 左右,暗河出口高程为 632 m。从水库蓄水高程与黑龙洞出口高程看,有渗漏的水动力条件。从地质调查看,米粮川库区右岸和右坝肩地层为金鸡岭组,处于金鸡岭向斜西段,部分地层倾向南西,通过北西向断层与龙洞川组接触(P_{2l}),地层走向 NEE。现场水文地质调查,在沿

米粮川至黑龙洞沿线,发育多处泉水,其中米粮川右岸蒋家坪一泉水出露高程 899 m,泉水流量 0.1~0.5 l/s,为当地居民生活水源,常年有水,雨季流量变化较大。这些现象揭示在水库与黑龙洞之间地下分水岭高程高于 735 m。水库蓄水后向黑龙洞渗漏可能性不大。但是从库区到黑龙洞,是否存在深部顺层发育的岩溶系统是需要进一步深入研究的问题。

5 结论

(1) 水库区域岩溶地层广泛分布,主要碳酸盐岩地层包括泥盆系、石炭系二叠系和三叠系。岩溶类型为溶沟石牙、峰丛洼地、落水洞、溶洞。岩溶地

下水系统复杂,发育暗河、断头河、干沟。

(2) 水库所属的米粮川河岩溶水系统东部与黑龙洞岩溶水系统相邻,水库正常蓄水位高于排泄基准面高程。从水动力条件上看水库存在向邻谷渗漏的水动力条件,从库区到黑龙洞,是否存在深部顺层发育的岩溶系统是需要进一步深入研究的问题。

(3) 水库建坝后,坝体上下游之间无隔水层(或相对隔水层),因此渗漏是绝对的,不渗漏则是相对的。水库坝址、坝基渗漏方式属于裂隙型渗漏。

(4) 水库坝址右坝肩岩体单薄,构造裂隙和溶蚀裂隙发育,地下水水力坡度小,右坝肩存在比较严重的绕坝渗漏问题。坝基位置无相对隔水岩层,存在坝基渗漏问题。需要设置灌浆帷幕减少坝肩和坝基渗漏。

参考文献

- [1] 王太银,陆广良,冯福,等.冯家桥水库岩溶渗漏分析及防渗方案研究[J].黑龙江水利科技,2020,48(6):81-83.
- [2] 胡云军,马敏艳.德厚水库岩溶发育特征研究[J].云南水力发电,2017,33(5):62-65.
- [3] 余加松,孙明彪,王太银.贵州省三宝水库岩溶发育特征与规律

研究[J].地下水,2017,39(4):45-48.

- [4] 屈志勇,李松磊,潘兴军,等.大兴水库岩溶发育与水文地质问题研究[J].水利水电工程设计,2015,34(2):44-47.
- [5] 成体海.安谷水电站右岸单薄分水岭渗漏问题研究[J].四川水利,2013,(6):41-44.
- [6] 李亚津,巫锡勇,蒲大攀,等.西南山区岩溶水文地质结构类型及地下水动力特征分析[J].路基工程,2020,(6):13-18.
- [7] 钱海涛,王思敬,严福章,等.黔中水利枢纽一期工程区岩溶发育模式及水库防渗研究[J].水文地质工程地质,2008,35(4):51-57.
- [8] 刘浩,田茂中.贵州冗赖水库岩溶成库条件分析[J].中国岩溶,2019,38(4):513-523.
- [9] 薛伟,袁宗峰,周密.西南地区某岩溶水库渗漏分析[J].中国岩溶,2019,38(4):508-514.
- [10] 冯志刚,韦国建,张汉猛,等.西南某水电站断裂构造和层间溶蚀带组合岩溶渗漏研究[J].中国岩溶,2022,41(5):728-735.
- [11] 王汝华.阿岗水库库区岩溶渗漏研究[J].人民长江,2005,(9):6-7.
- [12] 胡大儒,郑克勋,赵代尧,等.复杂岩溶水系统势汇区建坝成库可行性研究——以北盘江流域普岔河水库为例[J].中国岩溶,2022,41(5):736-745.
- [13] 邹成杰.深岩溶发育的基本规律与水库岩溶渗漏的研究[A].第四届全国工程地质大会[C].1992.

作者简介:冯磊(1980—),男,高级工程师,专业:工程地质,研究方向:主要从事水利水电项目工程地质与水文地质研究及应用工作。
E-mail:175530900@qq.com.

(上接第39页)

项目和工程经济活动,必须开展地质环境评价和建设用地地质灾害危险性评估,严禁不合理地对坡体开挖或是开挖后不采取相应防护措施的行为,同时严禁农户对顺向坡脚进行开挖。

(3) 先滩镇、福宝镇、甘雨镇、石龙镇、车辋镇和九支镇等低中山区山地、河谷区域的地质灾害防控应充分结合和依靠合江县地质灾害风险区管控方案^[7],特别是相应区域的中高风险区管控方案。

参考文献

- [1] 朱承斌,王昌强,车怀庆,等.泸州市合江县2017年地质灾害排

查总结报告[R].泸州市:四川省一三五岩土工程有限公司,2018.

- [2] 鄢毅,岳昌桐.四川省地质灾害特征及防治对策探讨[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(Z1):123-127.
- [3] 杨光华,钟志辉,张玉成,等.滑坡灾害的机制与力学特性分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S2):4009-4017.
- [4] 中国地质灾害防治工程行业协会.崩塌防治工程勘查规范(试行)(TCAGHP 011-2018)[S].2018.
- [5] 刘果,张友谊,张珊珊,等.九寨沟地震前后次生地质灾害分布特征分析[J].地质灾害与环境,2018,29(3):1-4.
- [6] 王向,覃虎,党超,等.合江县2020年地质灾害风险调查评价采购项目风险调查评价(1:50 000)成果报告[R].成都市:四川省鑫冶岩土工程有限公司,2021.
- [7] 谢光辉.四川省泸州市合江县地质灾害风险管控试点实施方案[R].泸州市:四川一三五岩土工程有限公司,2021.

作者简介:王银(1989—),男,四川自贡人,大学本科,高级工程师,主要从事岩土工程勘察、地质灾害勘查设计、地质灾害巡、排查方面的工作。E-mail:787845214@qq.com