

宋晨, 潘晓东, 刘天云, 等. 云南省一把伞水库主封堵区岩溶渗漏条件与管道特征分析[J]. 中国岩溶, 2024, 43(5): 1088-1098.

DOI: 10.11932/karst2024y033

云南省一把伞水库主封堵区岩溶渗漏条件 与管道特征分析

宋晨^{1,2}, 潘晓东^{1,2}, 刘天云³, 罗飞^{1,2}, 曾洁^{1,2}, 彭聪^{1,2},
程瑞瑞^{1,2}, 张文平^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部广西岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004;
2. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心/岩溶动力系统与全球变化国际联合研究中心,
广西桂林 541004; 3. 文山壮族苗族自治州水利电力勘察设计院, 云南文山 663000)

摘要: 水库渗漏是岩溶地区兴建水利枢纽关键的病害问题之一, 以一把伞水库主封堵区为例, 水文地质调查、地下水位动态监测、地球物理探测和钻探相互验证, 分析主封堵区水文地质条件, 识别岩溶渗漏管道位置及发育特征。结果表明: 主封堵区岩溶渗漏带发育于泥盆系东岗岭组(D₂d)较纯碳酸盐岩, SW至NE向压扭性断层构成南北隔水边界, 东西两侧为透水地层, 上游地下河至主封堵区汇流后又迅速分为南东、北东支流。岩溶渗漏带包括主管道以及北支管道, 渗漏管道发育位置受断层作用控制显著。研究揭示了岩溶渗漏的季节变化规律, 提出了主管道与北支管道的渗漏条件, 并分析了渗漏管道分布特征、规模及充填性质, 为一把伞水库主封堵区渗漏防范提供科学依据, 并为岩溶地区类似渗漏病害问题的治理提供借鉴意义。

关键词: 岩溶渗漏; 管道特征; 地球物理探测; 断层构造; 一把伞水库

创新点: 聚焦岩溶渗漏危害工程建设的疑难问题, 综合水文地质条件、地下水监测、地球物理探测和钻探等多方法, 识别岩溶渗漏带, 揭示了渗漏管道发育位置、规模及充填特征, 可为研究岩溶渗漏类似病害问题提供依据。

中图分类号: TV697.32 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)05-1088-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

我国西南地区碳酸盐岩分布面积达 53.26 km², 是全球碳酸盐岩连片分布面积最广的地区之一^[1]。西南地区岩溶发育, 水利资源丰富, 可开发水电资源占我国水电资源总储量的三分之二以上, 同时也是构造作用强烈的地区, 岩溶作用形成的溶洞、管道等

渗漏通道的高度不均匀性导致水工环条件变得极为复杂, 岩溶渗漏往往成为影响水利设施安全运行的症结所在^[2-3]。

岩溶渗漏是最主要、最复杂的水库渗漏类型, 因渗漏问题引起失事的大坝占失事工程总数的 40.5%^[4]。渗漏带走向和发育位置等特征的识别是水库渗漏研究的主要内容, 充分细致地进行水文地质

资助项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB21196026); 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2022005); 中国地质调查局地质调查项目“重点岩溶区及珠江流域水文地质与水资源调查监测”DD20221758)

第一作者简介: 宋晨(1997—), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事岩溶水文地质研究。E-mail: chens_feng@163.com。

通信作者: 潘晓东(1984—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事岩溶水文地质、环境地质研究。E-mail: 524592964@qq.com。

收稿日期: 2023-01-01

条件调查和分析,是识别岩溶渗漏的基础^[5-7]。地球物理探测是勘察不可见岩溶的有效手段,广泛地应用于研究渗漏区域、渗漏途径、渗漏速度等,在金鸡河水库渗漏分析中得到了很好地运用^[8-9]。目前,综合运用地面调查、长期观测、地球物理探测、钻探等多种方法组合是准确识别岩溶渗漏管道位置及发育特征的关键^[10-11]。一把伞水库位于我国西南边陲,属典型岩溶水库,主封堵区岩溶发育充分,管道、溶洞、裂隙分布十分不均,加之构造作用强烈,使原已充分发育的岩溶作用变得更加复杂,对岩溶管道位置及发育特征的认识仍有不足,潜在的渗漏问题给水库的成功封堵带来了极大的挑战。

基于地质、水文地质条件调查和分析,综合地下水动态监测、地球物理探测和钻探等多层次结果,分析了岩溶渗漏条件,并揭示了岩溶渗漏管道发育位置及发育深度等特征,以期对岩溶区水库渗漏类似病害问题的治理提供科学依据。

1 研究区概况

1.1 一把伞水库

一把伞水库位于云南省文山州南部马关县坡脚

镇境内(图 1),拟建库容近 9 000 万 m^3 ,是一座由 11 个地表季节性岩溶湖泊(照片 1a)和地下河管道、溶洞、裂隙共同组成的地表—地下联合调蓄型水库,属文山州、马关县政府拟建的重点水源工程。为了形成良好的蓄水效益,主封堵区拟建于大型洼地集中分布界线处,上游集中分布许多大型洼地,下游高差则较平缓,总体呈弧形,长度近 800 m,拟通过帷幕灌浆、泄洪隧洞等手段成库,试堵总库容 1 141.26 万 m^3 。因此,主封堵区是否存在渗漏带及特征是能否封堵成功的关键。前期水文地质初勘基本查明了主封堵区地质条件和地下水形成条件、赋存特征,本次结合水文地质详勘成果对主封堵区是否存在渗漏带及渗漏带特征开展进一步的研究和讨论。

1.2 地质背景

一把伞水库位于南岭纬向构造体系的西端、黔桂经向构造带的西南缘,山峦连绵起伏,常见峰丛洼地等岩溶地貌,地势总体西高东低、南高北低,海拔在 1 350~1 600 m 之间。库区地质构造较为复杂,主体构造方向以北东、北东东向断层为主,其次为次一级的北西向断层,主要影响断层包括 F3、F4、F5、F6、F7(图 1)。

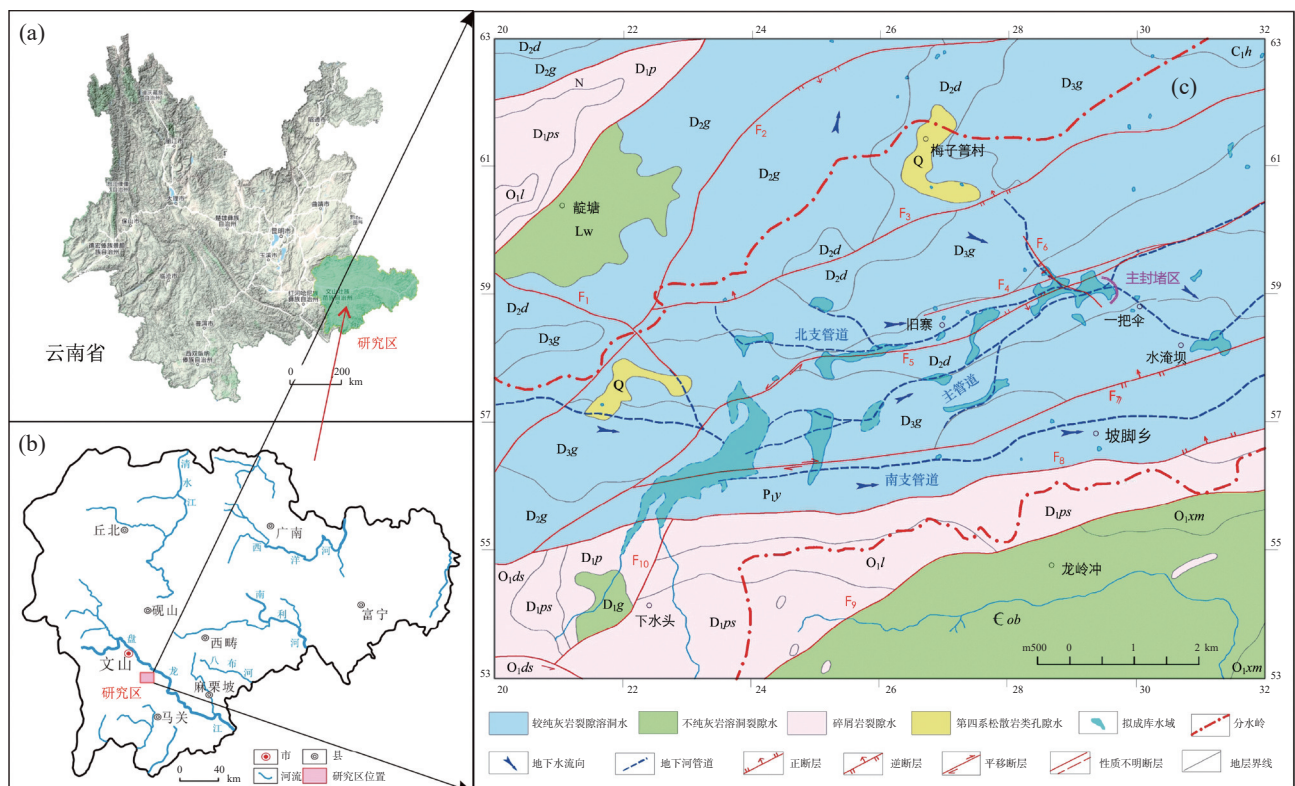
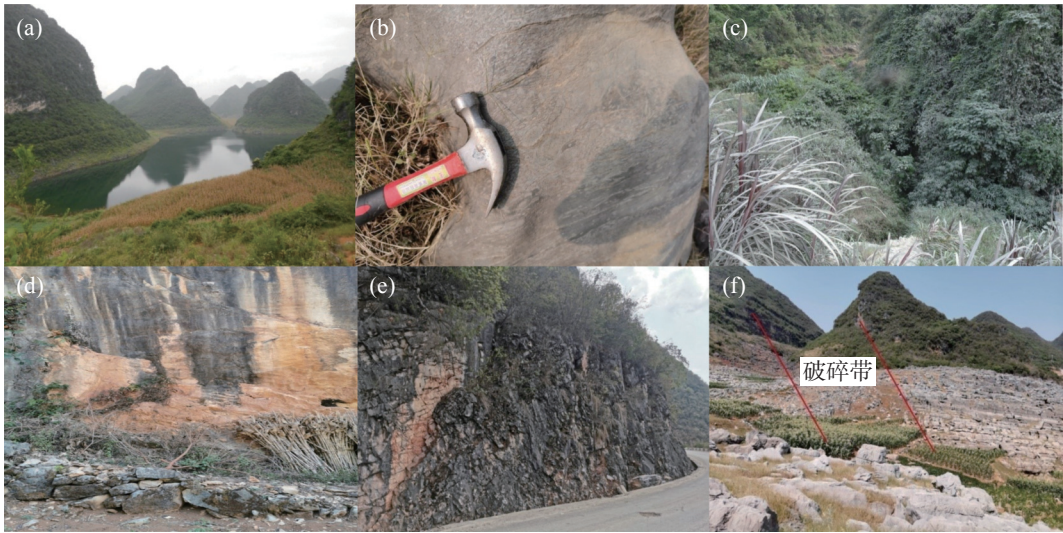


图 1 (a、b)一把伞水库区域位置图,(c)一把伞水库水文地质图
Fig. 1 Regional location of Yibasan reservoir (a, b), Hydrogeological map of Yibasan reservoir (c)



照片 1 (a) 一把伞水库地貌特征, (b) 水库附近出露灰岩, (c) 水库附近落水洞, (d) F3 沿线断层面紧闭, (e) F7 断层沿线发育紧闭裂隙, (f) F5 断层影响宽度达 80 m

Photo 1 (a) geomorphic features of Yibasan reservoir, (b) exposed limestone near the reservoir, (c) sinkhole near the reservoir, (d) the tightly closed plane along the F3 fault; e. closed fissures developed along the F7 fault; f. 80-meter-wide influence of F5 fault

库区主要出露泥盆系东岗岭组(D_{2d})及革当组(D_{3g})较纯碳酸盐岩,周边还出露有二叠系、石炭系碳酸盐岩以及奥陶系和上泥盆系碎屑岩。主封堵区出露地层为东岗岭组(D_{2d})厚层粉晶灰岩、白云质灰岩夹薄层泥灰岩、泥质灰岩(照片 1b),透水性较强,无稳定隔水层,岩溶现象以溶沟、洼地、落水洞(照片 1c)、天窗、地下河、溶洞等为主,库区主要地层岩性基本特征如表 1 所示,地层分布如图 1 所示。

2 研究方法

2.1 地下水动态监测

地下水动态观测有助于分析水体间是否存在水力联系,同时可为识别岩溶管道的空间展布等提供

参考依据^[12-13]。结合前期调查资料,研究区位于鱼塘地下河系统上游,该系统是由 F3、F7 断层构成的较为独立的系统,分为树杈型的南支、北支和主管道,地下河总体自南西向北东径流,最终于鱼塘村附近汇流出露地表。本研究利用 Solinst 仪器自动记录研究区各钻孔水位等信息,可实时查看、导出数据,以查明北支管道和主管道的水力联系。

2.2 地球物理探测及钻探

根据研究区水文地质条件和研究目标,选取音频大地电磁法、大功率充电法开展主封堵区地球物理探测,探测地层岩性、地下岩溶发育等。研究布设钻孔如图 2,钻头类型采用合金、金刚石钻头,钻孔深度介于 100~130 m,直观地揭露地层岩心,验证地下水动态监测及地球物理探测成果的准确性^[14]。

表 1 研究区地层岩性表
Table 1 Stratigraphic lithology in the study area

系	统	组段与地层代号	厚度/m	基本岩性特征
二叠系	下统	阳新组(P _{1y})	280	厚层至块状灰岩、白云质灰岩
	上统	马坪组(C _{2m})		厚层灰岩夹白云岩
石炭系	下统	黄龙组(C _{1h})		厚层灰岩
	上统	革当组(D _{3g})	241	厚层至块状灰岩、白云质灰岩、白云岩
泥盆系		东岗岭组(D _{2d})	187~1 125	厚层灰岩、白云质灰岩夹薄层泥灰岩、泥质灰岩
	中统	古木组一段(D _{2g})		厚层至块状灰岩夹白云质灰岩,白云岩
		古木组二段(D _{1g})	280~534	厚层白云岩夹中薄层灰岩
		坡脚组(D _{1p})	174	薄层泥岩,顶部夹灰岩透镜体
	下统	坡松洛组(D _{1ps})	0~241	薄至中层泥岩、砂岩夹泥质粉砂岩

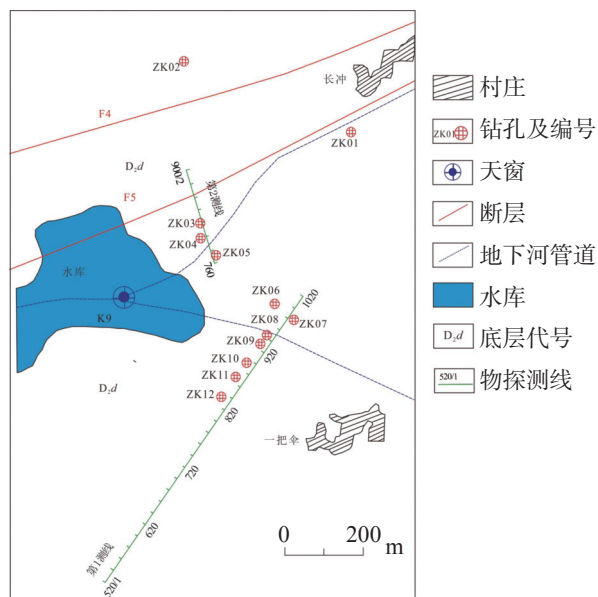


图2 钻孔及地球物理探测分布图

Fig. 2 Distribution of boreholes and geophysical exploration

3 主封堵区岩溶渗漏带识别与验证

3.1 主封堵区岩溶渗漏带的提出

3.1.1 水文地质条件分析

主封堵区位于主管道与北支管道的汇合区,同时也是大型洼地集中分布的界线,边界条件主要受地质构造、地层岩性等因素控制(图3),边界条件划分及依据如下:

(1)主封堵区北侧发育F3断层,断层性质属压扭性;通过对断层进行追索调查发现,断层面紧闭(照片1d),断面近直立,可见断层泥,断层泥厚度可达10 cm;断层带范围内未见岩溶现象发育,而在断层带两侧发育有消水洞、洼地等;断层带北侧消水洞消水方向为由南向北,断层带南侧消水洞消水方向为由北向南,断层两侧地下水流方向截然不同;同时断层带两侧地下水位动态变化并不具有规律性、相关性的变化。上述依据证明F3断层控制形成隔水边界,断层南北不存在水力联系。

(2)主封堵区南侧发育F7断层,断层性质属压扭性;通过对断层进行追索调查发现,断层面近直立,断层带裂隙多为紧闭裂隙(照片1f);断层带范围内未见岩溶现象发育,而在断层带两侧同样发育有消水洞、洼地等;通过分析断层两侧地下水位可知,旱季或者雨季水位差均超过50 m,而两侧洼地水平距

离不超过500 m,体现出断层两侧地下水隶属不同地下水系统。上述依据证明F7断层控制形成隔水边界,断层南北不存在水力联系。

(3)主封堵区东西两侧为地下水主要径流通道,出露革当组(D_3g)和东岗岭组(D_2d)较纯碳酸盐岩,形成透水边界。西侧发育北西至南东向F6导水断层,延展过程中错断F4、F5阻水断层,使F5断层面张开,通过研究区时断层影响宽度达80 m(照片1g),岩溶现象极为发育且岩石破碎,形成岩溶强发育带,可能形成岩溶渗漏带。

3.1.2 岩溶地下水水力联系

图4指示主封堵区库水位(K9一把伞天窗)与各钻孔水位关系图,当K9水位发生变化时,钻孔水位呈相同涨落状态,ZK01、ZK04、ZK08孔水位动态变化与库水位曲线吻合程度最高,ZK08水位变化速度大于ZK01以及其余钻孔,同时枯水期ZK08孔水位标高低于其他所有钻孔水位。

通过分析地下水流量监测资料可知,枯季时,主管道下游瓦厂坡断面平均流量 $0.98 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,鱼塘地下河出口流量 $1.15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;丰水期时,瓦厂坡断面平均流量 $4 \sim 5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,鱼塘地下河出口流量 $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。对比可得,枯季主管道流量与总出口流量基本一致,而丰水期两者流量相差 $4.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,说明丰水期可能有 $1/3 \sim 1/2$ 的水量自主管道渗入北支管道,而后至总出口汇流。

图5表示K9一把伞天窗、K12水淹坝天窗和ZK01钻孔地下水位动态变化。当K9天窗水位上升时,K12天窗水位随即出现涨幅,且与K9天窗具有相同的起伏波形,但随着水位的增加,两者间的水位差愈来愈大,说明主管道一把伞天窗至水淹坝天窗之间存在着明显的隔水段,当K9天窗水位超过1330 m时,阻水作用较明显;ZK01孔水位变化也指示,当水位超过1330 m时,ZK01孔和K9天窗水位变化一致,指示此时部分主管道地下水开始渗漏补给北支管道。

3.2 主封堵区岩溶渗漏带识别

通过水文地质分析与地下水位监测结果可知,主封堵区断层破碎作用强烈,K9至ZK04、ZK08之间可能存在岩溶渗漏带。以往研究发现:音频大地电磁法(EH4)通过分析低阻异常带的分布情况,可有

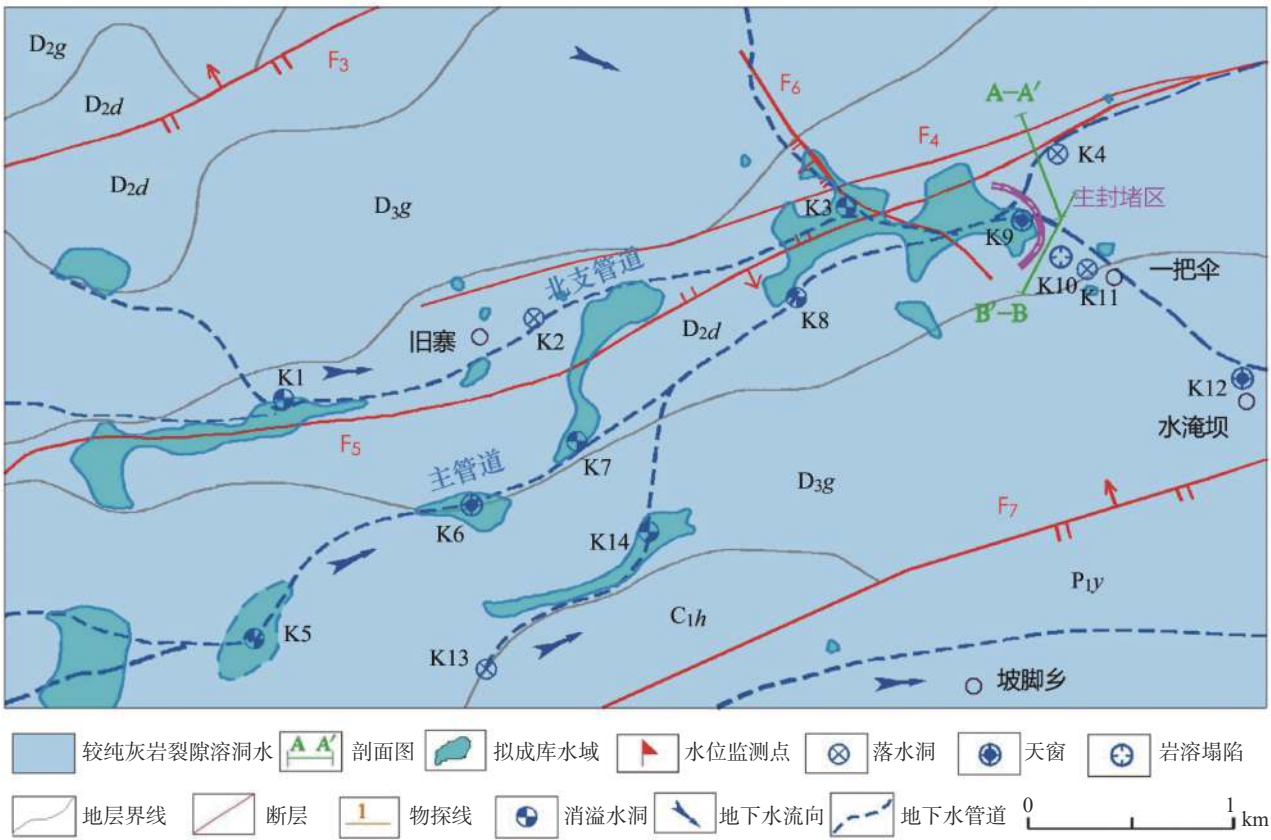


图3 一把伞水库主封堵区水文地质图

Fig. 3 Hydrogeological map in the main blocked area of Yibasan reservoir

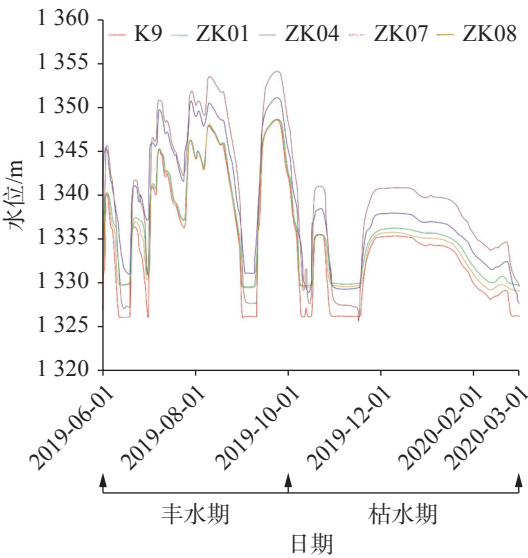


图4 研究区水位观测变化图

Fig. 4 Variations of water levels in the study area

效判断不同介质体的埋藏深度等特征;大功率充电法通过研究充电场分布,在确定管道走向等方面具有较高的准确性^[15-16]。

依据上述圈定的渗漏带范围,布设1号和2号

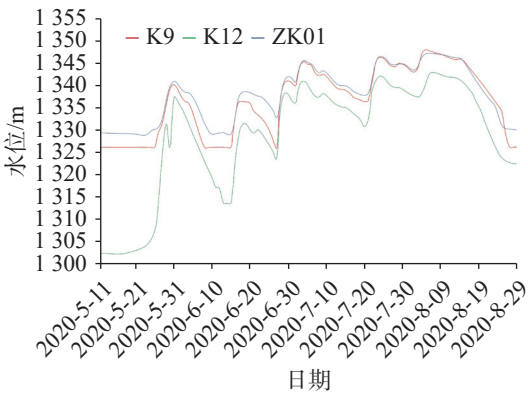


图5 北支管道与主管道地下水位关系图

Fig. 5 Relationship of groundwater levels between northern branch pipeline and the main pipeline

测线,地球物理测线布设垂直岩溶渗漏带和地下水流向,测线位置如图2,探测结果如图6。大功率充电法电位结果(图6a、b)曲线异常值出现在第1测线940~960 m、第2测线785~795 m处,分别于940~960 m、790 m电位达到极大值,电位梯度也接近于0,推测为岩溶渗漏管道。

EH4探测结果(图6c)显示,第1测线890~

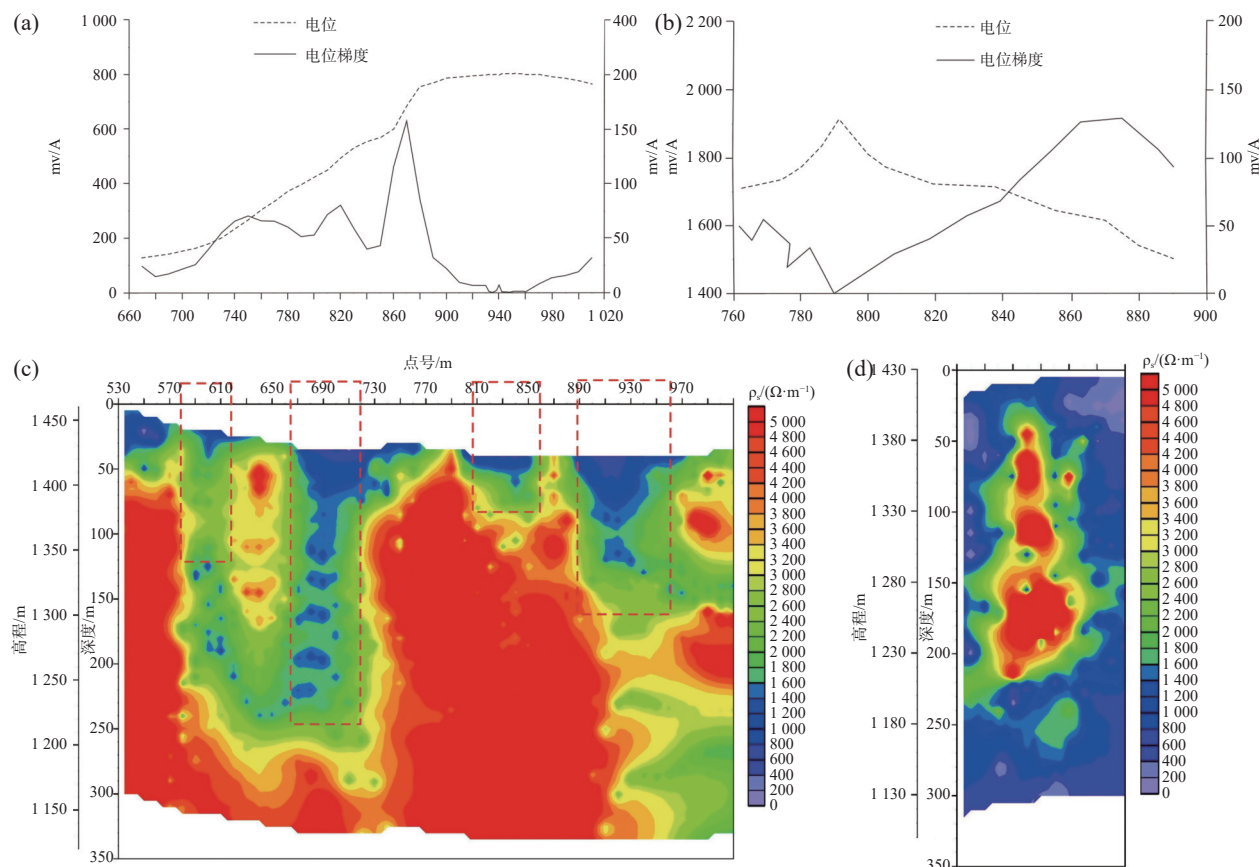


图 6 地球物理探测结果图((a)、(b)为大功率充电法 1、2 号测线；(c)、(d)为音频大地电磁法 1、2 号测线)

Fig. 6 Results of geophysical exploration ((a) and (b): No.1 and No.2 measuring lines for high power charging method; (c) and (d): No.1 and No.2 measuring lines for acoustic magnetotelluric method)

960 m 范围内出现极低阻闭合圈,与大功率充电法探测的异常带范围基本一致,指示岩溶管道发育位置,对应大功率充电法 940~960 m, 890~940 m 可能为管道附近岩溶强发育带,异常带深度约 120 m。第 1 测线其余异常范围可能因断裂破碎或岩溶发育形成岩溶裂隙(破碎)带,电阻较低,从而导致 EH4 解译极低阻闭合圈,并非岩溶管道。

同时, EH4 探测结果显示,第 2 测线 780~800 m、860~890 m 范围内出现 2 处极低阻闭合圈(图 6d),与大功率充电法探测的 785~795 m 渗漏带位置一致,指示岩溶管道发育位置,异常带深度约 100 m。第 2 测线 860~890 m 范围可解释为 F5 断裂形成的岩溶裂隙(破碎)带,导致 EH4 解译极低阻闭合圈,并非岩溶管道。

3.3 主封堵区岩溶渗漏带验证

根据岩溶渗漏识别结果,于第 1 测线 940~960 m、第 2 测线 785~795 m 附近实施钻探验证,相关钻孔特征(图 7c)描述如下:

(1)第 2 测线 785~795 m 附近实施钻孔 ZK03、ZK04、ZK05,分别进尺 94.8 m、81.6 m 和 114 m。钻孔均揭露表层第四系覆盖,厚度 0~14.6 m 左右,覆盖层以下至钻孔底部为泥盆系东岗岭组白云质灰岩地层,40 m 以下岩心较为破碎且岩溶较发育。

ZK03 孔 5.5~8 m、12.8~16.8 m、33.3~34.8 m 为溶洞,40~98.4 m 几乎均为溶洞,常发生掉钻。ZK04 孔 27.1~29.4 m、40.9~43.2 m、45.5~47.0 m、58.8~61.1 m、67.2~69.3 m、75.5~77.3 m 为溶洞。ZK05 孔 45~68 m 为溶洞,掉钻 23 m,75.8~78.1 m 为泥沙充填溶洞,可见较明显溶蚀及河道胶结物岩心(图 7a、b)。

(2)第 1 测线 940~960 m 附近实施钻孔 ZK07、ZK08、ZK09,分别进尺 100 m、126 m 和 115.9 m。钻孔均揭露表层第四系覆盖,厚度 0~18 m 左右,覆盖层以下至钻孔底部为泥盆系东岗岭组灰岩、白云质灰岩地层,岩心局部有宽大溶隙,可见黏土充填,且 ZK07、ZK08 成孔后有“吹气”现象, ZK08 “吹气”现象较明显。

ZK07 孔 28.6~41.3 m、55.2~58.7 m、63.1~66.3 m、

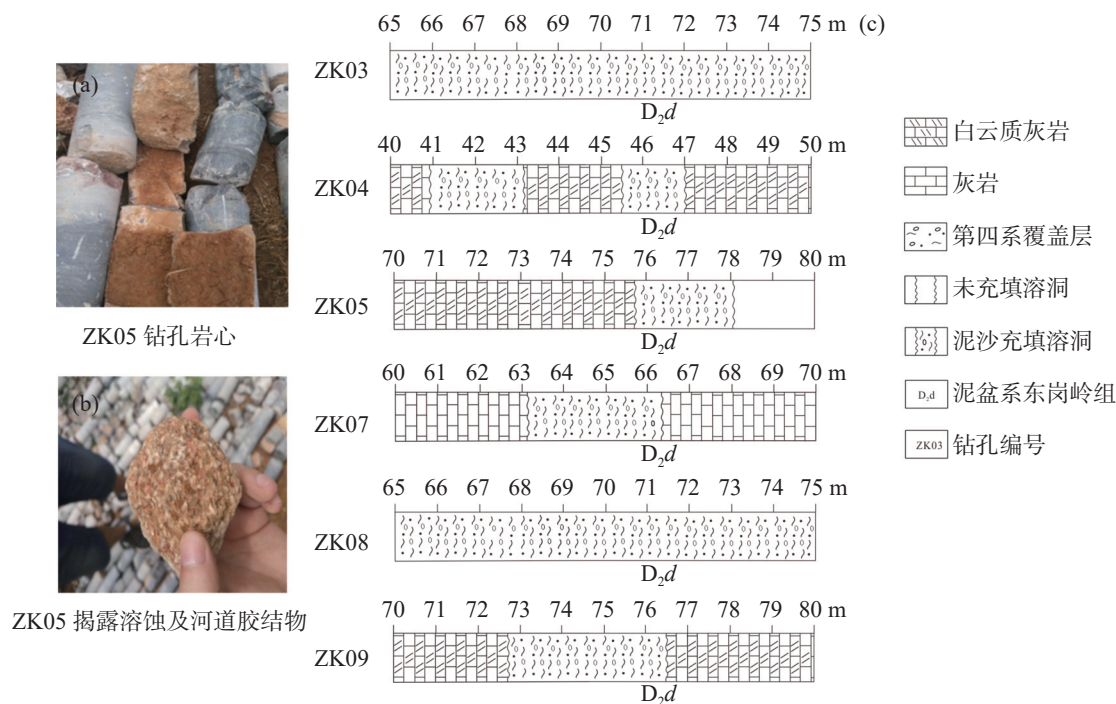


图 7 钻孔岩性柱状图

Fig. 7 Lithology histogram of boreholes

78.5~88.2 m 为溶洞, 40 m 以下溶洞有泥沙充填; ZK08 孔 60 m 以下几乎均为溶洞, 常发生掉钻; ZK09 孔 0~44.3 m 为第四系及白云质灰岩全风化带, 未揭露溶洞, 57.6~64.2 m、72.8~76.5 m、86.3~91.7 m 为溶洞。

总之, 研究实施的钻孔或揭露溶洞, 或岩心发育宽大溶隙, 且成孔后具有明显的“吹气”现象, 验证了前述识别的岩溶渗漏带。

4 讨论

4.1 主封堵区岩溶渗漏管道分布位置

综合水文地质分析、地下水动态、地球物理探测及钻探结果认为, 研究区岩溶渗漏带主要由主管道、北支管道组成, 出露地层均为东岗岭组(D_2d)较纯碳酸盐岩, 渗漏带发育受构造控制作用显著, 静兰防洪堤工程区岩溶渗漏评价也证明了这一点^[17]。主封堵区北部和南部存在的 F3、F7 断层隔水边界是封堵成库的主要原因, 雨季蓄水后, 水库试堵总库容达 1 141.26 万 m^3 , 是封堵成效很好的检验依据。以 A-A'、B-B' 剖面为例(剖面线见图 3), 渗漏带分布特征如图 8 所示。

北支管道分布特征及依据如下:

(1) 水文地质调查及剖面测量发现, F5 断层穿越研究区时断层影响宽度达 80 m, 影响范围内岩石破碎, 使原已充分发育的岩溶作用进一步强烈, K9 至 F5 断层可见串珠状的岩溶塌陷、落水洞等岩溶地貌。已有研究表明, 岩溶发育且构造作用强烈的地区易形成岩溶渗漏带的基础^[18], 故北支管道分布位置符合岩溶发育的一般规律。

(2) 水位动态监测结果表明 ZK01、ZK04 孔水位动态变化与 K9 呈相同涨幅状态, 说明钻孔与库水具有直接水力联系, 指示北支管道分布位置。

(3) 地球物理探测结果显示, 第 2 测线 785~795 m 处出现低阻异常带, 于点 790 m 处达到电位极大值及电位梯度近零值, 异常带范围与 ZK04 钻孔分布位置基本一致, 证明北支管道异常带范围。

(4) 水文地质钻探结果显示, 第 2 测线 790 m 处 ZK05 孔 40 m 以下岩心破碎, 45~68 m、75.8~78.1 m 均出现掉钻现象, 揭露溶洞, 且可见较明显的溶蚀及河道胶结物岩心, 指示水流痕迹明显。ZK03、ZK04、ZK05 孔 40 m 以下揭露多层溶洞, 常发生掉钻, 岩溶较发育, 验证了北支管道发育位置。

主管道分布特征及依据如下:

(1) 水文地质调查及剖面测量发现, 主管道为地下河系统主要径流通道, K9 至 K12 之间分布有多处

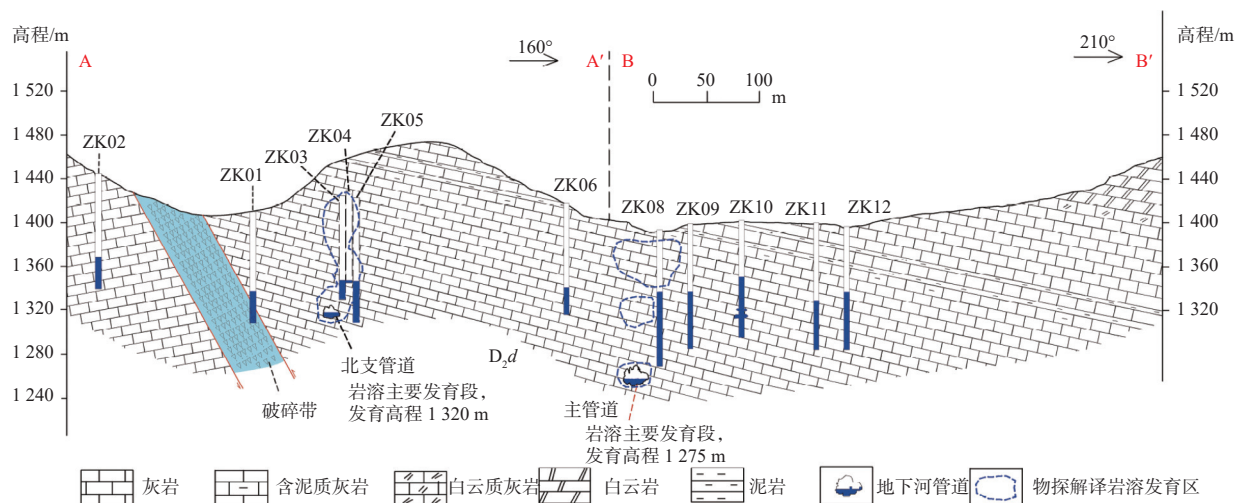


图 8 A-A'、B-B'剖面渗漏带分布特征图

Fig. 8 Distribution characteristics of the leakage zone of profile A-A' and B-B'

岩溶洼地、岩溶塌陷、落水洞、天窗等岩溶地貌，并以南侧 F7 阻水断层为边界，两处天窗雨季及枯季地下水具有同涨同落特征，长浪坝水库等研究表明岩溶地貌主发育方向一般为地下水集中径流方向^[2]。

(2) 地下水动态监测结果表明，ZK08 孔水位与库水位变化幅度及响应时间基本完全吻合，水位变化速度大于封堵区其余钻孔，表现出先涨先落趋势，且枯水期 ZK08 孔水位低于其余钻孔，根据枯水期一般情况下地下水补给径流与排泄关系，基本认为主管道位置位于 ZK08 孔附近。

(3) 大功率充电法结果显示在第 1 测线 940~960 m 存在电位极大值与电位梯度近零值 (ZK08 钻孔位于 950 m 附近)，音频大地电磁法结果显示第 1 测线 890~960 m 附近存在低阻异常带，两种方法在水文地质推测的主管道附近均证明了异常带显示。

(4) 水文地质钻探结果显示岩心局部发育有宽大溶隙，可见粘土充填，ZK07、ZK08、ZK09 孔均揭露溶洞。ZK09 孔 18.0~44.3 m 为白云质灰岩全风化带，可能为构造溶蚀溶洞塌陷形成，指示附近岩溶发育极为强烈；ZK08、ZK09 成孔后存在明显的“吹气”现象，ZK08 “吹气”现象较明显，说明下部因水流作用引起空气流动，均验证了主管道发育位置。

4.2 主封堵区岩溶渗漏管道发育规模

主管道及北支管道岩溶渗漏带发育规模差异较大，水文地质分析、地下水动态监测、地球物理探测以及钻探成果均显示主管道渗漏带发育规模较北支管道更大，主要依据如下：

(1) 水文地质分析及地下水动态监测发现，北支管道和主管道于主封堵区汇流后，枯水期地下河水流基本全部自主管道向下游排泄，仅丰水期存在约 1/3~1/2 水量自北支管道排泄。落水洞、天窗等岩溶地貌发育密集的地区通常岩溶作用强烈，易反映岩溶渗漏发育规模^[19]，研究区主管道沿线天窗、落水洞及岩溶塌陷发育较北支管道密集 (图 2)，指示主管道附近岩溶作用较北支管道更强烈，渗漏带发育规模更大。

(2) 地球物理探测及水文地质钻探结果表明，第 1 测线 940~960 m 指示主管道发育，第 2 测线 785~795 m 指示北支管道位置，第 1 测线异常带宽度相对较大。通常电位局部峰值范围愈大，宽度愈长，指示该异常带的规模愈大，发育强度愈强^[15]。水文地质钻探揭示主管道附近溶洞发育规模较大，溶洞发育高程较低。主管道岩溶渗漏带发育宽度和深度较大，宽度约 20 m，深度约 120 m，发育高程约 1 290 m，北支管道异常带宽度约 10 m，深度约 100 m，发育高程约 1 320 m。

4.3 主封堵区岩溶渗漏管道充填特征

主管道及北支管道附近钻孔岩心表面可见充填物或揭露溶洞，溶洞位置、规模、充填特征不尽相同，主要依据如下：

(1) 北支管道 ZK03 孔 40~98.4 m 几乎均为溶洞，见泥沙充填，ZK04 孔 40.9~43.2 m、45.5~47.0 m、58.8~61.1 m 溶洞含有泥沙充填，而上层溶洞未见充填物堆积，ZK05 孔 75.8~78.1 m 为泥沙充填溶洞，上层溶洞未见充填物，说明深部溶洞存在水流携带泥沙痕迹。

(2)主管道附近钻孔岩心以局部发育宽大溶隙,伴有明显表面溶蚀现象为主,裂隙中可见黏土充填。ZK07 孔 55.2~58.7 m、63.1~66.3 m、78.5~88.2 m 为溶洞,见泥沙充填,ZK08 孔 60 m 以下几乎均为泥沙充填溶洞,ZK09 孔 0~44.3 m 为第四系及白云质灰岩全风化带,未揭露溶洞,57.6~64.2 m、72.8~76.5 m、86.3~91.7 m 为溶洞,见泥沙充填,ZK09 上部 44.3 m 内均为土层,可能为构造溶蚀溶洞垮塌形成。

5 结论与建议

(1)一把伞水库主封堵区位于鱼塘地下河系统上游主管道与北支管道汇合区,而后又迅速分为北东、南东向支流,出露东岗岭组(D_2d)较纯碳酸盐岩,压扭性断层构成南北隔水边界,东西为透水地层,枯水期地下水多自主管道向下游排泄,丰水期地下水约 1/3-1/2 向北支排泄。

(2)主封堵区岩溶渗漏带包括北支管道以及主管道,发育位置受构造作用控制显著,主管道规模较大,发育位置在第 1 测线 940~960 m, ZK08 钻孔处,发育宽度约 30 m,深度约 120 m,发育高程约 1 290 m;北支管道规模较小,发育位置在第 2 测线 785~795 m, ZK04、ZK05 钻孔之间,发育宽度约 10 m,深度约 100 m,发育高程约 1 320 m,库区地下河水位超过 1 330 m 时,存在主管道至北支管道渗漏。

(3)岩溶地区水利资源丰富但时空分布十分不均,渗漏管道识别一直是关乎岩溶地区水利枢纽成败与否的关键问题。由于主封堵区地层为较纯碳酸盐岩,岩溶发育十分不均,可能存在未被发现的岩溶渗漏通道,建议设计施工阶段在本研究成果的基础上进一步开展地质、水文地质加密勘察工作,进一步查明可能存在的岩溶渗漏带,做到对水文地质条件及水库渗漏更充分、完整的认识。

参考文献

- [1] 袁道先. 岩溶地区的地质环境和水文生态问题[J]. 南方国土资源, 2003(1): 22-25.
- [2] 赵敏. 复杂岩溶水库成库条件及岩溶渗漏分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
ZHAO Min. Analysis of reservoir forming conditions and karst seepage in complex karst reservoirs[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [3] Liu B, Wang C K, Liu Z Y, Xu Z H, Nie L C, Pang Y H, Wang N, Feng S X. Cascade surface and borehole geophysical investigation for water leakage: A case study of the Dehou reservoir, China[J]. Engineering Geology, 2021, 294(5): 106364.
- [4] 段乔文, 俞富有, 张天柏, 何伟, 段春林. 滇东高原罗平湾子水库岩溶渗漏机理及库外补漏设想[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 287-297.
DUAN Qiaowen, YU Fuyou, ZHANG Tianbai, HE Wei, DUAN Chunlin. Karst leakage and its sealing at Wanzi reservoir in Luoping county on the plateau of eastern Yunnan[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(2): 287-297.
- [5] Mohammadi Z, Raeisi E. Understanding karst leakage at the Kowsar dam, Iran, by hydrogeological analysis[J]. Environmental & Engineering Geoscience, 2015, 21(4): 325-339.
- [6] 梁杏, 韩庆之, 曾克峰, 宋胜武, 杨建宏. 溪洛渡水电站库首岩溶渗漏可能性研究[J]. 水文地质工程地质, 2000(5): 26-30.
LIANG Xing, HAN Qingzhi, ZENG Kefeng, SONG Shengwu, YANG Jianhong. Research on reservoir leakage possibility in Xiluodu hydroelectric plan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2000(5): 26-30.
- [7] Mozafari M, Milanovic P, Jamei J. Water leakage problems at the Tangab Dam Reservoir (SW Iran), case study of the complexities of dams on karst[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(10): 7989-8007.
- [8] 韩凯, 陈玉玲, 陈贻详, 甘伏平, 郑智杰. 岩溶病害水库的渗漏通道探测方法: 以广西全州县洛潭水库为例[J]. 水力发电学报, 2015, 34(11): 116-125.
HAN Kai, CHEN Yuling, CHEN Yixiang, GAN Fuping, ZHENG Zhijie. Detection method of leakage passages in karst disease reservoirs: A case study of Luotan reservoir in Quanzhou county of Guangxi[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(11): 116-125.
- [9] 陈贻详, 郭健强, 黄奇波, 甘伏平, 韩凯. 水中自然电场法探测病态水库岩溶渗漏通道: 以金鸡河水库一级水电站为例[J]. 中国岩溶, 2018, 37(6): 883-891.
CHEN Yixiang, WU Jianqiang, HUANG Qibo, GAN Fuping, HAN Kai. Detection of karst leakage passages in sick reservoirs by the self-potential method on the water: An example of the first-class hydropower station on the Jinjihe reservoir[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(6): 883-891.
- [10] Feng S X, Zhao Y F, Wang Y J, Wang S Y, Cao R L. A comprehensive approach to karst identification and groutability evaluation: A case study of the Dehou reservoir, SW China[J]. Engineering Geology, 2020, 269: 1-14.
- [11] 胡大儒, 李鹏飞, 裴熊伟, 王钦权. 北盘江流域某岩溶水库坝基渗漏敏感性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(6): 39-44.
HU Daru, LI Pengfei, PEI Xiongwei, WANG Qinquan. Sensitivity analysis of dam foundation seepage of a karst reservoir in Beipan river basin[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, 18(6): 39-44.
- [12] 陈舟, 赵贵清, 王志光, 陈豪, 张科正. 岩溶区某磷石膏堆放场渗漏特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(2): 144-150.

- CHEN Zhou, ZHAO Guiqing, WANG Zhiguang, CHEN Hao, ZHANG Kezheng. Leakage characteristics of a phosphorus gypsum storage site in karst area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(2): 144-150.
- [13] Bonacci O, Rubinic J. Water losses from a reservoir built in karst: The example of the Boljunčica reservoir (Istria, Croatia)[J]. *Environmental Geology*, 2009, 58: 339-345.
- [14] 肖万春. 水库岩溶渗漏勘察技术要点与方法研究[J]. *水力发电*, 2008, 34(7): 52-55.
- XIAO Wanchun. Keystones and methods study of karst reservoir leakage investigation[J]. *Water Power*, 2008, 34(7): 52-55.
- [15] 罗瑞恒, 刘天云, 胡顺强, 潘晓东, 刘伟. 地球物理技术在岩溶水库渗漏通道识别中的应用[J]. *人民长江*, 2022, 53(7): 128-134.
- LUO Ruiheng, LIU Tianyun, HU Shunqiang, PAN Xiaodong, LIU Wei. Application of geophysical technology in leakage channel identification of reservoir in karst area[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(7): 128-134.
- [16] 郑智杰, 张伟, 曾洁, 甘伏平. 综合物探方法在碳质灰岩库区岩溶渗漏带调查中的应用研究[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(5): 2268-2273.
- ZHENG Zhijie, ZHANG Wei, ZENG Jie, GAN Fuping. Application research of integrated geophysical methods to karst seepage investigation in carbonaceous limestone reservoir area[J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(5): 2268-2273.
- [17] 赵伯锐. 柳州市静兰防洪堤工程岩溶发育特征及渗漏评价[J]. *水文地质工程地质*, 2005(1): 81-84.
- ZHAO Bokun. Characteristics of the karst and evaluation of the leakage of the flood control project of the Jinglan dike near Liuzhou[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2005(1): 81-84.
- [18] 黄顺涛. 断裂构造发育对贵州两岔河水库岩溶渗漏的影响研究[J]. *水利水电技术*, 2017, 48(3): 127-132.
- HUANG Shuntao. Study on impact from development of fault structure on karst leakage of Liangchahe reservoir in Guizhou[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, 48(3): 127-132.
- [19] 刘天云, 罗瑞恒, 胡顺强, 赵永宾, 潘晓东, 刘伟. 文山小河尾水库岩溶渗漏水文地质条件与管道位置识别[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(1): 88-99.
- LIU Tianyun, LUO Ruiheng, HU Shunqiang, ZHAO Yongbin, PAN Xiaodong, LIU Wei. Hydrogeological conditions of karst leakage and identification of pipeline location in Xiaohewei reservoir, Wenshan[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(1): 88-99.

Analysis of karst leakage conditions and pipeline characteristics in the main blocked area of Yibasan reservoir, Yunnan

SONG Chen^{1,2}, PAN Xiaodong^{1,2}, LIU Tianyun³, LUO Fei^{1,2}, ZENG Jie^{1,2}, PENG Cong^{1,2}, CHENG Ruirui^{1,2}, ZHANG Wenping^{1,2}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. International Research Centre on Karst under the Auspices of UNESCO, National Center for International Research on

Karst Dynamic System and Global Change, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Institute of Water

Conservancy and Electric Power Survey and Design, Wenshan, Yunnan 663000, China)

Abstract Reservoir leakage is a significant challenge in the construction of water conservancy projects in karst areas. Yibasan reservoir is a key water source project planned for Wenshan Prefecture in Yunnan Province. It is a storage reservoir composed of 11 surface seasonal karst lakes, underground river pipelines, karst caves and fissures. The proposed storage capacity is nearly 90 million m³. The main blocked area is planned to be built at the concentrated distribution line of large depressions. Many large depressions are located in the upper reaches, while the height differences in the lower reaches are relatively gentle, with an overall arc length of nearly 800 m. The project is planned to be constructed with the use curtain grouting, flood discharge tunnel and other methods, with a total storage capacity of 11,412,600 m³. The presence of leakage zones in the main blocked area and their characteristics are critical to the success of sealing process. Taking the main blocked area of Yibasan reservoir as an example, the hydrogeological survey, dynamic monitoring of groundwater levels, and geophysical exploration and drilling have been employed in conjunction to analyze the hydrogeological conditions in the main blocked area and to identify the location and development characteristics of karst leakage.

The results show that the karst leakage zone in the main blocked area is developed in the pure carbonate rocks of the Devonian Donggangling Formation (D₂d). The lithology consists of thick layers of silty crystalline limestone, dolomitic limestone interbedded with thin layers of marl, and muddy limestone. The south-north water boundary is

formed by the SW to NE compression and torsional reverse fault, Water permeable strata are located on both sides of east and west. After the confluence of the upper reaches of the underground river to the main blocked area, the river rapidly divides into southeast and northeast tributaries. The F6 water-guiding fault in the direction of NW to SE crosses the main blocked area and opens the F4 and F5 fault planes. The width of the fault influence is 80 meters, which provides the structural conditions necessary for the formation of karst leakage zone. This karst leakage zone encompasses both the main pipeline and the north branch pipeline, with the development location of the leakage pipeline being significantly controlled by faulting. The study revealed the seasonal variation of karst leakage, proposed the leakage conditions of the main pipeline and the northern branch pipeline, and analyzed the distribution characteristics, scale and filling properties of the leakage pipeline. Through the analysis of groundwater level and monitoring of groundwater flow, it has been observed that when the groundwater level in the reservoir area exceeds 1,330 meters, leakage occurs from the main pipeline to the northern branch pipeline. In the dry season, groundwater is mostly discharged downstream through independent pipelines. In contrast, during the wet season, about 1/3 to 1/2 of groundwater is discharged into the northern branch. Hydrogeological analysis, monitoring of groundwater dynamics, and results of geophysical exploration and drilling show that the development scale of the leakage zone of the main pipeline is larger than that of the northern branch pipeline. The drilling results also show that filling or exposed karst caves can be seen on the surface of the drilled core near the main pipeline and the northern branch pipeline, and there is an obvious "blowing phenomenon" after the formation of holes. There is no sediment filling in the karst cave with the northern branch pipeline above 40 m; however, there is an increase in sediment filling in the karst cave below this depth. Similarly, there is no sediment filling in the karst cave with the main pipeline above 50 m, while there is a notable increase in sediment filling in the karst cave below this depth. This suggests that the development depth of the underground river is below 40 m, and the drilling results are consistent with the geophysical findings. The karst leakage zone of the main pipeline exhibits a large leakage scale, characterized by a development width of about 30 m, a depth of about 120 m, and an elevation of about 1,290 m. The development location is identified between 940 m and 960 m along the first survey line and at the ZK08 borehole. In contrast, the karst leakage zone of the northern branch pipeline is smaller in scale, with its development situated along the second survey line at 785 m to 795 m, as well as at ZK04 and ZK05 boreholes. This zone has a development width of about 10 m, a depth of about 100 m, and an elevation of about 1,320 m. This study establishes a scientific basis for leakage prevention in the main blocked area of Yibasan reservoir, and offers a reference for the treatment of similar leakage issues in karst areas.

Key words karst leakage, pipeline characteristics, geophysical exploration, fault structure, Yibasan reservoir

(编辑 张玲)