

曹建文, 杨海洋, 王 喆, 等. 湖北某抽水蓄能电站建设中地下河系统多元信息综合分析评价[J]. 中国岩溶, 2023, 42(4): 699-710.

DOI: 10.11932/karst20230406

湖北某抽水蓄能电站建设中地下河系统 多元信息综合分析评价

曹建文^{1,2}, 杨海洋³, 王 喆^{1,2}, 赵良杰^{1,2}, 林玉山^{1,2}, 栾 崧^{1,2}, 李录娟^{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/联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004; 2. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西 平果 531406;

3. 中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘 要: 岩溶发育特征是岩溶区水电工程建设中必须查明的水文地质条件, 岩溶渗漏问题更是工程建设成败的关键。湖北某抽水蓄能电站上水库位于岩溶洼地区, 工程区地下水系统边界不清、条件不明, 可能面临严重的岩溶渗漏问题, 本次研究将区域构造分析、地貌成因识别、地下河追踪溯源、微动态自动化监测等多种技术手段有机结合, 提取多元信息综合分析, 对工程区地下河系统进行了有效识别。结果表明: 上水库周边不存在隔水层及阻水构造, 子良坪背斜控制了地下水系统的基本格局; 地下河岩溶管道具有单支管道状结构特征, 南北向岩溶管道不发育, 上水库存在向南西侧发生管道式渗漏的风险; 上水库内垂向溶蚀作用强烈, 建议进行库底土工膜全库盆防渗处理, 工程蓄水后应防范可能发生的不均匀沉降和岩溶塌陷问题。

关键词: 岩溶; 库区渗漏; 地下河系统; 识别; 多元信息

中图分类号: P641 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)04-0699-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

党的十八大以来, 我国坚定不移推进能源绿色低碳转型, 把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局的同时, 大力推动清洁能源发展, 其中水电更是能源转型的最前沿, 在电力工业中发挥中流砥柱的作用, 发展水电一直是我国能源电力的重要战略方针。我国西南地区水能资源极其丰富, 是我国水能资源最为集中的地区, 水能蕴藏量高达 2.7 亿 kW^[1], 但是西南地区又是我国最主要的岩溶分布区, 岩溶分布面积占三分之一以上, 随着水利水电建设事业

的迅猛发展, 常常会在岩溶地区开展水库工程建设, 库区地质条件复杂^[2]。

岩溶对于水利工程是一种不良地质现象, 岩溶发育形成的地下水运移空间具有高度非均质性, 孔、缝、洞多尺度岩溶形态并存, 对施工期主体工程的结构稳定性、基础的处理措施及运行期工程的蓄水成功与否会产生重大影响, 甚至影响整个工程的成败。不同于北方平原区地下水系统, 我国西南岩溶区地质条件复杂, 在不同的地层结构、地形地貌条件和新构造运动背景组合下, 可形成不同模式的岩溶水系统^[2], 具有难以准确划分系统

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20221758); 中南勘测设计研究院科技项目

第一作者简介: 曹建文(1983—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水文地质、岩溶地质调查研究。E-mail: cjianwen@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 杨海洋(1987—), 男, 工程师, 主要从事工程地质、水文地质工作。E-mail: snitxiuyy@126.com。

收稿日期: 2023-02-28

边界、难以探测管道形态与位置、流量动态变幅巨大等特征,如何准确识别工程建设区岩溶水系统的特征及其工程影响仍然是一个难题。近年来国内学者综合利用水文地质调查、示踪试验、水文地球化学、同位素、地下水动态监测等多种技术来开展地下水系统识别研究,为查明地下水动力条件和岩溶发育规律,提供了可靠的借鉴^[3-10]。

湖北某抽水蓄能电站是国家抽水蓄能中长期发展规划“十四五”重点实施项目,工程利用高部位的凤凰岗岩溶洼地作为上水库,北侧流水支流沟谷作为下水库,工程区总体位于子良坪背斜,其中上水库位于背斜核部,近地表分水岭附近,岩溶发育极其强烈,由于不存在区域上的隔水层及阻水构造,地下水系统边界不易划分,地下水流系统情况不明,对库区工程建设影响巨大。本文以电站上水库为研究对象,通过岩溶水系统多元信息综合分析,将区域构造分析、地貌成因识别、地下河追踪溯源、微动态自动化监测等多种技术手段有机结合,提取对地下水系统形成具有重要影响作用的多元信息,准确识别库区岩溶水系统边界及特征,分析岩溶发育对工程的影响机制,为该库区工程建设提供科学依据,同时为其他岩溶地区库区选址提供参考。

1 工程区概况

该抽水蓄能电站位于武陵山余脉,属湘鄂西构造侵蚀褶皱地貌区,地形以中深切的中低山丘陵地形为主。本区域地处亚热带过渡性季风气候区内,年降水量为 1 050~1 300 mm,区内河流主要有流水及其支流南河、曲尺河(北河)、红岩河,干流总体走向多为 SN 向,工程区位于流水支流红岩河中游,河道狭窄曲折,两岸山岭纵横。

子良坪背斜西起湖南省石门县子良镇,向东延至湖北松滋西斋附近,轴线呈近东西向伸展,东西长 30 多千米,南北宽约 10 km。西部在曲尺河一带向西倾没,东部在斯家场—西斋一线受江汉断块凹陷影响,被第四系覆盖,背斜核部为寒武系地层,南北翼为奥陶系、志留系地层,两翼地层产状不对称,北翼倾角较陡,多在 50°~70°,南翼倾角缓,多在 20°~30°,因而造成斜歪背斜,背斜北翼受曲尺河大断裂(F1)破坏,使部分地层缺失(图 1)。地层及岩性由老到新依次为:寒武系中上统娄山关组($C_{2-3}l$)中厚层

白云岩;奥陶系下统南津关组(O_{1n})中厚层状灰岩夹页岩、分乡组(O_{1f})中厚层状灰岩、红花园组(O_{1h})厚层状灰岩、大湾组(O_{1d})泥质条带灰岩,中统牯牛滩组(O_{2g})泥质条带瘤状灰岩、宝塔组(O_{2b})龟裂纹灰岩,上统临湘组(O_{3l})泥质灰岩;志留系下统龙马溪组(S_{1ln})砂页岩。

子良坪背斜发育碳酸盐岩含水岩组($C_{2-3}l$)、纯碳酸盐岩夹碎屑岩含水岩组(O_{1n} 、 O_{1f} 、 O_{1h})、不纯碳酸盐岩含水岩组(O_{1d} 、 O_{2g} 、 O_{2b} 、 O_{3l})等三类岩溶含水岩组,岩溶水文地质格架相对较简单。上库区地势较高,位于近分水岭地带,岩溶发育强烈,洼地及落水洞密集分布,汇水能力较强,为地下水的补给提供了良好的地形条件,地下水埋藏较深,岩溶管道受层控影响较为明显。该区域内地下水主要接受大气降水的补给,局部接受季节性泉水补给,在岩溶洼地分布区,大气降水通过裂隙和岩溶通道迅速补给地下水,在地形及构造共同控制下自凤凰岗—长冲岗一带向红岩河谷方向排泄。上水库位于子良坪背斜核部,周边均为单一的娄山组白云岩地层,附近不存在隔水层及阻水构造,地下分水岭表征不明,地下水系统边界不易划分,岩溶水系统结构特征难以准确识别。

2 岩溶地下河系统多元信息识别

根据研究区特点,本次研究采用“构造—地貌—溯源—验证”的多元信息识别来进行岩溶地下河调查研究工作,准确识别出冬竹水地下河系统及其岩溶发育特征。

2.1 构造分析法

地质构造控制着地下水的形成及运动和岩溶发育的方向与格局^[8,11-12]。本区位于鄂西南边陲,地貌的基本轮廓定型于侏罗纪末的燕山运动,山川的展布,皆受这一构造骨架的控制。在燕山运动后,鄂西地区一直处于大面积的间歇性隆起之中,在地壳运动相对稳定时,地壳向夷平方向发展,形成剥夷面。而同时岩溶形态也向水平方向发展,形成槽谷、洼地和地下水平管道。地壳上升时,夷平作用结束,岩溶向垂向管道发展,形成漏斗、落水洞等。由于在晚近构造运动的作用下,地壳处于大面积的急剧上升之中,侵蚀基准面和溶蚀基准面也随之急剧下切,但地下溶蚀速度低于地表侵蚀下切速度,导致大部分岩溶管道出口要高悬于侵蚀基准面之上(表 1)。在新

构造运动的改造下,该地区岩溶发育也具有典型的垂向分带特征^[13]:在上库区洼地及丘峰受生物溶蚀和散流水溶蚀作用形成了表层岩溶带,向下在强烈的垂向侵蚀及溶蚀作用下形成了垂直岩溶发育带,在丘峰向河谷的转折地带,形成了最新一期近水平延展的地下河管道系统。

上水库整体处于子良坪背斜核部,褶皱发育且无断层影响,沿背斜轴部发育大量拉张性质的垂向裂隙及次生裂隙,为地下水的流动提供良好的径流通道,形成沿背斜轴部及向背斜两翼运移的两类地下水径流方向。轴部碳酸盐岩形成顺主体构造线分布的条带状岩溶洼地,由于垂向上裂隙的导水作用,有利于岩溶的向下发育,在地下一定深度形成地下河管道(图2)。总体来看,背斜转折端的次级张裂为地下水提供了向纵深的运移空间,包括落水洞及溶

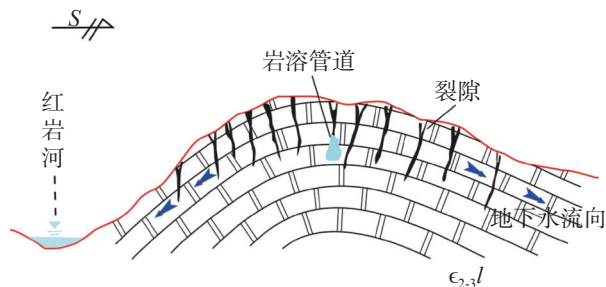


图2 子良坪背斜对岩溶发育的控制

Fig. 2 Control of karst development by the Ziliangping anticline

蚀沟槽等(图3),背斜转折端的宽缓地层分布增大地下水的汇水面积,通过大气降雨补给的地下水先顺岩层倾向运动到一定深度后,受该地区线状特殊地质构造条件的控制,再顺岩层走向纵向运动至横切沟谷排泄。



a. 落水洞



b. 溶蚀沟槽

图3 上库区典型地表岩溶形态

Fig. 3 Typical surface karst morphology in the upper reservoir area

2.2 地貌成因分析法

通过区域地形地貌可以大致判断地下水的运动趋势和方向,可以直观地了解地下水补给区及排泄基准面,尤其岩溶负地貌形态、数量和规模是表征地下岩溶发育情况的重要依据^[14-16],通过地貌及地貌组合形态的调查,可以分析地表和地下径流过程的转化及结果^[17]。

对上库区岩溶洼地及落水洞发育特征进行统计发现(图4,表2,表3):

(1)岩溶洼地主要分布于岩溶溶丘洼地地貌单元中。按洼地底部高程,上库区段岩溶洼地可分为二级:Ⅰ级洼地(洼地底部高程为453~585 m)、Ⅱ级洼地(洼地底部高程为272~414 m),说明工作区至少经历了两期岩溶夷平作用;

(2)洼地平面上多呈不规则的长条状,在背斜核部,洼地长轴方向多为近东西向,而背斜两翼洼地则多近南北向发育,体现出明显的褶皱构造控制性特征;

(3)上库区及周边地段共发育18处落水洞,洞口一般呈圆形或椭圆形,直径一般为1~5 m,可见深度一般为4~10 m,落水洞的发育方向主要受裂隙控制,整体形态多为垂直或倾斜的,多位于洼地底部,具有明显的地表径流汇入特征,是地表水转入地下河或溶洞的通道。

岩溶地貌组合形态是地表-地下水溶蚀侵蚀作用为主形成的组合群体,对含水层类型及岩溶水的形成、运动和赋存特征具有较为确切的反映^[17]。在研究区,溶丘洼地是该区最重要的岩溶汇水地貌组

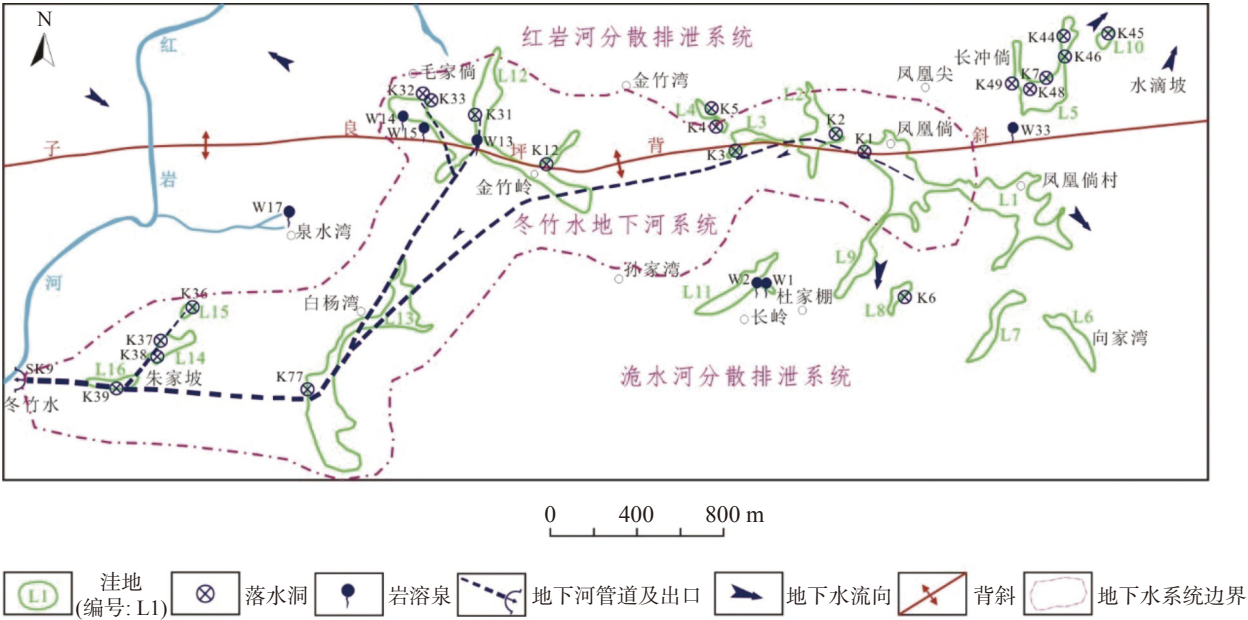


图 4 上库区及周边地区主要洼地、落水洞、岩溶泉、岩溶管道分布图

Fig. 4 Distribution of main depressions, sinkholes, karst springs and karst pipelines in the upper reservoir area and its surrounding area

表 2 上库区及周边地段岩溶洼地基本特征一览表
Table 2 Development characteristics of karst depression in the upper reservoir area and its surrounding area

洼地 编号	洼地底部 高程/m	按底部高 程分级	长轴 方向	与背斜位置 关系
L1	551	I 级	近EW向	核部
L2	552	I 级	近SN向	
L3	578	I 级	近EW向	
L12	414	II 级	近EW向	
L4	585	I 级	近NW向	北翼
L5	528	I 级	近SN向	
L10	537	I 级	近SN向	
L6	553	I 级	近SN向	
L7	482	I 级	近SN向	南翼
L8	558	I 级	近SN向	
L9	548	I 级	近SN向	
L11	453	I 级	近SW向	
L13	338	II 级	近SW向	
L14	290	II 级	近SW向	
L15	302	II 级	近SW向	
L16	272	II 级	近EW向	

合形态,洼地内落水洞、溶蚀沟槽、垂向裂隙等大气降水补给通道发育,地下水获得补给后向西侧河谷区径流,在背斜核部附近形成集中排泄通道,并与地表发育的洼地及落水洞互为对应,如 L1、L3、L13 及

L16 等洼地的长轴方向基本与地下河管道发育方向一致,K1、K2、K12、K39 等落水洞在平面上的连接线能够基本反应地下河主管道的发育位置。

2.3 追踪溯源法

地下河系统具有完整的补径排分区,并且多以出水溶洞作为集中排泄点(地下河出口)出露于地表,实际工作中以该处为起点向地下来水方向进行追索溯源调查,重点关注岩溶洼地、天窗、落水洞、竖井及伏流出入口等岩溶地貌形态在平面上的延展变化情况,并由此初步判断地下河系统补径排的大概轮廓。

上库区及周边地段发育具有一定规模的主要溶洞为 SK9(冬竹水),为一处地下河出口,位于朱家坡 L16 洼地的西侧山脚处(图 5),洞口高程 165 m,洞口朝向 273°,沿岩层面近东西向发育,宽 1.5~4 m,高 2~3 m,可见深度大于 5 m。溶洞发育于 C₂₃l 浅灰色中厚层白云岩、细晶白云岩地层中,沿溶蚀裂缝、断层破碎带发育。洞口的冲积物多为砂砾石,砾石直径 2~5 cm,含砂量约为 70%,磨圆度较好,分选性较差,搬运距离可能较远,并存在溶潭。洞口发育少量钟乳石,有跌水现象,属流出型溶洞,流量 20~200 L·s⁻¹。

由地下河出口 SK9 向东部补给区追溯,依次发

表 3 上库区及周边地段落水洞基本特征一览表

Table 3 Development characteristics of sinkholes in the upper reservoir area and its surrounding area

落水洞编号	洞口高程/m	分布位置	落水洞规模/m			发育条件
			宽度	长度	深度	
K1	551	L1洼地西侧底部	2~4	6~8	>4	受 $300^{\circ}\angle 85^{\circ}$ 裂隙控制
K2	552	L2洼地东侧底部	1~2	2~3	>3	长轴方向 60°
K3	578	L3洼地南侧底部	0.6	5	>1	被填埋
K4	585	L4洼地南侧底部	—	—	>20	被填埋
K5	586	L4洼地北侧底部	2	3	>2	长轴方向 20°
K6	558	L8洼地东南侧底部	2	2	>1.5	长轴方向 60°
K12	457	L12洼地东侧底部	—	—	>2	被填埋
K31	414	L12洼地底部	2	—	>6	—
K32	449	L12洼地西北侧底部	5	—	8	受 $340^{\circ}\angle 80^{\circ}$ 裂隙控制
K33	449	L12洼地西北侧底部	0.3	—	不详	—
K36	302	L15洼地北侧	—	—	—	—
K37	295	L14洼地西侧底部	2.2	0.3	不详	沿 $317^{\circ}\angle 15^{\circ}$ 岩层面发育
K38	290	L14洼地西侧底部	1.8	0.4	不详	裂隙控制
K44	530	L5洼地东北侧底部	3	—	10	—
K46	556.6	L5洼地东北侧底部	2.5	1.3	5	受岩层面控制
K47	528	L5洼地北侧底部	1	4	>10	沿 330° 裂隙垂向发育
K48	534	L5洼地中部	1.8	3.8	不详	沿 310° 裂隙垂向发育
K49	543.1	L5洼地西侧底部	1.8	1.8	不详	沿 290° 裂隙垂向发育

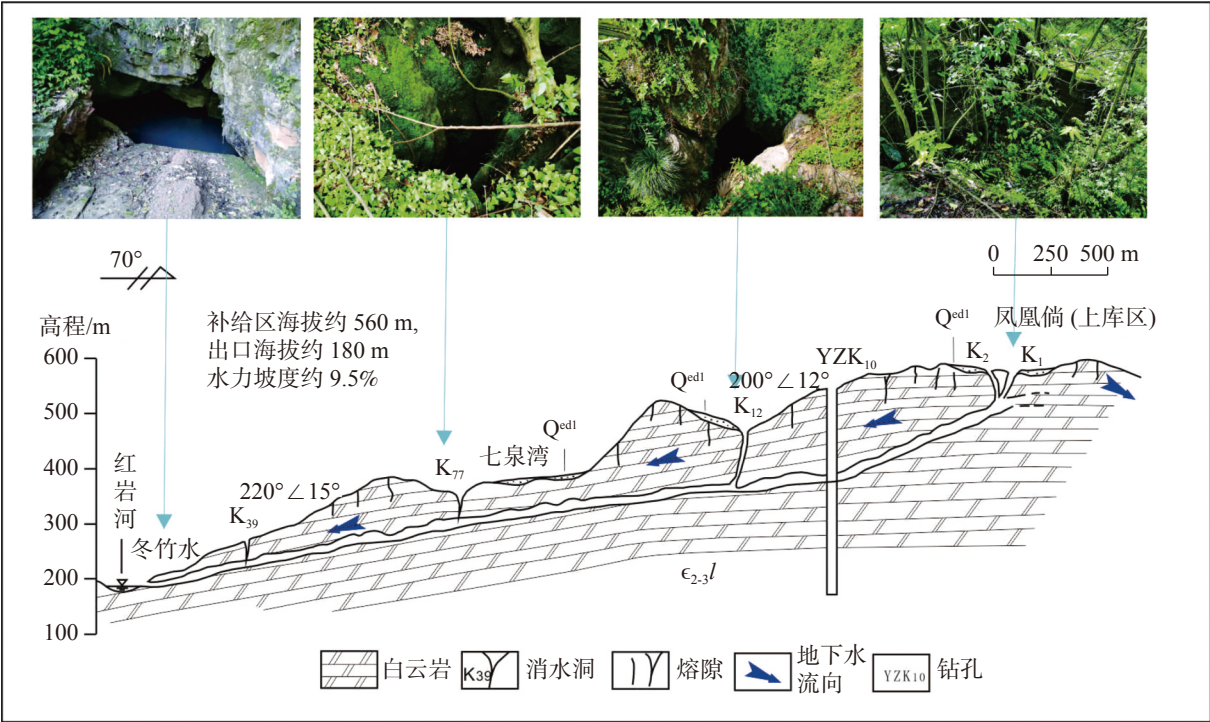


图 5 冬竹水地下河系统剖面图

Fig. 5 Cross section of the Dongzhushui underground river system

育L16、L13、L12、L3、L2、L1等6处岩溶洼地,洼地底部高程呈阶梯状上升,且这些洼地底部都发育了规模不一的落水洞(K39、K77、K12、K3、K2、K1),由此基本确立了地下河系统的补径排分区,即SK9为地下河出口,上库区L1及L2洼地为补给区。

2.4 高精度示踪试验法

地下水示踪试验是在地下水系统的某个部位投放相关的示踪剂,并在预期可能到达的部位进行接收检测,综合分析和评价场区的水力联系的探测方法,目前在岩溶区应用最广的是荧光试剂结合高精度自动化监测的方法手段。

为验证以上推测,本次研究利用高精度示踪试验进行检验,以此证明冬竹水地下河系统的空间分布特征。监测仪器使用自动化荧光光度计(瑞士,

GGUN-FL30,精度可达 $0.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),试验监测时间步长设为120 s,示踪剂选取荧光素钠($\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{Na}_2\text{O}_5$),投放点为凤凰塙落水洞K1,接收点为冬竹水地下河出口SK9和红岩河左岸W30泉(图1)。

从图6a.可以看出,荧光素钠的浓度变化曲线呈现出三个明显特征:一是呈单峰状;二是峰值陡升陡降,没有明显的浓度平缓区域;三是回收率高达73.42%。以上三个特征可以说明,凤凰塙K1落水洞与冬竹水地下河出口SK9是连通的,二者分属地下河系统的补给和排泄区;冬竹水地下河系统的管道具有单支管道状结构特征,即地下河系统主要由一条较大的主管道构成,峰值陡升陡降且没有明显浓度平缓区,反映出地下系统内没有发育空间规模较大的储水溶潭或水力坡度平缓的廊道。

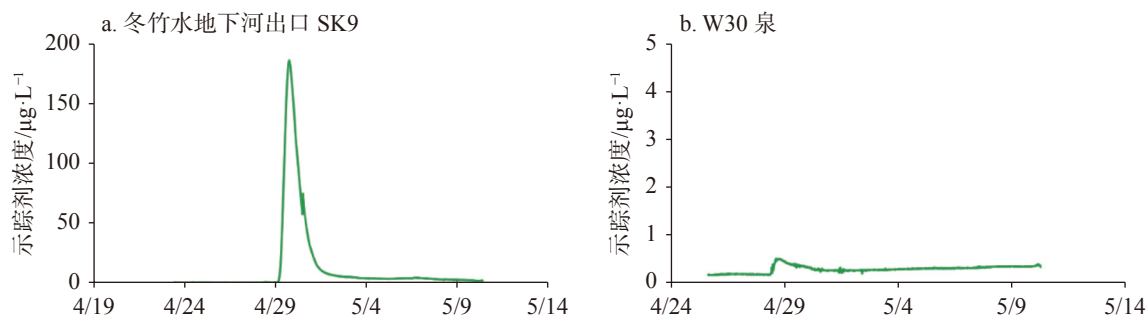


图6 示踪剂浓度曲线图

Fig. 6 Tracer concentration curve

从图6b.可以看出,荧光素钠的浓度变化曲线整体变化不明显,且维持在极低值,这说明凤凰塙落水洞K1与W30泉不存在明显水力联系,即佐证了冬竹水地下河系统在子良坪背斜控制下整体沿东西向发育,地下水未向北部红岩河谷方向径流排泄。

2.5 钻探及物探验证

根据钻孔资料,上库区25个钻孔中共7个钻孔钻遇21段岩溶洞穴(图7,表4),钻孔遇洞率28%,其余钻孔未见明显洞穴发育,平均线岩溶率为4.50%,岩溶发育强度随深度增加而逐渐减弱,揭露的溶洞发育深度都在50 m以浅,10~30 m深度范围内最为集中,属强岩溶发育带。但由于钻孔深度均小于82 m,即钻孔揭露的溶洞多位于表层岩溶带内,钻探数据对于水平径流带岩溶发育特征揭示不足。

根据瞬变电磁法勘探结果,上库区布置的7条物探剖面上共发现21处溶蚀发育区。地形上看,溶

蚀发育区多位于洼地底部或近底部的山坡处,溶丘高部位地区较少分布,说明在洼地地势低部位处岩溶发育程度更高;平面上看,溶蚀发育区的展布与洼地轴部发育方向基本吻合,说明控制洼地形成的次级断裂,同样对岩溶的发育起着重要影响作用;近东西向分布的洼地、落水洞及溶蚀发育区共同佐证了该地区岩溶地下河管道的存在。

3 岩溶水系统分析评价

通过岩溶水系统多元信息识别法,查明了冬竹水地下河系统的结构及空间分布特征,在此基础上综合分析归纳岩溶水系统特征,以形成总体的认识。

3.1 系统边界条件

冬竹水地下河系统流域面积约 3.7 km^2 ,形态为

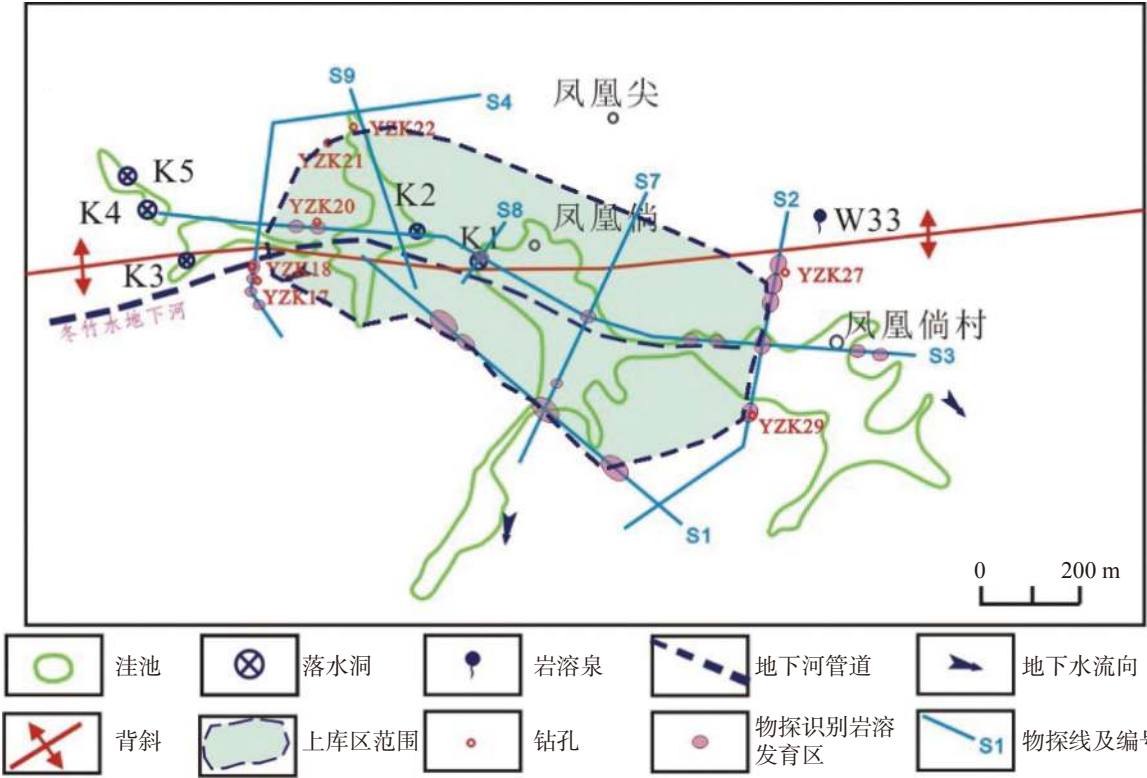


图 7 上库区部分钻孔及物探工作布置图

Fig. 7 Layout of boreholes and geophysical exploration in the upper reservoir area

表 4 上库区钻遇溶洞钻孔统计表

Table 4 Statistics of boreholes in karst caves in the upper reservoir area

位置	孔号	钻孔高程/m	孔深/m	溶洞距孔口深度/m	溶洞底部高程/m
1#副坝	YZK27	604.87	60.7	6.9~7.9	596.97
				9.4~15.5	590.51
	YZK29	606.01	81.8	18.0~23.5	582.51
				29.7~34.5	571.51
				43.8~46.0	560.01
2#副坝	YZK21	586.46	60.3	8.6~10.0	576.46
				4.4~7.0	557.67
	YZK22	564.67	50.8	7.6~9.2	555.47
				10.4~13.5	551.17
				15.2~18.8	545.87
3#副坝	YZK17	621.54	60.4	21.1~27.4	537.27
				5.0~7.8	613.74
				10.0~11.9	609.64
	YZK18	609.76	50.2	16.4~17.6	603.94
				3.7~5.0	604.76
库盆	YZK20	575.04	40.2	16.0~21.1	588.66
				30.4~31.0	578.76
				32.3~33.3	576.46
				34.8~37.3	572.46
				3.4~8.0	567.04
				16.0~22.6	552.44

NE-SW向长条状。补给区高程为550~600 m,径流-排泄区高程为180~350 m,根据岩性特征和地下水赋存形式,地下水主要为碳酸盐类岩溶水,其含水介质组合类型为裂隙-溶洞水,富水性中等,透水性较强。系统东部以凤凰淌洼地东部垭口及地表分水岭为界;南北两侧受子良坪背斜控制,基本上以局部地表分水岭为界,辅以岩溶负地形的发育分析,系统边界大体控制在主管道两侧300~500 m范围内,边界以外地下水以裂隙流形式分散排泄进入红岩河和流水,沿河谷发育多处岩溶泉;西部以红岩河谷为界,冬竹水地下河出口为系统唯一集中排泄点。

3.2 含水系统与水循环

整个系统都发育在中上寒武统娄山关组($C_{2,3}I$)中厚层白云岩内,含水层组单一,无明显隔水层及阻水构造。补给区位于凤凰淌洼地及附近山丘,为该区域海拔最高处,岩溶地下水补给以地表径流汇流后通过垂向发育的落水洞及岩溶裂隙进行集中补给为主,如凤凰淌K1、K2、K3落水洞等,这些落水洞主要为雨季消水,洞口均可见明显地表水流入痕迹,K1—地下河出口的示踪试验直接证明了两个地区的水力联系;径流区主要位于毛家淌、白杨湾、金竹岭、七湾泉村一带,其中毛家淌、白杨湾洼地内,雨季有地表径流,岩溶洼地、落水洞发育,如毛家淌K13落水洞、白杨湾落水洞等,地下水埋深较大,地下水位埋深大于50 m,地下水整体由北东向南西径流,管道结构单一,不存在大型地下溶潭;排泄区位于朱家坡一带,集中排泄岩溶水点主要为冬竹水地下河出口,流量范围为 $20\sim 200\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,岩溶水出露后均汇红岩河,水力坡度为9.5%。

3.3 岩溶环境 with 问题评价

上库库盆由两个溶蚀洼地组成,库周山包相连形成4个低矮垭口,垭口高程均低于正常蓄水位,需修筑挡水坝以形成封闭库盆,根据钻探资料揭示,上水库各分水岭及库底水位埋深较深,均低于设计正常蓄水位,库区正好位于地下河系统补给区内,落水洞及溶蚀沟槽等岩溶现象极为发育,岩体透水率受岩溶发育强度、构造发育程度、岩体完整性及岩体风化卸荷程度控制,不同部位差异巨大,具有很大的渗漏风险。

地下河系统范围内溶蚀洼地、漏斗、落水洞比比

皆是,共发育洼地11个,平均密度 $2.75\text{ 个}\cdot\text{km}^{-2}$,洼地大小一般 $80\text{ m}\times 150\text{ m}$,最大 $400\text{ m}\times 500\text{ m}$,从长冲淌—毛家淌3 km距离内,发育落水洞14个,线性密度 $4.66\text{ 个}\cdot\text{km}^{-2}$ 。与之对比,子良坪背斜北翼即系统范围外溶蚀洼地、漏斗、落水洞发育寥寥无几。总体而言,背斜轴部岩溶发育强烈,翼部岩溶发育较弱,这是由其内部低序次、低等级断裂构造决定的,背斜轴部二次纵张和横张裂隙发育程度远高于翼部,为水体流动溶蚀提供了良好的运移空间,是库区最需要注意的岩溶渗漏通道。

本区经历了多期构造变动,在燕山运动后,鄂西地区一直处于大面积的间歇性隆升之中,岩溶在垂向上的分布和发育多集中在一定的剥夷面上,本区落水洞、洼地分布于高程200~580 m,又可大致分为200~330 m,400~500 m,500~580 m三个海拔区间(图8),说明该地区至少经历了三期剥夷作用,岩溶发育深度也受控于剥夷作用的时间和强度。当前期次的溶蚀作用仍在不断进行中,因此需要注意水库蓄水后,深部岩溶的发展演化趋势,要充分考虑深部含水层结构变化可能导致的上部形变问题,避免库底因岩溶发育出现不均匀沉降和岩溶塌陷等地质灾害,从而影响工程安全运行。

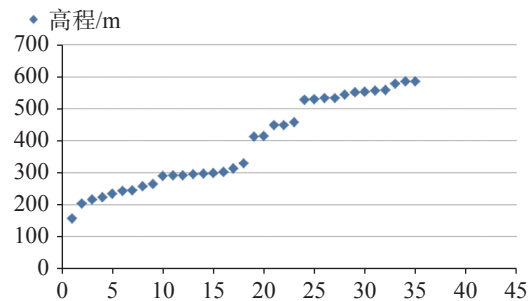


图8 研究区不同高程落水洞分布情况

Fig. 8 Distribution of sinkholes at different elevations in the study area

4 结 论

(1)子良坪背斜核部垂直方向,均为娄山组白云岩地层,即冬竹水地下河系统不存在底板隔水层,垂向溶蚀作用强烈,自上而下为具多层洞穴的岩溶含水层,0~50 m属于强岩溶发育带,库内岩溶垂向渗漏问题突出,建议进行库底土工膜全库盆防渗处理。

(2)沿背斜轴部发育的大量垂向裂缝,为地下水的流动提供良好的运移通道,控制了地下岩溶管道自北东-南西向的展布特征,即上库区附近北东-南西向为岩溶集中发育方向,上库区向南西侧发生管道式渗漏的风险大,向北侧及南侧发生管道式渗漏的可能性小,后期工程施工中应重点关注并区别处理。

(3)上库区凤凰洼地内垂直型溶蚀裂隙和落水洞发育,洼地底部基岩面地形起伏大,库盆施工时易出现回填层厚度不均和填料压实度差异等问题,加之后期深部岩溶的发展演化,工程蓄水后应防范可能发生的不均匀沉降和岩溶塌陷问题。

参考文献

- [1] 黄钰铃,惠二青,员学锋,李靖.西南地区水资源可持续开发与利用[J].水资源与水工程学报,2005,16(2):46-54.
HUANG Yuling, HUI Erqing, YUAN Xuefeng, LI Jing. Sustainable exploitation and utilization of water resources in Southwest China[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2005, 16(2): 46-54.
- [2] 赵瑞,许模.水库岩溶渗漏及防渗研究综述[J].地下水,2011,33(2):20-22.
ZHAO Rui, XU Mo. Summary on reservoir karst seepage and anti-seepage research[J]. Ground Water, 2011, 33(2): 20-22.
- [3] 罗明明,周宏,郭绪磊,陈乾龙,齐凌轩,况野.峡口隧道间歇性岩溶涌突水过程及来源解析[J].地质科技通报,2021,40(6):246-254.
LUO Mingming, ZHOU Hong, GUO Xulei, CHEN Qianlong, QI Lingxuan, KUANG Ye. Processes and sources identification of intermittent karst water inrush in Xiakou Tunnel[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(6): 246-254.
- [4] 罗明明,黄荷,尹德超,周宏,陈植华.基于水化学和氢氧同位素的峡口隧道涌水来源识别[J].水文地质工程地质,2015,42(1):7-13.
LUO Mingming, HUANG He, YIN Dechao, ZHOU Hong, CHEN Zhihua. Source identification of water inrush in the Xiakou tunnel based on hydrochemistry and hydrogen-oxygen isotopes[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(1): 7-13.
- [5] 颜慧明,常威,季怀松,邓争荣,郭绪磊,陈林,黄琨.黄陵背斜东北翼岩溶水系统特征及其对引调水隧洞工程的影响[J].地质科技通报,2022,41(5):315-323.
YAN Huiming, CHANG Wei, JI Huaisong, DENG Zhengrong, GUO Xulei, CHEN Lin, HUANG Kun. Characteristics of the karst water system on the northeast wing of the Huangling anticline and its impact on water diversion tunnel engineering[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(5): 315-323.
- [6] 任亚楠,万军伟,黄琨,何欣慧.云南万寿山地区岩溶水系统特征及隧道选线研究[J].中国岩溶,2020,39(4):604-613.
REN Yanan, WAN Junwei, HUANG Kun, HE Xinhui. Study on the characteristics of karst water system and tunnel route selection in Wanshoushan area, Yunnan Province[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 604-613.
- [7] 王泽君,周宏,齐凌轩,王纪元,燕子琪.岩溶水系统结构和水文响应机制的定量识别方法:以三峡鱼迷岩溶水系统为例[J].地球科学,2020,45(12):4512-4523.
WANG Zejun, ZHOU Hong, QI Lingxuan, WANG Jiyuan, YAN Ziqi. Method for characterizing structure and hydrological response in karst water systems: A case study in Y-M System in Three Gorges Area[J]. Earth Science, 2020, 45(12): 4512-4523.
- [8] 于斯遥,秦梓萱,杨艳娜,毛唯娜,郝朝,许模,刘洋.明月峡背斜南部张关-排花洞岩溶水系统地下水径流模式解析[J].中国岩溶,2022,41(4):599-609.
YU Siyao, QIN Zixuan, YANG Yanna, MAO Weina, HAO Chao, XU Mo, LIU Yang. Analysis of groundwater runoff patterns in Zhangguan-Paihuadong karst water system in the south of the Mingyue gorge anticline[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(4): 599-609.
- [9] 颜慧明,常威,郭绪磊,邓争荣,黄琨.岩溶水流系统识别方法及其在引调水工程隧洞选线中的应用[J].地质科技通报,2022,41(1):127-136.
YAN Huiming, CHANG Wei, GUO Xulei, DENG Zhengrong, HUANG Kun. Identification of the karst water flow system and its application in the tunnel line selection of water diversion projects[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(1): 127-136.
- [10] 翟虎威,胡晓兵,张凯,马永明,高旭波,靳建红.基于同位素指示的辛安泉域岩溶水系统识别[J/OL].中国岩溶,1-13.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20230203.1754.001.html>.
ZHAI Huwei, HU Xiaobing, ZHANG Kai, MA Yongming, GAO Xubo, JIN Jianhong. Identification of karst water system in Xin'an Spring area by isotope method[J/OL]. Carsologica Sinica, 1-13. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20230203.1754.001.html>.
- [11] 吴继文,吴亮君,吕勇,王璞珺,周嘉铭,林宇,潘明,廖家飞,孟庆鑫.云南泸水市压扭性构造对银厂坪白云岩岩溶系统发育控制作用[J].中国岩溶,2021,40(5):793-804.
WU Jiwen, WU Liangjun, LV Yong, WANG Pujun, ZHOU Jiaming, LIN Yu, PAN Ming, LIAO Jiafei, MENG Qingxin. Transpressional structure and its control on development of Yinchangping dolomite karst system in Lushui City, Yunnan[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(5): 793-804.
- [12] 郭娣,许模.西南地区紧密背斜岩溶地下水赋存与运移特征[J].四川地质学报,2009,29(1):66-69.
GUO Di, XU Mo. Characteristics of occurrence and migration of karst groundwater in tight anticline in Southwest China[J]. Sichuan Geological Journal, 2009, 29(1): 66-69.

- [13] 王宇. 岩溶高原地下水径流系统垂向分带[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 1-8.
WANG Yu. Vertical zoning of groundwater runoff system in karst plateau[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 1-8.
- [14] 张海坦, 李庆华, 黄永泽, 邓书金, 姚万林. 歌乐山地区岩溶发育特征[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(Supp.1): 347-351.
ZHANG Haitan, LI Qinghua, HUANG Yongze, DENG Shujin, YAO Wanlin. Characteristics of karst development in Gele mountain area, Chongqing[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(Supp.1): 347-351.
- [15] 李芳涛, 李华明, 胡志平, 陈南南, 晏长根. 峨汉高速廖山隧道岩溶发育规律及其工程效应浅析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 592-603.
LI Fangtao, LI Huaming, HU Zhiping, CHEN Nannan, YAN Changgen. Features of karst development and geotechnical effects in the Liaoshan tunnel on the E-Han expressway[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(4): 592-603.
- [16] 曹贤发, 刘玉康, 刘之葵, 张炳晖. 基于强溶蚀带特征的地基岩溶发育程度评价方法[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 577-583.
CAO Xianfa, LIU Yukang, LIU Zhikui, ZHANG Binghui. Evaluation method of development degree based on features of intense dissolution layer[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(4): 577-583.
- [17] 王宇, 王梓澈. 岩溶地下水富集的地貌组合形态[J]. 中国岩溶, 2015, 34(4): 314-324.
WANG Yu, WANG Ziwei. Patterns of karst geomorphologic combinations in areas with rich groundwater[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(4): 314-324.

Comprehensive analysis and evaluation of the multi-information on the underground river system in construction of a pumped-storage hydropower station in Hubei

CAO Jianwen^{1,2}, YANG Haiyang³, WANG Zhe^{1,2}, ZHAO Liangjie^{1,2},
LIN Yushan^{1,2}, LUAN Song^{1,2}, LI Lujuan^{1,2}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/ International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China; 3. Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha, Hunan 410014, China)

Abstract China is steadfast in promoting green and low-carbon energy transformation. Playing a pivotal role in the power industry, hydropower is at the forefront of energy transformation. Developing hydropower has always been an important strategic policy for China's energy and electricity industry. The southwest area, a main karst distribution region, is mostly concentrated with water energy resources in China. With the rapid development of water conservancy and hydropower construction, reservoir engineering in karst areas is often constructed. The characteristics of karst development are hydrogeological conditions that must be identified in the construction of hydropower projects in karst areas. What's more solving the problem of karst leakage is the key to the success of engineering construction. A pumped-storage power station in Hubei Province is prone to serious karst leakage because its upper reservoir is located in the karst depression and the boundaries, where conditions of the groundwater system are not clear. Taking the upper reservoir of the power station as a research object, this study integrates different technical methods such as regional structural analysis, identification of geomorphic causes, tracing of underground rivers and micro-dynamic automation monitoring to extract multi-information for effective identification of the underground river system in the engineering area and to conduct a comprehensive analysis of the impact mechanism of karst development on the engineering.

Firstly, geological structures control the formation and movement of groundwater, as well as the direction and pattern of karst development. On the one hand, under the transformation of neotectonic movements, karst development in the study area has typical characteristics of vertical zoning, with surface karst zones, vertical karst development zones, and horizontal runoff zones developed from top to bottom. On the other hand, the secondary tension fractures at the turning point of the anticline provide space for groundwater to migrate in depth, and the wide and gentle distribution of strata at the same place increases the catchment area of groundwater. These two actions jointly provide conditions for the development of karst pipelines along the axis of the anticline. Secondly, the regional terrain and topography can roughly reflect the movement trend and direction of groundwater. Especially, the form, quantity, and

scale of karst negative landforms are important bases for characterizing the development of underground karst. Through ground investigation and tracing, the distribution characteristics of underground karst pipelines can be basically obtained. Finally, the boundary and structural characteristics of the underground river system can be further clarified through high-precision tracing experiments, drilling, and verification of geophysical exploration.

The analysis results indicate, (1) There are no aquitards or water blocking structures around the upper reservoir. The vertical and secondary fractures with tensile properties in the axis of the Ziliangping anticline control the basic pattern of the groundwater system, and the secondary cracks generated in the axis of the anticline play a dominant role in karst development. (2) The upper reservoir is located in the supply area of the Dongzhushui underground river system, and the permeability rate of the rock mass is controlled by the strength of karst development, the degree of structural development, the integrity of the rock mass, and the degree of weathering and unloading of the rock mass. There are significant differences in different parts, with a high risk of leakage. (3) The karst pipeline in a structure of the single-pipe shape is not subject to the development of large-scale karst ponds. The north-south karst pipeline is not developed, and there is a risk of pipeline leakage towards the southwest side of the upper reservoir. (4) The reservoir area has undergone at least three stages of denudation, and the current stage of dissolution is still ongoing. The development and evolution of deep karst can lead to deformation in the overlying strata. After the engineering water storage, it is necessary to prevent potential uneven settlement and karst collapse. By comprehensively analyzing and evaluating multi-information of the underground river system, people can accurately identify the boundary and structural characteristics of the karst water system in the reservoir area, providing a scientific basis for the project construction of the reservoir area as well as reference for the site selection of reservoir in other karst areas.

Key words karst, leakage in the reservoir area, underground river system, identification, multi-information

(编辑 杨杨张玲)

2022 年我国地质灾害灾情及防治情况

2022 年共发生地质灾害 5 659 起, 其中滑坡 3 919 起, 崩塌 1 366 起、泥石流 202 起, 地面塌陷 153 起、地裂缝 4 起、地面沉降 15 起。共造成 90 人死亡、16 人失踪、34 人受伤, 直接经济损失 15.0 亿元。

全国各级自然资源主管部门共派出专家及技术

人员 90.2 万余人次, 排查巡查隐患点 309.8 万余处次 (重复计数), 紧急处置各类地质灾害隐情或隐患 14 237 处。

全国共成功预报地质灾害 321 起, 涉及可能伤亡人员 7 226 人, 避免直接经济损失 6.0 亿元。

——据《2022 年中国自然资源统计公报》