

• 地质与勘测 •

喀斯特地下水系统分析方法 在场地适宜性评估工作中的应用

朱永清, 张秀宏, 杨进军

(中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 某县城坐落于二叠系下统茅口组厚层灰岩上, 喀斯特发育, 属复杂喀斯特场地。在建设适宜性评估勘察中应用地下水系统分析方法, 解决了复杂喀斯特场地适宜性分区问题, 并作出了客观评价。

关键词: 地质学; 喀斯特; 地下水系统分析方法; 适宜性; 评估工作

中图分类号: TU195⁺.1; P641.2

文献标志码: B

文章编号: 1007-0133(2012)02-0016-05

0 引言

贵州某县城位于喀斯特汇水构造排泄区, 地下水埋深浅, 地下喀斯特管道、暗河极为发育, 喀斯特形态纵横交织, 县城附近喀斯特泉、喀斯特潭分布较多, 有“百泉之城”的美称。

过去在进行城市建设时, 由于对地下喀斯特水系统认识不足, 未能充分重视工程建设对地下水的影响, 曾因工程建设导致廻龙潭、四方井等泉水点流量锐减, 致使自来水厂不得不重新选择水源点, 同时已开工项目不得不调整工程建设方案。除此以外, 由于原来畅通的喀斯特管道被堵塞, 地下水排泄受阻, 地下水雍高, 其潜蚀、顶托及冲刷作用引起地表局部塌陷等地质灾害, 危害居民生命财产安全, 给地方经济建设造成不良影响。

本文采用地下水系统分析方法对县城地下水系统进行归纳, 确定了场区地下喀斯特管道的主要发育方向, 对场地进行了适宜性分区, 作出了相对客观的评价, 为当地城镇规划及基础设施建设提供了重要的指导作用, 发挥了显著的社会效益。

1 基本地质条件

研究区地势南西高、北东低, 以南西面分水岭中新寨大山为最高, 海拔 2 165 m, 北东面六冲河河面为最低, 海拔 940 m 左右, 其间发育娄山关期、山盆期及乌江期等 3 级夷平面。娄山关期夷平面高程 2 000 ~ 2 200 m; 山盆期夷平面高程为 1 250 ~ 1 800 m, 分为 2 个亚期, 一亚期高程为 1 700 ~ 1 800 m, 二亚期高程为 1 250 ~ 1 500 m; 地貌发育进入乌江期后, 区内主要干流(如六冲河)河谷从 1 250 m 附近下切, 最大切深达 200 余 m。工程区地貌成形于山盆二期, 为一溶蚀盆地, 盆地内广泛

分布第四系冲积与残坡积物等。织金小河及其支流化跨河及贯城河切割了山盆二期形成的盆地, 切割深度为 3 ~ 8 m, 现河床或岸边局部仍有基岩出露。

涉及的地层有梁山组(P_1L)石英砂岩与炭质页岩; 栖霞组(P_1q)深灰色燧石灰岩、灰岩; 茅口组(P_1m)灰岩、白云岩及白云质灰岩; 龙潭组(P_2L)黏土岩、凝灰质黏土岩、粉砂岩及炭质页岩含煤 9 ~ 82 层; 长兴大隆组($P_2c + d$)灰岩、泥灰岩及粉砂岩与页岩; 夜郎组(T_1y)泥岩、粉砂质泥岩、灰岩、泥灰岩、粉砂质泥岩; 永宁镇组(T_{1yn})中至厚层灰岩、薄至中厚层泥岩、灰岩、泥灰岩、中至厚层溶塌角砾岩、中至厚层泥质白云岩。

区内主要断层有鼠场断层: 位于县城北西侧, 压性逆断层, 区内长 28 km, 走向 $N60^\circ \sim 70^\circ E$, 倾 SE, 倾角 $70^\circ \sim 80^\circ$, 切错 P、T 地层; 化落断层: 位于县场南西侧, 压性逆断层, 区内长 28 km, 走向 $N60^\circ E$, 倾 SE, 倾角 80° , 切错 P、Z 地层。

区内主要褶皱有后寨向斜: 轴向为 $N40^\circ \sim 60^\circ E$, 延伸长度大于 28 km, 南西被断层切错, 向斜核部由石炭系马平群 ~ 摆佐组地层组成, 两翼由二叠系下统栖霞组及茅口组组成, 轴部紧闭, 两翼地层倾角稍陡, 一般 $30^\circ \sim 60^\circ$ 左右; 八步向斜: 轴向为 $N40^\circ E$, 轴面略倾北西, 延伸长度大于 24 km。向斜核部为三叠系下统夜郎组及永宁镇组地层, 两翼分别为二叠系上统长兴组、大隆组及龙潭组地层构成, 向斜轴部宽缓, 两翼地层倾角较缓, 一般 $5^\circ \sim 20^\circ$; 地贵背斜: 轴向为 $N40^\circ E$, 延伸长度大于 32 km, 背斜核部由二叠系下统栖霞组及茅

收稿日期: 2011-11-16

作者简介: 朱永清(1976—), 男, 贵州省晴隆县人, 高级工程师, 从事水利水电工程地质勘察及项目管理工作。

口组地层构成,栖霞组地层在核部不连续出露,两翼由龙潭组地层构成,向斜轴部宽缓,两翼地层倾角较缓,一般 20° 左右;珠藏向斜:轴部位于县城南东侧,向斜轴部宽缓,岩层产状较平缓。县城的贯城河位于向斜SE翼,两岸岩层总体倾向W,产状 $N30^{\circ}\sim 50^{\circ}E$, $NW\angle 7^{\circ}\sim 22^{\circ}$,或 $N35^{\circ}W$, $SW\angle 5^{\circ}\sim 31^{\circ}$ 。

2 喀斯特水文地质特点

2.1 水文地质

工程区地下水以喀斯特水为主,主要喀斯特大泉有12个,其中县城内有冒沙井、四方井、廻龙潭、双龙潭、瓦窑龙潭、龙王庙潭等6个大泉,其特征详见表1。

表1 主要喀斯特大泉特征汇总

喀斯特大泉名称(编号)	位置	出口高程/m	出露地层	流量/($L\cdot s^{-1}$)	原流量/($L\cdot s^{-1}$)
冒沙井(S8)	贯城河左岸	1306.56	P_1m+q	0~50	—
四方井(S4)		1303.18	P_1m+q	10~30	—
廻龙潭(S5)	贯城河右岸	1299.58	P_1m+q	13~35	424
瓦窑龙潭(S2)		1305.97	P_1m+q	40~340	—
龙王庙潭(S1)		1304.52	P_1m+q	90~285	—
双龙潭(S3)		1301.11	P_1m+q	240~460	200
龙洞潭(S7)		1303.90	P_1m+q	10~30	—
金龙潭(S25)	鱼井小河右岸	1310.00	P_1m+q	169	—
蓝龙潭(S33)		1310.50	P_1m+q	30	—
响龙潭(S18)	化跨河左岸	1308.00	P_1m+q	440~1110	—
应龙潭(S19)	化跨河右岸	1309.00	P_1m+q	120~550	—
谢家桥(S209)	纳弓河源头	1280.00	P_1m+q	132	—

工程区北部的六冲河是本区最低排泄基准面,两岸地表、地下水流最终向六冲河河谷排泄;在分水岭地带,接受大气降水补给,以垂直运移形式补给地下水;在广阔的高原台面地区,为地下水的补给与径流区,地下水运动同时具有垂直和水平运动的特点。

区内各泉点汛期流量均有所增大。据调查自左岸廻龙潭、四方井流量变小后,右岸瓦窑龙潭、龙王庙潭及双龙潭流量均有所增加,左岸减少的流量与右岸增加的流量大致相当,说明左岸地下水经过地下管道跨越了贯城河自右岸排泄点流出。

2.2 喀斯特发育基本规律

(1) 岩性是喀斯特发育的基础,喀斯特因岩石化学成分、颗粒结构不同而有明显差异,纯灰岩分布的地段喀斯特较不纯灰岩分布区发育,生物碎屑结构较细晶结构发育,灰岩地层喀斯特较白云岩地层发育,碳酸盐岩厚度大时深部喀斯特发育。

(2) 构造是喀斯特发育的控制条件,主要表现在褶皱的紧密程度、断裂的力学属性、发育程度及构造的复合部分。区内紧密褶皱喀斯特发育相对较弱,而较开阔的褶皱利于喀斯特发育。张性、扭性断裂,尤其是其密集发育带,有利于喀斯特的发

育,常见有串珠状漏斗、喀斯特洼地、落水洞及地下河等。区内主要暗河发育方向与构造方向基本一致,多呈NNE向,主要是喀斯特管道、暗河顺构造发育的结果。另外喀斯特追踪横张与纵张优势裂隙、断层发育,形成呈近南北向的网状管道。区域构造控制喀斯特发育的另一特点是主要暗河或喀斯特管道几乎不跨越北东向断裂发育,说明该方向压扭性断裂具有较好的阻水性。

(3) 水动力作用是喀斯特发育的重要影响因素。贯城河左岸地势高,地下水循环交替强烈,水力坡度较大,水流动速度相对较快,喀斯特发育也相对较强烈,洼地、落水洞及伏流暗河多。远离河谷的分水岭地区,地下水垂直方向渗流的力度较大,因此多喀斯特洼地、落水洞和暗河伏流进口,洼地规模较大,长度可达 $0.3\sim 0.6$ km。近河岸坡地区洼地较少,多为陡倾溶隙、溶缝及竖管状溶洞。

3 喀斯特水系统划分及其特点

3.1 喀斯特含水系统

同一喀斯特含水层具有统一水力联系的喀斯特含水空间,或不同喀斯特含水层构成,因构造原因

仍具有统一水力联系的喀斯特含水空间,均称为喀斯特含水系统。工程区附近包括珠藏向斜、八步向斜等多个喀斯特含水系统,其中与工程区密切相关的为珠藏向斜地下水含水系统,其特征简述如下:

珠藏向斜地下水含水系统边界条件较简单,含水层由珠藏向斜核部的 P_{1m} 及 P_{1q} 灰岩构成, P_{1q} 底部灰岩夹炭质页岩及 P_{1L} 石英砂岩、炭质页岩及泥岩为底部隔水边界;北侧因鼠场断层切错, P_{2L} 泥页岩沿织金小河附近出露, P_{2L} 泥页岩出露高程低,切断了该含水层继续向北运移排泄的通道,因此, P_{2L} 泥页岩作为珠藏向斜含水系统的北部边界;含水系统西边界位于地贵向斜附近,因背斜隆起, P_{1L} 石英砂岩、炭质页岩及泥岩有阻隔作用,限制了地贵向斜西侧含水层与东侧含水层的联系;含水系统东边界沿化落断层附近的 P_{1L} 地层展布;南侧边界延伸至分水岭附近。

珠藏喀斯特含水系统内喀斯特强烈发育,喀斯特地貌以峰丛洼地、落水洞及地下暗河等喀斯特形态分布较多。在大新桥、独店子、河坝、洛丫口一

带,地表水由落水洞潜入地下 P_{1m} 含水层中,形成断头河,断头河长 1~7 km 不等,其出口多在低高程的化垮河、贯城河及纳弓河及支流地势较低处流出。喀斯特发育受地质构造控制明显,地下暗河多为 SW~NE 向,地下水总体流向为由 SW 向 NE,但 NW、SE 向地下水亦向县城附近槽谷排泄。

据区域水文地质资料, $P_{1q}+m$ 灰岩枯期地下径流模数一般为 $3.91 \sim 12.63 \text{ L/s} \cdot \text{km}^2$, 平均值 $7.46 \text{ L/s} \cdot \text{km}^2$ 。珠藏喀斯特含水系统 $P_{1q}+m$ 灰岩出露面积 240 km^2 左右,枯期流量总计 1500 L/s 左右,据此计算其枯期径流在 $6.25 \text{ L/s} \cdot \text{km}^2$,与区域地质资料数据基本吻合。

3.2 喀斯特地下水流动系统

地下水流动系统是指由源到汇的流面群构成,具有统一时空演变过程的地下水水体。

根据以上定义,珠藏向斜喀斯特含水系统发育多个流动系统,主要包括县城泉群、金鱼池、响水潭、应龙潭、谢家桥及龙洞等地下水流动系统,与本工程关系密切是县城流动系统,如图1所示。

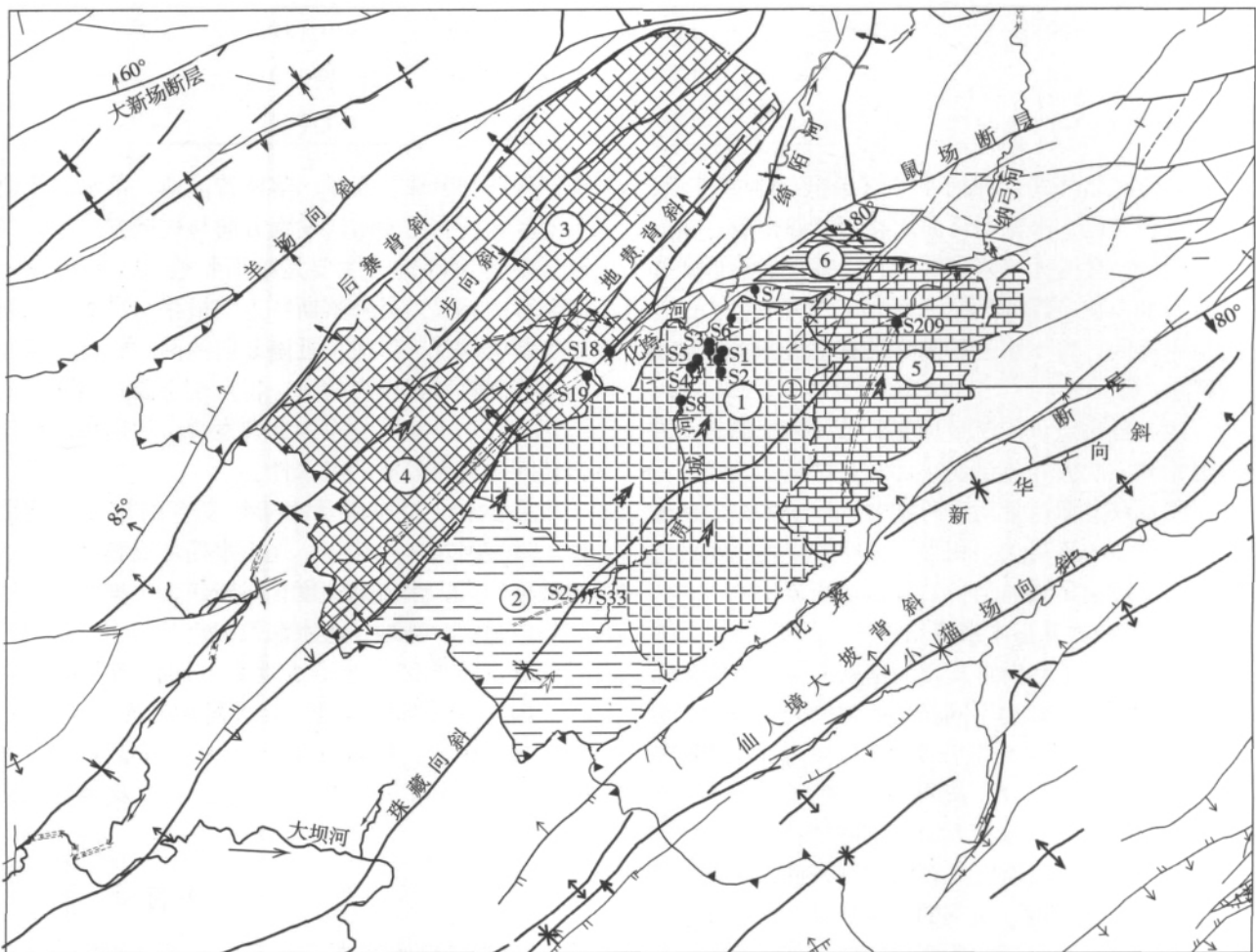


图1 某县城喀斯特地下水流动系统分布示意图

各流动系统出露面积与枯期径流计算值与实测值统计见表2,各系统排泄量实测值与计算值基本吻合。

表2 喀斯特地下水流动系统主要参数

名称及编号	出露面积 /km ²	流量/(L·s ⁻¹)		
		计算值	实测值	误差/%
县城泉群地下水流动系统①	56.6	412	430	0.04
金鱼池地下水流动系统②	31.7	236	198	0.16
响水潭地下水流动系统③	66.0	492	440	0.11
应龙潭地下水流动系统④	30.7	229	207	0.10
谢家桥地下水流动系统⑤	27.9	207	182	0.12

县城泉群地下水流动系统下部以P₁L泥页岩隔水层作为边界,左岸边界至地形分水岭,右岸分别至地形分水岭及P₁L泥页岩边界附近,与上游金鱼池流动系统(S25)边界在白虎山、苗寨一带,与地表分水岭吻合。该系统地下水与地表水之间存在密切的水力联系,河水对地下水的补给使泉流量有所增加。该系统位于县城附近,排泄点主要位于贯城河两岸,左岸自南向北主要有冒沙井、四方井及迴龙潭等,右岸自南向北主要有瓦窑龙潭、龙王庙潭及双龙潭等,详见图2。

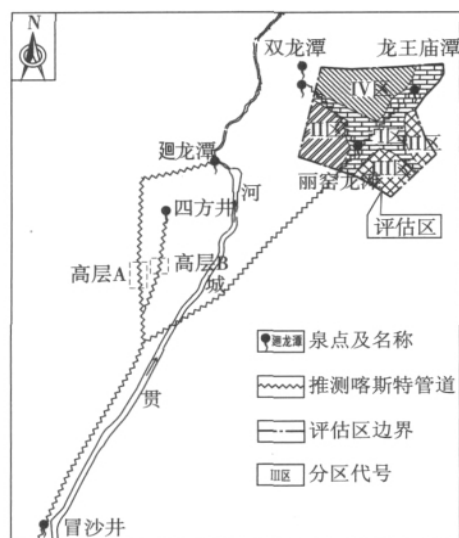


图2 某县城泉群流动系统主要排泄点分布图

系统内泉水面自南向北、自东向西降低,泉水流量大小不一,总体上具有出口越低、流量越大的特征,汛期时流量有所增大。

系统内主要喀斯特管道主体顺喀斯特槽谷发育,延伸长度大于6 km,基本沿珠藏向斜核部或西翼分布,地形上为喀斯特峰丛洼地或喀斯特槽谷区,大型喀斯特洼地呈串珠状分布,多处有集中补给的明显进口,以喀斯特洼地的汇流补给为主。

冒沙井与双龙潭、瓦窑龙潭及龙王庙潭之间存

在一定的水力联系,通过喀斯特管道导通,从而将冒沙井系统与双堰塘系统连接成一个整体,当其中任何一个出口发生地下水流动阻塞时,原通过该管道排泄的地下水将向另一个出口排出,但地下水的排泄总量基本无变化。

据现场调查,迴龙潭原流量在424 L/s左右,其流量未变小之前,龙王庙潭、瓦窑龙潭枯期无水流出。自2008年迴龙潭水流量变小后,鱼山一带龙王庙潭、瓦窑龙潭及双龙潭的流量均变大,枯期仍保持较大流量。某高层建筑(高层B)桩基施工过程中龙王庙潭、瓦窑龙潭潭水曾变浑浊,说明龙王庙潭、瓦窑龙潭、双龙潭与四方井喀斯特管道系统之间存在着水力联系。

4 喀斯特场地建设适宜性分区与评价

4.1 工程场地喀斯特水文地质条件

工程场地位于属县城泉群地下水流动系统北东侧,位于贯城河右岸,地下水排泄出口较多,主要有瓦窑龙潭、黄泥龙潭(现已回填)、狗屎龙潭(现已回填)、小四方井、龙清寺潭、龙王庙潭及双龙潭等7个,连通试验及访问表明场地内排泄点之间存在密切的水力联系。

根据地下水流动系统划分及补给区的分布特征,场地NE、E及SE侧补给区面积较小,按枯期径流3.91~12.63 L/s·km²计算,径流量45~146.5 L/s,而龙王庙、瓦窑龙潭及双龙潭3个出口的枯期流量达370 L/s,远大于该区域最大径流量,说明场区主要补给区为贯城河左岸南侧及西侧的广大地区,从而决定了自南向北的喀斯特管道为该区的主管道,NE、E及SE侧喀斯特管道为场区分支管道,规模相对较小。

4.2 分区原则

根据工程区位置与地下水流动系统位置的关系,确定建设适宜性。

工程区在系统外部时,工程建设不会对系统造成影响。工程区位于地系统内部时,工程建设就可能破坏系统原有的平衡状态,系统将会调整达到新的平衡点,从而引起系统的变化或能量的释放。因此,工程区位于地系统内部时,工程场地分区就遵循如下原则:

(1) 地下水系统内部主要径流区是地下水集中流经区域,地下水活动强烈,地下水交替、循环条件较好,带入的CO₂相对较多,有利于喀斯特发育,因此该区是喀斯特集中发育的区域,建筑适宜性差。该区进行工程建设时,应尽量避免在主要径流区上修建重要建筑物,必须修建时首先应进行详

细的地质勘察,确保地基不产生大面积塌陷,并根据地质条件选择合理的基础形式及施工方法,防止桩基等施工不当堵塞主要喀斯特管道,导致喀斯特泉流量产生较大变化或诱发喀斯特塌陷等地质灾害。

(2) 地下水系统内部地下水一般径流区地下水活动相对较弱,地下水交替、循环条件较差,带入的 CO_2 相对较少,不利于喀斯特发育,喀斯特发

育相对较弱,喀斯特地下水流量有限,相比主要径流区更加适宜工程建设。

4.3 场地适宜性分区及评价

根据以上原则,将评估区按场地建设适宜性由差到好的顺序划分为 4 个区,分区及评价详见表 3。

表 3 场地适应性分区评估

区段序号	位置	面积/万 m^2	面积百分比/%	工程建设可能引起的主要地质问题	适宜性评价
I	地块中部	8.4	35	位于地下水流动系统排泄区内,喀斯特管道交汇地带,喀斯特发育,工程建设对地下水影响较大,不当的工程建设可能导致瓦窑龙潭、小四方井及龙王庙潭泉水流量变化。	适宜性差,建议以景观、绿化工程为主,不宜布置深基础建筑。
II	地块南西侧	4.2	18	位于地下水主要径流区上,不当的工程建设可能导致双龙潭泉水流量变化。	适宜性较差,建议以浅基建筑为主,布置深基础建筑时需进行详细水文地质勘察论证。
III	地块南东部	4.8	20	不在地下水主要径流区上,但毗邻主要径流区,补给区汇水面积较大,喀斯特管道堵塞对场区主要排泄点有一定影响。	适宜性较差,建议以浅基建筑为主,布置深基础建筑需避开喀斯特集中发育区。
IV	地块北侧	6.4	27	位于地下水主要排泄区以北,工程建设对主要径流通道影响不大。	适宜性较好,可考虑布置深基础建筑。

5 结束语

在地下水较为丰富的复杂喀斯特地区特别是人口稠密的地区进行评估勘察工作时,事先应对整个工作区的喀斯特水文地质条件进行调查,以便确定地下水系统边界条件,划分流动系统,对主要径流带开展适量的勘察工作,确定喀斯特地下水主要径流区,进行场地适宜性分区,预测各分区工程建设对喀斯特地下水系统可能产生的影响及喀斯特对工

程的影响,对工程场地建筑规划布置提出意见。

参考文献:

- [1] 王大纯 等. 水文地质学基础[M]. 地质出版社, 2007.
- [2] 韩至钧, 金占省. 贵州省水文地质志[G]. 地震出版社, 1996.
- [3] 贵州省安顺幅区域水文地质报告(1:20 万)[R]. 贵州省地质局, 1979.

(责任编辑:唐成书)

(上接第 15 页)

2010 年底启动了Ⅲ-3 溶洞封堵试验施工,之后的进一步勘察完全验证了上述研究成果,至 2011 年 8 月底,封堵试验取得阶段性成功,Ⅲ-3 溶洞封堵体初步形成,经现场观测,封堵体初步切断了水库经Ⅲ-3 溶洞与 K_{11} 的水力联系,在库水位 1 086 m 以上时, K_{11} 渗漏量与Ⅲ-3 溶洞封堵前相比减少约 $9 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3 结束语

窄巷口水电站喀斯特地质条件复杂,自电站建成以来,因其巨大的喀斯特渗漏,勘察研究工作从未停止。本文在系统整理、研究已有勘探、试验成果的

基础上,通过喀斯特地质分析,综合运用各种水文地质测试方法,包括水位观测、地下水温度、电导率和示踪试验等,复核和研究了电站库首坝址区,特别是左岸防渗线的地下水渗流场、温度场、电导率场等,各场能相互印证,且以物探和钻探等手段加以验证。在大量勘察、分析工作的基础上,掌握了库首坝址区喀斯特发育的基本规律,查明了主要渗漏管道,即Ⅲ-3 溶洞的位置、规模及形态。目前,已经基本成功的溶洞封堵工作验证了以上研究成果,上述综合研究方法在喀斯特集中渗漏管道探测工作中卓有成效,值得其他类似工程借鉴使用。

(责任编辑:梁文龙)