

黄龙洞拟建水库坝址岩体渗透性分析与渗漏风险初判

张卓彬

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年3月23日; 录用日期: 2026年4月13日; 发布日期: 2026年4月27日

摘要

为评价拟建黄龙洞水库坝址的渗漏风险与工程适宜性, 本研究综合采用实地考察、高密度电法物探及钻探(ZK1, ZK2)等手段, 对坝址区进行了立体化勘察。本次物探沿坝轴线(测线一)及垂直坝轴线方向(测线二)布设, 结合压水试验重点分析了坝址区岩溶发育特征与岩体渗透性。结果表明: 坝轴线剖面电性结构横向分异显著, 左岸坝肩存在明显的低阻异常区, 提示构造破碎或强岩溶发育; 而河床及右岸坝肩主要表现为中高阻特征, 岩体相对完整。钻孔压水试验进一步揭示岩体渗透性具强烈垂向分带规律, 浅部强风化带透水率极高(最大118.6 Lu), 44.8 m深度以下进入完整基岩带(<3 Lu)。综合判定: 坝址区存在“左岸构造控溶渗漏、右岸浅表弥散渗漏”的风险特征。结论认为, 坝址具备工程建设的“有条件适宜性”, 建议防渗设计应以左岸深层防渗与右岸浅部帷幕灌浆相结合。

关键词

拟建水库, 高密度电法, 岩溶坝址, 渗透性分带, 渗漏风险

Rock Mass Permeability Analysis and Preliminary Assessment of Leakage Risk at the Dam Site of the Proposed Huanglongdong Reservoir

Zhuobin Zhang

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: March 23, 2026; accepted: April 13, 2026; published: April 27, 2026

Abstract

To evaluate the leakage risk and engineering suitability of the proposed Huanglongdong Reservoir dam site, this study employed a multi-faceted investigation approach integrating field surveys, the high-density resistivity method, and drilling (ZK1, ZK2). Geophysical exploration was conducted along the dam axis (Line 1) and perpendicular to it (Line 2), with a focus on analyzing the karst development characteristics and rock mass permeability at the dam site through packer tests. The results indicate significant lateral heterogeneity in the electrical structure of the dam axis, with a pronounced low-resistivity anomaly zone in the left abutment, suggesting tectonic fragmentation or strong karst development. In contrast, the riverbed and right abutment exhibit predominantly medium-to-high resistivity, indicating relatively intact rock mass. Borehole packer tests further reveal a strong vertical zonation in permeability, with the shallow, highly weathered zone displaying extremely high permeability (up to 118.6 Lu), while the intact bedrock below 44.8 m depth shows low permeability (<3 Lu). Comprehensive analysis identifies the leakage risk characteristics at the dam site as “structural-controlled leakage on the left bank and shallow diffuse leakage on the right bank”. It is concluded that the dam site demonstrates “conditional suitability” for construction, and it is recommended that anti-seepage measures integrate deep curtain grouting on the left bank with shallow curtain grouting on the right bank.

Keywords

Proposed Reservoir, High-Density Resistivity Method, Karst Dam Site, Permeability Zonation, Leakage Risk

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在我国中东部广大岩溶地区,水库建设是解决水资源时空分布不均、促进区域发展的关键工程措施。然而,岩溶介质强烈的非均质性和渗透性,使得库水沿溶隙、管道等通道发生渗漏成为此类工程最常见、最严重的地质问题之一[1]。渗漏不仅导致水资源流失、工程效益降低,更可能引发岸坡失稳、地面塌陷等次生灾害,直接威胁工程安全[2]。因此,在工程规划与可行性研究阶段,对拟选坝址进行系统的岩溶渗漏风险早期识别与评价,是确保工程方案经济合理、技术可行的首要地质工作[3]。

近年来,综合物探与钻探技术在水库岩溶勘察中得到了广泛应用。然而,现有研究在面对复杂地质过渡带的岩溶渗漏评价时仍存在一定局限性:一方面,多数研究往往侧重于渗漏通道的单一识别或宏观机制分析,而在精细刻画受控于局部构造与风化深度的岩体渗透性三维空间分异规律方面略显不足[4];另一方面,对于特定地质构造背景(如太行山前断裂带与碳酸盐岩交汇区),目前仍缺乏将地表物探异常与深部水文地质参数(如透水率)进行高精度锚定与多源互证的标准范式。这种研究空白使得在类似复杂地质条件下,工程勘察往往难以准确界定防渗帷幕的合理边界与深度。

拟建黄龙洞水库位于河南省焦作市修武县高窑村西北约 0.5 km 处,地处太行山系的高山区。该水库最大库容为 147 万 m³,最大坝高 47 m,建成后将承担供水、灌溉等综合任务。坝址区广泛分布碳酸盐岩,地表岩溶形态发育,预示其存在复杂的渗漏地质背景。目前,关于该拟建坝址尚未开展针对性的工程地质专题评价,其具体的渗漏风险空间分布、主控因素及坝址适宜性尚不明确。作为太行山前典型的高山峡谷型碳酸盐岩坝址,黄龙洞拟建水库为深入探讨岩溶发育与岩体渗透性的非均质性规律提供了一

个绝佳的天然试验场。

基于此,本研究将黄龙洞水库坝址作为一个高质量的案例研究(Case Study),旨在前期勘察资料的基础上,聚焦“坝址是否可能发生渗漏、何处风险最高、总体是否适宜”三个核心工程问题。本研究通过整合地质测绘、地球物理勘探(高密度电法)及钻探(压水试验)资料,系统揭示坝址区岩溶发育规律与水文地质结构,初步划分渗漏风险区,并最终对坝址的适宜性做出综合评价[5]。尽管本研究所采用的勘察手段属于常规方法,但本文致力于通过精细化的多源数据融合,深刻揭示太行山前特定地质条件下“构造控溶与垂向风化交织”的岩体渗透性非均质特征。本研究的贡献不仅在于为黄龙洞水库的可行性论证与后续深化设计提供关键的地质依据,更重要的是,它为类似复杂地质背景下的水库工程勘察提供了一套行之有效的范式和工作“物探-钻探”综合解译模板,具有重要的示范意义与学术推广价值[6]。

2. 研究区概况

2.1. 地形地貌

研究区地处太行山山脉与华北平原的过渡地带,宏观地势呈现北高南低、西高东低的特点,整体向东南方向倾斜。依据地貌成因及形态特征,可自西北向东南划分为四个主要地貌单元:构造剥蚀山区、山前丘陵区、山前洪积扇群及冲洪积平原。

构造剥蚀山区位于西北部,属太行山脉之一部,海拔高度在 1700 米至 200 米之间,相对高差一般为 200 至 500 米。山体基岩裸露,山势陡峻,沟谷深切,多发育“U”形谷,局部可见“V”形谷(见图 1)。

山前丘陵区为山区向平原的过渡带,由基岩剥蚀丘陵与侵蚀河谷相间构成。丘陵高程一般为 150~350 米,相对高差多大于 50 米,局部仅 10~30 米,边坡坡度常在 25°至 40°之间。丘间谷地多呈南北走向,谷底宽约 10~40 米,两侧常发育有 2~3 级阶地。丘陵坡脚及洼地常见残坡积物堆积。

山前洪积扇区主要由来自山区的间歇性水流冲洪积物堆积而成,覆盖层厚度变化较大。地表冲沟发育,侵蚀切割作用显著,形成沟岭相间、波状起伏的地貌景观。该区土层与砂卵石层交错分布,结构不均,地面坡度约为 1/100 至 1/600。

冲洪积平原区由多个洪积扇群连接形成,构成广阔的山前倾斜平原。地形平坦,自西北向东南微倾,地面坡度缓至 1/1000 至 1/2000。至此,山前发育的冲沟逐渐萎缩、消失。



Figure 1. Field photos of topography and geomorphology in the study area
图 1. 研究区地形地貌实景照片

2.2. 地层岩性

区内出露地层自老至新主要包括太古界变质岩、元古界震旦系沉积岩、古生界沉积岩及新生界第四系松散堆积物,现分述如下:

太古界(Ar)岩性以各类片麻岩、斜长角闪片岩为主,夹少量浅粒岩,总厚度大于 1400 米,主要分布

于研究区北部的薄壁—上八里北塔岗水库一带。

元古界震旦系(Z)岩层上部为浅黄色含砂白云岩,中下部则为浅紫红色石英岩状砂岩,与下伏太古界地层呈不整合接触。该套地层厚度一般小于40米,其分布范围与太古界基本一致。

古生界地层在区内较为发育,自下而上包括:

寒武系(ε):以青灰色、灰色中厚层条带状鲕状石灰岩和白云岩为主,下部可见紫红色、黄绿色泥灰岩及砂页岩,厚度380~510米,广泛出露于太行山区。

奥陶系(O):主要为深灰色至灰色石灰岩、角砾状灰岩及灰白色白云岩,厚度430~670米,同样分布于太行山区。

石炭系(C):岩性为砂岩、页岩、薄煤层及灰岩,底部常发育铁矿或铝土矿层,厚度140~200米,在焦作东北部及庙口等地有零星出露。

二叠系(P):以紫红色砂岩、页岩、粘土岩为主,底部含煤层,厚度大于1000米,主要分布于焦作及其以北地区。

新生界地层在平原及丘陵区广泛分布:

下第三系(E):为紫红色泥岩、泥质砂岩及粉砂岩,厚度大于400米,在沁河一带埋藏深度通常超过300米。

上第三系(N):岩性复杂,包括紫色、杂色泥岩、泥质砂岩、砂砾岩、砾岩及泥灰岩,厚度大于220米,主要分布于安阳以北的丘陵区及淇河—安阳新乡北站一线。

第四系(Q):为未固结的松散堆积物,包括壤土、黄土状土、砂及卵石混合土等,主要堆积于山间盆地、沟谷及现代河床地带。

2.3. 地质构造

坝址区位于华北准地台(I)山西台背斜(I₂)的东部边缘。见图2所示。

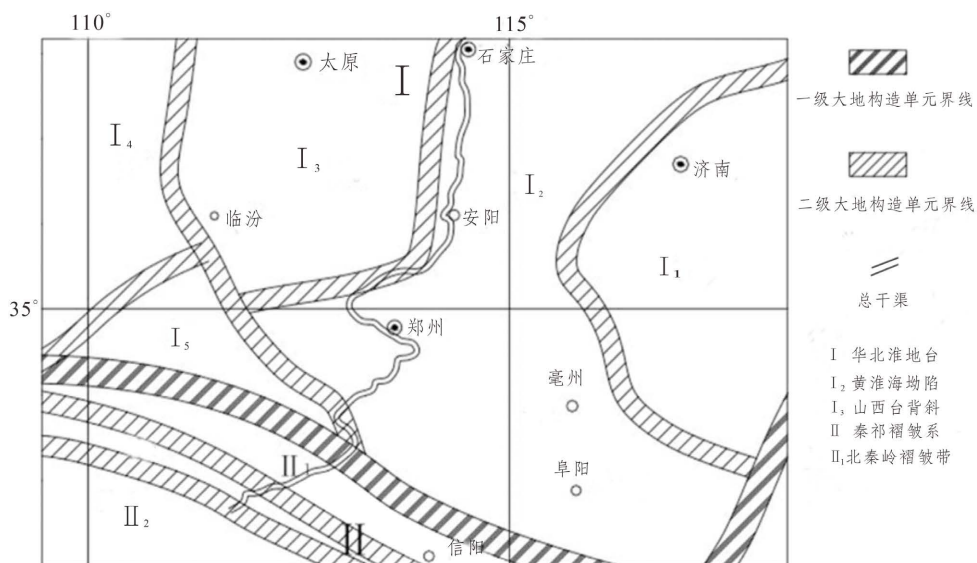


Figure 2. Regional tectonic division map

图2. 区域大地构造分区图

研究区所处大地构造位置为晋东南山字型构造前弧内侧,太行山台隆南缘。区域构造格局主要受山字型构造体系控制,并叠加有近东西向(纬向)及北西向构造带。

区内岩层总体呈一平缓的单斜构造，走向近东西或北东。断裂构造较为发育，其主体为一套近东西向展布的高角度正断层，局部伴生小型褶皱。主断裂两侧常发育数次级分支断层。

(1) 山字型构造

区内分布有该山字型构造的东翼前弧部分。代表性断裂为薄壁断层，该断裂自焦作北，经薄壁、上八里、黄水延伸至南村一带，全长约 50 km，与数条平行断裂共同构成一宽约 5 km 的断裂带。断裂总体走向 NE40°，倾向 NW，倾角约 70°，为正断层性质，断距 80~450 m。

(2) 纬向构造带

该组构造在坝址区南部有分布，主体呈近东西向展布。其形成时代较早，切割深度大，多为基底断裂，并常被后期的新华夏系断裂错断。该构造带近期活动明显，对地震活动具控制作用，力学性质以压性、压扭性为主。

代表性断裂为盘古寺断裂。该断裂西起济源盘古寺，向东经紫陵北延伸至焦作柏山一带，并断续延伸至新乡县北郎公庙，全长约 160 km。断裂走向近东西，倾向南，倾角 60°~70°，断距达 700~1500 m。该断裂处于东西向构造带与山字型前弧的复合部位，力学性质复杂，早期具张扭性特征，后期受山字型构造复合改造而表现出压扭性特征。

(3) 北西向构造带

该组构造规模一般较大，多呈北西向展布，构造形式以压扭性正断裂为主，晚更新世以来仍有活动。

主要断裂包括峪河断裂与安阳断裂带。峪河断裂分布于峪河口西至峪河镇、大块村一带，长约 25 km，走向 NW300°，倾向 SW，断距 800~2000 m，属正断层。安阳断裂带西起水冶，向东经安阳延伸至内黄一带，全长约 70 km，总体走向 NWW。该断裂带由安阳南、北两条断层构成安阳地堑，断层倾角较陡，断距 6~7 m，为正断层，并错断了北北东向的构造形迹。

2.4. 水文地质条件

库区及外围 3 公里范围内，主要含水岩组为第四系冲洪积物与奥陶系灰岩，下伏的寒武系白云岩则构成区域相对隔水层。

第四系冲洪积物直接分布于现代河床底部，岩性以砾石、卵石及漂石为主，夹砂，结构呈中密状态。其磨圆度中等，分选性差，孔隙发育，为强透水层。据钻孔揭露，该层最大厚度为 10.7 米。

奥陶系灰岩在库区两岸山顶及可能浸没区以上广泛出露，岩性为灰色厚层状灰岩。表层风化裂隙发育，并常见溶孔、溶隙，岩体透水性强，亦属主要含水层。

寒武系白云岩分布于库区两岸山体，构成含水层的基底。其上部为浅灰白色厚层白云岩，中部是灰褐色中层白云岩，下部为灰黄色中厚层泥质白云岩。该套地层地表风化面常见“刀砍状”裂隙，但新鲜岩石完整，裂隙不发育，整体渗透性差，起着区域相对隔水层的作用。

库区地下水系统可分为两类：一是赋存于奥陶系灰岩中的裂隙岩溶水，其富水带主要沿节理密集带及断层带呈条带状分布，补给来源以大气降水为主，总体向河床方向径流排泄；二是赋存于第四系冲洪积层中的孔隙水，主要接受地表河水补给，其径流受季节性影响显著。在雨季，地下水沿河床向下游径流，水力坡度与径流强度较大，主要排泄方式为向下游径流及蒸发。由于侧向及垂直向的径流强度相对较弱，初步判断库区通过地下途径的永久性渗漏量总体较小。

3. 岩溶发育特征与岩体渗透性

3.1. 地表岩溶特征

在研究区内的可溶岩层走向一般为东北或西南，倾角在 9°~20°之间。大部分碳酸盐出露地表，在接

受大气降雨作用下形成裸露型岩溶。其中在坝址处西北方向 2 km 处岩溶发育相对明显(见图 3)，库区地层主要为上寒武系碳酸盐岩，在地表水及大气降水的作用下，岩石表面多形成“刀砍”状溶蚀沟，风化较严重。局部存在溶洞，深度一般小于 1.0 米。



Figure 3. Surface karst development in the study area
图 3. 研究区地表岩溶发育情况

3.2. 地下岩溶发育规律

为查明坝址区地下岩溶的空间分布与发育特征，本次研究采用高密度电法剖面探测与钻探验证相结合的综合勘察方法。沿坝址区布设两条高密度电法剖面，并结合 ZK1 (河槽)、ZK2 (右岸坝肩)两个控制性钻孔，以“物探面状扫描、钻孔点上验证”的思路，综合揭示岩溶发育规律[7]。

3.2.1. 物探成果解译



Figure 4. Location map of high-density electrical method survey lines
图 4. 高密度电法测线位置图

高密度电法通过探测地下介质的视电阻率差异来推断地质结构。两条测线位置如图 4 所示,其中 CX1 代表测线 1, CX2 代表测线 2。在本研究区,低电阻率异常通常指示岩体破碎、富水或已被泥质充填的岩溶发育带;高电阻率区域则反映体相对完整、干燥[8]。

测线一解译(坝轴线剖面)

如图 5 所示,该测线横跨整个坝址区,其电性结构呈现出极强的横向非均质性:左岸区域(剖面左侧):存在一个规模较大、形态不规则的显著低阻异常体,电阻率值远低于背景场,且异常带自浅部向深部贯通延伸。结合区域构造背景分析,此异常带极可能对应左岸的断层破碎带或受构造控制的岩溶集中发育带,是坝址区主要的潜在渗漏通道。

河床及右岸区域(剖面中右侧):视电阻率整体较高,电性层层状特征较清晰,未见贯穿性低阻异常。这表明河床及右岸坝基岩体完整性明显优于左岸,主要风险集中在浅表风化层。

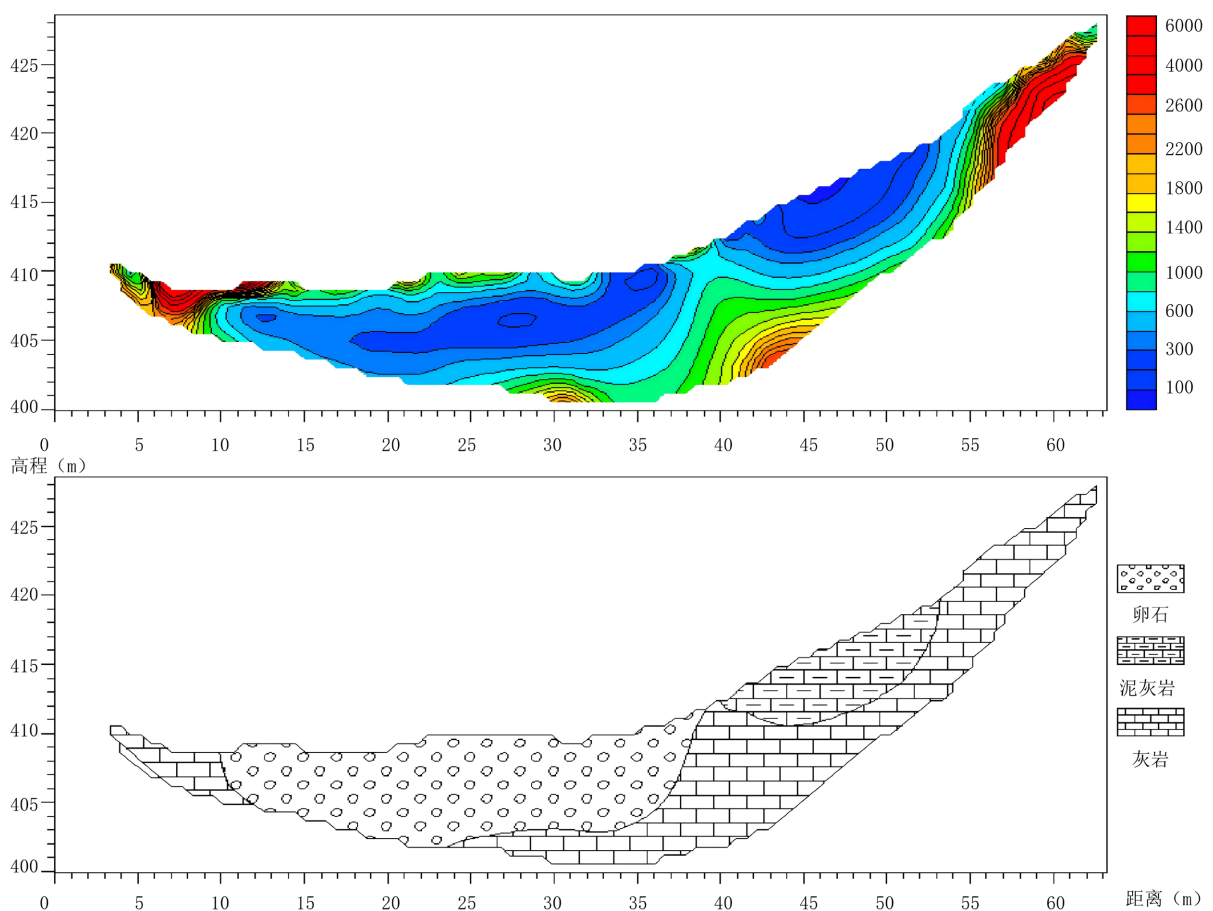


Figure 5. High-density electrical method result map of survey line 1 (along the dam axis)

图 5. 测线一高密度电法成果图(沿坝轴线)

测线二解译(垂直坝轴线/纵剖面)

如图 6 所示,该测线切过坝址纵深方向。剖面整体表现为相对均一的中高阻背景。浅部存在的薄层低阻区主要反映了河床冲积积覆盖层及基岩表层风化带;其下部基岩电性层连续稳定,未发现切割岩体的深大断裂或大规模溶洞异常。这表明在垂直坝轴线方向上,岩体结构具有较好的纵向连续性,坝基持力层沿水流方向相对稳定。

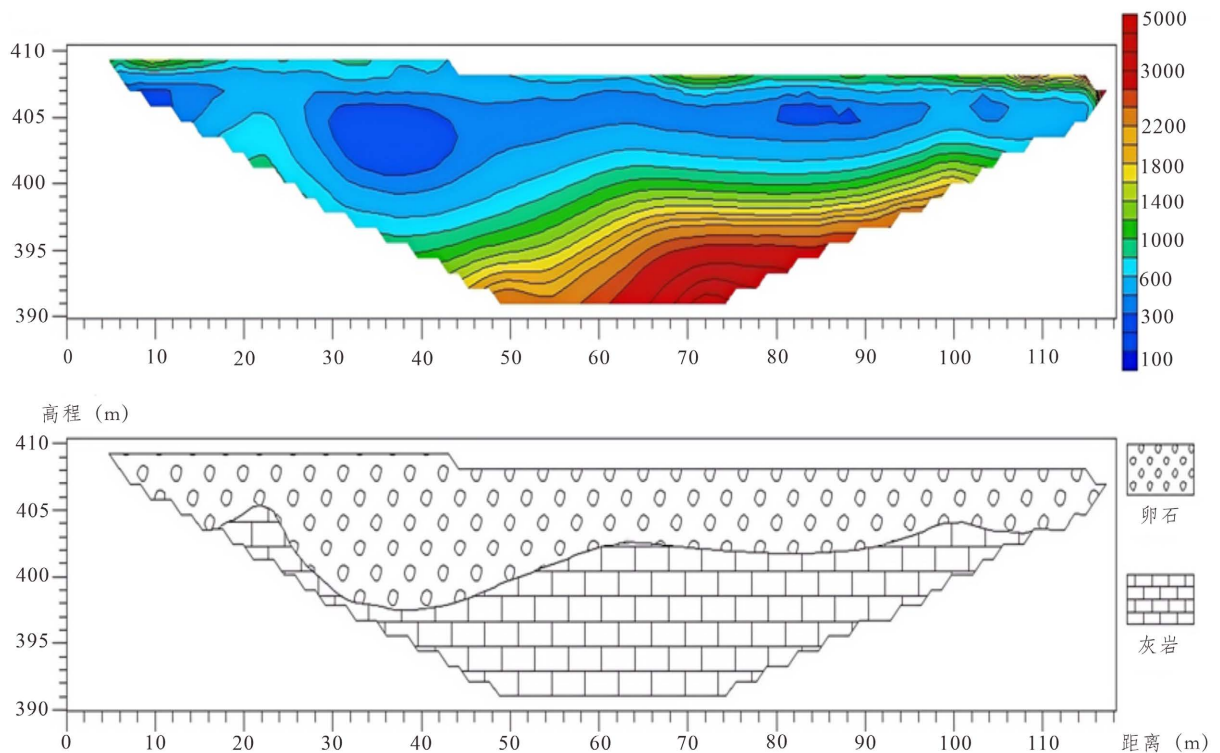


Figure 6. High-density electrical method result map of survey line 2 (perpendicular to the dam axis)

图 6. 测线二高密度电法成果图(垂直坝轴线)

3.2.2. 钻探揭示的岩溶垂向分带特征

钻探成果从“点”上精确揭示了岩溶发育的垂向分带性，ZK2 孔(右岸)的数据尤为系统和典型，其详细分层与特征如表 1 所示[9]。

Table 1. Vertical zonation characteristics of karst development in borehole ZK2 (right dam abutment)

表 1. ZK2 钻孔(右岸坝肩)岩溶发育垂向分带特征表

分层序号	深度范围(m)	岩性描述	岩溶与风化发育特征	工程地质分层
I	0~6.0	奥陶系中统强风化 - 全风化泥灰岩	全 - 强风化，结构已破坏	覆盖层/强风化带
II	6.0~22.0	薄 - 中厚层状灰岩	强烈溶蚀风化带，溶隙发育，多充填泥质	浅部强岩溶带
III	22.0~33.9	中厚 - 厚层状灰岩	裂隙性溶蚀风化带，溶隙较发育	中部中等岩溶带
IV	33.9~44.8	中厚 - 厚层状灰岩	强烈溶蚀风化带，溶洞、溶隙发育	深部强岩溶带
V	44.8~60.5	厚 - 巨厚层状灰岩	微新岩体，溶蚀现象不发育，岩体完整	完整基岩带

根据表 1，右岸岩溶发育呈现清晰的垂向分带规律：

强风化溶蚀带(0~44.8m)：该深度内岩体受溶蚀和风化作用影响强烈。其中，6.0~22.0m 与 33.9~44.8m 为两个强岩溶发育段，尤其在下段揭露有溶洞，表明溶蚀作用在垂向上具有非均一性和多层性。此带岩体破碎，RQD 值低，透水性强。

微新完整岩体带(44.8m 以下)：进入该层后，岩性变为厚 - 巨厚层灰岩，溶蚀现象基本停止，岩体转为完整，取芯率达 100%，RQD 值高达 80%~100%。这标志着一个稳定的、渗透性极低的相对隔水底板

的出现, 是良好的坝基持力层。

河槽部位的 ZK1 孔则揭示了不同的地层结构: 覆盖层以下依次为灰岩、白云岩和白云质灰岩。该孔记录中未强调如 ZK2 孔般的强烈溶洞发育, 初步表明河床基础虽为可溶岩, 但其浅部岩溶发育强度可能弱于右岸山体的强风化带, 这与物探剖面中河床区域未出现大规模集中低阻异常的特征具有一定对应关系。

ZK2 孔揭示的“上部破碎、深部完整”的垂向规律, 与测线一(坝轴线)在右岸显示的高阻特征以及测线二(纵剖面)显示的深部岩体稳定性高度吻合, 实现了“物探 - 钻探”的互证[10]。

3.2.3. 岩溶发育规律综合推断

综合坝轴线物探剖面(测线一)的横向扫描、纵向物探剖面(测线二)的纵深探测以及钻孔的垂向验证, 坝址区岩溶发育规律推断如下[11]:

(1) 空间发育极不均匀, 左岸为优势通道: 坝轴线电法剖面清晰地划分了“左岸低阻破碎区”与“右岸高阻完整区”的界限。左岸受构造控制, 存在深部岩溶或断层破碎带, 是发生绕坝渗漏的高风险区。

(2) 右岸及河床具备良好的隔水底板: 纵向剖面(测线二)与 ZK2 钻孔共同证实, 右岸及河床深部岩体完整、连续性好。岩溶发育严格受垂向分带控制, 44.8 m 以深可作为可靠的防渗帷幕底界。

3.3. 岩体渗透性分析(压水试验)

为定量评价坝址区岩体的透水性, 为渗漏风险评价和防渗设计提供关键参数, 本次勘察在钻孔中进行了分段压水试验。试验采用单栓塞隔离式(单管顶压式), 自上而下分段进行。考虑到试段位置较浅(一般小于 15 m), 试验压力按规范要求适当降低, 采用三级压力(0.1 MPa, 0.3 MPa, 0.5 MPa)、五个阶段(P1-P2-P3-P4-P5)进行[12]。

3.3.1. 试验成果与数据分析

现场压水试验成果统计如表 2 所示。试验获得的 P-Q 曲线均属 B 型(紊流型), 表明在整个试验过程中, 水流在岩体裂隙中呈紊流状态, 裂隙本身的开度或状态未发生明显改变, 试验结果可靠。

Table 2. Statistical table of borehole water pressure test results in the dam site area

表 2. 坝址区钻孔压水试验成果统计表

钻孔编号	试段深度 (m)	试段长度 (m)	透水率 (Lu)	P-Q 曲线类型	工程地质评价
ZK1	3.0~7.0	4.0	35.2	B 型(紊流)	强透水, 对应浅部卵石层及强风化层
ZK1	10.0~15.0	5.0	28.5	B 型(紊流)	强透水, 对应溶蚀裂隙发育带
ZK1	18.0~23.1	5.1	15.8	B 型(紊流)	中等透水, 岩体完整性有所好转
ZK2	2.0~4.1	2.1	118.6	B 型(紊流)	极强透水, 对应表层全风化带及张开裂隙
ZK2	8.0~13.0	5.0	42.7	B 型(紊流)	强透水, 对应浅部强烈溶蚀风化带(见表 1 分层 II)
ZK2	16.0~20.0	4.0	31.5	B 型(紊流)	强透水, 对应溶蚀风化带
ZK2	25.0~30.0	5.0	8.3	B 型(紊流)	中等透水
ZK2	35.0~40.0	5.0	5.1	B 型(紊流)	弱透水, 接近微新岩体过渡带
ZK2	48.0~53.0	5.0	1.2	B 型(紊流)	微透水, 对应完整基岩带(见表 1 分层 V)

注: Lu (吕荣值)为透水率单位, 1 Lu 表示在 1 MPa 压力下, 每米试验段每分钟渗入 1 升水量。

根据表 2，坝址区岩体渗透性规律如下：

(1) 透水率总体偏高，空间差异显著：坝址浅部岩体透水率普遍大于 10 Lu，属于强透水级别。其中，ZK2 孔最浅部试段(2.0~4.1 m)透水率高达 118.6 Lu，揭示了地表全风化带及裂隙密集区的极强导水能力。这与“主要含水层为上覆第四系卵石层”以及钻孔上部岩心采取率低的描述完全吻合。

(2) 渗透性具有明显的垂向分带规律：两个钻孔的试验数据均显示，透水率随深度增加呈现明显的递减趋势。在 ZK2 孔中，从浅部的 118.6 Lu 急剧降低至深部(48.0~53.0 m)的 1.2 Lu，这与 3.2.2 节中钻孔揭露的岩溶垂向分带规律(见表 1)高度一致：强透水带对应强风化溶蚀带(I~IV 层)，而 44.8 m 以下的完整基岩带(V 层)透水性已降至微透水级别，构成了可靠的相对隔水底板。

(3) 含水层水力联系微弱：所有试段的 P-Q 曲线均为 B 型(紊流型)，且在高压阶段未出现曲线上扬(扩容)或下降(充填物冲蚀)的异常形态。这表明在试验压力范围内，岩体中的渗流通道(裂隙、溶隙)结构稳定，含水系统相互连通性差，水力联系微弱，进一步印证了该区地下水以季节性补给、存量有限的特点。

3.3.2. 对工程防渗的指示意义

(1) 灌浆处理的必要性：ZK1 与 ZK2 孔上部试段极高的透水率(30~120 Lu)，与其较低的岩心采取率相互印证，证实了坝肩浅部岩体质量差，是库水渗漏的主要通道。必须进行系统的灌浆处理，形成防渗帷幕，以阻断此浅部强渗流带。

(2) 帷幕深度设计的依据：压水试验数据为防渗帷幕的底线深度提供了定量依据。右岸(ZK2)帷幕深度必须穿过浅部的强-中等透水带(至少需超过 40 m 深)，并深入至透水率小于 3~5 Lu 的微新岩体(V 层)内不少于 5 m，才能确保幕体的可靠性。左岸虽无钻孔数据，但参考坝轴线物探剖面揭示的显著低阻异常和地质类比，其处理深度需更大[13]。

(3) 灌浆压力的参考：试验采用的 0.1~0.5 MPa 压力序列，为后续灌浆施工的起始压力提供了现场试验参考，有助于避免在浅层低压条件下发生浆液无效扩散或地面抬动[14]。

4. 坝址渗漏风险初判与工程建议

4.1. 渗漏风险定性评价

基于渗透性数据及地质模型，对坝址关键部位进行风险等级定性评价，如表 3 所示。

Table 3. Leakage risk level assessment table for key parts of the dam site

表 3. 坝址关键部位渗漏风险等级评价表

评价部位	核心地质与渗透性特征	透水率范围(Lu)	风险等级	主要依据
左岸断层带	构造破碎，地表岩溶密集，物探低阻异常显著。	推断 > 50	高风险	构造控溶明确，物探异常显著，具备形成集中管道条件。
右岸浅部强风化带(0~45 m)	强溶蚀，岩心破碎，RQD 低，压水试验值极高。	30~120	高风险	ZK2 实测数据确证，透水性极强，分布连续。
河床及覆盖层	卵石层孔隙大，基岩浅部风化，透水性高。	15~35	中风险	ZK1 实测数据，透水性高，但可能以均匀渗漏为主。
右岸深部完整基岩带(45 m 以下)	岩体完整，微新，透水性微弱。	1~5	低风险	ZK2 实测数据确证，为天然隔水底板。

4.2. 主要渗漏模式分析

(1) 管道式集中渗漏模式：主要发生于左岸断层带。库水易沿断层破碎带及伴生溶洞、溶隙形成集中

汇流,快速向下游排泄,是潜在危害最大的渗漏模式。

(2) 裂隙型弥散渗漏模式:主要发生于右岸浅部强风化带及河床。库水通过网状溶隙和风化裂隙向下游渗流,预计渗漏量较大但较分散,风险程度次之。

4.3. 对工程防渗的建议

(1) 防渗处理原则:应遵循“封堵重点,控制浅部,依托底板”的原则。即重点封堵左岸管道式渗漏通道,全面控制右岸及河床浅部强透水带,帷幕底线应锚入右岸深部微透水完整基岩带[15]。

(2) 帷幕设计参数建议:

深度:右岸帷幕深度应不小于 50 m,以确保深入完整基岩(V层) ≥ 5 m;左岸帷幕深度需根据进一步勘察确定,原则上应穿透物探低阻异常体。

灌浆压力:浅部(0~15 m)灌浆起始压力可参考 0.3~0.5 MPa,防止抬动。

(3) 后续勘察建议:亟需在坝轴线左岸物探低阻异常区布设验证性钻孔并进行压水试验,量化其渗透参数;开展连通试验,确认断层带的渗漏路径。

5. 结论

(1) 岩体渗透性具有强烈的空间分异特征。水平方向上,坝轴线物探结果显示左岸岩体破碎(低阻),右岸相对完整(高阻);垂直方向上,压水试验揭示了“浅部强透水(>10 Lu) - 深部微透水(<3 Lu)”的典型分带规律。

(2) 坝址渗漏风险呈“左重右轻、浅重深轻”的格局。左岸断层破碎带为管道式集中渗漏高风险区,是防渗处理的重中之重;右岸及河床主要风险源于浅部强风化带的均匀渗漏。

(3) 工程适宜性评价与建议。坝址区虽然地表岩溶发育,但右岸及河床深部存在可靠的隔水底板,通过工程措施可有效控制渗漏,坝址具备“有条件适宜性”。建议下一阶段重点针对左岸物探低阻异常区加密钻探,查明其性质与边界,确立防渗帷幕的左岸边界与深度[16]。

参考文献

- [1] 李云,虞磊.平寨水库左岸岩溶渗漏综合诊断与治理[J].水利建设与管理,2025,45(11):54-60.
- [2] 马蓝建,陈世万,蔡良钧,等.岩溶区尾矿库渗漏通道探查及其三维可视化——以贵阳市扎塘赤泥库为例[J].中国岩溶,2025,44(6):1270-1290.
- [3] 曾荣福,郑克勋,王钦权.岩溶水库渗透破坏型渗漏勘察与评价[J].中国岩溶,2023,42(1):119-127.
- [4] 陈启军,陈海新,张浩然,等.高卡水库坝址岩溶渗漏分析[J].人民珠江,2014,35(6):95-98.
- [5] 张迪,孙峰,叶晓剑,等.基坑地墙渗漏指标预测及风险等级评价方法[J].土木工程与管理学报,2025,42(1):20-26.
- [6] 刘志雄.安徽省贡溪水库岩溶渗漏研究[D]:[硕士学位论文].郑州:华北水利水电大学,2024.
- [7] 梁纯皓.吉林省花岗岩地区某水库工程钻探与物探手段相结合勘察应用[J].中国水运(下半月),2018,18(24):195-196.
- [8] 刘晓东,张虎生,黄笑春,等.高密度电法在宜春市岩溶地质调查中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2002(1):74-77.
- [9] 代志宏,朱银红,卢鹏,等.非典型隐伏岩溶发育特征及渗漏研究——以大雪山水库为例[J].桂林理工大学学报,2021,41(3):518-524.
- [10] 皮雷,谭磊,李波.综合物探方法在水库绕坝渗漏隐患探测中的应用[J].中国农村水利水电,2022(5):82-86.
- [11] 葛文军,李小超,赵善国.五道库水电站坝址右岸断裂带渗漏地质问题研究[J].黑龙江水利科技,2013,41(5):128-129.
- [12] 孙蓉琳,梁杏,靳孟贵.裂隙岩体渗透系数确定方法综述[J].水文地质工程地质,2006(6):120-123.

-
- [13] 曾晓波. 缅甸滚弄水电站坝址区水文地质条件及坝基渗漏问题处理研究[J]. 水电站设计, 2017, 33(4): 53-56.
 - [14] 邹成杰. 水库坝址岩溶渗漏类型及防渗帷幕布置型式的研讨[J]. 中国岩溶, 1987(2): 60-67.
 - [15] 张丽艳. 水库坝址区工程地质条件分析与坝址优选[J]. 吉林水利, 2017(3): 31-33.
 - [16] 刘强. 松峪水库上坝址坝基渗漏及渗透稳定性工程地质分析评价[J]. 山西水利科技, 2016(2): 20-22.