

联合示踪探测方法在石梁河水库大坝渗漏中的应用

刘国庆^{1,2}, 洪云飞^{1,2}, 王蔚^{1,2}, 赵洪波^{1,2}, 乌景秀^{1,2}, 范子武^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院水工水力学研究所, 江苏 南京 210029; 2. 水利部太湖流域水治理重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:针对石梁河水库北泄洪闸异常渗漏问题,基于长系列现场同步原型观测试验,绘制了北泄洪闸二级消力池周边温度场,开展了Ca²⁺、Cl⁻等水化学元素质量浓度相似性和相异性特征分析,基于冒水水源多示踪离子质量浓度穿透特征曲线,查明了北泄洪闸二级消力池冒水的主要来源和渗漏路径,并提出了修建地下连续截渗墙、采用高压旋喷桩截渗、修复二级消力池底部反滤层等可行的除险加固措施,使得除险加固工程能精准施工,成功堵住了渗漏通道,并取得巨大的经济效益。石梁河水库大坝渗漏探测结果表明,温度场示踪、天然水化学示踪和ICP化学示踪联合的示踪探测方法可精准溯源渗漏水源,可在大坝渗漏探测中推广应用。

关键词: 大坝渗漏; 温度场示踪; 天然水化学示踪; ICP化学示踪; 石梁河水库

中图分类号: TV697.3⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2023)06-0074-08

Application of combined tracer detection method in dam leakage of Shilianghe Reservoir//LIU Guoqing^{1,2}, HONG Yunfei^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, ZHAO Hongbo^{1,2}, WU Jingxiu^{1,2}, FAN Ziwu^{1,2} (1. Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Key Laboratory of Water Governance in Taihu Lake Basin, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: Aiming at the abnormal leakage problem of the north sluice of the Shilianghe Reservoir, based on a long series of field synchronous prototype observation tests, the temperature field around the secondary stilling basin of the north sluice was drawn. The similarity and dissimilarity characteristics of mass concentrations of hydrochemical elements such as Ca²⁺ and Cl⁻ were analyzed. The main source and leakage path of the secondary stilling basin of the north sluice were identified, and feasible reinforcement measures such as building underground continuous cut-off wall, using high-pressure jet grouting pile to intercept seepage, and repairing the bottom filter of the secondary stilling basin were put forward, which made the reinforcement project be constructed accurately, blocking the leakage passage successfully and great economic benefits were achieved. The results of the Shilianghe Reservoir dam leakage detection show that the combined tracing method of temperature field tracing, natural water chemical tracing and ICP chemical tracing can accurately trace the source of leakage, it can be promoted and applied in dam leakage detection.

Key words: dam leakage; temperature field tracing; natural hydrochemical tracing; ICP chemical tracing; Shilianghe Reservoir

我国水库众多,截至2018年底,已建各类水库大坝9822座,总库容达到8953亿m³^[1]。规模庞大的水库工程不仅是我国防洪体系的重要组成部分,更是优化水资源配置的重要组成部分^[2],在防洪、灌溉、供水、发电、水产养殖、生态等方面都发挥了重要作用。但水库一旦发生溃决会造成严重的生命财产损失和恶劣的社会影响,水库大坝溃坝风险始终是大坝建设与管理中的关键问题。根据水利部大坝安全管理中心大坝基础数据库数据,我国1954—2018年共发生了3541起溃坝事件,年均

54.5起,年均溃坝率达万分之6.3,其中2000—2018年就有84起水库溃坝事件^[3]。

我国的水库大部分建于20世纪五六十年代,运行时间较长。李宏恩等^[4]研究了中国水库溃坝规律,结果表明,在因工程质量问题导致的土石坝溃坝案例中,因渗流问题导致的溃坝占23.68%,渗流问题导致的溃坝事故值得重点关注,其中以新老坝体、泄水建筑物与坝体结合部位及穿坝建筑物(涵管)导致的坝体渗漏问题最为突出。此外,虽然我国已开展了多轮病险水库除险加固工作,但水库除险加

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB2102003); 广东省重点领域研发计划项目(2019B111105002); 江苏省水利科技重大技术攻关项目(2021027); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(Y121004)

作者简介: 刘国庆(1984—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事城市水力学、数字流域与智能水网研究。E-mail: gqliu@nhri.cn

固措施均会对原坝体造成直接扰动,若设计、施工或运行不当极易产生严重的渗漏隐患。当水库出现渗漏问题时,快速查找渗漏原因,准确确定渗漏位置和可能的渗漏通道,及时采取补救措施,对降低水库大坝溃坝风险、保障水库下游人民群众生命财产安全和降低工程成本均具有重要意义。

传统的渗漏探测方法主要有高密度电法、电磁法、弹性波法、综合物探法、声纳法等。高密度电阻率法因对水比较敏感,常用于坝体渗漏勘察^[5-10]。郭凯等^[11-14]采用高密度电法装置对国内多座大坝渗漏进行了高密度电阻率法探测试验,试验结果表明,高密度电阻率法可快速准确定位坝体渗漏区域。综合物探法是通过两种或两种以上的物探方法进行勘探^[15-16],赵志宏等^[17]研究表明,采用综合物探法既能发挥不同物探方法的优势,又可利用各种方法的测试结果相互验证,保证物探成果的可靠性;朱云峰^[18]将高密度电法和地质雷达探测法联合应用于泉州某水库大坝渗漏探测中,推断出了大坝防渗墙可能存在的缺陷位置以及形成的渗漏通道走向;蒋甫伟等^[19]在山东省青杨堡水库大坝渗漏探测中,联合应用高密度电法和地质雷达探测法,探测出大坝渗流层存在较大压差、坝体含水量较高、坝后存在渗漏等问题。声纳渗流探测法是根据声波传播速度顺流向加大、逆流减小的特点进行渗漏探测的^[20],如刘迪等^[21]通过声纳探测器对于桥水库大坝、溢洪道、放水洞进行渗漏声纳探测,查清了检测区域的渗漏位置和渗漏量。

近年来示踪技术在水库大坝渗漏探测中逐步得到应用^[22-25]。程和森等^[26]比较了同位素示踪方法和离子体耦合光谱分析(inductive coupled plasma emission spectrometer, ICP)化学示踪方法的技术特点,并成功应用于浙江临海牛头山水库大坝渗漏探测。邱辉阳等^[27]应用水化学分析及基于示踪技术的手段确定了某水库大坝左坝廊道内异常涌水的渗漏源。韩文娟等^[28]的示踪试验表明,示踪成果可为确定水库渗流通道和渗漏位置提供重要依据。钟铨杰等^[29]通过对某水库大坝的示踪试验,确定了该大坝3号坝段库前面板与廊道U3边缝之间存在渗漏通道。沈添耀等^[30]提出了一种基于高密度电法与综合示踪法的联合探测方法,可以降低单一探测方法的局限性及不确定性,解决高密度电法成果解释非唯一性问题。这些研究成果表明,天然水化学示踪、ICP化学示踪和同位素示踪技术均是探测大坝渗漏的有效方法。

目前示踪技术在水库大坝尤其是大型水库大坝渗漏探测中的应用研究并不多,而且天然水化学示

踪和 ICP 化学示踪方法也很少联合使用。单一的示踪法获得的大坝渗漏探测结果往往具有多解性,但采用多种示踪方法相互印证、补充,可以大大提高分析的准确性,能更准确确定渗漏源与渗漏通道^[31]。本文针对石梁河水库北泄洪闸异常渗漏问题,联合应用温度场示踪、天然水化学示踪和 ICP 化学示踪方法进行探测,直观准确地查明了石梁河水库北泄洪闸二级消力池冒水孔出水水体的主要渗漏源和渗漏路径。

1 工程概况

石梁河水库位于江苏赣榆、东海与山东临沭3县区交界处,1962 年建成,集水面积 15 365 km²,总库容 5.31 亿 m³,调洪库容 3.23 亿 m³,兴利库容 2.34 亿 m³,是一座以防洪为主,具有综合功能的大(2)型水库,也是江苏省最大的水库。石梁河水库具有防洪、灌溉、供水、发电、旅游等诸多功能,其中防洪主要是承泄新沭河上游和沂河、沭河部分洪水,担负沂沭河流域洪水调蓄任务,保障下游 100 万人口及连云港市重要设施的安全。

2020 年夏汛,石梁河水库北泄洪闸长时间持续开闸泄洪,泄洪流量超过了历史最高纪录。9 月中旬,石梁河水库北溢洪闸二级消力池内有异常冒水现象,冒水孔周围有大量砂、石滤料被带出,冒水量较大,水头达到 1.7 m 左右。针对此次大坝渗漏事件,现场采取温度场示踪、天然水化学示踪和 ICP 化学示踪联合探测方法,分析研究了北泄洪闸二级消力池冒水孔出水水体的渗漏源和渗漏路径。

北泄洪闸位于主坝右侧,闸底板高程 14.00 m (废黄河零点,下同),其基础为第四系地层,其下为基岩。周边地质条件:①层为素填土,②层为黄褐色粉质黏土,③层为黄褐色中轻壤土,④层为棕黄色粉质黏土,⑤层为棕黄色含少量砾石的中、细砂,⑦层为浅黄色全风化片麻岩。北泄洪闸基础含水层以第⑤层承压含水层为主,渗透系数 $1.92 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-2}$ cm/s。石梁河水库北泄洪闸平面布置及测点位置如图 1 所示。

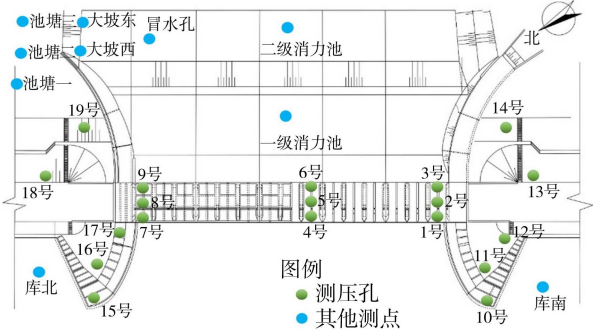


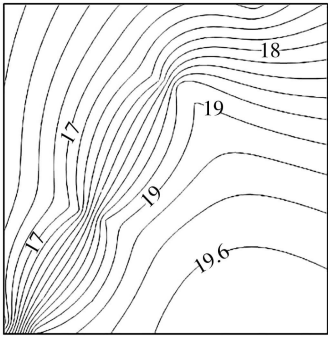
图 1 石梁河水库北泄洪闸平面布置及测点位置

2 示踪探测方法与结果分析

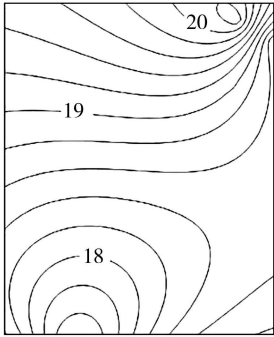
2.1 温度场示踪

根据石梁河北泄洪闸二级消力池冒水孔周边工程布局情况,如图 1 所示,选取北泄洪闸上游库区(库北、库南)以及北泄洪闸周边 19 个测压孔共计 21 个测点(其中 12 号测压孔底部堵塞损坏,测量结果不计),量测 20 个测点水面以下水体温度,水面以下每间隔 0.5 m 测 1 个值,一共 220 个温度值。同时量测北泄洪闸二级消力池冒水孔出水水体连续 24 h 的温度值,每隔 0.5 h 测量一次,分析冒水孔出水水体温度随时间变化情况。

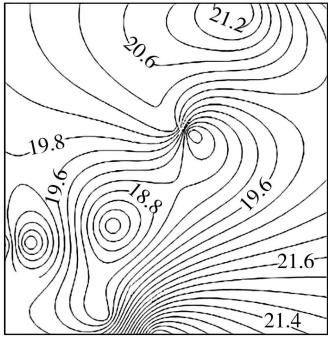
图 2 为石梁河北泄洪闸二级消力池冒水孔周边(约长 300 m、宽 200 m 的矩形区域)不同测点纵向温度场分布情况。根据各测点水面以下水体顶高程和底高程量测结果,各测点水面高程最高为 23.5 m,水体底高程最低为 9.5 m,选择以高程 11、15、21 m 分别代表北泄洪闸二级消力池冒水孔周边水体的下层、中层和上层,图 3 为冒水孔周边下层、中层和上层水体水平温度场分布。图 4 为 2020 年 10 月 24—25 日北泄洪闸二级消力池冒水孔出水水体水温变化曲线。



(a) 11 m 高程



(b) 15 m 高程



(c) 21 m 高程

图 3 冒水孔周边水体水平温度场分布(单位:℃)

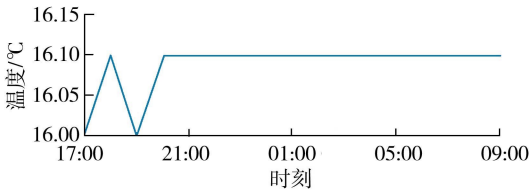


图 4 冒水孔出水水体水温变化曲线

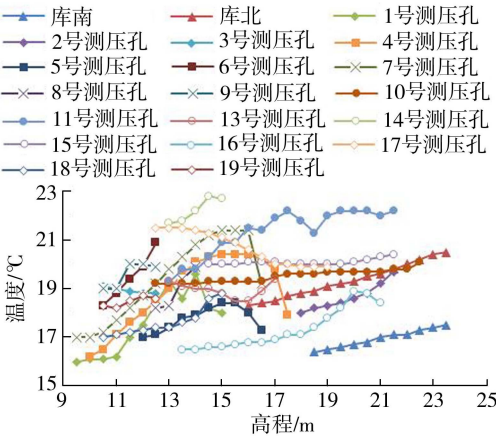


图 2 不同测点水体纵向温度场分布

由图 2、图 3 可知,库区水体温度场和测压孔水体温度场均随深度变化,越深温度越低,最高温度分别为 20.5℃ 和 22.2℃,最低温度分别为 16.7℃ 和 16.0℃。由图 4 可知,冒水孔出水水体温度场基本稳定,维持在 16.1℃ 左右,且靠近冒水孔周边其他测点温度场中的温度最低值,这个温度与库区底部温度基本相同,而与库区、测压孔表层水温相差较大,因此冒水孔出水水体渗漏源与水库底部水体相关性较大。

2.2 天然水化学示踪

在北泄洪闸二级消力池上游库区(库北、库南)、测压孔(1 号、5 号、8 号、11 号、13 号、14 号、

16 号、18 号和 19 号)、边坡(大坡东、大坡西)、消力池(一级消力池、二级消力池、冒水孔)、地表水(闸北侧池塘一、池塘二、池塘三)5 个区域 19 个采样点(图 1)采取水样,对采取的水样进行水化学元素(Ca^{2+} 、 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-})分析和 pH 值测定。

各采样点水样水化学元素质量浓度测定结果如表 1 所示。从表 1 可知,9 个测压孔处各水化学元素质量浓度偏差较大,经分析,可能与前期测压孔冲洗有关。库南、库北 2 个采样点水样各水化学元素质量浓度基本一致。

计算一级消力池、二级消力池、冒水孔、大坡西、大坡东、池塘(池塘一、二、三)采样点水样水化学元素质量浓度与库水水样(表 1 中库北采样点水样)对应水化学元素质量浓度的比值来分析各个采样点水化学元素的相关性,以及与库水对应水化学元素的相关性。

a. 一级、二级消力池水样与库水水样水化学元素相比,仅 CO_3^{2-} 质量浓度与库水有所差异,比值达到 3.0,造成差异的可能原因是 CO_3^{2-} 本身具有不

表 1 各采样点水样水化学元素质量浓度和 pH 值

采样点	质量浓度/(mg/L)								pH 值
	Ca ²⁺	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	
1 号测压孔	21.8	30.6	24.7	37.6	31.6	5.2	41.8	74.1	9.52
5 号测压孔	34.9	53.6	12.3	30.0	10.3	6.9	26.6	65.8	9.33
8 号测压孔	40.2	45.2	<1.0	92.8	12.3	8.4	27.9	67.2	7.56
11 号测压孔	9.7	29.8	30.8	6.3	13.5	0.9	47.2	50.3	9.85
13 号测压孔	65.6	45.9	<1.0	236.0	7.3	15.8	36.0	60.4	7.26
14 号测压孔	51.9	72.0	<1.0	150.0	1.2	10.8	11.9	90.7	6.55
16 号测压孔	38.0	38.3	<1.0	138.0	19.2	7.1	34.8	49.8	7.79
18 号测压孔	50.8	34.5	<1.0	162.0	22.6	11.3	29.5	70.0	6.86
19 号测压孔	38.1	19.1	<1.0	200.0	2.9	8.8	17.6	63.4	6.47
库南	59.8	37.6	<1.0	138.0	8.7	12.2	26.3	76.3	7.64
库北	60.3	33.7	<1.0	138.0	8.8	12.2	25.7	77.6	7.74
一级消力池	60.1(1.0)	41.4(1.2)	<1.0(1.0)	138.0(1.0)	8.7(1.0)	12.1(1.0)	25.7(1.0)	78.0(1.0)	8.23(1.1)
二级消力池	61.4(1.0)	38.3(1.1)	12.3(3.0)	118.0(0.9)	8.3(1.0)	12.3(1.0)	26.4(1.0)	76.8(1.0)	8.95(1.2)
冒水孔	86.2(1.4)	72.7(2.0)	<1.0(1.0)	300.0(2.2)	0.8(0.1)	19.0(1.6)	32.9(1.3)	19.7(0.3)	6.98(0.9)
大坡西	79.4(1.3)	76.4(2.1)	<1.0(1.0)	257.0(1.9)	16.2(1.9)	21.1(1.7)	34.6(1.3)	58.4(0.8)	6.91(0.9)
大坡东	81.2(1.4)	75.2(2.1)	<1.0(1.0)	262.0(1.9)	0.9(0.1)	21.1(1.7)	34.6(1.3)	40.5(0.5)	6.94(0.9)
池塘一	74.8(1.2)	67.2(1.9)	<1.0(1.0)	267.0(1.9)	1.6(0.2)	15.0(1.2)	44.5(1.7)	33.1(0.4)	7.70(1.0)
池塘二	70.9(1.2)	66.5(1.9)	<1.0(1.0)	230.0(1.7)	6.3(0.7)	16.4(1.3)	36.1(1.4)	35.0(0.5)	7.72(1.0)
池塘三	51.9(0.9)	81.5(2.3)	<1.0(1.0)	146.0(1.1)	0.6(0.1)	14.0(1.1)	37.4(1.4)	31.2(0.4)	7.80(1.0)

注:括号中数据为采样点水样水化学元素质量浓度与库水水样对应水化学元素质量浓度的比值。

稳定性,易与其他物质发生化学反应,从而影响分析结果。其余水化学元素质量浓度基本与库水一致,两者比值不超过 1.2,表明三者为同一水源,一级、二级消力池水体来源均为库水。

b. 冒水孔出水水体水样与库水水化学元素差异很大,质量浓度比值较大,其中 Ca²⁺、Cl⁻、HCO₃³⁻、K⁺、Mg²⁺、Na⁺等元素偏差在 50% 以上,表明冒水孔出水不是直接来自库水;若来自库水,则必定发生了水化学反应,但需要进一步分析。

c. 大坡西、大坡东水样除 K⁺以外,其余水化学元素质量浓度与冒水孔出水水体基本一致,但与库水各水化学元素质量浓度比值差异较大,其中,大坡西水样中 K⁺质量浓度偏大可能是受面源污染所致。由此可判断冒水孔、大坡西、大坡东为同一水源,因与库水成分差异大,若为库水,则发生了水化学反应。

d. 冒水孔出水水样与池塘一水样各水化学元素质量浓度基本一致,与池塘二、池塘三水样部分水化学元素质量浓度存在微小差异,池塘二 K⁺质量浓度与冒水孔出水水体相差较大,其余水化学元素质量浓度基本一致,池塘三 HCO₃质量浓度与冒水孔出水水体相差较大,其余水化学元素质量浓度相近。初步判断冒水孔出水水体与池塘一、池塘二、池塘三为同一水源,其中冒水孔出水水体水化学元素与池塘一最为接近,相似度超过 90%。3 个池塘均位于大坝背水坡外侧,分析可知池塘一水源主要来自库水,经水库大坝坝体渗漏后从背水坡沟槽汇入。因此判断冒水孔出水水体渗漏源也是同样通过地下渗漏,发生了相似水化学过程,形成了相似的水化学成分。经天然水化学元素相似性综合分析,确定冒水

孔出水水体渗漏源为库水。

2.3 ICP 化学示踪

ICP 化学示踪方法与传统的放射性同位素示踪法相比,具有无污染、工作周期短、成本低等明显优势。根据地下矿物质含量情况,此次选取与自然本底差异大且性质稳定的化学元素作为试验的示踪剂,共选择了 3 种不同的示踪剂,分别编号为 1 号、2 号和 3 号示踪剂。

在北泄洪闸 19 个测压孔中选取闸南侧(11 号、13 号和 14 号)、闸上(1 号、5 号和 8 号)、闸北侧(16 号、18 号和 19 号)作为投放点,分别投放1 号、2 号、3 号示踪剂。在 9 个投放点采用同一时间、一次性投放的方式完成示踪剂的投放,随后在冒水孔、一级消力池、二级消力池、大坡东、大坡西 5 个采样点用专用取样器采集水样,其中冒水孔前 4 天采样频率为每隔 1h 采样 1 次,随后每隔 4h 采样 1 次;一级消力池、二级消力池、大坡东、大坡西 4 个采样点每天采样 1 次,连续采样 26 天。试验前在库南、库北、一级消力池、二级消力池、冒水孔 5 个采样点各采取 1 个水样,测定各采样点 3 种示踪剂自然本底值,结果如表 2 所示。

表 2 各采样点示踪剂质量浓度自然本底值

采样点	单位:ng/mL		
	1 号示踪剂	2 号示踪剂	3 号示踪剂
库南	3.96	0.31	1.57
库北	4.02	0.35	1.48
一级消力池	4.35	0.34	1.70
二级消力池	4.02	0.34	1.61
冒水孔	3.99	5.48	1.02

共检测冒水孔出水水体水样 168 个,一级消力

池和二级消力池水样各 23 个,大坡东和大坡西水样各 14 个。通过 ICP 化学示踪方法测定各采样点水样中 3 种示踪剂的质量浓度,结果如表 3 和表 4 所示。

分析表 2~4 可知:①水库周边各采样点水样中 3 种示踪剂自然本底值均较低,1 号示踪剂质量浓度在 4.00 ng/mL 左右,2 号示踪剂质量浓度大多在 0.35 ng/mL 左右,3 号示踪剂质量浓度大多在 1.50 ng/mL 左右;②大坡东连续 14 天水样中 1 号、2 号示踪剂未出现明显峰值过程,表明闸门底部、闸南侧与大坡东之间未形成明显渗漏通道,3 号示踪剂质量浓度则增大近 4 500 倍,表明闸北侧与大坡东

之间形成明显的渗漏通道;③大坡西连续 12 天水样中 1 号、2 号示踪剂未出现明显峰值过程,表明闸门底部、闸南侧与大坡西之间未形成明显渗漏通道,3 号示踪剂出现两个峰值过程,所采水样的质量浓度由 0.49 ng/mL 分别上升至 1.01 ng/mL 和 1.24 ng/mL,表明闸北侧与大坡西之间可能形成渗漏通道;④一级消力池连续 21 天水样中 1 号、2 号、3 号示踪剂均未出现明显峰值过程,表明闸南侧、闸上、闸北侧与一级消力池之间均未形成渗漏通道;⑤二级消力池连续 24 天水样中 1 号、2 号示踪剂均未出现明显峰值过程,表明闸门底部、闸南侧未形成明显渗漏通道,3 号示踪剂在后期出现明显上升,又

表 3 大坡东、大坡西水样示踪剂质量浓度检测结果 单位:ng/mL

大坡东				大坡西			
水样编号	1 号示踪剂	2 号示踪剂	3 号示踪剂	水样编号	1 号示踪剂	2 号示踪剂	3 号示踪剂
BPD-1	2.52	4.99	1352	BPX-1	3.49	6.06	0.49
BPD-2	2.47	4.80	2180	BPX-2	4.03	7.29	0.58
BPD-3	3.33	6.87	5249	BPX-3	4.00	7.20	0.51
BPD-4	2.80	7.39	6180	BPX-4	2.72	5.29	1.01
BPD-5	3.10	8.02	7821	BPX-5	3.24	5.12	0.96
BPD-6	1.73	5.28	6175	BPX-6	3.38	5.06	0.75
BPD-7	1.82	5.50	6961	BPX-7	3.44	4.88	0.47
BPD-8	2.16	5.19	7073	BPX-8	3.52	5.14	0.42
BPD-9	2.24	5.28	7418	BPX-9	2.83	5.10	1.24
BPD-10	2.21	5.08	7037	BPX-10	2.86	5.07	0.71
BPD-11	1.73	5.40	7564	BPX-11	3.07	5.59	0.66
BPD-12	1.70	5.19	7023	BPX-12	3.13	5.51	0.65
BPD-13	1.93	5.82	6828	BDX-13	4.05	5.60	0.68
BPD-14	1.97	6.16	7629	DPX-14	3.88	5.40	0.70

表 4 一级消力池、二级消力池水样示踪剂质量浓度检测结果 单位:ng/mL

一级消力池				二级消力池			
水样编号	1 号示踪剂	2 号示踪剂	3 号示踪剂	水样编号	1 号示踪剂	2 号示踪剂	3 号示踪剂
YJ-1	3.75	0.25	2.18	EJ-1	4.02	0.84	1.84
YJ-2	4.34	0.33	1.70	EJ-2	3.71	0.53	1.39
YJ-3	4.37	0.43	1.38	EJ-3	3.54	0.59	1.52
YJ-4	5.03	0.48	4.11	EJ-4	3.50	0.50	1.42
YJ-5	4.16	0.25	1.25	EJ-5	4.50	0.50	1.84
YJ-6	4.34	0.23	1.21	EJ-6	4.54	0.40	1.62
YJ-7	4.29	0.27	1.09	EJ-7	5.19	1.06	0.87
YJ-8	3.45	0.24	0.87	EJ-8	4.31	0.32	1.38
YJ-9	3.45	0.27	1.35	EJ-9	4.39	0.41	1.59
YJ-10	4.84	0.50	2.02	EJ-10	4.19	0.29	1.56
YJ-11	5.07	0.43	1.92	EJ-11	3.35	0.28	1.63
YJ-12	4.74	0.43	1.81	EJ-12	3.39	0.35	2.85
YJ-13	3.28	0.24	2.02	EJ-13	4.86	0.48	3.99
YJ-14	4.02	0.33	1.93	EJ-14	4.64	0.64	5.00
YJ-15	3.99	0.24	1.41	EJ-15	4.57	0.49	5.22
YJ-16	4.16	0.27	1.20	EJ-16	3.38	0.30	7.79
YJ-17	4.13	0.30	1.31	EJ-17	3.70	0.29	2.16
YJ-18	3.30	0.24	1.39	EJ-18	3.98	0.28	4.48
YJ-19	3.31	0.25	1.66	EJ-19	3.89	0.28	12.00
YJ-20	3.54	0.31	1.46	EJ-20	3.88	0.30	4.04
YJ-21	3.49	0.32	1.56	EJ-21	3.34	0.24	3.27
YJ-22	4.35	0.34	1.70	EJ-22	3.32	0.28	4.02
YJ-23	5.20	0.20	1.43	EJ-23	3.46	0.35	7.06

由于二级消力池承接了大坡东含高质量浓度 3 号示踪剂的来水,因此二级消力池与闸北侧之间可能形成渗漏通道。

以 3 种示踪剂自然本底值为基准对冒水孔出水水体水样中示踪剂检测结果进行无量纲化处理(水样示踪剂质量浓度除以冒水孔出水水体示踪剂自然本底值),得到冒水孔出水水体中各示踪剂幅度变化曲线如图 5 所示,可见连续 26 天冒水孔出水水体水样中 1、2 号示踪剂均未出现显著的峰值过程,表明闸南、闸上与冒水孔之间未形成明显渗漏通道;3 号示踪剂出现明显多峰现象,其中峰值达到自然本底值 5 倍左右,表明闸北与冒水孔之间存在渗漏通道。

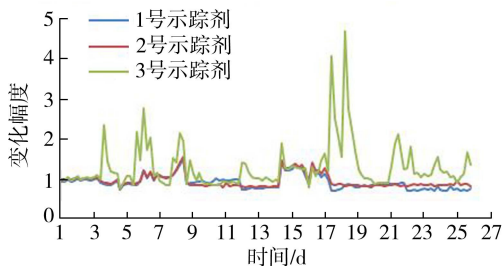


图 5 冒水孔出水水体中 3 种示踪剂质量浓度变化曲线

3 综合判定及成效分析

根据温度场示踪、天然水化学示踪和 ICP 化学示踪试验分析结果,综合判定石梁河水库北泄洪闸二级消力池冒水孔出水水体渗漏源来自闸北侧库区底部水体,闸北侧库区底部水体经坝体渗漏后从二级消力池北侧绕渗至出水点,渗漏路径如图 6 所示。

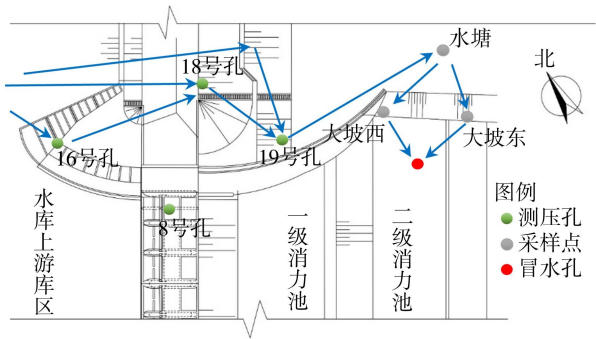


图 6 石梁河水库北泄洪闸二级消力池出水水体渗漏路径示意图

根据上述分析结果,提出以下除险加固措施建议:①在原坝体顺坝轴线方向 150 m 范围内,采用 C30 素混凝土建地下连续墙截渗,宽度 45 cm,墙顶以上采用 12% 的水泥土回填,在靠近北泄洪闸涵洞 5 m 范围内采用高压旋喷桩截渗;在 CS0+40 处垂直坝轴线下游方向 120 m 范围内采用高压旋喷桩截渗;②清理北泄洪闸下游二级消力池堵塞的冒水孔

约 480 个,修复底部反滤层;③拆除重建北泄洪闸北侧下游的北侧翼墙至二级消力池末端搅拌桩围封位置的护坡约 530 m²。根据上述建议,石梁河水库于 2021 年实施了北泄洪闸渗流异常应急处理工程,堵住了渗漏通道,成功解决了二级消力池异常冒水问题。

通过采用温度场示踪、天然水化学示踪和 ICP 化学示踪联合的示踪探测方法,直观准确地判断出石梁河水库北泄洪闸二级消力池冒水孔出水水体的渗漏源与渗漏路径,使得除险加固工程能精准施工,缩短了施工工期,工程实际投资由原先预算的 3 000 万元减少到 900 多万元,同时确保了石梁河水库大坝及下游百万人民群众生命财产及连云港市重要设施的安全,直接经济效益 2 000 多万元,间接经济效益上亿元。

4 结 语

采用温度场示踪、天然水化学示踪和 ICP 化学示踪联合的示踪探测方法,结果能相互印证、补充,可以精确定位渗漏水源,绘制渗漏路径图,对降低大坝渗漏损失具有重要意义,可在大坝渗漏探测中推广应用,也可广泛应用于全国各类型水库大坝、河道、圩区堤防等渗漏问题的隐患排查、质量检测、定性探测、安全评价以及防洪抢险等工作中。此外,该方法还可以应用于城市河网、湖泊污染溯源和污染物运移分析中,解决目前引水过程中水源不清、影响不明的难题。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴:2018 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2018.

[2] 中华人民共和国水利部,中华人民共和国国家统计局. 第一次全国水利普查公报[J]. 中国水利,2013(7):1-3. (Ministry of Water Resources of PRC, National Bureau of Statistics of PRC. Bulletin of the first national census of water resources[J]. China Water Resources,2013(7):1-3. (in Chinese))

[3] 水利部大坝安全管理中心. 我国典型水库溃坝现场调查报告[R]. 南京:水利部大坝安全管理中心,2013.

[4] 李宏恩,马桂珍,王芳,等. 2000—2018 年中国水库溃坝规律分析与对策[J]. 水利水运工程学报,2021(5):101-111. (LI Hongen, MA Guizhen, WANG Fang, et al. Analysis of dam failure trend of China from 2000 to 2018 and improvement suggestions [J]. Hydro-Science and Engineering,2021(5):101-111. (in Chinese))

[5] 席彬,任达,王金刚,等. 高密度三维地震勘探技术在川中地区的运用[J]. 天然气勘探与开发,2013,36(4):39-43. (XI Bin, REN Da, WANG Jin' gang, et al.

- Application of high-density 3D seismic technology to central Sichuan basin[J]. Natural Gas Exploration and Development,2013,36(4):39-43. (in Chinese))
- [6] 刘江平,王莹莹,刘震,等. 近地表反射和折射法的进展及应用[J]. 地球物理学报,2015,58(9):3286-3305. (LIU Jiangping, WANG Yingying, LIU Zhen, et al. Progress and application of near-surface reflection and refraction method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015,58(9):3286-3305. (in Chinese))
- [7] 金丹,程建远,张宪旭. 高密度全数字地震勘探技术在煤田中的应用及效果分析[J]. 煤炭技术,2015,34(8):89-92. (JIN Dan, CHENG Jianyuan, ZHANG Xianxu. Application and effect analysis of single-point high-density digital seismic exploration in coal seismic exploration[J]. Coal Technology, 2015,34(8):89-92. (in Chinese))
- [8] 牛琳,李冰,王彦春,等. 高密度地震资料剩余静校正[J]. 石油地球物理勘探,2015,50(1):71-76. (NIU Lin, LI Bing, WANG Yanchun, et al. Residual static corrections for high-density seismic data [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(1):71-76. (in Chinese))
- [9] 褚春妍,孙黄利. 煤炭高密度三维地震勘探一体化技术的应用[J]. 工程地球物理学报,2017,14(3):333-338. (CHU Chunyan, SUN Huangli. Application of integration technology to high density 3D seismic coal exploration [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2017,14(3):333-338. (in Chinese))
- [10] 葛双成,梁国钱,陈夷,等. 探地雷达和高密度电阻率法在坝体渗漏探测中的应用[J]. 水利水电科技进展,2005,25(5):55-57. (GE Shuangcheng, LIANG Guoqian, CHEN Yi, et al. Application of GPR and high-density resistivity method to leakage detection of dam bodies[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2005,25(5):55-57. (in Chinese))
- [11] 郭凯. 高密度电法在水库大坝渗漏探测中的应用[J]. 中国煤炭地质,2018,30(12):106-108. (GUO Kai. Application of high density electric survey in reservoir dam leakage detection[J]. Coal Geology of China,2018,30(12):106-108. (in Chinese))
- [12] 孙钦同,徐淑贞,李才明. 应用高密度电阻率法实现坝体渗漏快速探测[J]. 地质与勘探,2019,55(6):1436-1441. (SUN Qintong, XU Shuzhen, LI Caiming. Rapid detection of dam seepage using the high-density resistivity method[J]. Geology and Exploration,2019,55(6):1436-1441. (in Chinese))
- [13] 林新星. 高密度电法探测在登云水库大坝渗漏勘察中的应用[J]. 水利建设与管理,2019,39(8):68-71. (LIN Xinxing. Application of high density electrical detection in dam leakage investigation of Dengyun Reservoir [J]. Water Resources Development & Management,2019,39(8):68-71. (in Chinese))
- [14] 刘晓,彭友文,袁志辉,等. 高密度电法在堤坝渗漏监测中的模拟及应用[J]. 水利水电科技进展,2021,41(5):71-75. (LIU Xiao, PENG Youwen, YUAN Zhihui, et al. Modeling and application of high-density electrical method in dam leakage monitoring [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5):71-75. (in Chinese))
- [15] 苏怀智,周仁练. 土石堤坝渗漏病险探测模式和方法研究进展[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):1-10. (SU Huaizhi, ZHOU Renlian. Research progress and prospect of earth-rockfill dam leakage detection modes and method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(1):1-10. (in Chinese))
- [16] 任众. 综合物探法在水库大坝渗漏探测中的应用与展望[J]. 陕西水利,2019(2):38-39. (REN Zhong. Application and prospect of comprehensive geophysical exploration method in leakage detection of reservoir dams [J]. Shaanxi Water Resources, 2019(2):38-39. (in Chinese))
- [17] 赵志宏,邢庆祝. 综合物探技术在水库堤防渗漏通道探测中的应用[J]. 矿产勘查,2011,2(3):322-324. (ZHAO Zhihong, XING Qingzhu. Application of comprehensive geophysical prospecting technology in hidden defects detection in reservoir levee [J]. Mineral Exploration,2011,2(3):322-324. (in Chinese))
- [18] 朱云峰. 综合物探在泉州某水库大坝渗漏探测中的应用[J]. 勘察科学技术,2020(6):56-59. (ZHU Yunfeng. Application of comprehensive geophysical prospecting in a reservoir dam leakage detection in Quanzhou[J]. Site Investigation Science and Technology, 2020(6):56-59. (in Chinese))
- [19] 蒋甫伟,王淼,丁浩,等. 综合物探方法在大坝渗漏探测中的应用分析[J]. 陕西水利,2020(1):28-30. (JIANG Fuwei, WANG Miao, DING Hao, et al. Application analysis of comprehensive geophysical methods in dam leakage detection [J]. Shaanxi Water Resources, 2020(1):28-30. (in Chinese))
- [20] 谭界雄,杜国平,高大水,等. 声纳探测白云水电站大坝渗漏点的应用研究[J]. 人民长江,2012,43(1):36-37. (TAN Jiexiong, DU Guoping, GAO Dashui, et al. Application of sonar in seepage detection of Baiyun Hydropower Station[J]. Yangtze River,2012,43(1):36-37. (in Chinese))
- [21] 刘迪,李雪娇,于艳秋. 声纳渗流检测于桥水库大坝渗漏点的应用研究[J]. 海河水利,2013(3):46-47. (LIU Di, LI Xuejiao, YU Yanqiu. Application research of sonar in seepage detection of Yuqiao Reservoir dam[J]. Haihe Water Resources,2013(3):46-47. (in Chinese))
- [22] 何铁炎,王安源. 声纳渗流探测技术在大库斯台水库大坝渗漏检测中的应用[J]. 湖南水利水电,2020(1):

26-30. (HE Teyan, WANG Anyuan. Application of sonar seepage detection technology in leakage detection of Dakusitai Reservoir dam [J]. Hunan Hydro & Power, 2020(1):26-30. (in Chinese))

[23] 樊哲超, 陈建生, 李世兴. 环境同位素和模糊聚类法研究堤坝渗漏[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 37-42. (FAN Zhechao, CHEN Jiansheng, LI Shixing. Application of environmental isotope and fuzzy clustering method to study leakage from embankment[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 37-42. (in Chinese))

[24] 蒋甫伟, 宋金平, 汪新健, 等. 地下水示踪技术在水库渗漏勘察中的应用研究[J]. 工程技术研究, 2019, 4(21): 79-80. (JIANG Fuwei, SONG Jinping, WANG Xinjian, et al. Application research of groundwater tracer technology in reservoir leakage investigation [J]. Engineering and Technological Research, 2019, 4(21): 79-80. (in Chinese))

[25] 杨会峰, 白华, 程彦培, 等. 基于氯离子示踪法深厚包气带地区地下水补给特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(1): 30-39. (YANG Huifeng, BAI Hua, CHEGN Yanpei, et al. Characteristics of groundwater replenishment in deep and thick unsaturated zone based on chloride tracer method [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(1): 30-39. (in Chinese))

[26] 程和森, 王守家, 易瑞吉, 等. 利用 ICP 化学示踪法现场观测大坝渗漏[C]//第五届全国水利工程渗流学术研讨会论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2006: 318-323.

[27] 邱辉阳, 黄勇, 王建平. 示踪技术和水化学分析在水库渗漏勘察中的综合应用[J]. 勘察科学技术, 2017(2): 45-50. (QIU Huiyang, HUANG Yong, WANG Jianping. Comprehensive application of tracer technique and hydrochemical analysis in reservoir leakage investigation [J]. Site Investigation Science and Technology, 2017(2): 45-50. (in Chinese))

[28] 韩文娟, 顾梅. 示踪试验在水库大坝渗漏检测中的应用[J]. 治淮, 2018(1): 19-21. (HAN Wenjuan, GU Mei. Application of tracer test in leakage detection of reservoir dams[J]. Harnessing the Huaihe River, 2018(1): 19-21. (in Chinese))

[29] 钟铨杰, 张彦兵, 黄勇. 基于示踪试验的水库坝体渗漏通道参数估算[J]. 勘察科学技术, 2021(1): 11-15. (ZHONG Quanjie, ZHANG Yanbin, HUANG Yong. Estimation of leakage passage parameters of reservoir dam based on tracer test [J]. Site Investigation Science and Technology, 2021(1): 11-15. (in Chinese))

[30] 沈添耀, 董海洲. 基于高密度电法和综合示踪法的堤坝渗漏通道联合探测方法[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(2): 63-69. (SHEN Tianyao, DONG Haizhou. Combined detection method of dam leakage channels based on high-density electrical method and comprehensive tracer method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(2): 63-69. (in Chinese))

[31] 黄华龙. 有关水库渗漏检测的实例分析[J]. 水利科技与经济, 2015, 21(2): 118-120. (HUANG Hualong. Example analysis of reservoir leakage detection[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2015, 21(2): 118-120. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-11-18 编辑: 熊水斌)

(上接第 49 页)

[16] 蔡忠祥, 刘陕南, 高承勇, 等. 基于混凝土损伤模型的灌注桩水平承载性状分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 2): 4032-4040. (CAI Zhongxiang, LIU Shannan, GAO Chengyong, et al. Analysis of lateral response of bored piles based on concrete damaged plasticity model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup2): 4032-4040. (in Chinese))

[17] ZHU Bin, WEN Kai, KONG Deqiong, et al. A numerical study on the lateral loading behaviour of offshore tetrapod piled jacket foundations in clay [J]. Applied Ocean Research, 2018, 75: 165-177.

[18] 吕凡任, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 软土地基上微型桩抗压和抗拔特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(3): 99-105. (LYU Fanren, CHEN Renpeng, CHEN Yunmin, et al. Field tests on compression and uplift behavior of micropiles in soft ground [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(3): 99-105. (in Chinese))

[19] 王书行. 水平偏心荷载下群桩受荷性状模型试验及设计方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

[20] 赵春风, 王卫中, 赵程, 等. 砂土中竖向和弯矩荷载下单桩水平承载特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 184-190. (ZHAO Chunfeng, WANG Weizhong, ZHAO Cheng, et al. Lateral bearing capacity of single piles under vertical and moment load in sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 184-190. (in Chinese))

[21] 邹新军, 丁仕进, 赵灵杰. 水平力(H)-扭矩(T)组合受荷桩承载特性模型试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(3): 126-133. (ZOU Xinjun, DING Shijin, ZHAO Lingjie. Model testing investigation on bearing behavior of a single pile under combined H - T loads [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(3): 126-133. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-11-11 编辑: 熊水斌)