

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.007

堤坝渗漏入口示踪剂运移规律

梁越^{1,2,3}, 邓惠丹¹, 喻金桃⁴, 许彬^{1,2,3}, 饶育锋¹

(1. 重庆交通大学河海学院; 2. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心;
3. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室; 4. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司)

摘要: 为准确定位堤坝的渗漏入口, 基于示踪法, 采用室内模型试验和 Fluent 数值模拟方法, 分析了示踪剂投放量、渗漏规模及示踪剂投放点位置对示踪剂运移规律的影响。结果表明: 增加示踪剂投放量, 壁面示踪剂峰值质量分数显著增大, 穿透时间缩短, 示踪剂运移速度加快; 增大渗漏规模, 示踪剂流失速率加快, 壁面示踪剂峰值质量分数减小, 示踪剂分布形状由圆形向椭圆形转变, 且其长轴会沿示踪剂投放点与渗漏入口之间的连线方向排列, 据此可推断渗漏入口方向; 减小示踪剂投放点与渗漏入口距离, 壁面示踪剂峰值质量分数减小, 穿透时间延长, 示踪剂分布面积显著增大。

关键词: 堤坝渗漏识别; 示踪法; 示踪剂运移规律; 模型试验; 数值模拟

Tracer transport patterns in levee seepage inlet

Liang Yue^{1,2,3}, Deng Huidan¹, Yu Jintao⁴, Xu Bin^{1,2,3}, Rao Yufeng¹

(1. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University;
2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University;
3. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University;
4. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd.)

Abstract: To accurately locate the levee seepage inlet, laboratory model tests and Fluent numerical simulations based on the tracer method were employed, and the effects of tracer dosage, seepage scale, and tracer injection point location on tracer transport pattern were analyzed. The results indicate that increasing the tracer dosage significantly raises the peak tracer mass fraction on the wall, shortens the penetration time, and accelerates tracer transport velocity. Enlarging the seepage scale accelerates the tracer loss rate, reduces the peak tracer mass fraction on the wall, and transforms the tracer distribution shape from circular to elliptical, with its major axis aligning along the line connecting the tracer injection point and the seepage inlet. This alignment can be used to infer the direction of the seepage inlet. Reducing the distance between the tracer injection point and the seepage inlet decreases the peak tracer mass fraction on the wall, prolongs the penetration time, and significantly expands the tracer distribution area.

Key words: levee seepage identification; tracer method; tracer transport pattern; model experiment; numerical simulation

截至 2024 年, 我国已建成各类水库大坝 9.4 万余座, 5 级以上堤防约 32 万 km, 这不仅为国民经济与社会发展筑牢了防洪安全屏障, 更创造了显著的社会、经济与生态综合效益。但大部分堤坝年代久远, 受当时经济、技术水平的限制, 很多工程存在建设等级低、施工质量差等问题, 难以承受极端事件^[1], 潜在风险不断增加^[2]。渗漏是堤坝的一个重大隐患^[3], 快速有效地定位和合理处置渗漏隐患是保障堤坝安全的关键^[4]。

目前堤坝渗漏探测方法主要有野外巡测^[5]、地质钻探法^[6]、地球物理勘探法^[7]以及示踪法^[8]。地质钻探法仅能探测钻孔周边的地质情况, 而在堤坝整体地质探测中, 需布设大量钻孔, 这不仅会对堤坝结构造成较大破坏, 还存在成本偏高、经济效益不佳的问题。地球物理勘探法是识别潜在内部侵蚀区域的有效手段^[9], 其原理是利用堤坝隐患处与周围地质间的物理性质差异寻找地质异常区域, 不破坏堤坝结构, 不影响使用性能^[10]。常用的地球物理勘探法主要分为地震法类、电法类、电磁法类^[11]。陈亮等^[12]以跨孔四极法和三极法对地下连续墙进行渗漏缺陷探测数值模拟及室内试验研究, 认为跨孔电法能够精确地定位地下连续

基金项目: 国家自然科学基金项目(52379097, 52509138); 广西科技计划项目(桂科 AA23062023); 重庆市水利科技项目(CQSLK-2024005); 重庆市教委科学技术研究计划项目(KJQN202300744); 重庆交通大学高层次人才引进计划项目(F1250081)

作者简介: 梁越(1985—), 男, 教授, 博士, 主要从事水利工程灾害形成机理与防治研究。E-mail: liangyue2560@163.com

通信作者: 邓惠丹(2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事水利工程灾害形成机理与防治研究。E-mail: 1348695302@qq.com

墙渗漏位置;Abdulsamad 等^[13]构建的岩石物理模型,不仅能够表征导电率与带电率,还能精准刻画地下水从渗漏管道出口端至堤坝底部的流动路径。地球物理勘探法可以确定地层中可能的导水通道,但较难确定这些通道是否造成了渗漏。

相比于地球物理勘探法,示踪法可以对水库渗漏问题提出更合理的解决方案:沈添耀等^[10]提出了一种基于高密度电法与综合示踪法的堤坝渗漏通道联合探测方法,成功揭示了渗漏位置与范围;陈江等^[14]利用温度示踪法成功检测并识别了水下混凝土结构的裂缝宽度;刘国庆等^[15]针对石梁河水库北泄洪闸异常渗漏问题的研究表明,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;张治国等^[16]设计了一套可对渗流轨迹进行示踪的可视化模型试验装置,探究了渗流侵蚀过程中的砂土成拱效应及砂土位移演变规律;Stefania 等^[17]以人工甜味剂为示踪剂材料,将示踪剂法与多元分析、迁移模型方法结合,研究了垃圾填埋场的渗漏来源;戚海博等^[18]利用单孔热响应获得了高时空分辨率的地下水渗流场分布特征,并认为应用单孔热响应评价堤防渗流场具有可行性;Yu 等^[19]通过结合示踪法和电阻率层析成像法,成功检测出垂直屏障泄漏并确定了泄漏点位置;梁越等^[20]以透明土为材料,采用自研的 PIV-PLIF 渗流侵蚀试验系统研究了水力梯度对渗流侵蚀过程中孔隙溶液流速分布以及细颗粒运动的影响。

综上,示踪法能及时并准确找出渗漏隐患,但针对示踪剂运移规律的研究相对匮乏。掌握示踪剂运移规律是精准定位渗漏通道的核心关键,直接关系到示踪过程能否有效反映目标信息、能否为工程实践提供可靠参考依据等核心问题。鉴于此,本文通过室内模型试验探究示踪剂在渗漏条件下的运移规律,并结合 Fluent 软件进行模拟验证,研究示踪剂投放量、渗漏规模及示踪剂投放点位置对示踪剂运移规律的影响,以期为示踪法探测渗漏通道提供参考。

1 研究方法

1.1 模型试验

1.1.1 试验装置

试验装置主要包括电导率数据采集系统、示踪剂投放系统以及渗漏模型装置。电导率数据采集系统由数据采集控制计算机和电导率仪组成,电导率仪通过渗漏壁面各采集点的石墨探头连续采集各点的电导率值并将数据实时传送至 PC 端,计算机每 200 ms 采集并存储一次数据。试验水箱采集点如图 1(a)所示。示踪剂投放系统由示踪剂存放桶和蠕动泵组成。蠕动泵采用慧宇 BT100J-1A 型蠕动泵,通过设置不同的转速及蠕动泵工作时间调节示踪剂的投放速度和投放量,通过改变不同的吸力(即增加或者减少水泵数量)实现不同的渗流流量(渗漏规模)。通过设置 3 处与渗漏入口(位于 5 号采集点处)不同距离的示踪剂投放口(图 1(b)),模拟示踪剂不同的投放位置。

1.1.2 试验工况

本文主要分析示踪剂投放量、渗漏规模、示踪剂投放点位置 3 个变量对示踪剂分布及运移规律的影响,工况设置见表 1。

1.1.3 试验流程

①电导率校准及传感器标定。②配制示踪剂:试验中的示踪剂是由 NaCl 质量分数大于 99.5%的分析氯化钠和自来水配制而成的饱和盐溶液。③打开水龙头,将试验水箱注满水,打开渗漏通道开关(即水泵),待水位平稳后开始采集电导率,随后立即打开示踪剂投放系统中的蠕动泵开关,开始注入示踪剂,直至示踪剂投放量达到试验设计值;待水箱中各点电导率值与

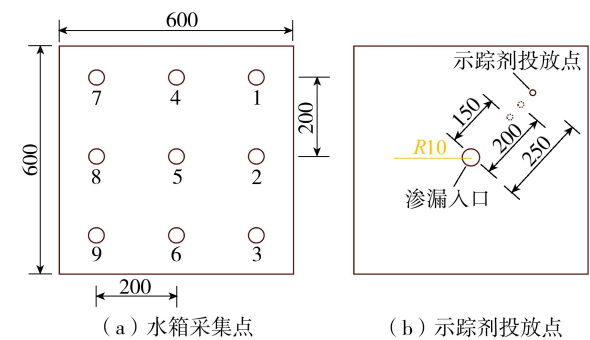


图 1 试验水箱采集点和示踪剂投放点设置(单位:mm)
Fig. 1 Setting of sampling points for test water tank and tracer injection points (unit: mm)

表 1 试验工况
Table 1 Experimental condition

编号	示踪剂投放点与渗漏入口距离/mm	渗漏规模/(L/min)	示踪剂投放量/mL
T1	250	5.0	35
T2	250	5.0	70
T3	250	5.0	105
G1	250	2.5	70
G2	250	7.5	70
J1	150	5.0	70
J2	200	5.0	70

自来水电导率相近时,认为渗漏壁面不再存在示踪剂,停止采集。④其他工况重复步骤③即可。

1.2 数值模拟

Fluent 是一种求解偏微分方程的数值方法,基于有限容积法进行数值模拟。主要包括三大模块:①前处理模块主要用于创建几何模型、网格划分;②求解器模块主要用于网格计算,需要给定合适的计算模型、参数、边界条件等求解条件;③后处理模块主要用于分析和可视化结果。

1.2.1 模型构建

在 Geometry 中建立水箱的几何模型(图 2),其内径尺寸为 600 mm×600 mm×60 mm(长×宽×高)。为了降低模型墙体边界对示踪剂运移产生的影响,示踪剂投放位置在渗漏入口周围 400 mm×400 mm 范围内。在保证计算精确度的情况下,最小面网格设置在 0.003 m 以下,最大面网格设置在 0.03 m 以下的计算结果可信度较高,网格划分如图 3。

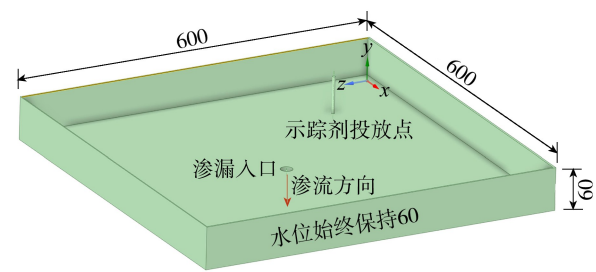


图 2 水箱的几何模型(单位:mm)

Fig. 2 Geometric model of water tank (unit: mm)

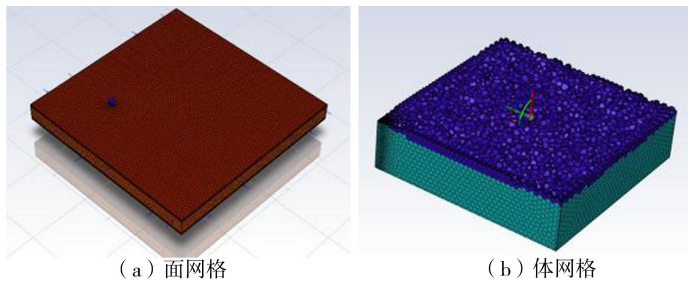


图 3 网格划分

Fig. 3 Grid division

模拟选用的模型为标准的 K-epsilon (2 eqn)模型,壁面函数选用 Standard wall function。网格划分时,将模型定义为没有空隙的流体区域,并在 mixture-template 中,仅留下水和盐水,使整个模型完全由水构成。模拟设有两个入口,1 个出口,其中 inlet1 为示踪剂投放入口,为更好地模拟实际工程中研究区域外的水会自动向研究区域内补充,将模型四周设为压力入口 inlet2,仅补充水而不注入盐水。示踪剂入口设定为质量流入口,示踪剂投放质量速率设定为 0.043 kg/s,质量分数为 1(初始状态视为“纯示踪剂”),通过设置不同的投放时长以模拟不同示踪剂投放量工况,待示踪剂投放完毕后,将 inlet1 设置为壁面即可停止投放示踪剂。出口设置为质量流出口,位于壁面的中心,通过设定不同的流出质量速率模拟不同渗漏规模。运算设置如下:步长为 0.005 s,步数为 10 000,最大迭代次数为 10。采集点设置与物理模型试验(图 1(a))中保持一致。

1.2.2 模拟工况设置

为了对模拟结果进行验证,采取与室内试验相同的工况设置,同样分别考虑了示踪剂投放量、渗漏规模、示踪剂投放点位置对渗漏过程中示踪剂运移的影响。

示踪剂电导率主要受温度、掺杂程度以及各向异性等影响。本文主要通过采集壁面各点的电导率推算对应点及整个坝面的示踪剂质量分数,从而得到示踪剂在壁面的分布及其运移规律。通过开展 26 组不同质量分数示踪剂的预试验,获得示踪剂质量分数与电导率呈线性关系:

w = 0.053 43N - 0.765 1 (1)

式中:w 为示踪剂质量分数;N 为电导率。

2 结果与分析

2.1 模型试验结果与分析

试验开始前,开展了一组无渗漏,示踪剂投放量为 70 mL 的预试验。由图 4 可知,示踪剂运移约 0.99 万 s 时,5 号采集点电导率达到峰值,9 号采集点的电导率在约 1.98 万 s 才达到峰值;达到峰值后,各采集点电导率曲线开始下降,最终

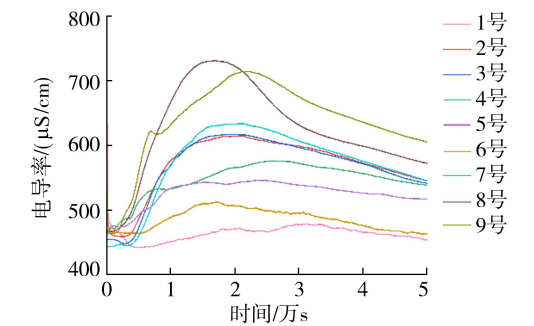


图 4 无渗漏时壁面各采集点电导率变化曲线

Fig. 4 Conductivity change curves at each sampling point of wall when there is no seepage

均停留在 450~580 $\mu\text{S}/\text{cm}$,并趋于稳定。

2.1.1 示踪剂投放量对示踪剂运移的影响

对比图 4 和图 5 (b)可知,存在渗漏时,5 号采集点在 61 s 已达到峰值电导率,相较于无渗漏时,电导率达到峰值时间缩短了 9839 s。无渗漏时,4 号、8 号、9 号等采集点的电导率会随着时间的增加而逐渐增加直至峰值,但是发生渗漏时,4 号、8 号、9 号等采集点的电导率几乎没有变化,主要是因为示踪剂随着水流从渗漏入口流出水箱,无法运移至这些采集点。由此,渗漏的存在大大加快了示踪剂的运移速度,也减小了示踪剂扩散的区域。

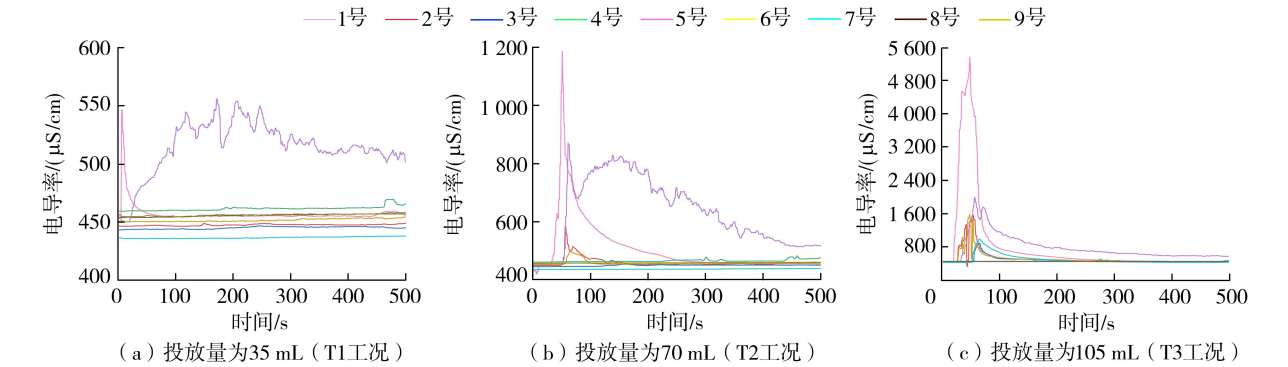


图 5 不同示踪剂投放量下各采集点电导率变化曲线

Fig. 5 Conductivity change curves at each sampling point with different tracer dosages

2.1.2 渗漏规模对示踪剂运移的影响

由图 6 可知,随着渗漏规模的增加,1 号采集点的峰值电导率减小,意味着坝面上的示踪剂质量分数随着渗漏规模增加而减小。因为示踪剂投放点位于 1 号采集点和渗漏入口之间,所以渗漏规模增大后,能够运移至 1 号采集点的示踪剂会减少。但是,随着渗漏规模的增加,渗漏入口周围的峰值电导率也减小。虽然渗漏规模增加导致更多的示踪剂流向渗漏入口,但这意味着有更多的水流向渗漏入口,进一步减小了坝面上的示踪剂质量分数,所以渗漏入口周围的电导率也减小。

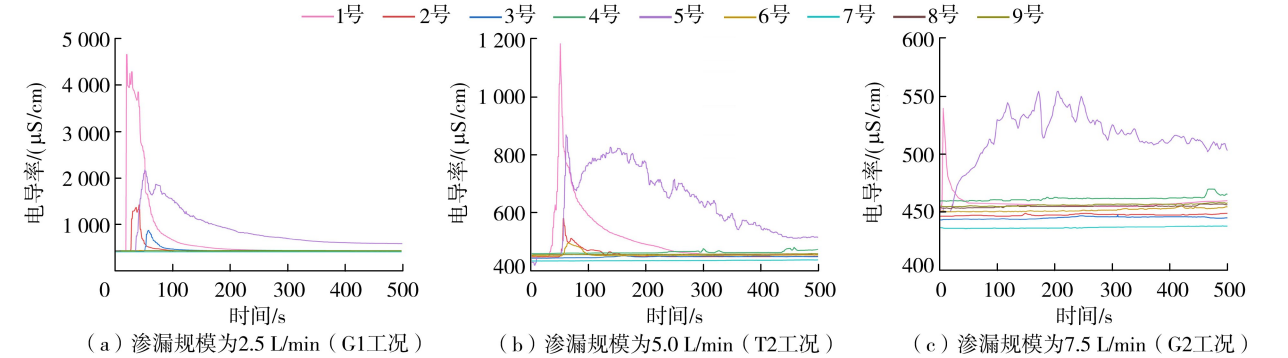


图 6 不同渗漏规模各采集点电导率变化曲线

Fig. 6 Conductivity change curves at each sampling point for different seepage scales

2.1.3 示踪剂投放点位置对示踪剂运移的影响

由图 7 可知,随着示踪剂投放点与渗漏入口距离的减小,5 号采集点更快达到峰值电导率且峰值电导率更大。其他采集点的电导率达到峰值的时间有所延后且峰值更小,是因为距离越小,示踪剂能够更快通过渗漏入口流失,导致水箱内示踪剂余量很少,所以其他采集点电导率峰值很小且达到峰值所需时间较长。

2.2 数值模拟结果与分析

因采集点为对称式布置,因此只对 1 号、2 号、3 号、4 号、5 号和 9 号采集点进行分析。

2.2.1 示踪剂投放量对示踪剂运移的影响

由图 8 可知,6 个采集点的示踪剂质量分数曲线先迅速上升至峰值质量分数再迅速下降最后趋近于 0,且示踪剂质量分数从 1/2 峰值上升到峰值的时间明显大于从峰值下降到其 1/2 的时间。5 号采集点的曲线不平滑,是由于其位于渗漏入口周围,流态相较于其他采集点更复杂。随着示踪剂投放量的增加:①各采集

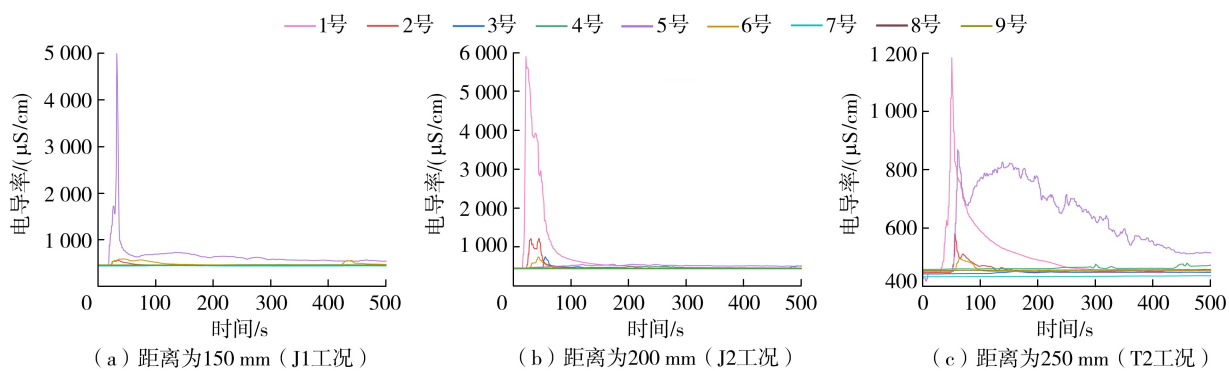


图 7 不同示踪剂投放点各采集点电导率变化曲线

Fig. 7 Conductivity change curves at each sampling point with different tracer injection point locations

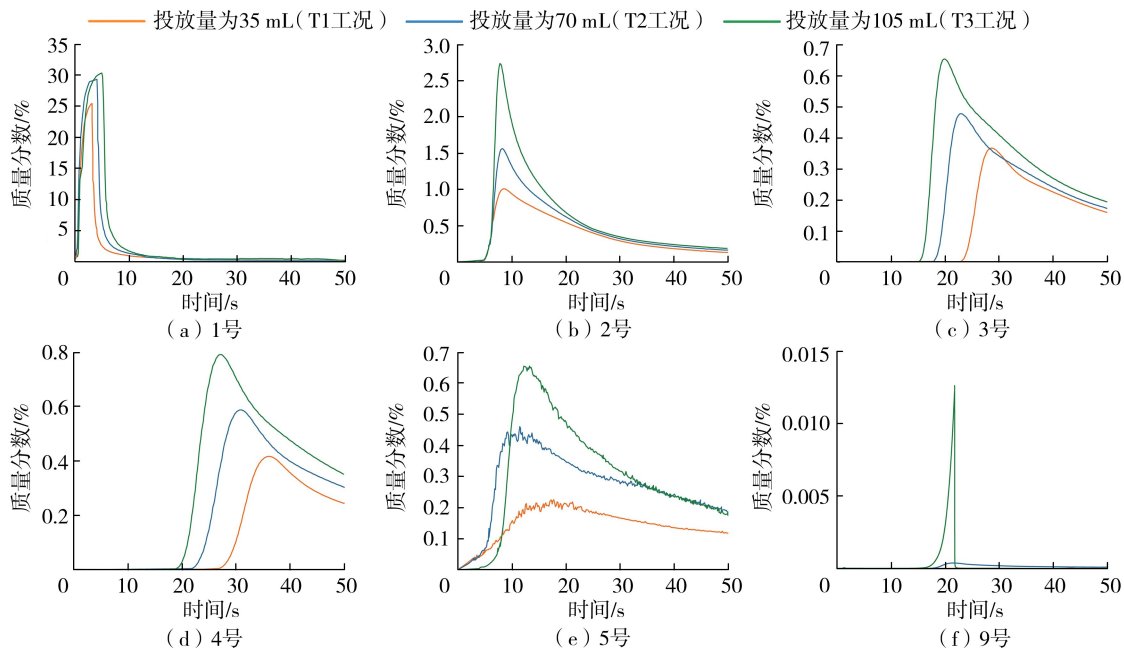


图 8 不同示踪剂投放量各采集点示踪剂质量分数曲线

Fig. 8 Curves of tracer mass fraction at each sampling point under different tracer dosages

点的峰值质量分数逐渐增大;②除 1 号采集点,其他采集点达到峰值质量分数的时间均提前,是因为示踪剂投放位置和 1 号采集点的距离最近,且不同示踪剂投放量是通过控制示踪剂投放时间实现的,其他采集点提前可能是因为随着示踪剂投放量增加,浓度梯度增加,导致示踪剂运移加快;③曲线的峰宽越宽,这是因为在同样大小的水流作用下,示踪剂投放量越大,示踪剂投放时间越长。峰值质量分数越大,达到峰值后的下降速度越快,这是由于峰值质量分数越大,采集点与周围水体的浓度梯度越大,示踪剂运移越快。3 种工况下 9 号采集点的质量分数均十分微小,所以后续不对 9 号采集点进行分析。

渗漏入口的存在会显著影响示踪剂质量分数云图的形状,浓度羽由椭圆形逐渐发展为圆形,影响范围逐渐扩散,呈对称分布现象,对称轴为示踪剂投放点与渗漏入口的连线(图 9)。

2.2.2 渗漏规模对示踪剂运移的影响

由图 10 可知,示踪剂质量分数从 1/2 峰值上升到峰值的时间明显大于从峰值下降到其 1/2 的时间。随着渗漏规模增大:①各采集点示踪剂峰值质量分数减小,这是因为随着渗漏规模的增加,水流挟带示踪剂的能力增强,导致更多的示踪剂随水流从渗漏入口流失,所以峰值质量分数减小且达到峰值的时间增加;②示踪剂质量分数由峰值下降至一半所需时间出现小幅增加,可能是因为渗漏入口对示踪剂分子的作用力与浓度梯度的作用力出现了部分抵消;③1 号采集点峰值宽度越窄,是因为随着渗漏规模的增大,示踪剂更容易随着水流的流动而流失或者由于水流流速的增加,示踪剂离开 1 号采集点速度变得更快。除 1 号采集点外,其他采集点与示踪剂投放点位置有一定距离,其峰值质量分数到达时间逐渐延后,曲线峰值宽度越来越宽,

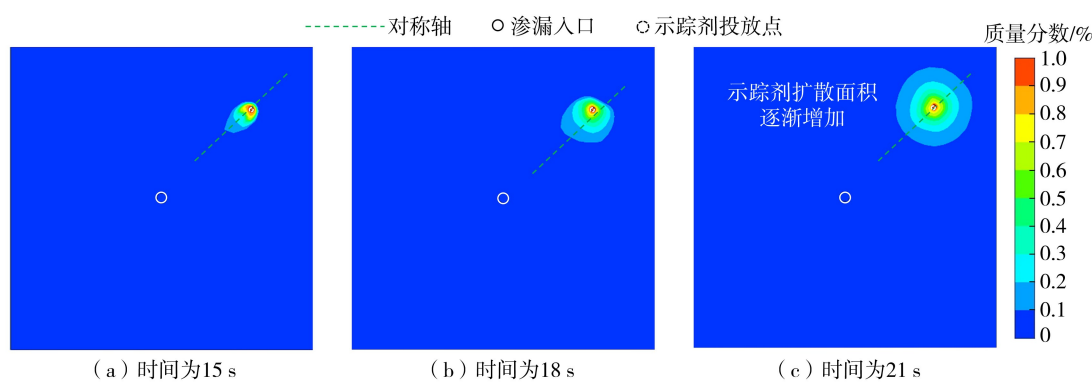


图 9 不同时间示踪剂质量分数云图 (T2 工况)

Fig. 9 Tracer mass fraction contour map at different times (T2 condition)

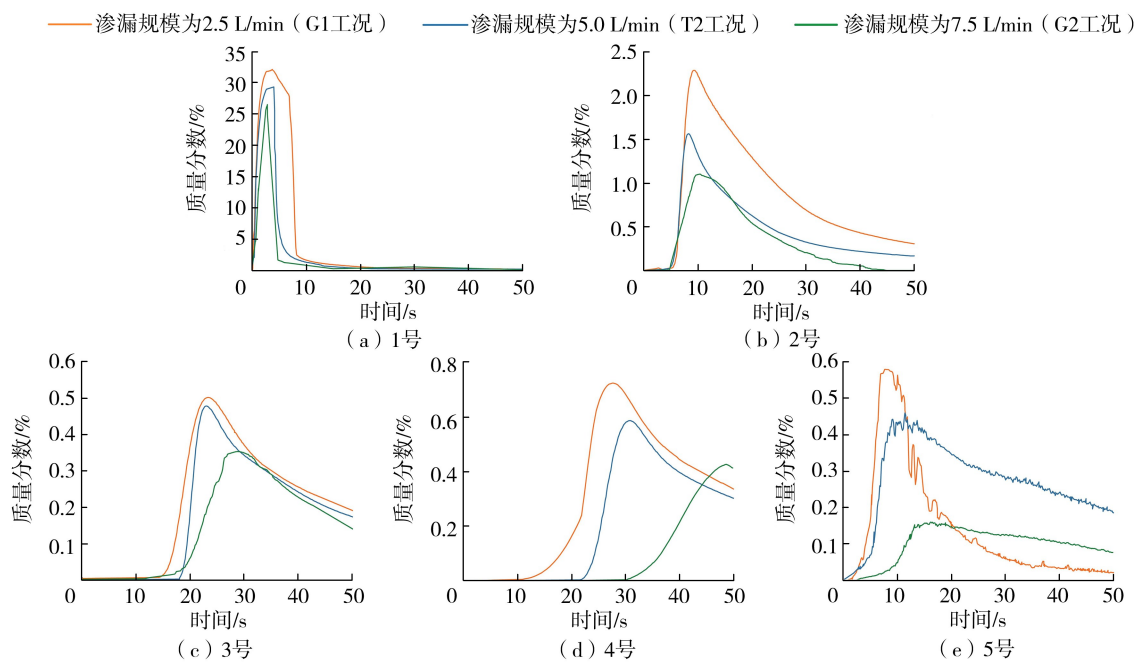


图 10 不同渗漏规模各采集点质量分数变化曲线

Fig. 10 Curves of mass fraction variation at each sampling point under different seepage scales

是因为随着渗漏规模的增加,示踪剂更容易从渗漏入口流失,示踪剂在壁面上的量较少,运移到其他采集点的速度越缓,因此采集点与示踪剂投放点存在一定距离的情况下,渗漏规模的改变会影响穿透时间。1 号采集点,3 种工况的峰值质量分数到达时间相差不大,是因为示踪剂投放点与 1 号采集点的距离太近,在投放示踪剂的过程中,示踪剂可以将其完全覆盖,所以采集点与示踪剂投放点距离过近的情况下,渗漏规模的改变不能影响穿透时间。

由图 11 可知,随着渗漏规模的增大,壁面上示踪剂分布的面积增大,这是因为随着渗漏规模的增大,水流对示踪剂的挟带作用越强。渗漏规模为 2.5 L/min 时,示踪剂的质量分数云图为圆形,也没有凸向渗漏入口的凸点,说明渗漏规模较小时对示踪剂的运移影响不明显。渗漏规模为 5 L/min 时,示踪剂质量分数云图开始向渗漏入口凸出,增加至 7.5 L/min 时,凸点弱化,但凸点仍指向渗漏入口的方向。因此,实际工作中,可以通过示踪剂质量分数云图的形状推测渗漏入口的大致方向。

2.2.3 示踪剂投放点位置对示踪剂运移的影响

由图 12 可知,1 号采集点示踪剂质量分数变化曲线的宽度也随距离增加而增加,这是因为随着距离的增加,示踪剂运移受渗漏入口的影响会逐渐减小,进而导致示踪剂运移得更久。同时,随着投放点与渗漏入口间距离的增大,示踪剂质量分数减小得更快,但最终都会趋近于 0,这是因为质量分数在达到峰值后开始下降的时间段内,1 号采集点的质量分数较周围水体来说存在较大浓度梯度,故示踪剂会迅速扩散至质量分

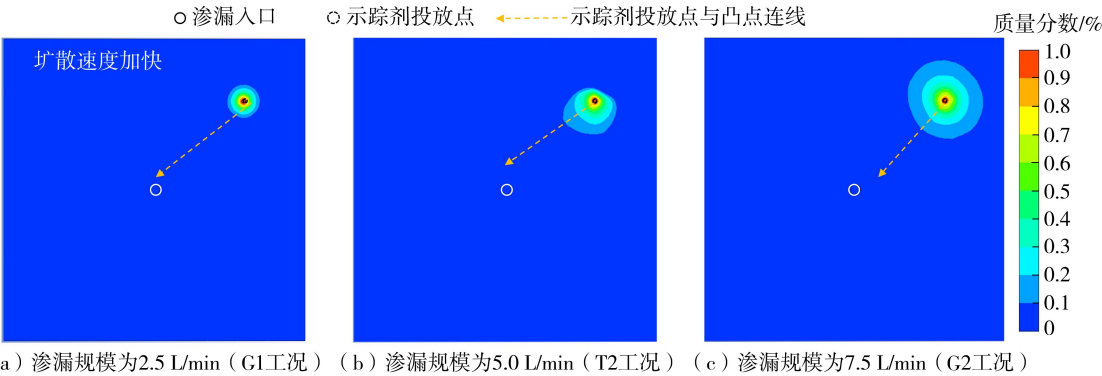


图 11 不同渗漏规模下 15 s 时示踪剂质量分数云图

Fig. 11 Cloud map of tracer mass fraction at 15 seconds under different seepage scales

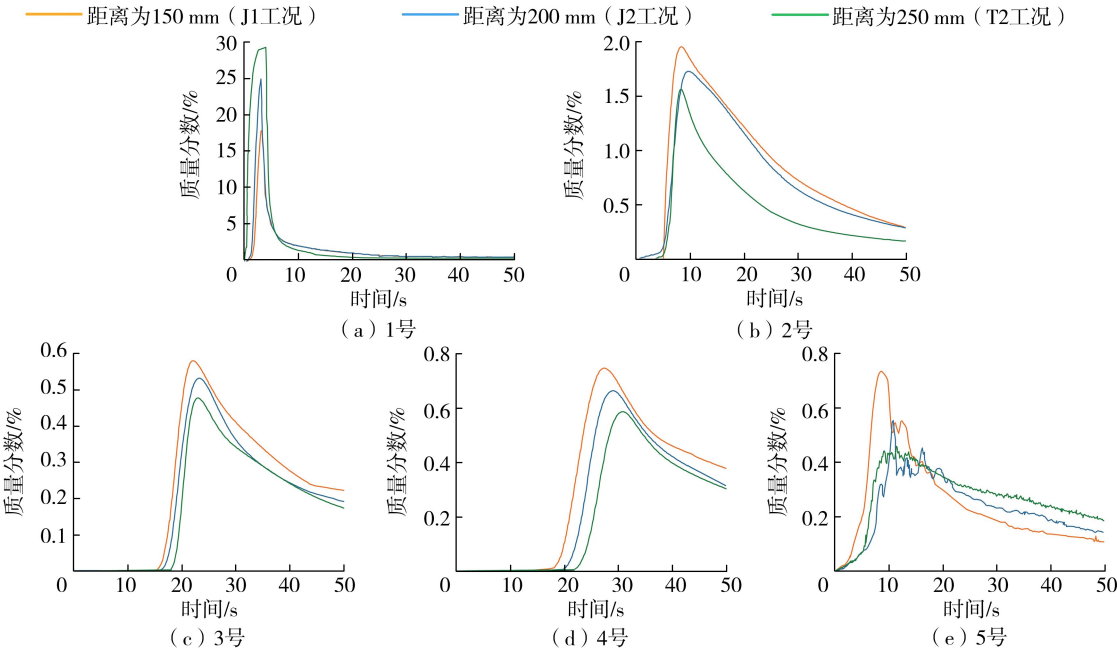


图 12 不同示踪剂投放点各采集点示踪剂质量分数变化曲线

Fig. 12 Curves of tracer mass fraction variation at each sampling point under different tracer injection point locations

数较小区域,加之示踪剂停止投放没有示踪剂对 1 号采集点进行补充,这两部分原因导致示踪剂质量分数迅速下降;至于距离越大,浓度下降得越快,这同样是因为浓度梯度大造成的,因为距离越小,示踪剂受渗漏入口的影响越大,即示踪剂更容易从渗漏入口流失,导致采集点的峰值浓度更低,浓度梯度更小,所以浓度下降越慢。随着示踪剂的继续运移,浓度梯度降低,所以浓度下降的速度开始变慢。2 号、3 号、4 号和 5 号相应的图表数据呈现如图 12 所示,由于其变化规律的分析与前文类似,这里便不再赘述。

由图 13 可知,示踪剂投放点与渗漏入口距离为 150 mm 时,示踪剂影响范围最大,且质量分数云图凸向渗漏入口的凸点较为明显,说明渗漏入口已经开始影响示踪剂的运移,且已经有示踪剂从渗漏入口流失。距离为 200、250 mm 时,虽然同样存在凸点,但其影响范围大大减小,主要是因为随着示踪剂投放点与渗漏入口距离的增大,示踪剂影响范围逐渐减小,但示踪剂质量分数云图的圆形始终存在凸点,且凸点位置基本朝向渗漏入口,说明渗漏入口的大致方向可以通过模拟进行推断。同时,参考各采集点的示踪剂质量分数变化情况,可知随着距离的增加,渗漏入口对示踪剂分布及运移的影响减弱,且响应时间会延长。

3 结 论

a. 随着示踪剂投放量的增加,壁面上的峰值质量分数增大,穿透时间和主体穿透时间变短,因此加大示踪剂投放量能够加快示踪剂的运移速度。

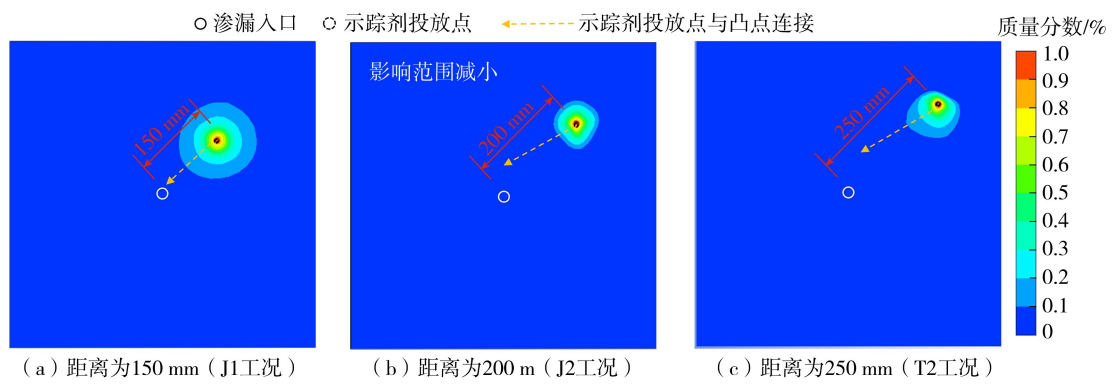


图 13 不同示踪剂投放点 15 s 时示踪剂质量分数云图

Fig. 13 Cloud map of tracer mass fraction at 15 seconds under different tracer injection point locations

b. 随着渗漏规模的增大,示踪剂随着水流流失的速度加快,壁面上的峰值质量分数减小,主体穿透时间变短,示踪剂的分布形状会从圆形逐渐转变为椭圆形,并且其长轴会沿示踪剂投放点与渗漏入口之间的连线方向排列,因此可通过分析示踪剂的分布形状,大致推测渗漏入口的方向。

c. 示踪剂投放点与渗漏入口之间的距离越小,壁面上的峰值质量分数越小,主体穿透时间越长,示踪剂的分布面积会显著增大。

参考文献:

[1] 蔡跃波,向衍,盛金保,等. 重大水利工程大坝深水检测及突发事件监测预警与应急处置研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2023,45(3): 441-458. (Cai Yuebo, Xiang Yan, Sheng Jinbao, et al. Deep-water detection, monitoring, early warning and treatment of emergencies of major water conservancy projects:a review[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(3):441-458. (in Chinese))

[2] Wu Zhongru, Peng Yan, Li Zhanchao, et al. Commentary of research situation and innovation frontier in hydro-structure engineering science[J]. Science China Technological Sciences,2011,54(4):767-780.

[3] 陈建生,何会祥,王涛. 基于熵权-可变模糊集模型的堤坝渗漏探测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(4):358-363. (Chen Jiansheng, He Huixiang, Wang Tao. Dam leakage detection based on entropy weight-variable fuzzy set model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(4):358-363. (in Chinese))

[4] 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))

[5] 周仁练,马佳佳,苏怀智. 基于无人机载红外-可见双光成像的土石堤坝渗漏巡查方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023,51(3):154-161. (Zhou Renlian, Ma Jiajia, Su Huaizhi. Leakage inspection method of earth-rock embankment based on UAV with infrared and visible dual-light imaging[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):154-161. (in Chinese))

[6] Wu Yao,Xu Shilang,Li Qinghua,et al. Estimation of real fracture parameters of a dam concrete with large size aggregates through wedge splitting tests of drilled cylindrical specimens[J]. Engineering Fracture Mechanics,2016,163:23-36.

[7] 白广明,张守杰,卢建旗,等. 流场法探测堤坝渗漏数值模拟及分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):52-58. (Bai Guangming, Zhang Shoujie, Lu Jianqi, et al. Numerical modelling and verification of the dam leakage detection using the quasi-flowing field method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(1):52-58. (in Chinese))

[8] Mozafari M,Raeisi E,Zare M. Water leakage paths in the Doosti Dam,Turkmenistan and Iran[J]. Environmental Earth Sciences, 2012,65(1):103-117.

[9] Cardarelli E,Cercato M,Di Filippo G. Geophysical investigation for the rehabilitation of a flood control embankment[J]. Near Surface Geophysics,2010,8(4):287-296.

[10] 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))

[20] 毕金强,高邈,鲍可馨,等. 沿海航道数字孪生场景构建方法研究[J]. 水道港口,2024,45(6):939-946. (Bi Jinqiang, Gao Miao, Bao Kexin, et al. Research on construction method of digital twin scene of coastal channel[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2024, 45(6):939-946. (in Chinese))

[21] 马瑞鑫,薛礼,问皓,等. 数字孪生航道建设及航道智慧化指标体系研究[J]. 水道港口,2024,45(4):612-620. (Ma Ruixin, Xue Li, Wen Hao, et al. Research on digital twin waterway construction and intelligent waterway indicator system[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2024, 45(4):612-620. (in Chinese))

[22] 庞启秀,李怀远,王克勤,等. 航道疏浚全过程智能监管系统研发[J]. 航海技术,2024(2):18-21. (Pang Qixiu, Li Huaiyuan, Wang Keqin, et al. Research and development of intelligent supervision system for the whole process of channel dredging[J]. Marine Technology, 2024(2):18-21. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 08 - 01 编辑:刘晓艳)

+++++

(上接第 60 页)

[11] 徐力群,张国琛,马泽锴. 土石堤坝隐患探测综合物探技术发展综述[J]. 地球物理学进展,2022,37(4):1769-1779. (Xu Liqun, Zhang Guochen, Ma Zekai. Development of comprehensive geophysical prospecting technology for hidden danger detection of earth rock dams[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(4):1769-1779. (in Chinese))

[12] 陈亮,颜书法,万昱. 跨孔电法探测地下连续墙渗漏隐患的应用研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(8):1605-1614. (Chen Liang, Yan Shufa, Wan Yu. Application of cross-hole electrical method to detection of the hidden leakage of diaphragm walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(8):1605-1614. (in Chinese))

[13] Abdulsamad F, Revil A, Ahmed A S, et al. Induced polarization tomography applied to the detection and the monitoring of leaks in embankments[J]. Engineering Geology, 2019, 254:89-101.

[14] 陈江,熊杰,李宇驰,等. 基于热效应的涉水混凝土工程裂缝监测方法[J]. 工程科学与技术,2023,55(1):296-303. (Chen Jiang, Xiong Jie, Li Yuchi, et al. Crack monitoring method for wading concrete engineering based on thermal effects[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(1):296-303. (in Chinese))

[15] 刘国庆,洪云飞,王蔚,等. 联合示踪探测方法在石梁河水库大坝渗漏中的应用[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):74-81. (Liu Guoqing, Hong Yunfei, Wang Wei, et al. Application of combined tracer detection method in dam leakage of Shilianghe Reservoir[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6):74-81. (in Chinese))

[16] 张治国,程志翔,张孟喜,等. 盾构隧道接缝漏损诱发水土流失模型试验及离散元分析[J]. 中国公路学报,2023,36(1):162-175. (Zhang Zhiguo, Cheng Zhixiang, Zhang Mengxi, et al. Model test and discrete element analysis of soil and water loss induced by joint leakage of shield tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(1):162-175. (in Chinese))

[17] Stefania G A, Rotiroti M, Buerge I J, et al. Identification of groundwater pollution sources in a landfill site using artificial sweeteners, multivariate analysis and transport modeling[J]. Waste Management, 2019, 95:116-128.

[18] 戚海博,顾凯,张博,等. 基于单孔热响应测试的地下水渗流场评价:以扬中指南村崩岸场地为例[J]. 工程地质学报,2022,30(5):1713-1720. (Qi Haibo, Gu Kai, Zhang Bo, et al. Evaluation of groundwater flow field based on single-borehole thermal response test: a case study of Zhinan Village bank collapse site[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(5):1713-1720. (in Chinese))

[19] Yu Haitao, Liu Zhibin, Cai Xinchun, et al. Research on the detection of leakage points in vertical barrier walls using a combined method of ERT and tracer methods[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(59):123008-123021.

[20] 梁越,何慧汝,许彬,等. 基于透明土的水力梯度对渗流侵蚀影响试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):60-66. (Liang Yue, He Huiru, Xu Bin, et al. Experimental study on the influence of hydraulic gradient on seepage erosion based on transparent soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5):60-66. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 02 - 17 编辑:刘晓艳)