

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.15.017

基于动态水质指标的排水管道外水入侵风险评估

郭 帅¹, 彭寿海², 赵志超², 申屠华斌³

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430014; 3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘 要: 为突破当前排水管网外水入侵诊断评估的技术瓶颈,提出了可表征外水入侵风险的 P 值法。该方法可同时考虑外水水量和水质两个因素的影响,并通过将 P 值离散化,实现动态评估管道内沿程不同位置处的外水入侵风险。通过搭建的全尺寸物理模型试验平台对 P 值的精度与可行性进行了验证。试验设计了5种外水水量占比和3种浓度比,以温度和电导率为变量参数,共计15组工况。结果发现,在监测点4至监测点7之间,电导率指标计算的风险值为0.00%~3.15%,温度指标计算的风险值为0.00%~7.47%,表明在入侵点后3 m位置处外水与原污水已混合均匀。比较每种工况下两种指标计算的外水入侵风险等级评估结果及外水入侵点识别的准确率,发现同一监测点处电导率指标的灵敏度及准确率均高于温度指标,电导率宜优先作为评估外水入侵风险等级的水质指标。

关键词: 排水管网; 电导率; 外水入侵; 风险评估

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)15-0117-06

Risk Assessment of Extraneous Water Intrusion in Sewer Networks Based on Dynamic Water Quality Indicators

Guo Shuai¹, Peng Shouhai², Zhao Zhichao², Shentu Huabin³

(1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430014, China; 3. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: To overcome the current technical bottleneck in diagnosing and assessing extraneous water intrusion in sewer networks, this paper proposed a P -value method that could characterize the probability of extraneous water intrusion risk. This method simultaneously considered the influences of both extraneous water quantity and water quality, and achieved dynamic assessment of intrusion risk at different locations along the pipeline by discretizing the P -value. The accuracy and feasibility of the P -value were verified through a full-scale physical model experimental platform. A total of 15 experimental conditions were designed, involving five levels of extraneous water volume proportion and three concentration ratios, with temperature and electrical conductivity used as variable parameters. The results showed that between monitoring points 4 and 7, the risk values calculated by electrical

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3810803); 中国三峡集团科技创新研发课题(NBWL202300014)

通信作者: 郭帅 E-mail: guoshuai@hfut.edu.cn

conductivity ranged from 0.00% to 3.15%, while those calculated by temperature ranged from 0.00% to 7.47%, indicating that extraneous water and native sewage had been uniformly mixed at a location 3 m downstream of the intrusion point. By comparing the risk level assessment results and the identification accuracy of intrusion points for both indicators under each condition, it was found that electrical conductivity exhibited higher sensitivity and accuracy than temperature at the same monitoring point, and thus should be prioritized as the water quality indicator for assessing extraneous water intrusion risk levels.

Keywords: sewer network; electrical conductivity; extraneous water intrusion; risk assessment

当前,我国污水管网系统普遍存在外水入侵情况,导致管网长期高水位运行、污水处理厂进水浓度低、溢流频发等一系列问题,造成了极大的经济损失与环境风险。因此,近年来污水管网外水入侵的定位诊断与定量评估已成为学术界与市政工程行业的研究热点与难点^[1-2]。

传统的排水管道外水定量方法使用较为广泛的是水量平衡法和水质因子法^[3]。其中,水量平衡法利用管网中的流量差直接定量评估管网外水,但精确的管网流量数据受限于流量计的安装条件等因素的制约往往难以获取,导致其评估精度较低^[4];李丹琳等^[5]提出了基于供排水一体化监测的外水风险评估方法,主要采用城市用水量与监测污水流量计数据,并将其用于南方某市某片区的外水风险评估工作中。另外,基于管网内流体水质平衡原理的水质因子法在近些年得到了大量的研究与应用,例如,徐祖信等^[6]利用总氮和硬度作为水质特征因子分析排水管网中的地下水入渗情况;De Bondt等^[7]利用自然水体中的稳定同位素在沿海城市开展外水入侵定量评估实践工作;张明凯^[8]利用COD、电导率等4种水质指标在无锡市开展外水入侵评估工作,发现电导率指标表现优越;Guo等^[9]在前期研究中选取了3种水质因子,发现电导率与温度两种指标整体表现较优。整体而言,多数水质因子法实施成本较高,例如上述同位素法,且需要考虑在污水传输过程中生化反应及物理反应所引起的水质因子浓度时空变化^[10]。因此,单一的水量法或水质法在实际应用中均存在较大的局限性,排水管网外水入侵风险评估亟须新的思路与方法。

为解决当前排水管网外水入侵诊断评估的技术瓶颈,本研究首次提出了排水管网外水入侵风险

评估指标法,即 P 值法,并通过搭建的全尺寸管网试验平台,开展了大量的研究工作。 P 值法为外水入侵风险评估提供了更为全面和精准的视角,它巧妙地融合了外水的水量与水质这两个关键因素,从而有效规避了传统单一水量法或水质法所固有的局限性。通过综合考量这两个维度的信息, P 值不仅能精准反映外水入侵风险,还能为进一步间接锁定外水入侵的具体位置提供有力支持,极大地提升了外水入侵风险评估的科学性和实用性。根据试验结果,计算分析了电导率与温度两项水质指标在多种工况下的外水入侵风险等级评估结果,该研究成果对评估与诊断我国排水管网的外水入侵问题具有重要的参考价值。

1 外水入侵风险评估指标定义

外水入侵将会导致排水管道中水体流量以及水质浓度的改变。外水入侵过程中,管网内流量与水质浓度关系符合以下水量-水质平衡方程:

$$Q_{sw} + Q_{in} = Q_{ww} \quad (1)$$

$$Q_{sw}C_{sw} + Q_{in}C_{in} = Q_{ww}C_{ww} \quad (2)$$

$$R_Q = \frac{Q_{in}}{Q_{ww}} \quad (3)$$

$$R_C = \frac{C_{in}}{C_{sw}} \quad (4)$$

式中: Q_{sw} 、 Q_{in} 和 Q_{ww} 分别为主管内原污水、外水和合流后总污水的流量; C_{sw} 、 C_{in} 和 C_{ww} 分别为主管内原污水、外水和合流后总污水的水质因子浓度; R_Q 为外水水量占比; R_C 为外水与原污水的水质因子浓度之比。

在前人研究中,常根据 R_Q 值的不同,将外水入侵严重程度划分为4个等级^[11]。然而,在实际排水管网系统中,管道流量计的安装与数据采集易受水

中漂浮污染物、底泥厚度测量、管径测量等多种因素的影响,造成精确的管道流量的测定比水质浓度的获取要复杂得多、昂贵得多^[4]。因此,基于 R_0 值的评估法多用于较大的排水片区的入侵风险评估,这是其局限性。近年来,基于水质平衡方程原理的水质特征因子法得到了较多的研究与应用。

在水质平衡方程原理的基础上,本文引入一个可衡量管段沿程水质因子变化规律的 P 值,用来定量评估外水入侵风险,其计算公式如下:

$$P = \left| \frac{C_{\text{WW}} - C_{\text{SW}}}{C_{\text{SW}}} \right| \times 100\% \quad (5)$$

结合水量-水质平衡方程,可将式(5)改为:

$$P = |R_c - 1| R_0 \times 100\% \quad (6)$$

从式(6)可以看出, P 值同时受到外水水量与水质两个因素的影响,突破了单一用水量法或水质法评估外水入侵影响的局限性, P 值可以很好地表征外水入侵的发生概率,并能够用于间接表征外水入侵的发生位置。因此, P 值的引入是本文的重要创新之处。然而,如上所述,受限于管道流量测定的复杂性,为了实现动态评估管道内沿程不同位置处的外水入侵风险,需要将上述评估指标 P 离散化,即将式(5)改写为式(7)所示的动态指标,当前 i 点的外水入侵风险指数 P_i 由本点与上一个点位的浓度

差值来计算。

$$P_i = \left| \frac{C_{\text{WW}}^i - C_{\text{SW}}^{i-1}}{C_{\text{SW}}^{i-1}} \right| \times 100\% \quad (7)$$

为验证 P_i 值的大小是否可以用来动态评估单根管段沿程外水入侵风险,并进而用来定位外水入侵发生的位置,本文开展了大量的试验研究。在前期研究工作^[9]的基础上,选取温度与电导率两个水质因子作为变量参数,通过搭建全尺寸物理模型试验平台,在不同工况下,采集管道沿线不同点位的的水质数据并进行计算,分析外水入侵风险评估算法的精度与可行性。

2 试验设计

2.1 试验平台

全尺寸物理模型试验平台搭建于合肥工业大学水工模型实验大厅内,平台总占地 800 m²,分为进水部分和试验管道部分。进水部分用于存储试验用水、提升试验用水至试验管道以及流量控制,配备有水箱、进水管、电磁阀、水泵和电磁流量计。为满足多种工况的试验需求,该部分有两条进水通道:通道1和通道2(见图1),通道1进水由检查井1接入试验管道,流经全程后可排入水箱1中的回流通道循环流动以节省用水,通道2进水则由检查井2接入试验管道,可用于模拟外水入侵的情形。

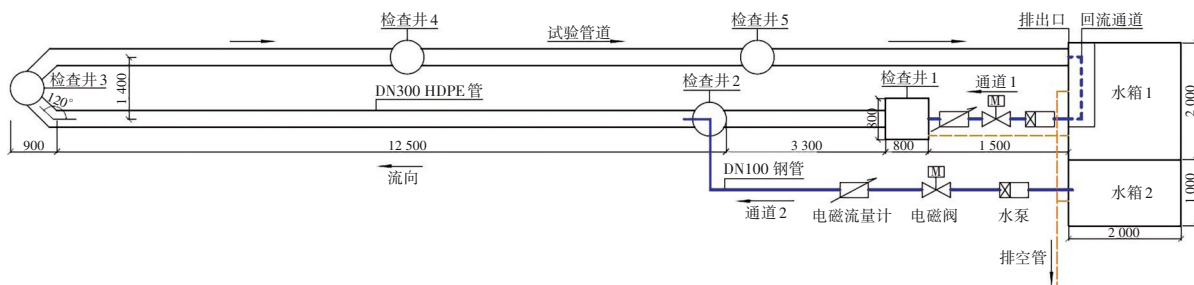


图1 试验平台平面图

Fig.1 Layout plan of test platform

试验管道部分根据实际重力流排水管道形式设计,采用DN300 HDPE波纹管材质,全长37 m,坡度范围为1.25‰~5.00‰。为了便于观察和放坡,模拟管道全部架空安装,底部用钢制支架支撑,最低点距地面1.05 m。管道沿程设置5个检查井用于管内观测和设备安装,其中检查井1为方形砖砌井,高1.80 m,底部连接通道1的进水钢管,顶部连接排水管道,进水时水流由井底缓慢上升并溢流至试验管道,以保证入流均匀平缓;检查井2~5采用污水

管道中常用的流槽式检查井,以保证水流顺畅,井底用砖砌支座固定,并通过橡胶圈和管道进行连接。试验结束后,水箱和检查井内的存水均可通过排空管放出。

2.2 试验工况

本试验设置了5种外水水量占比(R_0)和3种浓度比(R_c),考察温度与电导率指标在外水入侵点附近的数值变化规律。共进行了5组共15种工况的试验,每种工况重复3次,工况参数见表1。其中,两

种水体的温度差通过实验室的电加热水箱输入水箱 2 中来实现,电导率差通过添加食用盐调节。

表 1 试验工况
Tab.1 Test conditions

试验编号	R_0	$Q_{sw}/(m^3/h)$	电导率			温度		
			$C_{sw}/(\mu S/cm)$	$C_{wt}/(\mu S/cm)$	R_c	$C_{sw}/^{\circ}C$	$C_{wt}/^{\circ}C$	R_c
a1	0.15	5.81	1 367.72	199.20	0.15	27.47	36.35	1.32
a2		4.88	891.40	223.50	0.25	28.10	41.29	1.47
a3		5.20	704.14	208.00	0.30	28.33	39.37	1.39
b1	0.25	5.68	983.93	247.75	0.25	29.77	39.27	1.32
b2		2.86	646.36	222.69	0.34	32.09	40.63	1.27
b3		2.90	854.68	249.76	0.29	32.58	39.88	1.22
c1	0.35	2.12	532.30	188.75	0.35	27.93	36.63	1.31
c2		2.12	940.76	218.44	0.23	28.45	40.08	1.41
c3		2.12	1 782.74	199.00	0.11	28.67	39.39	1.37
d1	0.45	3.85	1 264.71	267.80	0.21	31.15	41.69	1.34
d2		1.90	993.53	240.61	0.24	33.31	40.56	1.22
d3		2.82	320.00	245.00	0.77	30.55	35.64	1.17
e1	0.55	1.80	1 251.86	217.25	0.17	34.84	38.63	1.11
e2		1.70	1 005.47	238.33	0.24	33.75	41.38	1.23
e3		1.63	665.58	226.86	0.34	33.27	41.39	1.24

本试验中,从上游至下游共设置 7 个水质监测点,监测点 1 位于 2 号检查井上游 1 m 处,用于监测外水入侵前的水质数据;监测点 2 为 2 号检查井即外水入侵点;监测点 3~7 为 2 号井下游以 1 m 间隔设置的 5 个监测点。流动达到恒定状态时,利用多参数水质监测仪进行水质采样。采样频率设置为 2 s,在每个监测点处采集 1 min 的电导率及温度数据

(每个点获取 30 个数据),进行风险值计算及分析。

3 结果与讨论

3.1 试验结果

由式(7)可知,沿程 7 个监测点,可实现监测点 2~7 共 6 个点的 P 值计算。15 种试验工况下基于电导率与温度两个指标的外水入侵风险值计算结果如表 2 所示。

表 2 电导率和温度指标计算的外水入侵风险值

Tab.2 Extraneous water intrusion risk values derived from conductivity and temperature indicators %

试验编号	监测点 2		监测点 3		监测点 4		监测点 5		监测点 6		监测点 7	
	电导率	温度	电导率	温度	电导率	温度	电导率	温度	电导率	温度	电导率	温度
a1	28.14	4.41	28.31	10.13	0.05	5.08	0.50	0.07	0.14	0.07	0.05	0.14
a2	32.95	17.47	41.94	8.57	1.35	0.79	0.06	0.03	1.33	0.43	1.14	0.30
a3	23.39	5.81	21.66	10.13	0.01	5.08	0.19	0.07	0.35	0.07	0.08	0.14
b1	25.16	4.48	6.89	1.29	3.15	0.73	0.16	0.01	0.24	0.13	0.16	0.17
b2	30.60	12.48	27.23	5.04	0.16	0.17	0.08	0.14	0.47	0.12	0.47	0.14
b3	18.41	5.55	6.62	6.02	0.34	0.37	0.09	0.00	0.05	0.09	0.10	0.06
c1	11.85	5.36	0.81	1.05	0.31	0.20	0.59	0.23	0.47	0.30	0.18	0.10
c2	9.62	8.77	2.74	0.90	0.18	0.16	0.48	0.13	0.44	0.16	0.01	0.06
c3	27.91	5.76	4.21	1.85	0.55	0.13	0.42	0.06	1.14	0.41	0.72	0.25
d1	51.63	21.27	62.98	7.65	0.35	0.31	0.03	0.11	0.00	0.06	0.19	0.08
d2	46.40	11.25	47.42	3.57	0.75	0.22	0.15	0.11	0.31	0.00	0.28	0.11
d3	5.35	3.25	0.27	0.79	0.74	1.05	0.69	0.89	0.23	0.35	0.68	0.24
e1	49.13	2.80	44.00	4.40	0.53	0.95	2.73	0.03	0.57	0.16	1.65	0.11
e2	50.20	5.42	46.87	2.90	0.26	7.47	0.95	0.63	0.41	0.10	0.46	0.09
e3	45.43	16.90	41.43	7.62	1.23	0.16	0.04	0.11	0.10	0.19	0.20	0.08

首先,从同一参数的沿程 P 值变化来看,监测点 2 为外水入侵点,监测点 3 为外水入侵后的第 1 个监测点,因此,监测点 2 和 3 的风险值最高,其中,电导率指标计算的风险值范围为 0.27%~62.98%,平均值为 27.98%;温度指标计算的风险值范围为 0.79%~21.27%,平均值为 6.76%。在监测点 4 至监测点 7 之间,电导率指标计算的风险值范围为 0.00%~3.15%,温度指标计算的风险值范围为 0.00%~7.47%,表明监测点 4 及其下游沿程水质已混合相对均匀,外水入侵导致的水质波动已渐趋于零。

对比表 2 中同一监测点处的 P 值可以看出,电导率指标灵敏度明显高于温度指标。另外,一些工况下的 P 值呈现出较大的波动特性,如电导率指标下的工况 d1~d3,在同一 R_0 值下,工况 d1 的 P 最大值达到 62.98%,而工况 d3 的 P 最大值则仅为 5.35%,这反映出水量与水质两种参数的协同影响;同时,这种协同作用还造成随着 R_0 值的增大(0.15~0.55),5 组工况下监测到的 P 最大值并未表现出随之单调增加的趋势,反映出外水水质和水量对系统造成的复杂影响。

3.2 风险等级划分及入侵点识别

外水入侵风险等级评估结果如表 3 所示。

表 3 外水入侵风险等级评估结果

Tab.3 Extraneous water intrusion risk level assessment results

试验编号	电导率		温度	
	P 最大值/%	入侵风险等级	P 最大值/%	入侵风险等级
a1	28.31	高	10.13	低
a2	41.94	高	17.47	中
a3	23.39	中	10.13	低
b1	25.16	高	4.48	无
b2	30.60	高	12.48	低
b3	18.41	中	6.02	低
c1	11.85	低	5.36	低
c2	9.62	低	8.77	低
c3	27.91	高	5.76	低
d1	62.98	高	21.27	中
d2	47.42	高	11.25	低
d3	5.35	低	3.25	无
e1	49.13	高	4.40	无
e2	50.20	高	5.42	低
e3	45.43	高	16.90	中

冯杭华等^[11]根据 R_0 值大小将外水入侵等级分为一般($R_0<15\%$)、较为严重($15\%\leq R_0<35\%$)、严重($35\%\leq R_0<55\%$)和非常严重($R_0\geq 55\%$)4 个等级。因为 P 值包含了 R_0 和 R_c 两个参数的影响,比单一 R_0 值评估外水入侵风险更为灵敏,为此,本研究在评估外水入侵风险时,根据 P 值将入侵风险分为无风险($P<5\%$)、低风险($5\%\leq P<15\%$)、中等风险($15\%\leq P<25\%$)和高风险($P\geq 25\%$)4 个等级。取每种工况下 P 的最大值并将中等风险及以上的等级作为可信入侵点,根据试验结果(见表 3),则可得出两种指标每种工况下的外水入侵风险等级评估结果及入侵点识别的准确率,其中电导率指标的准确率为 80%,温度指标的准确率为 20%。可见,电导率指标在外水入侵风险等级评估和入侵点识别的灵敏性及准确率方面均远高于温度指标,宜优先作为外水入侵风险等级评估的水质指标。

4 结论

① 基于全尺寸管道试验平台,提出了可表征外水入侵风险的 P 值法,该方法综合考虑外水水量和水质两个因素的影响,可动态评估管道内沿程不同位置处的外水入侵风险。

② 外水入侵后,电导率与温度两项水质参数均较快实现了均匀混合,导致在入侵点下游 3 m 位置后(监测点 4 及以后)的 P 值很小。

③ 各工况条件下计算得到的外水入侵风险等级评估结果及外水入侵点识别准确率表明,电导率指标的准确率与灵敏度明显高于温度指标,宜优先作为外水入侵风险等级评估的水质指标。

④ 当前研究仍存在一些局限性,例如目前的试验条件尚未涵盖降雨对排水管网中外水入侵的影响;研究中所使用的模型基于一定的简化假设,这些假设可能与实际管网的复杂情况存在差异,未来需要更精细的模型来缩小这一差距;此外,当前尚未考虑多入侵点的干扰,这在实际情况中可能会增加问题的复杂性。

参考文献:

[1] Zeydilinejad N, Javadi A, Webber J. Global perspectives on groundwater infiltration to sewer networks: a threat to urban sustainability [J]. Water Research, 2024, 262: 122098.
[2] Darling A, Davis B, Byrnex T, et al. Subsewershed

- analysis of the impacts of inflow and infiltration on viral pathogens and antibiotic resistance markers across a rural sewer system [J]. *Water Research*, 2025, 276: 123230.
- [3] Guo S, Shi X, Luo X, et al. River water intrusion as a source of inflow into the sanitary sewer system [J]. *Water Science and Technology*, 2020, 82(11): 2472-2481.
- [4] 丁睿. 水量水质法评估排污管网外来水关键影响因素试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- Ding Rui. Experimental study on the key influencing factors of water quantity and water quality method for evaluating extraneous water in sewer system [J]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022 (in Chinese).
- [5] 李丹琳, 郭帅, 黄荣敏, 等. 基于供排水一体化监测的污水管网外来水入侵风险评估[J]. *环境工程*, 2023, 41(11): 39-45.
- Li Danlin, Guo Shuai, Huang Rongmin, et al. Risk assessment of extraneous water in sewage systems based on integrated monitoring of water supply and drainage systems [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2023, 41(11): 39-45 (in Chinese).
- [6] 徐祖信, 汪玲玲, 尹海龙, 等. 基于特征因子的排水管网地下水入渗分析方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(4): 593-599.
- Xu Zuxin, Wang Lingling, Yin Hailong, et al. Quantification of groundwater infiltration into urban drainage networks based on marker species approach [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(4): 593-599 (in Chinese).
- [7] De Bondt K, Seveno F, Petrucci G, et al. Potential and limits of stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) to detect parasitic water in sewers of oceanic climate cities [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2018, 18: 119-142.
- [8] 张明凯. 基于污染物过程线模型的污水管网水量水质动态模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- Zhang Mingkai. Research on dynamic variation of wastewater quantity and quality in sewer system based on pollutant hydrograph [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017 (in Chinese).
- [9] Guo S, Ding R, Huang B, et al. Experimental study on three simple tracers for the assessment of extraneous water into sewer systems [J]. *Water Science and Technology*, 2022, 85(2): 633-644.
- [10] Shelton J M, Kim L, Fang J, et al. Assessing the severity of rainfall-derived infiltration and inflow and sewer deterioration based on the flux stability of sewage markers [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(20): 8683-8690.
- [11] 冯杭华, 陈海涛, 施翔, 等. 外来水量诊断法在污水管网预诊断中的应用[J]. *水利水运工程学报*, 2022(4): 62-69.
- Feng Hanghua, Chen Haitao, Shi Xiang, et al. Application of extraneous water quantity diagnosis method in pre-diagnosis of sewer network system [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(4): 62-69 (in Chinese).

作者简介: 郭帅(1984—), 男, 河南商丘人, 博士, 副教授, 主要研究方向为排水管网外来水入侵机理与风险管理。

E-mail: guoshuai@hfut.edu.cn

收稿日期: 2025-02-12

修回日期: 2025-03-18

(编辑: 刘贵春)

以水定城、以水定地、以水定人、
以水定产, 发展节水产业