DOI：10.13245/j.hust.260099

基于氢氧稳定同位素的排水管网地下水入渗诊断

刘 伟[1,2] 王万琼[1,2] 赵志超[1,2] 陈奕林[1,2] 张春光[1,2] 刘武双[1,2]
(1．长江经济带生态环境国家工程研究中心，湖北 武汉 430010；
2．中国长江三峡集团有限公司，湖北 武汉 430010)

摘要 当管网水量来源复杂时，基于来源组成比例全解析思想的传统水质特征因子分析法将面临诊断成本高、误差大等瓶颈．针对此问题，提出了基于氢氧稳定同位素(δ^2H-δ^{18}O)的排水管网地下水入渗高效诊断方法，通过实现多源污水聚类并在空间上与地下水隔离，将复杂混合体系降维简化至二元混合体系，达到降低检测成本和解析误差的目的．进一步结合模拟分析和现场应用，验证了该方法的有效性，结果表明：与常规水质特征因子相比，δ^2H-δ^{18}O在聚类并隔离多源污水方面具有显著优势，通过耦合蒙特卡罗随机抽样和非负最小二乘法，可精确解析地下水比例，平均绝对误差低于2.2%；该方法可高效诊断排水管网地下水入渗水平，在实际案例中通过开展高满水位污水管道地下水入渗诊断，快速识别出存在入渗问题的管段，与采用CCTV(管道闭路电视成像)开展的渗漏缺陷排查结果相符合．

关键词 排水管网；地下水入渗；氢氧稳定同位素；聚类隔离；水质特征因子
中图分类号 X52；TU992 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2026)10-0160-07

Diagnosis of groundwater infiltration in drainage networks based on hydrogen and oxygen stable isotopes

LIU Wei[1,2] *WANG Wanqiong*[1,2] *ZHAO Zhichao*[1,2] *CHEN Yilin*[1,2]
ZHANG Chunguang[1,2] *LIU Wushuang*[1,2]
(1．National Engineering Research Center of Eco-Environment in the Yangtze River Economic Belt，Wuhan 430010，China；
2．China Three Gorges Corporation，Wuhan 430010，China)

Abstract When the water sources in drainage networks are complex，the traditional parameter tracer analysis method—which relies on the concept of exhaustive quantification of source composition proportions—encounters limitations including high diagnostic costs and substantial errors．In response，an efficient diagnostic method for groundwater infiltration in drainage networks based on hydrogen and oxygen stable isotopes (δ^2H-δ^{18}O) was proposed．By clustering and spatially isolating multi-source sewage from groundwater，the complex mixed system was dimensionally reduced and simplified to a binary mixing system，thereby achieving the purpose of reducing detection costs and analytical errors．Furthermore，combined with simulation analysis and field application，the effectiveness of the proposed method was verified．Results show that compared with conventional parameter tracer，δ^2H-δ^{18}O exhibits distinct advantages in clustering and isolating“multi-source sewage”from groundwater；by coupling Monte Carlo (MC) random sampling and non-negative least squares (NNLS)，the proportion of groundwater can be accurately resolved，with a theoretical mean absolute error below 2.2%．The level of groundwater infiltration in drainage networks can be efficiently diagnosed by this method．In practical case studies，pipeline sections with infiltration issues are quickly identified by conducting groundwater infiltration diagnostics in sewage pipelines with high water levels，which are consistent with leak defect inspections performed using closed-circuit television (CCTV)．

收稿日期 2026-02-25．
作者简介 刘 伟(1999—)，男，助理工程师；赵志超(通信作者)，工程师，E-mail：zhao_zhichao@ctg.com.cn．
基金项目 中国长江三峡集团有限公司科研资助项目(NBZZ202300940)；湖北省自然科学基金资助项目(2023AFB475)．

Key words　drainage networks；groundwater infiltration；hydrogen and oxygen stable isotopes；clustering and isolating；water quality indicators

截至2023年底我国城市排水管网总长度已达95万公里[1]，然而管网面临显著的外水入侵问题，导致污水厂进水浓度偏低，影响处理效能[2]，同时易引发污水冒溢和溢流[3-4]，因此诊断外水入侵水平并锁定问题区域意义重大．

地下水入渗是主要的外水入侵类型[5]．管道闭路电视成像(CCTV)技术是普遍采用的排查手段，须要管道降水清淤，导致成本高、实施难度大[6]．水量平衡法可有效实现带水诊断，但存在流量监测成本高、误差大等问题[7]．近年来兴起的特征因子法可利用不同来源水体的数值化指纹标签，结合端元混合模型，解析各来源水体的贡献比例[8]，有效实现降本增效，逐步成为管网外水入侵诊断的重要手段[9]．例如，徐祖信等[10]采用总氮-硬度-氟化物作为水质特征因子，量化了上海市某雨水管网旱天水量中的地下水贡献情况；Zhao等[11]采用安赛蜜区分污水与地下水，高效锁定了巢湖市城区严重入渗区域．然而，该方法的关键是筛选与水量来源数量适配的水质特征因子，当水量来源较多时，将面临水质特征因子筛选难度大、诊断成本高等瓶颈．因此，亟须探究优化改进路径．

排水管网地下水入渗诊断的本质是从多源污水与地下水的混合体系中解析出地下水的贡献情况，而无须求解多源污水的具体组成．据此，可将复杂混合体系简化为多源污水、地下水的二元混合体系，所需水质特征因子减少至两个．其关键是筛选一组二维水质特征因子，既具有较高稳定性，又能将多源污水聚类并与地下水隔离．研究表明：氢氧稳定同位素(δ^2H-δ^{18}O)作为水分子的固有属性，不仅稳定性高，且在聚类多源污水及与隔离地下水方面表现出较大潜力．如Kracht等[12]、Houhou等[13-14]发现，在δ^2H-δ^{18}O二维坐标系中，不同类型污水呈明显的空间聚集并与地下水隔离；尹炜等[7]调研发现δ^2H-δ^{18}O的变异系数低于5%，稳定性明显优于常规水质特征因子，且生活污水的主要产生过程不会引发其明显改变．然而，当前基于δ^2H-δ^{18}O聚类、隔离效应开展排水管网地下水入渗诊断的研究鲜有报道．对此，本研究基于实测数据，验证δ^2H-δ^{18}O在稳定性及聚类多源污水与隔离地下水方面的显著优势；建立基于δ^2H-δ^{18}O的二元混合水体组分比例解析模型，分析其准确性，并通过实际案例验证该方法体系的可行性．

1　基于δ^2H-δ^{18}O的地下水入渗诊断方法构建

1.1　技术路线

本研究首先通过开展排水系统内不同来源类型水体的常规水质特征因子和δ^2H-δ^{18}O检测，分析二者在稳定性、聚类多源污水及隔离地下水效果方面的差异性；其次，构建基于蒙特卡罗随机抽样和非负最小二乘法的二元混合水体组分比例解析模型，并通过配比实验，比较分别采用常规水质特征因子组合和δ^2H-δ^{18}O时，解析模型的误差水平；最后，基于实际案例，验证δ^2H-δ^{18}O耦合解析模型诊断排水管网地下水入渗问题的可行性．技术路线图如图1所示．

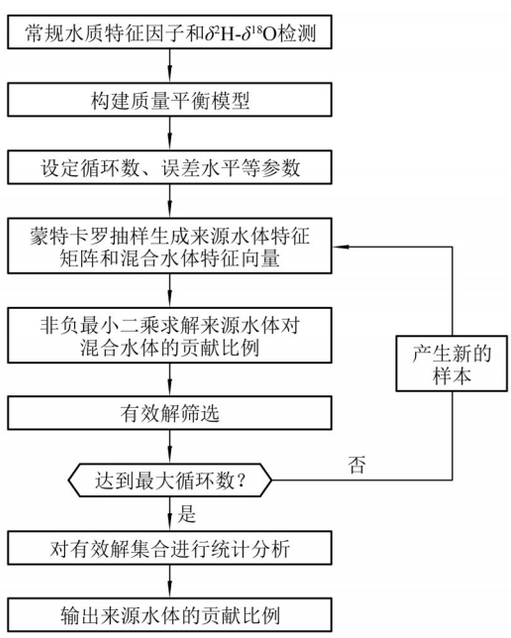


图1　技术路线图

1.2　样品采集与检测

本研究样品采集遵循以下原则：为消除雨水干扰，本研究于旱天期间开展采样工作，且前期晴天数不少3 d．采样周期持续24 h，当采样对象为排水户、管网节点和厂站时，采样频率为3 h/次；当采样对象为地下水时，采样频率为8 h/次．为控制现场采样与实验室分析的随机误差，研究对20%的关键点位设置了现场平行样测试．采集的样品须要同步检测常规水质特征因子(总氮(TN)、总磷(TP)、钾离子(K^+)、氟离子(F^-))、氢稳定同位素

(δ^2H)和氧稳定同位素(δ^{18}O)．常规水质特征因子涉及的样品预处理及检测方法参照相关国家及行业标准执行：样品的TN采用国家标准HJ 636—2012检测；样品的TP采用国家标准GB 11893—89检测；样品的K^+采用国家标准HJ 812—2016检测；样品的F^-采用国家标准HJ 84—2016检测；样品的δ^2H，δ^{18}O采用液态水同位素分析仪(Picarro，L2140i)进行测定．

1.3　水质特征因子的聚类隔离特性评价方法

聚类隔离特性是评价一组二维水质特征因子聚类多源污水并隔离地下水的能力．具体是采用一组二维水质特征因子构建二维坐标系，并针对任意一种来源类型水体，以其对应的水质特征因子的平均值构成的坐标点为几何中心点，标准差为半边长，构建矩形区域，然后将同类型但不同来源水体的矩形区域合并，生成聚类区域，如图2所示．多源污水聚类后所覆盖的区域范围越紧凑、与地下水所覆盖区域之间的重叠度越小且距离越远，效果越好．此外，为定量评估聚类隔离效果与稳定性，本研究构建基于变异系数、马氏距离[15]的统计评价体系．

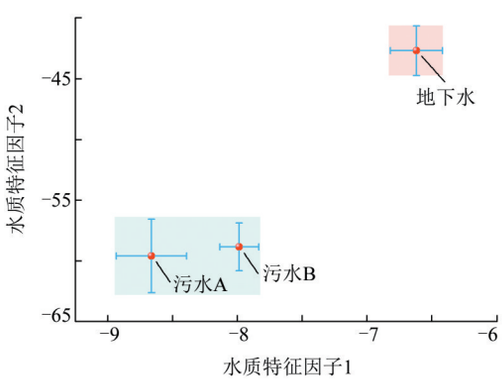


图2　污水和地下水的聚类隔离示意图

1.3.1　聚类效果与稳定性评价指标

稳定性是评价指水质特征因子数据波动程度的量化指标，本质上反映了其在水环境中的生物地球化学稳定程度，本研究采用变异系数(C_V)表征聚类数据整体的稳定性水平．一般认为当C_V的绝对值大于15%时，数据离散程度较大，稳定性不足[16]．同时C_V可以表征多源污水的类内紧密度，C_V值越小，表明同类水体在特征空间内的聚集越紧密，聚类效果越好．计算公式为

$$C_V = (\sigma/X) \times 100\%,$$

式中：σ为聚类数据整体样本的标准差；X为聚类数据整体样本的平均值．

1.3.2　隔离效果评价指标

本研究引入马氏距离(D_m)定量反映在特定指标体系下地下水与多源污水的隔离程度(类间分离度)，D_m值越大，表明该指标体系对二者的区分效果越好．其计算公式为[17]

$$D_m(z) = \sqrt{(z-\bar{\mu})^T \Sigma^{-1} (z-\bar{\mu})},$$

式中：z为地下水样本的特征向量；$\bar{\mu}$为多源污水样本集合的均值向量(空间质心)；Σ^{-1}为多源污水样本协方差矩阵的逆矩阵．

1.4　二元混合水体组分比例解析模型

在本研究中，二元混合水体组分比例解析模型的工作原理为：采用蒙特卡罗抽样方法在各来源类型水体和混合水体所对应的水质特征因子数据分布中随机抽取样本，并基于质量平衡约束，采用非负最小二乘法求解各来源类型水体对混合水体的贡献比例，在此基础上筛选满足给定误差约束的有效解，并通过统计分析得到最优解．

质量平衡模型的数学表达为

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} \\ a_{12} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix},$$

式中：a_{mn}为第m种来源类型水体的第n种水质特征因子的数值(m，n=1，2)；x_m为第m种来源类型水体对混合水体的贡献比例；b_n为混合水体的第n种水质特征因子的数值．

考虑到水质特征因子数据存在由采样、检测误差等引起的不确定性，导致解析结果不闭合问题($x_1+x_2\neq1$)[10]，本研究采用蒙特卡罗方法从各来源类型水体、混合水体的水质特征因子数据分布中随机抽取样本，模拟上述不确定性，使解析结果更符合实际情况，其中a_{mn}符合以μ_{mn}为均值、ω_{mn}^2为方差的正态分布，b_n符合以θ_n为均值、τ_n^2为方差的正态分布．蒙特卡罗抽样次数(N)默认设定为2×10^4次，以保证较高的采样空间覆盖率．

针对每次抽取的各来源类型水体、混合水体的水质特征因子数据样本，本研究基于质量平衡约束，采用非负最小二乘法对污水贡献比例x_1、地下水贡献比例x_2进行求解，即找到一组非负的x_1和x_2，使得$a_{mn}x_m$与b_n差异最小

$$\min_{x_1,x_2} f(x_1,x_2) = \left\| \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \right\|_2^2,$$

式中$\|\cdot\|^2$为欧几里得范数．

每次求解完成后，须要对x_1和x_2进行归一化处理，使得$x_1+x_2=1$．由于蒙特卡罗随机抽样可能产生的偏离物理实际的离群解，因此本模型进一步采用基于欧氏残差的平均相对误差指标量化解析结果与理论值之间的误差水平．具体是利用求解所得的

来源水体比例反推混合水体的水质特征因子模拟值，计算其与实测值的相对欧式残差(R)，并与给定误差容忍度(t)进行比较，当且仅当$R \leqslant t$时，采样结果才被保留作为有效解．最终，对所有通过阈值筛选的有效解集合进行概率密度拟合，提取其数学期望(即最终入渗比例)．由于δ^2H，δ^{18}O及常规水质指标均存在一定的检测分析误差(1%～5%)，本研究将有效解的误差容忍度默认设置为1%，以最大化提升解析精度．R的计算公式为

$$R = \max\left[|\hat{b}_1 - b_1|/b_1,\ |\hat{b}_2 - b_2|/b_2\right] \leqslant t,$$

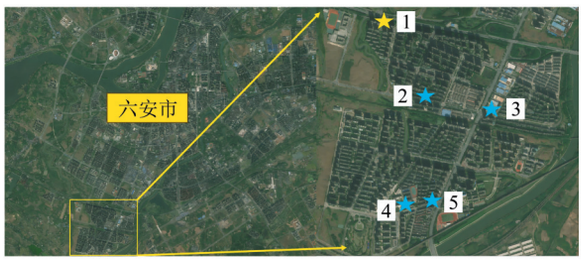
式中：$\hat{b}_1$和$\hat{b}_2$为基于归一化x_1，x_2求解得到的混合水体的第1种、第2种水质特征因子的预测值；max(·)表示取括号内各相对误差中的最大值．

2　结果与讨论

2.1　基于δ^2H-δ^{18}O的二元混合水体组分比例解析方法研究

2.1.1　δ^2H-δ^{18}O的聚类隔离特性与稳定性评价

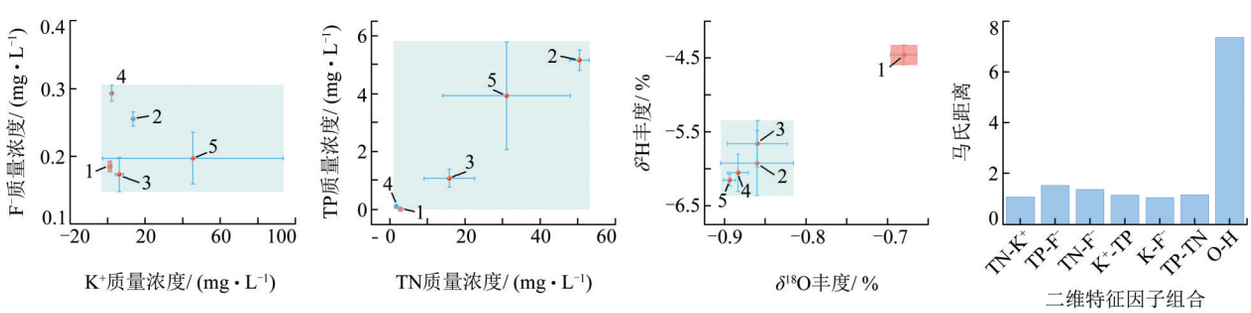
本研究以六安市的某典型排水片区作为研究对象(见图3)，开展基于δ^2H-δ^{18}O、常规二元水质指标的二元混合水体组分比例研究．该片区内的排水户类型主要为住宅小区、餐饮、商业街底商、学校，经调查，旱天期间管网中潜在的外水入侵类型为地下水．本研究共布设5个源头水体采样点(包括住宅小区、餐饮、商业街底商、学校污水源头及沿管网主干线布设的地下水临时采样井)，并于旱天期间(前期晴天数大于3 d)采集得到35组有效水样．



1—地下水；2—住宅小区；3—餐饮；
4—学校；5—商业街地铺(下同)．

图3　采样污水类型及点位示意图

本研究分别采用常规水质特征因子(TN，TP，K^+，F^-)和δ^2H-δ^{18}O作为区分上述生活类污水与地下水的水质特征因子．通过指标两两组合，绘制各来源类型水体在不同二维坐标系中的分布图，如图4所示，图中：TN-K^+为TN和K^+组成的二维特征因子组合；TP-F^-为TP和F^-组成的二维特征因子组合；TN-F^-为TN和F^-组成的二维特征因子组合；K^+-TP为TP和K^+组成的二维特征因子组合；K-F^-为K^+和F^-组成的二维特征因子组合；TP-TN为TP和TN组成的二维特征因子组合；O-H为δ^2H和δ^{18}O组成的二维特征因子组合．结果显示：在基于TN，K^+，TP，F^-构成的二维坐标系中，多源污水聚类区域TN，K^+，TP，F^-的C_V值分别为86.16%，169.34%，83.10%，22.11%，明显超出了15%的稳定性阈值，聚类区域松散；此外，多源污水和地下水聚类区域的马氏距离在1.05～1.54范围内分布，表明其隔离效果较差，这与多源污水和地下水聚类区域存在明显重叠现象一致；相比而言，在δ^2H-δ^{18}O坐标系中，多源污水聚类区域δ^2H和δ^{18}O的C_V值分别为5.46%，3.51%，表明其稳定性较高，具有更高的聚类紧密度，并且二者之间的马氏距离为7.36，显著高于常规水质指标，表明其类间隔离效果更显著[18]，在二维空间中表现为多源污水和地下水呈现明显的二元分布特征．由此可见：与常规水质特征因子组合相比，δ^2H-δ^{18}O在聚类多源污水并隔离地下水的效果方面更优且数据稳定性更高，具备降低排水管网外水入侵诊断复杂度的显著优势．



(a) K^+-F^-　　(b) TN-TP　　(c) δ^{18}O-δ^2H　　(d) 马氏距离

图4　各来源类型水体在二维水质特征因子坐标系中的聚类分布图及马氏距离

2.1.2　δ^2H-δ^{18}O用于二元混合水体组分比例解析的准确性分析

本研究进一步采用数值混合实验，分析常规水质特征因子组合和δ^2H-δ^{18}O用于二元混合水体组分比例解析的准确性．针对多源污水-地下水混合实验，本研究将生活类污水(餐饮、住宅、学校、商

业街底商)视为整体，并按照不同比例与地下水混合(见表 1)，共计形成 10 个混合样品，分别采用耦合常规水质特征因子两两组合、δ^2H-δ^{18}O 的解析模型对二元混合水体组分比例进行求解，结果如图 5 所示．结果显示：当模型设定为 N=2×10^4，t=1% 时，在不同混合比例下，基于 TP-TN，TP-F$^-$，TN-K$^+$，TN-F$^-$，K$^+$-TP，K$^+$-F$^-$，δ^2H-δ^{18}O 得到的解析结果的平均绝对误差分别为 6.44%，13.72%，15.20%，19.71%，10.26%，30.87%，2.16%．可见：与常规水质特征因子相比，采用 δ^2H-δ^{18}O 解析二元混合水体组分比例的准确性最高．值得注意的是：虽然 TP-TN 指标组合也获得了较高的解析准确度，但深入分析发现，采用该指标组合获得的有效解数量较少，不足总抽样数量的 0.1%，远低于 δ^2H-δ^{18}O(3.7%)，反映了上述指标组合解析稳定性较差，不确定性较高．

表 1　多源污水-地下水混合实验中水源组分混合比例　%

样品编号	地下水占比	住宅小区污水占比	餐饮污水占比	学校污水占比	商业街底商污水占比
A	1	59.4	9.9	9.9	19.8
B	2	58.8	9.8	9.8	19.6
C	3	58.2	9.7	9.7	19.4
D	5	57.0	9.5	9.5	19.0
E	8	55.2	9.2	9.2	18.4
F	10	54.0	9.0	9.0	18.0
G	20	48.0	8.0	8.0	16.0
H	40	36.0	6.0	6.0	12.0
I	60	24.0	4.0	4.0	8.0
J	80	12.0	2.0	2.0	4.0

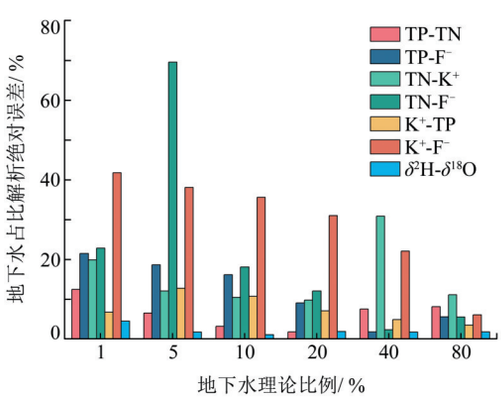


图 5　混合实验解析误差示意图

2.1.3　蒙特卡罗抽样次数对模型解析的准确性分析

为明确本文方法有效应用的具体参数要求，开展了抽样次数对地下水混合比例解析准确度的影响特征分析．图 6 表明：解析得到的地下水混合比例绝对误差表现出随着采样次数的增加逐渐趋于稳定的趋势：当采样次数小于 5 000 时，抽样序列未能充分覆盖特征因子正态分布的全局概率空间，此时的模型输出具有极高的不确定性，解析比例的绝对误差较大；当采样次数增加到 5 000～2×10^4 时，系统误差与随机误差被大幅削弱，解析精度获得显著提升．当抽样次数突破 2×10^4 次后，解析误差基本趋于稳定，在此基础上进一步增加抽样次数，模型解析精度的提升效果不明显，但计算效率会显著降低，因此本研究将抽样次数默认设定为 2×10^4．

综上所述，与常规水质特征因子相比，δ^2H-δ^{18}O 可通过将多源污水聚类并与地下水隔离，实现对高维质量平衡方程(上述实验为 5 维)的二维简化与求解，显著提升排水管网地下水入渗诊断的准确性与效率，下面将结合具体案例对该方法作进一步验证．

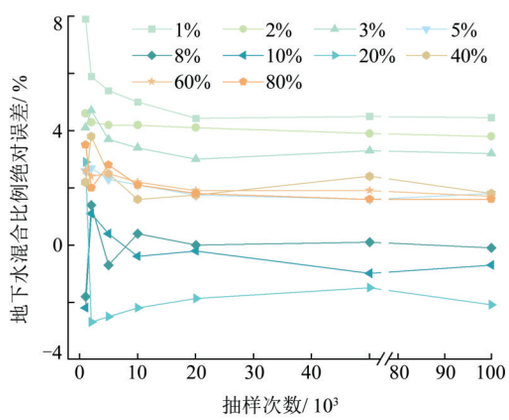


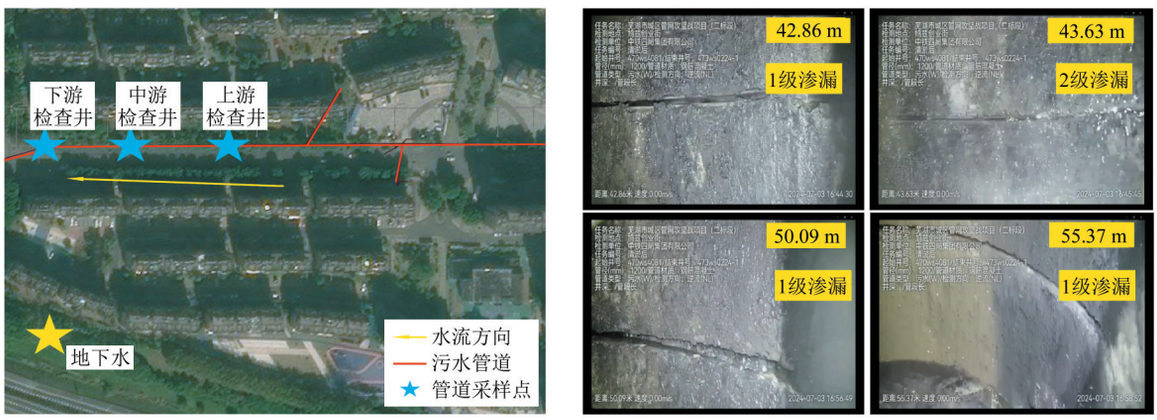
图 6　蒙特卡罗抽样次数对地下水解析比例精度的影响

2.2　污水管道地下水入渗诊断与 CCTV 检测验证

选取芜湖市某污水干管为研究对象，开展 CCTV 检测与地下水入渗诊断．该管段长度约为 102.8 m，直径为 1 200 mm，平均埋深为 7.6 m，主要承接上游输送的污水且长期处于高满水位运行状态．根据水流流向和拓扑关系，可基于上、中、下三个检查井将该管段划分为管段Ⅰ和管段Ⅱ，如图 7(a)所示．

研究区域位于平原地区，城市化程度较高，与周边河湖地表水体距离均在 1 km 以上；由于采样期设置于连续晴天 3 d 以上的旱天时段，因此可有效排除山水、河湖水、雨水干扰，此外该段管道拓扑结构简单，不存在支管接入．根据当地一厂一策系统化实施方案的地勘数据显示，该区域地下水水位约为 0.7～3.1 m，即污水管线长期处于地下水水位以下，因此本研究认为旱天期间该管段中的潜在外水类型为地下水．根据前期开展的管道 CCTV 检测，管段Ⅰ中检查出 1 处二级渗漏缺陷(在距离上

游节点43.63 m处)和3处一级渗漏缺陷(距离上游节点42.86，50.09，55.37 m处)，管段Ⅱ中未检出渗漏缺陷，如图7(b)所示．进一步采用本文方法定量解析管段Ⅰ和管段Ⅱ的地下水入渗情况．



(a) 案例区域的排水管网及取样点　　(b) 案例管段的CCTV检测结果

图7　案例区域概况及CCTV检测情况

以上、中、下三个检查井为污水采样点，以附近约50 m处的地下水钻探井为地下水采样点(井深与管道底部高程接近)，同步开展δ^2H-δ^{18}O监测，共计4个采样点，采集有效数据27组，结果如图8所示．可见：在δ^2H-δ^{18}O坐标系中，检查井污水与地下水呈现出各自聚类、相互隔离的现象，聚类间的马氏距离达4.40，具有明显二元分布特征，满足本文方法适用条件．基于此，以最上游检查井污水(点S1)和地下水为贡献端元，以中下游检查井为混合水样，进一步解析两管段的地下水入渗情况．

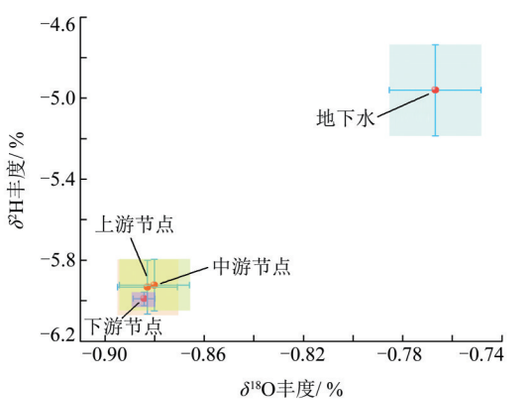


图8　地下水和管网上、中、下游节点水体在δ^2H-δ^{18}O坐标系中的分布特征

为明确本文方法的属地化精度，首先开展了管道上游检查井污水与地下水的梯度混合实验，混合体系的理论比例与解析结果如表2所示．结果显示：在不同混合比例下，本文方法的平均绝对误差整体较低(1.55%)，当地下水占比低于3%时该值仅为0.53%，表明方法精度较高．其次，开展管段Ⅰ和管段Ⅱ中的地下水比例解析，结果分别为2.04%和0.46%．结合误差分析可知：管段Ⅱ的地下水入渗比例解析结果处于方法自身的误差范围内，视为无地下水入渗问题；而管段Ⅰ的地下水入渗比例高于方法自身的误差范围，经校准后约为1.51%；上述结果与CCTV检测结果相符合(管段Ⅰ存在多处入渗，管段Ⅱ无入渗)，验证了本文方法的准确性．此外，污水和地下水在δ^2H-δ^{18}O坐标系中的分布特征也进一步支撑了该结论．如图8所示：与上游检查井污水相比，中游检查井污水的δ^2H-δ^{18}O明显向地下水方面偏移，显示出该段管道存在地下水贡献特征，而下游检查井污水的δ^2H-δ^{18}O处于中游检查井污水δ^2H-δ^{18}O的分布范围内，反映其符合中游检查井污水的特征，表明该管段无地下水入渗问题．

表2　管段污水-地下水混合实验水源混合比例及误差　%

样品编号	地下水理论占比	地下水解析占比	绝对偏差
A	1	1.92	0.92
B	2	2.20	0.20
C	3	2.52	0.48
D	5	3.42	1.58
E	8	5.52	2.48
F	10	7.52	2.48
G	20	20.84	0.84
H	40	43.38	3.38

综上所述，本研究通过实际案例初步验证了该方法在识别与定量解析排水管网地下水入渗方面的可行性，在此基础上可结合分级诊断技术路线，实现高效锁定问题区域的目标，为有效减少CCTV排查工作量提供技术支撑．

3　结论

本研究提出了一种基于δ^2H-δ^{18}O的排水管网地

下水入渗诊断方法，并通过现场应用验证了其有效性，主要结论如下．

a．相比于传统水质特征因子，δ^2H-δ^{18}O在稳定性与聚类隔离多源污水方面具有显著优势，结合多源污水与地下水的梯度配比试验，表明耦合δ^2H-δ^{18}O、蒙特卡罗随机抽样和非负最小二乘法的二元混合水体组分比例解析模型，可精确解析复杂混合体系中的地下水比例，平均绝对误差约为2.16%．

b．以芜湖市某高水位污水管道为研究对象，通过开展基于上下游节点的δ^2H-δ^{18}O监测和地下水入渗诊断，有效识别出地下水入渗管段，并结合CCTV排查，验证了诊断结果的准确性．

值得注意的是：本文方法的有效性建立在多源污水的δ^2H-δ^{18}O相似且明显区别于地下水的基础上，若某区域以浅层地下水作为城市自来水水源，则可能存在二者的δ^2H-δ^{18}O重叠问题，导致本文方法失效；因此在实施管网地下水入渗诊断前，须分析多源污水(或自来水本底)与浅层地下水的δ^2H-δ^{18}O是否存在显著差异．对于不满足条件的区域，应考虑引入其他水质特征因子进行联合分析．

综上所述，本研究提出的基于δ^2H-δ^{18}O的排水管网地下水入渗诊断方法具有准确性高、可实施性强的特点，在特定边界条件下可高效识别外水入侵管段，有效降低CCTV排查范围，实现降本增效．本研究存在的不足之处：验证场景较少，须进一步结合不同城市、运行工况的排水管网，广泛分析其通用性，为该技术的推广应用提供坚实的数据支撑．

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部．中国城市建设状况公报[R]．北京：中华人民共和国住房和城乡建设部，2024.

[2] 罗坤，孙凌凯，周小国．长江经济带城镇污水处理现状调查与分析[J]．水利水电快报，2024，45(1)：84-88．

[3] 徐祖信，张竞艺，徐晋，等．城市排水系统提质增效关键技术研究——以马鞍山市为例[J]．环境工程技术学报，2022，12(2)：348-355．

[4] 王福芝，尹炜，王殿常，等．污水管网重大缺陷快速识别方法研究[J]．给水排水，2024，60(8)：112-119．

[5] 陈青．湖北省大冶市城区污水处理提质增效技术方案研究[J]．水利水电快报，2024，45(S1)：57-60．

[6] 赵志超，黄晓敏，尹海龙，等．雨水管网混接入渗诊断技术研究进展[J]．环境工程技术学报，2024，14(1)：278-288．

[7] 尹炜，赵志超，王万琼，等．污水管网外水入侵定量诊断研究进展与思考[J]．人民长江，2025，56(10)：128-136．

[8] 季骁楠．城市市政排水管网污染物溯源技术研究进展[J]．环境工程技术学报，2022，12(4)：1153-1161．

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部．推进城市生活污水管网全覆盖及厂网一体长效机制建设工作指南[R]．北京：中华人民共和国住房和城乡建设部，2025．

[10] 徐祖信，汪玲玲，尹海龙．基于水质特征因子和Monte Carlo理论的雨水管网混接诊断方法[J]．同济大学学报(自然科学版)，2015，43(11)：1715-1721，1727．

[11] ZHAO Z C，YIN H L，XU Z X，et al．Pin-pointing groundwater infiltration into urban sewers using chemical tracer in conjunction with physically based optimization model[J]．Water Research，2020，175：115689．

[12] KRACHT O，GRESCH M，GUJER W．A stable isotope approach for the quantification of sewer infiltration [J]．Environmental Science & Technology，2007，41(16)：5839-5845．

[13] HOUHOU J，LARTIGES B S，FRANCE-LANORD C，et al．Isotopic tracing of clear water sources in an urban sewer：a combined water and dissolved sulfate stable isotope approach[J]．Water Research，2010，44(1)：256-266．

[14] PUSKÁS-PRESZNER A，OROSZ A，KOMPÁR L，et al．Isotopic tracing and quantitative assessment of rainwater in a separate sewer system in Tiszavasvári，Hungary[J]．Results in Engineering，2022，13：100360．

[15] 许子杰，任光亮．基于马氏距离的相位噪声抑制算法[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2017，45(4)：112-115．

[16] 刘武双，彭寿海，赵志超，等．排水管网混合污水来源解析与组分比例定量诊断方法研究[J]．环境科学学报，2025，45(11)：36-47．

[17] 赵毅强，刘沈丰，何家骥，等．基于自组织竞争神经网络的硬件木马检测方法[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2016，44(2)：51-55．

[18] 曾山，同小军，桑农，等．基于对应分析的冗余模糊C均值聚类算法研究[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2012，40(2)：107-111．