

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.09.019

基于荧光指纹与模型的信息化排水管网溯源分析

王立剑¹, 王 凯², 刘姝睿², 崔 鹏³, 张丽婷¹, 罗 阳²

(1. 张家口绿垣环境工程有限公司, 河北 张家口 075138; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 3. 张家口市不动产登记中心, 河北 张家口 075599)

摘 要: 河北省某市地势高差显著,存在自然跌水、工业废水违规偷排及雨污混接现象,致使管网污染物成分复杂、溯源困难,污水厂进水水质频繁波动且处理成本激增,亟须构建精准高效的污染溯源技术体系,以破解排水管网隐蔽性污染源监管难题。以该市区市域范围内133 km排水主干管网及100余家排水户为研究对象,构建了融合水质荧光指纹技术与Simuwater模型的源头溯源信息化平台。通过建立水质指纹库、高精度管网模型,并集成物联监测数据,实现了污染源的动态解析与排水户精准监管。实际应用表明,平台可在1.5 h内成功锁定污染源,通过Simuwater模型对污染团扩散路径及浓度变化进行模拟验证,关键节点浓度模拟误差 $\leq 5\%$,可为溯源决策提供依据。该源头溯源信息化平台能够有效破解城市排水管网污染溯源难、监管效率低的问题,推动监管模式由被动应对向主动防控转变,提升了排水系统运行稳定性。

关键词: 排水管网; 水质荧光指纹; Simuwater模型; 源头监管; 污染物溯源

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)09-0129-08

Information-based Drainage Network Tracing Analysis Using Aqueous Fluorescence Fingerprinting and Modeling

WANG Lijian¹, WANG Kai², LIU Shurui², CUI Peng³, ZHANG Liting¹, LUO Yang²

(1. Zhangjiakou Lvyuan Environmental Engineering Co. Ltd., Zhangjiakou 075138, China;

2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074,

China; 3. Zhangjiakou Bureau for Real Estate Registration, Zhangjiakou 075599, China)

Abstract: A city in Hebei Province exhibits significant topographical elevation differences, characterized by natural waterfalls, illegal discharge of industrial wastewater, and combined sewer overflows. These factors result in complex pollutant compositions within the drainage network, making pollution source tracing challenging. The wastewater treatment plant experiences frequent fluctuations in influent quality and sharply rising treatment costs. There is an urgent need to establish a precise and efficient pollution source tracing technology system to address the oversight challenges posed by concealed pollution sources within the drainage network. Targeting the 133 km main drainage network and over 100 drainage users within the city's urban area, an information platform integrating aqueous fluorescence fingerprint technology with the Simuwater model was developed for source tracing. By establishing an aqueous fluorescence fingerprint database, constructing a high-precision drainage network model, and integrating IoT monitoring data, the platform enables dynamic analysis of pollution sources

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3203204)

通信作者: 王凯 E-mail: lucky2024201@yeah.net

and precise oversight of drainage users. The practical application demonstrated that the platform successfully identified the pollution source within 1.5 hours. The Simuwater model further validated the results by simulating dispersion path and concentration variation of pollutant plumes, achieving simulation errors of $\leq 5\%$ at key nodes, which provided a scientific basis for traceability decision-making. The information platform effectively addresses the challenges of difficult pollution traceability and low supervision efficiency in urban drainage network, promoting a shift from reactive response to proactive prevention in regulatory models, and enhancing the operational stability of drainage systems.

Keywords: drainage network; aqueous fluorescence fingerprint; Simuwater model; source supervision; pollutant tracing

随着城市化进程的加速,排水管网规模不断扩大,以工业企业、餐饮单位等为主体的污水偷排问题突出。这类污染具有随机性强、溯源困难等特点,不仅会导致污水处理厂进水水质波动加剧,影响处理工艺稳定性^[1-2],还可能引发水体富营养化等次生环境风险。传统溯源方法主要依赖人工排查和常规指标比对,存在响应滞后、定位模糊等缺点^[3],难以满足当前治理需求。

现有污染溯源技术主要分为定性解析和定量反演两类。在定性解析技术中,三维荧光光谱法具有自动化程度高、无二次污染等优点^[4],可基于水质荧光指纹快速识别污染源类型,但无法量化污染物迁移路径及时空分布^[5-6],单独应用时难以实现“从识别到定位”的完整溯源闭环。定量反演技术以水力水质模型为核心,通过模拟污染物迁移扩散过程实现溯源,但SWMM等传统定量模型存在数据依赖性强、适用场景受限、与污染源识别技术衔接不畅等问题^[7],无法与定性解析技术形成互补。中国市政工程华北设计研究总院有限公司研发的城市水系统控制仿真模型(Simuwater)^[8],采用“源头-过程-末端”全流程模拟框架,能够实现排水户与管网节点的动态关联,通过参数优化算法可降低数据依赖,同时支持与水质监测数据的实时耦合,可为定性解析技术提供模拟验证支撑,有效填补了传统定性技术与定量技术间的衔接空白,为构建一体化溯源体系奠定了基础。鉴于此,以河北省某市排水主干管网为研究对象,创新性提出了融合水质荧光指纹技术与Simuwater模型的源头溯源解决方案和信息化平台。该平台通过水质荧光指纹快速锁定污染源,结合模型模拟验证污染物的迁移扩散过程,最终实现污染源精准溯源和排水户的可视化监管,为城市水环境

精细化管理提供了可行的技术支撑路径。

1 研究区域概况

以河北省某市排水主干管网为研究对象,范围覆盖市域内100余家以工业企业为主的排水户,其中重点排水户23家,主要涉及医疗、制药、洗涤及工业制造等行业。管网末端设有一座污水处理厂($10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),负责处理市区生活污水和工业废水,管网、重点排水户及污水处理厂的分布见图1。



图1 管网、重点排水户及污水处理厂的分布情况

Fig.1 Distribution diagram of pipeline network, key drainage households and wastewater treatment plant

经过多年建设,该区域已形成较为复杂的排水管网系统,随着城市的发展和排水户数量的增加,系统运行中逐渐暴露出一些问题。首先,区域内排水户数量众多且分布广泛,监管体系尚不完善,部

分企业存在偷排、超排等违规行为,易对末端污水处理厂造成进水冲击;其次,传统监测手段因监测点位有限、监测数据实时性差等问题,难以及时准确地识别污染源;此外,管网老化、破损和渗漏等问题也干扰了对污染源的准确判断。因此,建立高效、精准的排水管网污染物溯源体系已成为该区域水环境治理过程中的迫切需求。

2 材料与方法

2.1 水质荧光指纹库建设与指纹相似度算法

通过实地调研排水户污染源,结合监管需求筛选出污染风险较高的23家重点排水户作为监测对象。根据污染源生产及排污情况,采用自动采样与人工采样相结合的方式对各排污企业具有水质特征代表性的点位(如工艺排水口、污水收集池、生产车间出水、雨水排口等)实施周期性连续采样,根据污染源工艺复杂情况设定每15 min~6 h采样一次,每个污染源采集样品数量不少于50个,采样周期为1~20 d,以全面反映企业生产与排污规律。依据《入河入海排污口监督管理技术指南 水质荧光指纹溯源方法》(HJ 1407—2024)相关要求,提取所采集水样的水质荧光指纹特征并建立数据库。为支撑溯源研判,本研究综合采用以下两种水质荧光指纹相似度算法。

① 区域百分比相似度算法

为定量比较不同水样的水质荧光指纹,采用区域百分比相似度进行量化分析,计算公式如下:

$$a = \left[1 - \frac{\sum \left| \frac{S_1}{S_{1,\max}} - \frac{S_2}{S_{2,\max}} \right|}{T_{\text{pairs}}} \right] \times 100\% \quad (1)$$

式中: a 为区域百分比相似度,%; S_1 、 S_2 分别为样本1和样本2的光谱矩阵,需去除瑞利散射线和拉曼散射线; $S_{1,\max}$ 、 $S_{2,\max}$ 分别为样本1和样本2光谱矩阵中波长对(发射波长与激发波长)的荧光强度最大值; T_{pairs} 为光谱矩阵中波长对的总数。

② 基于荧光光谱特征的其他算法

基于水质荧光指纹的荧光光谱特征,如荧光峰数量、激发和发射波长、强度、区域强度积分等进行比较、聚类或机器学习等计算。通过平行因子分解法将水质荧光指纹分解为若干荧光组分,采用余弦相似度算法计算水体荧光组分和污染源荧光组分

之间的相似度^[9],判断水体污染来源。其中判别标准依据荧光指纹相似度划分:当相似度 $\geq 90\%$ 时为“高度相似”,说明水样主要受单一污染源影响;当 $60\% \leq \text{相似度} < 90\%$ 时为“相似”,说明可能存在混合污染源;当相似度 $< 60\%$ 时为“不相似”,说明水样之间无显著关联。

当上述两种算法结果存在差异时,优先以区域百分比相似度作为初步筛查依据。若两种算法结果差异值 $\leq 10\%$,取两者平均值作为最终相似度;若差异值在 $(10\%, 20\%]$ 范围内,结合特征峰位置匹配情况进一步验证:当峰位置匹配度 $\geq 80\%$ 时,以基于荧光光谱特征的综合相似度为准,反之则以区域百分比相似度为准;若差异值 $> 20\%$,则重新核查采样与检测流程规范性,排除干扰因素后重新计算,如果结果仍存在显著差异,则结合排水管网拓扑关系、节点水质常规指标监测数据进行交叉验证,最终确定污染源归属。

为确保监测覆盖范围,结合研究区域排水管网拓扑结构,在下游污水处理厂进水口、东线与西线主干管网关键节点处布设水质溯源仪设备。设备可定时自动采样,并可将水质指纹测试结果实时上传至源头溯源信息化平台。除特殊情况外,所有溯源仪均保持24 h在线运行状态。

2.2 模型构建与率定

2.2.1 基础数据收集

本研究建模范围面积约为90.45 km²,基础资料收集包含基础数据、矢量数据、统计数据、率定数据和其他数据等。①基础数据:包括遥感影像、用地类型等数据,用于划分管道节点的服务区;②矢量数据:包括排水分区体制、管线数据、厂站设施数据等,用于搭建排水管网模拟骨架;③统计数据:包括降雨数据、污染源统计数据、管网监测数据、污水厂进水水质和水量数据等,用于管网系统运行特征分析及模型参数设置;④率定数据:包括已发生过污染事件的监测数据等,用于模型校核率定;⑤其他数据:包括已有的调查和养护过程业务数据、现状已知管网缺陷相关资料、地下水位数据等,用于提高模型参数的准确度。

2.2.2 模型搭建

基于该市排水设施普查数据,依据污水系统分区及用地类型分布,对管网基础数据进行梳理和拓扑分析,将市区范围内的排水管网划分为5大污水

分区系统(见图1),包括桥西、桥东、经开北部、经开南部和洋河新区污水系统。根据该市不同污水分区排水管网连接关系和用地类型数据,详细梳理排水系统管线数据和设施、节点关系,保留核心转输管线路由,构建“排水分区-节点-排水管线”之间的拓扑对应关系,应用Simuwater软件建立该市排水系统模型骨架,以反映污水收集和排放过程。

2.2.3 模型参数设置

基于实际基准数据,运用Simuwater软件开展污水系统参数识别工作。采用马斯京根法模拟管道流量传输过程,主要识别参数为马斯京根参数 K 、 N 、 $X^{[10]}$ (K 为河段线性蓄量常数,表示恒定流条件下单个子河段的平均流动时间,反映单一管段的传输延时; X 为流量比重因子,表示入流和出流对槽蓄影响的相对权重,反映管段的削峰作用; N 为管道子段数);管渠参数则参照实际管道参数(长度、坡度、粗糙度、管型等)或根据经验进行赋值,参数识别过程采用蒙特卡洛优化算法,并以纳什效率系数(NSE)和偏差指标作为优化判据,最终得到各管道、管渠的设定参数。模型采用简化处理方式,排水设施以概化模块表示,并依据实际情况设置蓄水面积、高程等参数,同时参考污水处理厂和泵站实际运行规则设定模型边界条件,确保模拟结果准确反映系统实际运行特征。

2.2.4 模型率定与验证

模型构建完成后,通过加载实测降雨数据进行模拟,并与校验后的实测值进行对比,以NSE为主要评价指标,要求NSE不小于0.5,即良好等级。数据基础依托该市污水主干管监测点位及污水处理厂运行数据,若实测数据不足或质量欠佳,则根据当地实际情况选择合适的参数取值。

率定过程包括基于经验和实测数据的率定,根据是否包含污水量分别进行旱天与雨天流量的率定。选择具有代表性的监测点位数据,通过调整模型参数,使模拟结果与实测数据达到较高拟合度,以保证模型可真实反映区域的水文水力特征。

2.3 源头溯源信息化平台搭建

2.3.1 总体架构设计

本研究设计的源头溯源信息化平台采用四层架构,自下而上包括数据采集层、数据传输层、数据中心层和业务应用层,如图2所示。数据采集层依托流量计、液位计、水质监测微站和水质溯源仪等

设备实现实时数据采集;数据传输层通过通用分组无线服务技术确保数据高效传输至数据中心层;数据中心层作为平台核心,负责水质指纹库等数据的存储、处理与分析;业务应用层则整合了排水户管理与源头溯源等核心功能,不仅为Simuwater模型提供从参数配置到结果可视化的全流程操作平台,还能直观展示水质指纹比对结果,实现业务管理、模型应用与风险预警的协同运作。

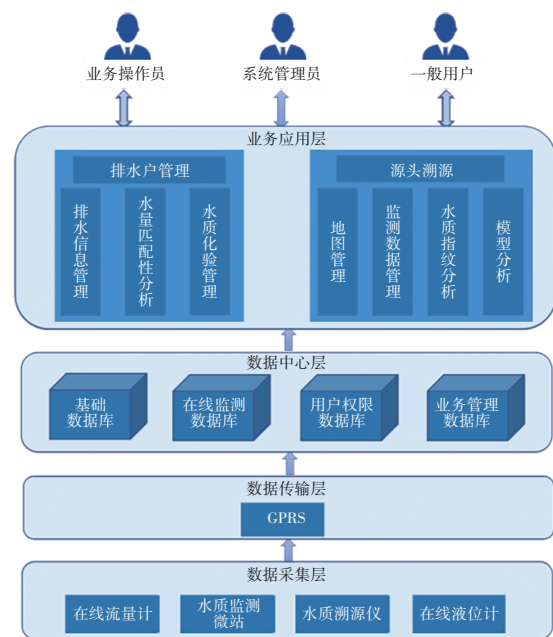


图2 源头溯源信息化平台总体架构

Fig.2 Overall architecture diagram of information platform for source tracing

2.3.2 主要应用场景

① 源头排水户精细化监管

平台已建立该区域内100余家排水户的电子信息档案,通过将水质荧光指纹数据纳入排水户电子档案,并结合Simuwater模型分析排水特征,实现排水户管理流程的规范化。Simuwater模型与水质指纹技术协同应用,可为排水稳定性动态评估及异常排水早期识别提供支撑。

② 排水户偷排漏排溯源排查

平台通过将实时采集的异常水质荧光指纹与内置指纹库比对,快速定位可疑排水户。并在此基础上结合Simuwater模型模拟污染物迁移路径与浓度变化,通过与实际监测数据交叉验证,进一步提升溯源精准度。Simuwater模型与水质荧光指纹技术的深度融合,实现了可疑排水户的快速锁定、污

染扩散动态模拟及溯源结果科学验证的三重功能,为排水系统稳定运行与水质安全提供双重保障。

③ 污水处理厂进水风险预警

平台整合了 Simuwater 模型、在线监测、水质荧光指纹比对及告警功能。当监测到污染物浓度或水质荧光指纹异常时,平台会立即触发告警机制。同时, Simuwater 模型基于异常数据,实时预测污染物的迁移路径、浓度变化、影响范围及到达时间,实现风险早期识别和污染演化动态预测。该功能可为污水处理厂提供进水负荷预警,使运行人员能够提前 2~4 h 采取应对措施,有效避免进水冲击。

3 应用实例

研究区域已构建一套完善的污染溯源技术体系,主要包括:在排水管网关键节点布设水质监测微站和水质溯源仪,实现对流量、液位、COD、TP、TN、NH₃-N 等多项水量和水质指标的实时监测,并具备异常水样自动留样取证功能;源头溯源信息化平台集成当地典型行业水质指纹库及 23 家重点排水户的特征水质指纹数据,能够通过对异常水样进行水质指纹比对分析,辅助污染源头的快速精准识别;此外,平台内嵌 Simuwater 模型,具备污染物扩散路径模拟、浓度衰减动态计算及影响范围预测等功能,可为溯源结果提供验证支撑。

3.1 异常发现

某日上午 09:45,该市源头溯源信息化平台监测到末端污水处理厂进水水质异常,COD、TP、TN 和 NH₃-N 浓度分别骤升至 803.4、38.1、135.7 和 112.1 mg/L,远超过该污水处理厂设计进水指标及常规波动范围(COD≤500 mg/L、TP≤8 mg/L、TN≤70 mg/L、NH₃-N≤60 mg/L)。根据该厂设计标准与运行经验,当 TN、TP 等指标超出设计进水浓度范围时,需通过增加药剂投加量来确保出水达标,这将会直接导致能耗与运行成本升高。

同时,安装在污水处理厂进水口 1#节点的 2 号水质溯源仪触发报警,并自动留存异常进水水样。该污水处理厂收纳来水分东、西两条管线,在厂外墙约 500 m 处汇合进入污水处理厂,为快速定位污染来源,平台调取了当日 09:45 东、西两条汇水支线各节点的实时监测数据,具体见表 1。结合管网拓扑关系(见图 3)进行初步空间分析发现,位于东线管网节点的 4 号微站(4#节点)监测到各水质指标均

处于正常范围,而位于西线的 3 号微站(3#节点)、2 号微站(2#节点)和 1 号微站(1#节点)监测到的各指标浓度均显著超标,且呈现出沿 3#→2#→1#方向浓度递减的变化特征,由此可初步排除东线管网异常排水的嫌疑。鉴于更上游的西线 1 号溯源仪未触发报警,综合推断污染源应位于 1 号溯源仪下游至 1#节点上游之间的西线管段。

表 1 各节点处实时监测数据

Tab.1 Real-time monitoring data at various nodes

mg/L				
项目	COD	TP	TN	NH ₃ -N
1#节点	810.98	38.63	135.26	112.67
2#节点	890.07	41.31	168.91	135.01
3#节点	970.68	46.12	172.32	156.32
4#节点	302.16	5.61	62.83	48.45



图 3 溯源监测排查点位示意

Fig.3 Schematic diagram of traceability monitoring and inspection points

3.2 基于水质荧光指纹确定疑似污染源

为进一步锁定污染源所在区域范围,通过源头溯源信息化平台进行水质指纹比对分析。污水处理厂正常进水与异常进水的水质荧光指纹如图 4 所示。正常进水水质指纹主要有两个特征峰,分别在激发波长/发射波长($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}$)为 275 nm/305 nm 和 230 nm/305 nm 处,而异常进水水质指纹的两个特征峰分别在 280 nm/335 nm 和 230 nm/345 nm 处,特征峰的明显偏移说明进水污染物组成存在显著差异,有外源特征污染物输入。

将异常进水指纹与东、西线各节点水样指纹(见图 5)进行进一步比对。结果显示,污水处理厂异常进水与西线 2#、3#节点处水样的指纹相似度分别高达 99.13%、97.17%,而与西线上游 1 号溯源仪及东线 4#节点水样的指纹相似度均低于 60%,结合

荧光指纹相似度判别标准,可判定本次异常进水来源于西线管网1号溯源仪下游的单一污染源,这与各管网节点处的水质监测数据结果相互印证。

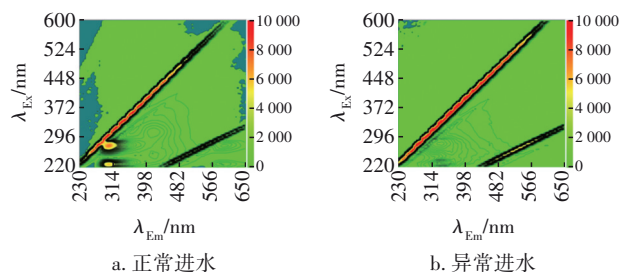


图4 污水处理厂正常进水与异常进水水质荧光指纹对比
Fig.4 Comparison of aqueous fluorescence fingerprints between normal and abnormal influents of WWTP

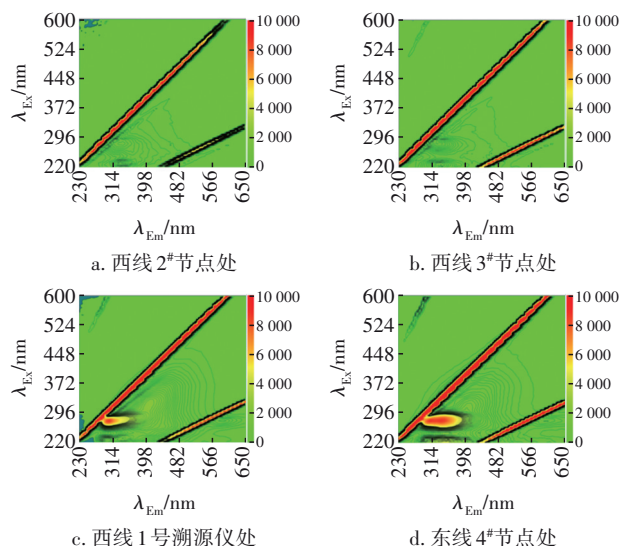


图5 各节点处的水质荧光指纹
Fig.5 Aqueous fluorescence fingerprints at various nodes

为进一步缩小溯源范围,源头溯源信息化平台将2号水质溯源仪留存的异常进水水质荧光指纹首先与内置的本地典型行业水质指纹图谱进行比对。结果表明,污水处理厂异常进水水质指纹与金属制造行业水质指纹[见图6(a)]相似度高达78.43%,显著高于其他行业(均低于60%),可初步推断污染源为金属制造类企业。经排查,西线1号溯源仪下游至1#节点上游位置之间有3家金属制造相关企业(A、B、C),其分布位置见图3。采集3家企业排污口的水样进行水质荧光指纹分析[见图6(b)~(d)],经比对,异常进水水样与企业A、B、C的水质指纹相似度分别为93.21%、51.99%、75.66%。综合分析表明,金属制造企业A为本次异常进水的污染源(图3中的P点为该企业污水排口)。

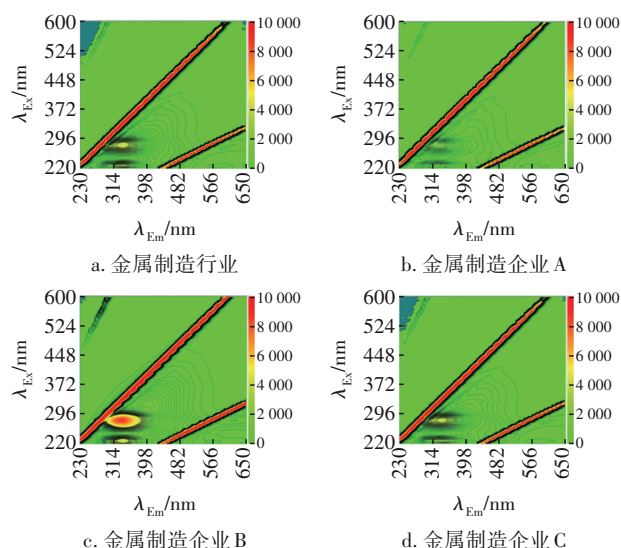


图6 金属制造行业水质荧光指纹
Fig.6 Aqueous fluorescence fingerprints of metal manufacturing industry

3.3 基于Simuwater模型溯源验证

为验证源头溯源信息化平台筛查结果的准确性,本研究采用Simuwater模型对污水处理厂异常进水事件中污染物从排放源到下游关键节点的迁移路径及浓度变化过程进行了模拟,通过对比模拟结果与实际监测数据的一致性,完成了平台溯源结果的验证。本次模拟选取在异常进水事件中浓度响应较为显著的COD作为验证参数,由于COD在金属加工废水中常与氮、磷等污染物共同排放,其迁移路径和浓度变化趋势也可有效反映其他污染物(如TP、TN、NH₃-N)的扩散规律。模型模拟参数主要依据金属制造行业典型废水水质数据及该金属制造企业的历史排污记录 and 实际运行排放特征进行设置,其中COD排放浓度设为1 800 mg/L,排放流量设为0.012 7 m³/s,排放持续时间设为2 h。为进一步明确各模型参数对污染物迁移过程的影响规律,本研究系统考察了排放浓度、排放流量与持续时间等关键参数对模拟结果的影响,结果表明:改变排放浓度会导致下游节点峰值浓度预测值发生变化,但污染团到达各节点的时间基本不变,说明排放浓度对污染物扩散路径无显著影响;流量参数的变化会影响污染物在管网中的输运过程,从而影响污染物到达下游节点的时间和峰值浓度;排放持续时间的变化主要影响下游节点的浓度平台期长度,而对峰值浓度和污染物扩散路径影响较小。上述参数响应规律与已有相关研究结论一致^[11],表明该模型能

够较好地反映实际系统中污染物的迁移扩散机制。

3.3.1 扩散路径验证

模型模拟结果显示,污染物从排放源进入管网后,沿P点→3#→2#→1#路径随水流迁移,具体见图7。实际监测数据表明,3#、2#和1#节点的COD浓度梯度分布(分别为970.68、890.07、810.98 mg/L)与模拟路径高度一致。同时,由于东线水质微站等其他支线节点均未检测到异常浓度,进一步排除了污染物通过其他路径扩散的可能性。

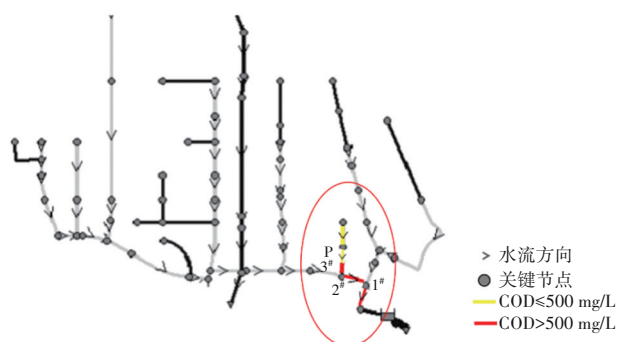


图7 模型模拟扩散路径

Fig.7 Model-simulated diffusion path

3.3.2 节点浓度变化验证

模拟输出的排放源下游主要节点COD浓度变化曲线与实际监测曲线(见图8)对比分析表明,在污染事件发生后,模拟与监测曲线各节点COD浓度迅速上升并形成明显峰值,随后进入浓度平台期,最终随排放结束而逐渐下降。其中,模型模拟曲线中3#、2#、1#节点的峰值出现时间、平台期持续时间和形态与实际监测曲线基本一致,各节点最大浓度的误差均小于5%。根据相关研究^[12],相对误差<20%即视为模拟结果可接受,因此验证了污染物来源判断的准确性。

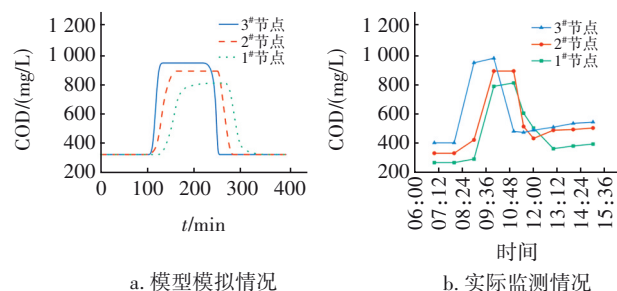


图8 污染发生前后关键节点COD浓度变化情况

Fig.8 Changes in COD concentration at key nodes before and after pollution occurrence

此外,模型模拟结果显示,在设定流量(0.012 7

m³/s)条件下,污染物从排放源P点依次到达下游3#、2#、1#节点的时间分别为0.8、1.5、2.3 h,与实际监测数据中异常浓度首次检出的时间点(分别为事件发生后0.9、1.6、2.4 h)高度吻合,时差均小于0.2 h。同时,模型设定的排放持续时间(2 h)与实际监测曲线中各节点出现的异常浓度平台期长度(约1.8~2.2 h)基本对应。综上,模型在污染物峰值浓度、节点到达时间和污染影响时长三个维度上均与实际监测数据表现出一致性,系统验证了本次模型参数设定的合理性与溯源结果的可靠性。

本次污染溯源工作从平台报警到最终锁定污染源仅耗时1.5 h。经现场核查,金属制造企业A因储存罐阀门破损导致废水泄漏,经排污口进入管网,这一情况与溯源结果一致。基于溯源结果,当地环保部门立即采取管控措施,有效阻断了污染源排放,避免了污水处理厂进水水质的进一步恶化。

4 结论

① 针对河北省某市排水管网偷排漏排问题,创新性地开发了耦合水质荧光指纹与Simuwater模型的源头溯源信息化平台。该平台在实际应用中展现出卓越的溯源分析与管理效能,为提升城市水环境治理水平提供了重要技术支撑。

② 平台通过整合物联网监测与业务数据,实现了水质荧光指纹的自动比对与可疑排水户的智能锁定,显著提升了异常排污溯源精度、排水户监管效能和污染源动态解析能力。

③ 平台将水质荧光指纹技术与Simuwater高精度仿真模型相结合,可精准模拟排水系统水量与水质变化,形成“监测-预警-溯源-验证-处置”的闭环管理体系。这一体系不仅能有效预警污水处理厂进水风险,还能快速定位污染源头,为应急处置决策提供科学依据,有力保障了城市排水系统的稳定运行。

④ 本研究成功破解了排水系统源头溯源的技术难题,通过指纹追踪与模型验证的有机融合,构建了一套完整的信息化解决方案。该方案不仅在河北省某市的实践中取得了显著成效,其技术路径和实施经验更可为其他城市的水环境治理工作提供有益参考。

参考文献:

[1] 梁鸿,王文霞,蒋冰艳,等.水污染预警溯源技术应

- 用案例研究[J]. 环境影响评价, 2021, 43(2): 56-60.
- LIANG H, WANG W X, JIANG B Y, et al. Cases study on early-warning and discharge source identification technology of water pollution[J]. Environmental Impact Assessment, 2021, 43(2): 56-60 (in Chinese).
- [2] 楚金喜, 吕丹, 贾清龙, 等. 活性污泥重金属中毒的工艺调控方法与对策[J]. 净水技术, 2022, 41(1): 166-171.
- CHU J X, LÜ D, JIA Q L, et al. Process control and solutions for activated sludge poisoning caused by heavy metals [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(1): 166-172 (in Chinese).
- [3] 胡远, 冯亮, 柴一获, 等. 基于水质荧光指纹的污水处理厂异常进水溯源新方法[J]. 环境监控与预警, 2024, 16(6): 1-7.
- HU Y, FENG L, CHAI Y D, et al. Novel method for pollution source identification of abnormal influent of wastewater treatment plant based on aqueous fluorescence fingerprint [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2024, 16(6): 1-7 (in Chinese).
- [4] 曹慧敏, 李超, 毛俊毅. 水体污染物溯源方法研究综述[J]. 污染防治技术, 2021, 34(5): 3-7.
- CAO H M, LI C, MAO J Y. A review of research on traceability methods for water pollutants [J]. Pollution Control Technology, 2021, 34(5): 3-7 (in Chinese).
- [5] 张国慧. 环境水体中污染物的溯源分析技术研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2024.
- ZHANG G H. Study on Traceability Analysis Technology of Pollutants in Environmental Water [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2024 (in Chinese).
- [6] SHEN J, LIU B, CHAI Y D, et al. Characterizing fluorescence fingerprints of different types of metal plating wastewater by fluorescence excitation-emission matrix[J]. Environmental Research, 2021, 194: 110713.
- [7] 李琪. 基于弗雷歇距离模型的污水厂进水异常污染溯源研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- LI Q. A Study on the Traceability of Anomalous Pollution in Wastewater Plant Influent Based on Frechet Distance Modeling [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023 (in Chinese).
- [8] 王丽娜, 刘海婷, 韩冠宇, 等. 基于源-网-厂-河耦合仿真的水体污染治理效果分析[J]. 净水技术, 2024, 43(9): 142-150.
- WANG L N, LIU H T, HAN G Y, et al. Effect analysis of water environment pollution control based on combined simulation of source-network-plant-river[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(9): 142-150 (in Chinese).
- [9] SHEN J, LIU C Y, LV Q, et al. Novel insights into impacts of the COVID-19 pandemic on aquatic environment of Beijing-Hangzhou Grand Canal in southern Jiangsu region [J]. Water Research, 2021, 193: 116873.
- [10] 王浩正, 邱依婷, 韩冠宇, 等. 基于马斯京根方法的概念模型在排水系统中的应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(13): 113-120.
- WANG H Z, QIU Y T, HAN G Y, et al. Construction and application of conceptual model based on Muskingum method in urban drainage system[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(13): 113-120 (in Chinese).
- [11] 陈月芳, 刘倩, 张宇琪, 等. 基于Morris筛选法的河水污染物混合长度相关参数敏感性分析[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(7): 903-909.
- CHEN Y F, LIU Q, ZHANG Y Q, et al. Sensitivity analysis of parameters related to river mixing length based on Morris method[J]. Environmental Pollution & Control, 2023, 45(7): 903-909 (in Chinese).
- [12] 赵康. 城市排水管网水流水质数值模拟及应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- ZHAO K. Numerical Simulation and Application Research on Water Flow and Quality in Urban Drainage Networks[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023 (in Chinese).
-
- 作者简介:**王立剑(1979—), 男, 河北张家口人, 本科, 工程师, 主要从事排水防涝、水环境治理等相关工作。
- E-mail:**757768365@qq.com
- 收稿日期:**2025-09-01
- 修回日期:**2025-12-10

(编辑:刘贵春)