

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.020

基于分区水质监测的污水管网收集效能评估

黄晓敏^{1,2}, 傅肖尉³, 赵志超^{1,2}, 尹海龙³

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 2. 湖北省长江流域水环境综合治理工程技术研究中心, 湖北 武汉 430010; 3. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要:为评估城镇污水管网收集效能,提出了污水管网分区水质监测与化学质量平衡模型相结合的污水管网诊断评估方法,并联合贝叶斯-马尔科夫链蒙特卡洛模拟算法解决了溯源解析的不确定问题,对污水处理厂进水有机污染指标质量浓度偏低和可生化性低的原因进行了解析。以武汉市某污水处理厂服务区域为研究对象,建立了生活污水、工业废水和地下水的属地化水质特征因子数据库,并开展了污水干管分区水质特征因子监测。结果表明:通过耦合贝叶斯-马尔科夫链蒙特卡洛模拟算法与化学质量平衡模型,实现了基于水质监测的水量来源占比合理解析;研究区污水干管中电子工业废水量占比高达53.2%~74.4%,地下水入渗量占比为14.3%~29.5%,污水处理厂进水可生化性低的主要原因是大量无机工业废水排入污水管网;应加强对工业废水排入污水管网的监管,重点对研究区域上游污水管段的破损状况开展排查,通过精准化手段提高污水治理效能。

关键词:污水管网;水质特征因子;化学质量平衡模型;管网诊断;入流入渗

中图分类号:X52;TU992 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)06-0152-008

Evaluation of collection efficiency of sewer network based on water quality zoning monitoring//HUANG Xiaomin^{1,2}, FU Xiaowei³, ZHAO Zhichao^{1,2}, YIN Hailong³ (1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China; 2. Hubei Provincial Engineering Research Center for Comprehensive Water Environment Treatment in the Yangtze River Basin, Wuhan 430010, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A method for evaluating the sewage collection efficiency of urban sewer network was put forward based on water quality zoning monitoring and the chemical mass balance model. The Bayesian-Markov chain Monte Carlo simulation algorithm was introduced to address the uncertainty problem in source flow proportion simulation, and the reason for the low mass concentration of organic pollution index and poor biodegradability of inflow of wastewater treatment plant was analyzed. Taking the service area of a wastewater treatment plant in Wuhan City as the study site, a site-specific water quality tracer parameter database of domestic sewage, industrial wastewater, and groundwater was established, and in-sewer water quality monitoring along the trunk sewer was carried out. The results showed that by introducing Bayesian-Markov chain Monte Carlo simulation algorithm into the chemical mass balance model, the rational analysis of source flow proportion based on water quality monitoring was realized. The proportion of electronic manufacturing wastewater entering the sewer network was as high as 53.2% to 74.4%, whereas the proportion of infiltrated groundwater was 14.3% to 29.5%. The main reason for the low biodegradability of wastewater treatment plant inflow was associated with large amounts of inorganic industrial wastewater discharge into the sewer network. Therefore, it is necessary to strengthen the surveillance of industrial wastewater discharge, to focus on detection of potential defect in the upstream sewer pipe section, and to improve the efficiency of sewage collection and treatment through targeted measures.

Key words: sewer network; water quality tracer parameter; chemical mass balance model; sewer diagnosis; inflow and infiltration

基金项目:国家长江生态环境保护修复联合研究中心项目(2022-LHYJ-02-0302);长江勘测规划设计研究有限责任公司自主创新项目(CX2020Z24)

作者简介:黄晓敏(1987—),女,正高级工程师,博士,主要从事水环境综合治理研究。E-mail:420266427@qq.com

通信作者:尹海龙(1976—),男,教授,博士,主要从事城镇排水系统优化设计与运行研究。E-mail:yinhailong@tongji.edu.cn

截至 2021 年,全国城镇污水处理厂已达 4 600 余座,日处理水量超过 2.3 亿 m^3/d ,规模居世界第一^[1]。但是,许多污水处理厂的进水水质低于设计标准,一方面导致污水处理厂进水的可生化性低、污水处理费用高,污水处理效能得不到有效利用;另一方面造成大量污水未经收集直排河道,水功能区水质达标率低^[2-3]。据统计,全国 37.5% 的污水处理厂进水化学需氧量(COD)质量浓度低于 150 mg/L ^[4-5];以污水处理厂进水污染负荷量与服务范围内污染负荷量的比值计算,全国平均实际污水收集率只有约 66%,远低于按照污水处理厂进水水量计算得出的污水收集率统计数据^[6]。国家发改委 2021 年发布的《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》中提出,要从增量建设转变为系统提质增效与增量建设并重,提升现有污水治理设施的污水收集处理效能。

污水管网诊断评估是城镇污水处理提质增效的前提^[7],目前污水管网诊断评估主要分为物探检测和数值化诊断两种方法^[8-11]。物探检测主要采用管道闭路电视成像(closed circuit television, CCTV)法,通过利用带有摄像装置的管道行走机器人在管道内部拍照,对管道的结构性和功能性缺陷进行判定^[12]。但是 CCTV 法操作需要对管道封堵、降低水位和清淤操作,污水管道全面检测费用昂贵,高水位运行条件下也难以实施^[13]。数值化诊断方法通过在管网中开展水量水质监测,根据污水片区或者污水管段上下游水量水质变化对管网不同水量类型接入进行定量分析,从而对污水管网的运行情况进行评估^[14-15]。该方法无须污水管网的断水操作,具有对管道运行不产生干扰的优势,近年来逐渐得到重视和应用。基于水质特征因子监测的诊断评估方法,通过筛选不同水量类型(生活污水、工业废水、地下水等)的保守性和差异性特征因子,结合化学质量平衡分析,能够定量解析管网中不同水量类型的接入占比,并进一步评估污水管网破损、工业废水接入等问题^[16-18]。该方法近年来在上海、巢湖等地的管网破损、混错接问题评估和诊断排查中已有应用,其中,对污水管网的诊断评估主要是对生活污水接入的管网中地下水入渗和破损程度进行了定量解析^[19-20]。但我国各地污水管网的水量来源性质复杂,既有生活污水接入,也可能有工业废水接入,还包括了地下水等外水入流入渗。如何准确分析复杂来源水量综合作用对污水处理厂进水水质和可生化性的影响,需要进一步深入研究。

本文以武汉某开发区污水处理厂服务范围的污水管网为研究对象,建立属地化的水质特征因子数

据库,开展污水管网分区水质特征因子监测,定量解析污水处理厂进水有机污染指标质量浓度低的成因,为复杂水量接入条件下的污水管网运行诊断和污水处理提质增效提供科学依据。

1 研究区概况

研究区为武汉某开发区污水处理厂(图 1)。该污水处理厂设计进水量为 10 万 m^3/d ,实际进水量约 7.2 万 m^3/d ,处理后的尾水排放执行一级 A 标准。该污水处理厂服务面积约 45.2 km^2 ,管网总长度约为 144 km,2020—2021 年该污水处理厂旱季进水 COD、5 日生化需氧量(BOD_5)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、总氮(TN)和总磷(TP)平均质量浓度分别为 99.9、34.1、12.2、22.5、1.4 mg/L ,仅为设计进水各指标质量浓度的 19%~56%。污水处理厂进水表现为有机污染指标质量浓度低、可生化性差的特点,需对该服务区域污水管网的收集效能进行诊断评估,确定制约污水处理提质增效的原因。



图 1 研究区管网分区水质监测点位分布

Fig. 1 Distribution of water quality monitoring sites in different regions of sewer network in study area

2 研究方法

2.1 监测点位布设与采样方法

根据调查,该服务片区内分布有大型居民社区和高科技产业园区,污水管网既接纳生活污水,也接纳工业废水。其中,列入重点排污单位名录的工业企业有 3 个,均为电子企业,生产废水经预处理达到接管标准后排入污水管网。依据现场调查情况,分别选择代表性的生活污水和工业废水排放源,开展

水质采样和水质特征监测,建立水质特征因子数据库。如图1所示,选择大型居民社区(点位DZ)排放口1个、工业园区企业的集中生活区(点位CL和SH)排放口2个、工业园区企业(点位CJ、HX1、HX2和TM)的生产性污水排放口4个,分别开展生活污水和工业废水的采样监测。研究区降雨丰富、地下水位高,存在潜在的地下水入渗污水管网现象。为此,对研究区内一处地下水井(点位HX3)开展水质采样。

为了判断污水管网的运行状况,在污水主干管上开展分区水质监测。根据研究区域生活区和工业园区企业的分布情况,沿污水主干管从上游到下游共设置了5个监测点(图1)。由于2号和3号点间存在一段压力管道,无法设置监测点,故2号和3号点间的距离相对较长。

采样时间为2021年6月,采样前期至少连续72 h不降雨,以排除潜在的雨水入流对污水管网水质的影响。每个监测点位连续开展48 h监测,每4 h采集1个水样,在每个点位采集12个水样;对于地下水井,每天采集1个水样,连续采样7 d。每次采集水样置于聚乙烯瓶内,于当天运回实验室冷藏储存。

2.2 水质特征因子的选择

通过筛选保守性和差异性的水质特征因子,可以判断污水管网中接入水量的化学性质。具体来说,水质特征因子的选择原则为:①不同水量类型之间的污染物质量浓度差异显著;②管道中基本不发生物化、生化反应;③具有较高的灵敏度和可重现性。

生活污水的水质特征因子采用TN,TN主要来自人体排泄物,是人们日常生活的表征,且每天排放规律具有较好的稳定性^[21]。研究区域的工业企业为电子类企业,其生产废水主要来自电子器件蚀刻、清洗等工艺,所用蚀刻和清洗剂包括氢氟酸、碱液等,因此将氟化物和钠离子(Na^+)作为此类工业废水的水质特征因子。此外,引入硬度作为表征潜在地下水入渗的水质特征因子^[22]。

TN的测定依据HJ 636—2012《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》,钠离子的测定依据HJ 776—2015《水质 32种元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法》,氟化物(以 F^- 计)的测定依据HJ 84—2016《水质 无机离子(F^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 Br^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 、 SO_4^{2-})的测定 离子色谱法》,总硬度(以 CaCO_3 计)的测定依据GB 7477—87《水质 钙和镁总量的测定 EDTA滴定法》。

2.3 化学质量平衡模型

化学质量平衡模型的基本思想是在旱季污水管网水位较为稳定的条件下,污水管网任一监测点处

的出流污染物质量与上游各种来水汇入管网的污染物质量相同,即管网入流污染物质量等于出流污染物质量。模型方程为

$$\sum_{j=1}^n \rho_{ij} Q_j = Q \rho_i \quad (1)$$

式中: Q_j 为污水管网监测点上游区域水量类型 j 的入流量, $j=1,2,3$ 分别表示生活污水、工业废水和地下水; n 为水量类型总数, $n=3$; Q 为污水管网监测点处的流量; ρ_{ij} 为水量类型 j 的水质特征因子 i 的质量浓度; ρ_i 为污水管网监测点处水质特征因子 i 的质量浓度。

将式(1)的两边同时除以 Q 得到

$$\sum_{j=1}^n \rho_{ij} x_j = \rho_i \quad (2)$$

式中 x_j 为污水管网中水量类型 j 的水量占比,

$$\sum_{j=1}^n x_j = 1。$$

各来源水量和监测点的特征因子质量浓度难以预先给出一个确定的数值,这与实际生活污水、工业废水、地下水水质随时间和空间变化的不确定性,以及污水在管道中流动时间造成的不确定性有关。居民生活污水水质会随居民区生活水平、生活习惯、居民年龄分布等变化,采用某一个或者几个居住小区的水质监测结果计算,难免与服务区域内所有居民生活污水总体水质存在偏差。浅层地下水的水质在空间上也具有差异性,难以用一个监测点的地下水水质表征区域内地下水的总体水质。此外,不同点位的污水或者地下水进入管道后,在管道中的流动时间不同。由于污染物流入和流出管道的时间难以准确匹配,也很难用确定的数据表征入流和出流污染物质量浓度之间的准确对应关系^[23],为此,采用贝叶斯-马尔科夫链蒙特卡洛模拟算法解决质量平衡方程求解的不确定问题。贝叶斯概率分析是一种基于待求参数先验分布确定接近实际情况的参数后验分布方法,数学表达式为^[24-25]

$$p(\theta|\bar{\rho}) = p(\theta)L(\theta|\bar{\rho}) \quad (3)$$

式中: θ 为模型参数,指生活污水、工业废水、地下水中3个不同水质特征因子质量浓度和监测点不同来源水量占比,共12个参数; $\bar{\rho}$ 为监测点水质特征因子质量浓度; $p(\theta)$ 为模型参数的先验分布; $p(\theta|\bar{\rho})$ 为模型参数的后验分布; $L(\theta|\bar{\rho})$ 为似然函数,表征模型模拟值与对应实测值间的似然程度,其值越大表示两者拟合程度越好,本文采用对数型似然函数:

$$L(\theta|\bar{\rho}) = -\frac{m}{2} \ln(2\pi) - \sum_{i=1}^m \ln \sigma_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\bar{\rho}_i - \rho_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (4)$$

式中: m 为化学质量平衡模型方程中水质特征因子数量, $m=3$; $\bar{\rho}_i$ 为污水管网中某一监测点水质特征因子 i 质量浓度多次监测结果的平均值; σ_i 为污水管网中某一监测点水质特征因子 i 质量浓度的多次监测值标准差。

实际计算中采用多条平行马尔科夫链的蒙特卡洛模拟算法,通过高效率空间遍历搜索,解决限于局部最优的问题^[26]。计算流程如图 2 所示,计算步骤包括:基于现场监测数据,给出生活污水、工业废水、地下水水质特征因子质量浓度、管网监测点水质监测结果和各种类型水量占比的先验分布;基于式(2)(4)计算似然函数;设定平行模拟的马尔科夫链数量和迭代次数,进行马尔科夫链蒙特卡洛模拟,基于式(3)求出各种类型水量占比的后验分布,根据概率分布确定各种类型水量占比。具体实现方式上,在 MATLAB 计算语言环境下耦合差分进化自适应 Metropolis (differential evolution adaptive Metropolis, DREAM) 算法求解。DREAM 算法能够平行地生成多个马尔科夫链,有利于扩大参数搜索空间并加速收敛,因此更有助于识别出全局最优解^[26]。

3 结果与分析

3.1 不同来水水质监测结果

不同来水水质特征因子监测结果如图 3 所示。总体上,生活污水(DZ、CL 和 SH)中日均 $\rho(\text{TN})$ 为

45.8 mg/L,分别是工业废水(CJ、HX1、HX2 和 TM)和地下水(HX3)中相应值的 2.6 倍和 458 倍,因此, TN 可作为该区域表征生活污水接入的水质特征因子。研究区域工业废水中 $\rho(\text{TN})$ 较高,原因是蚀刻过程使用氨水,转化成铜氨络合离子和游离氨的形态存在于废水中,难以完全去除。地下水中 $\rho(\text{TN})$ 很低,表明该区域的地下水未受到污染。

由图 3 可以看出,工业废水中 $\rho(\text{F}^-)$ 和 $\rho(\text{Na}^+)$ 明显高于生活污水和地下水中的数值,与其生产工艺过程有关。3 家企业日均排放工业废水中 $\rho(\text{F}^-)$ 和 $\rho(\text{Na}^+)$ 的均值分别为 4.53 mg/L 和 435 mg/L,是生活污水中对应值的 22 倍和 11 倍,地下水中对应值的 9.6 倍和 25 倍。电子企业在生产工艺的蚀刻和清洗环节中使用了氢氟酸和氢氧化钠,导致其工业废水中 F^- 和 Na^+ 含量明显偏高。对 F^- 和 Na^+ 两种特征污染物而言,电子工业废水中 $\rho(\text{F}^-)$ 比 $\rho(\text{Na}^+)$ 更为稳定。调查的 3 家企业日均排放工业废水中 $\rho(\text{F}^-)$ 和 $\rho(\text{Na}^+)$ 范围分别为 3.03 ~ 6.34 mg/L 和 176 ~ 757 mg/L,最高和最低 $\rho(\text{F}^-)$ 比值和 $\rho(\text{Na}^+)$ 比值分别为 2.1 和 4.3,因此,与 Na^+ 相比, F^- 作为表征电子工业废水排放的特征因子更具有优势。此外,电子工业废水和生活污水中 $\rho(\text{F}^-)$ 比值也明显高于两种类型废水中 $\rho(\text{Na}^+)$ 比值,即 F^- 作为电子工业废水的特征因子指示性更强。

硬度是潜在表征地下水水质的特征因子。监测

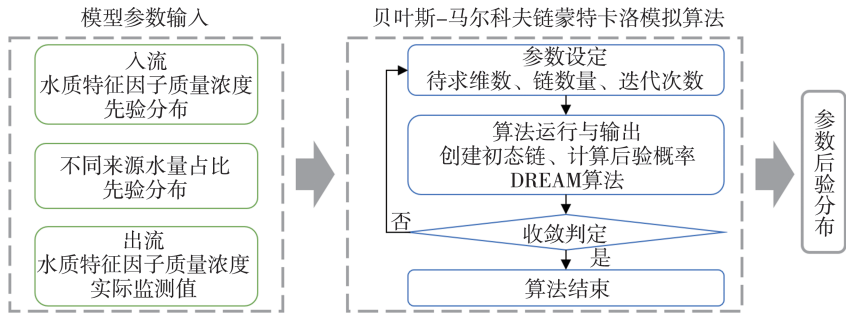


图 2 引入贝叶斯-马尔科夫链蒙特卡洛模拟算法的化学质量平衡模型求解流程

Fig.2 Technical route for solving chemical mass balance model with Bayesian-Markov chain Monte Carlo simulation algorithm

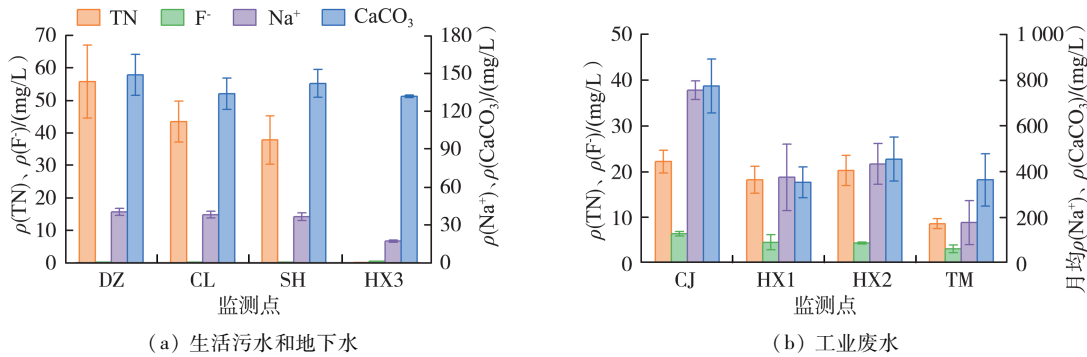


图 3 不同来水水质特征因子的监测结果

Fig.3 Monitoring results of water quality tracer parameters of different inflow sources

数据显示生活污水、工业废水和地下水中 $\rho(\text{CaCO}_3)$ 日均值分别为 142、353、132 mg/L,工业废水的硬度高于生活污水和地下水。究其原因,一是研究区域河湖密布,导致河湖水与浅层地下水显著交换^[27-29],使地下水的天然背景硬度值大幅度降低,接近于河湖水的硬度值;二是电子企业在含氟废水预处理过程中添加氯化钙或氢氧化钙^[30],导致工业废水的硬度值明显升高,进一步表明了针对不同区域开展属地化水质监测的必要性。

3.2 污水干管水质监测结果

污水干管水质特征因子监测结果如图 4 所示。5 个监测点的日均 $\rho(\text{TN})$ 在 16.4 ~ 21.4 mg/L 之间,显著低于生活污水中的 $\rho(\text{TN})$,5 个监测点的日均 $\rho(\text{F}^-)$ 、 $\rho(\text{Na}^+)$ 分别为 4.04 ~ 5.30 mg/L 和 313 ~ 722 mg/L,表现出明显的工业废水水质特征。污水干管监测点处的硬度值也明显高于生活污水和地下水的硬度值。因此,基于 4 个水质特征因子的监测结果,可以初步判断研究区域污水管网中最主要的水量来源是工业废水,即工业废水大量接入是造成污水处理厂进水有机污染指标(COD、BOD₅、NH₃-N、TN、TP)质量浓度明显低于设计值的原因,而非大量入渗的地下水。基于有限监测点的污水干管水质特征因子检测结果对污水处理厂进水水质和污水管网收集效能进行评估,方法简单快捷,可操作性强,具有显著优势。

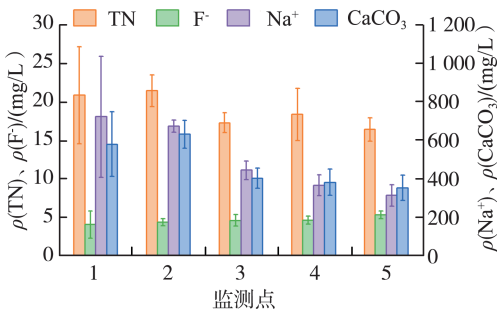


图 4 污水干管监测点水质特征因子检测结果
Fig.4 Monitoring result of water quality tracer parameters along trunk sewer

进一步分析污水干管监测点间水质特征因子的变化可以发现 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{F}^-)$ 在 1 ~ 5 号监测点间的变化不明显; $\rho(\text{Na}^+)$ 和硬度从污水干管上游至下游呈现沿程下降的趋势。出现这一现象的原因可能与下游电子企业工业废水排放中 $\rho(\text{Na}^+)$ 较低有关,且地下水入渗水量的变化对管网沿程的硬度会产生影响。

3.3 污水干管不同来水水量占比解析

为进一步揭示污水干管监测点间水质特征因子变化的原因,对管网中生活污水、工业废水和地下水

的水量占比变化进行定量解析。根据图 2 所示的计算流程,在设定参数先验分布环节,设置 12 个参数的先验分布,包括生活污水 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{F}^-)$ 或 $\rho(\text{Na}^+)$ 、硬度的先验分布,工业废水 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{F}^-)$ 或 $\rho(\text{Na}^+)$ 、硬度的先验分布,地下水 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{F}^-)$ 或 $\rho(\text{Na}^+)$ 、硬度的先验分布,以及生活污水水量占比、工业废水水量占比和地下水水量占比的先验分布。根据图 3 的监测结果,将生活污水、工业废水和地下水水质特征因子质量浓度的先验分布设定为正态分布;生活污水、工业废水和地下水水量占比的先验分布设定为 0 ~ 1 之间的均匀分布。

在马尔科夫链蒙特卡洛模拟算法中,设定的平行马尔科夫链为 8 条,迭代次数为 5 万次。DREAM 算法的模拟计算表明,迭代次数大约为 2 万次时,可实现计算收敛,得到 12 个参数的后验分布。其中,生活污水、工业废水和地下水水质特征因子质量浓度等 9 个参数的后验分布仍然符合正态分布;而生活污水、工业废水和地下水水量占比的后验分布则依据化学质量平衡模型的约束条件,给出概率趋势集中的解析结果,与先验分布的均匀分布呈现显著差异。

为进一步探究 F^- 和 Na^+ 作为工业废水水质特征因子的可行性和差异性,提出 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{F}^-)$ 、硬度(方案 1)和 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{Na}^+)$ 、硬度(方案 2)两种组合方案,对污水干管 5 个监测点不同来源水量占比进行定量解析。解析结果的边缘密度曲线如图 5 所示;将后验分布概率的统计平均值作为各水量占比解析结果,如表 1 所示。

表 1 两种方案的水量占比解析结果平均值

Table 1 Simulation results of average water amount proportion from different sources under two schemes

监测点	方案 1 水量占比/%			方案 2 水量占比/%		
	生活污水	工业废水	地下水	生活污水	工业废水	地下水
1	21.4	53.2	29.5	18.9	57.2	21.4
2	14.1	61.6	19.4	7.6	82.9	8.3
3	13.4	64.2	19.1	15.5	64.2	19.6
4	12.7	67.2	16.3	19.3	54.8	22.1
5	11.5	74.4	14.3	19.9	55.0	26.7

基于方案 1 解析出的生活污水、工业废水和地下水水量占比范围分别为 11.5% ~ 21.4%、53.2% ~ 74.4%、14.3% ~ 29.5%,基于方案 2 解析出的生活污水、工业废水和地下水水量占比范围分别为 7.6% ~ 19.9%、54.8% ~ 82.9%、8.3% ~ 26.7%。两种方案的定量解析结果均表明研究区域污水干管中工业废水水量占主要地位,工业废水接

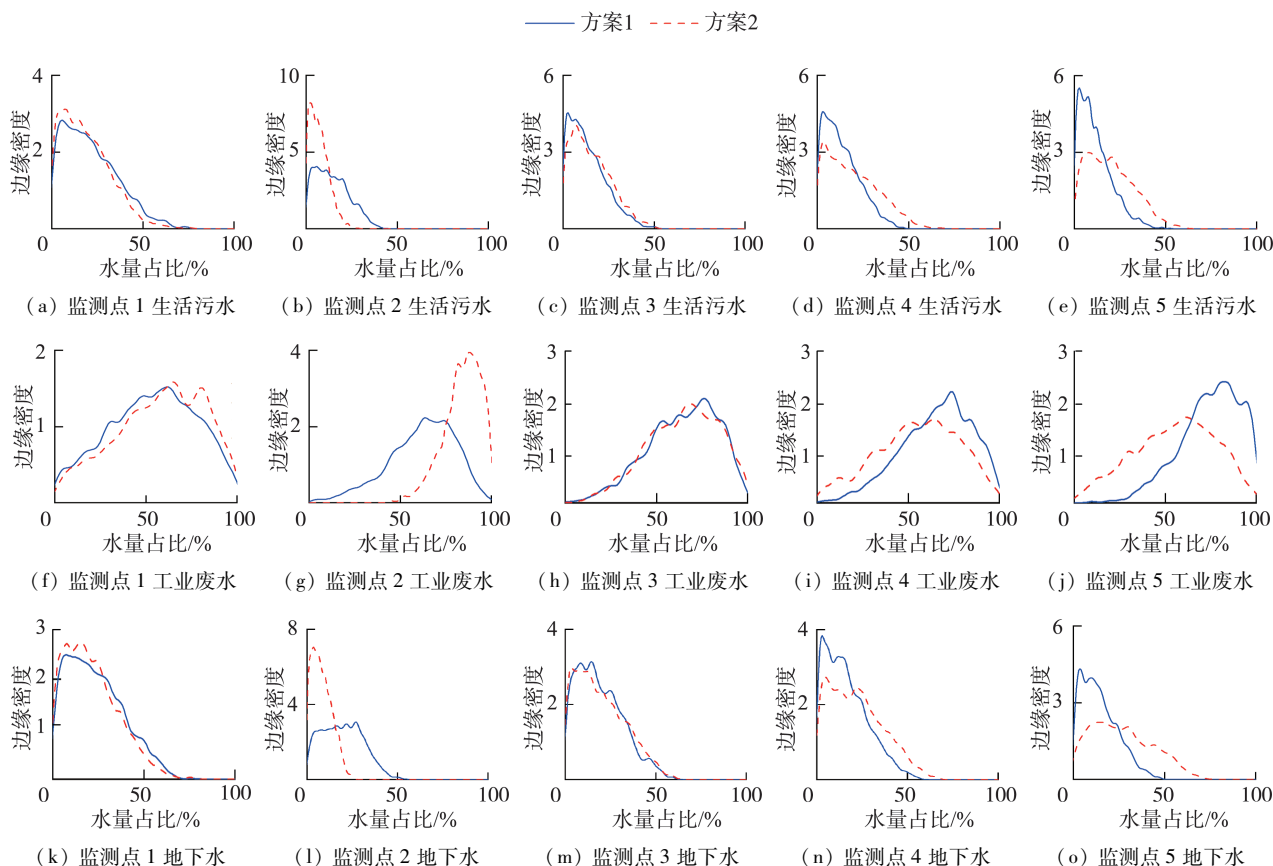


图5 两种方案的水量占比解析结果边缘密度曲线

Fig.5 Marginal density curves of simulation results of water amount proportion from different sources under two schemes

入是造成污水处理厂进水水质有机污染指标质量浓度低和可生化性差的主要原因。

方案2相对于方案1解析出的污水干管水量占比变化范围较大,原因是方案1和方案2分别采用了 F^- 和 Na^+ 作为表征工业废水排放的水质特征因子, $\rho(Na^+)$ 相比 $\rho(F^-)$ 的变化范围更大,且不同企业工业废水间的变化不确定性更高。基于方案1解析的生活污水占比沿程表现出降低的趋势,而基于方案2解析出的生活污水占比表现为沿程升高的趋势,由于污水干管下游没有大规模的居民生活区,由此可见,方案1的解析结果更符合实际情况。根据方案1的解析结果,污水干管工业废水水量占比从上游到下游逐渐升高,相应地下水水量占比从污水干管上游至下游逐渐降低,最末端管段(监测点4和5之间)地下水水量占比为14.3%,而监测点1上游管段的地下水水量占比近30%,应重点对该管段的污水管道破损状况开展加密筛查。

4 结论

a. 在基于分区水质监测的污水管网收集效能评估中,应同步开展片区污水(生活污水、特定行业工业废水)和地下水水质监测,建立属地化水质特征因子数据库。TN可作为生活污水的水质特征因

子; F^- 和 Na^+ 可作为电子工业废水的水质特征因子,本文研究区域 F^- 的指示性相对更好;硬度可作为地下水水质特征因子。

b. 将贝叶斯-马尔科夫链蒙特卡洛模拟算法与化学质量平衡模型相结合,能够有效解决不同来源水量占比解析的不确定性问题,以有限点位监测数据实现对各种水量占比的合理解析。本文研究区域污水干管中生活污水、工业废水和地下水水量占比范围分别为11.5%~21.4%、53.2%~74.4%、14.3%~29.5%,工业废水的接入占据了主导地位。

c. 大量工业废水排入污水管网是造成研究区域污水处理厂进水有机污染指标质量浓度明显偏低和可生化性差的主要原因。对此,应重点加强对工业废水接入的监管,并针对污水处理厂进水以低可生化性工业废水为主的特点,优化污水处理厂运行调控方案;同时对研究区域上游污水管段的破损状况开展排查,减少地下水入渗水量。本文方法可为“一厂一策”污水处理提质增效方案的制定提供支撑。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统

- 计年鉴-2021[M].北京:中国统计出版社,2022:58.
- [2] 迟国梁.关于新时代流域水环境治理技术体系的思考[J].水资源保护,2022,38(1):182-189.(CHI Guoliang. Thoughts on water environmental management technology system in watersheds in the new era[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 182-189. (in Chinese))
- [3] 何艳虎,郭红江,谭倩,等.广东省东江流域显著水问题类型识别[J].水资源保护,2021,37(5):16-21.(HE Yanhu, GUO Hongjiang, TAN Qian, et al. Type identification of significant types of water problems in the Dongjiang River Basin, Guangdong Province [J]. Water Resources Protection,2021,37(5):16-21. (in Chinese))
- [4] 徐祖信,徐晋,金伟,等.我国城市黑臭水体治理面临的挑战与机遇[J].给水排水,2019,45(3):1-5.(XU Zuxin, XU Jin, JIN Wei, et al. Challenges and opportunities of black and odorous water body in the cities of China[J]. Water & Wastewater Engineering,2019,45(3):1-5. (in Chinese))
- [5] 李一平,郑可,周玉璇,等.南方城市污水处理系统效能评估与提质增效策略制定[J].水资源保护,2022,38(3):50-57.(LI Yiping, ZHENG Ke, ZHOU Yuxuan, et al. Efficiency evaluation of a sewage system and strategy formulation of quality and efficiency improvement in city of Southern China[J]. Water Resources Protection,2022,38(3):50-57. (in Chinese))
- [6] 尹海龙,葛佳宁,徐祖信,等.我国河长制实施成效考核方法评估研究[J].中国工程科学,2022,24(5):169-176.(YIN Hailong, GE Jia'ning, XU Zuxin, et al. Evaluating the methods for assessing implementation effects of river chief system in China[J]. Strategic Study of CAE,2022,24(5):169-176. (in Chinese))
- [7] 陈小龙,李心梅,余黎,等.城镇排水管网分区监测诊断方法与应用[J].中国给水排水,2022,38(10):40-45.(CHEN Xiaolong, LI Xinmei, YU Li, et al. Technology and application of zoning-monitoring and diagnosis of urban drainage network[J]. China Water & Wastewater, 2022,38(10):40-45. (in Chinese))
- [8] FOORGINEZHAD S, MOHSENI-DARGAH M, FIROOZIRAD K, et al. Recent advances in sensing and assessment of corrosion in sewage pipelines[J]. Process Safety and Environmental Protection,2021,147:192-213.
- [9] KARPFF C, KREBS P. Quantification of groundwater infiltration and surface water inflows in urban sewer networks based on a multiple model approach[J]. Water Research,2011,45(10):3129-3136.
- [10] 程珣,张明凯,刘艳臣,等.污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析[J].环境科学,2016,37(5):1845-1851.(CHENG Xun, ZHANG Mingkai, LIU Yanchen, et al. Wastewater quantity and quality fluctuation characteristics of typical area of hybrid sewage system [J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1845-1851. (in Chinese))
- [11] 杨婷婷,李志一,李萌,等.污水管网入流入渗的不同指标的量化分析[J].水电能源科学,2022,40(6):127-129.(YANG Tingting, LI Zhiyi, LI Meng, et al. Quantitative analysis of different indexes of inflow and infiltration of sewage pipe network [J]. Water Resources and Power,2022,40(6):127-129. (in Chinese))
- [12] CHENG J C P, WANG Mingzhu. Automated detection of sewer pipe defects in closed-circuit television images using deep learning techniques[J]. Automation in Construction, 2018,95:155-171.
- [13] 尹海龙,郭龙天,胡意杨,等.基于光纤分布式测温的污水管道入流识别方法研究[J]中国环境科学,2022,42(4):1737-1744.(YIN Hailong, GUO Longtian, HU Yiyang, et al. A method on sewer inflow identification using fiber-optic distributed temperature sensing [J]. China Environmental Science, 2022, 42(4): 1737-1744. (in Chinese))
- [14] 刘战广,谭学军,陈嫣.基于水量分析和节点监测的城镇污水管网评估诊断[J].中国给水排水,2021,37(17):32-37.(LIU Zhan' guang, TAN Xuejun, CHEN Yan. Evaluation and diagnosis of urban sewage pipe network based on water flow analysis and node monitoring [J]. China Water&Wastewater,2021,37(17):32-37. (in Chinese))
- [15] 周乙新,李激,王燕,等.城镇污水处理厂低浓度进水原因分析及提升措施[J].环境工程,2021,39(12):25-30.(ZHOU Yixin, LI Ji, WANG Yan, et al. Reason analysis and improvement measures for low pollutants concentration of influent water of urban sewage treatment plants[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(12): 25-30. (in Chinese))
- [16] TRAN N H, LI Jinhua, HU Jiangyong, et al. Occurrence and suitability of pharmaceuticals and personal care products as molecular markers for raw wastewater contamination in surface water and groundwater [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(6):4727-4740.
- [17] ROEHRDANZ P R, FERAUD M, LEE D G, et al. Spatial models of sewer pipe leakage predict the occurrence of wastewater indicators in shallow urban groundwater [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(3): 1213-1223.
- [18] YIN Hailong, XIE Ming, ZHANG Lunyuan, et al. Identification of sewage markers to indicate sources of contamination: low cost options for misconnected non-stormwater source tracking in stormwater systems [J]. Science of the Total Environment, 2019, 648:125-134.
- [19] 周骅,智国铮.基于三维荧光光谱和水质特征因子检测技术的排水管网地下水入渗分析研究[J].给水排水,2022,48(5):128-133.(ZHOU Hua, ZHI Guozheng. Groundwater infiltration analysis of urban drainage

- networks based on 3D-EEM technology and marker species technology[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48 (5): 128-133. (in Chinese))
- [20] 徐祖信,王诗婧,尹海龙,等. 基于节点水质监测的污水管网破损位置判定方法[J]. *中国环境科学*, 2016, 36 (12): 3678-3685. (XU Zuxin, WANG Shijing, YIN Hailong, et al. Locating the sewer network defect based on marker investigation at pipe manholes [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36 (12): 3678-3685. (in Chinese))
- [21] SHELTON J M, KIM L, FANG Jiasong, 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.
- [22] 许畅畅,温瑶,成思,等. 长江口滨岸浅层地下水化学组分时空分布特征及影响机制[J]. *水资源保护*, 2022, 38 (3): 181-188. (XU Changchang, WEN Yao, CHENG Si, et al. Spatio-temporal distribution characteristics and mechanisms of chemical composition of shallow groundwater in coastal area of Yangtze River Estuary[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38 (3): 181-188. (in Chinese))
- [23] 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. (XU Zuxin, WANG Lingling, YIN Hailong. Quantification of non-storm water flow entries into storm drains using Monte Carlo based marker species approach [J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2015, 43 (11): 1715-1721. (in Chinese))
- [24] MASSOUDIEH A, KAYHANIAN M. Bayesian chemical mass balance method for surface water contaminant source apportionment[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2013, 139 (2): 250-260.
- [25] WANI O, SCHEIDEGGER A, CARBAJAL J P, et al. Parameter estimation of hydrologic models using a likelihood function for censored and binary observations [J]. *Water Research*, 2017, 121: 290-301.
- [26] VRUGT J A. Markov chain Monte Carlo simulation using the DREAM software package: theory, concepts, and MATLAB implementation[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 75: 273-316.
- [27] CLOUTIER V, LEFEBVRE R, THERRIEN R, et al. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 353 (3/4): 294-313.
- [28] 余倩,张宇,董昕,等. 地表水-地下水相互作用对砷在浅层地下水系统中运移的影响[J]. *地球科学*: 2023, 48 (9): 3420-3431. (YU Qian, ZHANG Yu, DONG Ting, et al. Effect of surface water-groundwater interaction on arsenic transport in shallow groundwater of Jiangnan plain [J]. *Earth Science*, 2023, 48 (9): 3420-3431. (in Chinese))
- [29] 周峰,陶良,胡元平,等. 武汉长江新城起步区地下水环境特征研究[J]. *资源环境与工程*, 2020, 34 (3): 471-476. (ZHOU Feng, TAO Liang, HU Yuanping, et al. Research on groundwater environmental characteristics in starting area of the Yangtze River New Town in Wuhan [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2020, 34 (3): 471-476. (in Chinese))
- [30] 尹海龙,徐祖信,李怀正,等. 电子企业水质特征因子与雨污混接诊断研究[J]. *中国环境科学*, 2015, 35 (9): 2713-2720. (YIN Hailong, XU Zuxin, LI Huaizheng, et al. Tracer parameters to identify and quantify electronic industrial flow entries into storm drains [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35 (9): 2713-2720. (in Chinese))

(收稿日期:2023-01-03 编辑:施业)

(上接第 120 页)

- [31] 王永明,王美霞,吴殿廷,等. 贵州省乡村贫困空间格局与形成机制分析[J]. *地理科学*, 2017, 37 (2): 217-227. (WANG Yongming, WANG Meixia, WU Dianting, et al. Spatial patterns and determinants of rural poverty: a case of Guizhou Province, China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37 (2): 217-227. (in Chinese))
- [32] ZHAO Fangqi, TANG Lina, QIU Quanyi, et al. The compactness of spatial structure in Chinese cities: measurement, clustering patterns and influencing factors [J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2020, 6 (1): 1743763.
- [33] 卢宾宾,葛咏,秦昆,等. 地理加权回归分析技术综述 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45 (9): 1356-1366. (LU Binbin, GE Yong, QIN Kun, et al. A review on geographically weighted regression [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45 (9): 1356-1366. (in Chinese))
- [34] 孙才志,马奇飞,赵良仕,等. 基于 GWR 模型的中国水资源绿色效率驱动机理[J]. *地理学报*, 2020, 75 (5): 1022-1035. (SUN Caizhi, MA Qifei, ZHAO Liangshi, et al. Analysis of driving mechanism based on a GWR model of green efficiency of water resources in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75 (5): 1022-1035. (in Chinese))

(收稿日期:2022-05-05 编辑:施业)