

陈则宏. 基于电导率在线数据的雨水管网异常识别与诊断技术应用[J]. 净水技术, 2024, 43(12): 160–170.

CHEN Z H. Application of abnormal identification and diagnosis technology for storm sewer networks based on online conductivity data[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(12): 160–170.

基于电导率在线数据的雨水管网异常识别与诊断技术应用

陈则宏*

(福州市滨海水务发展有限公司, 福建福州 350207)

摘 要 为了建立适合基于大范围、长周期、低维护在线监测的雨水管网混接诊断技术, 研究建立了基于电导率的相对水平混接程度分级标准, 经对比发现其与总氮和氨氮的绝对偏差较低, 具有较好稳定性与准确性。标准建立过程中需识别电导率本底特征, 为此开展了日变化、时变化、前期晴天数及降雨强度对本底值的影响分析。结果显示, 在研究区域内日变化及时变化影响并不显著, 而前期晴天数存在一定的影响, 当选取不低于 3 d 的旱天作为数据采集周期时, 混接等级计算的准确性更高。基于电导率在线数据, 采用混接程度分级、污染来源解析及上有下游多点位联动追踪的系统方法, 可以有效开展雨水管段上下游污染溯源与雨水接户井混接识别。

关键词 雨水管网 电导率 在线监测 混接诊断 异常识别

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)12-0160-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.12.018

Application of Abnormal Identification and Diagnosis Technology for Storm Sewer Networks Based on Online Conductivity Data

CHEN Zehong*

(Fuzhou Binhai Water Service Development Co., Ltd., Fuzhou 350207, China)

Abstract In order to establish a diagnostic technology for rainwater pipe network mixing based on large-scale, long-term, and low maintenance online monitoring, this study established a relative horizontal mixing degree grading standard based on conductivity values. After comparison, it was found that its absolute deviation from total nitrogen and ammonia nitrogen was low, and it had good stability and accuracy. In the process of establishing standards, it was necessary to identify the background characteristics of conductivity. Therefore, an analysis was conducted on the impact of daily variation, hourly variation, number of clear days in the early stage, and rainfall intensity on the background value. The results showed that the timely variation of daily variation did not have a significant impact in the study area, while the number of clear days in the early stage had a certain impact. When selecting dry days of no less than 3 days as the data collection cycle, the accuracy of mixing level calculation was higher. Based on online conductivity data, a systematic method is adopted to classify the degree of mixing, analyze the sources of pollution, and track the linkage of upstream and downstream multiple points, which can effectively carry out the tracing of pollution sources in rainwater pipe sections and the identification of mixing in rainwater connecting households.

Keywords storm sewer networks electrical conductivity online monitoring mixed connection diagnosis abnormal recognition

城市排水管网作为市政基础配套设施, 随着城

市的发展, 数量日益庞大。目前城市排水管网因其隐蔽性、建设使用周期长等特点, 在管网维护管理中存在着养护技术落后、整体规划不到位、基础信息不完善等问题^[1]。2023 年 2 月, 中共中央、国务院印发了《数字中国建设整体布局规划》, 提出了在以数字化驱动生产生活和治理方式变革的背景下, 开展生态文明建设, 构建绿色低碳可持续发展的生态城

[收稿日期] 2024-04-22

[基金项目] 福州新区滨海新城排水管网在线监测设备一期第一批(水质监测)采购项目(2022.362); 福州滨海新城分流制排水管道混接诊断技术应用效果研究(BHSW2022001)

[通信作者] 陈则宏(1990—), 男, 主要从事给排水建设管理相关工作, E-mail: 757540703@qq.com。

市的目标。通过物联网在线监测技术提供数据支撑,依靠排水管网混接识别诊断的技术手段,从源头上解决因雨污混接导致的环境污染,进一步提升排水管网维护管理效率,逐渐成为未来排水管养的一个重要发展方向。

目前,排水管网混接识别技术主要分为两大类^[2-3]:1)通过仪器设备对管道进行直接检测判断;2)基于水质、水量平衡特征的解析方法。第一类技术具体包括:管道闭路电视、声纳成像、温度识别等。该类技术的共性问题是无法对管道内的异常水量和污染物进行定量解析和识别,因此,对后续维护与改造的指导存在一定局限性。第二类技术具体包括:示踪剂法、流量调查以及水质特征因子法等^[4]。示踪剂法需要在调查的管网系统中投加特定标记物,可用于某一管段渗漏或混接水量的精确判别。流量调查法是在管网各节点或潜在混接点安装流量计,监测管道流量,并根据水量平衡计算外来污染源输入水量情况。水质特征因子法是选择能够表征不同来源(如生活污水、工业废水、地下水等)的水质特征指标,同时监测管网旱天出流的水质,基于质量平衡原理,建立质量平衡等式,对异常水量来源进行量化诊断^[5]。基于水质指标的诊断方法克服了仪器检测技术难以定量识别的难题。

但此类方法的推广应用也受到多种因素的影响。一方面,管网内水质特征瞬息万变,若采用离线检测的方法,样品的代表性较难评估,易出现异常水质或水量无法捕获的情况;另一方面,若采用多指标的在线监测方式,此时对设备运行与维护的要求较高,完善的维护措施往往难以持续,从而导致大量设备的闲置与损坏^[6]。此外,多指标的在线监测方式投入较高,部分地区人力物力无法支撑大规模或长周期的监测工作,此时在有限条件下最大限度地发挥混接识别方法的功效成为此类技术成功应用的关键。但尚无研究系统性针对低投入下在线监测技术在雨水管网混接诊断中的应用进行分析讨论。

电导率监测技术主要基于电导率原理进行设计,通过衡量排水系统中输送溶液的导电能力,来反映溶液中污染物的浓度。这种技术已经被广泛应用于水质监测、工业生产及科学研究等领域。电导率在线监测仪具有稳定性和频率高、运行维护便利、投入较低的特点,并具有对多类型污染物的敏感及高频反馈能力,已有研究者^[6]将其作为监测与管控排

水系统溢流污染、入流入渗预警、雨水调蓄池、农村污水处理设施、地表水环境等的基础数据,研究与应用结果显示电导率对上述系统中的常规水质特征变化具有较好的反馈。

为了建立适合基于大范围、长周期、低维护在线监测的雨水管网混接诊断技术,研究将在城市排水系统领域进一步探索电导率在线数据的分析价值与应用效益,重点解决基于电导率单指标识别雨水管网异常水量时本底特征差异较大的问题,同时建立基于电导率特征的雨水管网混接等级判别标准,最终为在条件受限情况下开展雨水管网异常识别与诊断打下重要的理论与实践基础。

1 区域概述

研究区域位于我国东南沿海某新建行政区(图1),区域面积约为11 km²,域内以大数据产业、学校、居民生活及公建设施为主,其排水体制为雨污分流制。以河道为界,雨水管网形成若干个独立分区,通过重力就近自排入周边河道。在该区域内各地块排口与雨水管道入河口,共布设在线电导率仪170余套,用于雨水管网异常水质预警与分析。研究先选取其中2处重点区域开展方法建立与验证分析研究。根据项目边界范围,项目组前期对范围内雨水管线及街区入驻情况进行了全面排查。项目区域内,A片区以居民商业为主,商户入驻率较高且部分入驻时间较长;B片区以大数据产业为主。根据现场调查,两处雨水管线清晰,存在一定的枝权管网,且有一定的旱流污水,管网拓扑结构如图2所示。

2 研究方法

2.1 电导率仪选型

电导率在线监测设备的稳定性是影响排水管道监测效益的重要因素。除外部环境和维护保障对其稳定性产生影响外,电导率检测方式的影响亦很突出。电极法和电磁法是2类主要的在线监测方式^[7-8]。在排水管网中,雨污水、颗粒状污染物及硫化氢等均会存在一定的腐蚀性,将极大影响电极探头的使用寿命。此外,在线监测中采用直流供电,电极使用过程中的极化效应较难避免。尽管基于电磁法的电导率仪一次性投入略高于电极法,但受制于排水管网的复杂环境特征,采用电极法势必会大幅增加后期对设备的运行维护成本,不利于在线监测系统的长期稳定运行。因此,本研究与应用中选用



图1 福州新区雨水管网电导率在线监测项目区域

Fig. 1 Online Monitoring Project Area for Conductivity of Rainwater Pipe Network in Fuzhou New Area

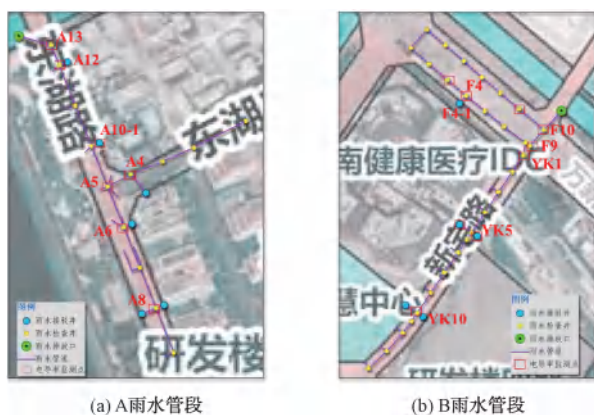


图2 研究区域

Fig. 2 Study Area

基于电磁法的电导率设备进行在线监测。

感应式电导率仪型号为 ZY-SALS-L500-01, 测量值为 $0 \sim 200\,000\ \mu\text{S}/\text{cm}$, 分辨率为 $0.01\ \mu\text{S}/\text{cm}$, 准确度为 1% (满量程), 温度量程为 $-10 \sim 60\ ^\circ\text{C}$, 温度准确度为 $\pm 0.3\ ^\circ\text{C}$, 最大测量流速为 $3\ \text{m}/\text{s}$ 。

2.2 监测与检测方法

感应式电导率仪由电导率传感器、传输电缆及数据采集器组成,其中数据采集器包括电池模组与数据远传模块。如图3所示,电导率传感器安装于固定支架底部,传输电缆沿着固定支架铺设固定,电导率传感器通过固定支架放置于检测井底部,数据控制器固定于检查井上部井壁。此外,在电导率探测器安装于检查井底部前,需测定上下游管道底部的高程,设备固定时需将探测器接触面与上下游管底连线齐平,从而不仅避免槽内污染物对其产生影响,同时可以最大限度地监测上游来水的水质波动情况。

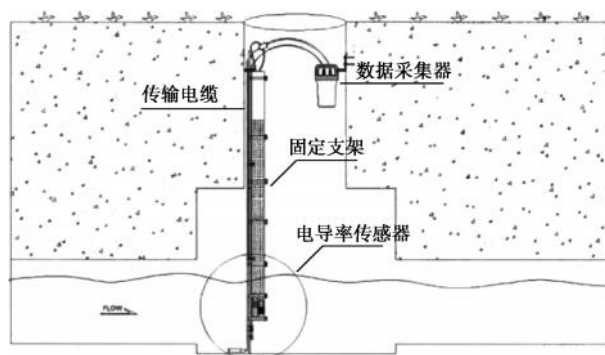


图3 检查井内电导率仪安装示意图

Fig. 3 Installation Diagram of Conductivity Meter in Inspection Well

本项目选用的感应式电导率仪于安装前、安装期间均定期开展设备校准检测,确保采集数据准确性,数据采集频率为 $5\ \text{min}/\text{次}$ 。

实验室电导率、总氮(TN)、氨氮的检测方法分别为电极法、过硫酸钾法与水杨酸法进行检测^[9-10],分光光度计为 HACH DR6000。

2.3 混接程度分级方法

为便于水务部门高效识别雨水管道混接严重程度,指导下一步工作计划,研究中将根据采集的电导率数据进行混接程度的分级。

根据《城镇排水管道混接调查及治理技术规范》(T/CECS 758—2020)^[11](以下简称《规程》)推荐的评价标准,判别雨水管道混接状况的标准可分为两个类型,分别是针对单个混接点以及存在混接的区域。针对单个混接点,《规程》中考虑较为全面,建议将接入管管径、出流流量以及污水出流水质作为判别因素。研究中重点考察电导率在线监测设备在雨水管道混接特征识别中发挥的作用,因此,选

择以水质因素作为主要的分析对象。此外,《规程》还从混接密度的角度进行了规定,认为雨水管道内的混接点小于 5 个/km 时,为轻度混接(1 级);5~10 个/km 时为中度混接(2 级);大于 10 个/km 时为重度混接(3 级)。混接密度可以在一定程度上反映区域内雨水管道的混接情况,但在本区域内,雨水为就近排入河道,单段的雨水管道总长较短,上述标准难以全面地反映实际外水入流程度,因此,本次研究中暂不考虑该类因素。《规程》中考虑的水质指标包括:氨氮及 COD_{Cr} ,并依据相关阈值范围分为 3 个混接等级。

本研究将依据水质电导率特征进行混接程度的分级。不同的区域内电导率本底数值差异显著,因此,在确定分级标准时,需优先对无混接条件下各区域的本底值进行分析。

现设 E_c 为管道内的电导率日常监测值, E_b 为该监测点位的电导率本底值, η_c 为日常特征值相对

水平,计算如式(1)。

$$\eta_c = E_c / E_b \quad (1)$$

其中: E_c ——通过在线监测设备日常监测直接获取, $\mu\text{S}/\text{cm}$;

E_b ——雨水管道内在无外源污水进入时的水质参数, $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

如雨水管道旱天接纳的空调冷凝水、少量地下水及其他潜在的非污染来水等(一般地,当出现污水混接进入雨水管网、地下水入渗量达到管网设计水量的 15% 以上以及河水倒灌时,认为该管段处于异常状态)。以相对水平作为分级标准,可以避免因研究区域内本底特征的不同而无法统一评价标准的情况。

结合属地水务部门的管理需求,初步设定雨水管道内的混接分级标准限值为 6、12、18、30,并将混接等级细分为 5 个等级,即雨水管道混接程度分级的判别流程如图 4 所示。

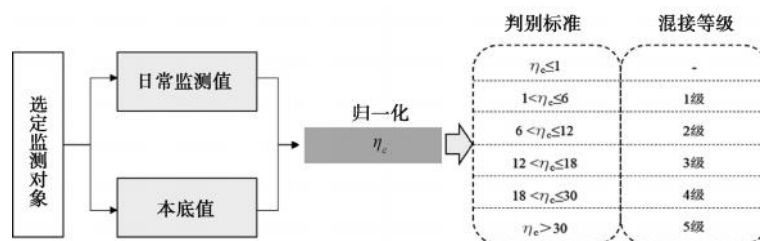


图 4 雨水管网混接程度分级技术路线

Fig. 4 Technical Route for Grading the Degree of Mixing in Rainwater Pipe Networks

为了验证在属地依据电导率进行分级的合理性,本研究通过排序分析^[12]对比了电导率与 TN 和氨氮在上述分级方式下的特征,排序分析计算方法如式(2)。

$$\begin{aligned}
 & \uparrow \partial = 100\% \times \eta_c / 1 & \eta_c \leq 1 \\
 & \uparrow \partial = 100\% \times (\eta_c - 1) / (6 - 1) & 1 < \eta_c \leq 6 \\
 & \uparrow \partial = 100\% \times (\eta_c - 6) / (12 - 6) & 6 < \eta_c \leq 12 \\
 & \uparrow \partial = 100\% \times (\eta_c - 12) / (18 - 12) & 12 < \eta_c \leq 18 \\
 & \uparrow \partial = 100\% \times (\eta_c - 18) / (30 - 18) & 18 < \eta_c \leq 30 \\
 & \uparrow I & \eta_c > 30
 \end{aligned} \quad (2)$$

其中: ∂ ——区间内占比排序;

I ——无意义。

进一步地,通过绝对偏差 β , 即式(3)。

$$\beta = \partial_{\text{指标1}} - \partial_{\text{指标2}} \quad (3)$$

其中: $\partial_{\text{指标1}}$ 、 $\partial_{\text{指标2}}$ ——指标 1、2 的区间内占比

排序。

对比各指标间的相关度,研究中将绝对偏差分为 4 级,分级标准如表 1 所示。

表 1 不同指标下混接程度分级的相关度

Tab. 1 Correlation Degree of Mixing Degree Classification under Different Indices

编号	划分标准	相关度	解释说明
1	$\beta < 25\%$	强	两指标用于外水*,入流程度分级时具有强相关度
2	$25\% \leq \beta < 50\%$	较强	两指标用于外水,入流程度分级时具有较强相关度
3	$50\% \leq \beta < 75\%$	中	两指标用于外水,入流程度分级时相关度一般
4	$75\% \leq \beta < 100\%$	较弱	两指标用于外水,入流程度分级时相关度较弱

注: * 表示混接进入雨水管道的污水。

表1中未列入“弱”相关度是由于获取 β 值的前提是两指标对应的外水入流等级相同,即说明两者之间已存在一定的相关程度。

分级标准验证研究中分别对A和B两处某点位进行分析(图5),样品采集当天为前期晴天数 ≥ 3 d的晴天,各点位每3h采集1个样品进行电导率与TN和氨氮的检测。

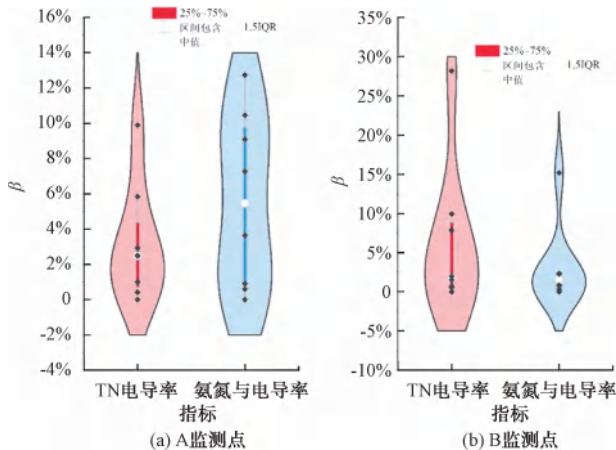


图5 电导率与TN和氨氮在相同分级方法下的差异对比

Fig. 5 Comparison of Differences between EC, TN, and Ammonia Nitrogen under the Same Classification Method

根据混接程度分级方法(图4),A和B各时刻样品依据电导率、TN和氨氮计算得到的混接等级均一致,该结果说明电导率作为混接程度等级检测指标与TN及氨氮具有较好的一致性。在本研究区域,混接污染源以生活污染为主,因此电导率与TN及氨氮存在一定的正相关性^[6]。因此,上述混

接程度的判别结果也说明具备更高测定效率的电导率,在指示混接程度时具备与TN及氨氮等常规指标相同的效用。结合式(2)和式(3),得到不同指标间排序占比的绝对偏差(图5),结果显示96.9%以上的数组间的绝对偏差均低于25%,具有强相关度,即说明在研究区域内,将电导率用于雨水管道混接程度等级的计算具有较好稳定性与准确性。

2.4 本底值识别方法

本底值是指雨水管道内在无外源污水进入时的水质参数,如雨水管道旱天接纳的空调冷凝水、少量地下水等。研究依据掌握的管网拓扑关系和下垫面用地类型,初步分析各监测点位上游来水的潜在组成特征。其次,根据雨水管网内旱天及夜间水量及水质特征,初步判别其管网完善情况。此后,根据连续性在线监测电导率数据,分析峰谷数值与昼夜变换的相互关系。最后,筛选外源干扰最少的时段进行算术平均作为本底值,如条件允许情况下,可选取多个同类型时段进行平均计算;如恰逢特殊时日,判定其受外源影响较小,可重点关注该时段电导率数值水平,以其作为本底特征值计算的依据。

2.5 基于电导率值的污染来源定量方法

Langeveld等^[13]已报道了基于电导率单指标解析排水管网来水水量组成的方法。考虑到对排水管网进行长效与大范围管理的需要^[14],与其他基于水质/水量的溯源解析方法^[2]相比,基于电导率单指标的解析可大幅降低定量溯源的经济投入。本研究采用基于Monte-Carlo原理的定量解析方法(图6)。

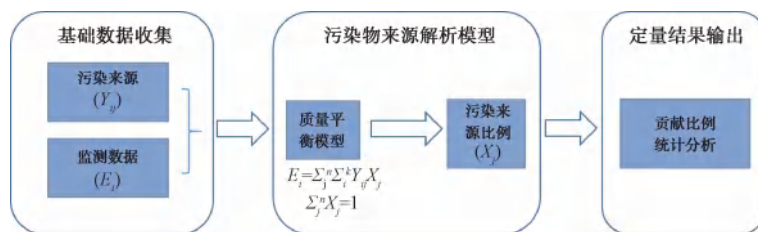


图6 定量解析技术流程

Fig. 6 Flow of Quantitative Analysis Technology

2.6 雨水管道多点位联动追踪溯源技术方法

雨水管网内污染源的多点位联动追踪基本原理即首先将雨水管道进行分段划分,再通过对比分段节点处及接户井处的水质的现场快速初步判别,确定问题管段缩小追踪范围,此后依次对下游原始问题点位、中间关键节点及异常接户井的污染来源进

行诊断分析,再通过对比分析问题点位、中间关键节点及异常接户井的污染来源特征,以确定问题点位的污染来源情况(图7)。

为了厘清不同来源对下游污染物总量的贡献,研究中结合基于不确定性理论的质量平衡方程以定量化识别污染来源。

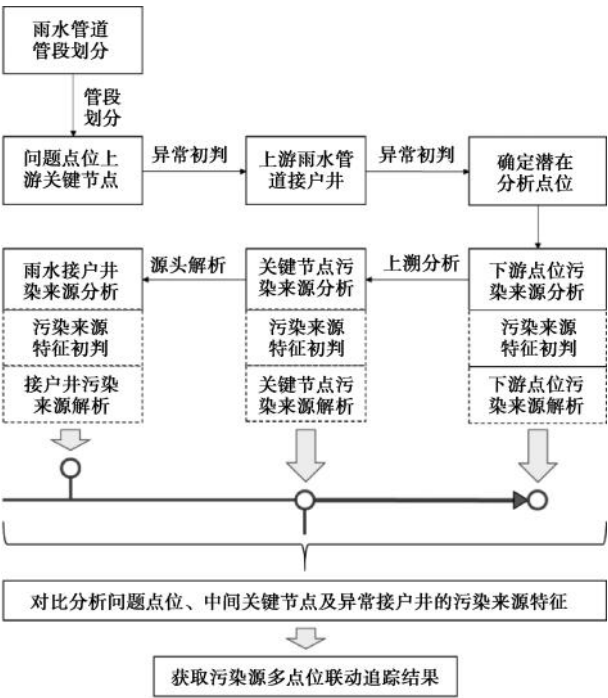


图 7 雨水管网多点位联动追踪技术流程

Fig. 7 Flow of Multi-Point Linkage Tracking Technology for Rainwater Pipe Network

表 2 电导率与日(1~7 d)、时(0~23 h)、前期晴天数及降雨强度的相关性分析

Tab. 2 Correlation Analysis between Electrical Conductivity and Daily (1~7 d), Hourly (0~23 h), Previous Sunny Days, and Rainfall Intensity

点位	指标	日	时	前期晴天数	降雨强度
A5	Pearson 相关性	-0.232 **	0.261 **	0.018	-0.184 **
	显著性(双侧)	0.000	0.000	0.615	0.000
	N	749	749	749	749
F4	Pearson 相关性	0.026	-0.089 *	0.150 **	0.044
	显著性(双侧)	0.489	0.017	0.000	0.234
	N	727	727	727	727
YK5	Pearson 相关性	0.074	0.017	0.163 **	0.231 **
	显著性(双侧)	0.058	0.660	0.000	0.000
	N	655	655	655	655
YK1	Pearson 相关性	0.012	0.002	0.338 **	-0.014
	显著性(双侧)	0.716	0.948	0.000	0.686
	N	864	864	864	864
A8	Pearson 相关性	-0.076 *	-0.010	0.003	-0.043
	显著性(双侧)	0.033	0.775	0.936	0.226
	N	793.000	793.000	793.000	793.000
A6	Pearson 相关性	-0.043	0.047	0.172 **	-0.298 **
	显著性(双侧)	0.235	0.193	0.000	0.000

3 结果与讨论

3.1 本底值影响因素分析

对雨水管道内水质影响的主要环境因子包含^[14-15]:日变化(周一至周日)、时变化(凌晨、上午、下午、晚上)、前期晴天数(前期不降雨天数)与降雨强度(不降雨间隔超 6 h 为 2 场降雨事件,此处为 1 场降雨事件中的降雨强度,单位为 mm/h)等。

3.1.1 相关性分析

为了综合分析各类因素[日(1~7 d)、时(0~23 h)、前期晴天数及降雨强度]的影响,选取了 3 个月内的连续性监测数据进行相关性分析,筛选 A 和 B 区域内 10 个代表性点位,每个点位的监测数据量在 655~864。

由表 2 可知,前期晴天数与降雨强度对电导率值的影响显著高于日变化及时变化的影响。前期晴天数与电导率值的显著相关性说明在旱天周期内存在污染物含量较高的水持续进入管道内的情况;而降雨强度的显著影响主要是高雨强下,降雨初期雨水径流中污染物浓度较高,而降雨中后期低浓度的雨水径流持续输入使管内水流中的污染物逐步被

(续表2)

点位	指标	日	时	前期晴天数	降雨强度
	<i>N</i>	765	765	765	765
A12	Pearson 相关性	-0.056	0.113 **	-0.064	-0.136 **
	显著性(双侧)	0.134	0.003	0.092	0.000
	<i>N</i>	706	706	706	706
A10-1	Pearson 相关性	0.029	0.054	-0.185 **	-0.014
	显著性(双侧)	0.437	0.151	0.000	0.702
	<i>N</i>	709	709	709	709
YK10	Pearson 相关性	0.048	-0.066	0.089 *	0.295 **
	显著性(双侧)	0.216	0.093	0.023	0.000
	<i>N</i>	655	655	655	655
F9	Pearson 相关性	0.038	-0.034	0.380 **	0.279 **
	显著性(双侧)	0.303	0.355	0.000	0.000
	<i>N</i>	733	733	733	733

注: * 表示显著性相关, ** 表示极显著性相关; “日”表示一周内星期的变化, “时”表示 1 d 内小时的变化; “*N*”表示 3 个月的监测周期内, 各点位纳入统计的数据总量, 下同。

稀释。因此, 其浓度显著低于降雨前的水平。通过上述分析可知, 在分析某点位在线监测电导率本底值时, 需要首先避免前期晴天数及降雨强度对其的影响, 从而避免敏感因素对电导率本底值的扰动, 进而提高后续分析及计算的准确性。

3.1.2 旱天影响因素分析

根据 3.1.1 小节中的结果, 为了剔除降雨和前期晴天数的影响, 以下选取了 A 和 B 区域内 9 个在线电导率仪安装点位的前期晴天数不低于 3 d 的旱天进行电导率值与日(1~7 d)、时(0~23 h)进行相关性的统计分析。分析中, 为了提高数据分析的准确性, 每个点位选取的监测数据量达到了 475 个以上。

由表 3 可知, 9 个点位中仅有 1 个点位存在显著的相关性。因此, 研究中本底值的分析将不再考虑日变化和时变化对旱天电导率值的影响。

3.1.3 最小前期晴天数的选取

根据前期分析可知, 在研究区域内, 下垫面污染负荷较低且雨水管道内本底值水平也较低, 因此当降雨事件发生时, 雨水管道内水样的电导率值基本呈现下降的情况。为了验证上述分析的合理性, 研究中选取 15 mm(持续 1 d)降雨事件中前期电导率值低于 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的点位进行雨后电导率值变化特征分析, 由图 8 的统计结果可知, 降雨事件发生当天电导率值平均降低 18.4%, 降雨后第 1 d 电导率值平均降低 13.4%, 降雨后第 2 d 电导率值回复到

降雨前的水平(该区域均值为超出原有状态 5.3%); 当选取 88.1 mm(持续 4 d)降雨事件中前期电导率值低于 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的点位进行雨后电导率值变化特征分析时, 降雨期间电导率值均略低于前期旱天电导率均值为 3.4%~6.4%, 雨后电导率回复到降雨前水平。根据上述结果可知, 无论是中雨还是暴雨事件, 降雨事件发生时电导率值会出现一定程度的下降, 但下降幅度并不显著, 且雨后 2 d 可恢复到雨前水平。因此, 在后续的统计分析时, 选取前期晴天数不低于 3 d 的旱天, 收集相应的在线监测数据将有利于混接等级计算的准确性。

3.2 基于在线电导率监测体系的用水户混接情况分析

在研究区域内, 主要的用水户类型分为: 办公楼、小区、学校、公建、医院、酒店、综合体(新建)、垃圾转运站、工地与机房。总体来看, 7 月—12 月无混接用水单元的占比超过了 50%, 1 级混接以下的超过了 80%。其中, 11 月是本周期内无混接占比最低且 4 级以上混接情况也最为严重的月份。由图 9 可知, 学校整体在 11 月出现了混接较为严重的情况。此外, 通过对比不同用户类型的混接情况可以发现, 办公楼与小区是出现 3 级以上混接情况最为突出的用水单元; 办公楼、小区、学校、公建及医院均出现过 5 级混接的情况; 此外, 仅有综合体(新建)、垃圾转运站未出现过 3 级以上混接的情况。

表 3 电导率与日(1~7 d)、时(0~23 h)的相关性分析

Tab. 3 Correlation Analysis between Conductivity and Daily (1~7 d), and Hourly (0~23 h)

点位	指标	日	时
YK1	Pearson 相关性	-0.043	-0.007
	显著性(双侧)	0.226	0.840
	N	779	779
YK5	Pearson 相关性	-0.029	-0.003
	显著性(双侧)	0.052	0.927
	N	730	730
YK10	Pearson 相关性	-0.038	-0.008
	显著性(双侧)	0.081	0.832
	N	707	707
F4	Pearson 相关性	-0.014	-0.011
	显著性(双侧)	0.064	0.759
	N	759	759
F9	Pearson 相关性	-0.237 **	-0.005
	显著性(双侧)	0.000	0.891
	N	682	682
A5	Pearson 相关性	-0.025	0.075
	显著性(双侧)	0.072	0.101
	N	475	475
A6	Pearson 相关性	-0.021	-0.061
	显著性(双侧)	0.589	0.124
	N	635	635
A8	Pearson 相关性	-0.047	-0.010
	显著性(双侧)	0.205	0.789
	N	730	730
A12	Pearson 相关性	-0.054	0.095 *
	显著性(双侧)	0.165	0.014
	N	666	666

通过上述结果可以发现,居民聚集较为集中的用水户出水雨水管道内均存在污水混接的情况,部分时刻雨污混接可以到达最严重等级。由此可见,在该区域内用水户出水雨水管雨污混接现象较为普遍。

3.3 混接溯源应用效果分析

由图 2 可知,该处管线为 A8→A6→A5 及 A4→A5,再由 A5→至 A12,显然 A5 是该处的关键节点。根据图 6 的流程进行分析,当末端问题点位 A12 存在异常时,对关键节点 A5 进行初判,识当别结果为存在早流污水,即 A5 也是问题点位;则关键节点 A5 上游必然存在问题,下游可能存在问题,需分别进行分析;关键节点 A5 下游包含 1 处接户井 A10-1,上游包含 A4 和 A6 两路来水;则 A10-1 为待分析接户井,A4 和 A6 增补为关键节点,需对 A10-1、A4 及 A6 3 处进行分析;经对监测记录进行分析后发现,A10-1 与 A6 存在早流污水量较大、A4 电导率值较高,则以上 3 点位均初判异常。首先对 A10-1 和 A5 2 处对 A12 的旱天污水中的污染物贡献比例进行分析,根据基于不确定理论的质量平衡方程,可解得 A10-1 与 A5 对 A12 的旱流污水中污染物的贡献比例分别为 58.3% 与 38.3%。同理得上游的 A6 和 A4 2 处对 A5 的旱流污水中污染物的贡献比例分别为 61.2% 与 38.8%;对以上 2 组比例关系进行联动分析,即得 A4、A6、A10-1 对 A12 的旱流污水中污染物的贡献比例分别为 14.86%、23.4%、58.3%。另外,根据混接等级判别方法可知,A4 混接等级处于 1~2 级,A6 与 A10-1 处于 0~1 级,A12 处于 0~1 级。综上所述可知,该处雨水管网下游 A12 节点旱流混接水量

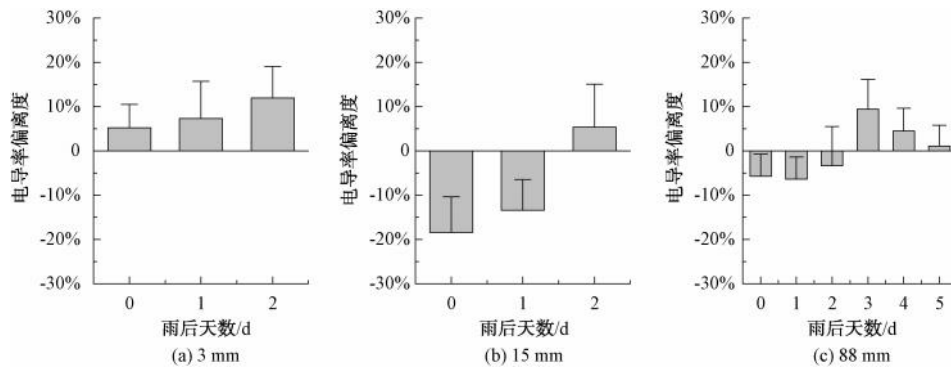
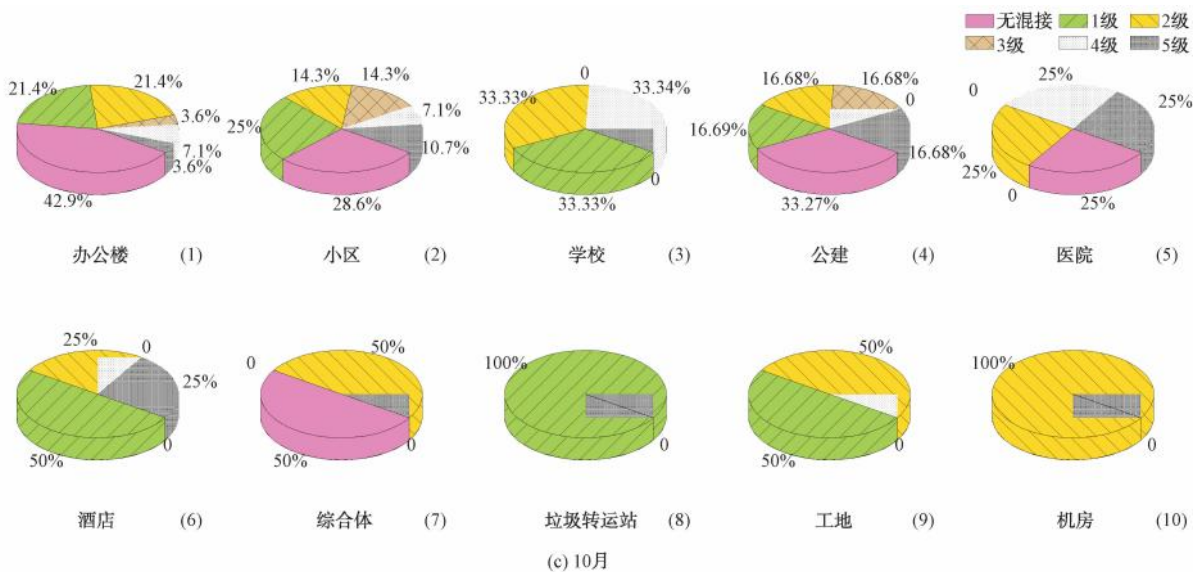
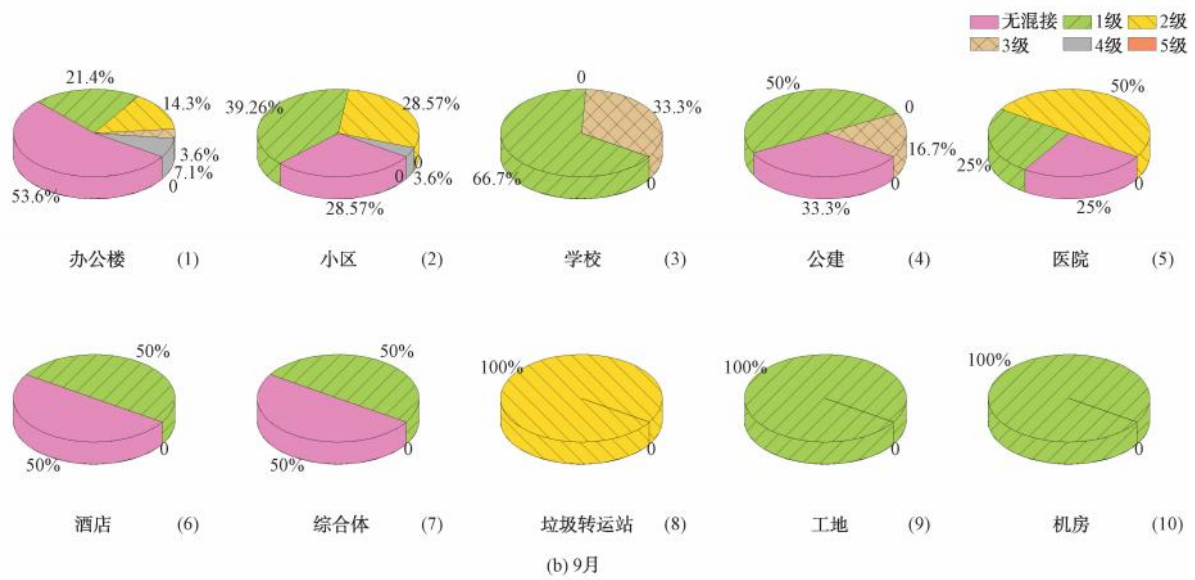
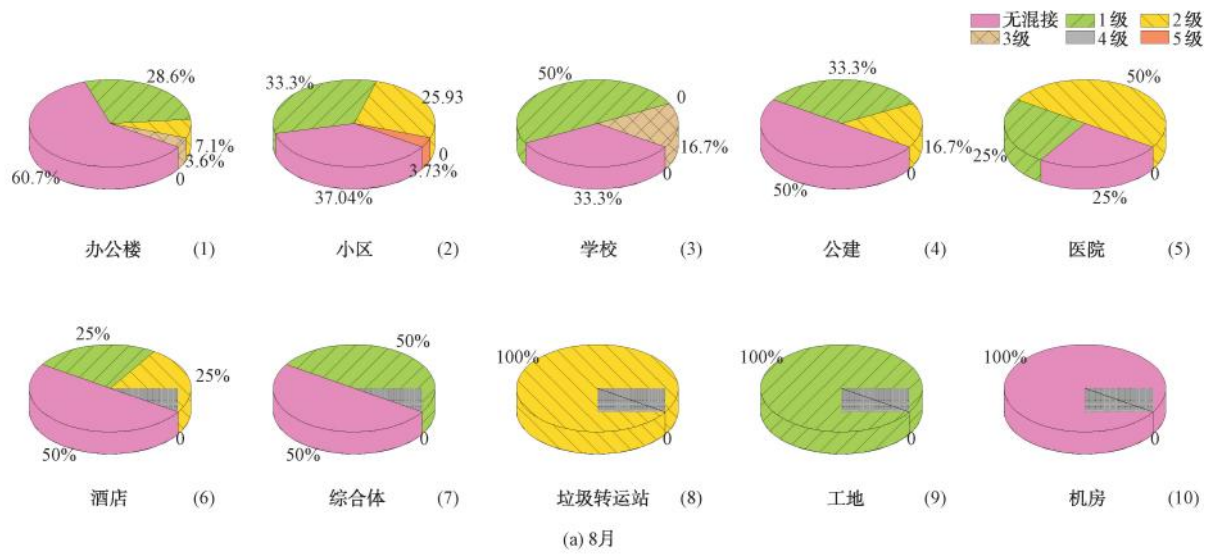


图 8 降雨事件对电导率偏离度的影响

Fig. 8 Impact of Rainfall Events on Electrical Conductivity Deviation



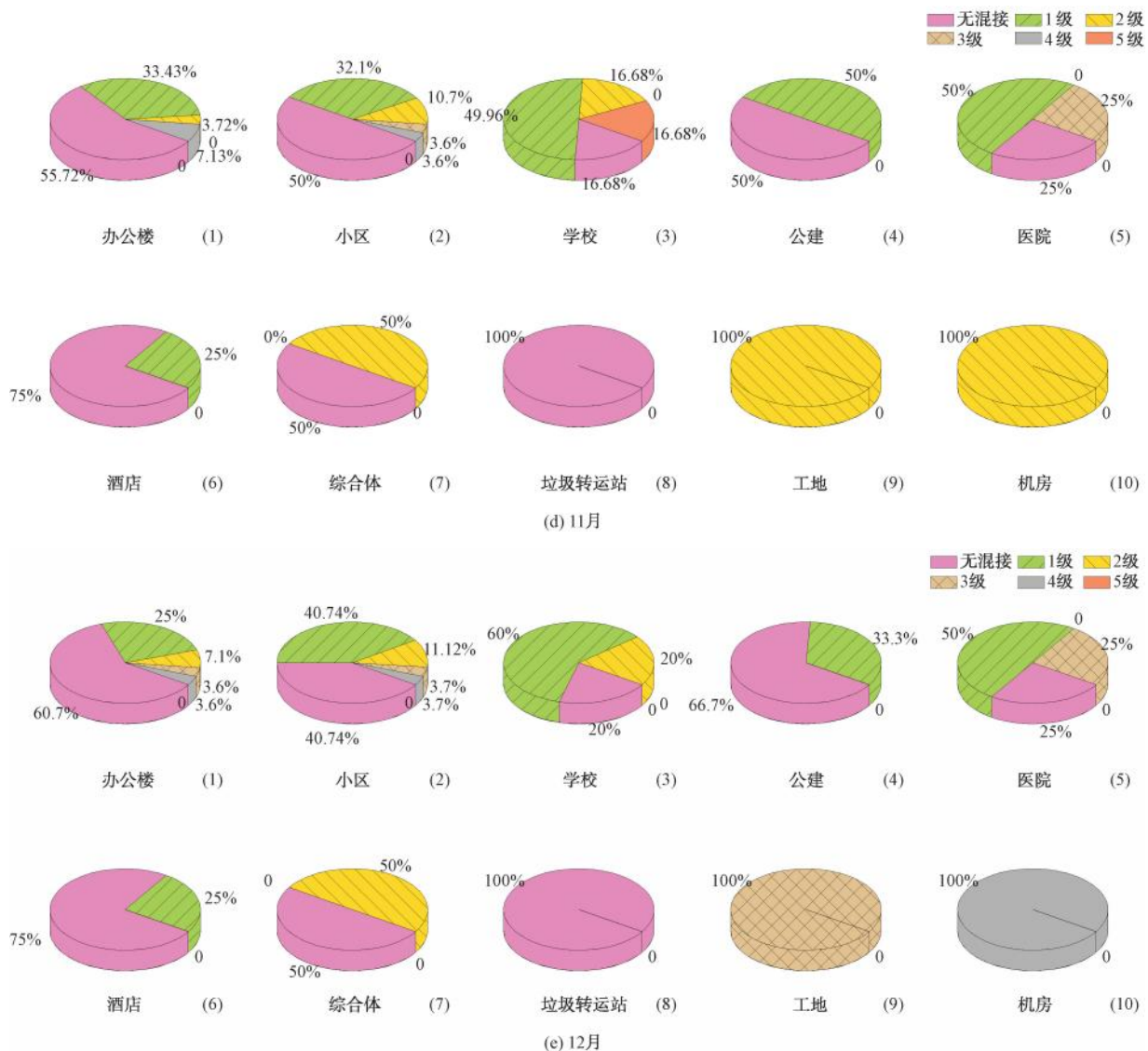


图9 各类用水户出水雨水管网混接等级占比

Fig. 9 Proportion of Mixed Connection Levels in Rainwater Pipe Networks for Various Types of Water Users

主要来源于 A10-1,但 A4 由于贡献水量的污染物浓度较高,亦不可忽视。

依照上述流程,可识别出雨水管网内早流污染物来源比例及污染物来源特征,实现多点位的污染物联动追踪分析。

4 结论与建议

以电导率值相对水平作为分级标准,可以避免因研究对象的水量来源及本底特征不同而无法统一评价标准的情况,且经对比发现其与 TN 和氨氮的绝对偏差较低,具有较好稳定性与准确性。基于电导率在线数据,采用混接程度分级、污染来源解析及上有下游多点位联动追踪的系统方法,可以有效开

展雨水管段上下游污染源与雨水接户井混接识别相关运行管理工作,从而为在大范围、长周期、低维护下开展雨水管网混接诊断建立重要的理论与实践基础。本方法建立在单一水质指标在线数据的基础上进行排水管网的异常识别,因此,在水量来源状况更为清晰或新建地区的排水管网内本方法具有更强的适用性。

参考文献

- [1] 郑贵江. 城市排水管网养护管理中存在的问题分析[J]. 绿色环保建材, 2017(4): 140-140.
ZHENG G J. Analysis of problems in maintenance and management of urban drainage network[J]. Green Environmental

- Protection Building Materials, 2017(4): 140–140.
- [2] 吴俊, 马艳. 排水系统水量组成解析中水质特征指标的应用现状及展望[J]. 环境工程, 2021, 39(9): 23–30.
- WU J, MA Y. Application status and prospect of marker species in water composition analysis of drainage system [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(9): 23–30.
- [3] YIN H L, XIE M, ZHANG L Y, 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. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.448.
- [4] ZIRLEWAGEN J, LICHA T, SCHIPERSKI F, et al. Use of two artificial sweeteners, cyclamate and acesulfame, to identify and quantify wastewater contributions in a karst spring[J]. Science of the Total Environment, 2016, 547: 356–365. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.112.
- [5] 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.
- XU Z X, ZHANG J Y, XU J, et al. Study on key technologies for improving quality and efficiency of urban drainage system: a case of Ma' anshan City [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(2): 348–355.
- [6] 陈至诚, 邵铭炜, 冯修平, 等. 电导率作为排水管道水质特征指标的潜力分析[J]. 净水技术, 2024, 43(3): 152–158.
- CHEN Z C, SHAO M W, FENG X P, et al. Potential analysis of electrical conductivity as a characteristic index of water quality in drainage pipelines[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(3): 152–158.
- [7] 姬忠勇. 水质电导率的测量原理分析及方法介绍[J]. 科技信息, 2013(10): 347–347.
- JI Z Y. Analysis of the measurement principle and method introduction of water conductivity [J]. Science & Technology Information, 2013(10): 347–347.
- [8] 仵杰, 孙永, 白彦, 等. 流体电导率的测量原理研究[J]. 计量与测试技术, 2010, 37(11): 11–13.
- WU J, SUN Y, BAI Y, et al. The measure principle of fluid electrical conductivity [J]. Metrology & Measurement Technique, 2010, 37(11): 11–13.
- [9] 王颖盈, 金跃斯. 紫外分光光度法测定生活废水中总氮方法优化[C]//中国环境科学学会 2021 年科学技术年会论文集 (三), 2021.
- WANG Y Y, JIN Y S. Optimization of the UV spectrophotometry method for determining total nitrogen in domestic wastewater [C]//2021 Annual Conference of the Chinese Society of Environmental Sciences, 2021.
- [10] 马芮, 刘嘉骥, 刘永. 水杨酸法检测水质氨氮的改进方法[J]. 中国环境监测, 2019, 35(5): 160–164.
- MA R, LIU J J, LIU Y. The improvement of salicylic acid method to determine ammonia nitrogen in water [J]. Environmental Monitoring in China, 2019, 35(5): 160–164.
- [11] 中国工程建设标准化协会. 城镇排水管道混接调查及治理技术规程: T/CECS 758—2020 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for investigation and elimination of illicit discharges of municipal drainage pipes: T/CECS 758—2020 [S]. Beijing: China Planning Press, 2020.
- [12] 龚日朝, 谭可星, 李诗音, 等. 基于均匀分布区间数的排序方法[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(4): 110–116.
- GONG R C, TAN K X, LI S Y, et al. Ranking method based on interval number of uniform distribution [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 35(4): 110–116.
- [13] LANGEVELD J, SCHILPEROORT R, HEIJNEN L, et al. Normalisation of SARS-CoV-2 concentrations in wastewater: The use of flow, electrical conductivity and crAssphage[J]. Science of the Total Environment, 2023, 865: 161196. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161196.
- [14] WU J, MA Y, SONG S. Reducing particle accumulation in sewers for mitigation of combined sewer overflow impacts on urban rivers: A critical review of particles in sewer sediments [J]. Water Science and Technology, 2024, 89(1): 89–115.
- [15] WU J, LI H Z, ZHANG J, et al. Microbial diversity and function in response to occurrence and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in combined sewer overflows [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123723. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123723.