

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.

电导率作为排水管道水质特征指标的潜力分析

陈至诚^{1,2}, 邵铭炜¹, 冯修平³, 林芳¹, 余子健¹, 刘希庭⁴, 宋姗姗³, 吴俊^{3,*}

(1. 福州市滨海水务发展有限公司, 福建福州 350207; 2. 福州新区生态环境与城市建设管理局城市建设管理处, 福建福州 350207; 3. 上海城市水资源开发利用国家工程中心有限公司, 上海 200082; 4. 上海众毅工业控制技术有限公司, 上海 200061)

摘要 水质在线监测是推进排水管道实时分析与动态管理的重要基础。由于监测便捷、成本较低, 电导率已被广泛应用于水环境日常监测与水处理效果分析等领域。文章综述了电导率在指示各类水质污染中的应用情况, 发现排水系统中的电导率特征主要受排入的雨水及污水中离子含量变化的影响; 综合分析排水管道水质特性与安装条件以及电导率测量原理后发现, 以电磁法为测量原理的电导率在线监测设备具有更好的适用性, 其测量的稳定性和设备的耐受性也要远高于其他化学指标; 基于雨污混合试验, 发现电导率可以灵敏地反馈不同的雨污混合比。综上, 电导率作为排水管道的水质特征初筛指标具有显著优势, 但仍需在属地特征方面做好前期研究工作。

关键词 电导率 在线监测 排水管道 属地特征 混接

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)03-0152-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.03.018

Potential Analysis of Electrical Conductivity as a Characteristic Index of Water Quality in Drainage Pipelines

CHEN Zhicheng^{1,2}, SHAO Mingwei¹, FENG Xiuping³, LIN Fang¹, YU Zijian¹, LIU Xiting⁴, SONG Shanshan³, WU Jun^{3,*}

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

2. Urban Construction Administration Division, Ecological Environment and Urban Construction Administration Bureau, Fuzhou New Area, Fuzhou 350207, China;

3. National Engineering Research Center of Urban Water Resources Co., Ltd., Shanghai 200082, China;

4. Shanghai Zhongyi Industrial Control Technology Co., Ltd., Shanghai 200061, China)

Abstract Online water quality monitoring is an important foundation for promoting real-time analysis and dynamic management of drainage pipelines. Due to the convenience and low cost of monitoring, electrical conductivity has been widely used in daily monitoring of water environment and analysis of water treatment effects. This article reviewed the application of electrical conductivity in indicating various types of water quality pollution, and found that the electrical conductivity characteristics in drainage systems were mainly influenced by changes in the ion content of discharged rainwater and wastewater; After comprehensive analysis of the water quality characteristics and installation conditions of drainage pipelines, as well as the principle of electrical conductivity measurement, it was found that the electrical conductivity online monitoring equipment based on electromagnetic method had higher applicability, and its measurement stability and equipment tolerance were also much higher than other chemical indicators; Based on the mixing experiment, it was found that the electrical conductivity could sensitively feedback different runoff/wastewater mixing ratios. In summary, electrical

[收稿日期] 2022-12-22

[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)

[作者简介] 陈至诚(1988—), 男, 主要从事生态环境与公共建设管理相关工作, E-mail: 35312201@qq.com。

[通信作者] 吴俊(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为排水系统提质增效, E-mail: wujunz2929@sina.com。

conductivity as a preliminary screening indicator for water quality characteristics of drainage pipelines has significant advantages, but preliminary research work still needs to be done in terms of territorial characteristics.

Keywords electrical conductivity(EC) online monitoring drainage pipeline local characteristic illicit connection

排水管网数量大、隐蔽性突出,导致日常养护难以及时发现问题。管网中的水质特征往往可以反映入流的水量来源特征,对于识别混接与错接等情况具有重要的意义。但在排水管道中开展水质检测也面临着离线检测人力投入高、周期长、管网内水质特征瞬息万变,致使样品代表性难以评估;在线监测对设备运行与维护要求高,前期投入及后期维护成本普遍较高,因此,其广泛应用受到限制。综上可以发现,在线监测可以做到高频次采样,不易漏失关键数据,对于实时评估排水管道的运行状况具有重要意义,但其投入与运维成本较高,难以系统性大范围应用。如若在线监测点位受限,此时对有限数据的分析难以充分体现在线监测的价值,更无法实现对排水管网的系统性实时精准管控。

电导率(electrical conductivity, EC)在线监测便捷、设备稳定性高、维护成本较低,近年来在水环境与原水水质监控、农村污水治理设施运行状态监控、工业废水处理效果监控等领域备受青睐。考虑到排水管道内水量来源特征、水质时变化特征及监测条件的复杂性及特异性^[1],应用 EC 在线监测设备作为排水管道日常运行管理的数据分析基础仍缺乏验证依据。本文重点对 EC 作为排水管道水质分析依据的可行性进行综述分析,以期为 EC 在线监测技术在排水管道日常监管中的应用提供参考。

1 EC 在指示水质污染中的应用现状

EC 表示物质传递电流的能力值,导电物质可引起 EC 的变化。雨污水中导电物质类型多样,包括氯离子(Cl^-)、铵根离子(NH_4^+)、硝酸盐(NO_3^-)、硫酸盐(SO_4^{2-})、碳酸氢根(HCO_3^-)及金属离子等^[2]。因此,采用 EC 表征污染特征时,首先需长期采集并分析研究对象的 EC 与其他指标的相关特征,建立 EC 特征阈值及与其他污染指标的相互关系,进而为基于 EC 监测属地水质特征建立重要的数据基础。遵循上述理论过程,已有案例将 EC 应用于水环境、生活污水及工业废水的特征污染物指示研究,同时建立了具有各自特色的 EC 在线监测体系。

张苒等^[3]通过统计分析某水文站多年在线 EC 数据,分析 EC 时变化特征,确定 EC 特征阈值;基于

上述基础,成功地通过在线 EC 监控系统精准识别出突发重金属污染事件,在地表水环境预警监控中起到了至关重要的作用。为了对原水水质进行长期的预警预报,黄斌等^[4]统计了研究区域内多年的水质数据,并分析了 EC 与其他各类指标的相关性,发现碱度、氯化物及 COD 与 EC 之间存在显著的正相关性,上述结果对采用 EC 在线监测预警预报咸潮入侵提供了重要的理论支撑。张智纯^[5]对嘉兴市及富阳区、定海区等地的农村污水水质特征进行了系统性分析,通过构建各污染物指标与 EC 之间的相互关系,建立了基于 EC 的农村生活污水处理设施在线监控方法,并通过在线指令保障设施的运行维护。为了实现对印染、纺织及热电等行业废水总排放口出水盐分的快速定量监控,白玲^[6]研究了上述废水中盐分与 EC 的相互关系,并建立了不同水质来源下盐分与 EC 的换算方法,实现了应用 EC 仪对工业行业废水中盐分的在线测定。此外,鉴于 EC 对多类型污染物的敏感性及其高频的反馈能力,研究者开始在城市排水系统领域探索 EC 仪的应用场景。研究人员^[2]通过构建雨水径流中 TN 与 EC 的相关性,建立了基于在线 EC 数值的雨水截流设施运行管理模式,用于在最大排水能力下截流更高的污染物总量;研究发现,在片区内的多个截流设施中应用统一的 EC 阈值范围作为运行标准时,其截污效率高于各设施采用经过独立分析而获取的 EC 阈值范围,同时也高于常规的物理截流模式。Samrani 等^[7]也将在线 EC 设备安装于排水管道的末端,用于监控合流制溢流(CSO)水质变化特征。

2 排水系统中 EC 特征

排水管道内水流的主要来源包括各类污水及雨水径流,水流通过排水管道进入污水处理厂或通过排放口排入接纳水体。为了提高水质识别的速度,提升排水系统管理的效率,已有研究针对排水系统潜在污染源、雨水径流及末端水质的 EC 特征开展分析。以下将对相关研究进行综述讨论,以初步分析 EC 在排水管道水质监控中应用的可行性。

2.1 排水管道潜在污染源 EC 特征

对某地区 231 座农村分散式污水处理设施的出

水水质进行分析发现,出水样品 EC 质量浓度 < 1 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 时,其中 87% 的出水样品 COD_{Cr} 质量浓度也低于 100 mg/L,因此当 EC 质量浓度 < 1 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 时基本可以判别出水 COD_{Cr} 的大致范围^[8];赵勇等^[9]对郑州市 3 条排污渠道开展连续监测,发现水体中的 EC 和 COD_{Cr} 之间存在显著的线性关系。楼显盛等^[10]发现,在浙江省农村污水中除 Ca^{2+} 因浓度较低以外, K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 与 EC 值均有显著的正相关性,且通过通径分析可知上述各离子均与 EC 存在显著的线性关系。农村污水中 Ca^{2+} 的主要来源为地下水入渗,在上述研究区域内,其与 EC 值不存在显著相关性,也说明该区域排水管道完善程度较好。因此,EC 可以快速地反馈水中离子含量的突变。

2.2 雨水径流 EC 变化特征

Lacour 等^[11]对多场次降雨事件进行分析后发现,当雨水径流持续排入后,排水管道中的 EC 值出现显著降低;降雨事件末期,管道中的 EC 值又开始逐渐上升。此外,研究^[2]显示,雨水径流中 EC 与 TN 等污染指标具有较好的相关性。

2.3 管道末端水流 EC 变化特征

Montalvo-Cedillo 等^[12]为了分析溢流雨污混合水水质变化特征,在 CSO 口安装了在线 EC 设备,并进行了其他水质指标的采样分析,经过对大量数据的对比分析发现,溢流雨污混合水的 EC 值在溢流初期即达到峰值,其反馈速率显著快于其他指标。Shirasuna 等^[13]也在初期雨水的研究中发现了相似的规律。因此,EC 在反馈排水管道内的水量突变情况时有其显著性优势。

结合前述分析可以发现,雨水径流、各类污水中的 EC 值有其常规特征,其对于水量波动具有较高的敏感度。Launay 等^[14]依据 EC 值的上述特征,通过对某片区内溢流雨污混合水、雨水径流及早流污水中各类化学指标及 EC 的数据分析,建立了基于 EC 值的 CSO 中雨水径流及早流污水贡献比例分析方法,其解析结果与依据其他各类特征指标的计算结果的偏差均低于 25%。Langeveld 等^[15]通过该方法对 CSO 中 SARS-CoV-2 浓度进行校正。

3 测量原理对水质在线监测的影响

EC 可作为物质传输电流能力强弱的评价指标,EC 值越大则导电性能越强,反之越小。因此,水体

中的 EC 是表征水体中导电能力的指标,其可间接反映水体中导电物质(以离子为主)的数量。流体中通常采用电极法和电磁法测量 EC。电极法是基于电解导电原理,通过电阻测量过程间接地测定 EC。电极法的测定过程是一个复杂的电化学过程。当对电极施加直流电后,阳极发生氧化反应,同时阴极发生还原反应,即法拉第(Faraday)过程。此时,电解产物在阴阳电极和溶液间形成电势,且电势方向与外加电势相反,进而电极之间的电流逐渐降低,等效溶液的电阻值上升,即发生化学极化效应。电极法中的电极需要涂抹耐腐蚀材料。电磁法是通过电磁感应原理测定溶液回路的导电能力,即通过闭环线圈在溶液中产生感应电压,并通过另一组线圈接收由感应电压产生的感应电流,测定中保持 EC 与电流成正比。

电极法通常测定速率快、设备更为轻便,且对低浓度更为灵敏,但其较易发生极化效应而影响测定的准确性^[16],同时电极的使用寿命较低。电磁法中不使用电极,因此,不会发生电极的极化问题,且对高温、高压、强碱、强酸等恶劣环境具有耐受性。一般而言,电磁法对高 EC 溶液的测量精度更高,当测定纯水等低电导溶液时,测量精度较低。相比于电极法,电磁法所需的一次性经济投入相对较高,但其长期的维护费用较低且环境耐受性较强^[17]。

温度是影响 EC 的关键因素。温度会影响电解质在溶液中的电离度和溶解度,进而使溶液的黏度和离子迁移速度发生变化,此时 EC 亦发生变化。一般情况下,25 $^{\circ}\text{C}$ 是表征 EC 的标准温度,当溶液温度偏离 25 $^{\circ}\text{C}$ 时,可进行温度补偿,折算成 25 $^{\circ}\text{C}$ 标准条件下的 EC 值。因此,当来源水流的常规水质较为稳定时,EC 值的波动很可能受到了温度的影响。谷建强等^[17]在分析南苕溪水体 EC 与温度的关系时发现,EC 与温度间的正相关系数高于 0.99。这也说明,在某一特定环境下,温度可以成为影响 EC 的最关键因素。因此,在实际应用过程中,通过优化 EC 仪的换算方法,使其对 EC 值进行定期校正,对于提升 EC 测量准确性至关重要。

当采用电极法时,会发生极化效应。在一定的温度下,当在电极两端施加直流电时,会发生极化效应,即溶液的电阻会上升,进而使误差加剧。当溶液浓度较低时,可通过施加交流电降低极化效应;但当溶液浓度较高时,电流密度过大或是电

压存在直流分量时,均会导致极化效应的出现。当进行室外环境 EC 在线监测时,通常会采用直流电,此时电极法测量的准确性将受到极化效应的显著影响^[18]。

4 在排水管道中的应用潜力分析

根据上述的分析可知,以电磁法为基础 EC 在线监测相对于常规水质指标的稳定性更高、适用范围更广,对多类型污染特征均可提供有效反馈。以下将对 EC 在排水管道水质监测中的应用潜力进行分析。

4.1 排水管道特征对 EC 应用的影响分析

排水管道中的水质特征与监测条件较为复杂,维护方式多样,直接影响着在线监测设施的正常运行。

4.1.1 水质特征

研究^[19]表明,排水管道内的水流与沉积物中存在与污水中相似的微生物种群和电子受体,因此,管段内的环境与污水处理厂预处理前端有一定相似性,其中的污染物主要包括有机物、悬浮颗粒物、无机物及微生物等。受不同污染源、管道混接、错接及地下水入渗等因素影响,不同管段内的水质特征存在一定的差异。依据 EC 在污水处理厂的大量应用实践,仅从水质特性(包括污染物特性及水温等条件等)的角度考虑,EC 在排水管道内的应用有其可行性。

4.1.2 监测条件

EC 在线监测构件中通常包含传感器、电池、信号发射器、连接及固定装置。排水管道在线监测设备通常安装于检查井内。根据大量现场调研,检查井内尺寸均可达到在线 EC 设备安装要求,而影响其应用的关键因素是信号的传输。尤其是一些传统的污水井,井盖上无孔洞,且一些井盖较厚,这些因素均会导致井下信号无法传递。但近年来,智能井盖方兴未艾,这也给排水管道在线监测的发展提供了重要的技术支持。

电磁法在线 EC 监测模块主要分为电池模块与探测器模块,其中电池模块与信号发射组件集成一体固定于检查井上部内壁[图 1(a)],探测器模块固定于管底[图 1(b)]。尽管排水管道内水流特征复杂,但 EC 监测组件均固定于坚固的管道结构上,因此,其受水流的影响较低。

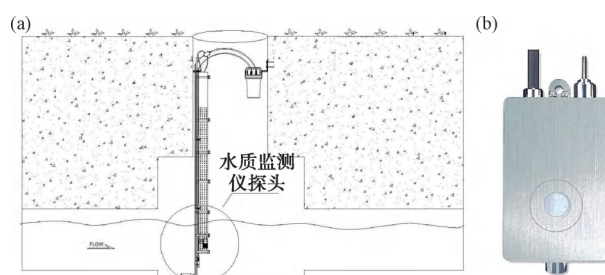


图 1 (a) 在线 EC 仪在检查井内的安装及(b)电磁法探测器模块

Fig. 1 (a) Installation of Online EC Instrument; and (b) Electromagnetic Detector Module

4.1.3 运行维护方式

现状排水管道的运行维护目标主要是使管道通畅,不累积沉积物。因此,维护方式主要包括绞车疏通、高压水射、水力冲刷等^[20]。在线 EC 设备一般固定于检查井内,所以其对传统的绞车疏通方式存在一定影响。但是,近年来随着排水管道运行维护方式的不断升级,效率低、人力投入大的绞车疏通方式正逐渐被水力冲刷、高压水射等方式取代。水力冲刷有其固定运行构建,造流后的水力条件也在管道的参数设计范围以内,因此,对在线设备不会附加其他的安装条件。高压水射法由于其可调范围峰值水压较高,短距内直接冲击设备主体,必将对其造成损害,但显然高压水射法可通过人为调节角度和初始冲洗位置,避免其作业时对设备主体造成伤害。此外,通过调节合理水射压力,高压水射的方式还可同时对在线 EC 设备外部进行快速清洗。

4.2 排水管道中 EC 在线监测设备的保障目标分析

保障 EC 在线监测设备的稳定性和灵敏度是关系到排水管道在线监测效益的重要基础。

4.2.1 保障稳定性的主要措施分析

排水管道中在线监测设备的稳定性是其应用的基本保障。通过第 3 小节中的讨论可知,EC 在线监测的稳定性主要受温度、检测方式、外部环境及运行维护方式等因素影响。其中,温度的影响可通过补偿公式进行误差校正,而电极法所产生的极化效应可通过采用电磁法进行规避,且上述相关技术已较为成熟。此外,通过有效的管理维护可以大幅减轻外部环境对在线监测设备的影响。例如,通过定期对探测器模块进行冲洗可以减少垃圾、杂物等对探测器的影响;通过周期性地更换电池组,保障设备的

持续运行;通过定期的信号检测,保障传输信号的长期稳定。

总体而言,EC 在作为排水管道中水质在线监测指标时,其测量的稳定性和设备的耐受性要远高于其他常规化学指标^[21]。因此,通过制定合理的维护计划将有助于长期保障在线 EC 设备的稳定运行。

4.2.2 保障灵敏度的主要措施分析

在水质在线监测中,COD、TN 等常规监测通常采用光谱法,该方法易受光谱信号背景的干扰。在排水管道中,由于水质情况复杂,此类设备必然需要进行经常性的校正维护,这也必然导致后期维护频率和成本的上升^[22]。相较而言,EC 测量时采用电信号,其受到水质背景干扰较小,灵敏度也相对更高。排水管道,尤其是雨水管道的检查井内易设置沉积槽或流槽,槽内通常存有一定的沉积物或雨污水,因此,当 EC 探测器浸没于沉积槽或流槽内时,监测的上游来水将受到槽内水体和沉积物的干扰,此时设备灵敏度将受到显著影响。因此,EC 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,当设备固定时,需将探测器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。

4.3 应用效益初步分析

排水管道中的各类不足是导致城市水环境污染的重要原因^[23]。为此,提高对排水管道水质的监测频率、扩大监测点位,有助于提升对排水管道的维护管理水平,有利于污染物的源头减排与排水管道的效能提升。

雨污混接是各地区排水管道普遍存在的问题。

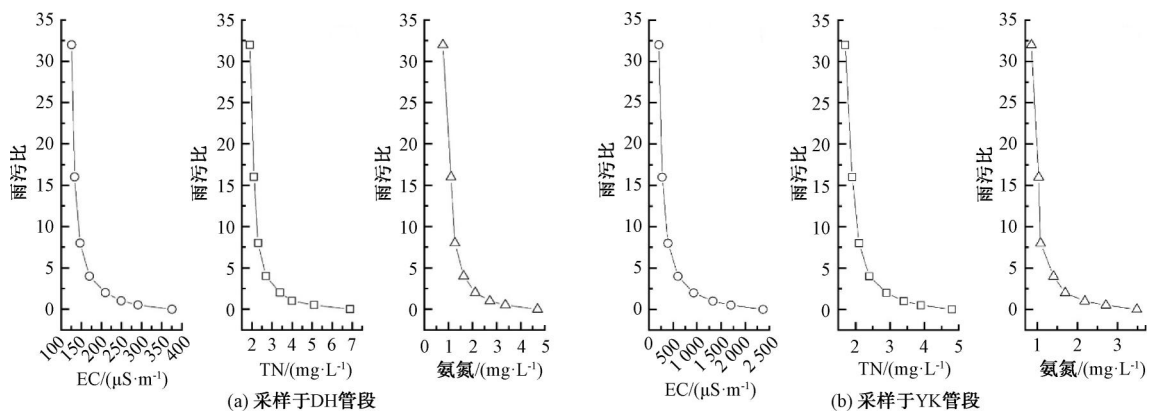


图2 不同雨污比下 EC、TN、氨氮浓度的变化

Fig. 2 Changes of EC, TN and Ammonia Nitrogen Concentrations under Different Rain-Sewer Ratios

常用诊断方法包括人工和管道内窥电视 (closed circuit television, CCTV) 检测,这 2 种方法诊断周期长且投入成本大,不宜成为诊断雨污混接问题的日常手段。近年来,已有研究者依据水质、水量特征的变化,基于输入-输出质量平衡方程,解析管道内的水量组成特征。但此类方法对采样频次、化学指标检测等要求较高,数据检测与分析工作量较大,难以适用于排水管网的长期跟踪监测与评估。依据前述对 EC 的分析可知,EC 具有测定速率和频率高、费用低、安装简便、维护管理简单等优点。因此,选取 EC 对排水管道水质特征变化进行在线监测有其显著性优势。根据笔者的文献调研,尚无研究讨论 EC 对不同雨污混接情况的反馈效应。

为了初步分析 EC 仪在排水管网监测中应用的可行性,同时也为后续的应用研究建立必要的基础,笔者选取福州新区滨海新城核心区两处独立的雨水管线 DH 和 YK,在相应区域内采集典型下垫面雨水径流(采样方法见文献^[24])与典型混接污水样品,并在实验室中将雨污水按照梯度比例进行混合(雨污比值分别为 0、0.5、1、2、4、8、16、32),以验证不同混接比下 EC 值的变化特性。研究中同步分析了 TN 和氨氮的变化特征,以与 EC 值进行对比分析。根据前文综述,研究中选取基于电磁法原理的 EC 仪开展相关检测工作。

根据图 2 可知,虽然不同区域(DH 和 YK)内采集的雨水径流及混接污水样品的本底污染物浓度差异较大,但不同雨污混合比对污染物浓度的影响趋势较为相近,未出现异常的波动。这一结果可以说明在不同的混接情况下,EC、TN、氨氮均呈现出较好

的反馈。将上述数据与不同混接比下的标准值(按雨污比计算得)进行相对偏差的分析发现(图3),在两处采样区域,EC的相对偏差比例均低于5%且标准误差值较小,TN的相对偏差与其相近,而氨氮的

相对偏差均超过10%。因此,EC不仅对不同的雨污混合比具有较好的反馈效应,同时也具有较好的数值稳定性。上述特征对EC在排水管道水质在线监测中推广应用具有重要的意义。

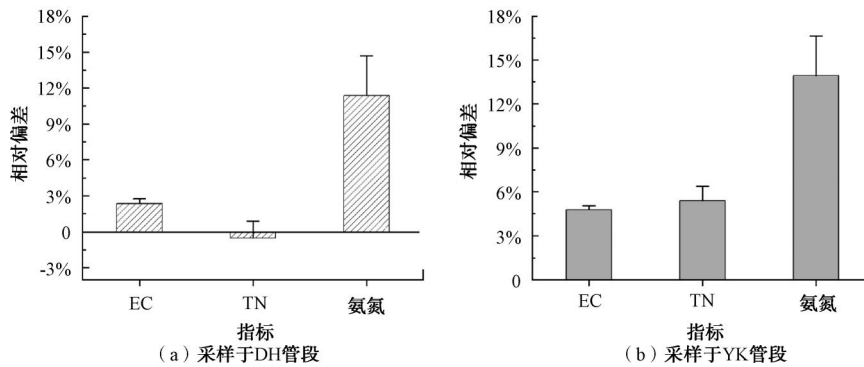


图3 不同雨污比对 EC、TN、氨氮浓度影响的相对偏差

Fig. 3 Effect of Different Rain-sewer Ratio on Relative Deviation of EC, TN and Ammonia Nitrogen Concentration

除此之外,就排水管网各重要节点而言,对于调蓄池、合流泵站、截流式雨水泵站、截流井等设施的排放口,在获取本底 EC 变化特征的基础上,同样可以应用 EC 在线监测,优化各类截流或调蓄设施的运行方式,进而减少污染物总量的排出,提高排水系统总截污能力,最终使城镇污水的实际收集效率得到有效提升,为排水系统的提质增效提供重要的技术支撑。

5 展望

选取合适的水质特征指标是在排水管道中开展在线监测的重要前提,其关键在于要同时兼顾便捷性、准确性、代表性及经济性等特征。EC 作为一种具有普遍适用性的水质指标,在监测技术上已较为成熟,能够满足必要的便捷性、准确性及经济性要求,但在代表性上仍需要依据属地特征进一步分析,必要时可通过一定时间的跟踪试验与分析模型,定量解析 EC 与其他水质指标之间的相关性。

排水管道中的水质波动影响因素众多,未来可在不同混接比、不同污染来源特征及不同管道类型等因素影响下,开展 EC 与其他多类型水质指标的相关性分析,系统地阐明 EC 在排水管道水质在线监测中的应用效益。同时,重点将其应用于各类不同特征的管道内,丰富应用场景,分析其实际应用效果,并将其与其他检测方式进行联用分析,逐步建立以 EC 为初筛方法,以其他各类检测方法为详细诊断方式的排水管道混接、错接及水量来源特征评

价体系,从而为排水系统提质增效发挥积极的作用。

参考文献

[1] 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.

[2] 陈水平. 基于电导率控制的城市雨水高效截流效率研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
CHEN S P. Study on high efficient interception efficiency of urban runoff based on conductivity [D]. Chongqing University, 2015.

[3] 张苒, 刘京, 周伟, 等. 水质自动监测参数的相关性分析及在水环境监测中的应用 [J]. 中国环境监测, 2015, 31(4): 125-129.
ZHANG R, LIU J, ZHOU W, et al. Study on the correlation of water quality automatic monitoring parameters and its application in aquatic environment monitoring [J]. Environmental Monitoring in China, 2015, 31(4): 125-129.

[4] 黄斌, 施周, 俞贤毅, 等. 微污染原水水质变化预警指标的选择 [J]. 水处理技术, 2015, 41(11): 47-49.
HUANG B, SHI Z, YU X Y, et al. The selection of early warning indexes for the changes of slightly polluted water quality [J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(11): 47-49.

[5] 张智纯. A/A/O 农村生活污水设施在线监测及自动控制的优化研究 [D]. 上海: 上海师范大学, 2021.
ZHANG Z C. Optimization of on line monitoring and automatic control of A/A/O rural domestic sewage treatment facilities [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2021.

[6] 白玲. 典型行业废水中盐分电导率测定方法研究与应用

- [D]. 济南: 山东师范大学, 2016.
- BAI L. Study and application of the determination method of salt conductivity in typical industrial wastewater [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2016.
- [7] SAMRANI E A G, LARTIGES B S, VILLIÉRAS F. Chemical coagulation of combined sewer overflow: Heavy metal removal and treatment optimization[J]. *Water Research*, 2008, 42(4/5): 951-960. DOI: 10.1016/j.watres.2007.09.009.
- [8] 时美, 张伯进, 顾正辉. 农村分散式生活污水处理设施的水质监测研究[J]. *质量安全与检验检测*, 2020, 30(4): 127-129.
- SHI M, ZHANG B J, GU Z H. Study on water quality monitoring of rural decentralized domestic sewage treatment facilities[J]. *Journal of Inspection and Quarantine*, 2020, 30(4): 127-129.
- [9] 赵勇, 李有, 王永刚, 等. 城市污水中电导率与 COD 相关性分析[J]. *重庆环境科学*, 2003(2): 36-38.
- ZHAO Y, LI Y, WANG Y G, et al. Analysis on relativity between COD_{Cr} and conductance of urban sewage [J]. *Chongqing Environmental Science*, 2003(2): 36-38.
- [10] 楼显盛, 陈安瑶, 张研, 等. 浙江省农村生活污水电导率与水质指标的响应关系分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2022, 34(1): 64-67.
- LOU X S, CHEN A Y, ZHANG Y, et al. Response relationship between conductivity and water quality index of rural domestic sewage in Zhejiang [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2022, 34(1): 64-67.
- [11] LACOUR C, JOANNIS C, GROMAIRE M C, et al. Potential of turbidity monitoring for real time control of pollutant discharge in sewers during rainfall events [J]. *Water Science and Engineering*, 2009, 59(8): 1471-1478. DOI: 10.2166/wst.2009.169.
- [12] MONTALVO-CEDILLO C, JERVES-COBO R, DOMÍNGUEZ-GRANDA L. Determination of pollution loads in spillways of the combined sewage network of the city of Cuenca, Ecuador[J]. *Water*, 2020, 12(9): 2540. DOI: 10.3390/w12092540.
- [13] SHIRASUNA H, FUKUSHIMA T, MATSUSHIGE K, et al. Runoff and loads of nutrients and heavy metals from an urbanized area[J]. *Water Science and Technology*, 2006, 53(2): 203-213.
- [14] LAUNAY M A, DITTMER U, STEINMETZ H, et al. Organic micropollutants discharged by combined sewer overflows - Characterisation of pollutant sources and stormwater-related processes [J]. *Water Research*, 2016, 104: 82-92. DOI: 10.1016/j.watres.2016.07.068.
- [15] 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.
- [16] 张明芳, 吴英, 李玮, 等. 基于电导率的米山水库水质演变分析[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2021, 35(5): 480-486.
- ZHANG M F, WU Y, LI W, et al. Water quality evolution analysis of the Mishan reservoir based on electrical conductivity [J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2021, 35(5): 480-486.
- [17] 谷建强, 朱凡, 祁享年. 温度对南苕溪水质电导率和 pH 的影响[J]. *环境工程*, 2015, 33(s1): 906-910.
- GU J Q, ZHU F, QI H N. Effect of temperature on the conductivity and pH of the water in south Tiaoxi [J]. *Environmental Engineering*, 2015, 33(s1): 906-910.
- [18] 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.
- [19] GASPERI J, LABORIE B, ROCHER V. Treatment of combined sewer overflows by ballasted flocculation: Removal study of a large broad spectrum of pollutants [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 211/212: 293-301. DOI: 10.1016/j.cej.2012.09.025.
- [20] 黄乃先, 齐一凡, 金伟. 排水管道沉积物控制的研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(3): 507-513.
- HUANG N X, QI Y F, JIN W. Research progress on the control of sediments in the drainage pipe [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(3): 507-513.
- [21] 李冲伟, 宋永, 李宏涛, 等. 电导率在 3 种饮料酒发酵过程中在线监测的研究[J]. *中国酿造*, 2011(7): 36-38.
- LI C W, SONG Y, LI H T, et al. On-line monitoring of conductivity of three alcoholic drinks during fermentation [J]. *China Brewing*, 2011(7): 36-38.
- [22] 粟晖, 姚志湘, 黎国梁, 等. 生化废水 COD 的近红外光谱法测定[J]. *光谱实验室*, 2011, 28(6): 3040-3043.
- SU H, YAO Z X, LI G L, et al. Determination of COD in biological and chemical wastewater by near infrared spectrometry [J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2011, 28(6): 3040-3043.
- [23] WU J, XU Z X, LI H Z, et al. Long-term effect of water diversion and CSOs on the remediation of heavy metals and microbial community in river sediments [J]. *Water Science Technology*, 2019, 79(12): 2395-2406.
- [24] 吴俊, 王以尧, 马艳. 基于新型径流采集方法的城市不同非渗透下垫面径流系数解析[J]. *环境工程*, 2021, 39(2): 47-52.
- WU J, WANG Y Y, MA Y. Analysis on runoff coefficients of different impervious underlying surfaces based on a novel runoff collection method for cities [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(2): 47-52.