

污水管网中雨水混接来源的高效诊断方法

徐祖信^{1,2}, 王诗婧^{1,2}, 尹海龙^{1,2}, 李怀正^{1,2}

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 污水管网中雨水混接不仅会导致雨天污水厂运行受到影响,而且产生管网污水冒溢. 针对在大范围污水管网中同步安装管道流量计识别雨水混接点位难以操作的问题,提出了基于管网节点水质特征因子监测的低成本雨水混接来源诊断技术方法. 具体以总氮和电导率分别作为指示生活污水和雨水的特征指标,并结合污染源地理信息系统、管网节点化学质量平衡和入流水质特征因子浓度数据库,有效解析污水管网中各管段的旱天入流水量和雨天雨水混接量. 对安徽省巢湖市城区污水管网雨水混接来源的解析证明了该方法的可靠性,提出了雨水入流来源解析的基本原则.

关键词: 污水管网; 雨污混接; 管网诊断; 水质特征因子
中图分类号: TU992; X52 **文献标志码:** A

Cost-effective Locating Inappropriate Rainfall Inflow into Urban Sewer Network

XU Zuixin^{1,2}, WANG Shijing^{1,2}, YIN Hailong^{1,2}, LI Huai Zheng^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Inappropriate rainfall connection to the sewer network would not only degrade the treatment efficiency of wastewater treatment plant, but also lead to sewer's wastewater overflow on wet-weather days. The identification of sewer's rainfall inflow by simultaneous flow measurements in manholes being hard to implement, a cost-effective approach based on marker species monitoring of the sewer network was presented. Specifically, total nitrogen and electrical conductivity being employed as the markers of sewage and rainfall respectively, in combination with the geographic information system of pollution sources, chemical mass balance at the sewer network nodes and data library of marker inflow concentration, the dry-weather flow as well as

the rainfall inflow received by each sewer segment could be quantified effectively. A case study to identify inappropriate rainfall inflow into the sewer network of Chaohu City, Anhui Province, of China, showed the reliability of the proposed approach, hence the basic principles for the method application was recommended.

Key words: sewage network; rainfall connecting to sewers; drainage system inspection; marker species

我国各地尤其是南方地区的污水处理厂,较为普遍地面临着雨天进水量增加和进水浓度偏低的问题,与雨天大量雨水接入污水管网有关. 当雨水不正当混接污水管网时,一方面可能会导致雨天污水厂无法正常运行;另一方面污水管网的输送能力被雨水占用,导致污水冒溢现象.

通过管网上、下游节点流量监测,是确定污水管网中雨水混接位置及其水量的直接手段. 相关研究如 Almeida 和 Brito 通过安装 37 台管道流量计,对 Costa do Estoril 截流系统进行了监测,利用实测数据区分和量化排水系统内的不同入流源^[1]. 国内,在常州市老城区和上海市排水系统的研究中,探讨了基于管道节点流量差值比较、 n 分法逐级溯源的水量调查技术^[2-3]. 但是,要在雨天定量污水管道中雨水来源,需在污水管网中同步安装很多管道流量计,极其费时费力且难以做到.

管网节点水质监测是一种诊断污水管网中雨水混接的潜在替代手段. 与现场同步安装管道流量计相比,同步的现场水质采样要相对容易很多. 国外 Shelton 等在 2011 年结合某排放口的流量和水质指标(总氮、总悬浮物、咖啡因、大肠埃希氏菌、肠球菌等)动态监测,筛选了评估生活污水的理想水质指标,在此基础上提出通过排放口旱天和雨天水质对

收稿日期: 2016-08-11

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX073003-003)

第一作者: 徐祖信(1956—),女,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为城市面源污染控制、水环境综合整治.

E-mail: xzx@stscm.gov.cn

通讯作者: 尹海龙(1976—),男,副教授,工学博士,主要研究方向为城市面源污染控制. E-mail: yinhailong@tongji.edu.cn

比及其化学质量平衡,评价污水管道中的雨水总体接入量^[4]. Houhou 等采用水中稳定同位素($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 和 δD)和硫酸盐同位素($\delta^{34}\text{S}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$),对法国大南锡地区城市排水系统的水量平衡过程进行分析(包括地下水入渗、调蓄池暴雨溢流、雨水下渗等)^[5]. 国内徐祖信等建立了基于水质特征因子的雨水管网混接成因诊断方法,以及排水管网地下水入渗分析方法,用于对雨水管道混接污染源分析以及管网破损程度的判定^[6-7]. 然而,以上方法是对于管网系统整体病因(包括污水管网雨水入流、雨污水管网地下水入渗、雨水管网混接等)的诊断分析,还需要进一步研究如何基于水质特征因子方法确定管道病因的具体来源,如污水管网中雨水接入点的位置及其水量. 美国国家环保局 2004 年发布的相关技术指南以及 Irvine 等在 2011 年的研究中^[8-9],尽管提出了基于管网节点水质调查确定管道病因的观点,但是如何细化这一技术方法,真正在实际中得到应用,目前尚无研究报道.

本文以安徽省巢湖市污水管网系统为例,研究基于管网节点水质调查,确定污水管网中雨水混接来源的技术方法,并对该方法进行验证.

1 研究区域概况

研究区域为安徽省巢湖市中心城区某污水处理厂服务范围,如图 1 所示. 服务面积 14.4 km²,污水干管总长 58.3 km. 区域内有两座污水提升泵站(XB 和 XR 泵站). 由于历史上管网建设资金缺乏,该区域现为污水干管系统、局部雨水管道和局部合流制管道组成混合排水系统(或称为混流制系统). 根据建立的污染源与污水管网综合地理信息系统,服务范围内污水收集量为 29 854 m³·d⁻¹.

根据 2013—2015 年污水厂进水水量记录统计,污水厂旱天进水量约为 49 000 m³·d⁻¹,与污水管网收集污水量相对照,确定管网系统的地下水入渗量为 19 146 m³·d⁻¹. 可见该污水管网系统旱天水量来源既包括纳管生活污水,也包括管网破损造成的地下水入渗.

此外,对 2013—2015 年期间雨天日降雨量与污水处理厂进水水量进行了统计分析,如图 2 所示, y 为进水量; x 为降雨量. 污水处理厂的日进水量与日降雨量呈正线性相关关系,即随着日降雨量增加,污水处理厂雨天进水量线性增加. 当日降雨量达 42 mm 时,污水处理厂进水量增加到 108 000 m³·

d⁻¹,约为旱天污水处理厂日进水量的 2.2 倍,并使污水处理厂日处理能力达到饱和. 可见,该污水管网系统存在严重的雨水混接问题,占据了污水管网的输送能力,影响了雨天截污效果的发挥. 为此,需要查明该污水干管系统中雨水混接来源及其对应的水量大小,并提出工程改造措施.

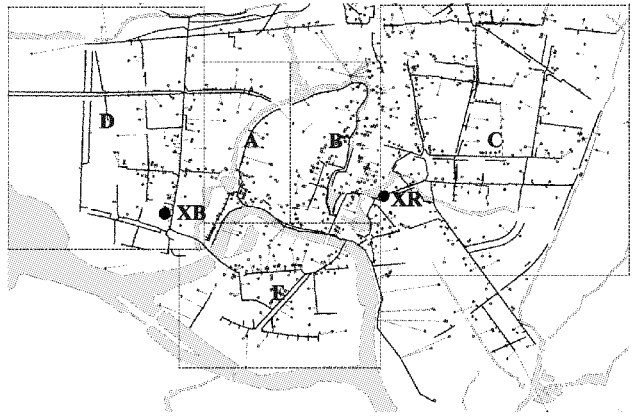


图 1 研究区域污染源与污水管网集成地理信息系统
Fig. 1 Geographic information system showing water pollution sources and trunk sewers of the study site

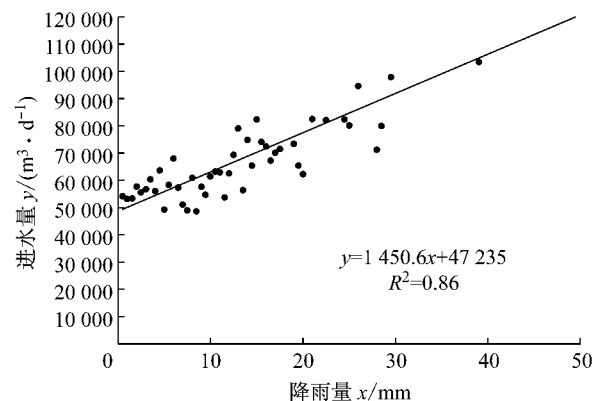


图 2 污水厂进水量与降雨量对应关系

Fig. 2 Statistics between rainfall and wastewater treatment plant inflow

2 研究方法

2.1 污水管网中雨水混接的诊断方法

污水管网中雨水混接来源诊断方法的建立,基于管网节点水质特征因子监测和节点管段的化学质量平衡,如图 3 所示.

2.1.1 污水管网中总体雨水混接量解析

雨天污水管网系统整体的化学质量平衡关系可表达为

$$(Q_d + Q_r)C_w = Q_d C_d + Q_r C_r \quad (1)$$

式中: Q_d, Q_r 分别为整个污水管网系统的旱天进水量和雨天雨水入流量; C_d, C_w 和 C_r 分别为污水处理厂旱天进水水质浓度、雨天进水水质浓度和雨水径流水质浓度。

由式(1)得出雨天污水管网系统总的雨水混接量为

$$Q_r = \frac{Q_d C_d - Q_d C_w}{C_w - C_r} \quad (2)$$

该方法可推广至任一污水管段雨水混接量解析。

2.1.2 污水管网雨水混接来源解析

参照式(2),第 k 个污水管段上游的雨水混接量可表示为

$$Q_{kr} = \frac{Q_{kd} C_{kd} - Q_{kd} C_{kw}}{C_{kw} - C_r} \quad (3)$$

式中: Q_{kr} 为第 k 个污水管段以上管网的雨水混接量; Q_{kd} 为第 k 个污水管段以上管网的旱天水量; C_{kd} 为第 k 个污水管段出流节点的旱天水质特征因子浓度; C_{kw} 为第 k 个污水管段出流节点的雨天水质特征因子浓度。各项符号如图 3 所示。

同理,第 $k+1$ 个污水管段上游的雨水混接量可表示为

$$Q_{k+1,r} = \frac{Q_{k+1,d} C_{k+1,d} - Q_{k+1,d} C_{k+1,w}}{C_{k+1,w} - C_r} \quad (4)$$

式中: $Q_{k+1,r}$ 为第 $k+1$ 个污水管段以上管网的雨水混接量; $Q_{k+1,d}$ 为第 $k+1$ 个污水管段以上管网的旱天水量; $C_{k+1,d}$ 为第 $k+1$ 个污水管段出流节点的旱天水质特征因子浓度; $C_{k+1,w}$ 为第 $k+1$ 个污水管段出流节点的雨天水质特征因子浓度。

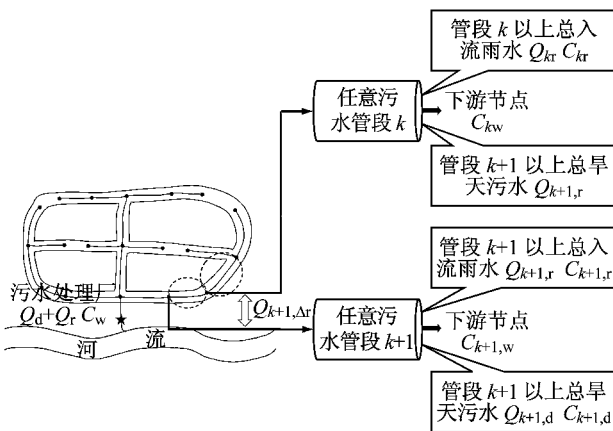


图 3 污水管网中雨水混接点位诊断模型示意图

Fig.3 Schematic diagram for locating and quantifying rainfall inflow into the sewer network

据此得出第 $k+1$ 个污水管段雨天混接雨水量

为

$$Q_{k+1,\Delta r} = Q_{k+1,r} - Q_{k,r} \quad (5)$$

式中, $Q_{k+1,\Delta r}$ 为第 $k+1$ 个污水管段雨天混接的雨水量,如图 3 示。

根据式(3)一式(5),要确定每一个污水管段混接雨水量,还需要确定每一个污水管段旱天输送的水量,包括生活污水量和地下水水量。其中,各污水管段接纳的污水量可通过污染源与污染管网 GIS 系统,基于污水排放去向与污水管段的对应关系确定;而对于各污水管段接纳的地下水入渗水量,则需要基于旱天污水管网沿程节点水质特征因子调查,建立旱天各污水管段的化学质量平衡方程解析确定,即

$$Q_{kd} C_{kd} = Q_{ku} C_{ku} + Q_{\Delta ks} C_s + Q_{\Delta kg} C_g \quad (6)$$

式中: Q_{ku}, Q_{kd} 分别表示污水管段 k 旱天上游来水水量和下游出流量; C_{ku}, C_{kd} 为污水管段 k 上游和下游监测节点的旱天水质浓度; $Q_{\Delta ks}$ 为污水管段 k 接纳的污水量,通过 GIS 系统确定; $Q_{\Delta kg}$ 为污水管段 k 接纳的人渗地下水水量; C_s 和 C_g 分别为生活污水和地下水的水质浓度。

由于 $Q_{kd} = Q_{ku'} + Q_{\Delta ks} + Q_{\Delta kg}$,代入式(6)得到任一污水管段 k 的地下水入渗量为

$$Q_{\Delta kg} = \frac{Q_{ku'}(C_{ku'} - Q_{kd'}) + Q_{\Delta ks}(C_s - C_{kd'})}{C_{kd'} - C_g} \quad (7)$$

综上,污水管网系统中雨水入流诊断技术路线如图 4 所示。具体实施时,首先通过划分若干管段,解析雨水接入污水管网的区域;对存在问题的重点管段,根据管网 GIS 系统并结合污水管段加密采样监测,确定雨水接入污水管网的具体位置。

需要进一步说明的是,管网入流包括生活污水、地下水和雨水径流的水质浓度具有不确定性,事先难以输入一个精准的数值。例如,生活污水水质浓度与区域内居住区类型和经济状况、居住人口年龄分布等有关,地下水水质浓度随区域内空间地质化学性质的差异可能发生改变,雨水径流水质浓度随每场降雨量大小、汇水区范围内各种土地利用类型等因素发生改变。基于此考虑,在管网节点化学质量平衡分析中另引入不确定性分析方法,即参照已有的实测数据,设定一个入流水质特征因子浓度范围(包括生活污水、地下水和雨水径流),在此浓度范围内随机取值,解析各污水管段旱天水量(包括生活污水和地下水)和雨天雨水入流量,将整个管网系统的解析值之和与基于旱天、雨天水量平衡的总水量进行对比,如果两者不相等,调整水质特征因子浓度重新计算,直至两者相等;据此,也可以反演接入污水管

网的生活污水、地下水和雨水径流水质浓度特征。

2.2 污水管网节点采样监测方法

在污水处理厂前池和污水管网检查井中共设置了 27 个监测节点,如图 5 所示。

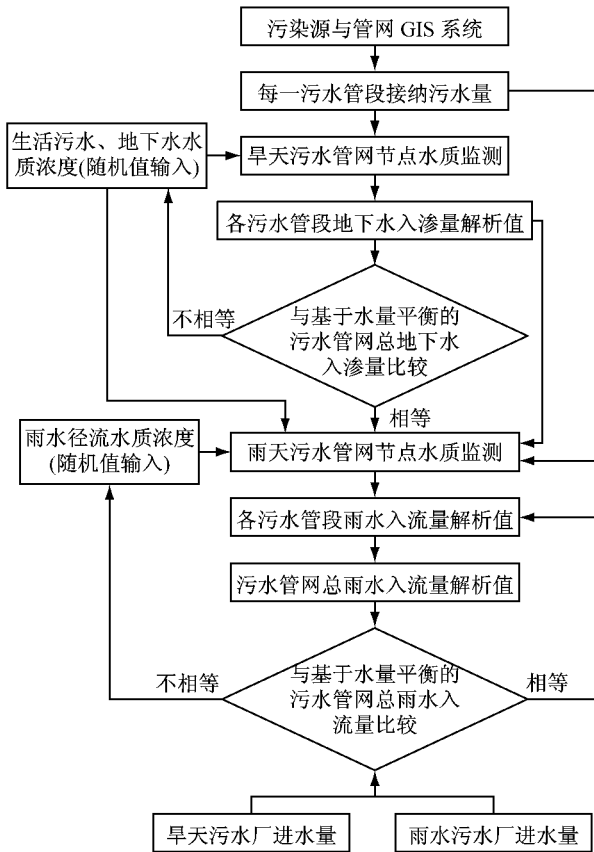


图 4 污水管网系统中雨水混接诊断技术路线图

Fig.4 Technical route for detecting rainfall inflow into the sewer network

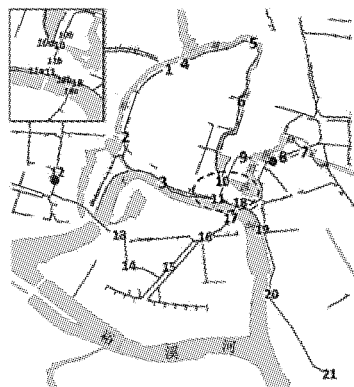


图 5 研究区域污水管网采样点分布

Fig.5 Sampling locations down the sewer network

2016 年 4 月在旱天和雨天各进行了 1 次同步采样,每次采样持续 1 d。其中:旱天采样时间段为 2016 年 4 月 14 日 12:00—4 月 15 日 12:00,每 3 h 采样 1 次,采样前 48 h 无降雨;雨天采样时间段为 2016 年

4 月 16 日 3:00—4 月 17 日 3:00,每 3 h 采样 1 次,期间总降雨量为 20.3 mm,降雨主要集中在 3:00—15:00 时间段,如图 6 所示。

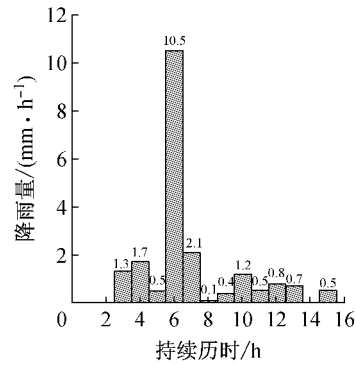


图 6 雨天采样时间段逐小时降雨量

Fig.6 Hourly rainfall during the sampling period

采集的水样样品保存在聚乙烯瓶中,采样后及时将水样运回实验室并在 4℃ 下冷藏避光保存。

2.3 水质特征因子的选择

要满足任一污水管段旱天、雨天入流与出流化学质量平衡,须选择表征生活污水和雨水的相对保守型水质特征因子,即该指标在管道中基本上不发生生物化、生化反应。

相关研究表明,表征生活污水的水质特征因子可采用安赛蜜、药物和化妆品类指标、总氮等。尽管安赛蜜、药物和化妆类指标被认为是稳定性的水质特征因子指标^[10-11],但是监测分析方法复杂。从便于快速监测的角度,可考虑总氮作为生活污水的水质特征因子指标,如 Shelton、徐祖信等在污水管网雨水入流和雨水管网混接、地下水入渗解析研究中给出的结论^[4,6-7]。对于雨水径流入流,采用电导率进行表征。

污水管网节点的总氮、电导率依据现场测定结果。旱天入流(生活污水和地下水)总氮、雨水电导率浓度范围,可直接参考相关文献报道^[6, 12-13]。

3 结果与讨论

3.1 各污水管段旱天接入水量解析

采样时间段内污水管网旱天的总氮浓度监测结果如图 7 所示。

如前述,旱天污水厂进水量约 $49\ 000\ \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,其中地下水入渗量为 $19\ 146\ \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$;以此作为约束条件,对各污水管段的地下水入渗量和旱天接入水量进行解析。设定的生活污水和地下水总氮浓度范围分别为:生活污水 $25.0 \sim 80.2\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,下限

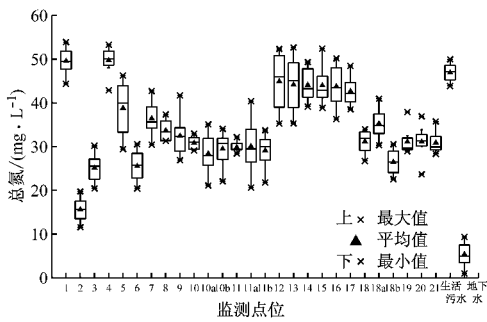


图 7 污水管网节点旱天总氮浓度监测结果

Fig.7 Monitored total nitrogen down the sewer network on dry-weather days

值代表相对清洁的灰水,上限值代表黑水;地下水为 $1.0\sim 9.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [6]. 能否能够得到合适的解析结果主要与生活污水总氮浓度的取值有关.

根据图 7 中每个节点每日监测数据系列的日均值,解析出相应污水管段每日的旱天接入水量(地下水+生活污水)如图 8 示;相应反演的入流生活污水总氮浓度范围为 $43.8\sim 49.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 $46.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 根据对上海市典型居住小区的总氮浓度监测结果,居住小区生活污水总氮浓度均值为 $53.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [6];本例反演的入流生活污水总氮浓度与已报道数值接近,表明该区域污水管网的生活污水主要来自于居民区,表现为以黑水而非以灰水为特点的生活污水接入.

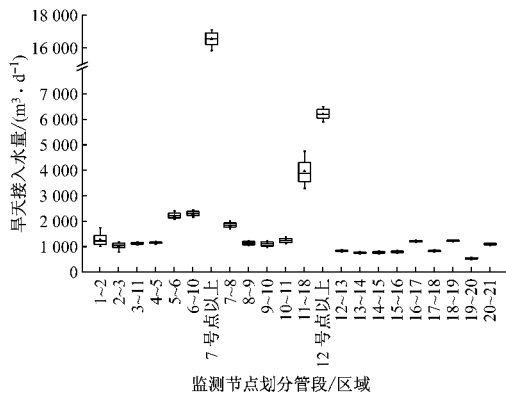


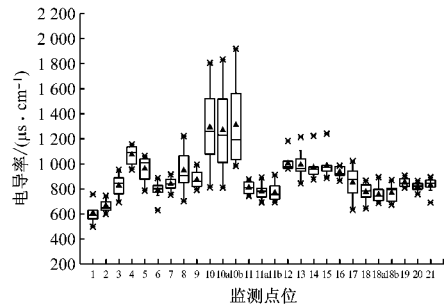
图 8 污水管网旱天接入水量解析结果

Fig.8 Apportioned dry-weather inflow into each sewer segment

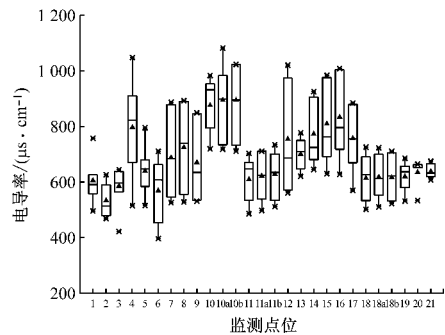
3.2 各污水管段雨水混接量解析

根据图 2,对应雨天采样时间段 20.3 mm 降雨量条件下,污水处理厂的雨天总进水量为 $76\ 682\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,相应污水管网的雨水混接量为 $27\ 682\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$. 以此为约束条件,在旱天入流量解析结果的基础上,进一步基于污水管网节点旱天和雨天电导率监测数据的对比,如图 9 所示,解析出各污水

管段的雨水混接量. 同理,根据每个节点每 d 电导率监测数据系列的日均值,解析出各污水管段每 d 雨水入流量.



a 旱天



b 雨天

图 9 污水管网电导率监测数据结果

Fig.9 Monitored data sets of electrical conductivity down the sewer network

根据国内在滇池流域的监测结果,雨水径流电导率范围约为 $170\sim 400\ \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ [12]. 国外,在日本某地测得的雨水径流电导率范围约为 $100\sim 500\ \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ [13],两者较为接近. 因此雨水径流电导率的随机值取值范围设定为 $100\sim 500\ \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$. 污水总氮浓度取值 $43.8\sim 49.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,即反向解析的污水浓度范围.

污水管网混接雨水量解析值与总氮、电导率的关系如图 10 所示. 可以看出: 污水总氮浓度波动对雨水入流量解析结果的影响很小,解析结果的变差系数仅为 $0.003\sim 0.008$; 电导率不确定性对解析结果的影响明显,随着雨水径流电导率的增加,污水管网雨水混接量呈幂函数形式增加. 同旱天所述的反向推算方法,满足本例污水管网总雨水混接量 ($27\ 682\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)约束条件的总体雨水径流电导率为 $328\sim 333\ \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$.

参照昆明市城区降雨径流总氮与电导率的拟合结果 $E_c=30.32C_{\text{TN}}+129.19$ (E_c 为电导率, C_{TN} 为总氮浓度)[12]; 对应本例中雨水径流电导率 $328\sim 333\ \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的总氮均值约为 $6.6\sim 6.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在

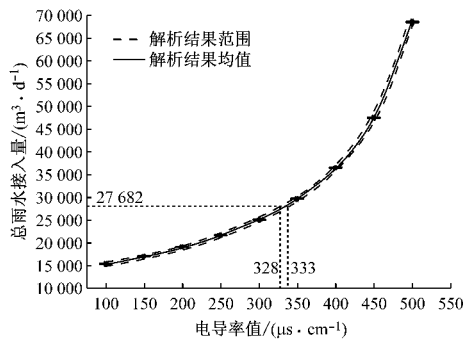


图 10 污水管网雨水入流量与总氮、电导率的对应关系

Fig. 10 Apportioned total rainwater inflow into the sewer network associated with uncertainty of total nitrogen and conductivity

合肥市不同下垫面降雨径流水质特征研究中,草地、屋面、校内道路和校外道路的总氮浓度均值分别为 4.2, 4.2, 4.9, 5.9 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[14];上海城区非渗透地面的地表径流总氮浓度均值约为 7.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[15]. 基于反演电导率推算出的雨水径流总氮浓度均值与已报道的非渗透路面值接近,表明了总氮与电导率满足相关关系,从而可以用电导率表征降雨径流,对污水管网的雨水接入进行快速监测和解析.

由图 10 可以看出,对应雨水电导率 328~333 $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时的雨水入流量解析值变化幅度不明显;为简便起见,可以用每个污水管段雨水混接量的解析结果均值表示,如图 11 示. 为验证解析结果的可靠性,分别选择 XR 污水泵站对应的 7 号点位以上子片区和 XB 污水泵站对应的 12 号点位以上子片区,对模型进行验证. XR 污水泵站和 XB 污水泵站均有长时间的连续水量运行记录;因此可以通过对运行记录进行统计分析,如图 12 所示,确定不同降

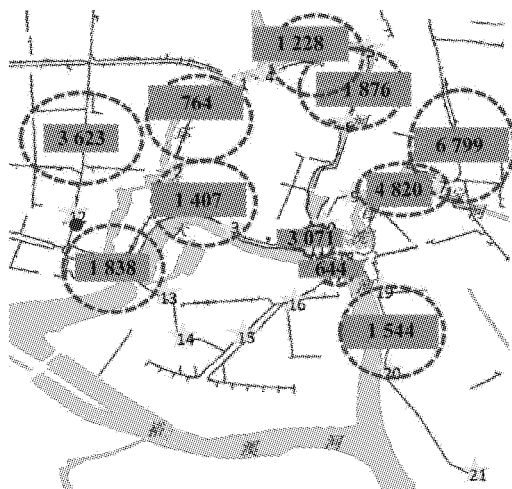
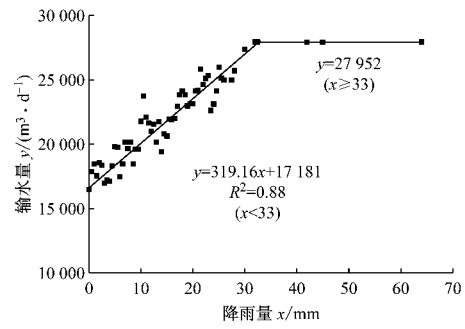
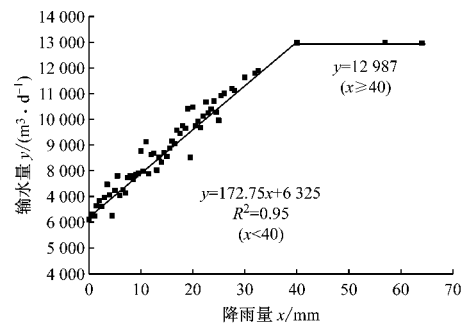


图 11 污水管网中雨水混接水量来源解析结果

Fig. 11 Apportioned rainwater inflow into the sewer network



a XR 泵站



b XB 泵站

图 12 两个污水系统子片区的雨天接入水量和降雨量关系
Fig. 12 Recorded rainwater inflow into the sewer systems of two mid-way sewage pump stations as a result of precipitation

雨量条件下两个污水泵站对应子片区的雨水混接量.

图 12 中, XR 与 XB 泵站分别在降雨量 33 mm 和 40 mm 时转输水量最大值,低于此降雨临界值时转输水量与降雨量成线性关系,高于此降雨临界值后转输水量不再增加. 根据线性拟合方程,降雨量为 20.3 mm 时, XR 泵站对应的 7 号点位以上子片区雨水入流量为 6 479 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, XB 泵站对应的 12 号点位以上子片区雨水入流量为 3 507 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. 对照图 12, 7 号点以上污水系统片区雨水混接量解析值为 6 799 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,与 XR 泵站雨水入流量记录值相对误差 4.7%; 12 号点以上污水系统片区雨水混接量为 3 623 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,与 XB 泵站雨水入流量记录值相对误差 3.2%. 因此,基于本文模型解析污水管段的雨天入流量,具有可靠性.

4 结论与建议

(1) 基于管网节点水质特征因子监测,结合污染源地理信息系统、污水管网节点化学质量平衡和入流水质特征因子浓度数据库,能够经济有效定量解析污水管网中雨水非正常接入. 针对安徽省巢湖

市的实证研究表明,采用总氮和电导率分别作为表征生活污水和雨水的水质特征因子指标,可以得到合理的解析结果。

(2) 在进行管网节点采样监测时,需要旱天在污水管网中监测总氮和电导率,雨天时可仅在污水管网监测电导率.具体采样频次,每个节点旱天采样 1 d,每 3 h 采样 1 次.雨天采样频次应不低于旱天时的采样频次.依据每个节点每 d 采样批次监测结果的日均值,解析各污水管段的每 d 入流量.可首先通过划分若干管段(如将监测点选择在污水中途提升泵站、管网连接点、长距离污水管段每间隔 1km 等处),解析雨水接入污水管网的区域;对存在问题的重点管段,根据管网 GIS 系统并结合污水管段加密采样监测,进一步确定雨水接入污水管网的具体位置。

(3) 实例表明,污水管网雨水混接量大且接入位置分布广泛,严重降低了雨天污水处理厂的运行效能.解决这一问题需要结合区域排水系统雨污分流改造和污水管网系统的优化调控,提出了工程改造措施。

参考文献:

- [1] Almeida M C, Brito R S. System diagnostics using flow data: Quantifying sources and opportunities for performance improvement [C] // Proceedings of the 9th International Conference on Urban Drainage. Portland: American Society of Civil Engineers, 2002: 1-13.
- [2] 吴文俊, 管运涛, 陈波, 等. 老城区排水系统效能诊断技术探讨[J]. 中国给水排水, 2010, 26(20): 59.
WU Wenjun, GUAN Yuntao, CHEN Bo, *et al.* Preliminary study on diagnostic techniques of drainage system performance in old towns [J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(20): 59.
- [3] 李田, 周永潮, 李贺, 等. 基于流量调查的分流制雨水系统诊断研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(7): 1.
LI Tian, ZHOU Yongchao, LI He, *et al.* Diagnostic study on split-flow rainwater system based on flow survey [J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(7): 1.
- [4] Shelton J M, Kim L, Fang J S, *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.
- [5] 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.
- [6] 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.
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.
- [7] 徐祖信, 汪玲玲, 尹海龙, 等. 基于特征因子的排水管网地下水入渗分析方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2016, 44(4): 593.
XU Zuxin, WANG Lingling, YIN Hailong, *et al.* Quantification of groundwater infiltration into urban drainage network based on marker species approach [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2016, 44(4): 593.
- [8] Environmental Protection Agency. Illicit discharge detection and elimination: a guidance manual for program development and technical assessments [EB/OL]. [2016-08-10]. http://www.epa.gov/npdes/pubs/idde_manualwithappendices.pdf.
- [9] Irvine K, Rossi M C, Vermette S, *et al.* Illicit discharge detection and elimination: low cost options for source identification and trackdown in stormwater systems [J]. *Urban Water Journal*, 2011, 8(6): 379.
- [10] Tran N H, Hu J Y, Li J H, *et al.* Suitability of artificial sweeteners as indicators of raw wastewater contamination in surface water and groundwater [J]. *Water Research*, 2014, 48: 443.
- [11] Kuroda K, Murakami M, Oguma K, *et al.* Assessment of groundwater pollution in Tokyo using PPCPs as sewage markers [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(3): 1455.
- [12] 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 Shuiping. Study on high efficient interception efficiency of urban runoff based on conductivity [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [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.
- [14] 谢继锋, 胡志新, 徐挺, 等. 合肥市不同下垫面降雨径流水质特征分析[J]. 中国环境科学, 2012, 32(6): 1018.
XIE Jifeng, HU Zhixin, XU Ting, *et al.* Water quality characteristics of rainfall runoff in Hefei City [J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(6): 1018.
- [15] 林莉峰, 李田, 李贺. 上海市城区非渗透性地面径流的污染特性研究 [J]. 环境科学, 2007, 28(7): 1430.
LIN Lifeng, LI Tian, LI He. Characteristics of surface runoff pollution of Shanghai urban area [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(7): 1430.