

Quantification of Inflow and Infiltration in Urban Sewer Systems Based on Triangle Method

Xiaoting Wang¹, Yue Yao², Wei Zhou³, Lan You³, Siyu Zeng^{1*}

¹School of Environment, Tsinghua University, Beijing

²China Academy of Urban Planning & Design, Beijing

³Suzhou Drainage Company Limited, Suzhou Jiangsu

Email: wxt_2011@126.com, *szeng@tsinghua.edu.cn

Received: July 24th, 2019; accepted: August 8th, 2019; published: August 15th, 2019

Abstract

Inflow and infiltration of external water into sewer systems exist generally in the plain river network area, which weakens the transmission capacity of pipelines and the efficiency of the wastewater treatment plants. In this study, triangle method is applied to analyze the outlet flow of sewage pipelines in a specific time period. The scale and composition of the external water volume are evaluated according to the principle of water balance using daily wastewater treatment plant inflow data and rainfall data. The assessment of the sewer system in Suzhou central district during the period of 2014-2017 shows that the amount of external water accounts for 27% - 33% of the total flow collected annually. Average daily external flow accounts for 22% in dry days and 43% in rainy days, among which the average infiltration and inflow rates are separately 16% and 27%. The severity of inflow and infiltration in wet weather is derived and intensified by the rain. This study identified the inflow and infiltration characteristics of the sewer systems in the case area, and verified the adverse effects of external water on the operation of the systems. The analytical results can provide a basis for the development of the pipeline repair program.

Keywords

Sewer System, Inflow and Infiltration, Triangle Method, Rainfall

基于三角分析法的城市污水管网入流入渗量评估

王小婷¹, 姚越², 周炜³, 尤岚³, 曾思育^{1*}

¹清华大学环境学院, 北京

*通讯作者。

²中国城市规划设计研究院, 北京

³苏州市排水有限公司, 江苏 苏州

Email: wxt_2011@126.com, szeng@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2019年7月24日; 录用日期: 2019年8月8日; 发布日期: 2019年8月15日

摘要

平原河网地区分流制污水系统普遍存在外来水入流入渗现象, 管网输送能力和污水厂处理效能均受到负面影响。本研究采用三角分析法解析特定时间段内的污水管网出口流量, 根据逐日水量平衡和降雨数据评估外来水量的规模与构成。对2014~2017年期间苏州市中心城区污水管网系统开展评估, 结果表明, 每年外来水总量占管网收集总水量的27%~33%; 旱天和雨天的外来水量日均占比分别为22%和43%, 其中雨天管网平均入渗率16%、平均入流率27%, 降雨对入流入渗的驱动作用明显。本研究识别了案例区污水管网入流入渗特征, 验证了入流入渗给系统运行带来的压力, 解析结果可为制定管网修复方案提供依据。

关键词

污水管网, 入流入渗, 三角分析, 降雨量

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

分流制污水系统中, 管网中的水流主要由实际排放的污水和入流入渗的外来水组成。前者指人们生产生活排放的污水, 后者则包括因管道或检查井结构性缺陷入渗的地下水和降雨时由于雨污管线混接入流的雨水[1]。外来水进入污水管道会增加系统水力负荷、加剧污水厂进水水量水质波动, 进一步增加污水漫溢风险、降低污水厂运行效率, 给居民的生产生活安全和受纳水体环境带来不良影响[2]。对外来水量规模及其特征的定量识别已成为提高城市排水系统运行绩效和安全水平的工作基础, 也是后续采取管道修复措施的重要依据。

虽然外来水入流入渗是排水系统普遍存在的现象, 但其水量大小和成分结构受到管网服务区域排水规律、管道结构条件、降雨情况、监测条件等诸多因素影响, 要实现精确计算存在难度[3]。根据排水系统监测的完善程度和监测数据的积累情况, 文献中报道了不同的入流入渗量估算分析方法, 常见的有夜间最小流量法、封堵计量法、特征因子法、三角分析法等。夜间最小流量法认为旱季管道中夜间最小流量全部来自地下水入渗, 因此用较长时间尺度下旱季夜间(0:00~6:00)平均流量估算地下水入渗量[4]。封堵计量法对单一管段进出水口进行封堵, 通过计量一段时间内管内水位或水量的变化计算地下水渗水量[5]。特征因子法选取污水管道各部分来水中浓度差异较大、易于分析的保守物质作为水质特征因子, 联立水量水质平衡方程计算入流入渗的各部分水量[6] [7] [8]。三角分析法根据污水管网日出水量和日降雨数据估算相应排水片区的早雨季外来水量[9] [10]。

已有研究表明, 夜间最小流量法和封堵计量法适用于较小空间尺度中旱季地下水入渗量的计算[11],

当系统服务范围比较大时,前者基本假设不再成立,后者可操作性不足,均可能导致明显的误差而无法应用[6];特征因子法精度高,但由于需要增加对特征因子的观测而投入大量采样监测工作,后期数据处理和计算难度也较大,应用于较大片区时成本过高;相比而言,三角分析法易操作、低成本,适用于较大尺度且相对封闭的污水系统,评估结果可精确到单日。综上,基于初步认识城市污水管网系统入流入渗规律的目的,以及较大尺度上复杂污水系统在线监测设备布设和成本费用的局限性,三角分析法成为宏观把握城市污水管网系统入流入渗规律的合适选择。

本研究以地下水位高、降雨丰富的苏州中心城区为案例,利用三角分析法的基本原理并根据研究需求进行部分参数优化,计算不同水文年污水管网中入流入渗的外来水量,并分析其特征,以期对该地区排水管网优化运行和维护修复提供数据支撑和决策参考。

2. 研究对象与方法

2.1. 研究区域概况

本研究针对苏州市中心城区,其总面积约 100.8 km²,属于典型平原河网地区,河网密集、地下水位较高且降水资源丰富。2014~2017年,苏州当地年降雨量分别达到 898.2 mm、1597.0 mm、1982.3 mm、1138.4 mm。通过统计分析案例区近 30 年降雨量可知,2014~2017 年降雨量对应的水文频率分别接近 95%、5%、5%、50%,可代表典型的丰平枯水文年条件。研究区采用分流制排水体系,其污水管网约 2000 km。区域内无工业废水排放,所有生活污水汇集到福星、城东和娄江 3 座污水厂进行处理,三厂总设计规模为 36 万 m³/d。其中福星污水厂设计规模 18 万 m³/d,服务于面积 46.1 km²的城西片区;城东和娄江污水厂设计规模分别为 4 万 m³/d 和 14 万 m³/d,共同服务于面积 54.7 km²的城东片区,超出城东污水厂处理能力的水量被转输到娄江污水厂。

2.2. 三角分析法与基础数据

由于分流制污水管网不存在溢流等中途水量损失的情况,因此,基于水量平衡原理,可将特定时间段内污水管网出口流量分解为污水流量、地下水入渗流量和雨水入流流量,后两者之和即为该段时间内污水管网中入流入渗的外来水总量。以天为计算单位,水量平衡方程如式(1):

$$Q_{out} = Q_{foul\ sewage} + Q_{infiltration} + Q_{inflow} \quad (1)$$

式中, Q_{out} 为当日污水管网出口流量(万 m³/d),即污水管网当日收集的总水量,对案例区而言即为各污水厂日进水量之和; $Q_{foul\ sewage}$ 为污水管网中居民当日排放的生活污水量(万 m³/d); $Q_{infiltration}$ 为污水管网中当日入渗的地下水水量(万 m³/d),既包括旱天(无降雨日)的地下水基础入渗量,也包括雨天由于雨水下渗提升地下水位而额外带来的入渗量; Q_{inflow} 为污水管网中当日入流的雨水水量(万 m³/d)。

三角分析法根据水量平衡方程,对特定时间段内的污水管网出口流量曲线进行分割。以天为最小计算单位,需要的基础数据包括所选时间段(总天数记为 n)内每日污水管网出口流量与发生降雨的天数。将管网出口流量由小到大升序排列并从 1 到 n 予以编号。绘图时,横坐标为当日编号与 n 的比值,纵坐标为当日污水管网出口流量,如图 1 所示。对流量曲线的分割则基于以下几点假设:(1)居民每日排放的生活污水量为定值;(2)雨天的外来水量较旱天大,且在雨天管网出口流量最小日,外来水依然全部为入渗的地下水;(3)在管网出口流量最大日,入流的雨水挤占了管道中除污水外的全部剩余空间,即该日的外来水全部为入流雨水。根据假设(1),在图中可用水平线表示居民生活污水量 $Q_{foul\ sewage}$;根据假设(2)和所选时间段内的降雨天数,由横坐标右端起始,发生降雨的天数组成雨季,左边剩余时段为旱季,在旱雨季分界当日,入流的雨水水量 Q_{inflow} 为 0;根据假设(3),横坐标数值达到 100%时,入渗的地下水水量 $Q_{infiltration}$

为 0。由此用直线对管网出口流量曲线与坐标轴围成的图形进行分割，得到若干三角形，其面积分别代表该时间段内的旱季入渗量、雨季入渗量和雨水入流量。需要特别说明的是，三角分析法中雨季、旱季的定义不同于按月划分的汛期、非汛期，而是定义污水管网出口流量较大的时段组成雨季(天数同发生降雨的天数)，其余时段组成旱季。

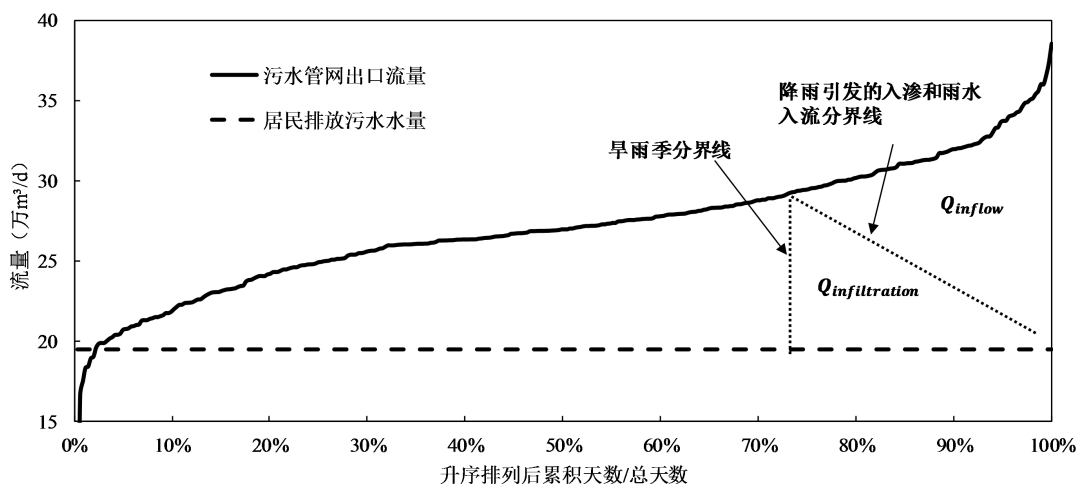


Figure 1. Determination of foul sewage, inflow and infiltration by triangle method

图 1. 三角分析法计算入流入渗原理示意图

相比于国外已报道的三角分析法，本研究沿用其基本假设，将纵坐标由日流量与最大日流量之比调整为日流量数据，便于水量的解析。此外，在入流雨水量计算时，为减小对应三角形面积与实际图形面积差异造成的误差，选取日流量的 95%~99% 分位数范围内的数字代入计算。

对于苏州市中心城区，污水管网出口流量即为福星、城东和娄江 3 座污水处理厂的进水量之和，该数据由各污水厂的日生产报表得到。降雨天数由日降雨历史数据得到，观测站点位于城西片区。2014~2017 年，各年的降雨天数分别为 99、141、140、116 天。居民每日排放的生活污水水量通过用水数据和城市污水排放系数估算。根据《苏州统计年鉴》，可得到 2014~2017 年各年人均日生活用水量 and 常住人口数据，根据《城市排水工程规划规范》(GB50318-2017)，取城市污水排放系数为 0.70，从而得到各年居民每日排放的生活污水水量，2014~2017 年的结果分别为 19.50、20.43、20.17、19.25 万 m^3/d 。对比 3 座污水厂的日进水量之和，发现估算结果均在一年中污水厂日进水量的 2%~5% 分位数范围内，即每日居民生活污水排放量估算值处于污水厂日进水量的最低水平，估算结果合理。

3. 结果与讨论

3.1. 全年外来水入流入渗总量

根据 2.2 节计算方法和获取的基础数据，图 2 给出了计算得到的苏州市中心城区 2014~2017 年各年居民排放的生活污水总量、旱季外来水入渗总量、雨季入流入渗总量及其占比。从全年总量来看，2014~2017 年苏州中心城区污水管网所收集的水中，67%~73% 水量来自居民生产生活所排放的生活污水，27%~33% 水量来自入流入渗的外来水。其中旱季入渗的外来水占全年管网收集总水量的 11%~15%，雨季入流入渗的外来水占 15%~20%。

各部分外来水量的比例变化与年降雨量大小有关。2014~2016 年期间，随着降雨量逐年增加，入流入渗的外来水总量占比由 27% 增加到 33%，且主要原因是雨季入流入渗增加；2017 年降雨量减少，但入

流入渗的外来水量占比没有显著下降, 其中雨季入流入渗水量占比介于枯水年和丰水年之间, 但旱季入渗水量占比为 4 年中最高水平。由此说明丰水年的降雨情况将对污水管网的入渗产生持续影响, 2015、2016 年降雨量较大, 雨水下渗抬高了当地地下水位, 该影响持续到 2017 年, 由此加剧了旱季地下水入渗问题。

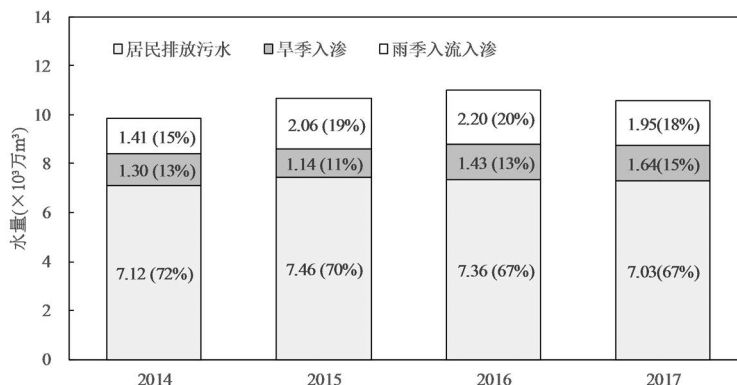


Figure 2. Flow components of the sewer system in Suzhou from 2014 to 2017
图 2. 2014~2017 年各年苏州中心城区污水管网收集水量组成

3.2. 旱雨季日均外来水入流入渗量

2014~2017 年案例区污水管网外来水量的逐日解析结果如图 3 所示。2014~2017 年, 单日入渗水量均值分别为 5.66、6.19、8.78、9.48 万 m³/d, 均超出了城东污水厂的设计能力; 单日入流入渗的外来水量最大值分别为 19.08、19.22、19.04、20.48 万 m³/d, 该数值与居民每日排放的生活污水水量相近。入流入渗给苏州中心区排水系统运行带来的压力不容忽视。外来水量最大值出现的当天或前一天均发生了强降雨, 大多数情况下对应日降雨量超过 60 mm, 表明降雨对外来水的入流入渗驱动作用明显。此外, 2017 年日均入渗量并未随着降雨量减小而降低, 再次佐证了降雨对高地下水位地区外来水入渗存在持续性的驱动作用。

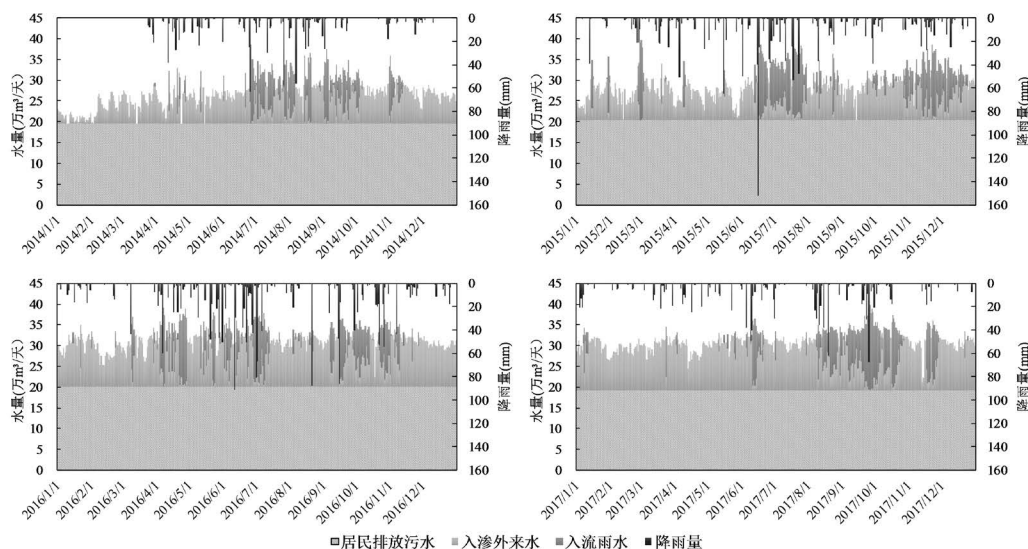


Figure 3. Daily inflow and infiltration in the sewer system in Suzhou from 2014 to 2017
图 3. 2014~2017 年苏州中心城区污水管网入流入渗逐日解析结果

根据 2014~2017 年无降雨天数和有降雨天数, 分别计算旱、雨天各部分外来水量均值和对应占比, 结果如图 4 所示。旱天污水管网收集总水量平均为 25.56 万 m^3/d , 其中入渗的外来水量约占污水系统收集总量的 22%。将该比例与其他方法应用案例中的入渗量占比进行对比, 如上海部分小区 10%~35% [12]、昆山局部区域 15%~30% [13]、深圳福田片区 25% [7], 表明苏州中心城区旱天入渗量占比的解析结果处在较合理区间。

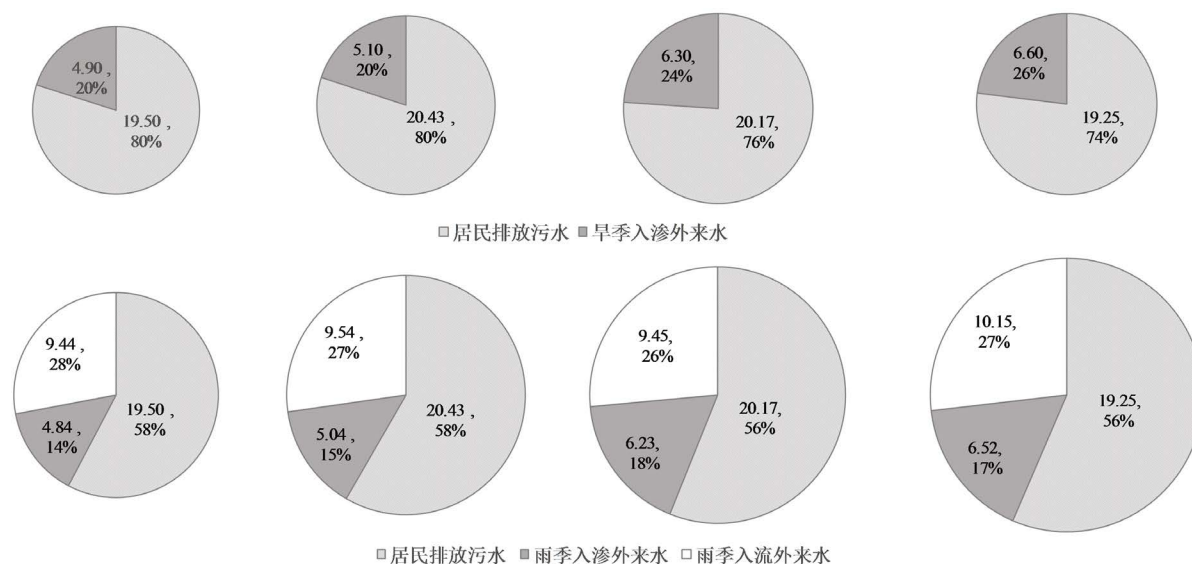


Figure 4. Average fluxes and ratios of flow components in the sewer system in Suzhou in dry days and rainy days of 2014~2017
图 4. 2014~2017 年苏州中心城区污水管网旱雨天收集水量均值(万 m^3/d)与占比

雨天污水管网收集水量平均为 35.14 万 m^3/d , 已经接近三座污水厂的总设计规模 36 万 m^3/d , 其中入渗的外来水量与旱天基本相平, 占比约为 16%, 入流的外来水量占比达到 27%左右, 外来水总量占比约 43%。以监测方法分析入流入渗在宜兴市的研究结果表明, 不同降雨情景下部分片区入流入渗量占比 13%~55% [14], 说明本研究结果具有合理性。

雨天与旱天结果相比, 入渗量基本未发生变化, 表明尽管雨天外来水入流使得管内液位升高, 但污水管外的地下水位同样受降雨影响而同步抬升, 加强了入渗效应, 管内外液位变化的综合作用使雨天入渗量与旱天相近; 雨天污水管网中新增的入流量是外来水的主要贡献, 增大了污水厂的运行压力, 表明雨污管线的混接问题值得关注。

3.3. 降雨量与雨季入流入渗的关系

从图 2、图 3 和图 4 可以看出, 不同年份的入流入渗情况不尽相同, 降雨量是重要的影响因素。分别对城东和城西两个片区在 2014 到 2017 年应用三角分析法, 可获得不同片区不同年份的雨季入流入渗量。在此基础上, 对污水管网服务范围内的雨量和雨天入流入渗水量进行回归, 可获得显著($P < 0.05$)的线性统计关系, 如图 5 所示。结果表明, 对于 100.8 km^2 的苏州中心城区, 降雨量每增加 10 mm, 即整个区域增加 100.8 万 m^3 的总雨量, 对应的雨季入流入渗量将增加 5.7 万 m^3 。如果这 10 mm 降雨集中在 1 h 发生(苏州市一年一遇的 1 h 历时降雨强度为 0.67 mm/min, 总降雨量约 40 mm), 将对中心城区总设计规模为 36 万 m^3/d 的三座污水厂造成明显的负荷冲击, 严重影响污水系统的运行操作和处理效能。国内西南某市同样获得了回归系数高达 0.97 的降雨入渗量与降雨量的关系, 表明降雨量的 6% 以入流入渗的方式进入污水管道[15]; 而利用基于电导率作为特征因子的模型方法对无锡市小、中、大三场典型降雨的入

流入渗预测结果表明, 11.6%~35.9%的降雨量进入污水管道, 并得到基于流量方法的验证[16]。

综上, 研究区虽然是分流制系统, 但由于外来水入流入渗现象突出, 地下水和雨水的汇入大大削弱了管网的污水输送能力, 也给污水厂安全稳定高效运行带来了技术难度。外来水入流入渗问题的解决依赖于系统化的工程和管理措施。针对较为严重的雨季外来水入流问题, 需要对排水管网的雨污混接问题进行排查和修正、换掉质量较次的检查井井盖等, 从根本上减少雨季入流的雨水量。此外, 针对旱雨季外来水入渗问题的工程措施应配合进行, 通过检测管网的结构条件、修复存在问题的管道接口和检查井、更换破损严重的管段, 减少入渗的外来水量, 增加管网存储空间, 降低由于雨季入流引发的冒溢风险。

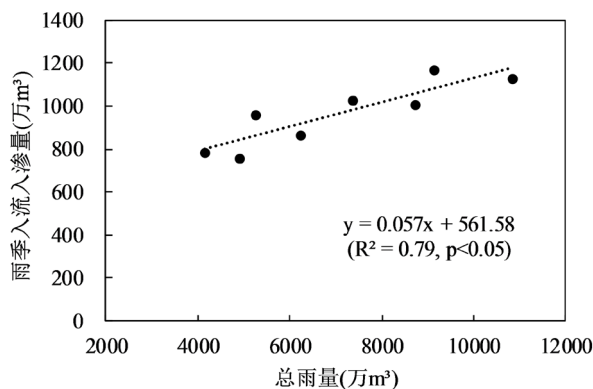


Figure 5. Rain volume vs. rain dependent inflow and infiltration
图 5. 区域总雨量与雨季入流入渗量关系示意图

4. 结论

利用三角分析法对苏州中心城区污水管网收集的水进行逐日解析, 发现当地污水管网的入流入渗问题较为突出, 2014~2017 年, 全年外来水总量占管网收集总水量的 30%左右, 旱、雨天外来水量占比分别达到 22%、43%, 合理性得到已有研究结果的验证, 说明降雨对外来水的入流入渗驱动作用明显。该区域降雨量与雨季入流入渗量的关系与已有监测方法或模型方法开展的城市污水管网入流入渗研究结果基本一致, 可以初步预测苏州市中心城区未来年份的雨季对污水厂运行增加的负荷。三角分析法在案例区的应用结果表明, 该方法能够定量评估服务范围较大的污水管网中外来水量和污水厂进水在雨天所受的冲击大小, 从而在一定程度上解释污水管网系统运行效能低下的原因。类似地, 可将三角分析法推广至其他平原河网地区, 为排水管网入流入渗问题的解决提供决策支撑, 促进排水管网输送能力的提升和污水厂的稳定运行。

基金项目

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07205001)。

参考文献

- [1] U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (2014) Guide for Estimating Infiltration and Inflow. EPA, Washington DC.
- [2] Federation of Canadian Municipalities and National Research Council (2003) Infiltration & Inflow Control-Reduction for Wastewater Collection Systems.
- [3] Karpf, C. and Krebs, P. (2011) Quantification of Groundwater Infiltration and Surface Water Inflows in Urban Sewer Networks Based on a Multiple Model Approach. *Water Research*, **45**, 3129-3136.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.03.022>

- [4] Long Megan, E. (2017) Quantifying and Modeling Surface Inflow and Groundwater Infiltration into Sanitary Sewers in Southern Pinellas County, FL. University of South Florida, Tampa.
- [5] 李田, 张善发, 时珍宝. 上海市排水管道的地下水渗入量测评[J]. 中国给水排水, 2003, 19(7): 12-15.
- [6] 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): 593-599.
- [7] 刘旭辉, 张金松, Goulven, I. 深圳市排水系统地下水渗入量初步研究[J]. 中国给水排水, 2013, 29(3): 77-79.
- [8] Kracht, O., Gresch, M. and Gujer, W. (2007) A Stable Isotope Approach for the Quantification of Sewer Infiltration. *Environmental Science & Technology*, **41**, 5839-5845. <https://doi.org/10.1021/es062960c>
- [9] Weiss, G., Brombach, H. and Haller, B. (2002) Infiltration and Inflow in Combined Sewer Systems: Long-Term Analysis. *Water Science and Technology*, **45**, 11. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0112>
- [10] 静贺. 排水管网水量水质变化特性及其运行优化策略的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2010.
- [11] De Benedittis, J. and Bertrankrajewski, J.L. (2005) Infiltration in Sewer Systems: Comparison of Measurement Methods. *Water Science and Technology*, **52**, 219-227. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0079>
- [12] 王梦江, 周骅, 陈华. 上海城市排水系统地下水渗入量现状及对策[J]. 上海水务, 2003(3): 15-18.
- [13] 彭杰, 章涛. 昆山铁南片区污水管网地下水入渗情况调查[J]. 净水技术, 2014, 33(5): 96-99.
- [14] 毛建军, 毛楠, 王浩正, 等. 宜兴市污水管网在线流量监测分析[J]. 给水排水, 2012(S2): 210-212.
- [15] 盛政, 刘旭军, 王浩正, 等. 城市污水管道入流渗入监测技术研究与应用进展[J]. 环境工程, 2013, 31(2): 17-21.
- [16] Zhang, M., Liu, Y., Cheng, X., *et al.* (2018) Quantifying Rainfall-Derived Inflow and Infiltration in Sanitary Sewer Systems Based on Conductivity Monitoring. *Journal of Hydrology*, **558**, 174-183. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.002>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2332-8010, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: wpt@hanspub.org