

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.05.011

污水管网外水流量与入流位置的模型估算

黄棚兰¹, 庞晶津¹, 陈茗¹, 陈仪¹, 王新端², 吴军²

(1. 扬州市政管网有限公司, 江苏扬州 225000; 2. 扬州大学环境科学与工程学院,
江苏扬州 225009)

摘要: 外水流量的估计和入流点查找是污水管网运行的难题。基于此,首先应用污水管网综合模型,建立了区域内生活和工业用水量、泵站液位、泵站流量和外水流量之间的动态平衡关系,以估计外水流量;再应用污水管网机理模型,在不同外水入侵点假设条件下,计算管网水力状态,并与实际污水管网运行水力状态进行对比,估计污水管网外水入流点的位置。用此方法对某区域进行外水查找,并封堵外水源头后,该区域旱季污水平均流量从 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 降低到与实际用水量相当的 $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右,COD平均浓度从92.4 mg/L提升至290.2 mg/L。其他污染指标如氨氮、TN、TP、SS和VSS等,均获得了3倍以上的提升;污水管网从高液位运行的满管流转变为低液位运行的非满管流。该基于污水管网模型的外水流量和入流位置的估计方法,有助于促进污水管网运行质态的提升和提质增效。

关键词: 污水管网; 外水流量; 入流位置; 模型; SWMM; 泵站

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)05-0074-06

Model Estimation of External Water Flow and Inflow Location in Sewage Pipe Network

HUANG Peng-lan¹, PANG Jing-jin¹, CHEN Ming¹, CHEN Yi¹, WANG Xin-duan²,
WU Jun²

(1. Yangzhou Municipal Pipe Network Co. Ltd., Yangzhou 225000, China; 2. School of
Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The estimation of external water flow and location of inflow point is a difficult problem in sewage pipe network operation. Firstly, the dynamic equilibrium among domestic and industrial water consumption, pump station water level, pump station flow and external water flow was established by using the sewage pipe network comprehensive model, so as to estimate the external water flow. Then, the sewage pipe network mechanism model was applied to calculate the hydraulic state of the pipe network under the assumption of different external water intrusion points, and the operating hydraulic state of the actual sewage pipe network was compared to obtain the estimated location of the external water intrusion point in the sewage pipe network. The method was applied to search the external water in an area. After plugging the source of external water, the sewage flow in this area decreased from the average flow of $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ in dry season to approximately $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ which was equivalent to the actual water consumption, and the average COD increased from 92.4 mg/L to 290.2 mg/L. Other pollution indicators, such as ammonia

通信作者: 吴军 E-mail: j.wu@yzu.edu.cn

nitrogen, TN, TP, SS and VSS, were all increased by more than three times. The sewage pipe network was changed from full pipe flow with high water level to non-full pipe flow with low water level. The method for estimating external water flow and inflow location based on sewage pipe network model is helpful to improve the operational quality of sewage pipe network and improve the quality and efficiency of sewage treatment.

Key words: sewage pipe network; external water flow; inflow location; model; SWMM; pump station

污水管网外水入侵是导致其运行效率降低的主要原因之一。大量外水进入污水管网,导致管道运输污水的空间被挤占,降低管网对实际污水的收集能力,使管网长期保持高水位运行状态,雨季时容易造成污水外溢,危害水环境,污水管网的高水位运行也会导致排水户排水困难,严重时甚至产生污水倒流入户;同时还增加了进入污水处理厂的污水量,导致污水处理成本上升;另外,外水入侵也会导致污水浓度降低,从而使污水处理厂运行效率难以提升。

进入污水管网的外水主要包括河水、地下水和雨水等^[1-2]。部分城市在雨污水管道建设过程中,存在雨水和污水管道错接、混接的情况。当河水水位较高时,河水会通过雨水排放口进入雨水管道,再通过雨污错接管道进入污水管道^[3]。查找外水入流点、减少外水进入污水管网,是提高污水管网运行效率的主要手段之一。在查找外水入流点之前,需要对进入污水管网的外水流量进行精确估计,而目前又缺乏相关的技术手段对区域范围内的外水流量进行准确估计^[4]。

在污水管网干管安装流量计,可以获得区域内的污水总流量。但是仅通过污水流量和区域用水量,仍然难以获得外水流量。这是因为流量计获得的污水流量会受到泵站运行工况的影响,泵站的抽水量也会影响污水管网的液位高程,从而改变河水和管网的液位差,改变外水流量。由于外水流量、泵站运行工况、用水量、管网液位和河道液位之间相互关联,仅依靠获得的污水流量和用水量之差来精确估计管网的外水流量比较困难^[5]。笔者通过简化污水管网综合模型,对进入污水管网的河水入流量进行精确估计,再通过管网模型定位入流点,旨在为污水管网的高效运维提供参考。

1 材料和方法

1.1 实验方法

以扬州市国家高新技术开发区宏溪路污水提升泵站服务区域为例,说明如何利用污水管网模型对该区域的外水流量进行估计和对入流点进行定位。该泵站服务区域面积约为600 hm²,服务人口约为2.5万人,分布在24个小区和庄台。该区域小区和庄台的用水量调查结果表明,人均生活用水量为140 L/d,区域内居民生活用水量为3 500 m³/d。除居民小区和庄台外,该区域另有31家用水量较大的企事业单位和商场综合体,平均用水量为1 500 m³/d。该区域总用水量约为5 000 m³/d,排水体制为分流制。

在污水进入宏溪路提升泵站前干管上最后一个污水检查井内安装流量计,该流量计能够同步测量检查井液位和管道污水流量。为验证区域管网外水流量减少前后污水浓度的变化,在泵站集水池安装在线多参数水质分析仪,可以同步测定COD和SS浓度。

1.2 模型方法

本研究使用的污水管网模型有两种:一种是由于外水流量估计的综合模型,其不考虑具体的污水管网拓扑结构,而是通过泵站运行工况、液位和用水量变化等来确定区域内外水流量;另一种是确定外水入侵位置的管网机理模型,该模型通过管网布置、管底高程、用户位置、用水量等来建立较为详细的管网模型,以确定外水入侵的位置。

1.2.1 外水流量估计综合模型

在外水流量估计综合模型中,当泵站抽水量、外水进入量和用户用水量处于平衡状态时,泵站流量($Q_{\text{泵站}}$)可以用式(1)表示。

$$Q_{\text{泵站}} = Q_{\text{外水}} + Q_{\text{居民}} + Q_{\text{企事业}} \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{外水}}$ 、 $Q_{\text{居民}}$ 和 $Q_{\text{企事业}}$ 分别为区域外水流量、

居民用水量和企事业单位用水量, m^3/d 。

在实际泵站运行过程中, 泵站抽水量、外水流量和用户用水量之间通常不是平衡状态, 而是动态变化的, 从而导致泵站前集水池和管网内液位高程的动态变化。泵前水深($h_{\text{泵前}}$)的变化可以用式(2)表示。

$$\frac{dh_{\text{泵前}}}{dt} = \frac{1}{A} (Q_{\text{外水}} + Q_{\text{居民}} + Q_{\text{企事业单位}} - Q_{\text{泵站}}) \quad (2)$$

式中: A 为模型参数, m^2 。

A 用于控制由于用水量、外水流量和泵站抽水量变化导致的泵前水深变化程度。污水管网综合模型中, 通常把管网简化为不同截面积的容器^[6], 此处的 A 并不是物理意义上的面积, 而是作为调节泵前水深随外水流量、居民用水流量、企事业单位用水流量和泵站抽水量变化的模型参数。

本研究主要分析晴天时污水管网外水入流情况, 因此所述的外水不包括雨水。另外, 本区域外水的主要来源为河水入流, 地下水入渗并不是外水的主要来源。外水流量($Q_{\text{外水}}$)可以用式(3)进行模拟^[7-8]。

$$Q_{\text{外水}} = K_{\text{inf}} \sqrt{h_{\text{河道}} - h_{\text{泵前}}} \quad (3)$$

式中: K_{inf} 为模型参数, $\text{m}^{2.5}/\text{d}$; $h_{\text{河道}}$ 为区域内有可能产生入流的河道液位高程, m 。

实际应用过程中, 通常难以确定哪一条河道为污水管网的入流河道, 可以首先尝试选择在上游污水管网、靠近主要河道, 并且液位高程较高的检查井安装液位传感器, 测定外水进入的液位高程。河道和水泵集水池的液位差是导致河水入流的主要动力, 通过 K_{inf} 模型参数将液位差转化为外水流量。

1.2.2 外水入流定位模型

要确定外水入流位置, 需要分析区域的管网拓扑结构, 在管网管理部门前期工作中, 调查污水管网, 包括管点(检查井)的位置, 管线的长度、管径、管底高程和管井的深度等。图1为服务区域污水管点和管线在GIS系统内的布置。整个宏溪路提升泵站服务区域被分为7个子分区, 区域内55个主要用水户按照其地理位置被分配到相应的子分区内。根据管网测绘资料和现场调查, 将污水管网简化为9个管点和8根管线。管点的深度、管底高程、管段长度、坡度、管径和管材等信息根据测绘资料确定, 子分区内的用水户排水排入相应管点。区域的子分区划分、用水户、管点和管线信息导入等在GIS操

作软件内完成, 之后导入污水管网模拟软件EPA SWMM5.0进行模拟。本研究取得的用水户数据为日平均用水数据, 为获得用水动态变化数据, 选取典型小区内5家用水户, 测定其24 h动态用水情况。



图1 服务区域污水管点和管线在GIS系统中的布置

Fig.1 Layout of sewage pipe points and pipelines in GIS system in service area

2 结果与讨论

2.1 外水流量的确定

在宏溪路污水泵站前污水管道检查井进行流量和液位监测后, 一周内的流量和泵前水深监测数据如图2所示。

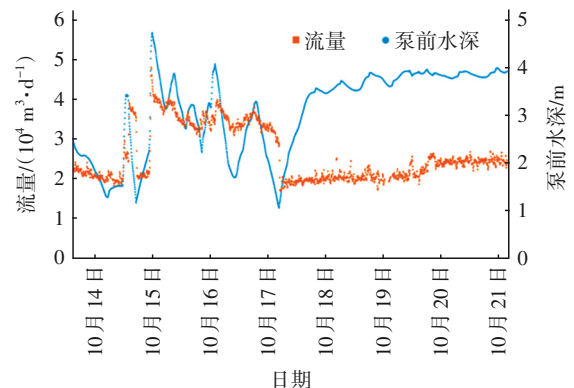


图2 泵站流量和泵前水深监测结果

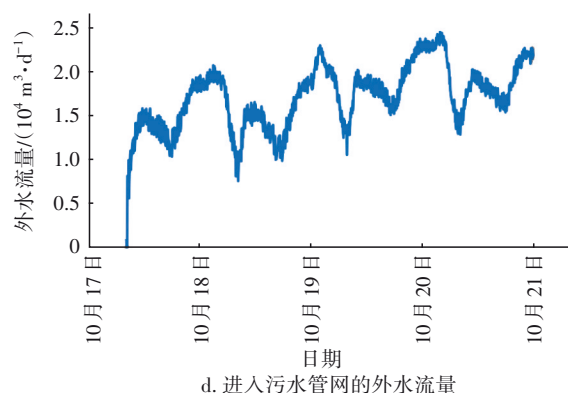
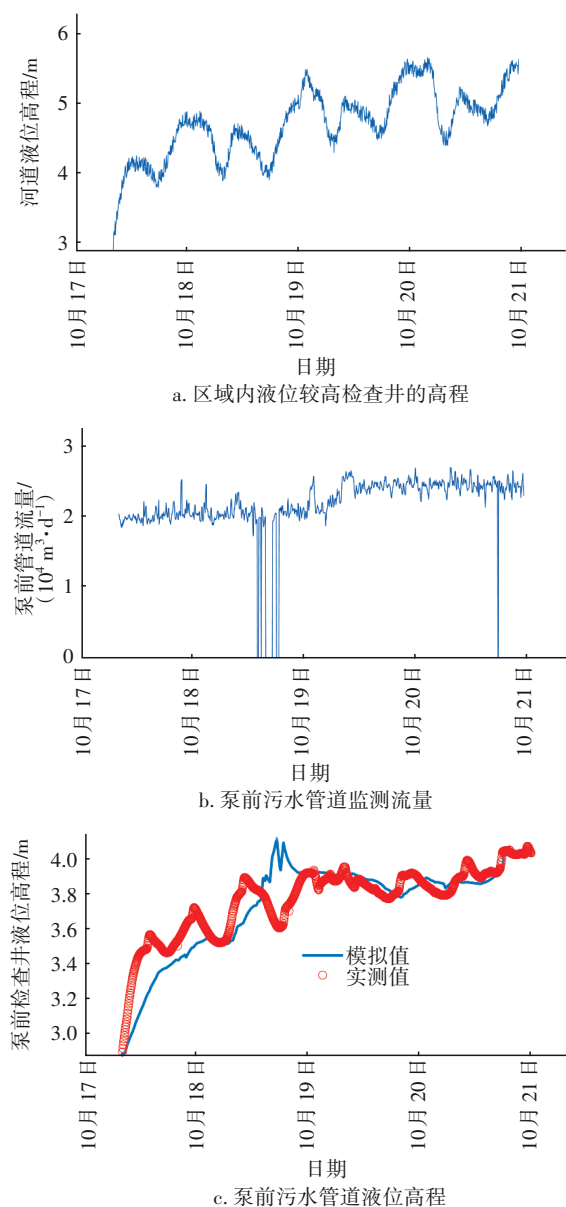
Fig.2 Monitoring results of flow rate and water depth in front of pumping station

2021年10月14日—16日, 因降雨导致大量雨水进入污水管网, 监测到的污水管网流量为 $1.85 \times$

$10^4 \sim 4.75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 泵前检查井液位在 $1.05 \sim 4.75 \text{ m}$; 10月17日降雨停止后, 在维持污水泵站抽水量为 $1.75 \times 10^4 \sim 2.75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的条件下, 泵前水深仍维持在 $3.5 \sim 4.0 \text{ m}$ 的高液位运行。

同该区域的用水量(约为 $5000 \text{ m}^3/\text{d}$)相比, 晴天污水管网监测流量为 $1.75 \times 10^4 \sim 2.75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 说明有较大规模的外水进入污水管网。泵前污水管道监测获得的流量会受到泵站运行工况的影响, 因此不能通过污水管道监测获得的流量和用水量的差值来估算外水流量。

选取晴天观测的泵前水深和流量, 分析进入污水管网的外水流量情况, 结果见图3。



d. 进入污水管网的外水流量

图3 进入污水管网的外水流量情况

Fig.3 Flow of external water into sewage pipe network

以区域液位高程较高检查井的数据作为外水入流的液位高程($h_{\text{河道}}$)。图3(b)反映了该时段的泵前流量, 即泵站抽水量 $Q_{\text{泵站}}$, 利用式(2)和式(3), 输入 $Q_{\text{泵站}}$ 和 $h_{\text{河道}}$, 调节模型参数 K_{inf} 和 A 来获得模型预测和实测泵前水深($h_{\text{泵前}}$)之间的吻合度; 获得模型参数值 K_{inf} ($17987.5 \text{ m}^2/\text{d}$) 和 A (2101.3 m^2) 后, 应用式(3)计算外水流量, 外水流量的变化曲线与用户用水日变化曲线类似, 呈现明显的日变化规律。图3(c)中模型的模拟值和实测值较为吻合, 但是并不能完全重合, 特别是在模拟的起始阶段(10月17日—19日), 实测值要稍高于模拟值, 可能是因为降雨结束后, 雨水径流储存于地下水中, 导致地下水入渗进入管网的量较高, 而该模型主要考虑晴天河水入流导致的外水, 致使模型计算液位高程低于实测值。

应用外水流量、用水量和泵站抽水量, 以及管网液位的动态关系建立的污水量动态模型, 可较为准确地估计管网外水流量。与应用泵站抽水量和用水量差值估计外水流量相比^[4], 所提出的方法具有如下优势: ①可以得到外水流量的动态变化, 为深入分析外水规律提供更多数据支撑; ②可以避免泵站运行工况对外水流量估计的干扰, 图3(b)中10月18日—19日有部分时段泵站停止运行(泵站抽水量为0), 但是仍然可以计算出该时段外水流量。

2.2 外水入流位置的确定

为获得外水入流的位置, 首先模拟无外水入侵条件下, 该区域污水管网的流态。根据区域内主要用水户分布和用水量, 计算污水管网的流态。图4反映了用水波峰时段管道中污水的流态, 可见在

无外水入侵条件下,污水管道均为非满管流。

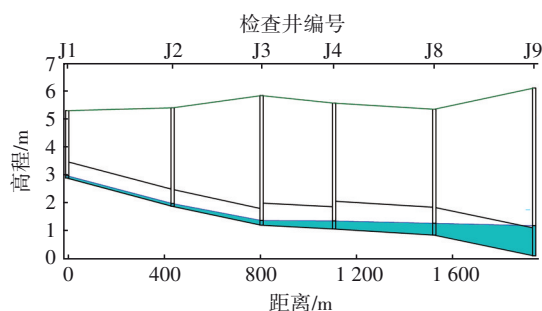


图4 无外水入侵条件下管网中污水流态的模拟结果

Fig.4 Simulation results of sewage flow in pipe network without external water intrusion

无外水入侵条件下,宏溪路提升泵站泵前水深和污水流量的变化如图5所示。水泵的额定功率较高,在维持泵前水深为0.50~1.25 m的条件下,水泵每日约有8~12 h为停机状态,并且污水管网可以维持在低液位运行。

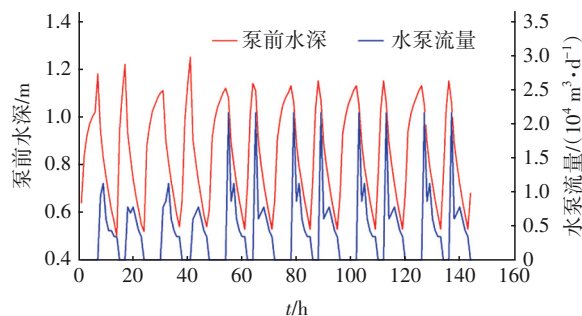


图5 无外水入侵条件下泵前水深和污水流量模拟结果

Fig.5 Simulation results of water depth in front of pumping station and sewage flow without external water intrusion

根据外水流量的计算结果,在晴天宏溪路泵站正常运行情况下,进入区域污水管网的外水流量在 $0 \sim 2.45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 之间。根据前期管网探测情况,该区域管网完整性较好,暂不考虑外水由多点进入污水管网,首先考虑外水是从某个位置集中进入污水管网的。选取液位高程较高的J1检查井(见图1)作为外水入流点,按照外水流量为 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 模拟管网运行情况,若模拟结果和实际情况偏差较大,再更换外水入流点,重新进行模拟。

外水入侵条件下,晴天宏溪路泵站服务区域管网中污水流态的模拟结果如图6所示。在外水流量为 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 条件下,即使是晴天,并且泵站流量为 $0.22 \text{ m}^3/\text{s}$ ($1.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),远超用水量 $5000 \text{ m}^3/\text{d}$

的情况下,污水管网仍为满管流,与宏溪路泵站服务区域污水管网现状相符。

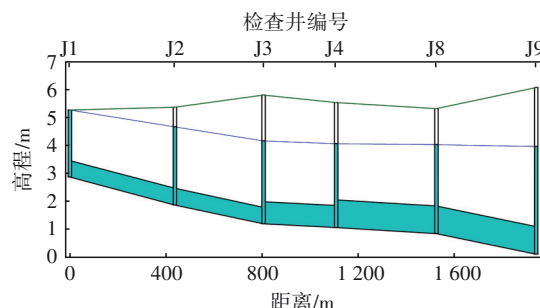


图6 外水入侵条件下管网中污水流态的模拟结果

Fig.6 Simulation results of sewage flow in pipe network with external water intrusion

外水入侵条件下,晴天宏溪路泵站泵前水深和污水流量的模拟结果如图7所示。可知,泵前平均水深维持在4 m左右,泵站平均流量约为 $0.22 \text{ m}^3/\text{s}$ ($1.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),与实际情况相符。分析检查井中污水水质发现,J1检查井内氨氮浓度仅为 5.0 mg/L 左右,可以初步判断J1检查井是主要的外水入流点。

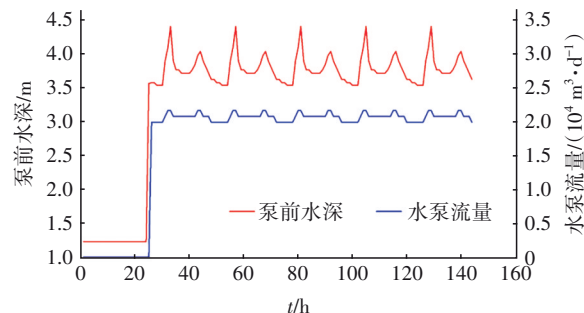


图7 外水入侵条件下泵前水深和污水流量的模拟结果

Fig.7 Simulation results of water depth in front of pumping station and sewage flow with external water intrusion

2.3 外水封堵后管网中污水流量和浓度的变化

通过对J1检查井附近污水和雨水管网详细调查后发现,J1污水检查井有雨水干管接入,雨水管连接附近雨水排口,雨水排口淹没于河道液位以下,河道液位高于J1检查井底部高程,导致河水入流至J1检查井,进入污水管网。2021年10月21日,在对雨水和污水错接点采用气囊封闭后,污水泵站流量和泵前水深立刻下降(见图8)。10月23日,错接点封闭气囊松动后,河水再次进入污水管道,导致泵站流量和泵前水深重新上升。10月28日,重新封闭气囊后,泵站流量和液位再次回落。实测的雨

水污水错接点封闭后的泵站流量和液位数据与图5中无外水入侵条件下污水管网运行模拟结果相符。表明J1污水和雨水错接点是该区域唯一主要外水入流点,封闭该错接点后,可以获得基本无外水入侵条件下的污水管网运行质态。

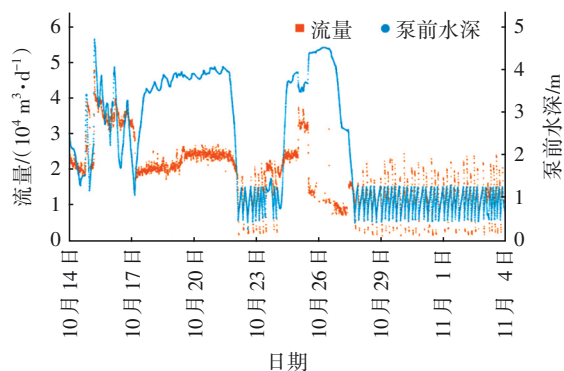


图8 外水入流点封堵前后污水泵站流量和泵前水深变化

Fig.8 Change of sewage flow of pumping station and water depth in front of pumping station before and after plugging of external water inflow point

外水封堵后,污水量和污水浓度都有较大的变化。外水封堵前,该区域晴天日累计流量约为 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;外水封堵后,日累积流量为 $0.5 \times 10^4 \sim 0.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,与用水量相当,表明外水被挤出污水管网系统。宏溪路泵站服务区域污水浓度也得到大幅度提升,外水封堵前,COD和SS浓度的平均值分别为92.4和30.1 mg/L;外水封堵后,COD和SS浓度的平均值分别提高至290.2和105.3 mg/L。另外,泵站集水井的污水样品检测结果表明,其他污染物浓度指标,如氨氮、TN、TP、和VSS等,在外水封堵后,均获得了3倍以上的提升,分别达到51.0、55.2、3.2和135.0 mg/L。

3 结论

成功开发并验证了一种基于污水管网模型的外水流量和入流点估计方法。在找到外水来源并封堵后,区域内旱季污水平均流量从 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 降低至与实际用水量相当的 $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右,污水COD平均浓度从92.4 mg/L提高至290.2 mg/L,其他污染物指标,如氨氮、TN、TP、SS和VSS等,均获得了3倍以上的提升。污水管网从高液位运行的满管流改变为低液位运行的非满管流,污水管网运行质态得到较大提升。

参考文献:

- [1] BROADHEAD A T, HORN R, LERNER D N. Captured streams and springs in combined sewers: a review of the evidence, consequences and opportunities [J]. *Water Research*, 2013, 47(13): 4752-4766.
- [2] DIRCKX G, VAN DAELE S, HELLINCK N. Groundwater infiltration potential (GWIP) as an aid to determining the cause of dilution of wastewater [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 542: 474-486.
- [3] BONNEAU J, FLETCHER T D, COSTELLOE J F, *et al.* Stormwater infiltration and the 'urban karst'—a review [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 141-150.
- [4] 马翠香,王荣昌,曾旭,等.平原河网地区污水管网外来水量衡算分析[J]. *净水技术*, 2020, 39(6): 61-66.
MA Cuixiang, WANG Rongchang, ZENG Xu, *et al.* Calculation and analysis of external water quantity of sewage pipe networks in plain river network areas [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(6): 61-66(in Chinese).
- [5] GUO S, SHI X, LUO X, *et al.* River water intrusion as a source of inflow into the sanitary sewer system [J]. *Water Science and Technology*, 2020, 82(11): 2472-2481.
- [6] GUO L S, TIK S, LEDERGERBER J M, *et al.* Conceptualizing the sewage collection system for integrated sewer-WWTP modelling and optimization [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 710-716.
- [7] SAAGI R, FLORES-ALSINA X, FU G, *et al.* Catchment & sewer network simulation model to benchmark control strategies within urban wastewater systems [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 78: 16-30.
- [8] KARP F 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.

作者简介:黄棚兰(1976-),女,江苏扬州人,本科,高级工程师,主要从事排水管网设施的运营和管理工作。

E-mail:huangpenglan@yzckjt.com

收稿日期:2022-03-06

修回日期:2022-05-03

(编辑:任莹莹)