

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.17.005

基于水量分析和节点监测的城镇污水管网评估诊断

刘战广, 谭学军, 陈 嫣

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘 要: 基于现场排查、水量分析、节点监测等方法对某污水泵站所属的排水系统进行初步诊断,并通过溯源分析缩小问题管段范围,进而提出有针对性的解决方案。泵站的雨天流量达到旱天流量的 2.4 倍,表明泵站上游的排水系统存在较严重的雨污混接现象;泵站的旱天水质浓度显著低于生活污水,大部分时段瞬时样 COD 在 110~140 mg/L 之间,混合样 COD 和 BOD₅ 分别为 165、81.6 mg/L,表明泵站的上游管网存在旱天外水入流现象;管网节点的雨天水质浓度均有不同程度的下降,其中两条支管的雨天总氮浓度较旱天分别下降了 78% 和 60%,通过溯源分析进一步评估不同支线对泵站水质浓度降低的贡献率,缩小雨污混接管段范围。该方法可为我国污水管网系统的提质增效工作提供参考。

关键词: 排水系统; 提质增效; 水量分析; 节点监测; 溯源分析

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)17-0032-06

Evaluation and Diagnosis of Urban Sewage Pipe Network Based on Water Flow Analysis and Node Monitoring

LIU Zhan-guang, TAN Xue-jun, CHEN Yan

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The preliminary diagnosis of a drainage system of a sewage pump station was carried out based on on-site inspection, water flow analysis, node monitoring and other methods. Through tracing analysis, the scope of the problem pipe section was narrowed, and then the targeted solution was proposed. The rainwater flow rate of the pumping station reached 2.4 times that of the dry weather, indicating that there was a serious misconnection of rainwater and sewage pipes in the upstream drainage system of the pumping station. The water quality of the pumping station was significantly lower than that of the domestic sewage in the dry weather. The COD of the instantaneous samples were between 110 mg/L and 140 mg/L most of the time, and the COD and BOD₅ of the mixed samples were 165 mg/L and 81.6 mg/L, respectively, indicating that there was an inflow of external water in the upstream pipe network of the pumping station in dry weather. The water quality of the pipe network nodes decreased in different degrees in rainy days, and the total nitrogen of the two branch pipes decreased by 78% and 60%, respectively. The contribution rate of different branch pipes to the pollutant concentration reduction in the sewage pump station was further evaluated through tracing analysis, and the scope of misconnection of rainwater and sewage pipes was narrowed. The method can provide reference for improving the quality

基金项目: 上海市青年科技启明星计划项目(18QB1403600)

and efficiency of sewage pipe network systems in China.

Key words: sewage drainage system; quality and efficiency improvement; water flow analysis; node monitoring; tracing analysis

近年来我国城镇排水管网建设快速增长,截至2018年底,全国城市排水管道总长度达到 68.35×10^4 km,自2000年以来年均增长约9.2%^[1]。与此同时,我国城市排水管网建设和运行管理长期落后,城市浅层地下水位相对较高的地区,地下水、倒灌河水等外来水通过排水口、管道和检查井的各种结构性缺陷进入埋设在地下水位以下的排水管道中^[2-3],加之雨污混接、错接和污水直排,削弱了“控源截污”措施应有的作用,也造成污水处理厂进水浓度偏低,成为制约污水管网系统提质增效、黑臭水体整治工作的瓶颈,导致城市排水系统应有的排水和治污功能不能充分发挥。因此,亟需通过建设和完善排水管道、强化排水设施管理等措施,提升污水收集处理效能。

排水管道修复和改造的前提是对排水管网进行有效的评估诊断^[4-6]。目前常用的诊断方法主要有运行数据监测、排水管网检测等,前者需要进行水量、水质等运行数据的分析测定^[7-8],后者包括管道闭路电视检测(CCTV)、潜望镜检测(QV)以及声呐检测等^[3,5]。然而,城市排水管网庞大复杂,全面开展数据监测和管网检测不仅费用很高,而且费时费力。因此,有必要在存量管网梳理分析和污水厂站水量分析的基础上,通过管网节点调查分析等方法,分区域进行连续监测分析,逐步缩小问题管段范围,在流量或水质存在突变或差异的区域开展CCTV检测,不仅可以提升管网排查效率,也能大大节约检测成本。笔者基于水量分析和节点监测方法对某城市污水系统进行定性诊断研究,以期为国内其他排水系统的系统排查和评估提供借鉴。

1 研究方法

1.1 系统概况

选取南方某城市污水输送干线的支线接入泵站X为研究对象,该泵站服务面积约2.2 km²,服务范围内以居民小区为主,仅在北部沿河存在少量生产企业。该区域排水体制为分流制,区域内已建1个自排式雨水排水系统。污水泵站X配备3台离心泵,2用1备,单台泵的功率为55 kW,铭牌流量为0.253 m³/s,设计输送能力为0.506 m³/s。如图1

所示,该泵站服务范围内主要市政道路均铺设污水支管,管径包括DN300、DN400和DN800。泵站X上游接有污水泵站Y。

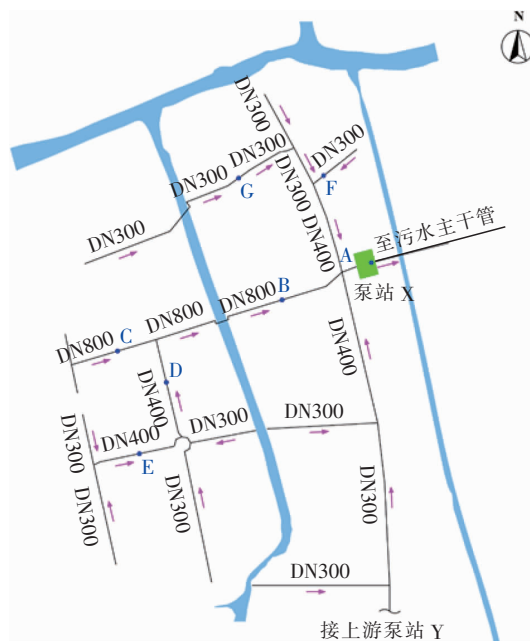


图1 污水管网及监测节点示意

Fig.1 Schematic diagram of the sewage pipe network and monitoring nodes

1.2 水量分析

城镇污水管网定性诊断可采用现场排查、资料调研和水量分析的方法。根据资料收集情况,水量分析方法包括理论排水量与监测流量的比较、污水厂站旱天与雨天水量的比较等。本研究根据污水泵站X在2012年—2014年的实际运行数据,通过雨天流量与旱天流量的对比分析进行初步诊断。

1.3 节点布置

本研究按照以下原则布设监测节点:①监测点位置涵盖排水管网系统的上游易冒溢点、中游重要汇水节点、下游排水口;②长距离输送管道的相邻监测点间隔不小于500 m;③支管接入流量较大,或支管接入流量与污水主干管输送流量之比较大的检查井设置监测点;④大管径管道交汇处设置监测点;⑤泵站前设置监测点。

如图1所示,根据泵站X的污水管线系统图,

结合现场勘查,共确定 A、B、C、D、E、F、G 等 7 个监测节点。其中,污水泵站监测节点 1 个, DN800 污水干管监测节点 2 个, DN300 和 DN400 污水支管监测节点 4 个。所有节点检查井均在机动车道内,因此实际监测节点一般设置在交汇井上游支线管段,其中接上游泵站 Y 污水支管所在道路为双向 6 车道主干道,交通繁忙,采样困难,因此该支管未设置监测节点。

1.4 监测方法

节点调查一般包括流量测量和水质检测,由于现场不具备流量计安装条件,本研究仅进行现场采样和水质检测。

采样时间:雨天、旱天各一次,其中旱天采样日前 7 d 应无降雨,雨天监测日的降雨应达到中雨以上水平,即 24 h 降雨量不小于 10 mm。

采样频率:采样日 09:00—23:00 每 2 h 采集一次污水样品,用水量少的时段及交通繁忙的道路节点检查井可适当降低采样频率。

监测指标:节点的单次采样量为 1 000 mL,其中 500 mL 作为瞬时样,检测 COD、TN 指标;其余 500 mL 用于节点日均混合样,检测 COD、BOD₅、NH₃-N、TN、TP、SS、电导率指标。

2 基于水量分析的初步判定

根据运行管理单位提供的历史运行数据,2012 年—2014 年泵站 X 的运行水量如图 2 所示,图中横线表示当年的平均日运行水量。

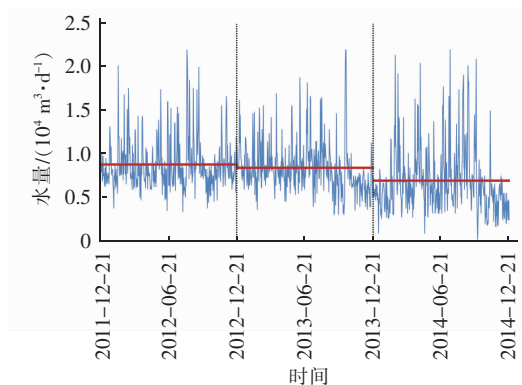


图2 泵站 X 在 2012 年—2014 年的运行水量

Fig.2 Sewage flow of pump station X during 2012 to 2014

2012 年—2014 年的平均水量分别为 $(8\,745 \pm 2\,905)$ 、 $(8\,370 \pm 2\,965)$ 、 $(6\,914 \pm 3\,834)$ m^3/d 。2012 年和 2013 年的运行情况较为接近,2014 年的水量波动范围变大,平均水量较 2012 年和 2013 年

分别下降了 20.9% 和 17.4%。此外,从图 2 可以看出,泵站的日运行水量具有一定的季节性变化规律,一般当年 9 月—次年 2 月的运行水量较低,汛期水量较高,但波动范围较大。

将连续 7 d 无降雨日的流量作为旱天流量,每年 6 月 1 日—9 月 30 日的流量作为汛期流量,进一步分析泵站旱天和汛期的运行水量,结果如表 1 所示。2014 年的旱天流量较 2012 年和 2013 年分别下降了 2 130、2 290 m^3/d ,但 2012 年—2014 年的汛期流量差异不大,因此旱天流量显著下降可能是导致 2014 年平均水量下降的主要因素。同时,泵站 X 的旱天流量和汛期流量差异较大,2012 年—2014 年泵站 X 的汛期流量较早天流量分别增加了 28%、19% 和 67%,表明泵站 X 上游的排水系统可能存在较为严重的雨污混接现象,需要采用管网节点分析方法进一步诊断分析。

表1 泵站 X 旱天和汛期的运行水量比较

Tab.1 Comparison of sewage flow of pump station X between dry weather and wet weather

项目		平均日流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	流量差 值/%	平均秒流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	最大日流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
2012 年	旱天	7 159		0.083	11 081
	汛期	9 166	28		
	全年	8 745	22	0.101	21 859
2013 年	旱天	7 319		0.085	13 358
	汛期	8 720	19		
	全年	8 370	14	0.097	21 859
2014 年	旱天	5 029		0.058	10 019
	汛期	8 409	67	0.097	
	全年	6 914	37	0.080	21 859

注:“—”为汛期日均流量、全年日均流量与旱天日均流量的差值百分比。

3 基于节点监测的评估诊断

3.1 监测时间

2018 年 11 月 29 日和 12 月 11 日分别进行了旱天和雨天采样,其中 11 月 29 日之前 7 d 以上无降雨。根据泵站的雨量监测数据,该区域 12 月 11 日上午 8 点之前约 16 h 内有 14.9 mm 降雨,采样当天有零星小雨。

3.2 水量分析

根据运行管理单位提供的数据,2018 年 11 月 29 日和 12 月 11 日污水泵站 X 的输送水量分别为 6 831、16 470.3 m^3 ,雨天流量达到旱天流量的 2.4

倍,表明污水泵站X上游的排水管网系统可能存在较为严重的雨污混接现象,这与前文历史运行数据的分析结果相符。泵站X上游管网接有泵站Y,11月29日和12月11日泵站Y的流量分别为2 160、6 960 m³,分别占泵站X当天流量的32%和42%。因此,泵站Y上游的排水管网系统也存在较严重的雨污混接现象,其雨天增加流量约占泵站X雨天增加流量的50%。

3.3 水质分析

3.3.1 节点水质

节点A、B、E、F在旱天和雨天采样时段内瞬时样COD和TN浓度的变化情况如图3所示。节点B、E的旱天水质与生活污水水质接近,节点B的旱天COD和TN平均值分别为(299 ± 72)、(64.7 ± 12.3) mg/L,高峰出现在17:00—23:00;节点E的旱天COD和TN平均值分别为(322 ± 62)、(56.7 ± 14.3) mg/L,最大值出现在21:00。节点F所在区域有少量的生产企业,其旱天水质浓度显著偏高,19:00—23:00的COD平均值达到了(3 630 ± 987) mg/L。节点A所代表的泵站X大部分时段的水质浓度显著低于生活污水,13:00—23:00的6个瞬时样COD均在110 ~ 140 mg/L之间,仅11:00的瞬时样COD超过200 mg/L,表明泵站X的上游管网存在旱天外水入流的现象。

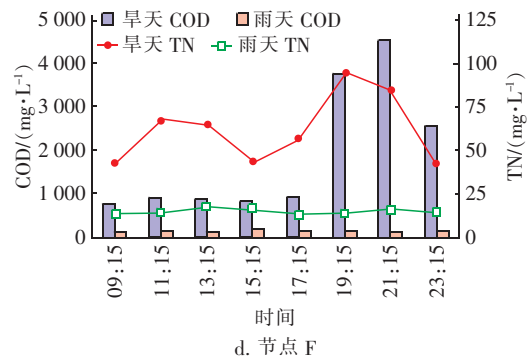
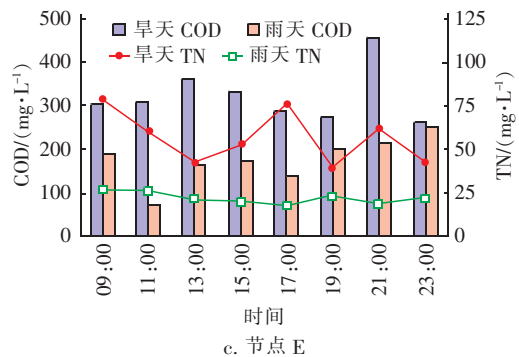
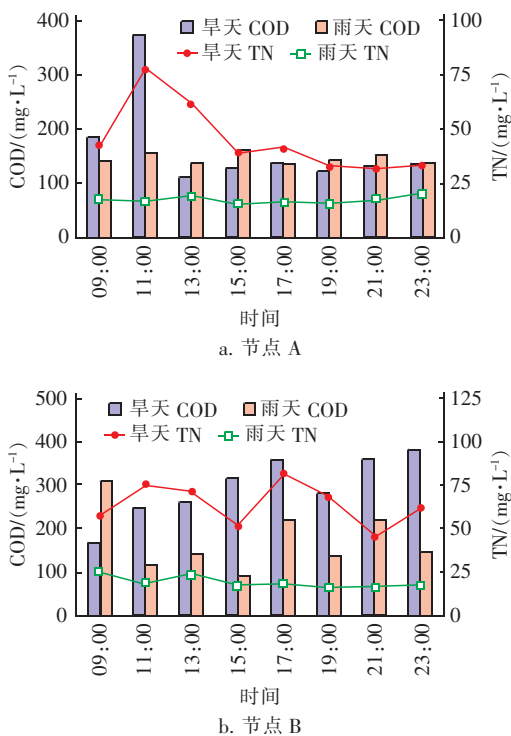


图3 泵站X上游管网典型节点的水质变化

Fig. 3 Water quality variation of the key monitoring nodes at upstream pipeline of pump station X

各节点的雨天水质浓度出现不同程度的下降,其中节点A的雨天COD浓度与旱天相似,但TN浓度下降明显。节点F的雨天COD和TN平均值较旱天分别下降92.3%和76.5%。此外,与旱天水质相比,节点A和F的雨天水质波动较小。

选取COD、TN和电导率为特征水质因子,对各管网节点在雨天和旱天的混合样水质进行对比分析,结果如表2所示。可见,与旱天相比,雨天大部分节点的COD和电导率都有不同程度的下降,但也有部分节点的COD和电导率反而升高。与COD和电导率相比,所有节点的TN浓度在雨天均有所下降,规律性较强。其中,节点F、G的雨天与旱天TN浓度比为 0.22 ± 0.08 ,节点B、C、D、E的雨天与旱天TN浓度比为 0.40 ± 0.15 ,稀释效应明显,表明支线F—G和支线B—C—D—E均有较为严重的雨污混接现象。对于支线B—C—D—E,上游节点D、E所代表的管道雨污混接更严重,可能是导致下游节点B水质下降的主要原因。尽管如此,这些节点对泵站X出水水质浓度降低的贡献率尚与支线流量相关,应结合节点流量分析污染物负荷的变化。

表 2 泵站 X 上游管网节点旱天和雨天水质对比

Tab. 2 Comparison of water quality between dry weather and wet weather of monitoring nodes at upstream pipeline of pump station X

节点	2018 年 11 月 29 日 (旱天)					2018 年 12 月 11 日 (雨天)					R = 雨天水质/旱天水质				
	COD/ (mg · L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg · L ⁻¹)	TN/ (mg · L ⁻¹)	TP/ (mg · L ⁻¹)	电导率/ (μS · cm ⁻¹)	COD/ (mg · L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg · L ⁻¹)	TN/ (mg · L ⁻¹)	TP/ (mg · L ⁻¹)	电导率/ (μS · cm ⁻¹)	COD	BOD ₅	TN	TP	电导率
A	165	82	31.8	3.74	756	150	61.4	14.9	1.73	654	0.91	0.75	0.47	0.46	0.87
B	308	147	66.4	5.18	933	192	82.4	17.5	0.83	565	0.62	0.56	0.26	0.16	0.61
C	246	121	40.9	3.35	795	280	126.0	24.5	2.88	902	1.14	1.04	0.60	0.86	1.13
D	769	375	62.2	5.04	980	202	89.1	20.2	2.18	721	0.26	0.24	0.32	0.43	0.74
E	331	176	55.9	4.06	992	178	67.6	23.9	2.96	841	0.54	0.38	0.43	0.73	0.85
F	2 920	1 410	88.0	8.68	1 588	138	54.9	14.2	1.35	648	0.05	0.04	0.16	0.16	0.41
G	1 850	885	96.0	7.81	1 249	2 640	1 180.0	26.8	4.10	1 156	1.43	1.33	0.28	0.52	0.93

3.3.2 溯源分析

采用向上溯源的方法进一步分析泵站 X 上游管网节点的水质数据,泵站 X 上游管网的节点概化如图 4 所示。结合表 2 可知,节点 A 的水质浓度较生活污水偏低,其中旱天和雨天的 BOD₅ 均显著低于 100 mg/L;与旱天水质相比,节点 A 雨天的 TN 和 TP 浓度下降 50% 以上,COD 和电导率则没有显著变化。节点 A 的位置为末端泵站 X 出水管泄压井,河水渗入导致水质浓度偏低的可能性较小。泵站 X 上游有 3 条支线汇入,由于采样原因,本研究节点水质分析主要沿 B—C—D—E 及 F—G 这 2 条支线向上溯源。

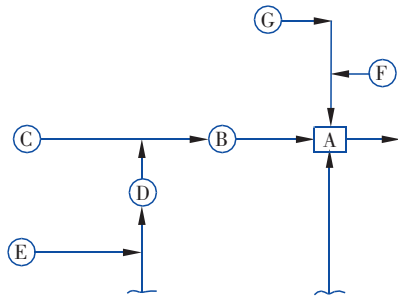


图 4 泵站 X 上游管网的节点概化示意

Fig. 4 Generalization of monitoring nodes at upstream pipeline of pump station X

支线 B—C—D—E 主要接纳居住小区的生活污水。结合表 2 可以看出,节点 B 的旱天水质与该地区典型的生活污水水质相近,但雨天水质浓度显著降低,BOD₅ 浓度下降至 100 mg/L 以下,TN 和 TP 浓度分别下降了 74% 和 84%,表明节点 B 的上游管网存在较为严重的雨污混接现象。节点 B 上游的节点 C 旱天和雨天水质相近,节点 D、E 的雨天水质浓度下降明显,表明 D—E 管段是支线 B—C—D—

E 存在雨污混接的主要来源。此外,节点 D 的旱天水质浓度较典型生活污水偏高,可能存在高浓度废水接入。

支线 F—G 北侧的沿河区域存在部分生产企业。结合表 2 可知,节点 F 和 G 的旱天水质浓度均显著偏高,表明该管段存在不符合纳管标准的企业废水接入,且废水流量占比较大。同时,节点 F 和 G 的雨天水质呈现不规律性变化,可能是企业废水的不规则间歇排放所致。

受监测条件所限,本研究未对节点水量进行监测。结合水量监测,可进一步评估不同支线的污染负荷贡献率和缺陷严重程度。通过对比末端节点 A 与支线 B—C—D—E 及 F—G 的水质可以发现,尽管支线 F—G 存在高浓度废水接入,但可能由于水量较小,节点 A 的水质浓度仍然显著偏低,表明支线 B—C—D—E 及上游泵站 Y 的雨污混接对节点 A 的水质影响更大。同时,根据旱天水质数据分析,泵站 X 排水系统还存在地下水入渗或河水倒灌等外水接入的情况。根据本研究结果,建议对支线 F—G 北侧的生产企业加强废水排放监管,对支线 B—D—E 采用 CCTV 等物理检测手段进一步排查问题来源,评估问题严重程度,并制定有针对性的改造或修复方案。上游泵站 Y 所在的管网系统则应采取节点分析的方法进一步缩小问题管段范围后再进行物理检测。

4 结论

城市排水管网庞大复杂,全面开展数据监测和管网检测费时费力且难以实现,通过管网梳理分析、污水厂站水量分析、管网节点监测等方法对可能存在的问题进行预判,可为有针对性地开展污水管网

系统提质增效工作提供依据。针对某分流制污水泵站的水量分析表明,泵站汛期流量较旱天流量显著增加,泵站上游的排水系统可能存在较严重的雨污混接现象。管网节点水质监测结果表明,泵站的旱天水质浓度显著低于生活污水,表明泵站的上游管网存在旱天外水入流的现象。另外,通过溯源分析可进一步明确不同支线管网的雨污混接情况,缩小问题管段范围,并采取有针对性的解决方案。本研究可为国内排水系统的系统排查和评估提供借鉴。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴—2019[M]. 北京:中国统计出版社,2019.
National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook – 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019 (in Chinese).
- [2] 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.
XU Zuxin, WANG Lingling, YIN Hailong, *et al.* Quantification of groundwater infiltration into urban drainage networks based on marker species approach[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(4):593–599(in Chinese).
- [3] 徐祖信,王诗婧,尹海龙,等. 基于节点水质监测的污水管网破损位置判定方法[J]. 中国环境科学,2016,36(12):3678–3685.
XU Zuxin, WANG Shijing, YIN Hailong, *et al.* Locating the sewer network defect based on marker investigation at pipe manholes[J]. China Environmental Science, 2016, 36(12):3678–3685(in Chinese).
- [4] 徐祖信,王诗婧,尹海龙,等. 污水管网中雨水混接来源的高效诊断方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2017,45(3):384–390.
XU Zuxin, WANG Shijing, YIN Hailong, *et al.* Cost-effective locating inappropriate rainfall inflow into urban sewer network[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(3):384–390(in Chinese).
- [5] 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):59–63,68.
WU Wenjun, GUAN Yuntao, CHEN Bo, *et al.* Preliminary study on diagnostic techniques of drainage system performance in old towns[J]. 2010, 26(20):59–63,68 (in Chinese).
- [6] 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):1–5.
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):1–5 (in Chinese).
- [7] 刘小梅,王婷,赵美玲,等. 基于在线监测的排水系统运行负荷分析与问题诊断[J]. 给水排水,2016,42(12):126–130.
LIU Xiaomei, WANG Ting, ZHAO Meiling, *et al.* Analysis and measures for the operation load of drainage system based on on-line monitoring[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(12):126–130(in Chinese).
- [8] 赵冬泉,王浩正,陈吉宁,等. 监测技术在排水管网运行管理中的应用及分析[J]. 中国给水排水,2012,28(8):11–14.
ZHAO Dongquan, WANG Haozheng, CHEN Jining, *et al.* Application and analysis of monitoring technology in operation and management of urban drainage network[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(8):11–14 (in Chinese).

作者简介:刘战广(1985–),男,湖北随州人,博士,高级工程师,主要从事水污染控制方面的研究工作。

E-mail:headbook@163.com

收稿日期:2020–03–20

修回日期:2020–06–23

(编辑:刘贵春)