

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.11.023

降雨入流入渗定量评价方法及指标的对比

郭效琛¹, 李萌², 杜鹏飞¹, 赵冬泉², 杨婷婷²

(1. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 2. 北京清环智慧水务科技有限公司, 北京 100086)

摘要: 降雨导致的入流入渗是城市污水管网普遍存在的问题,利用监测识别入流入渗严重区域并开展检测和诊治工作是排水管理的重要任务之一。目前相关研究中,对于场次降雨条件下监测点入流入渗总量的计算方法相对明确,但仍需要建立定量指标进行监测点间的对比。总结并建立了基于排水分区面积、污水管线长度和旱天基准流量的3个定量指标,并在案例区域进行应用,结果表明,不同指标对排水分区入流入渗严重程度的识别存在明显差异;利用单位面积和单位长度的计算结果具有较好的一致性,但所需基础资料较多;与旱天基准流量进行比较仅需要利用监测数据本身,但会受不同排水分区人口密度、用地类型等因素影响;不同指标的适用条件不同。

关键词: 污水管网; 入流入渗; 定量评价; 排水分区面积; 污水管线长度; 旱天基准流量

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2022)11-0133-06

Comparison on Quantitative Evaluation Methods and Indexes of Rainfall Inflow and Infiltration

GUO Xiao-chen¹, LI Meng², DU Peng-fei¹, ZHAO Dong-quan², YANG Ting-ting²

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Tsinghuan Smart Water Tech Co. Ltd., Beijing 100086, China)

Abstract: The inflow and infiltration caused by rainfall is a common problem in urban sewage pipe network. It is one of the important tasks of drainage management to identify the areas with serious inflow and infiltration problem by monitoring and to carry out the detection, diagnosis and treatment. At present, relevant studies indicate that the method for calculating the total volume of inflow and infiltration at monitoring points in a rainfall event is relatively clear. However, it is still necessary to establish quantitative indexes for comparison among monitoring points. Three quantitative indexes based on drainage area, sewage pipeline length and reference flow rate in dry days were summarized and established, and applied in the case area. The results showed that there were significant differences in the identification and judgment of different indexes on the severity of inflow and infiltration in drainage areas, the use of unit area and per unit length calculation results had good consistency, but they relied on more basic data. The method compared with reference flow rate in dry days only needed the monitoring data, but the results could be influenced by drainage partition factors such as population density and type of land use. The applicable conditions of different indexes were different.

Key words: sewage pipe network; inflow and infiltration; quantitative evaluation; drainage

通信作者: 郭效琛 E-mail: guoxiaochen_92@163.com

area; sewage pipeline length; reference flow rate in dry days

在降雨条件下,雨水进入到城市污水管网,即降雨导致的入流入渗(RDII)^[1],是城市排水管网中普遍存在的问题。雨天排水系统水量激增,不仅会造成污水溢流,影响城市水安全和水环境,也会加大城市污水处理厂的运行负荷^[2]。降雨入流入渗的分析、识别与治理,是排水系统综合诊断与管理所必须解决的关键问题之一^[3]。对于整个区域而言,往往是某个小范围的分区分集中了主要问题,因此,需要优先识别问题严重部分,并有针对性地开展CCTV检测和诊治工作^[4]。

排水监测技术是入流入渗问题识别最常用的一种分析手段,能够简单直接了解目标区域的真实情况^[1,5]。利用流量监测数据统计旱天的基准流量,将不同场次降雨下的流量与旱天基准流量进行比较,所增加的部分即雨天的入流入渗量^[6]。然而各监测点雨天入流入渗量的绝对值大小并不能直接反映所对应收水范围内排水管线入流入渗的严重程度。为了对不同监测点、不同分区入流入渗严重程度进行横向比较,研究总结建立了3个定量指标:单位面积单位降雨RDII、单位污水管线长度单位降雨RDII和单位降雨入流入渗率。基于案例区域各排水分区的流量监测数据,利用3个定量指标对入流入渗严重程度进行衡量与比较,结果表现出了明显的差异性,不同指标代表的意义不同,适用条件也有所差异。

1 案例区域与数据收集

1.1 区域概况

案例区域位于湖南省,属亚热带季风气候,降雨量充沛。区域内排水整体上采用分流制,污水管网总长度约为235 km,全部污水按要求收集进入到污水处理厂统一处理后排放。统计该区域2020年2月—4月污水处理厂的进水量数据,平均污水处理量为 $8.99 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,区分旱天和雨天再进行平均值统计(当日有降雨为雨天;前48 h及当日无降雨则为旱天),分别为 $6.61 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $12.23 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。从污水厂进水量差异可以看出,虽然区域整体采用分流制排水,但排水系统受降雨影响显著,会导致污水厂雨天进水量显著增加,处于超负荷运行状态,且进水浓度低,影响污水厂处理效率。

1.2 在线监测方案

根据区域内排水管网的拓扑关系,对区域划分排水分区,并在各排水分区的分界点处的主干管网布置在线流量计,实时采集在线流量,若排水分区内几乎没有排水管网,则无需布置监测点。最终划分11个排水分区,布置9个流量在线监测点;为同步收集降雨信息,在区域内布置1台在线雨量计。区域排水分区划分及在线监测点的布置见图1。



图1 区域排水分区划分及监测点分布示意

Fig.1 Regional drainage zoning and monitoring point distribution

1.3 监测数据收集

案例区域于2020年1月24日完成全部在线监测设备的安装,开始进行为期两个月的监测与数据收集,降雨量统计见表1。

表1 监测期内日降雨量统计

Tab.1 Statistics of daily rainfall during monitoring period

| 日期 | 日降雨量/mm | 日期 | 日降雨量/mm |
|------------|---------|------------|---------|
| 2020-01-24 | 32.08 | 2020-03-02 | 4.06 |
| 2020-01-25 | 13.41 | 2020-03-03 | 26.84 |
| 2020-02-02 | 7.90 | 2020-03-05 | 6.49 |
| 2020-02-03 | 2.80 | 2020-03-07 | 8.80 |
| 2020-02-06 | 39.90 | 2020-03-08 | 9.70 |
| 2020-02-10 | 3.40 | 2020-03-09 | 23.80 |
| 2020-02-11 | 17.20 | 2020-03-12 | 13.20 |
| 2020-02-12 | 3.30 | 2020-03-22 | 17.40 |
| 2020-02-15 | 24.60 | 2020-03-24 | 3.80 |
| 2020-02-29 | 20.50 | 总计 | 279.18 |

截至2020年3月24日,以天(24 h)为统计单位,日累计降雨量在2 mm及以上的有效降雨天数为

19 d,总累计降雨量为279.18 mm,日最大累计降雨量为39.9 mm(见表1)。在2个月的时间内持续进行各监测点分钟级流量数据的收集。

2 入流入渗定量评价方法

排水管网降雨入流入渗的定量分析评价,首先要以旱天的情况为基础,进行各监测点基准流量的统计计算。旱天监测数据的选取应满足以下条件:至少前48 h无降雨,以减少上一轮降雨的影响;旱天时间为连续7 d,能够包含周末和工作日;监测数据质量合格,避免后续分析受到无效数据的干扰。

基于连续7 d的监测数据,统计计算各监测点每日的累计流量,并对7 d的日累计流量求取平均值,作为该监测点旱天基准流量,如公式(1)所示。

$$Q_h = \bar{Q}_i \quad (1)$$

式中: Q_h 为旱天日基准流量, m^3/d ; Q_i 为每天的日累计流量($i=1,2,\dots,7$), m^3/d 。

根据每日流量的逐时变化,在各时刻下求取流量平均值后,可得到监测点旱季流量特征曲线。

在各场次降雨条件下,收集监测点的流量数据曲线,与旱季流量特征曲线进行比较,两条曲线间的差值即为由降雨导致的该监测点的入流入渗量,如公式(2)所示。

$$R_{mk} = P_{mk} - Q_{hk} \quad (2)$$

式中: R_{mk} 为监测点在第 m 场降雨下 k 时刻由降雨导致的入流入渗量, m^3/s ; P_{mk} 为监测点在第 m 场降雨下 k 时刻的监测流量, m^3/s ; Q_{hk} 为监测点旱天 k 时刻的特征流量, m^3/s 。

将各时刻雨天与旱天特征流量的差值进行求和,根据在线监测数据收集的时间间隔,可得到场次降雨下总的降雨入流入渗量,如公式(3)所示。

$$\text{RDII}_m = 60t \cdot \sum_{k=1}^k R_{mk} \quad (3)$$

式中: RDII_m 为监测点在第 m 场降雨下由降雨导致的入流入渗量, m^3 ; t 为流量在线监测数据收集的时间间隔,min。考虑降雨径流汇集需要一定的时间, k 时刻不仅需要包含全部降雨时间,还应涵盖降雨后一段时间,一般可选择以天为单位进行计算。

对于同一监测点而言,不同场次降雨条件下的入流入渗量主要是受降雨条件影响,可对不同场次降雨下的入流入渗量与降雨量进行相关性分析,利

用线性拟合,将RDII值作为因变量 y ,将累计降雨量作为自变量 x ,如公式(4)所示。

$$y = ax + b \quad (4)$$

式中: a 的取值即代表了每单位降雨量能够引起的入流入渗量, m^3/mm 。

然而,对于不同监测点,由于各监测点对应的收水范围不同,基准流量也有明显差异,同一场降雨条件下,直接进行总RDII值的比较,对于各分区入流入渗严重程度难以进行有效的衡量与对比,可以利用以下3个指标做进一步的分析与比较。

① 单位面积单位降雨导致的RDII量

在各监测点对应的收水范围、汇水面积清晰的情况下,各监测点对应区域入流入渗严重程度用单位面积的入流入渗量来衡量,如公式(5)所示。

$$r_1 = \frac{a}{S} \quad (5)$$

式中: r_1 为监测点单位面积单位降雨导致的入流入渗量, $\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{mm})$; S 为监测点对应的汇水面积, km^2 。

② 单位污水管线单位降雨导致的RDII量

除了利用汇水面积,还可以根据监测点上游收水范围内辐射的污水管网长度来进行比较,如公式(6)所示。

$$r_2 = \frac{a}{L} \quad (6)$$

式中: r_2 为监测点单位污水管线单位降雨导致的入流入渗量, $\text{m}^3/(\text{km} \cdot \text{mm})$; L 为监测点对应的上游污水管线总长度,km。

③ 单位降雨导致的入流入渗率

当所在区域管网基础资料有限,面积和长度都较为模糊时,可以与监测点本身旱天的日累计流量进行比较,将比值作为入流入渗率,如公式(7)所示。

$$\beta = \frac{a}{Q_h} \times 100\% \quad (7)$$

式中: β 为监测点单位降雨导致增加的入流入渗率, $\%/ \text{mm}$ 。

3 区域入流入渗评价结果

3.1 雨天入流入渗总量分析

在监测期内选择3月15日—21日连续7 d作为典型旱天,计算各监测点的旱天基准流量,结果如下:1#~9#监测点的旱天基准流量分别为15 914.09、

2 700.47、1 248.64、1 161.42、8 598.07、16 936.69、11 217.96、6 803.51、1 367.42 m³/d。

在 19 个降雨日中,筛选 10 场次降雨进行雨天入流入渗的分析,共涵盖小雨(<10 mm)1 场、中雨(10~25 mm)6 场、大雨(25~50 mm)3 场,所筛选 10 场次降雨的信息如表 2 所示。

表 2 典型场次降雨信息统计
Tab.2 Statistics of rainfall information

| 编号 | 降雨日期 | 总降雨量/ mm | 降雨历时/ h | 平均强度/ (mm·h ⁻¹) |
|----|------------|-------------|------------|--------------------------------|
| 1 | 2020-02-02 | 7.9 | 9.0 | 0.88 |
| 2 | 2020-02-05 | 41.7 | 21.0 | 1.99 |
| 3 | 2020-02-10 | 20.6 | 30.0 | 0.69 |
| 4 | 2020-02-15 | 24.6 | 15.0 | 1.64 |
| 5 | 2020-02-29 | 21.8 | 24.0 | 0.91 |
| 6 | 2020-03-02 | 31.7 | 41.0 | 0.77 |
| 7 | 2020-03-05 | 17.0 | 53.0 | 0.32 |
| 8 | 2020-03-08 | 33.5 | 21.0 | 1.60 |
| 9 | 2020-03-11 | 14.6 | 21.3 | 0.68 |
| 10 | 2020-03-22 | 17.8 | 17.3 | 1.03 |

表 3 各场次降雨条件下 1[#]监测点的降雨入流入渗量

Tab.3 Amount of rainfall inflow and infiltration of 1[#] monitoring point under each rainfall

| 降雨日期 | 2020-02-02 | 2020-02-05 | 2020-02-10 | 2020-02-15 | 2020-02-29 |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 累计降雨量/mm | 7.9 | 41.7 | 20.6 | 24.6 | 21.8 |
| 入流入渗量/m ³ | 1 239.38 | 17 466.70 | 6 632.84 | 8 327.98 | 6 946.46 |
| 降雨日期 | 2020-03-02 | 2020-03-05 | 2020-03-08 | 2020-03-11 | 2020-03-22 |
| 累计降雨量/mm | 31.7 | 17.0 | 33.5 | 14.6 | 17.8 |
| 入流入渗量/m ³ | 13 168.18 | 8 896.49 | 13 351.40 | 4 075.25 | 3 776.60 |

将各场次降雨的累计降雨量作为自变量,1[#]监测点入流入渗量作为因变量,进行线性拟合,拟合曲线为 $y=479.04x-2\,687.3$,相关系数为 0.92,表明对于 1[#]监测点而言,当降雨量大于 5.6 mm 时,开始出现入流入渗,之后每增加 1 mm 降雨,对应的入流入渗量增加 479.04 m³。

对所有监测点按照相同的方法进行各场次降雨条件分析,得到各监测点每单位降雨导致的入流入渗量,结果如下:1[#]~9[#]监测点每单位降雨导致的入流入渗量分别为 479.04、1 314.46、423.89、379.76、598.96、2 332.47、2 187.03、458.25、149.12 m³/mm。可以看出,各监测点的入流入渗量与降雨量都呈正相关,但增加的程度有着明显差异:9[#]监测点最小,每 1 mm 降雨仅导致了 149.12 m³的入流入渗量,而对于 6[#]监测点则高达 2 332.47

在各场次降雨条件下,绘制各监测点的流量曲线,并与旱天基准流量曲线进行比较,得到该场次降雨下监测点的入流入渗曲线,以 1[#]监测点为例,在 3 月 2 日降雨条件下,流量曲线变化见图 2。

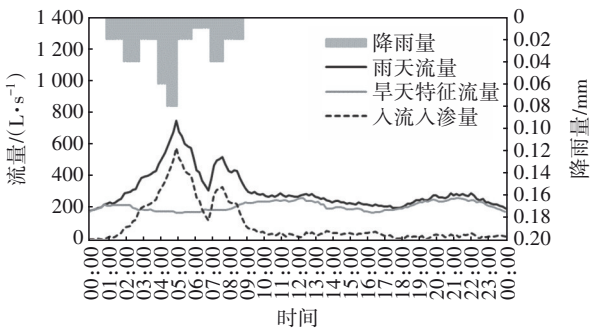


图 2 1[#]监测点 3 月 2 日降雨条件下流量变化曲线
Fig.2 Flow change curve of 1[#] monitoring point under rainfall on March 2nd

根据曲线差值计算得到,该场次降雨条件下降雨导致的入流入渗量为 13 168.18 m³。在 10 场次降雨条件下分别进行曲线的比较,可得到监测点各场次降雨条件下的入流入渗量,如表 3 所示。

m³。但各监测点的基础流量及收水范围有所不同,利用该指标并不能对不同分区降雨入流入渗的严重程度进行对比。

3.2 分区入流入渗严重程度分析

① 单位面积单位降雨导致的 RDII 量

根据管网拓扑关系,对各监测点对应排水分区的汇水面积进行统计,并计算单位面积单位降雨量下的 RDII。1[#]~9[#]监测点的分区面积分别为 4.14、2.17、1.97、2.26、6.49、2.82、2.53、1.49、1.36 km²,单位面积单位降雨量 RDII 分别为 115.71、605.74、215.17、168.04、92.29、827.12、864.43、307.55、109.65 m³/(km²·mm)。

② 单位污水管线单位降雨导致的 RDII 量

统计各监测点对应排水分区内的管线长度,计算单位污水管线长度单位降雨导致的入流入渗量。

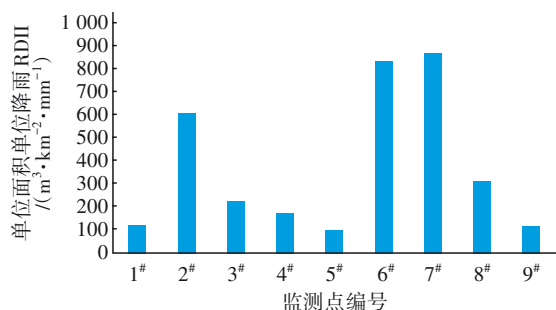
1#~9#监测点的管线长度分别为28、22、21、24、19、35、31、28、25 km,单位污水管线长度单位降雨量RDII分别为17.11、59.75、20.19、15.82、31.52、66.64、70.55、16.47、5.96 $\text{m}^3/(\text{km}\cdot\text{mm})$ 。

③ 单位降雨导致的入流入渗率

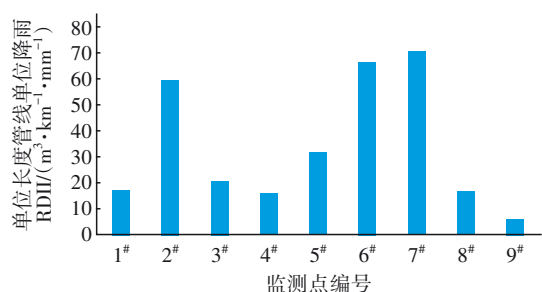
将各监测点的旱天基准流量作为参考值,计算各监测点单位降雨导致的入流入渗率。1#~9#监测点的旱天基准流量分别为15 914.09、2 700.47、1 248.64、1 161.42、8 598.07、16 936.69、11 217.96、6 803.51、1 367.42 m^3/d ,单位降雨入流入渗率分别为3.01、48.68、33.95、32.70、6.97、13.77、19.50、6.74、10.91 $\%/ \text{mm}$ 。

3.3 计算结果的对比与讨论

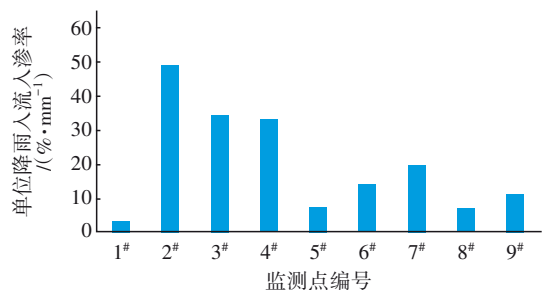
根据不同指标进行计算,相关结果都可以作为区域内判定不同分区降雨入流入渗严重程度的依据,并用于入流入渗分区图的绘制,指导后续排水管网CCTV检测工作等,但利用不同指标对各排水分区入流入渗严重程度的判断有着显著差异,如图3所示。可以看出,以单位面积和单位污水管线长度进行不同监测点间比较时,降雨入流入渗的严重程度基本一致,但5#监测点有一定的偏差。一般而言,排水管网长度与面积有着很强的正相关性,即面积越大、管网长度越长,但在个别城镇区域,存在大面积裸土、空地或城中村等,这部分地区通常没有完善的排水管网系统,以面积为考量会低估管网入流入渗的严重程度。以旱天基准流量作为参考计算降雨入流入渗率的结果,与另外两个指标所得结果有着较大差异。监测点6#和7#的严重程度有所降低,而监测点3#和4#的严重程度有所上升,成为入流入渗问题严重片区。无论以哪种指标作为衡量,2#监测点对应分区的入流入渗问题都较为严重,而1#、8#和9#监测点所对应分区的入流入渗问题相对较轻。



a. 单位面积单位降雨量下监测点的RDII



b. 单位污水管线长度单位降雨量下监测点的RDII



c. 单位降雨量下监测点入流入渗率

图3 不同指标下各监测点降雨入流入渗对比

Fig.3 Comparison of rainfall inflow and infiltration of monitoring points under different indexes

3.4 指标适用性分析

对区域整体降雨入流入渗问题进行诊断的目标是对比不同排水分区的严重程度,绘制入流入渗分区图,找到最严重区域。然而,利用不同指标进行定量评价会得到不同的结果,指标的选择应综合考虑区域实际情况和具体目的。

① 区域内用地类型、人口密度、城镇化程度、管网修建密度等都比较相近时,3个指标所得到的结果会基本一致,用任一指标衡量都可以。但这种情况过于理想,当区域范围较大,在问题诊断初期进行排水分区层级的识别时,很难满足这样的条件;在小范围片区内精细诊断分析和识别时,可一定程度上满足该条件。

② 在有条件获取区域管网基本资料的前提下,相比于管线长度,各监测点对应汇水面积更易利用GIS等工具进行测量。单位面积单位降雨的RDII值能反映该排水分区内的平均情况,但如果该排水分区内有大量未建管网区域或管网密度明显低于其他分区,利用单位面积作为指标有可能会低估该分区内排水管网本身降雨入流入渗严重程度。

③ 以旱天基准流量为参考计算入流入渗率,与另外两个指标的意义有较大差别,不再是空间上平均值的计算,而是涉及到了人口数量。旱天基准

流量与该分区常驻人口密切相关,在中心繁华区域,由于人口密度高,日常生活用水量大,即使雨天入流入渗量较大,比值也会较小,而显得严重程度降低;相反,在相对偏僻、人口少的地区,则严重程度会有所上升。在案例区域中,监测点6#和7#所在排水分区即为中心城区,以入流入渗率作为衡量时,严重程度明显降低。

3个指标中,单位污水管线单位降雨的RDII值最能直接反映排水管网本身的问题,但在很多实际项目中,各分区排水管线的长度最难统计和测量;此时可以利用排水分区面积计算单位面积单位降雨的RDII值;若基本资料缺失,对排水管线信息掌握不足,利用入流入渗率,只需要各监测点本身的监测数据,也可以做一个初步的判断与识别。

4 结论

排水管网入流入渗问题的分区排查、识别问题严重地区是区域排水管网诊断的基础性工作,也是需要重点关注的问题。通过计算各场次降雨下监测点入流入渗的总量,仅能够对某个监测点的入流入渗规律进行识别,不能对监测点间的情况进行横向比较。为了判断入流入渗最严重的监测点及对应的排水分区,需要具有平均意义的定量指标。

总结并建立了单位面积单位降雨RDII、单位污水管线长度单位降雨RDII和单位降雨入流入渗率这3个指标,并在案例区域进行计算,对各监测点及对应排水分区入流入渗严重程度的识别有一致也有差别,这与指标背后的内在含义密切相关。

在实际工作中,应根据目标区域的具体情况选择评价指标。污水管网存在结构性破损是导致降雨入流入渗问题出现的最主要原因,因此,单位污水管线长度单位降雨RDII最能直观反映各分区污水管网所存在的问题,但所需的基础信息相对较难统计。利用单位面积进行对比分析,具有一定的替代性。单位降雨入流入渗率仅需监测数据本身就能进行判别,对基础资料的依赖程度较低,在各分区人口、发展程度等条件较为相近时,也可对降雨入流入渗的严重程度做出相对准确的识别。

参考文献:

[1] 盛政,刘旭军,王浩正,等. 城市污水管道入流入渗监

测技术研究与应用进展[J]. 环境工程,2013,31(2): 17-21.

SHENG Zheng, LIU Xujun, WANG Haozheng, *et al.* Study on field monitoring technology for urban drainage network system management [J]. Environmental Engineering, 2013, 31(2): 17-21 (in Chinese).

[2] 余黎,陈小龙,刘皓波,等. 污水处理厂低浓度进水的快速监测评估[J]. 中国给水排水,2017, 33(5): 68-71.

YU Li, CHEN Xiaolong, LIU Haobo, *et al.* Rapid monitoring and evaluation of low concentration influent in sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(5): 68-71 (in Chinese).

[3] 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).

[4] PEARLMAN S. Minimizing Municipal Costs for Infiltration & Inflow Remediation [M]. Massachusetts: Neponset River Watershed Association, 2007.

[5] 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).

[6] 王小婷,姚越,周炜,等. 基于三角分析法的城市污水管网入流入渗量评估[J]. 水污染及处理, 2019, 7(4): 152-159.

WANG Xiaoting, YAO Yue, ZHOU Wei, *et al.* Quantification of inflow and infiltration in urban sewer systems based on triangle method [J]. Water Pollution and Treatment, 2019, 7(4): 152-159 (in Chinese).

作者简介:郭效琛(1992-),女,山西太原人,博士,研究方向为城市排水管理、排水在线监测等。

E-mail: guoxiaochen_92@163.com

收稿日期:2020-06-22

修回日期:2021-03-02

(编辑:任莹莹)