

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.15.013

# 重庆市某城区市政污水管道水力参数监测与分析

姜文超<sup>1,2</sup>, 杨希<sup>1,2</sup>, 董晓霞<sup>3</sup>, 许雨桐<sup>1,2</sup>, 林于廉<sup>4</sup>

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045; 2. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 3. 重庆市九龙坡区住房和城乡建设委员会, 重庆 400050; 4. 重庆水利电力职业技术学院 市政工程学院, 重庆 402160)

**摘要:** 了解污水管道的实际水力状况对完善规划设计和维护管理具有重要意义。为此,对重庆市某城区市政污水管道(DN400)的水力参数进行了监测。结果表明,W1~W4监测点的平均流速分别为0.16、0.25、0.52、0.29 m/s,均未达到不淤流速0.60 m/s;最大流速分别为0.40、0.51、1.10、0.55 m/s,均低于设计流速;95%累积频率流速分别为0.29、0.39、0.92、0.46 m/s,大部分都低于不淤流速。相应的充满度和流量监测数据也都低于设计值。各监测点的实际水力状况远未达到设计工况,水力效率偏低,其原因可能与规定的市政污水管道最小管径及用水定额取值偏大有关。以各监测点平均流速计算,1 km监测管道中污水的总停留时间接近1 h。管径偏大可能会造成水力效率低、投资浪费、淤积增加,甚至会造成污水停留时间及有机物降解率增加,值得关注。

**关键词:** 污水管道; 水力参数; 水力停留时间

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)15-0078-06

## Monitoring and Analysis of Hydraulic Parameters of Municipal Sewer in an Urban Area of Chongqing City

JIANG Wen-chao<sup>1,2</sup>, YANG Xi<sup>1,2</sup>, DONG Xiao-xia<sup>3</sup>, XU Yu-tong<sup>1,2</sup>, LIN Yu-lian<sup>4</sup>

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing 400045, China; 3. Housing and Urban Rural Development Commission of Jiulongpo District in Chongqing, Chongqing 400050, China; 4. School of Municipal Engineering, Chongqing Water Resources and Electric Engineering College, Chongqing 402160, China)

**Abstract:** It is of great significance to understand the actual hydraulic condition of the municipal sewer system to improve its planning, design, maintenance and management. Therefore, the hydraulic parameters of the municipal sewers (DN400) in an urban area of Chongqing were monitored. The average flow velocities of W1-W4 monitoring sites were 0.16 m/s, 0.25 m/s, 0.52 m/s and 0.29 m/s, respectively, which did not reach the non-silting flow velocity of 0.60 m/s. The maximum flow velocities were 0.40 m/s, 0.51 m/s, 1.10 m/s and 0.55 m/s, respectively, which were all lower than the design flow velocity. The flow velocities with cumulative frequency of 95% were 0.29 m/s, 0.39 m/s, 0.92 m/s and 0.46 m/s, respectively, most of which were lower than the non-silting flow velocity. The corresponding fullness and flow rate

基金项目: 重庆市城乡建设委员会科技计划课题(城科字2015第1-15号); 重庆高等职业院校新技术推广项目(GZTG201616)

通信作者: 姜文超 E-mail: wchjiang@cqu.edu.cn

monitoring data were also lower than the design value. The actual hydraulic condition of each monitoring site was far from the design condition, and the hydraulic efficiency was low, which might be related to the relatively too large values of municipal sewer minimum diameter and per capita water consumption standard. According to the average flow velocity of each monitoring site, the total retention time of sewage in a monitoring sewer with distance of 1 km was close to 1 h. Relatively too large pipe diameter may result in low hydraulic efficiency, waste of investment, increase of siltation, and even increase of sewage retention time and degradation rate of organic matter, which is worthy of attention.

**Key words:** municipal sewer; hydraulic parameter; hydraulic retention time

污水管道是城市基础设施的重要组成部分,其设计、建设和运行质量不仅会影响污水处理设施的运行,而且会影响水污染控制效果和水环境质量。长期以来我国市政污水管道建设重设计、轻运维,关于管道特别是污水支管实际运行状况的监测及其与初始设计的比较研究少见报道<sup>[1-3]</sup>。此外,近年来我国部分城市有增大起端污水管道管径的趋势,如重庆市要求市政排水管道管径不小于DN400(参见《重庆市城市规划管理技术规定》),广州市要求公共污水管最小设计管径为DN500(参见《广州市排水管理办法实施细则》),其主要出发点可能是通过扩大排水管道最小管径以减少管道堵塞,但这些规定是否科学合理,尚缺少实证研究支撑。对污水管道的实际水力参数进行监测和分析,对于优化污水管道甚至污水厂的设计、建设和运行维护,促进污水处理提质增效,具有重要意义。笔者在地方市政维护部门的支持下,对重庆市某城区市政污水管道的水力参数进行了监测,获得其实际运行状况数据并进行分析,以获得相关研究和应用启示。

1 研究方法

1.1 监测对象

本研究以污水支管为主,监测对象为重庆某城区两条分流制市政污水管道,管径均为DN400,管

材为HDPE双壁波纹管,均于2013年12月完成设计,服务范围及人口见图1和表1,设计工况见表2。

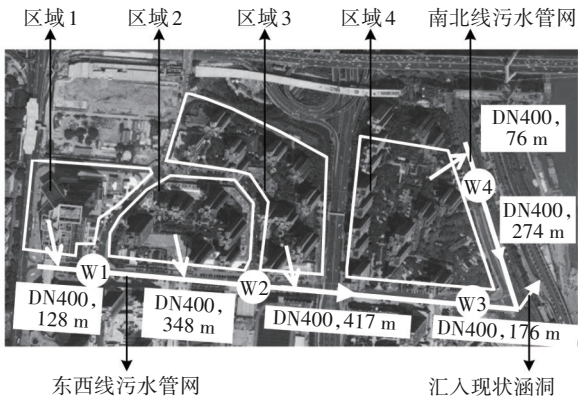


图1 监测点位置及污水收集范围示意

Fig.1 Monitoring sites and sewage collection scope

表1 污水收集范围及服务人口

Tab.1 Sewage collection area and service population

项目	污水收集范围及特征	服务人口及面积
区域1	3.6 hm <sup>2</sup> , 主要是商场及餐饮店面污水	建筑面积为 144 800 m <sup>2</sup>
区域2	5.9 hm <sup>2</sup> , 主要是住宅、商铺及餐饮店面污水	2 182 户, 约 6 546 人
区域3	6.5 hm <sup>2</sup> , 主要是住宅、商铺及餐饮店面污水	1 848 户, 约 5 544 人
区域4	6.8 hm <sup>2</sup> , 主要是住宅污水	1 840 户, 约 5 520 人

表2 监测管段设计工况

Tab.2 Designed conditions of the monitored sewers

设计管段	最高日污水量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	本段流量/(L·s <sup>-1</sup> )	传输流量/(L·s <sup>-1</sup> )	设计流量/(L·s <sup>-1</sup> )	管径/mm	坡度/%	流速/(m·s <sup>-1</sup> )	充满度
东西线起端—W1	825.36	28.66	0	28.66	DN400	0.2	0.62	0.40
W1—W2	2 494.60	37.66	28.66	66.32	DN400	0.3	0.89	0.57
W2—W3	3 908.58	32.49	66.32	98.81	DN400	0.6	1.27	0.59
南北线起端—W4	1 407.60	32.36	0	32.36	DN400	0.2	0.64	0.43

区域1按商铺用水定额为6 L/(m<sup>2</sup>·d)、用水时长为12 h、时变化系数为1.5、污水排放系数为0.95计

算,区域2~4按人均综合用水定额为300 L/(人·d)、污水排放系数为0.85、《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)表3.1.3中的污水量总变化系数 $K_z$ 计算。管道于2016年6月竣工并投入使用,目前住户入住率及商家入驻率均达80%左右。在两条管线上设置4个监测点,如图1所示。

### 1.2 监测参数及方法

监测参数主要包括:流量 $Q$ 、流速 $v$ 和水深 $h$ 。采用多普勒超声波流量计,该流量计利用超声波流速传感器测量流速,利用压力式水位计测量水深,并利用预先在控制器设置的渠道参数,自动换算出过流面积,最后再采用速度面积法求得流量。流量计安装位置为检查井上游管段末端,距出口约0.5 m,以保证流态均匀稳定(见图2)。考虑到可保存数据量的限制及仪器电池消耗等因素,将监测频率设置为每5 min读取一次数据,每日各参数可测得288个数据,W1~W4各点实测时长分别为5、18、4、9 d,共获得31 104个数据。

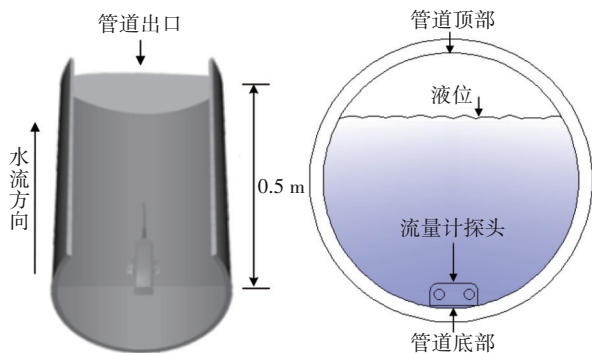


图2 流量计主机安装示意

Fig.2 Flow meter installation

### 1.3 分析方法

利用Excel对水力参数实测结果进行统计计算,计算方法见式(1)~(4),并将实测值与设计值进行比较。

$$\text{平均流速} = \sum_{i=1}^m \frac{v_i}{m} \quad (1)$$

$$\text{平均流量} = \sum_{i=1}^m \frac{Q_i}{m} \quad (2)$$

$$\text{平均充满度} = \sum_{i=1}^m \frac{h_i}{D \times m} \quad (3)$$

$$K_z = \frac{\text{实测最高日最高时污水量}}{\text{实测平均日平均时污水量}} \quad (4)$$

式中: $m$ 为某监测点所有监测数据数量; $Q_i$ 为实

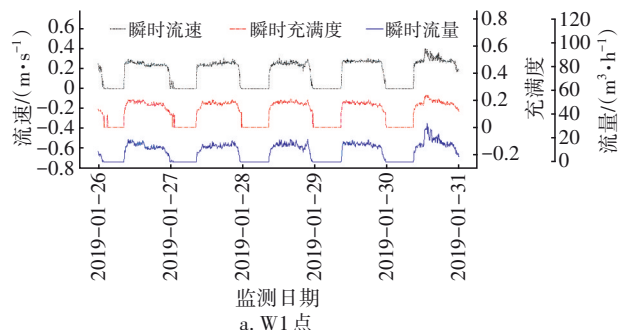
测瞬时流量; $v_i$ 为实测瞬时流速; $h_i$ 为实测瞬时水位; $D$ 为管径。

此外,绘制各管段流速、充满度及流量累积频率分布曲线,以统计特征频率对应的水力参数特征值。

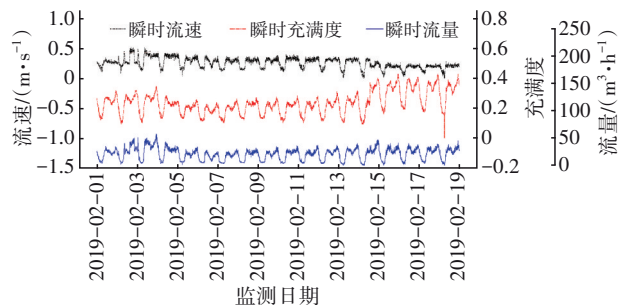
## 2 结果与讨论

### 2.1 水力参数实测值与设计值的比较

水力参数监测结果见图3。可知,各监测点的污水流量呈现昼夜变化,污水排放集中在白天,夜间污水排放较少。W1点白天污水流量变化较为平缓,符合商场排水特征;W2~W4点白天污水流量变化幅度较大,符合居民生活排水特征。流速方面,W1~W4监测点的平均流速分别为0.16、0.25、0.52、0.29 m/s,均未达到不淤流速0.60 m/s;最大流速分别为0.40、0.51、1.10、0.55 m/s,均低于设计流速0.62、0.89、1.27、0.64 m/s。充满度方面,W1~W4监测点的平均充满度分别为0.14、0.23、0.21、0.26,远低于设计充满度0.40、0.57、0.59、0.43;最大充满度分别为0.24、0.43、0.34、0.54,远低于DN400管道允许的最大设计充满度0.65。流量方面,W1~W4监测点的平均流量分别为8.20、21.00、41.69、32.89 m<sup>3</sup>/h,最大流量分别为32.49、57.28、118.41、109.13 m<sup>3</sup>/h,远低于设计流量103.18、238.75、355.72、116.50 m<sup>3</sup>/h。可见,各监测点的平均流速、充满度及流量均低于设计值,说明各监测点的水力利用效率较低,管径偏大。



a. W1点



b. W2点



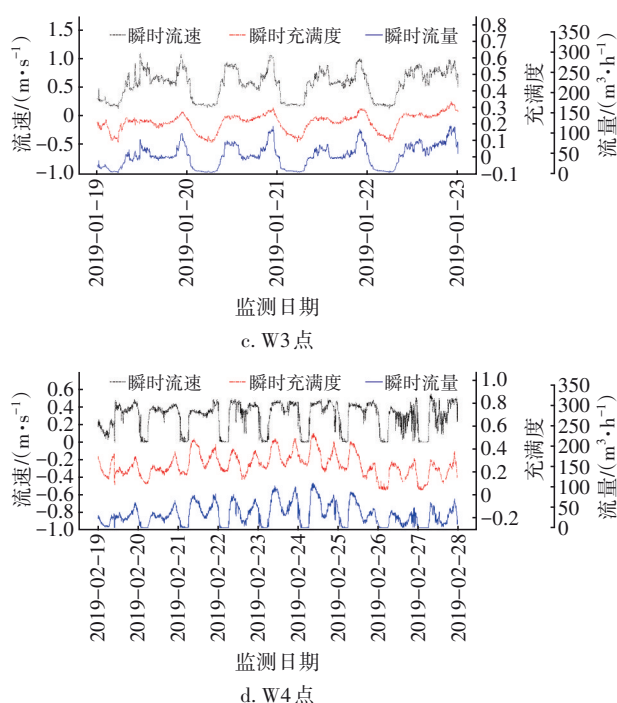


图3 水力参数监测结果

Fig.3 Monitoring results of hydraulic parameters

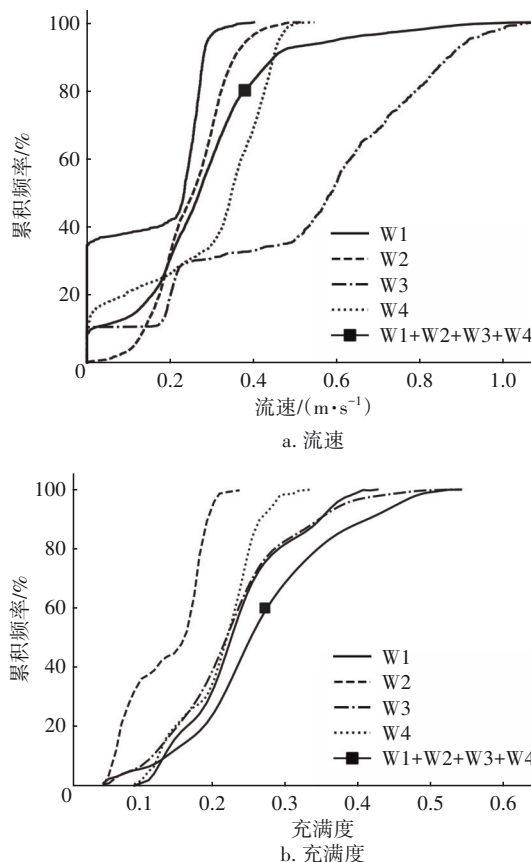
W1和W4点位于起端管段,流量较小,若没有市政排水管道管径不小于DN400的要求,按照表2中的设计流量,均可选用DN300管道,此时W1点的设计坡度为0.3%、设计流速为0.72 m/s、设计充满度为0.55、设计流量为28.66 L/s, W4点的设计坡度为0.4%、设计流速为0.83 m/s、设计充满度为0.54、设计流量为32.36 L/s,水力利用效率得以提高;利用实测最大时流量(W1点为32.49 m³/h、W4点为109.13 m³/h)进行试算, W1和W4点的实际流速分别为0.53、0.82 m/s,实际充满度分别为0.29、0.52,两个监测点的充满度均未超过DN300的最大设计充满度0.55,过流能力满足实际要求。根据表2中W2和W3点的设计流量重新进行水力计算,发现在该设计流量下选用DN400是合理的,而W2和W3点的实测流量及流速远小于设计值,可能是因为设计流量估算偏高。该设计完成于2013年,根据当时的《室外给水设计规范》(GB 50013—2006),重庆市属于一区超大城市,平均日综合生活用水定额取值为210~340 L/(人·d),该设计取值为300 L/(人·d),而新的《室外给水设计标准》(GB 50013—2018)已将重庆市调整到二区,其平均日综合生活用水定额取值修正为150~230 L/(人·d),可见原设计中平均日综合生活用水定额的取值确实偏高,从而导致设计

流量偏大。

此外,实测期间各监测点的污水量总变化系数 $K_z$ 值与《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)计算值差距较大, W1~W4点的 $K_z$ 实测值分别为3.76、2.78、2.84、3.31,规范计算值分别为2.11、1.95、1.99、1.99,实测值比规范计算值分别高了78.2%、42.6%、42.7%、66.3%,这与其他人的研究结果有相似之处,如王立彤等<sup>[1]</sup>通过监测某污水主干管发现, $K_z$ 实测值比规范计算值高14%;赵勇<sup>[4]</sup>通过监测乌鲁木齐某主排污管线发现, $K_z$ 实测值比规范计算值高9.8%。这可能是因为, $K_z$ 规范计算值是基于污水厂或泵站流量获得的,而监测管段服务人口较少,所以生活污水流量变化幅度较大。另外,本研究监测的是起端市政污水管道,小流量管道的污水量变化幅度大于市政主干管,所以本研究中的 $K_z$ 实测值也高于其他研究者对市政主干管的 $K_z$ 实测值。

## 2.2 水力参数分布特征分析

为更好地了解水力参数的分布情况,对各监测点的流速、充满度和流量的累积频率进行了统计,结果如图4所示。



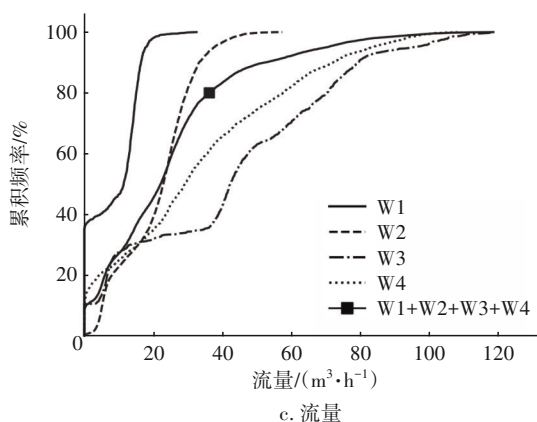


图4 各监测点的流速、充满度和流量的累积频率分布曲线

Fig.4 Cumulative frequency curves of flow velocity, fullness and flow rate for monitoring sites

由图4(a)可知, W1点42%的流速 $\leq 0.2$  m/s, 54%的流速介于 $0.2 \sim 0.3$  m/s, 4%的流速在 $0.3 \sim 0.4$  m/s之间; W2点32%的流速 $\leq 0.2$  m/s, 37%的流速介于 $0.2 \sim 0.3$  m/s, 27%的流速在 $0.3 \sim 0.4$  m/s之间, 4%的流速介于 $0.4 \sim 0.5$  m/s; W3点20%的流速 $\leq 0.2$  m/s, 11%的流速介于 $0.2 \sim 0.3$  m/s, 2%的流速介于 $0.3 \sim 0.4$  m/s, 3%的流速介于 $0.4 \sim 0.5$  m/s, 17%的流速介于 $0.5 \sim 0.6$  m/s, 28%的流速介于 $0.6 \sim 0.8$  m/s, 17%的流速介于 $0.8 \sim 1.0$  m/s, 2%的流速 $> 1.0$  m/s; W4点26%的流速 $\leq 0.2$  m/s, 9%的流速介于 $0.2 \sim 0.3$  m/s, 34%的流速介于 $0.3 \sim 0.4$  m/s, 31%的流速介于 $0.4 \sim 0.5$  m/s。总体来说, W1、W2和W4点的流速分布较为集中, 大部分处于 $0.4$  m/s以下, 而位于管道后端的W3点流速分布较为分散, 表明服务范围对流速变化幅度有一定的影响。另外, W1~W4监测点95%累积频率流速依次为 $0.29$ 、 $0.39$ 、 $0.92$ 、 $0.46$  m/s, W3点的流速虽明显大于其余监测点, 但有53%的流速在 $0.60$  m/s以下, 即W3点也有一半以上的流速低于不淤流速, 表明各监测点的水力效率较低。

由图4(b)可知, W1点93%的充满度 $\leq 0.2$ , 7%的充满度介于 $0.2 \sim 0.3$ ; W2点30%的充满度 $\leq 0.2$ , 52%的充满度介于 $0.2 \sim 0.3$ , 18%的充满度介于 $0.3 \sim 0.4$ ; W3点32%的充满度 $\leq 0.2$ , 66%的充满度介于 $0.2 \sim 0.3$ , 2%的充满度介于 $0.3 \sim 0.4$ ; W4点22%的充满度 $\leq 0.2$ , 47%的充满度介于 $0.2 \sim 0.3$ , 19%的充满度介于 $0.3 \sim 0.4$ , 10%的充满度介于 $0.4 \sim 0.5$ , 2%的充满度 $> 0.5$ 。总体来说, W1、W2和W3点的充满度分布较为集中, W4点的充满度分布

较为分散, 这与流速情况有反差, 其原因尚待探究。另外, W1~W4及所有监测点的95%累积频率充满度依次为 $0.20$ 、 $0.37$ 、 $0.28$ 、 $0.45$ 、 $0.38$ , 表明绝大部分情况下水力效率较低。

### 2.3 分析与讨论

前已述及, 部分城市有增大起端污水管道管径的倾向, 且实际设计中也偏于保守而扩大管径, 但是否能起到预防管道堵塞的作用尚难判断。采用CCTV(闭路电视系统)管道机器人对该城区污水管道进行排查的结果表明, 绝大多数管道堵塞是由施工弃块、树根、管道破坏、检查井坍塌等原因造成的, 与管径大小的关系还难于推断<sup>[5]</sup>。柳州市类似的排查也表明障碍物是管道堵塞的主要问题<sup>[6]</sup>, 但其与管径的联系也难以判定。就本研究结果来看, 起端管径DN400造成实际充满度及流速都显著偏小, 不仅浪费投资及输水能力, 而且由于管径偏大, 还可能加剧管道淤积, 不利于管道运行。扩大管径未必能避免管道堵塞, 而缩小管径也未必会显著增加上述原因之外的堵塞, 管径大小与管道堵塞的关系还值得进一步研究和探讨。

同时, 过分放大管径可能会导致流速过低, 从而增加污水在管道中的停留时间。对于W1点, 按其实际平均流量 $8.20$  m<sup>3</sup>/h( $2.28$  L/s)计算, 在相同设计坡度即 $0.2\%$ 的条件下, DN500、DN400、DN300管径对应的流速分别为 $0.29$ 、 $0.30$ 、 $0.31$  m/s, DN500和DN400相比DN300分别降低了 $6.5\%$ 和 $3.2\%$ ; 以管长 $1.5$  km计, DN500、DN400、DN300管径对应的平均水力停留时间分别为 $1.44$ 、 $1.39$ 、 $1.34$  h, DN500和DN400相比DN300分别增加了 $7.5\%$ 和 $6.0\%$ 。对于同为起端管道的W4点, 在相同设计坡度即 $0.2\%$ 的条件下, DN500、DN400、DN300管径对应的流速分别为 $0.44$ 、 $0.45$ 、 $0.46$  m/s, DN500和DN400相比DN300分别降低了 $4.3\%$ 和 $2.2\%$ ; 以管长 $1.5$  km计, DN500、DN400、DN300管径对应的平均水力停留时间分别为 $0.95$ 、 $0.93$ 、 $0.91$  h, DN500和DN400相比DN300分别增加了 $4.4\%$ 和 $2.2\%$ 。以上分析是对于起端小管径管道而言的, 对于大管径管道, 不合理的管径偏大设计可能会导致更大的停留时间变化。按照各监测点的实测平均流速计算,  $1$  km污水管道内的水力停留时间将达到 $1$  h。此外, 英国的室外排水系统设计标准(BS EN 752—2017)中规定, 对于直径较小的污水管

道(低于DN300),通常确保流速至少为0.7 m/s,以实现管道自净。马来西亚的污水系统设计规范(MS 1228:1991)中规定,污水管道设计流速的范围在0.8~4 m/s之间。因此,盲目和片面扩大管径不见得合理,应对管道输水安全、堵塞机制(如与管径的关系)及水质效应等进行综合分析后科学确定。

### 3 结论

长期以来,我国虽然重视排水管道规划设计的理论研究,但忽视了对排水管道系统建成后实际运行状况的跟踪调查与监测,现有设计体系的实践效果和科学合理程度到底如何,例如流量计算是否准确、管径是否偏大,难以准确判断。污水支管(含非计算管段)在污水管网中占有相当大的比例,片面增加最小管径可能会造成管道利用效率较低。而由于水力停留时间的增加,可能会导致管道中的有机物降解率增加,加重碳源不足问题,未来值得深入研究。近年来,我国对城市污水处理和水污染控制实际绩效空前重视,对城市排水系统的运行和维护要求也日益提高,在此背景下,开展排水管道系统实际运行状况的调查,并反馈于管道设计的理论基础,以优化管道设计,对于提升排水管道的利用效率、污水处理效果以及改善水环境质量,具有重要的意义。

### 参考文献:

- [1] 王立彤,毛瑞祥,王森,等. 市政污水流量峰值波动特点的研究[J]. 青岛理工大学学报, 2010, 31(3): 59-63.
- WANG Litong, MAO Ruixiang, WANG Sen, *et al.* The investigation and study of peak variety in town sewage flow [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2010, 31(3): 59-63 (in Chinese).
- [2] 郑志佳,李绍秀. 流量监测在排水管网中的应用[J]. 能源与环境, 2013(2): 11-13.

ZHENG Zhijia, LI Shaoxiu. Application on the flow monitoring in the drainage network [J]. Energy and Environment, 2013(2): 11-13 (in Chinese).

- [3] 何人杰,吴林安,董鲁燕,等. 污水管网在线流量监测技术在无锡市的应用[J]. 环境工程, 2011, 29(5): 123-126.

HE Renjie, WU Lin'an, DONG Luyan, *et al.* Application of on-line flow monitoring of sewerage system in Wuxi City [J]. Environmental Engineering, 2011, 29(5): 123-126 (in Chinese).

- [4] 赵勇. 城市污水流量峰值特点及其波动性分析——以乌鲁木齐市为例[J]. 水利科技与经济, 2014, 20(9): 113-115.

ZHAO Yong. Analysis on peak characteristics and volatility of urban sewage flow—a case study on Urumqi [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2014, 20(9): 113-115 (in Chinese).

- [5] 董晓霞,董晓婷. 排水管道机器人应用实例分析及应用建议[J]. 科学技术创新, 2018(25): 148-149.

DONG Xiaoxia, DONG Xiaoting. Application case and suggestion of drainage pipe robot [J]. Scientific and Technological Innovation, 2018 (25): 148-149 (in Chinese).

- [6] 孟宪翠,黄翔,王莎莎,等. 柳州市区某截污管道 CCTV 检测与修复实践[J]. 给水排水, 2018, 44(12): 93-97.

MENG Xianhui, HUANG Xiang, WANG Shasha, *et al.* Intercepting sewer CCTV inspection and repair practices in Liuzhou City [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(12): 93-97 (in Chinese).

**作者简介:**姜文超(1973—),男,河南上蔡人,博士,副教授,主要从事城市排水系统方面的教学研究、新技术开发和咨询设计工作。

**E-mail:** wchjiang@cqu.edu.cn

**收稿日期:** 2019-11-22

**修回日期:** 2020-04-27

(编辑:刘贵春)