

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.20.018

北京市延庆区排水管网监测及运行状态分析

李志丽¹, 姜明洁^{1,2}, 潘冉¹, 冀薪宇¹, 阎宇¹, 赵冬泉³, 李萌³
(1.北京北排智慧水务有限公司,北京 100032; 2.北京城市排水集团有限责任公司第四管网运营分公司,北京 100032; 3.北京清环智慧水务科技有限公司,北京 100032)

摘要: 北京市延庆区污水厂的日进水量与自来水厂日供水量规模存在差异,对该区域污水管网的流量、液位等水力要素进行监测采集。监测期间对在线监测设备进行定期维护,确保监测数据的可靠性。监测结束后对监测数据进行统计,分析流量、液位的变化规律,评估排水管网的运行状态,掌握外来水情况。该方法可为北方其他城区快速评估排水管网的运行状态提供参考。

关键词: 排水管网; 管网监测; 运行状态

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)20-0099-07

Monitoring and Operating Condition Analysis of Urban Sewer Network in Yanqing District, Beijing

LI Zhi-li¹, JIANG Ming-jie^{1,2}, PAN Ran¹, JI Xin-yu¹, YAN Yu¹, ZHAO Dong-quan³, LI Meng³

(1. Beijing BEIPAI Smart Water Co. Ltd., Beijing 100032, China; 2. No. 4 Network Operation Company, Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100032, China; 3. Beijing Tsinghuan Smart Water Tech. Co. Ltd., Beijing 100032, China)

Abstract: There is a difference between the daily wastewater intake of the sewage plant and the daily water supply capacity of the waterworks in Yanqing District of Beijing. The hydraulic elements such as flow and liquid level of sewage network in this district are monitored and collected. During the monitoring period, the online monitoring equipment is regularly maintained to ensure the reliability of the monitoring data. At the end of the monitoring, statistical analysis is performed on the data to analyze the changes in flow and liquid level, to evaluate the operating condition of the sewer network, and to grasp the external water situation. This method can provide a reference for rapidly assessing the operating condition of sewer network in other northern urban areas.

Key words: sewer network; pipe network monitoring; operating condition

随着城市的快速发展,地下排水管网不断延伸并日趋复杂化,使得保障其正常运行与有效管理变得日益困难。由于该系统具有体系庞大、隐蔽性、环境恶劣、水力水文条件复杂等特点,且缺乏现代化管理理念及手段,使得城市排水管网在管理上存在如下问题:①排水管网管理的法规和技术标准不完善^[1];②排水管网数据资料不完善、系统化程度较

低,造成分析、评估、管理工作低质低效;③排水管网重建设、轻管理,整体性处置效果不佳^[2];④现代化管理手段处于初级阶段,管网从设计、建设、运营到养护,缺乏有效的管网状态评估、运行监测手段和全过程运行管理平台,无法及时掌握管网水力负荷和实时运行状态,导致评估分析、应急处置和管理决策缺乏科学依据,排水管网运行管理效率低下;⑤智慧

化程度有待加强。

借助现代化技术手段,充分借鉴“互联网+”思维,建设分层、分类、分区的排水管网在线监测体系,动态反映排水管网运行状态,建立起以集成传感器(包括在线流量计、液位计等)为主要手段的监测网络,通过搭建数据传输系统构成的实时监测体系^[3],可以及时准确获取排水管网中的各项重要信息(如水量、液位、损害状况等),从而将被动管理模式变为主动管理模式。通过在线监测系统,构建以数据为核心的新型管理模式,以现场在线监测数据为基础,以数据统计分析为手段,以数据运行反馈为优化依据,辅助排水系统从规划设计、建设施工、运行维护到评估改造进行全过程的精细化与科学化管理。

1 研究区域概况

北京延庆区城西污水厂日进水量高出自来水厂供水量约 $(1.0 \sim 2.0) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,可能的原因分析如下:

- ① 北城管线建设年代较早,可能出现管道破损,造成地下水入渗。
- ② 南城、北城中间为城市内湖,水位常年稳定。在南、北岸沿湖存在过湖波纹管,可能出现管道破损,造成湖水入渗。
- ③ 再生水利用前期用于管道冲洗,后期产生污水量 $2\ 000 \sim 3\ 000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。
- ④ 存在 10 余个村落的农村自备井,每个村增加的排水量约 $200 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

为确定外来水来源与比例,本次监测覆盖该区主要污水管网和截污干管,主要是妫水河的南、北两侧片区污水管网。针对污水主干管的主要节点、主要支管节点、截污干管的关键节点等进行流量和液位监测,重点排查城区污水管网地下水入渗情况,结合在线监测采用夜间最小流量法估算各支管管段基础入渗量^[4],对穿河管段进行流量监测,与人工水质检测相结合。该监测范围面积约 23.54 km^2 、管网长 84.117 km 、检查井 $2\ 245$ 座,监测时间为2019年6月—7月。

2 监测设计方案与实施

根据现状及需求分析,监测实施技术路线如图1所示,其监测分析的关键步骤在于根据需求合理确定监测点、设备安装准确可靠、数据分析和定期运维等4个方面。

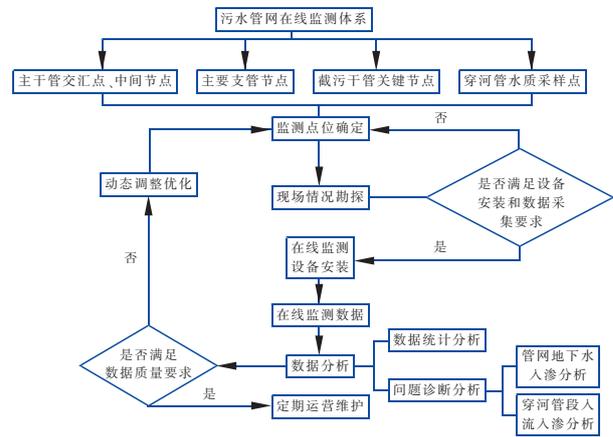


图 1 污水管网在线监测技术路线

Fig. 1 Roadmap of on-line monitoring technology for sewage network

2.1 监测技术架构

在线监测网络软硬件紧密集成,主要包括3部分:监测主机装置、监测中继器装置和数据中心^[5]。监测主机装置利用超声波与压力(雷达)组合的传感器对监测点进行在线同步监测,获得逐分钟的连续液位监测数据,并按照可变化的智能传输时间间隔(当监测液位低于用户预设的预警值时,间隔 15 min ;当监测液位高于预警值时,间隔 5 min ;当监测液位高于预设的报警值时,间隔 1 min),将数据传输给监测中继器装置。监测中继器装置接收监测数据,通过GPRS通信网络或其他无线网络将监测数据传输给数据中心。数据中心为具有独立因特网IP地址的云服务器主机或独立计算机的数据服务器,它接收并解析监测数据,将其存入数据库;对数据进行统计分析,并为用户提供可视化展示;同时,在发现液位异常时,动态发布报警信息,并通过微信或短信推送到手机端提醒用户。

2.2 监测点与水质采样布设

针对该项目需求,共布设14台在线流量计,具体位置见图2。

W1、W7~W13布设在主要支管节点,估算监测点支管管段的地下水入渗量;W2~W6布设在主要干管节点,W14布设在截污干管关键节点,统计分析管网流量、液位变化规律。

根据穿河管现状并结合水质采样目的,共布置4个采样点,其中0为河水采样点,1、2为穿河管穿河前的采样点,3为穿河管穿河后的采样点。具体点位见图3。

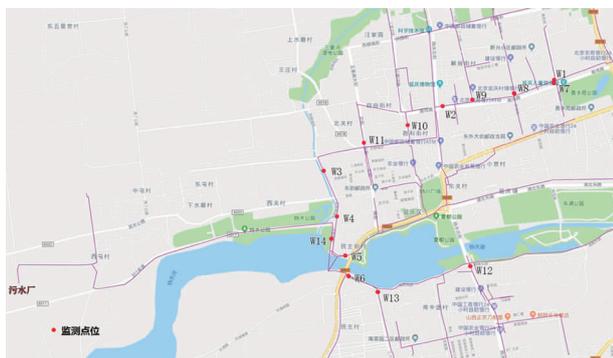


图2 在线流量监测布点

Fig. 2 On-line flow monitoring points layout



图3 水质取样布点

Fig. 3 Water quality sampling points layout

2.3 设备安装与维护

① 设备安装

确定监测点位置后进行在线流量计安装。安装设备包括流量计主机、中继器及配套支架;安装在线流量计之前应了解现场情况。目前结合国内现场工况,在线流量计主要有标准杆式安装和非标准定制化安装两种,前者主要用于标准排水井位置,而对于排口、河道等非标准情况,采用定制化安装,以保证传感器能稳定可靠地固定在管道中心线,获取具有代表性的速度监测值,方便进行探头的安装及维护工作^[6]。在线流量计安装完毕,通过便携式手持流量计对在线流量计进行校准,以保障监测数据真实有效。

② 设备维护

排水在线监测为接触式测量,由于污水管道具有易堵、管道工况复杂的特点,可能产生杂物缠绕,因此需要由专业的运营人员定期对监测设备进行巡查养护,避免对设备的监测精度和准确性造成影响;及时清洗设备传感器,以避免污物对传感器造成污染而导致的监测误差,提高数据保障度;同时通过监

测平台监视数据变化趋势,当数据出现异常变化时赶赴现场及时勘查,排除设备异常等可能的环境干扰。巡查养护频率建议1次/周。

2.4 监测数据校核

监测数据校核是指对在线流量监测仪获取的流速、液位原始数据进行评估检查,是监测数据分析的重要步骤。对稳定运行的城市生活污水系统,有效的液位变化过程符合水力学规律且表现出可重复性。由于污水管道监测工况复杂,污水流量变化幅度大,反映为监测数据出现异常。监测数据异常分为数据丢失、数据零值、数据偏移等。常用的监测原始数据异常值判断方法主要有三倍标准差法、滑动窗口法、滤波方法等。

由于监测数据异常值的取值对后续数据处理以及定量化分析的影响很大,因此需要对监测异常数据进行剔除并校核。在数据校核过程中,最大限度地避免将正常数据误判为异常值,是异常数据筛选的重要原则之一。截断点法较好地克服了主观选择判断参数的问题,且算法简明。采用截断点法^[7]识别出异常液位,并对识别出的无效液位数据采用均值法处理以还原其液位记录(见图4)。

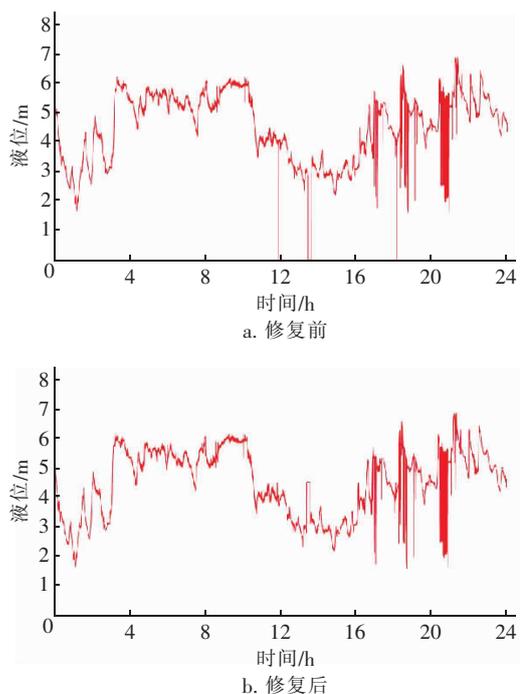


图4 液位数据修正前、后变化示例

Fig. 4 Example of changes of liquid level data before and after correction

由图4可知,修正后各监测点液位变化曲线的

分布集中且表现出较好的可重复性。

3 污水管网监测诊断分析

3.1 分析方法

① 聚类分析法

聚类分析也称群分析或点群分析,是研究多要素事物分类问题的数量方法。根据样本本身的属性,得到数据间的相似性,确定其亲疏关系,按这种方法进行聚类。

将每日流量、液位的时均值进行聚类分析。以某监测点为例:将 30 组流量、液位数据进行冰柱分析,提取得到 9 组流量相似数据,13 组液位相似数据。根据监测点流量、液位数据聚类分析的结果,选取流量、液位变化趋势相关性较高的典型日绘制时均值流量、液位变化曲线,见图 5。

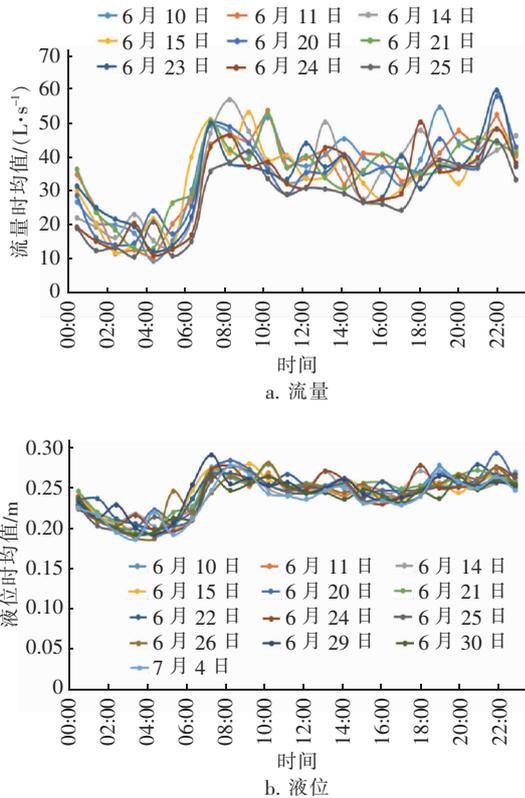


图 5 监测点典型日时均流量、液位变化曲线

Fig. 5 Typical daily average flow and liquid level change curve of monitoring points

利用该点的典型日流量数据可以推算出监测点污水排水的时变化系数,识别该点的排污变化规律(见图 6)。

从图 5、6 可知:监测期间该点典型日的流量变化波动幅度较大,典型日时均流量最大值为 59.42

L/s,最小值为 9.06 L/s,平均值为 33.42 L/s,说明上游收水范围用地类型相对复杂。该点典型日液位变化规律一致性较强,波动幅度较小,典型日时均液位最大值为 0.291 m,最小值为 0.184 m,平均值为 0.241 m。根据该点流量时变化系数曲线可知:流量在 07:00 和 22:00 左右分别达到峰值,在 04:00 达到谷值,与生活污水排放规律相近。

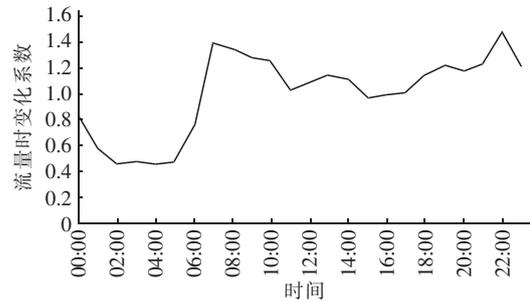


图 6 监测点流量时变化系数曲线

Fig. 6 Coefficient curve of flow variation at the monitoring point

② 夜间最小流量法

夜间最小流量法目前是国内外公认的评价排水管道地下水入渗量的主要方法之一^[8]。本次研究监测所得数据,需满足源头为小区地块、地下水位高于敷管深度、排水规律性较强、非降雨时段地下水入渗量全天为恒定值、在凌晨 03:00—05:00 排水系统内污(废)水流入量较少、管道充满度小于 0.1 的数据分析需要。通过实测掌握夜间最小用水量或污水量数据,将其从夜间最小流量中扣除,可得到污水系统的地下水入渗量。

③ 水质物料守恒算法

污水经过河道,由上游点位到下游点位,假设上游井口污染物浓度为 a ,流量为 1 L/s;河道污染浓度为 b ,进入管道流量为 X L/s,下游污染物浓度为 c ,流量为 $(1+X)$ L/s。

根据物质守恒定律,污染物总量以及流量保持不变,则有下列式成立:

$$a \cdot 1 + b \cdot X = (1 + X)c \quad (1)$$

式中 a 、 b 、 c 经测得为已知,由此可以得到进入管道的流量 X 的值,进一步求得入流入渗的比例 (T) 为:

$$T = \frac{X}{1 + X} \cdot 100\% = \frac{c - a}{b - a} \cdot 100\% \quad (2)$$

④ 其他分析法

对管道冲洗部分,采用排水管道流量监测的方法;对农村自备井,采用走访调研加排水管道监测的方法;对偷排漏排,采用数据异常分析方法。

3.2 管网运行负荷分析

对主干管和截污干管上监测点的流量进行统计分析,结果见表1。

表1 管网运行负荷统计分析

Tab.1 Pipeline network operation load statistical analysis

监测点	平均流量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)			峰值时间	谷值时间
	最大值	最小值	平均值		
W1	3 475	1 533	2 491	07:00/22:00	04:00
W2	5 133	782	2 887	07:00/22:00	04:00
W3	9 482	5 730	8 195	09:00/23:00	05:00
W4	13 885	5 461	7 003	10:00/19:00	04:00
W5	6 606	2 831	4 992	13:00/23:00	05:00
W6	4 856	1 933	3 573	12:00/21:00	04:00
W7	320	75	177	12:00/21:00	05:00
W8	940	350	571	10:00/19:00	04:00
W9	3 139	2 258	2 765	12:00/21:00	04:00
W10	686	284	369	12:00/21:00	04:00
W11	380	59	161	10:00/19:00	05:00
W12	6 787	1 618	4 466	12:00/21:00	04:00
W13	1 542	849	1 228	13:00/23:00	04:00
W14	37 585	28 238	31 640	14:00/21:00	05:00

3.3 自来水厂、污水厂运行数据分析

根据监测期间的自来水厂日供水量、污水处理厂日进水量数据可知:自来水厂供水量为22 051 ~ 28 711 m^3/d ,平均供水量为26 485 m^3/d ;污水处理厂进水量为34 334 ~ 44 454 m^3/d ,平均进水量为

39 008 m^3/d 。污水处理厂日进水量与自来水厂日供水量量差为8 039 ~ 19 991 m^3/d ,量差平均值为12 523 m^3/d 。

3.4 外来水入流入渗分析

根据前期分析,外来水水源主要包括:

- ① 城区管网地下水入渗;
- ② 穿河管入流入渗;
- ③ 世园会园区管道冲洗用水排放;
- ④ 使用自备井村落的污水排放。

此次监测针对城区管网地下水入渗量、穿河管入流入渗量进行评估计算,对世园会管道冲洗排水量、使用农村自备井村落排水量进行估算。

3.4.1 监测支管管段地下水入渗分析

对主要监测点所在的污水支管管段地下水入渗量采用夜间最小流量法进行评估,监测点W1、W7 ~ W13所在的污水支管管段的日均累计流量和地下水入渗量情况如表2所示。

由表2可知:

① W1、W7 ~ W13所在支管管段的日均累计流量为12 228 m^3/d ,地下水日均入渗总量为3 355 m^3/d ,平均入渗率为27.43%;

② W9、W13所在支管管段入渗程度严重,入渗率分别为47.21%和31.19%;

③ W1、W7、W8、W11、W12所在支管管段入渗程度一般,入渗率为15.45% ~ 27.66%;

④ W10所在支管管段入渗程度正常,入渗率为8.28%。

表2 污水支管监测点位入渗数据

Tab.2 Infiltration data of monitoring points of sewage branch pipes

监测点	日均累计流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	地下水日均入渗量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	平均入渗率 (ψ)/%	入渗程度	所在位置
W1	2 491	402	16.14	一般	高塔路与香苑街路口西北侧
W7	177	46	26.17	一般	高塔路与香苑街路口西南侧
W8	571	89	15.45	一般	高塔路与新城街路口北侧
W9	2 765	1 306	47.21	严重	广兴街与高塔路路口
W10	369	31	8.28	正常	东顺城街友家超市附近
W11	161	45	27.66	一般	玉皇阁大街与北顺城街路口北侧
W12	4 466	1 053	23.57	一般	妫水南街与湖南西路路口南侧
W13	1 228	383	31.19	严重	汇川路与湖南路路口南侧
合计	12 228	3 355	27.43		

注: $\psi < 10\%$,入渗程度正常; $\psi = 10\% \sim 30\%$,入渗程度一般; $\psi = 30\% \sim 50\%$,入渗程度严重; $\psi > 50\%$,入渗程度非常严重。

各监测点所在支管管段入渗程度分布位置如图7所示。

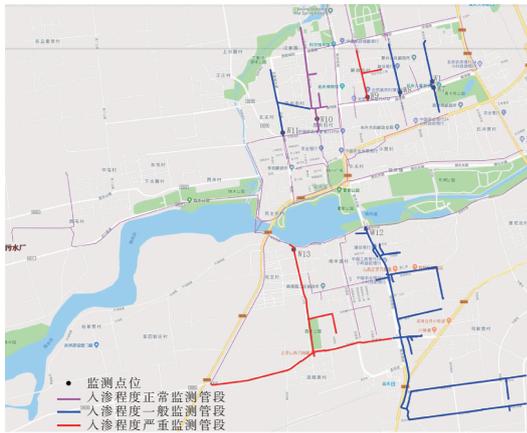


图 7 监测支管管段地下水入渗程度分布

Fig. 7 Monitoring of groundwater infiltration distribution in branch pipe sections

3.4.2 非监测支管管段地下水入渗分析

本次非监测支管管段的地下水入渗量采用用水量折算法进行估算。

非监测支管管段地下水入渗量 = (自来水厂供水量折算原生污水量 - 监测支管原生污水量) × 入渗率 / (1 - 入渗率)。

根据水务局提供的自来水厂供水量资料,监测期间自来水厂的供水量为 22 051 ~ 28 711 m³/d,日均供水量为 26 485 m³/d。按折算系数 0.85 ~ 0.90 转换为原生污水量为 22 512 ~ 23 837 m³/d。

由监测数据知:监测支管管段累计污水总量为 12 228 m³/d,地下水日均入渗总量为 3 355 m³/d,平均入渗率为 27.43%,则非监测支管管段的地下水入渗量为 5 155 ~ 5 656 m³/d,平均为 5 406 m³/d。

因此,城区污水管网地下水入渗量为 8 510 ~ 9 011 m³/d,地下水日均入渗量为 8 761 m³/d。

3.4.3 穿河管河水入流入渗分析

根据片区管网现状情况,城北部分污水通过穿河管与城南污水汇合,再通过一根截污干管穿过妫水河。针对穿河管可能存在河水入流入渗的情况,通过水质采样与流量监测结合的方法进行分析计算。对穿河管管段的河水入流入渗量采用水质物料衡算法进行估算。

水质采样要求:①采样开始前 48 h 没有或只下过非常小的雨。②所有样本在当天内采集并送检。③分析指标为 COD。

根据穿河管现状,水质采样点共 4 个,其中 0 为河水采样点,1 和 2 为穿河管穿河前的采样点,3 为

穿河管穿河后的采样点。监测期间共进行 3 批次的水质采样,水质具体情况如表 3 所示。

表 3 穿河管河水入流入渗情况

Tab. 3 River water inflow and infiltration ratio

项 目	第一批次	第二批次	第三批次
采样点 0 的 COD 测定值/(mg · L ⁻¹)	58	30	20
采样点 1 的 COD 测定值/(mg · L ⁻¹)	309	719	257
采样点 2 的 COD 测定值/(mg · L ⁻¹)	220	416	219
采样点 3 的 COD 测定值/(mg · L ⁻¹)	230	469	211
河水入流入渗比例/%	16.2	10.9	11.7
河水入流入渗量/(m ³ · d ⁻¹)	1 841	1 719	1 644

根据水样的水质检测数据,采用水质物料衡算法计算河水入流入渗比例和入流入渗量,计算得:河水入流入渗比例为 10.9% ~ 16.2%,均值为 12.9%;河水入流入渗量为 1 644 ~ 1 841 m³/d,均值为 1 669 m³/d。

3.4.4 世园会管道冲洗排水量

根据延庆区水务局提供的信息,世园会期间园区在延康路进行管道冲洗,水量为 2 000 ~ 3 000 m³/d。

3.4.5 使用农村自备井村落排水量

根据延庆区水务局提供的信息,片区内有 10 余个村落使用农村自备井,每个村增加的排水量约 200 m³/d,则使用农村自备井村落的排水量为 2 000 m³/d。

4 结论

管网系统具有体系庞大、隐蔽性、环境恶劣、水力水文条件复杂等特点,且缺乏现代化管理理念及手段,使得城市排水管网在管理上存在很多问题。针对延庆区污水厂的日进水量与自来水厂日供水量规模存在差异这一问题,通过在线监测系统,构建以数据为核心的新型管理模式,以现场在线监测数据为基础,以数据统计分析为手段,以数据运行反馈为优化依据,辅助排水系统从规划设计、建设施工、运行维护到评估改造进行全过程的精细化与科学化管理。

本次监测评估的外来水主要包括:①监测支管管段地下水入渗量;②非监测支管管段地下水入渗

量;③穿河管河水入流入渗量;④世园会管道冲洗排水量;⑤使用农村自备井村落排水量。

由监测数据可知:片区管网的外来水入流入渗量为 14 154 ~ 15 852 m³/d,日均值为 14 930 m³/d。监测支管管段地下水入渗量、非监测支管管段地下水入渗量、穿河管河水入流入渗量、世园会管道冲洗排水量、使用农村自备井村落排水量占外来水总量的比例分别为 22.47%、36.21%、11.18%、16.74%、13.40%。

污水厂日进水量与自来水厂日供水量的量差为 8 039 ~ 19 991 m³/d,平均值为 12 523 m³/d,外来水入流入渗量和污水厂进水量与自来水厂供水量的差值较接近,验证了污水厂的超额外来水确系由管网地下水入渗、河水入流入渗、世园会管道冲洗排水、使用农村自备井村落排水等外来水水源所致。

参考文献:

- [1] 都焕锋,陈佳,郑文田. 城市排水管网建设与运营问题剖析[J]. 城乡建设,2017(15):11-14.
DU Huanfeng, CHEN Jia, ZHENG Wentian. Analysis of urban drainage network construction and operation [J]. Urban and Rural Development, 2017 (15): 11 - 14 (in Chinese).
- [2] 杨光. 城市排水管网的现代化管理[J]. 市政技术, 2010,28(1):81-83.
YANG Guang. Modernization management of urban drainage system [J]. Municipal Engineering Technology, 2010,28(1):81-83 (in Chinese).
- [3] 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).
- [4] 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.
WANG Mengjiang, ZHOU Hua, CHEN Hua. Status quo of groundwater infiltration in Shanghai urban drainage system and countermeasures [J]. Shanghai Water, 2003 (3): 15 - 18 (in Chinese).
- [5] 赵冬泉,李雪森,唐兰贵,等. SmartWater 智能在线液位监测预警系统介绍及应用[J]. 给水排水,2015,41(9):95-100.
ZHAO Dongquan, LI Xuesen, TANG Langui, et al. Introduction and application of the SmartWater intelligent on-line liquid level monitoring pre-alarmed system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41 (9): 95 - 100 (in Chinese).
- [6] 蔡剑明. 时差式超声波流量计的原理及应用[J]. 内蒙古科技与经济,2007(24):91-92.
CAI Jianming. Principle and application of time difference ultrasonic flowmeter [J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2007 (24): 91 - 92 (in Chinese).
- [7] 黄二辉,潘德炉,李淑菁,等. 水下剖面光谱原始数据异常值的判断方法[J]. 海洋学研究,2006,24(1):91-96.
HUANG Erhui, PAN Delu, LI Shujing, et al. Comparing methods for identifying the outliers in the in-water profile spectral data [J]. Journal of Marine Sciences, 2006, 24 (1): 91 - 96 (in Chinese).
- [8] 王溯,李田,冯沧,等. 排水系统地下水渗入量的水力学模型辅助评估[J]. 中国给水排水,2010,26(10):13-18.
WANG Su, LI Tian, FENG Cang, et al. Hydraulic model-assisted evaluation of groundwater infiltration rate into drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26 (10): 13 - 18 (in Chinese).

作者简介:李志丽(1991-),女,河北唐山人,硕士,工程师,主要从事城市雨洪管理工作。

E-mail: lizhili1012@163.com

收稿日期:2020-03-13

修回日期:2020-03-18

(编辑:衣春敏)