

城市污水系统水量平衡分析

谢恬颖, 范丹丹

(上海市排水管理事务中心, 上海市 200001)

摘要: 城市污水系统的水量平衡分析是保障城市水环境安全的核心环节, 涉及原生污水量、设施运行量、地下水渗入量和雨水进入量这4类关键水量的动态交互。以“厂、站、网、户”4个方面为研究对象, 分析上海市中心城区3条典型支线污水系统上述4类水量的组成量, 结果表明: 1号、2号、3号支线2022年的地下水渗入率分别为20.5%、14.1%和7.5%, 2023年的地下水渗入率分别为16.1%、14.5%和25.9%。雨污混接改造措施可使地下水渗入量得到一定程度的整治, 但管网长期处于高水位运行, 且地下水位较高, 如降低污水管道运行水位, 地下水渗入率可能会升高; 1号、2号、3号支线2022年雨水进入比例分别为0.4%、0%和6.9%, 2023年雨水进入比例分别为0%、10.6%和10.2%, 随着初期雨水治理力度的加大, 分流制系统的雨水进入量有所增加。

关键词: 原生污水量; 设施运行量; 地下水渗入量; 雨水进入量; 水量分析

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0253-03

Analysis of Water Volume Balance in Urban Sewage Systems

XIE Tianying, FAN Dandan

(Shanghai Municipal Drainage Management Affairs Center, Shanghai 200001, China)

Abstract: The analysis of water volume balance in urban sewage systems is a central part in ensuring the safety of urban water environments, encompassing the dynamic interaction among four key water volumes, such as raw sewage, facility discharge, groundwater infiltration and rainwater infiltration. Taking four aspects of "WWTPs, pumping stations, sewer networks and households" as the research objects, the composition of these four water volumes in three typical branch sewage systems in the central urban area of Shanghai is analyzed. The result shows that in 2022, the groundwater infiltration rates of Branch 1, Branch 2 and Branch 3 were 20.5%, 14.1% and 7.5%, respectively, and in 2023, were 16.1%, 14.5% and 25.9%, respectively. The reconstruction measures for rainwater and sewage mixed connection can make the groundwater infiltration managed to a certain extent. But the pipeline networks are operated at the high water level for a long time and the level of groundwater is higher. If the operation water level of sewage pipelines is reduced, the groundwater infiltration rate may increase. In 2022, the proportions of rainwater inflow for Branch 1, Branch 2 and Branch 3 were 0.4%, 0%, and 6.9%, respectively. And in 2023, they were 0%, 10.6% and 10.2%, respectively. With intensified efforts in initial rainwater management, the rainwater volume into separated sewer systems has increased.

Keywords: raw sewage; facility discharge; groundwater infiltration; rainwater inflow; water volume analysis

0 引言

城市污水系统作为现代城市基础设施的重要组成部分, 其运行效率直接关系到城市水环境质量和公共卫生安全。随着城镇化进程加快和人口规模扩大, 污水系统面临水量波动加剧、管网老化渗漏、雨污混接等问题。水量平衡分析通过量化污水系统中原生污水量、设施运行量、地下水渗入量和雨水进入量这4类关键水量, 可以为管网改造、处理设施扩容

和雨污分流决策提供科学依据, 已逐渐成为学界和工程界关注的焦点。

原生污水量作为污水系统的基础输入量, 与城市人口密度、用水模式和产业结构密切相关。研究表明, 居民生活污水量通常占城市污水总量的60%~75%, 日变化系数可达1.5~2.0^[1], 呈现显著的时段波动特征。污水处理厂、泵站等设施的运行量直观反映出污水系统的实际运行效率, 决定了系统的承载力边界。地下水渗入量作为隐蔽性水量组分, 其精准量化长期面临着技术瓶颈。根据渗流方向差异, 地下水渗入量可分为主动型(管道破损导致地下水持续内渗)与被动型(水力梯度逆转引发污水外渗)2

收稿日期: 2025-04-07

作者简介: 谢恬颖(1993—), 女, 博士, 工程师, 从事排水调度监管工作。

类,前者占渗入总量的 60%~80%^[2]。雨水进入量的非线性特征对污水系统韧性构成严峻挑战。在合流制区域,降雨初期 30 min 的径流量可占整场降雨入流量的 70% 以上,大量悬浮固体直排河道,与地表污染物冲刷效应密切相关^[3];而在分流制区域,管道错接可使旱季雨水进入量达到日均流量的 12%~15%^[4]。原生污水量、设施运行量、地下水渗入量和雨水进入量这 4 类水量构成了污水系统的动态平衡体系,它们既相互独立又存在复杂的关联性,共同影响着污水处理设施的处理效能以及整个污水系统的可持续运行。

本文以“厂、站、网、户”4 个方面为研究对象,通过全面采集、测算、分析城市污水系统原生污水量、设施运行量、地下水渗入量、雨水进入量这 4 类水量,进而测算污水系统内的地下水渗入率和雨水进入比例,以期进一步加强雨污水管网管理,提升污水厂运行效能,减少末端溢流,为城市污水系统的管控提供依据。

1 系统概况

上海市已基本建成治污为本、截污为先、标本兼治的水环境保护体系,形成了 6 大污水治理区域格局。截至 2023 年底,本市中心城区污水厂设计规模为 724.0 万 m³/d,日均实际处理量 635.1 万 m³/d,运行负荷率达 87.7%。

本研究选取上海市中心城区 3 条典型支线污水系统为研究对象。其中,1 号支线位于石洞口区域,上游总服务范围 22.4 km²,污水出路由西干线汇入石洞口污水处理厂;2 号支线位于白龙港区域,上游总服务范围 15.1 km²,污水汇入白龙港污水处理厂;3 号支线位于竹园区域,上游总服务范围 65.0 km²,污水出路由合流一期汇入竹园第一污水处理厂。支线系统的具体名称和服务范围见表 1。

表 1 典型支线污水系统明细

所属区域	支线名称	上游总服务范围/km ²
石洞口	1 号	22.4
白龙港	2 号	15.1
竹园	3 号	65.0

2 4 类水量概念

4 类水量分别为:原生污水量、设施运行量、地下水渗入量和雨水进入量。

2.1 原生污水量

该类水量是利用排水户水量数据,通过用户地址落点和用水性质折算所算得的相应原生污水产生量。根据《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)以及经验值,选取居民综合用水折算系数为 0.9,则原生污水量计算式为:

原生污水量=用水量×0.9 (1)

2.2 设施运行量

该类水量指的是典型支线区域内污水泵站及合流制泵站的设施运行量。

2.3 地下水渗入量

该类水量采用典型支线区域内旱天污水输送量扣除原生污水量和旱天雨水泵站日均截流量计算得到,由此可计算地下水渗入率。

地下水渗入量=旱天污水输送量-原生污水量-旱天雨水泵站日均截流量 (2)

地下水渗入率=(地下水渗入量/最小 3 d 日均进厂量)×100% (3)

2.4 雨水进入量

该类水量采用典型支线区域内泵站雨天与旱天日均输送量的差值作为雨天增量,再根据此增量计算雨水进入比例:

雨水进入比例=(雨天增量/旱天输送量)×100% (4)

其中:雨天为降雨日及降雨日之后 2 d;旱天为除雨天以外的时间。

3 结果分析

3.1 原生污水量

采用排水户地址 GIS 落点挂接用水量数据的方法,通过 GIS 的 shape 图层,对落在 3 条典型支线区域内的所有点位数据求和,计算出典型支线区域内的用水总量,再通过式(1)进行原生污水量的计算。

3.2 设施运行量

该类水量为 3 条典型支线区域内污水泵站的旱天输送量与合流泵站的截流量之和。

3.3 地下水渗入量

2022—2023 年典型支线地下水渗入量分析见表 2。

通过对表 2 数据的纵向对比分析,可观察到各支线呈现显著差异化特征。在最小 3 d 日均输送量指标中,1 号支线由 3.52 万 m³ 降至 3.36 万 m³ (降幅 4.5%),2 号支线从 6.73 万 m³ 微降至 6.56 万 m³ (降幅 2.5%),均呈现平稳下降趋势。在原生污水量方面,1

号、2号支线均维持稳定。由此表明这2条支线的污水处理需求趋于稳定。1号、2号支线2022年和2023年的地下水渗入率分别为20.5%、16.1%和14.1%、14.5%,与国内相关报道相近^[5-7]。在地下水渗入率方面,2号支线基本维持稳定(增幅1.1%),1号支线较2022年有所下降(降幅21.5%),这可能与雨污混接改造措施有关,地下水渗入量得到了一定程度的整治。需要指出的是,根据本研究地下水渗入量的计算方法,该数值可能包含施工降水等其他外水。

3号支线最小3 d日均输送量突增46.3%(由10.80万m³增至15.80万m³),但原生污水量仅增长16.5%(由8.41万m³增至9.80万m³),二者增速相差30%。结合该支线旱天雨水截流量同比增长20.3%(由1.2万m³增至1.9万m³)的数据,初步判断地下水渗入率升高的原因一是仍存在一定程度的雨污混接;二是当系统污水管道由高水位运行状态切换至低水位运行后,管道内水压减小,而管道外地下水位相对稳定,导致管道内外水压差(即水力梯度)增大,即地下水渗入率也存在升高的可能性。马骏等^[8]基于供排水平衡的量化研究表明,泵站液位下降1.0 m时,入流渗入率上升约8%。

典型支线雨水进入比例及地下水渗入率增幅图见图1。

表2 2022—2023年典型支线地下水渗入量分析 单位:万m ³ /d						
支线名称	年份	最小3 d日均输送量	原生污水量	旱天雨水泵站日均截流量	地下水渗入量	地下水渗入率/%
1号	2022	3.52	2.78	0.02	0.72	20.5
1号	2023	3.36	2.80	0.02	0.54	16.1
2号	2022	6.73	5.00	0.79	0.94	14.1
2号	2023	6.56	4.92	0.69	0.95	14.5
3号	2022	10.80	8.41	1.58	0.81	7.5
3号	2023	15.80	9.80	1.90	4.10	25.9

3.4 雨水进入量

3条典型支线区域内雨天增量和雨水进入比例见表3和图1。1号支线雨水进入比例由2022年的0.4%下降至2023年的0%,与地下水渗入率下降(由20.5%降至16.1%)趋势一致,印证了雨污混接改造措施的效能。2号支线雨水进入比例由2022年的0%上升至2023年的10.6%;3号支线雨水进入比例由2022年的6.9%上升至2023年的10.2%。可能原因是本研究选取的典型支线均属于分流制系统,近期分流制雨水系统初期雨水治理力度加大,增大了设施的截流量,因此增加了雨水进入量。

表3 典型支线雨天增量及雨水进入比例 单位:万m³/d

支线名称	年份	旱天运行量	雨天运行量	雨天增量	雨水进入比例/%
1号	2022	3.67	3.68	0.01	0.40
1号	2023	5.42	5.42	0	0
2号	2022	7.80	7.80	0	0
2号	2023	7.37	8.15	0.78	10.60
3号	2022	14.35	15.33	0.98	6.90
3号	2023	16.72	18.43	1.71	10.20

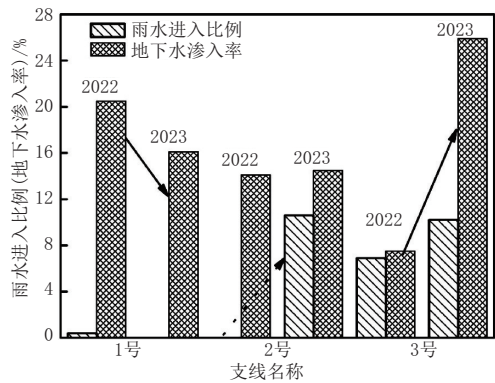


图1 典型支线雨水进入比例及地下水渗入率

4 结 语

(1)1号、2号、3号支线2022年的地下水渗入率分别为20.5%、14.1%和7.5%;2023年的地下水渗入率分别为16.1%、14.5%和25.9%。雨污混接改造措施可使地下水渗入量得到一定程度的整治,但管网长期处于高水位运行,且地下水位较高,如降低污水管道运行水位,地下水渗入率可能会升高。

(2)1号、2号、3号支线2022年雨水进入比例分别为0.4%、0%和6.9%;2023年雨水进入比例分别为0%、10.6%和10.2%。随着初期雨水治理力度的加大,分流制系统的雨水进入量有所增加。

(3)针对雨水进入量偏大的区域,应继续开展管网雨污混接排查和改造;对外水进入比例较大的区域应优先安排管网修复工程;同时建立管网检测修复工作机制和健康评价体系,形成常态化的管网健康保障机制。

参考文献:

[1] BUTLER D, DAVIES J W. Urban drainage[M]. 3rd ed. London: Spon Press, 2018: 112-135.

[2] TAFURI A N, SELVAKUMAR A, SULLIVAN D. Classification and mitigation of inflow and infiltration in sewer systems[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2022,148(3): 04022003.

[3] LI L Q, SHAN B Q, YIN C Q. Stormwater runoff pollution loads from an urban catchment with rainy climate in China[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2012, 6(5): 672-677.

[4] CHEN Z, LI H, WANG Q. Isotopic tracing of illicit rainwater inflow in

(下转第279页)