

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyf.2024.03.024

超大型城市合流制污水处理系统水量动态变化研究

沈巍¹,樊雪莲²,王建斌²

(1.上海市排水管理事务中心,上海市 200085; 2.上海万朗水务科技集团有限公司,上海市 200131)

摘要:以上海市竹园片区污水处理系统为例,利用 Prophet 模型和皮尔逊相关系数法分析竹园片区 2019 年、2020 年污水处理系统关键节点泵站水量的变化情况及互动关系。结果发现:竹园系统服务片区干线末端流量峰值与降雨量峰值存在滞后的相关性,溢流量与降雨量总体存在中等程度的相关性;末端泵站水量对污水处理厂进口水量影响较大,下游支线水量的增加导致污水处理厂进水量增加;选取的 4 个关键节点泵站水量均存在明显的周期和季节效应,周期效应体现为下半周水量持续上升,周末达到高峰,然后逐步下降,季节效应表现为 7 月到 10 月水量处于高位且有明显波动,1 月、2 月为低位。此次针对超大型城市合流制污水处理系统水量的变化规律进行研究的成果,可为大型排水系统的联控联调研究提供数据支撑。

关键词:合流制;污水处理厂;Prophet 模型;皮尔逊相关系数;联控联调

中图分类号: TU992.03

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)03-0098-05

0 引言

在我国城市化的推进过程中,排水系统建设不断完善,具体体现在排水管网与泵站“补短板、修缺陷”,污水处理厂的“提质增效”,以及海绵城市和黑臭河道治理等^[1]。这些工程在保护自然环境、提升人民生活幸福感等方面起到了重大作用。

但是在建设过程中,我国排水管网建设的短板日益凸显^[2],例如排水设施布局不均衡、存量管网的排水能力低于设计预期、排洪除涝能力不足、“厂-站-网”一体化的调度机制尚不完善等,使得在近年来极端气候频发的大背景下,部分城市出现排水系统崩溃问题,给人民的生命财产安全造成了严重损害^[3-4]。

上海市在探索超大型城市城镇排水系统建设和运维方面取得了一些成绩^[5],但是对标世界先进城市还存在一定的差距。因此在“十四五”期间,上海市将目光关注到提升污水末端处理能力、互联互通能力和削峰调蓄能力上来^[6]。

上海市竹园系统服务片区各期污水处理厂是上

海市苏州河环境综合整治工程的重要组成部分,据统计,竹园 4 期建设完成后,竹园片区污水处理规模能达到 340 万 m³/d。但是由于竹园片区沿线收集来自于合流制和分流制的污水,导致沿线泵站和末端容易出现放流入江(河)的现象^[7],对水环境造成明显影响^[8]。为未来加强“厂-站-网”一体化建设提供决策支持,本文通过分析合流一期、污水三期干线末端和关键节点泵站的水量数据,拟解决以下问题:

(1)降雨对城市排水管网干线末端管线的排水量及溢流放江污染的影响。

(2)降雨对不同排水体制泵站水量的影响。

1 系统概况及研究范围

1.1 数据来源

收集 2019 年、2020 年竹园系统服务片区末端的进厂水量数据,以及上游关键节点泵站的出水量。

1.2 关键监测节点泵站的确定

关键监测节点泵站的选择原则为:

(1)靠近污水处理系统末端。竹园片区整个排水系统以竹园污水处理系统合流一期末端、污水三期末端为最终接收末端,因此优先筛选与该末端最为临近的泵站作为研究对象。

(2)输送规模由大到小。输送量可以反映该泵站对于本片区的贡献,输送量越大,该泵站在本片区的作用越重要,其水量数据也更有代表性。

(3)涵盖不同排水体制泵站。为了摸清排水系统

收稿日期: 2023-03-23

基金项目: 2020 年度“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(20dz1204604)

作者简介: 沈巍(1976—),女,硕士,高级工程师,从事排水规划运行管理和安全生产行业监督工作。

通信作者: 樊雪莲(1971—),女,硕士,高级工程师,从事城市管网及智慧水务相关技术研究工作。电子信箱: fanzhiru@vip.sina.com

现状并对比不同排水体制泵站的运维状态,应选取不同体制的泵站作为研究对象。

根据上述选择原则,本文在竹园片区服务范围内选择了A~D共4个关键节点泵站。这些关键节点泵站的基本情况见表1。

表1 关键节点泵站基本情况

| 名称 | 泵站类型 | 选点原因 |
|----|----------|---|
| A | 一级污水 | 下游主干一级泵站,与进厂水质相近,便于研究污水处理厂与泵站之间的水质、水量调度运行规律 |
| B | 一级污水 | 上游干管一级泵站,服务面积广,便于研究上游收集干管在各种雨型情况下的水质变化 |
| C | 二级雨水截流泵站 | 分流制片区雨水泵站,便于研究不同雨情下水收集系统的水质变化规律 |
| D | 一级污水 | 上游干管一级泵站,服务面积广,便于研究上游收集干管在各种雨型情况下的水质变化 |

2 研究方法

2.1 Prophet 时间序列分析^[9]

2017年,Taylor等公布了一套基于加法回归模型的时序预测模型——Prophet模型^[10],该模型在分析短时期数据时,能够在时间序列中解析出周期性的变化规律并拟合。该模型包括trend(趋势项)、seasonality(周期项)及holidays(假期项),可较好地处理时间序列中的假期效应和趋势断点。

Prophet模型公式 $P(t)$ 如下式所示:

$$P(t) = g(t) + s(t) + h(t) + \varepsilon_t \quad (1)$$

式中: ε_t 为误差项;其余3项意义如下:

(1) $g(t)$ 为趋势项,也是模型的核心项,用于拟合观察期内的非周期变化,常用Logistic回归函数表达:

$$g(t) = \frac{C}{1 + e^{-k(t-m)}} \quad (2)$$

式中: C 为模型容量; k 为增长率; t 为当前时间; m 为曲线的中点值。

(2) $s(t)$ 为周期项,采用Fourier级数模拟观察期内的周期性变化,表达式为:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \frac{2n\pi x}{P} + b_n \sin \frac{2n\pi x}{P} \right) \quad (3)$$

式中: P 、 N 是时间参数,需要根据周期的长度加以调整,例如当以年为周期时, $P=365.25$, $N=10$;当以周为周期时, $P=7$, $N=3$; a_n 、 b_n 为系数。

(3) $h(t)$ 为假期项。将周期内的各假日和节日(可根据需要自行设定,数量为 L)视作相互独立,可得下式:

$$Z(t) = \begin{cases} 1, & t \in \{D_1, D_2, \dots, D_L\} \\ 0, & t \notin \{D_1, D_2, \dots, D_L\} \end{cases} \quad (4)$$

$$h(t) = \sum_{i=1}^L Z(t) \kappa(t), \kappa(t) \sim N(\mu, \sigma)$$

式中: $Z(t)$ 为虚拟变量; $\kappa(t)$ 表示在窗口期中节假日对预测值的影响,该变量服从正态分布; D 为节假日的时间序列,当 t 属于该时间序列(即该日为节假日)时, $Z(t)$ 为1,否则为0。因此 $h(t)$ 为 $Z(t)$ 与 $\kappa(t)$ 的乘积。

2.2 皮尔逊相关系数法

本文采用皮尔逊相关系数 r 值来研究干线末端水量、关键节点泵站水量数据与降雨量之间的相关关系。 r 值的计算公式为:

$$r = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\text{std}(X) \cdot \text{std}(Y)} = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中: X 和 Y 是2个变量; cov 表示协方差; std 表示标准差。

r 值值域为 $[-1, 1]$,该值越接近1或者-1,说明 X 和 Y 这2个变量之间的相关性越强;正值表示正相关,负值表示负相关。另外, r 值对线性关系敏感,对非线性相关性不敏感;而且,由于相除消去了 X 和 Y 的量纲,因此 r 值不受量纲影响。

皮尔逊相关系数 r 值的评判标准见表2。

表2 变量相关性的评判标准

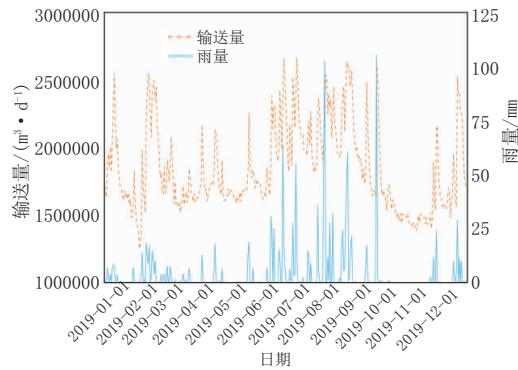
| $ r $ | [0.8, 1] | [0.5, 0.8) | [0.3, 0.5) | [0, 0.3) |
|-------|----------|------------|------------|----------|
| 相关程度 | 高度相关 | 中度相关 | 低度相关 | 不相关 |

3 降雨量对水量的影响分析

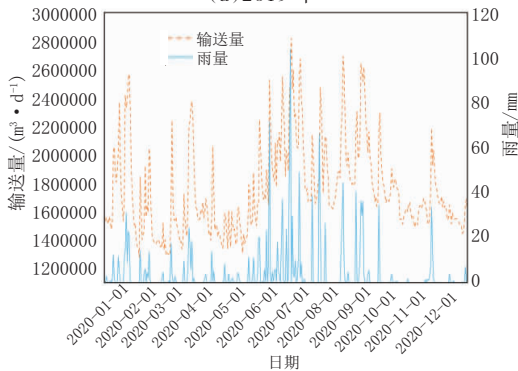
3.1 干线末端流量的变化规律

以污水处理厂干线末端流量作为变量 X ,降雨量作为变量 Y ,则可得到竹园片区合流一期、污水三期干线末端流量与降雨量之间的关系,如图1、图2所示。由图1、图2可知,干线末端流量与降雨量之间具有明显的相关性。从时间角度分析,竹园片区2条干线的干线末端流量大小均存在不同程度的季节性波动,即6月至9月每日流量处于高位波动状态;10月下半旬至12月每日流量相对较少,基本低于全年平均值。

以污水处理厂干线末端流量峰值作为变量 X ,降雨量峰值作为变量 Y 来计算两者的相关系数,可发现其相关性较低,说明降雨量转化为进厂流量有滞后,推测是合流管道较大,有一部分的调蓄空间而使

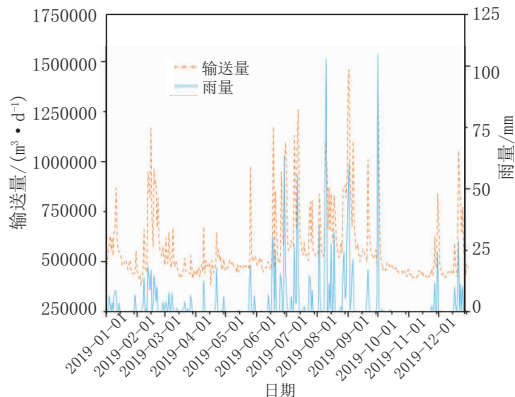


(a)2019年

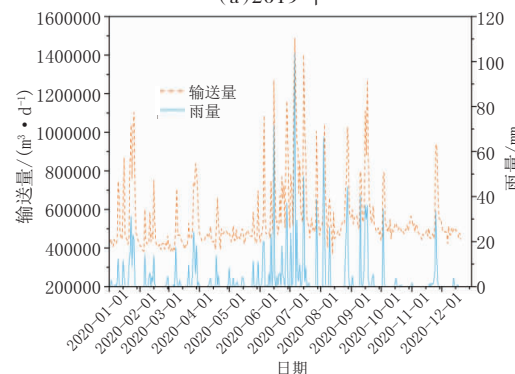


(b)2020年

图1 竹园片区合流一期干线末端流量与降雨量的关系



(a)2019年



(b)2020年

图2 竹园片区污水三期干线末端流量与降雨量的关系

得合流雨水得以延迟进入污水处理厂。为验证该猜想,取滞后1d的降雨量输送峰值与当日干线末端流量峰值再次计算两者的相关系数,发现该值有所提升。具体见表3。

表3 竹园片区干线末端流量与降雨量的相关系数 r 值

| 计算依据 | 合流一期干线末端流量 - 降雨量 | | 污水三期干线末端流量 - 降雨量 | |
|-------------|------------------|-------|------------------|-------|
| | 2019年 | 2020年 | 2019年 | 2020年 |
| 以当日降雨量峰值计 | 0.52 | 0.47 | 0.70 | 0.22 |
| 以滞后1d降雨量峰值计 | 0.55 | 0.52 | 0.78 | 0.65 |

3.2 降雨量对竹园片区溢流量影响

以污水处理厂溢流量作为变量 X ,降雨量作为变量 Y ,对2019年和2020年竹园片区的这2个变量进行相关性分析(见表4),可发现总溢流量与降雨量在总体上存在中等程度的相关性,且降雨量对2条污水输送干线的溢流量影响较大。

表4 竹园片区溢流量与降雨量的相关系数 r 值

| 年份 | 合流一期溢流量 - 降雨量 | 污水三期溢流量 - 降雨量 | 总溢流量 - 降雨量 |
|------|---------------|---------------|------------|
| 2019 | 0.48 | 0.62 | 0.61 |
| 2020 | 0.37 | 0.70 | 0.67 |

3.3 下游支线汇入量对干线末端流量的影响

对2020年竹园片区的末端泵站汇入量与干线末端流量进行相关性分析,结果如表5所示,其中一期出口泵站临近污水处理一厂干线末端;浦东北路泵站临近污水处理二厂干线末端。

表5 支线泵站水量与干线末端流量的相关系数 r 值

| 一期出口泵站水量 - 合流一期干线末端流量 | 浦东北路泵站水量 - 污水三期干线末端流量 |
|-----------------------|-----------------------|
| 0.41 | 0.80 |

由表5可知,合流一期干线末端流量与一期出口泵站水量之间的相关系数为0.41;污水三期干线末端流量与浦东北路泵站水量之间的相关系数为0.80,两者为中高程度相关。可以看出,末端泵站水量对污水处理厂进口水量影响较大,且属于正相关,即随着下游支线水量的增加,污水处理厂进口水量增加。

4 泵站水量周期性分析

4.1 污水泵站A水量时间序列分析

图3、图4为污水泵站A于2019—2022年的水量季节模型和2019—2022年各月份的水量输送量折线图。

由图3、图4可知:污水泵站A水量周期效应明显,总体呈现为周二至周四持续性上升,周五至周日高位波动上升,周五下降至最低点的趋势;季节效应

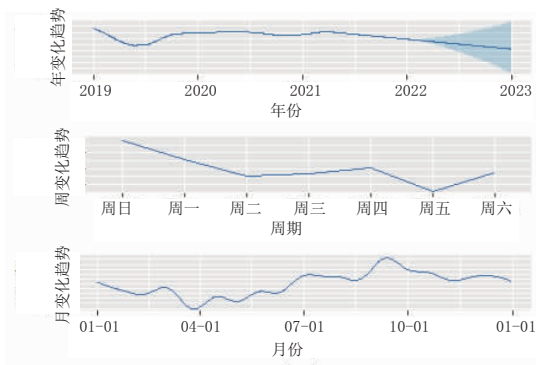


图3 污水泵站A的水量季节模型

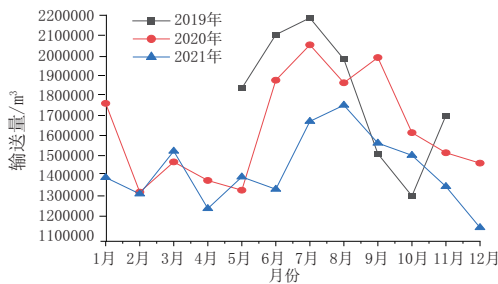


图4 污水泵站A于2019—2021年各月份的水量输送量明显,总体来说7月开始高位波动,8月下旬升至最高点,10月至次年1月降幅较大,4月降至最低,4月至7月缓幅提升。

4.2 污水泵站B水量时间序列分析

图5、图6为污水泵站B于2019~2022年的水量季节模型和2019~2021年各月份的水量输送量折线图。

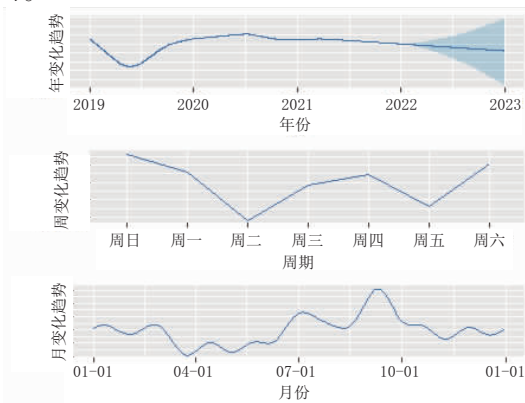


图5 污水泵站B的水量季节模型

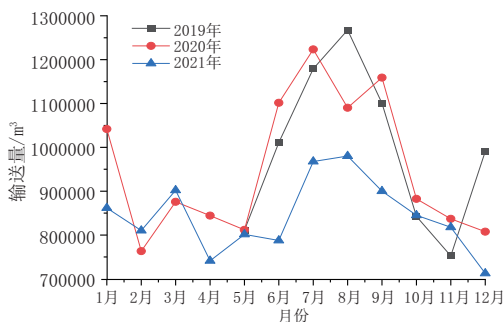


图6 污水泵站B于2019—2021年各月份的水量输送量由图5、图6可知:污水泵站B水量周期效应明显,总体呈现为周二至周日持续性上升,周五轻微下降,总体呈现为周二至周日持续性上升,周五轻微下

降,周六周日波动上升,周二下降至最低点的趋势;季节效应明显,总体来说7月开始高位波动,8月下旬升至最高点,10月至12月降幅较大,4月降至最低,4月至7月缓幅提升。

4.3 雨水泵站C水量时间序列分析

图7为雨水泵站C于2019—2022年的水量季节模型。

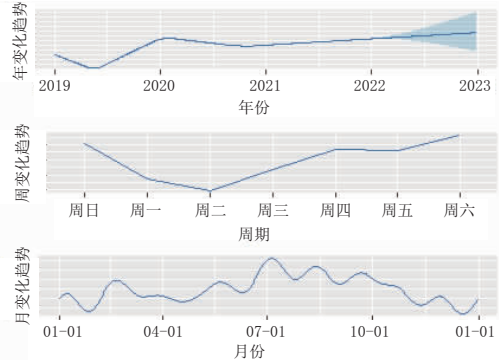


图7 雨水泵站C的水量季节模型

由图7可知:雨水泵站C水量周期效应明显,总体呈现为周二至周五持续性上升,周五轻微下降,周六周日波动上升,周二下降至最低点的趋势;季节效应明显,总体来说7月—10月高位波动并缓速下降,11月至次年2月降幅较大,2月降至最低,1月—4月缓幅提升。

4.4 污水泵站D水量时间序列分析

图8、图9为污水泵站D于2019—2022年的水量季节模型和2019—2020年各月份的水量输送量折线图。

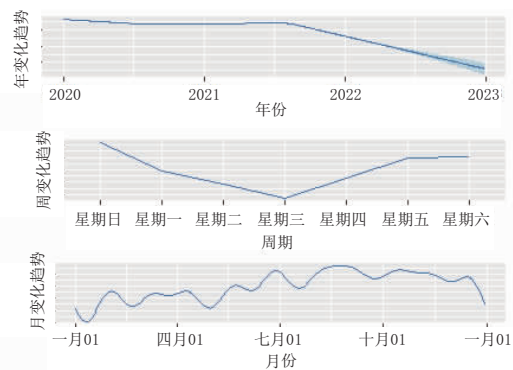


图8 污水泵站D的水量季节模型

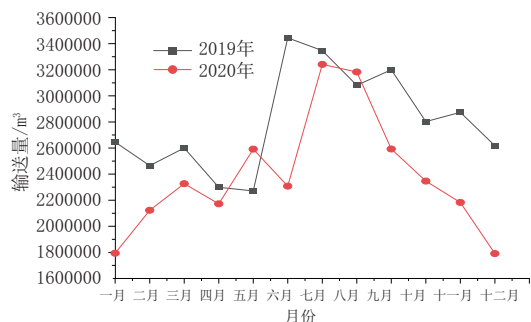


图9 污水泵站D于2019—2020年各月份的水量输送量

由图 8、图 9 可知:污水泵站 D 水量周期效应明显,总体呈现为周三至周日持续性上升,周日升至最高点,周日至周三持续下降,周三降至最低点的趋势;季节效应明显,总体来说 7 月—11 月高位波动,12 月至次年 1 月降幅较大,1 月降至最低,1 月至 4 月缓幅提升。

5 结 语

(1)干线末端流量峰值与降雨量峰值存在滞后的相关性,推测与管网的调蓄能力有关。干线溢流量与降雨量总体存在中等程度的相关性,且降雨量对 2 支污水输送干线的溢流量影响较大。

(2)2 支污水输送干线末端流量与对应的支线泵站出水量两者为中高程度相关,可以看出末端泵站水量对污水处理厂进口水量影响较大,且属于正相关,即随着下游支线水量的增加,污水处理厂进口水量增加。

(3)4 处泵站水量均存在明显的周期效应和季节效应。周期效应体现为下半周水量持续上升,周末达到高峰,然后逐步下降;季节效应表现为 7 月—10 月高位波动,1 月、2 月为低位。

参考文献:

- [1] YAN Sun, XIN Chenhu, YU Li, et al. A framework for deriving dispatching rules of integrated urban drainage systems [J]. Journal of Environmental Management, 2021(298): 1-11.
- [2] 陈绍军,张白良,张智颖.合流污水管道雨天水质水量的变化规律[J].中国市政工程,1994,65(2):55-58.
- [3] 叶道良.福建河流水量分布及历史洪水考证[J].水利科技,1998,77(4):1-4.
- [4] 刘敏强.乐从镇市政污水管网溢流特征及其污染控制研究[D].广州:广东工业大学,2016.
- [5] 颜晓斐.上海成都路合流污水调蓄池的污染减排效益及优化[J].中国给水排水,2010,26(8):6-10.
- [6] 荆红卫,华蕾,陈圆圆,等.城市雨水管网降雨径流污染特征及对受纳水体水质的影响[J].环境化学,2012,31(2):208-215.
- [7] 张怀宇,赵雷,王海岭,等.合流制排水系统雨季污染物溢流的截流与调蓄控制研究[J].给水排水,2010,36(6):42-45.
- [8] 李贺,李田.上海高密度居民区合流制系统雨天溢流水质研究[J].环境科学,2006,27(8):1565-1569.
- [9] 常恬君,过仲阳,徐丽丽.基于 Prophet- 随机森林优化模型的质量指数规模预测[J].环境污染与防治,2019,41(7):758-761, 766.
- [10] TSYMBALA, PUURONENS, PATTERSONDW. Ensemble feature selection with the simple Bayesian classification[J]. Information Fusion, 2003,4(2):87-100.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com