

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.15.008

基于在线监测的二次供水水箱运行效能评估及优化

林建德^{1,2}, 崔福义¹, 赵 锂², 徐 悦³, 吴芹环³, 沈 晨²,
匡 杰²

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045; 2. 中国建筑设计研究院有限公司, 北京 100032; 3. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500)

摘 要: 为优化二次供水系统中水箱的运行效能,以某办公园区为例,基于长序列的水箱进水量与水质在线监测数据,采用时序分析和统计学方法,对二次供水水箱有效容积、水质变化周期、水力停留时间和水质稳定性进行全面评估。结果表明,园区二次供水水箱有效容积设计值偏大,导致非工作时段水箱的水力停留时间较长,水质安全风险增加,建议通过动态调整水箱运行策略,将夏秋季节和冬春季节水箱最高运行水位分别控制在设计有效容积的85%和70%。此外,不同水质指标的稳定性差异显著,浊度与色度因受间歇性水箱水力扰动影响,稳定性较差,可基于监测数据样本的第95百分位数(P_{95})和第99百分位数(P_{99})分别设定提示预警和干预预警。

关键词: 二次供水水箱; 在线监测; 有效容积; 水力停留时间; 水质稳定性

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)15-0054-07

Operational Efficiency Evaluation and Optimization of Secondary Water Supply Tank Based on Online Monitoring

Lin Jiande^{1,2}, Cui Fuyi¹, Zhao Li², Xu Yue³, Wu Qinshuan³, Shen Chen²,
Kuang Jie²

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
2. China Architecture Design & Research Group Co. Ltd., Beijing 100032, China; 3. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: To optimize the operational efficiency of water tank in secondary water supply systems, this study took a specific office park as a case study. Based on long-term online monitoring data of influent flow and water quality, time-series analysis and statistical methods were employed to comprehensively evaluate the effective volume, water quality variation periodicity, hydraulic retention time (HRT), and water quality stability of the secondary water supply tank. The results indicated that the designed effective volume of the tank in the office park was overly large, leading to prolonged HRT during non-operating hours and increased water quality risks. It is recommended to dynamically adjust the tank operation strategy by controlling the maximum operating water level to 85% and 70% of the designed effective volume during the summer-autumn and winter-spring seasons, respectively. In addition, the

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406200)

通信作者: 徐悦 E-mail: xuyue@kust.edu.cn

stability of various water quality parameters varied considerably. Turbidity and chromaticity, being more susceptible to intermittent hydraulic disturbances within the tank, exhibited poorer stability. For these parameters, alert thresholds and intervention thresholds can be established based on the 95th and 99th percentiles (P_{95} and P_{99}) of the monitoring data samples, respectively.

Keywords: secondary water supply tank; online monitoring; effective capacity; hydraulic retention time; water quality stability

随着城市化进程的不断加速,高层建筑及超高层建筑层出不穷,二次加压供水已成为各类建筑与小区最主要的供水方式^[1]。二次供水水箱处于市政供水管网的末端,是保障建筑或区域供水压力稳定的关键节点,但普遍存在余氯和部分水质指标不合格、管理不善等现象^[1-2],是城市供水系统中的水质安全风险敏感节点和薄弱环节。

随着信息技术的迅速发展,传感器与数据分析技术联用可显著提升城市供水系统的运行效率和水质安全^[3-4]。然而,针对二次供水水箱的相关研究多集中于理论层面^[5-6],有限的在线监测案例^[7-9]也主要聚焦于二次供水水质参数的实时采集与异常报警。这些研究有助于理解水箱水质的动态变化特点,但对于引起水箱水质变化的本质诱因(如有效容积、用水模式等)了解不足,基于长序列监测数据的实例研究较少。二次供水系统的在线监测数据普遍具有多参数、高频率等特点^[9-10]。从系统工程的角度识别关键风险指标,构建效益成本综合最优的预警体系框架,是实现城市水务智慧化运维亟待解决的关键问题。

本研究通过对某办公园区二次加压水箱的进、出水流量及水质进行长期连续监测,基于实测数据,对水箱有效容积和水力停留时间的设计合理性、水质稳定性开展系统性评估与分析,进而对水箱的运行优化与城市水务运维提出建议。同时,采用轻量化的数据处理分析方法,以期降低计算成本、提升处理效率、增强方法的适用性,为二次供水系统运行优化提供易实现、可操作性强的实际参考案例。

1 研究区概况

以某办公园区二次供水系统为研究对象,园区总建筑面积约为 $10 \times 10^4 \text{ m}^2$,包含A座(14层)、C座(11层)、D座(8层)三栋主楼及连接A、C座的B座(4层裙房)。市政供水(DN200,入口压力 $\geq 0.18 \text{ MPa}$)

经设于C座地下二层的二次供水泵房中的二次供水调蓄水箱(简称“水箱”,有效容积为 32 m^3),由变频调速恒压供水泵组加压,供给各栋建筑三层及以上的楼层(地上二层及以下由市政直供)。

2 数据采集与处理

2.1 数据采集

为评估二次供水水箱的运行效能,对水箱的进、出水流量及箱内水质进行实时在线监测,监测系统布置如图1所示。流量监测采用高精度超声波远传水表(精度为Ⅱ级,最大允许误差为 $\pm 2\%$),分别安装于水箱的进水管与出水管上。

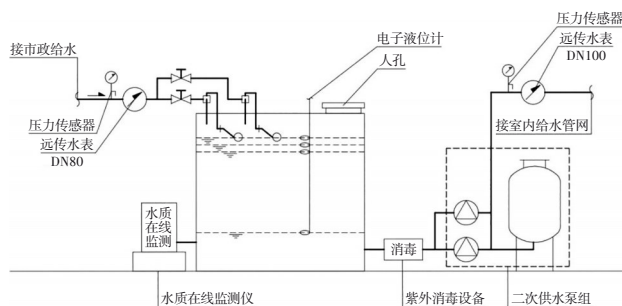


图1 监测系统布置示意

Fig.1 Schematic diagram of monitoring system

水箱内部设置在线水质监测仪,对pH、温度、浊度、余氯、TOC等关键指标进行持续监测。远传水表的数据采集频率为每30 s一次,以15 min为间隔通过有线网络上传至数据中心,通信接口为RS485,通信协议为modbus。在线水质监测仪的数据更新频率为每30 min一次,连接和通信方式与远传水表相一致。

流量数据采集时段为2022年7月1日—12月31日,重点分析不同季节系统用水模式及水箱运行状态。水质数据采集时段为2023年12月3日—2024年1月2日,主要研究冬季低流量工况下,水箱的水力停留时间与水质变化。

2.2 数据标准化处理

为消除不同水质指标的量纲差异,使不同类型

的数据序列具有可比性,全面展示各指标在水箱运行中的变化趋势与相对差异,对水质监测的原始数据进行标准化处理。本研究采用Z-Score标准化处理方法,该方法可有效消除量纲差异,量化单个数据点与整体均值的距离,揭示数据分布的集中趋势。Z-Score标准化计算方法如下:对于某水质指标的原始数据集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,各数据点 x_i 的标准化值 z_i 可通过式(1)计算。

$$z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

式中: x_i 为第 i 个水质指标的原始数据; μ 为该水质指标在研究期内所有监测数据的算术平均值; σ 为该水质指标所有监测数据的标准差。

原始数据集经标准化处理后,实现了均值为0、标准差为1的数据集转换,使不同指标可在相同统计基准下进行比较,实施综合评估。

3 结果与分析

3.1 水箱有效容积

二次供水水箱的日累积进水量直接反映二次加压供水区域的当日用水量。为分析园区二次供水调蓄水箱的合理有效容积,本研究基于水箱进水流量的监测数据,结合水力停留时间评估水箱实际所需储水容积。研究时段内,水箱进水日累积流量的变化如图2所示。

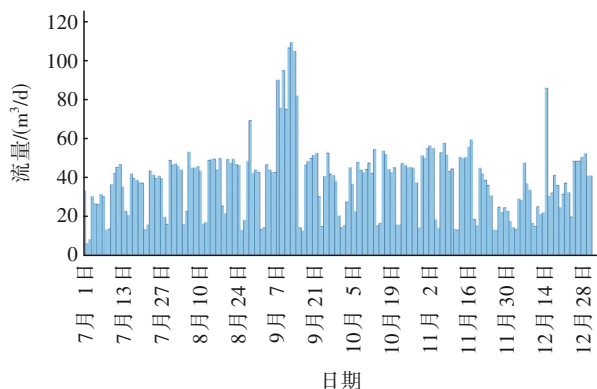


图2 水箱进水日累积流量的变化

Fig.2 Variation in cumulative daily inflow volume of water tank

从图2可知,不同季节二次供水的日用水量存在差异。夏秋季节,二次加压系统的最高用水量为 $109.00 \text{ m}^3/\text{d}$,冬春季节则降至 $85.60 \text{ m}^3/\text{d}$ 。根据现行国家标准《建筑给水排水设计标准》(GB 50015—2019)中生活用水低位贮水池有效容积的计算方法

(即最高日用水量的20%~25%),夏秋季节,水箱的理想有效容积宜在 $21.80 \sim 27.25 \text{ m}^3$ 之间;冬春季节,由于日用水量降低,水箱的有效容积需求也相应减少,宜为 $17.12 \sim 21.40 \text{ m}^3$ 。该园区水箱的实际有效容积为 32 m^3 (按最高日用水量理论计算值的20%计),这一数值远大于不同季节基于实测数据计算得出的理想有效容积范围。

图3为用水量的分布频率。可知,园区二次供水的用水量集中在 $40 \sim 50 \text{ m}^3/\text{d}$,用水量在 $60 \text{ m}^3/\text{d}$ 以下的累积频率为94.05%,这在一定程度上反映了绝大部分时间内水箱有效容积利用率较低,存在设计冗余问题。水箱设计容积过大,不仅会增加建造成本和维护费用,同时,还会延长水力停留时间,进一步引发水质问题。尤其是在用水低谷期,如果水箱长时间处于高水位运行状态,将对保持水质稳定和节能管理形成一定挑战。

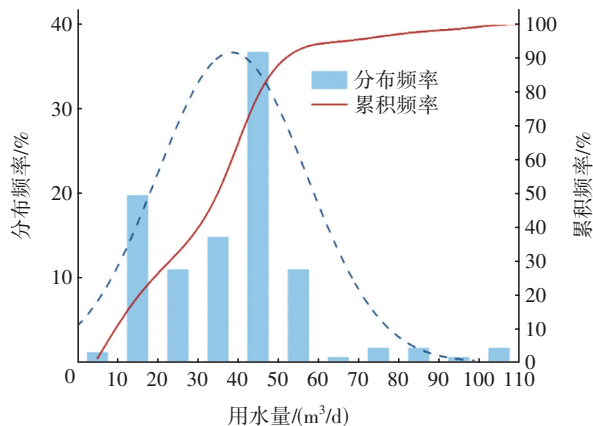


图3 用水量的分布频率

Fig.3 Frequency distribution of water consumption

3.2 水质变化周期与水力停留时间

二次供水水箱的水质变化受到水箱结构、内部物理生化过程、系统用水模式等多种因素的复杂作用,部分指标根据系统用水模式,具有显著的周期性变化特性。本研究以余氯为代表性指标,通过时序分析,对其连续在线监测数据进行分析,以了解水箱典型水质变化过程。研究期内,水箱中余氯最高浓度为 0.041 mg/L ,最低维持在 0.031 mg/L 左右(见图4)。水箱中余氯浓度基本以7~8 d为一个循环周期,单日则以“上升-平稳-下降”趋势变化,其浓度变化规律在一定程度上反映了水箱的水质变化周期及水力停留时间。

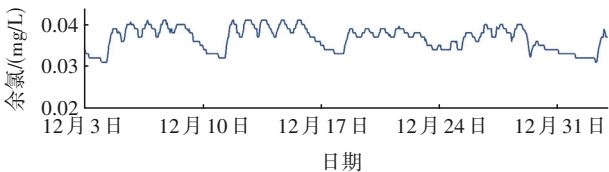


图 4 水箱中余氯浓度的变化

Fig.4 Variation of residual chlorine concentration in water tank

在自然周内,水箱余氯浓度在工作日和休息日具有不同的变化特征。工作日,水箱中余氯浓度呈“昼升夜降”的 24 h 循环波动,日间(08:00—18:00)因用水高峰引发水箱快速补水,补水余氯浓度较高,经水力混合后使得水箱内余氯浓度上升,并在日间维持稳定;夜间(18:00—次日 08:00)用水量减少,水箱内余氯因自然衰减及稀释的双重作用,浓度不断下降,平均衰减速率为 $3.59 \times 10^{-4} \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{h})$ 。水箱补水与系统供水的共同影响是造成水箱余氯浓度工作日单日波动变化的主要原因。根据一周内水箱中余氯的变化规律推测,工作日水箱的水质变化周期约为 1 d。值得注意的是,从周五 18:00 到周一 08:00,余氯浓度从 0.038 mg/L 持续下降至 0.032 mg/L,降幅为 15.8%,平均衰减速率变慢,降至 $1.70 \times 10^{-4} \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{h})$ 。该现象可能由以下两个原因造成:一是办公园区周末用水量较低,使得水箱无需补水或补水频次减少,补水不足使得余氯缺少外部补充;二是水箱中的滞留水体在静态水力条件下,余氯分解消耗速率减缓。

表 1 在线水质监测指标描述性统计分析结果

Tab.1 Descriptive statistics analysis results of online-monitored water quality indexes

项目	pH	水温/ $^{\circ}\text{C}$	浊度/NTU	色度/度	TOC/ (mg/L)	电导率/ $(\mu\text{S}/\text{cm})$	余氯/ (mg/L)
最大值	9.25	16.10	4.402	5.619	1.148	192.768	0.041
最小值	7.94	9.32	0.100	0.500	0.500	168.016	0.031
均值	8.57	12.76	0.499	0.554	0.909	182.152	0.037
中位数	8.56	12.80	0.100	0.503	0.922	183.190	0.037
众数	8.81	15.84	0.100	0.503	0.914	177.430	0.039
P_5	8.06	9.49	0.100	0.500	0.820	170.016	0.032
P_{25}	8.31	10.20	0.100	0.502	0.891	176.251	0.034
P_{75}	8.85	15.36	0.730	0.503	0.953	188.508	0.039
P_{95}	9.06	15.90	1.871	0.558	1.008	190.768	0.041

变差系数(Cv)是衡量数据相对离散程度的关键指标,客观反映了各参数的变异水平。浊度和色度的 Cv 值分别为 1.292 和 0.676,在各水质指标间处于高水平状态(pH、水温、TOC、电导率、余氯的 Cv 值分别为 0.037、0.190、0.108、0.038、0.075),这说

明浊度和色度的数值波动较为剧烈,指标稳定性较差。不同水质指标间的相关性分析表明,浊度与色度之间的相关系数为 0.652,在 1% 水平上显著,存在强烈的正相关关系,数据变化具有一定的同步性。相比之下,水温、TOC、余氯、电导率和 pH 的 Cv

在二次供水系统中,水龄主要由二次水池(箱)的水力停留时间和水在二供管道中的停留时间组成。二次水池(箱)水量占比高,其水力停留时间对供水水质安全的影响更为显著,尤其体现在对余氯、浊度和细菌总数的影响作用明显^[11]。现行国家标准《建筑给水排水设计标准》(GB 50015—2019)规定:“生活饮用水水池(箱)内贮水更新时间不宜超过 48 h”。基于水箱进水流量监测数据,研究期内,二次供水系统工作日的平均用水量为 $35.51 \text{ m}^3/\text{d}$,水箱设计容积为 32 m^3 ,可估算水箱的平均水力停留时间为 0.9 d,与以水箱余氯浓度变化推测的水质变化周期结论在数量级上较为吻合,二者的匹配性为利用在线水质监测数据间接评估与预测水箱水力情况(如是否存在短流、死水区等)提供了新思路,但两者之间的印证关系与影响机制有待进一步分析。此外,因受到水箱结构、水流条件等因素的影响,水箱中不同位置的贮水也可能存在停留时间不尽相同的现象^[12],部分水体在水箱中的最长停留时间极有可能超过 1 d。另一方面,实际运行中若补水周期过长(如周末或节假日),需要重点关注余氯消毒效能失效的风险。

3.3 水质稳定性

为定量评估二次供水调蓄水箱水质的稳定性,本研究对 pH、水温、浊度、色度、TOC、电导率和余氯等水质指标的在线监测数据进行描述性统计分析,结果见表 1。

值均处于较低水平,展现出良好的稳定性。综上所述,在水质监测期内,感官指标(如浊度、色度)为二次供水水质不稳定的核心问题,水体的基础化学性质稳定性较高。

此外,浊度最大值为4.402 NTU,远高于其第95百分位数(P_{95}),第5、25百分位数(P_5 、 P_{25})及中位数与最小值重合,均为0.100 NTU,表明监测时段内,浊度大多处于较低水平,偶有异常高值出现,色度的数据分布也具有类似特征。相比之下,pH、电导率、余氯等指标的各百分位数分布均匀,极值与百分位数差距较小,具有良好的正态分布特征。

本研究对各水质指标标准化处理后的数据系列进行统计分析,比较各指标的分布情况,结果见图5。可知,经Z-Score标准化处理后,各水质指标消除了量纲影响,可在同一尺度上对不同参数的数据分布情况及离散程度进行分析。pH、水温、电导率和余氯具有典型的箱体结构;TOC和浊度的箱体高度相对较小,浊度仅存在上边界线;色度上下边界线基本与中位线重合。箱线图中,箱体高度反映了数据的集中与离散程度,即四分位距值(IQR)。对于浊度和色度而言,可能是受到仪器最低检测限的限制或水体的清洁度较高,使得大部分数据点聚集于下边界线附近(两指标的中位数与第25百分位数基本重合)。可见,绝大多数监测时段中,水箱内浊度与色度较低。

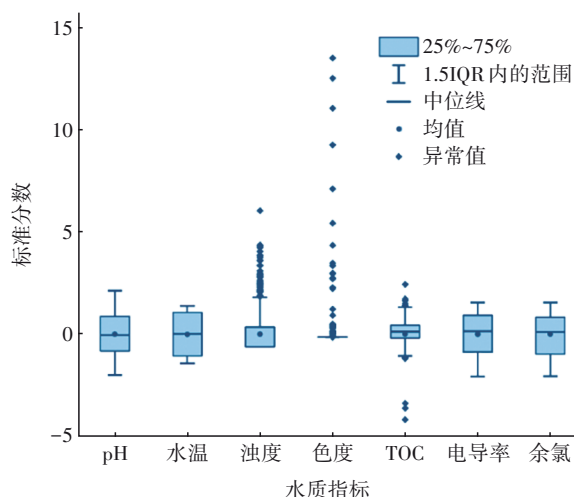


图5 各水质指标的标准化数据箱线图

Fig.5 Box plot of standardized index data for each water quality index

箱线图的上下须线长度与异常值反映数据分布的对称性和数据波动的极端情况。由图5可以看

出,浊度与色度均存在一定数量的异常高值,色度出现极端高值的现象更为突出。浊度与色度出现异常高值,且两指标相关性较强,反映了系统可能间歇性受到突发事件的影响,例如,管网压力波动导致管壁剥蚀物进入水箱、水箱补水时底部沉积物因水力冲刷返回水体或内部生物膜脱落等,均可能引起浊度与色度陡增。浊度和色度的不稳定性具有短时低频特点,极有可能是受偶发扰动因素的影响。pH、水温、电导率和余氯数据主体呈近似对称分布,无异常值,表明其变化主要由随机因素主导,极端异常事件较为罕见。值得注意的是,TOC的Cv值虽不高,但存在少量异常高值与低值,表明水箱有机污染风险整体较低且稳定性好,异常高值可能是受进水水质波动影响,低值的出现则与水体TOC的检测仪器下限有关。

3.4 启示与建议

3.4.1 二次供水水箱容积设计与运行优化

二次供水水箱有效容积的设计以水量调节为主要目标,目前,普遍基于系统最高日用水量理论计算值的20%~25%确定。本研究表明,在系统实际运行中,水箱实际容积利用率低于其有效容积设计值,水箱的设计冗余问题较为突出。建议对于具有在线水量监测功能的二次供水系统,开展用水模式的广泛数据调查,并结合数值模拟、大数据挖掘等方法,对不同类型的建筑建立水箱有效容积设计参考范围。在二次供水系统设计或运维中,以满足二次供水需求为前提,从多角度考虑,加强容积核算,优化水箱设计及运行方式。

对于当前有效容积设计偏大的传统型水箱,宜借助在线监测数据,从系统用水特性出发,通过动态调整运行方案来改善供水的安全稳定性,并实现节能降耗。在用水低谷时段,可增加水质监测频率或水箱清洗频次,防止水质恶化;或在满足系统供水压力的条件下,结合用水需求动态调控水箱储量,适当降低水箱储水液位,将水力停留时间主动控制在24 h以内。有条件的新建或改扩建项目,推荐采用新型智能水箱,通过集成传感器、控制器和执行机构等自动化系统,依据用水情况动态调整水箱储水量以降低水龄。基于上述研究,建议通过月或季度用水数据,动态设置控制水泵启停的液位阈值。就本案例而言,夏秋季节,可将水箱最高运行水位控制在设计有效容积的85%;冬春季节,可将

水箱最高运行水位控制在设计有效容积的70%。对于办公建筑而言,非工作时段的用水量总体水平不高,宜将周五晚间的水箱最高设置液位调低,周一凌晨通过夜间补水将水箱补充至标准液位,在保证周末用水需求的前提下,最大限度地缩短水箱的水力停留时间。基于水箱余氯浓度变化规律,通过自控系统动态调整水箱补水时间,在保障水质的同时,实现能效提升。针对夜间用水低谷期应充分利用市政供水压力集中补水,以满足次日系统供水需求,并提升水箱余氯浓度,应对日间高负荷用水时段的余氯衰减。在日间城市用水低谷期,系统同样可利用管网压力实施小流量短时集中补水,抵消余氯的流失,在保持水箱中余氯水平持久稳定的同时,有助于降低水厂设备间歇性启停引发的能耗增长。

基于水箱内颗粒沉积物因水力变化影响而重新悬浮,导致浊度与色度出现间歇性异常高值的现象,二次供水系统宜采用小流量缓释补水方式,避免在水箱水位过低时采用大流量注水方式,以减少对水箱底部沉积物的水力扰动。此外,降低系统运行干扰、定期清理水箱以减少沉积物积累等也是二次供水系统管理的重点。

3.4.2 二次供水水箱水质监控优化与差异化预警

二次供水水箱水质稳定性评估结果对优化水箱水质监测资源配置,以水质指标分布特征为参考建立差异化的预警策略具有一定的指导意义。水质参数的统计分析可识别影响水质稳定性的主要指标,进而在制定在线水质监测策略时,优先保障关键水质指标的高频或连续监测;对于较为稳定的水质参数,可适当降低监测频率。

另一方面,稳定性不同的水质指标的预警阈值宜进行差异化设定。以本研究为例,基于以月或季度为周期的稳定监测数据,对于浊度、色度等稳定性不佳的指标,可基于 P_{95} 设置低预警(即发出提示性警报),或对异常高值进行计数预警(如“一定时间间隔内出现大于或等于 P_{95} 预警值的次数”);基于第99百分位数(P_{99})设置高预警(即可能有异常事件发生,急需进行人工核查或干预)。对于数据近似于正态分布的水质指标(如本研究中的pH、电导率、余氯等),建议基于 P_{95} 与3倍标准差之和设置高预警值。同时,在系统长期运行中,建议统计基准宜以月或季度进行更新,使预警阈值适应进水水质的

变化或季节性波动。

此外,需要注意的是,海量在线监测数据的有效应用以数据可靠性为前提,因此,加强在线仪表的日常维护与清洗,以最大程度地保证数据的准确性是实现海量数据信息挖掘、指导工程应用的重要实践基础。

3.4.3 对城市智慧水务运行与管理的意义

二次供水水箱的进水流量及水质监测数据是市政管网在该节点用水需求和水质情况的真实反映,这验证了将水箱作为城市供水管网末端监测点的可行性。将各类建筑二次供水单元的多种在线监测数据整合至智慧水务平台,可实现区域用水需求及管网末端水质的精准分析与预测,促进城市水务向精细化、智能化的现代化管理模式转变。

城市不同时期、不同区域、不同建筑类型的二次供水系统,在用水特性、水箱规模及管理水平等方面均存在差异,执行单一化、固定化的监管方案在资源配置和节能降耗方面,适配性明显不足。对于二次供水系统,宜进行供水安全风险等级的划分,采取具有针对性的监管措施。对水力停留时间长、浊度不稳定的高风险二次供水水箱系统,应实施重点监管与强制性升级改造;运行稳定且水质达标的系统可适当减少检查频次,实现监管资源的高效分配。

4 结论

① 二次供水系统用水量具有季节变化特征。系统现有水箱的有效容积设计偏大,存在一定的水质安全风险。该研究表明,基于长序列的在线监测数据可解析系统用水模式,进而动态调整水箱运行策略,保障水质安全并降低能耗。

② 水箱余氯浓度变化以7~8 d为循环周期。工作日用水量稳定且水质变化周期规律,水力停留时间约为24 h。休息日用水量下降,因而补水频率有所降低,水力停留时间延长,水质风险升高。基于系统用水特点,可充分利用市政管网供水低谷期的市政压力,对水箱进行补水,提升余氯浓度,保持水质稳定。

③ 监测期内,水箱pH、水温、电导率和余氯等水质指标相对稳定,浊度和色度稳定性不高,其不稳定性具有短时低频的特点,主要受间歇性物理扰动事件的影响,水箱整体水质良好。建议基于水质

指标的统计分布特性,建立差异化的水质监测与预警策略。

④ 基于研究结果,未来拟引入机器学习方法(如随机森林、时序预测模型等),对各类监测数据进行深层数据挖掘与预测建模,精准量化水箱容积利用率与水质风险间的复杂关系,通过强化学习发展水箱补水自适应优化控制策略,探索统计分析方法与机器学习或人工智能模型相结合的决策支持系统,使其不仅具有可解释性,并能处理多维非线性问题,为二次供水系统智慧水务平台的智能化发展方向提供参考。

参考文献:

- [1] 赵锂. 建筑与小区二次加压与调蓄供水水质保障技术[J]. 给水排水, 2020, 46(12): 1-5.
Zhao Li. Water quality assurance technology for secondary pressurization and storage of buildings and sub-district [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(12): 1-5 (in Chinese).
- [2] 靳军涛, 梁思宸. 二次供水设施调研及水质影响因素分析[J]. 中国给水排水, 2023, 39(20): 32-37.
Jin Juntao, Liang Sichen. Investigation of secondary water supply facilities and analysis of water quality influence factors [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(20): 32-37 (in Chinese).
- [3] Nie X T, Fan T Y, Wang B, et al. Big data analytics and IoT in operation safety management in under water management [J]. Computer Communications, 2020, 154: 188-196.
- [4] Shim K, Berrettini E, Park Y G. Smart water solutions for the operation and management of a water supply system in Aracatuba, Brazil [J]. Water, 2022, 14(23): 3965.
- [5] 刁蓉梅. 上海市高品质饮用水关键技术与管理实践[J]. 城镇供水, 2024(4): 51-55.
Diao Rongmei. Research on key technologies and management practices of high-quality drinking water in Shanghai [J]. City and Town Water Supply, 2024(4): 51-55 (in Chinese).
- [6] 包伟忠. 高品质饮用水建设及运维中关键问题探讨[J]. 净水技术, 2024, 43(增刊1): 71-75.
Bao Weizhong. Discussion on key problems of high quality drinking water building and management [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(S1): 71-75 (in Chinese).
- [7] 刘梓晶, 赵珍仪, 高峰, 等. 建筑与小区二次供水设施运维情况调研与分析[J]. 中国给水排水, 2022, 38(1): 134-138.
Liu Zijing, Zhao Zhenyi, Gao Feng, et al. Investigation and analysis of operation and maintenance of secondary water supply facilities in buildings and communities [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(1): 134-138 (in Chinese).
- [8] 郝技, 赵娜. 沈阳市老旧小区二次供水设施改造工程探究[J]. 供水技术, 2024, 18(1): 34-39.
Hao Ji, Zhao Na. Exploration on renovation project of secondary water supply facilities in old residential areas of Shenyang [J]. Water Technology, 2024, 18(1): 34-39 (in Chinese).
- [9] 刘素芳. 居民二次供水监管体系构建与应用研究[J]. 水资源开发与管理, 2024, 10(5): 74-79.
Liu Sufang. Research on the construction and application of supervision system for residential secondary water supply [J]. Water Resources Development and Management, 2024, 10(5): 74-79 (in Chinese).
- [10] 王如琦, 舒诗湖, 孙美慧. 住宅二次供水在线水质评估与监管实践[J]. 净水技术, 2025, 44(增刊1): 103-110.
Wang Ruqi, Shu Shihu, Sun Meihui. Practice of online water quality assessment and supervision for residential secondary water supply [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(S1): 103-110 (in Chinese).
- [11] Hu D, Hong H R, Rong B, et al. A comprehensive investigation of the microbial risk of secondary water supply systems in residential neighborhoods in a large city [J]. Water Research, 2021, 205: 117690.
- [12] Martins N M C, Covas D I C. Induced circulation by plunging and submerged jets in circular water storage tanks using CFD [J]. Water, 2022, 14(8): 1277.

作者简介: 林建德(1986—), 男, 浙江瑞安人, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为建筑水系统数字化与智慧运维。

E-mail: linjd@cadg.cn

收稿日期: 2025-10-13

修回日期: 2026-01-18

(编辑: 任莹莹)