

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.07.008

供水管网分区后加氯策略优化方法

段 婷, 王 琦

(广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 为探究供水管网分区对加氯策略的影响,采用“模拟-优化”框架,提出了一种有效控制管网分区后余氯浓度的加氯策略优化方法。基于J案例管网的结果显示,管网加氯总量、加氯站数量和加氯复杂度之间存在明显的权衡关系。在保障节点水质安全的前提下,分区后的优化方案比分区前最多可节约氯耗达46.8%。管网分区会对原有加氯方案下的管网水质产生负面影响。二次加氯方式越灵活,分区后关键节点水质受到的负面影响越小。为保障分区后的水质安全,需要重新调整加氯方案,并适当增加总的氯投加量。建议在制订管网分区方案时将分区后对管网加氯的影响纳入成本效益分析过程,协调控漏效益与药耗增量之间的矛盾关系。

关键词: 供水管网; 管网分区; 加氯策略优化; 二次加氯; 水质安全

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)07-0056-07

Optimization Methodology for Chlorination Strategy Following Partition of Water Supply Network

DUAN Ting, WANG Qi

(School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology,
Guangzhou 510006, China)

Abstract: To investigate the impact of water supply network partition on chlorination strategies, an optimization method was developed using simulation-optimization framework to effectively manage residual chlorine following network partition. The results based on the J case pipeline network revealed a significant trade-off among the total chlorine dosage within the network, the number of chlorination stations, and the complexity of the chlorination. Under the premise of ensuring water quality safety at all nodes, the optimized scheme following network partition achieved a chlorine consumption reduction of up to 46.8% compared to the scheme before partition. The implementation of network partition is likely to adversely affect the original chlorination scheme. A more adaptable secondary chlorination approach can mitigate the potential negative impact on water quality at critical nodes following the network partition. To ensure the safety of water quality following the implementation of network partition, it is imperative to reassess and readjust the chlorination strategy, including a moderate increase in the total chlorine dosage. It is recommended that the impact of network partition on chlorination should be incorporated into the cost-benefit analysis process when planning the network partition, so as to address the conflicting relationship between leakage control benefits and increased chlorine consumption.

基金项目: 广东省自然科学基金资助面上项目(2022A1515011179)

通信作者: 王琦 E-mail: q.wang@gdut.edu.cn

Key words: water supply network; network partition; chlorination strategy optimization; secondary chlorination; water quality safety

随着城镇化进程的推进,供水管网规模逐渐扩大,管网结构日趋复杂,水源单独投加氯难以满足供水管网末梢水质安全需求。二次加氯能使余氯在管网中的时空分布更均匀,进而保障管网末梢的水质安全,同时有助于减少氯的总投加量,控制消毒副产物(DBPs)的产生^[1]。

管网分区协同压力管理是解决管网漏损的有效措施,近年来在我国供水管网管理过程中发挥了重要作用^[2]。管网分区即利用阀门截断部分管段,使得供水管网被划分为若干个子区域,以便开展精细化管理^[3]。根据《城镇供水管网分区计量管理工作指南》,管网分区有助于对漏损现状进行准确评估,提升对新增漏点的监测效率。然而,建立管网分区不可避免地会改变供水管网原来的连通关系,可能导致供水管网部分区域水质恶化。基于《“十四五”节水型社会建设规划》,研究管网分区对加氯策略的影响对于保障城镇居民的饮用水安全具有重要意义。

笔者比较了管网分区对不同加氯策略的影响,提出了一种有效控制管网分区后余氯浓度的加氯策略优化方法。该方法基于水源点非恒定加氯与多点位二次加氯的协同效应,优化所有加氯点逐时段的加氯强度,能充分保证分区后供水管网的水质安全,在加氯成本、维护成本和调控复杂度方面达到均衡状态,旨在为权衡分区后管网漏损控制效益与保证管网水质安全之间的矛盾提供一种有效的成本效益分析手段,有助于制订综合效益更优的决策方案。

1 材料和方法

1.1 管网分区方法

对供水管网进行分区时应考虑以下原则:①被输水干管隔开的小区域单独作为一个分区;②尽量选择权重小的管道作为分区之间的边界管;③为减少分区大直径边界管数量,在分区过程中可将部分末端输水干管纳入分区范围;④考虑分区均匀性,尽量让各个分区的需水量差异不大;⑤考虑如道路或水道形成的自然边界、行政区划等实际因素产生的影响^[4]。

国内外管网分区方法主要分为人工经验分区和计算分区法。人工经验分区主要是技术人员结合多年经验、专业知识和地理因素等对供水管网进行分区,分区后通过对管网进行模拟来验证其合理性。计算分区法即利用图论法、拓扑学知识和优化算法等,通过计算机模拟获得管网分区方案。对小规模管网而言,人工经验分区有一定优势;但人工经验分区主观性较强,对大规模管网而言,分区方案存在严重不足^[3]。

1.2 管网余氯的调控方式

目前管网余氯的调控方式一般是水源单点加氯与二次加氯的组合。其中,水源加氯可分为恒定加氯和非恒定加氯两种方式。二次加氯受加氯站点位置、加氯强度是否恒定的影响,可进一步分为以下四种方式:①选定加氯站点的数量和位置并采用恒定的加氯强度;②在方式①的基础上采用非恒定的加氯强度;③允许同时调整加氯站点的位置和数量并采用恒定的加氯强度;④在方式③的基础上采用非恒定的加氯强度。通常,随着组合加氯方式趋于灵活,管网系统总加氯量的降幅也随之提高;同时,对加药系统的自动化控制装备要求也越来越高,因此需要通过详细的技术经济分析手段权衡所选方式的合理性。

1.3 管网加氯的模拟方法

EPANET软件提供了4种模拟供水管网加氯过程的方法,包括固定浓度水源加氯方式、固定质量二次加氯方式、固定叠加浓度二次加氯方式和固定出流浓度二次加氯方式。本研究采用固定浓度水源加氯方式模拟水源点的加氯过程;考虑到加氯量计算的便利性,采用固定质量二次加氯方式模拟二次加氯过程。与此同时,针对水源点和二次加氯点的非恒定加氯情况,利用EPANET软件中的模式(Pattern)功能反映不同时段的调控强度(浓度)。

1.4 管网加氯策略优化模型

管网加氯策略的优化模型包含目标函数、决策变量及约束条件三个要素。目标函数为最小化加氯量(OF_1)、加氯复杂度(OF_2)和二次加氯站数量(OF_3),见式(1)~(5)。加氯量包括一个模拟周期内

水源点和所有二次加氯站投氯量的总和。加氯复杂度表示水源和二次加氯点非恒定氯投加浓度随时间变化的程度,具体计算方式为:累计一个模拟周期内加氯浓度变化模式中当前时刻的氯投加浓度不等于上一时刻数值的总次数。决策变量为判断各个节点是否为加氯站点,以及当某个节点被选为二次加氯点时各时段的加氯强度乘数因子。参考《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),约束条件如下:①所有节点的余氯浓度限值为0.05~2 mg/L;②出厂水余氯浓度不小于0.3 mg/L,见式(6)。

$$OF_1 = \min M =$$

$$\min \left(\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^T m_i^j F_i \Delta t_s + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^T m_i^k \Delta t_b \right) \quad (1)$$

$$OF_2 = \min C = \min \left(\sum_{j=1}^J \sum_{i=2}^T CS_i^j + \sum_{k=1}^K \sum_{i=2}^T CB_i^k \right) \quad (2)$$

$$OF_3 = \min B = \min \left[\sum_{n=1}^N \text{Boolean}(B_n) \right] \quad (3)$$

$$CS_i^j = m_i^j - m_{i-1}^j = \begin{cases} 0 & m_i^j = m_{i-1}^j \\ 1 & m_i^j \neq m_{i-1}^j \end{cases} \quad (4)$$

$$CB_i^k = m_i^k - m_{i-1}^k = \begin{cases} 0 & m_i^k = m_{i-1}^k \\ 1 & m_i^k \neq m_{i-1}^k \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} 0.05 \text{ mg/L} \leq C_i^n \leq 2 \text{ mg/L} \\ \quad (i \in 1, 2, \dots, T; n \in 1, 2, \dots, N) \\ C_i^n \geq 0.3 \text{ mg/L} \\ \quad (i \in 1, 2, \dots, T; j \in 1, 2, \dots, J) \end{cases} \quad (6)$$

式中: M 为加氯量,mg; m_i^j 为*i*时刻水源点*j*的加氯浓度,mg/L; m_i^k 为*i*时刻二次加氯站点*k*的加氯强度,mg/min; F_i 为*i*时刻水源点流量,L/s; Δt_s 为水源点每次加氯的水力步长,s; Δt_b 为二次加氯站点维持某一加氯强度的时长,min; C 为加氯消毒措施的总复杂度; CS_i^j 为*i*时刻水源点*j*的加氯复杂度; CB_i^k 为*i*时刻加氯站点*k*的加氯复杂度; B_n 为节点*n*是否作为二次加氯站点,如果选为加氯站点, $B_n = 1$,否则 $B_n = 0$; T 为模拟总时长,h; J 、 K 、 N 分别为供水管网中水源点、二次加氯站和需水节点的总数; C_i^n 为*i*时刻节点*n*的余氯浓度,mg/L; C_i^j 为*i*时刻水源点*j*的余氯浓度,mg/L。

1.5 求解算法

采用Borg算法^[5]求解管网加氯策略优化模型。选用该算法的主要原因如下:①相比于常规的多目

标优化算法,Borg算法内置 ε -支配^[6]规则,能对候选解进行高效比选和排序,保证帕累托解集的收敛性和多样性;②配备多种搜索算子参与遗传操作,能显著提高子代个体的适应度^[6]。Borg算法的主流程如图1所示,Borg算法每次随机选取一种算子(实线表示当前选取的是单峰正态交叉算子和多项式变异)参与遗传操作。图1中的*K*表示每次迭代计算参与的父代个体数量。具体来说,每次迭代计算从当前种群中抽取*K*-1个方案作为父代个体,从解集档案中抽取1个方案作为父代个体,再通过某种搜索算子产生相应的子代个体。*K*的具体数值与Borg算法选定的某种搜索算子相关,不同的搜索算子有不同的*K*值。

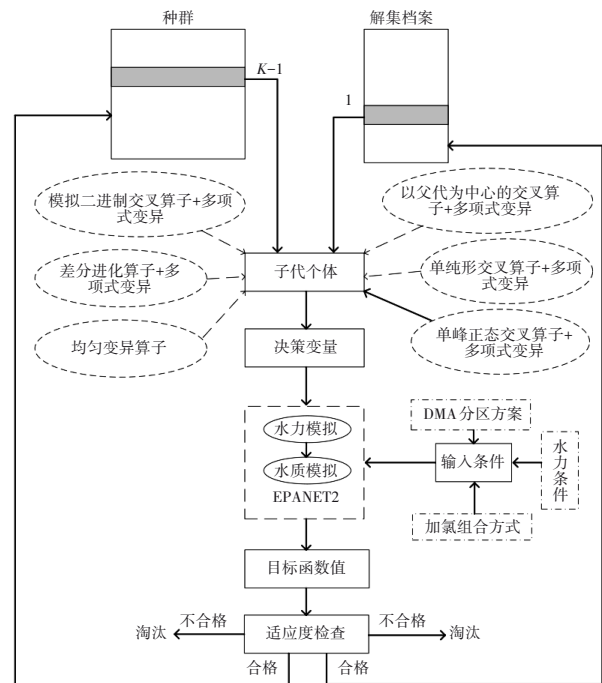


图1 Borg算法的主流程

Fig.1 Flow chart of Borg optimization algorithm

1.6 案例管网

J管网是中国某小镇供水管网^[7]。该管网包含1个水源,27个用水节点,34根管道;北部有一个总水头50 m的高位水池,日供水能力为 $2.52 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。该小镇所有用水节点的高程均为25 m。为保障用户正常用水需求,所有节点的最低水压需大于15 m。J管网的余氯衰减采用一级余氯衰减模型^[8],其中水体余氯衰减模型见式(7),管壁余氯衰减模型见式(8)。水体余氯衰减系数选用 $K_b = -3.72 \text{ d}^{-1}$;由于管网管材采用聚乙烯管,管壁余氯衰减系数选用 $K_w =$

-0.8 m/d^[9]。

$$R1 = K_b C \tag{7}$$

$$r = \frac{2K_w K_f C}{R(K_w + K_f)} \tag{8}$$

式中:R1为水体余氯衰减速率,mg/(L·d);K_b为水体余氯衰减系数,d⁻¹;C为水体余氯浓度,mg/L;r为壁面余氯衰减速率,mg/(L·d);R为管道半径,m;K_w为管壁余氯衰减系数,m/d;K_f为质量传输系数,m/d。

为对比水源单点加氯与二次加氯方案受管网分区的影响,对比了5种加氯方式:①水源恒定加氯;②水源非恒定加氯;③水源非恒定加氯,且在选定的加氯站点采用相同的非恒定强度进行二次加氯;④水源非恒定加氯,且在选定的加氯站点采用独立的非恒定强度进行二次加氯;⑤水源非恒定加氯,同时调整加氯站的位置、数量和加氯强度。以上5种加氯方式中,水源与加氯站的非恒定加氯强度彼此独立。

鉴于J管网的规模较小,采用人工经验分区。根据管网分区原则,将J管网分为东西两区(见图2),节点14~16、18~22和27划分为一个独立分区(分区2),剩余节点划入另一分区(分区1)。两个分区的需水量各占管网总需水量的50%左右。截断两个分区之间的一条连通管(12-15),仅保留管段13-14。为保证管网分区后所有节点的自由水压高于15 m,适当增大两个分区的连通管(13-14)和分区2中两条干管(14-15、15-16)的管径。

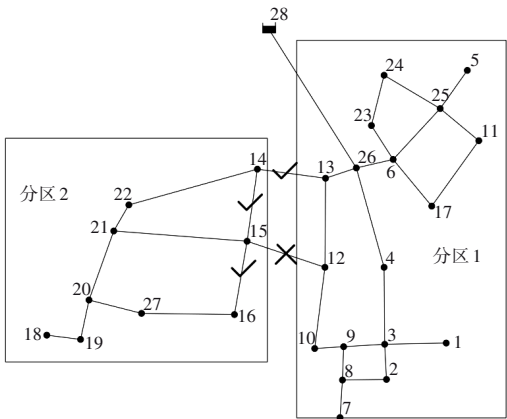


图2 J案例管网分区方案
Fig.2 Network partition scheme of J case

Borg算法的初始种群大小设置为100,通过试算发现,当目标函数的总评估次数设置为50 000次

时,足以保障帕累托解集的收敛性。J管网的水力模拟步长为1 h,水质模拟步长为5 min。

采用Borg算法对J管网设定的5种不同加氯方式进行优化计算,得到最优加氯方案为以下5种情景:水源点以0.7 mg/L的浓度恒定加氯(情景1);水源点以0.7 mg/L为基线浓度,配合逐时变化的非恒定加氯模式(情景2);水源点以0.7 mg/L的基线浓度配合非恒定加氯模式(不同于情景2),二次加氯站设置于节点3、6和15,加氯站采用同一加氯模式(情景3);水源点以0.7 mg/L的基线浓度非恒定加氯(不同于情景2和3),二次加氯站设置于节点3、6和15,每个二次加氯站采用不同的非恒定加氯模式(情景4);水源点以0.7 mg/L的基线浓度非恒定加氯(不同于情景2~4),二次加氯站设置于节点1、7、8、11、20、23和24,每个二次加氯站的实际投加量各不相同,但采用相同的非恒定加氯模式(情景5)。对J管网分区后,采用相同的方法获得情景3~5的最优加氯方案。

2 结果与讨论

2.1 分区前各加氯方式最优方案对比

从总加氯量、加氯复杂度、加氯站数量和加氯方案应用于分区后管网的水质不达标严重程度4个维度,比较分区前5种情景获得的最优加氯方案之间的差异,见表1。

表1 分区前各种加氯方式的最优方案

Tab.1 Optimal schemes of different chlorination strategies before network partition

项 目	总加氯量/ (kg·d ⁻¹)	加氯复 杂度	加氯站数 量/个	分区后管网节点水质 不达标的严重程度
情景1	17.64	0	0	0
情景2	14.00	11	0	2
情景3	10.70	9	3	10
情景4	10.10	14	3	12
情景5	9.38	5	7	11

注: 严重程度通过统计模拟周期内所有节点余氯浓度低于0.05 mg/L的总次数来表征。

由表1可以看出,加氯策略显著影响了最终的加氯方案,主要表现为:①加氯方式越灵活,总加氯量越低;②加氯站数量越多,总加氯量越低;③加氯复杂度越高,总加氯量越低;④加氯站数量越多,加氯复杂度趋于降低。从最简单的水源点恒定加氯方式到最灵活的水源点非恒定加氯+7个二次加氯站非恒定加氯,单日总加氯量的降幅最高可达

46.8%。另一方面,除水源恒定加氯外(情景1),管网分区会导致原有二次加氯方案均出现节点水质不达标的情况,且二次加氯优化方案中节点水质不达标情况比水源单点加氯方式更严重,即情景3~5中J管网整体的节点水质不达标情况比情景2更加明显。

2.2 分区前后管网关键节点余氯浓度时空变化

对比上述5种情景下分区前后管网关键节点的余氯浓度时空变化差异,结果如图3所示。

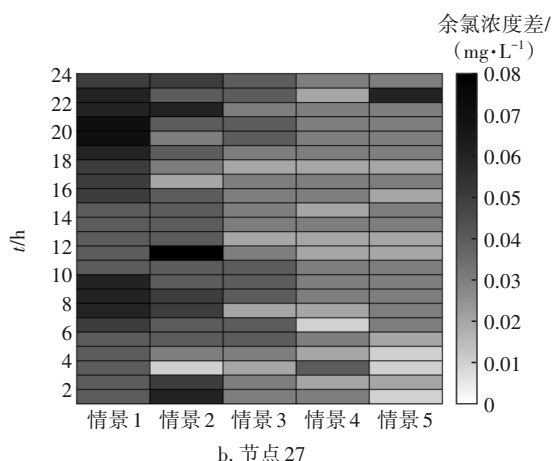
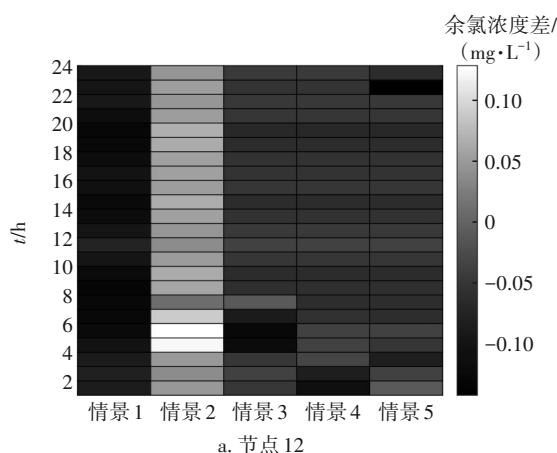


图3 关键节点在分区前后余氯浓度的差异

Fig.3 Variation of residual chlorine concentrations at critical nodes before and after network partition

由图3可知,相较于其他节点,截断管附近的节点12在管网分区前后余氯浓度差异波动较大,幅度在 $-0.13 \sim 0.13 \text{ mg/L}$ 之间。由于管网流态的变化,分区后原末梢节点27成为中间节点(管道流向发生变化),余氯浓度略有增加,增幅在 $0 \sim 0.08 \text{ mg/L}$ 之间。情景1、2中,节点12和27在管网分区前后的余氯浓度差异较大;分区后节点12的余氯浓度有升有降且幅度明显(情景1为 $-32\% \sim -20\%$,情景2为 $3\% \sim$

38%),节点27的余氯浓度显著上升(情景1为 $25\% \sim 46\%$,情景2为 $25\% \sim 73\%$)。情景3~5对应的余氯浓度时空变化差异明显小于情景1、2,即采用二次加氯的优化方案受管网分区的影响较水源单点加氯时要小。对比情景3~5可以发现,二次加氯方式越灵活,管网分区后关键节点的水质受到的影响越小。

2.3 分区后二次加氯方式下的最优方案对比

在J案例管网分区基础上,采用Borg算法重新计算二次加氯方式下的最优方案。情景6~8分别对应情景3~5中的二次加氯组合方式。表2为管网分区前后得到的最优二次加氯方案的综合效益,可以发现:①对分区后的供水管网进行二次加氯方案优化,能获得持续满足末梢水质安全的加氯方案;②虽然管网分区后得到的加氯方案中二次加氯站数量略有减少,但不可避免地需要提高总投氯量,且增幅仅体现在水源点的加氯量上。

表2 分区前后二次加氯优化方案的经济效益

Tab.2 Economic benefits of optimal secondary chlorination schemes before and after network partition

	最优加氯方案	水源点加氯量/kg	加氯站总加氯量/kg	加氯站数量/个	加氯复杂度	余氯消耗量/kg	
						管壁	水体
分区前	情景3	9.15	1.55	3	9	3.1	3.1
	情景4	9.10	1.00	3	14	3.0	3.0
	情景5	9.25	0.13	7	5	2.8	2.9
分区后	情景6	9.75	1.45	3	10	3.2	3.4
	情景7	9.20	0.90	3	10	2.9	3.2
	情景8	9.46	0.12	4	9	2.8	3.1

对比分区前后二次加氯优化方案中余氯消耗量的统计结果发现,管网分区后的加氯方案中,水体余氯消耗量都略有增加,管壁余氯消耗量相对稳定。分区后,由于截断管的出现,水从水源点运输至分区2的时长增加(相关节点水龄变大)。为保障管网各节点水质,情景6~8适当增加了水源点加氯量,由于水体余氯衰减速率与水体余氯浓度成正比,因此提高出厂水余氯浓度后导致水体余氯衰减速率增加,水体余氯消耗量增加。

2.4 代表性二次加氯方案详细对比

综合对比分区前后总投氯量最低的两种优化方案,图4(a)显示了分区前二次加氯的最优方案

(情景4);图4(b)显示了分区后最优加氯方案(情景8),即水源点以0.7 mg/L的浓度非恒定加氯,二次加氯站设置于节点3、7、10和23,4个二次加氯站的加氯强度均不一致,但都以相同的非恒定加氯模式运行。整体来看,分区后情景4导致供水管网中节点水质不达标的统计次数为12次;若采用情景8的加氯方案,可保障所有节点水质达标,且总加氯量比情景4降低0.52 kg/d(5.1%)。情景8的二次加氯点全部集中于分区1,这与分区1管径较小且余氯消耗量较大有关。二次加氯站数量比情景4多一个,新增站点位于分区1的管网末梢(节点7)。

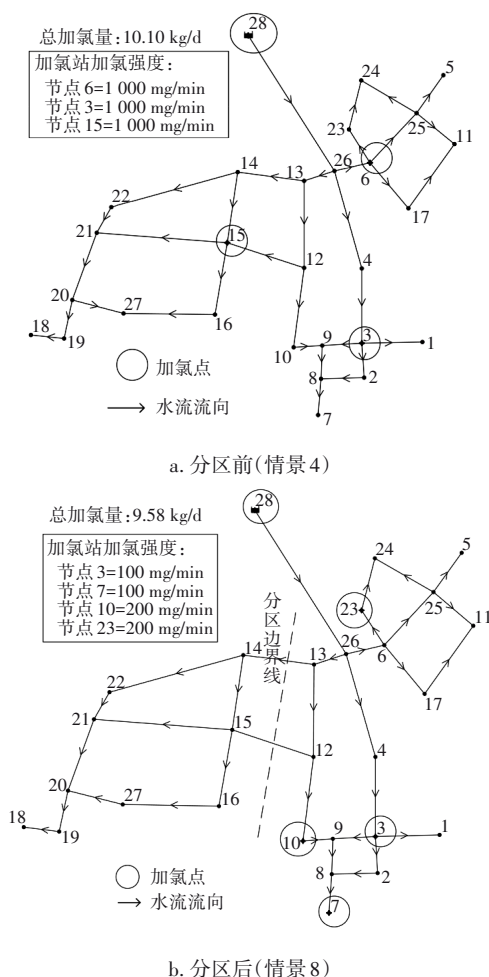


图4 管网分区前后二次加氯最优方案

Fig.4 Optimal schemes of secondary chlorination before and after network partition

比较分区前后水源点和加氯站加氯强度的变化,结果如图5所示。可以发现,管网分区前后水源点最低加氯强度均为0.35 mg/L,最高加氯强度均为0.49 mg/L。但分区后水源点加氯强度调节更为频

繁,平均加氯强度比分区前提高0.015 mg/L(4%)。分区后所有二次加氯站的平均加氯强度较分区前降低了一个数量级,由223.61 mg/min降低至21.25 mg/min。以分区前后同为二次加氯站的节点3为例,分区后加氯强度明显降低,并且加氯强度的变化幅度也显著降低。

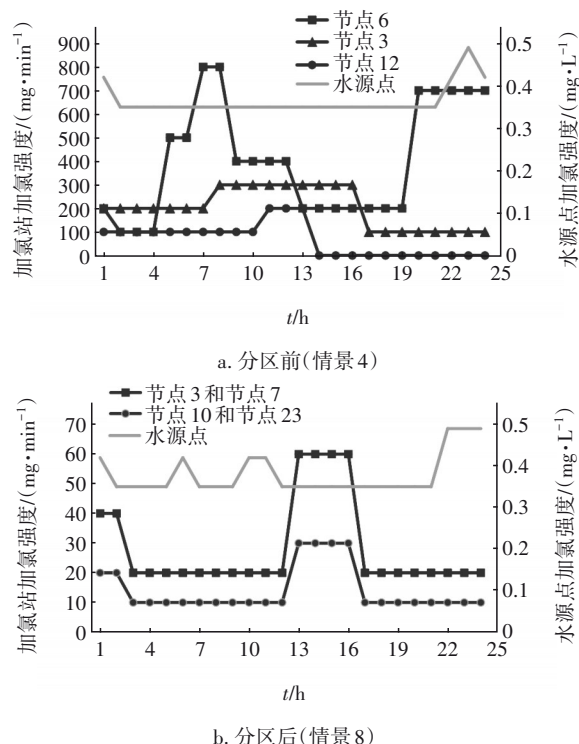


图5 管网分区前后最优加氯方案的氯投加强度

Fig.5 Chlorine addition intensity of optimal chlorination scheme before and after network partition

3 结论

① 分区会对原有加氯方案下的管网水质产生负面影响,节点水质出现不达标现象。管网分区对二次加氯方式下节点余氯浓度产生的负面影响较水源单点加氯方式更显著。

② 管网分区后水力条件的变化,在加氯方案不变的情况下,供水管网关键节点的余氯浓度随之发生改变。截断管附近节点的余氯浓度降低幅度较大,而管网末梢节点的余氯浓度有所增加。综合来看,二次加氯方式越灵活,分区后关键节点水质受到的负面影响越小。

③ 为持续满足管网末梢节点的水质安全需求,管网分区不可避免地会导致加氯成本的增加,且投加增量集中在水源点。

④ 在制订管网分区方案时,建议对管网分区

带来的产销差控制效益及为保障管网水质而增加的加氯成本进行详细的技术经济分析,进而获得综合效益更优的管网分区方案和加氯策略。

参考文献:

- [1] 李莉,张燕. 基于用水量权重的给水管网二次加氯优化[J]. 中国给水排水, 2011, 27(9): 50-53.
LI Li, ZHANG Yan. Optimization of booster chlorination in urban water distribution network based on weighted water consumption [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(9): 50-53 (in Chinese).
- [2] 王晨婉,强志民,徐强. 供水管网漏损研究知识结构与发展趋势分析[J]. 给水排水, 2020, 46(10): 141-149.
WANG Chenwan, QIANG Zhimin, XU Qiang. Analysis on the intellectual structure and emerging trends of water leakage in distribution networks [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(10): 141-149 (in Chinese).
- [3] 周中健,王琦,吉瑞博,等. 基于节点自然邻的供水管网DMA分区方法研究[J]. 给水排水, 2019, 45(7): 118-123.
ZHOU Zhongjian, WANG Qi, JI RuiBo, et al. Partition of DMAs within water distribution systems based on natural neighbors of nodes [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(7): 118-123 (in Chinese).
- [4] 刘子叶,谢予婕,李树平,等. 供水管网DMA优化分区设计方案[J]. 净水技术, 2021, 40(10): 62-69.
LIU Ziyue, XIE Yujie, LI Shuping, et al. Scheme of optimized DMA design for water supply pipelines network [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(10): 62-69 (in Chinese).
- [5] HADKA D, REED P. Borg: an auto-adaptive many-objective evolutionary computing framework [J]. Evolutionary Computation, 2013, 21(2): 231-259.
- [6] 苏炯恒,王琦,王礼炳,等. 考虑成本-弹性-水质的供水管网多目标协同设计方法[J]. 中国给水排水, 2020, 36(21): 58-65.
SU Jiongheng, WANG Qi, WANG Libing, et al. A multi-objective coordinated design method for water distribution networks considering cost, resilience and water quality [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(21): 58-65 (in Chinese).
- [7] BI W W, DANDY G C. Optimization of water distribution systems using online retrained metamodels [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014, 140(11): 4014032.
- [8] 郝艳萍. 余氯衰减一级模型参数确定方法试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
HAO Yanping. Study on Method of the First Order Chlorine Decay Model Parameters Determination [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 (in Chinese).
- [9] ONYUTHA C, KWIO-TAMALE J C. Modelling chlorine residuals in drinking water: a review [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022, 19(11): 11613-11630.

作者简介: 段婷(1999-), 女, 湖南娄底人, 硕士研究生, 主要研究方向为供水管网余氯调控。

E-mail: 2644196432@qq.com

收稿日期: 2023-01-18

修回日期: 2023-02-29

(编辑: 任莹莹)

推进城市节水, 建设美丽城市