

侯煜堃, 赵硕, 冯玉冠. 基于管道节点水龄的供水管网中途加氯优化[J]. 净水技术, 2024, 43(6): 71-79, 160.

HOU Y K, ZHAO S, FENG Y G. Optimization of pipelines midpoint chlorination in water supply distribution networks based on water age of pipelines nodes[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 71-79, 160.

基于管道节点水龄的供水管网中途加氯优化

侯煜堃, 赵硕*, 冯玉冠

(华北水利水电大学环境与市政工程学院, 河南郑州 450046)

摘要 节点水龄被认为是评价管网水质的重要参数之一, 与余氯浓度之间存在着紧密的关联。如何在漫长的管网输水过程中, 维持饮用水的水质安全是一项挑战。通过节点水龄和余氯浓度的关系, 基于广度优先搜索思想的拓扑排序算法, 按照定义计算节点间水龄, 提出并构建节点水龄有效矩阵, 并结合遗传算法对中途加氯点和加氯量优化模型进行优化求解。对优化后的实际管网案例进行单时刻静态模拟和多时刻动态延时模拟分析, 结果表明, 基于节点水龄的供水管网中途加氯优化能够降低节点加氯量的投加, 余氯浓度分布更均匀, 为给水管网水质优化提供了实际指导。

关键词 给水管网 节点水龄 中途加氯 遗传算法 拓扑排序

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)06-0071-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.06.008

Optimization of Pipelines Midpoint Chlorination in Water Supply Distribution Networks Based on Water Age of Pipelines Nodes

HOU Yukun, ZHAO Shuo*, FENG Yuguan

(School of Environmental and Municipal Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract Water age of pipelines node is considered as one of the crucial parameters for evaluating water quality in water supply distribution networks, closely correlated with the residual chlorine concentration. Maintaining the safety of drinking water quality throughout the extended process of water transmission in the pipeline poses a significant challenge. Leveraging the relationship between water age of pipelines node and residual chlorine concentration, a topological sorting algorithm based on breadth-first search is employed to calculate the water age of pipelines node. It was proposed and constructed an effective matrix for water age of pipelines node, integrating a genetic algorithm to optimize the model for midpoint chlorination addition locations and chlorine dosage. The optimized model was applied to real-world pipeline scenarios, subjected to both single-moment static simulations and multi-moment dynamic delay simulations. The results demonstrated that the optimization of midpoint chlorine addition in water supply networks based on water age of pipelines node reduced the required chlorine dosage at individual nodes, resulting in a more uniform distribution of residual chlorine concentration. This approach provides practical guidance for the water quality optimization of water supply networks.

Keywords water supply distribution network water age of pipelines node midpoint chlorination genetic algorithm topological sorting

城镇化规模的扩张引发了供水管网拓扑结构和规模复杂性的增加, 这也导致出厂水水质的化学和

微生物等指标发生变化。饮用水滞留时间过长可能导致水质余氯浓度降低, 从而威胁水质安全和居民的健康; 反之, 水流过短则可能使余氯浓度升高, 增加消毒副产物的风险^[1-2]。在水质变化机理的研究中发现, 从水源点流至管网某一节点所需的水流时间越长, 则该节点的余氯浓度越低; 反之, 随着水流时间的减短, 余氯浓度逐渐增加^[3-5]。通过分析

[收稿日期] 2023-11-14

[作者简介] 侯煜堃(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为城市水务规划与信息化管理、给水排水工程设计与运行最优化等。

[通信作者] 赵硕(1998—), 男, 硕士, E-mail: 2394231254@qq.com。

节点水龄与余氯浓度之间的关系,构建节点水龄有效矩阵,有助于准确定位需改善水质的管网区域,并通过中途加氯等措施提高水质,确保居民用水安全,更有效地优化供水管网,提高水质管理的精度和效果。

1 节点水龄定义

管径水龄是指水在特定管段内停留的时间,而节点水龄则是水从水厂到达某节点时所经过的所有管段的累计管径水龄^[6-7]。在水的输送过程中,通常存在多条路径,且每条路径输送给节点的流量可能不同,不同路径的水在某节点进行了加权混合^[8-9]。节点水龄不仅要考虑水在管道内停留的时间,还要考虑多路径输送对水质的影响,将水从不同供水路径到达该节点所经历的不同时间基于各管段的流量比例进行加权混合,为理解和优化复杂供水系统的水质管理提供了新的理论基础^[10-12]。节点水龄的计算如式(1)。

$$t_j = \frac{\sum_{i \in S_j} q_{ij} \left(t_i + \frac{L_{ij}}{V_{ij}} \right)}{\sum_{i \in S_j} q_{ij}} \quad (1)$$

其中: t_i, t_j ——节点*i*和节点*j*的节点水龄,s;
 i ——与节点*j*相邻的某个上游节点;
 S_j ——与节点*j*相邻的所有上游节点的集合;
 q_{ij} ——节点*i*与节点*j*之间的管段流量,L/s;
 L_{ij} ——节点*i*与节点*j*之间的管段长度,m;
 V_{ij} ——节点*i*与节点*j*之间的管段流速,m/s。

2 节点水龄矩阵

水流时间的精确计算对于供水管网的优化至关重要,为反映供水管网任意两节点间的水龄上的联系,根据式(1)计算任意两节点之间的水流时间,从而构建节点水龄矩阵 $[T]$,节点水龄矩阵的计算如式(2)。其中元素 $T(i,j) (i,j \in \{n\})$ 表示节点*i*到节点*j*的水龄时间, n 为供水管网节点总数。

$$[T] = \begin{bmatrix} T(1,1) & T(1,2) & \cdots & T(1,n) \\ T(2,1) & T(2,2) & & T(2,n) \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ T(n,1) & T(n,2) & \cdots & T(n,n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

在节点水龄矩阵 $[T]$ 的构建中,考虑不同的水龄计算情况, $T(i,j)$ 主要包括以下情况。

(1)若节点*i*到节点*j*没有水流路径,二者之间无水质联系, $T(i,j) = \infty$ 。

(2)若节点*i*到节点*j*只有一条水流路径,水龄时间计算如式(3)。

$$T(i,j) = t_i + \frac{L_{ij}}{V_{ij}} \quad (3)$$

(3)若节点*i*到节点*j*存在多条水流路径连接两点,水龄时间计算如式(4)。

$$T(i,j) = \frac{\sum_{n=1}^N q_{ij}^{(n)} T_{ij}^{(n)}}{\sum_{n=1}^N q_{ij}^{(n)}} \quad (N \in U^i) \quad (4)$$

其中: $T_{ij}^{(n)}$ ——水沿第*n*条水流路径从节点*i*到节点*j*流经的时间,s;
 $q_{ij}^{(n)}$ ——节点*i*沿第*n*条水流路径流入节点*j*的水量,L/s;
 U^i ——节点*i*到节点*j*所有供水路径的集合。

通过对不同水龄计算情况的考虑,能够更全面地评估管网中任意两节点之间的水质联系,为管网优化提供关键的数据支持。

3 节点水龄有效矩阵

国内外研究^[13]表明,随着水在管网中流动时间增加,节点处的余氯浓度逐渐减小。为了评估管网水质,引入水龄时间标准*C*,该标准反映了水在一定时间范围内的水质状况。Lee等^[14-15]提出的监测点覆盖模型认为从上游节点到下游节点,水质参数随水流时间和流动距离增加而减小,如果下游节点接收足够多的来自上游节点的水量,则认为下游节点能够代表上游节点水质。在相同前提下,通过设定水流时间的水龄时间标准*C*,判断上游节点*i*是否能够代表下游节点*j*。通过节点水龄矩阵 $[T]$ 中的元素,根据给定的水龄时间标准*C*,来确定上游节点*i*是否能够代表下游节点*j*的水质状况,计算如式(5)。这样可以获得管网节点的水龄有效矩阵 $[T_c]$,计算如式(6)。

$$T_c(i,j) = \begin{cases} 1, & T(i,j) \leq C \\ 0, & T(i,j) > C \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$[T_c] = \begin{bmatrix} T_c(1,1) & T_c(1,2) & \cdots & T_c(1,n) \\ T_c(2,1) & T_c(2,2) & \cdots & T_c(2,n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_c(n,1) & T_c(n,2) & \cdots & T_c(n,n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: $T(i,j)$ ——水流从上游节点 i 到下游节点 j 的水龄时间, s;

$T_c(i,j)$ ——在水龄时间标准 C 下, 节点 i 能覆盖到节点 j 则为 1, 否则为 0。

4 中途加氯优化模型

我国城市化规模的扩大伴随着城市供水管网的改扩建, 在实际供水管网中途加氯优化研究中, 通常采用两级优化模型。先确定中途加氯点的数量和位置, 再精确调控每个加氯点的投加量, 以优化水质, 实现管网水质最佳化。

4.1 加氯点选址优化模型

4.1.1 优化目标

在给定的水龄时间标准 C 内, 选址加氯点(包括中途加氯点和水厂等水源加氯点)的目标是最大程度覆盖供水管网内的用户节点, 即加氯点覆盖范围内各用户节点的用水量之和 D 最大。在实际情况下, 要求所选加氯点能够覆盖管网内所有用水节点, 优化目标函数如式(7)。

$$\max D = \sum_{j=1}^n D_j y_j \quad (7)$$

其中: D_j ——节点 j 的用水量, L/s;

y_j ——节点 j 是否被覆盖到, 若是则 y_j 为 1, 否则为 0。

4.1.2 约束条件

从技术角度考虑, 在追求给水管网余氯浓度分布均匀的目标下, 可考虑在每个节点进行加氯。然而, 实际情况中合理的加氯点数量可能会受到经济、地理空间等因素的限制, 因此, 可以预先设定目标加氯点的数量, 尽量避免优化求解结果在实际应用中并不能实施的情况, 合理的加氯点个数需满足以下条件, 如式(8)。

$$1 \leq \sum_{i=1}^n x_i \leq L_N \quad (8)$$

其中: x_i ——若节点 i 是加氯点, 则 x_i 取值为 1, 否则为 0;

L_N ——加氯点个数最大值。

在一定的水龄时间标准 C 下, 选取的管网加氯点的水龄有效矩阵 $[T_c(i,j)]$ 可以由两节点之间的水龄时间来确定。每个加氯点具有一个覆盖范围, 通过计算水龄有效矩阵 $[T_c(i,j)]$, 可确定加氯点的覆盖范围。在实际优化过程中, 确保加氯点的覆盖范围包含全部管网节点是必要的, 也就是说所有的 y_j 取 1 即可, 如式(9)。

$$\sum_{i=1}^n [T_c] x_i - y_j \geq 0 \quad (9)$$

其中: $[T_c]$ ——节点水龄有效矩阵;

x_i ——节点 i 是否为加氯点, 若是则为 1, 否则为 0;

y_j ——节点 j 是否被覆盖到, 若是则为 1, 否则为 0。

4.1.3 中途加氯点选址优化模型

借鉴 Lee 等^[14-15]提出的监测点覆盖模型, 结合上述研究内容, 确定中途加氯点位置的优化模型, 如式(7)~式(9)。

4.2 加氯量优化模型

我国许多水厂仍采用氯消毒来保障管网水质安全, 依据水质标准规定, 供水管网末梢的游离性余氯不得低于 0.05 mg/L^[16]。中途加氯的目的在于确保管网中每个节点的余氯浓度达到标准, 而加氯量的大量增加可能导致氯消毒副产物, 如三卤甲烷的生成^[17-18]。在确定加氯点位置的前提下, 通过最小化管网中各节点余氯浓度与目标余氯浓度间的差值和 P , 实现总加氯量的最小化, 如式(10)。

$$\min P = \sum_{i=1}^n (C_i - C_{aim}) \quad (10)$$

其中: C_i ——节点 i 的余氯质量浓度, mg/L;

C_{aim} ——节点 i 的目标余氯质量浓度, mg/L。

为了建立可行的优化模型, 选择了一级余氯衰减模型, 该模型在试验数据拟合和实际应用中表现良好, EPANET 中也通常使用该模型来模拟余氯的消耗。结合一级余氯衰减模型和管网节点混合规律, 建立了加氯量的优化模型, 如式(11), 旨在满足水质标准的前提下, 最有效地减小管网总加氯量, 以提高管网运行的经济性。

$$\text{s. t. } \begin{cases} C_{\min} \leq C_j \leq C_{\max} \\ C_j = \frac{\sum_{i=1}^l C_i \exp(-k_{i,j} t_{i,j}) Q_i}{\sum_{i=1}^l Q_i} + C_{oi} \end{cases} \quad (11)$$

其中: $C_{\max}$ ——管网水中的余氯上限值, mg/L, 取 2 mg/L;
 $C_{\min}$ ——管网水中的余氯下限值, mg/L, 取 0.05 mg/L;
 l ——节点 j 上游节点的个数;
 $k_{i,j}$ ——节点 i, j 点间的总余氯衰减系数, h^{-1} ;
 $t_{i,j}$ ——节点 i, j 点间水的传输时间, h;
 C_{oi} ——第 i 个加氯点的加氯量, mg/L;
 Q_i ——节点 i 处的流量, L/s。

5 案例分析

根据 EPANET 中的一个管网实例 Net2 进行案例分析。该管网通过泵站(节点 1)向用户供水,通过水塔(节点 26)对管网供水进行调节,还包括 36 个节点和 43 根连接管段。选取 31 h 由双水源同时供水的典型工况进行中途加氯的优化分析,管网布置如图 1 所示。EPANET 水力模型在该工况的节点用水量数据和管段水力数据如表 1 和表 2 所示。

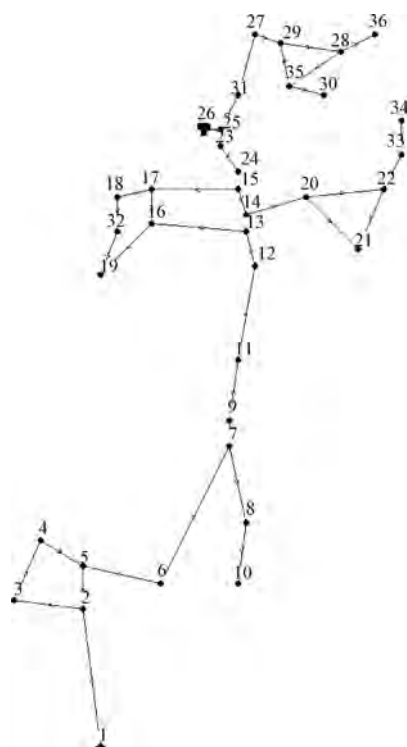


图 1 管网布置

Fig. 1 Layout Plan of Distribution Network

表 1 EPANET 水力模型在 31 h 的节点用水量数据

Tab. 1 Node Water Consumption Data of EPANET

Hydraulic Model at 31 h

节点编号	用水量/(L·s ⁻¹)	节点编号	用水量/(L·s ⁻¹)
1	—	19	0.542
2	0.867	20	2.059
3	1.517	21	1.734
4	0.867	22	1.084
5	0.867	23	0.867
6	0.542	24	1.192
7	0.433	25	0.650
8	0.975	26	—
9	1.517	27	0.867
10	0.542	28	0.000
11	3.769	29	0.759
12	1.734	30	0.325
13	0.217	31	1.842
14	0.217	32	1.842
15	0.217	33	0.163
16	2.167	34	0.163
17	2.167	35	0.000
18	2.167	36	0.108

表 2 EPANET 水力模型在 31 h 的管段水力数据

Tab. 2 Pipelines Section Hydraulic Data of EPANET

Hydraulic Model at 31 h

编号	上游节点	下游节点	管长/m	管径/mm	流量/(L·s ⁻¹)	流速/(m·s ⁻¹)
1	1	2	744	300	19.71	0.28
2	2	5	248	300	15.36	0.22
3	2	3	403	200	3.48	0.11
4	3	4	372	200	1.96	0.06
5	4	5	310	300	1.09	0.02
6	5	6	372	300	15.58	0.22
7	6	7	837	300	15.04	0.21
8	7	8	372	200	1.52	0.05
...	...	...	...	...	...	...
32	27	29	124	200	1.19	0.04
34	29	28	217	100	0.19	0.02
35	22	33	310	100	0.33	0.04
36	33	34	124	100	0.16	0.02
37	19	32	155	200	1.24	0.04
38	29	35	155	100	0.25	0.03
39	35	30	310	100	0.33	0.04
40	28	35	217	100	0.08	0.01
41	28	36	93	100	0.11	0.01

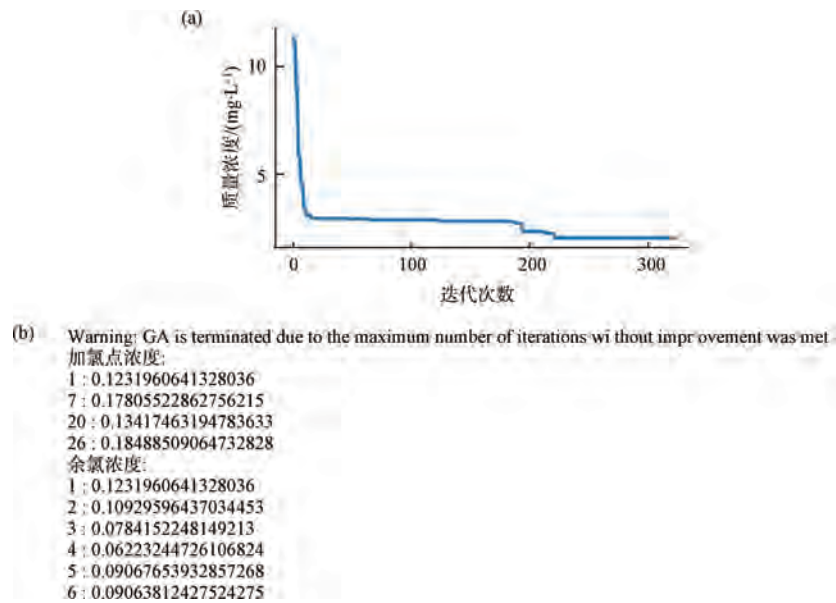


图2 遗传算法迭代过程及模型求解结果展示

Fig. 2 Iteration Process of Genetic Algorithm and Results of Model Solution

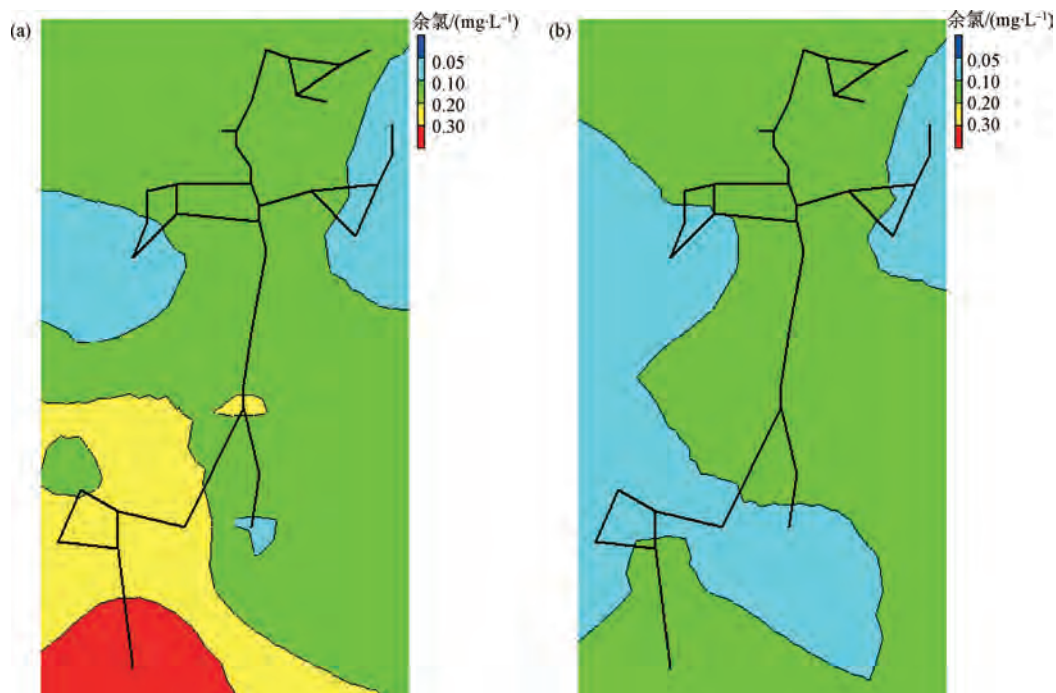


图3 31 h 优化前后管网余氯浓度分布

Fig. 3 Distribution of Residual Chlorine Concentrations in the Network before and after Optimization at 31 h

合标准,且分布更均匀,大幅降低了整体余氯浓度和消毒副产物生成的风险。

6 管网中途加氯动态运行调控

管网在不同时刻的运行情况不同,因此在选定加氯点数量和位置的基础上,选取泵站单独供水的工况(14 h)、水塔单独供水的工况(10 h)、泵站和水

塔同时供水的工况(17、31、42 h)利用 EPANET 分别进行模拟,调整加氯点和加氯量以满足不同工况下管网末梢对于余氯浓度的要求(表3)。

在模拟周期内,设定 EPANET 水质模型中不同工况下各加氯点的加氯量变化系数,然后进行水质模拟,获取管网在动态运行下的余氯浓度分布情况。

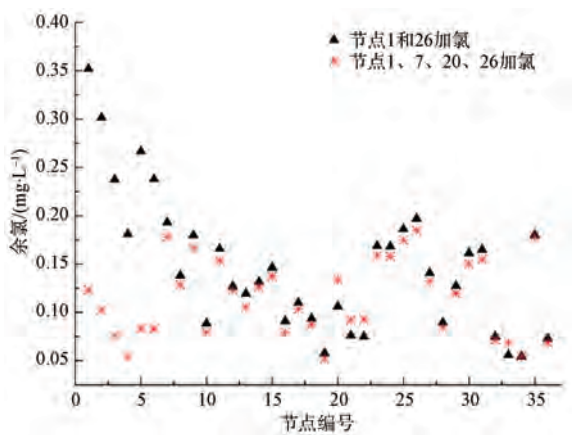


图4 各节点余氯浓度

Fig. 4 Residual Chlorine Concentrations at Each Nodes

表3 不同工况下各加氯点的加氯量

Tab. 3 Chlorine Dosage at Each Chlorination Point under Different Working Conditions

项目	节点1加氯量/(mg·L ⁻¹)	节点7加氯量/(mg·L ⁻¹)	节点20加氯量/(mg·L ⁻¹)	节点26加氯量/(mg·L ⁻¹)
(14 h)中途加氯优化前	0.38	—	—	—
(14 h)中途加氯优化后	0.12	0.16	—	—
(10 h)中途加氯优化前	—	—	—	0.39
(10 h)中途加氯优化后	—	0.19	—	0.15
(17 h)中途加氯优化前	0.30	—	—	0.22
(17 h)中途加氯优化后	0.12	0.17	—	0.19
(42 h)中途加氯优化前	0.42	—	—	0.18
(42 h)中途加氯优化后	0.13	0.18	0.11	0.13
(31 h)中途加氯优化前	0.35	—	—	0.20
(31 h)中途加氯优化后	0.12	0.18	0.13	0.18

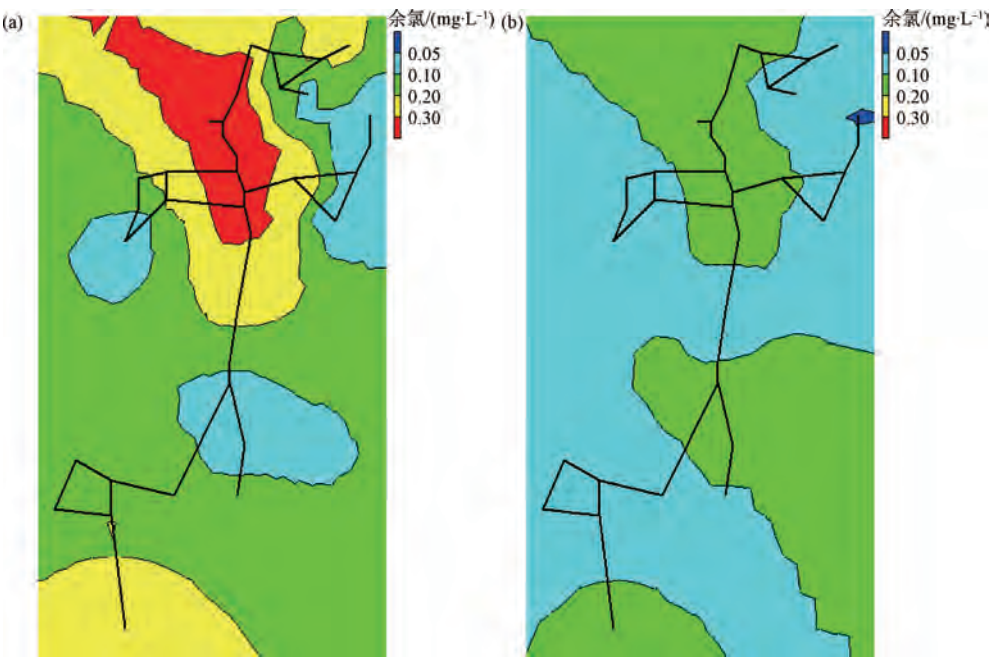


图5 22 h 优化前后管网余氯浓度分布

Fig. 5 Distribution of Residual Chlorine Concentrations in Network before and after Optimization at 22 h

在 22 h,水塔处于出水状态,单独向管网供水。在该工况下,泵站处的加氯点停止加氯,此时管网由设置在节点 26 的加氯点单点加氯,若考虑中途加氯优化,管网由设置在节点 26 和节点 7 的加氯点共同调节管网余氯浓度。在仅在水塔加氯的方式中,上一时段的余氯浓度还未衰减,因此,在个别节点处会出现余氯浓度较高的情况。如图 5 所示,采用中途加氯方式后,整个管网余氯质量浓度均匀分布在 0.2 mg/L 以下,末梢节点余氯质量浓度基本维持在 0.05 mg/L 及以上,满足规定的管网末梢余氯浓度要求。

在 27 h,泵站单独向管网供水,水塔处于进水状

态。在该工况下,水塔处的加氯点停止加氯,此时管网由设置在节点 1 的加氯点单点加氯,若考虑中途加氯优化,管网由设置在节点 1 和节点 7 的加氯点共同调节管网余氯浓度。如图 6 所示,两种加氯策

略下的管网余氯浓度整体表现为从加氯点沿水流方向逐渐降低。在满足管网末梢余氯浓度的要求下,管网中途加氯方式相较于传统的水源点加氯,加氯点余氯浓度更低,管网余氯浓度分布更均匀。

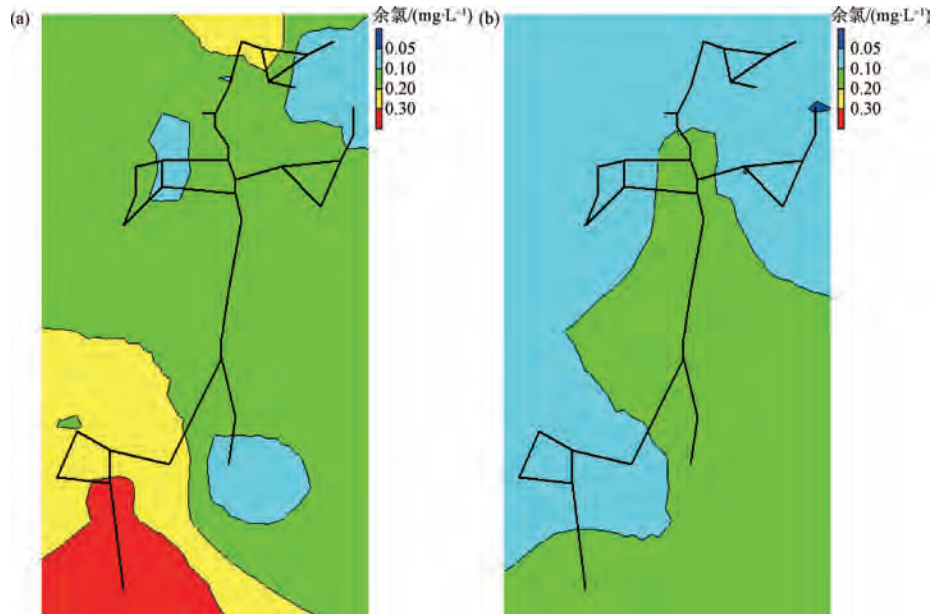


图 6 27 h 优化前后管网余氯浓度分布

Fig. 6 Distribution of Residual Chlorine Concentrations in Network before and after Optimization at 27 h

在 42 h,泵站处于运行状态,水塔处于出水状态,管网由泵站和水塔共同供水。在该工况下,管网由设置在节点 1 和节点 26 的加氯点同时加氯,若考

虑中途加氯优化,管网由设置在节点 1、节点 7、节点 20 和节点 26 的加氯点共同调节管网余氯浓度。如图 7 所示,仅考虑水源点加氯时,在加氯点附近的余

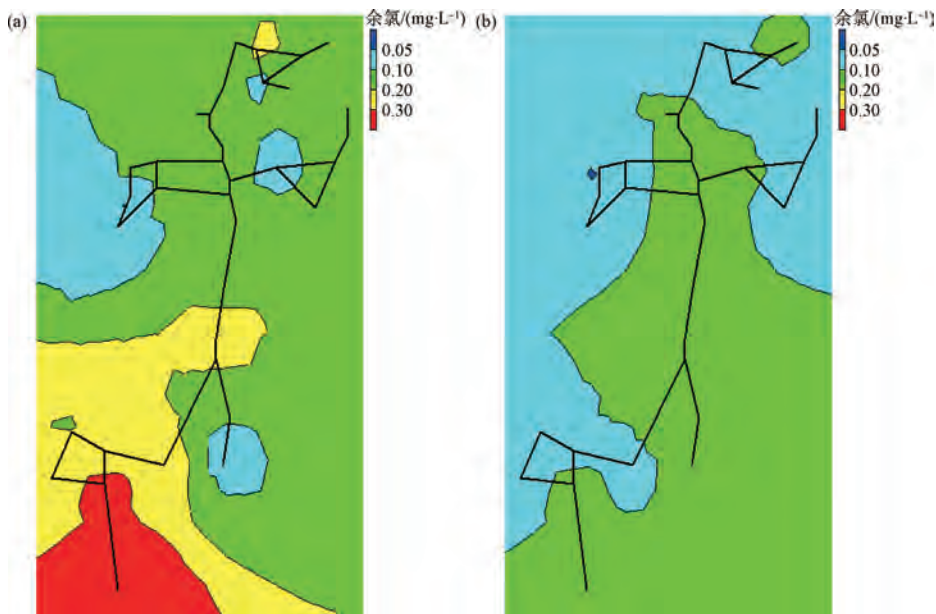


图 7 42 h 优化前后管网余氯浓度分布

Fig. 7 Distribution of Residual Chlorine Concentrations in Network before and after Optimization at 42 h

氯质量浓度达到 0.3 mg/L 以上,末梢余氯质量浓度则接近 0.05 mg/L,余氯浓度在整个管网中的分布梯度较大。在满足管网末梢余氯浓度的要求下,采用中途加氯方式,整个管网的余氯浓度分布更为均匀。

7 结论

聚焦节点水龄和余氯浓度的关系,通过设定水龄时间标准和构建节点水龄有效矩阵,以节点水龄反映节点水质关系。中途加氯的优化研究分两步进行:首先,基于节点水龄有效矩阵提出中途加氯点位置优化模型;其次,通过优化加氯量,以最小化各用水节点余氯浓度与目标浓度差值为目标。将优化模型应用于实例管网,在 jupyter notebook 计算环境通过 EPANET-Python 工具包(epyt)加载运行 EPANET 模型并使用 genetic algorithm 遗传算法库优化求解,得出优化后的结果。结果表明,采用上述方式对供水管网进行中途加氯优化,在满足各用水节点余氯浓度要求的前提下,管网中各节点余氯浓度分布更为均匀,有效降低了消毒副产物产生的风险,显著提升了管网整体的供水安全性,为更可靠的水质管理提供了实用有效的解决方案。

参考文献

- [1] 谈勇. 饮用净水管网余氯与细菌总数的相关性研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(13): 105-107.
TAN Y. Research on correlation of residual chlorine and total bacterial count in water distribution network[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(13): 105-107.
- [2] 信昆仑, 瞿玲芳, 陶涛, 等. 基于综合水龄指数评价的供水管网优化调度[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 1579-1584.
XIN K L, QU L F, TAO T, et al. Optimal scheduling of water supply network based on node water age [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2016, 44(10): 1579-1584.
- [3] 林英姿, 王宇. 供水管网水质模型中余氯在主体水中的衰减情况分析[J]. 吉林建筑大学学报, 2015, 32(2): 46-48, 97.
LIN Y Z, WANG Y. Analysis on decay of residual chlorine in bulk water for water quality modeling in water distribution system [J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2015, 32(2): 46-48, 97.
- [4] 班福忱, 叶露, 吴丹, 等. 基于 WaterGEMS 的供水管网建模及爆管分析研究[J]. 给水排水, 2020, 56(8): 116-120.
BAN F C, YE L, WU D, et al. Modeling and analysis of water supply network based on WaterGEMS [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(8): 116-120.
- [5] 侯宝芹, 任柏来, 童佳佳, 等. 供水管网游离氯衰减变化规律及影响因素的试验[J]. 净水技术, 2022, 41(s1): 67-70, 201.
HOU B Q, REN B L, TONG J J, et al. Experiment on law and influencing factors of residual chlorine attenuation in water supply pipeline network [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(s1): 67-70, 201.
- [6] 蒋承杰. 配水管网水龄分析与管网水质状况评价体系的探讨[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
JIANG C J. The age of water distribution network's analysis and the appraisal system with water quality condition's discussion [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [7] 郭维, 颜合想, 潘瑞军, 等. 多水源管网供水压力调整对供水交界面水龄的影响[J]. 中国给水排水, 2020, 36(1): 47-51.
GUO W, YAN H X, PAN R J, et al. Influence of water supply pressure adjustment on water age at water supply area boundaries in a multi-source water supply network [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(1): 47-51.
- [8] 许仕荣, 周书葵. 基于节点水龄的供水管网水质监测点的优化布置[J]. 南华大学学报(理工版), 2003(3): 13-16.
XU S R, ZHOU S K. Optimal locating of quality monitoring stations in water distribution systems based on current age of the nodes [J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2003(3): 13-16.
- [9] 周书葵. 城市供水 SCADA 系统管网监测点优化布置的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2004.
ZHOU S K. Research on the optimization of SCADA system monitoring points in urban water supply distribution networks [D]. Changsha: Hunan University, 2004.
- [10] 张怀宇, 赵洪宾, 吴文燕, 等. 市政给水管网水质监测点的优化选址[J]. 给水排水, 1996(10): 5-8.
ZHANG H Y, ZHAO H B, WU W Y, et al. Optimal localization of water quality monitoring points in municipal water distribution network [J]. Water & Wastewater Engineering, 1996(10): 5-8.
- [11] 李璞. 基于节点水龄分析的供水管网水质优化技术研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
LI P. Research on water quality optimization technique of water supply network based on water node age [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2014.
- [12] 阿依努尔·米吉提. 基于综合水龄指数评价的供水管网优化调度研究[J]. 陕西水利, 2019(6): 114-116.
MIJITI A Y N E. Research on optimization scheduling of water supply network based on comprehensive water age index evaluation [J]. Shaanxi Water Resources, 2019(6): 114-116.

(下转第 160 页)

- [28] 赵丽, 张韵, 郭劲松, 等. 重庆市加油站周边浅层地下水中石油烃污染调查与特征分析[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 131-136.
ZHAO L, ZHANG Y, GUO J S, et al. Investigation on pollution characteristics of petroleum hydrocarbon in shallow groundwater around gas stations [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(1): 131-136.
- [29] 张小凤, 刘文超, 苏子艺, 等. 成都平原社会加油站地下储油罐渗漏有机污染物监测[J]. 环境工程, 2015, 33(7): 127-130.
ZHANG X F, LIU W C, SU Z Y, et al. Characteristics of pollutants from underground storage tank leakage in social gas station in Chendu Plain [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2015, 33(7): 127-130.
- [30] 潘海燕, 过伟. 淮安市地表水和地下水中残留 MTBE(甲基叔丁基醚)的调查[J]. 仪器仪表与分析监测, 2007(4): 45-46.
PAN H Y, GUO W. An investigation on MTBE residue in surface and ground water of Huai'an [J]. Instrumentation Analysis Monitoring, 2007(4): 45-46.
- [31] 中华人民共和国环境保护部. 地下水污染健康风险评估工作指南(试行)[R]. 北京: 环境保护部, 2014.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Guidelines for health risk assessment of groundwater pollution (Trial) [R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, 2014.
- [32] United States Environmental Protection Agency. Regional screening levels (RSL) summary table [EB/OL]. (2023-12-11) [2023-07-06]. <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables>.
- (上接第 79 页)
- [13] 李璞, 李红卫, 吕谋, 等. 供水管网节点水龄变化规律研究[J]. 青岛理工大学学报, 2014, 35(2): 66-71.
LI P, LI H W, LÜ M, et al. Research of some rules on node age change in water supply network [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology, 2014, 35(2): 66-71.
- [14] LEE B H, DEININGER R A. Optimal locations of monitoring stations in water distribution system [J]. Journal of Environmental Engineering, 1992, 118(1): 4-16.
- [15] LEE B H, DEININGER R A, CLARK R M. Locating monitoring stations in water distribution systems [J]. Journal American Water Works Association, 1991, 83(7): 60-66.
- [16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Standards for drinking water quality: GB 5749—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [17] 全重臣, 员建, 苑宏英, 等. 饮用水处理中氯化消毒副产物三卤甲烷和卤代乙酸研究进展[J]. 净水技术, 2012, 31(2): 6-11.
TONG Z C, YUAN J, YUAN H Y, et al. Advances in research of trihalomethanes and haloacetic acids of chlorination disinfection by-products in drinking water treatment [J]. Water Purification Technology, 2012, 31(2): 6-11.
- [18] 曾磊, 刘海燕, 贺珊珊, 等. 饮用水卤代烃污染及其防治去除研究进展[J]. 净水技术, 2019, 38(3): 21-25, 31.
ZENG L, LIU H Y, HE S S, et al. Research progress of control and removal of halogenated hydrocarbon pollution in drinking water [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(3): 21-25, 31.
- [19] 李岚泊. 基于遗传算法的给水管网优化设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.
LI L B. Optimal design of water supply system based on improved genetic algorithm[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019.
- [20] 黄雅芳. 城市配水管网二次加氯的优化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
HUANG Y F. A study on optimizing rechlorination in water distribution systems [D]. Changsha: Hunan University, 2005.