

张博文, 胡甜甜, 辛培霞, 等. 山地农村多级加压供水系统氯化消毒的反演建模与应用[J]. 净水技术, 2026, 45(5): 171-178.

Zhang B W, Hu T T, Xin P X, et al. Inverse modeling and application of chlorination in multi-stage pressurized water supply network in mountainous rural areas[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(5): 171-178.

山地农村多级加压供水系统氯化消毒的反演建模与应用

张博文¹, 胡甜甜¹, 辛培霞², 曲梦雨³, 尹梦茹¹, 李 伟^{3,*}

(1. 青岛顺清源环境有限公司, 山东青岛 266000; 2. 青岛市市政工程设计研究院有限责任公司, 山东青岛 266061; 3. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西西安 710055)

摘要 【目的】针对山地农村多级加压供水系统因输水路径长、用户分散及用水量波动较大而引发的管网末梢余氯不足问题, 本文构建了一种适用于该类供水系统的氯化消毒反演模型, 以实现管网余氯的优化分布。【方法】利用 EPANET 软件对管网水龄进行模拟计算, 以管网末梢余氯目标浓度作为起始条件, 结合余氯衰减动力学方程, 反向推导出供水系统所需的初始加氯量或中途补氯量; 在此基础上, 系统分析单点加氯与二次加氯 2 种模式下管网全段余氯的时空分布特征, 并结合试验比较不同加氯方案对管网末梢水中消毒副产物三卤甲烷 (THMs) 和卤乙酸 (HAAs) 生成量的影响, 经比选后确定最优加氯方案。【结果】利用反演模型对青岛市城阳区山色峪供水工程进行加氯方案比选, 结果显示, 在单点加氯条件下, 为确保管网末端余氯浓度达标, 氯的初始投加质量浓度最低为 2.2 mg/L。然而, 此时管网前端部分余氯质量浓度将超过 2 mg/L 的限值, 管网整体余氯不达标率达 5.47%, 末梢水中 THMs 和 HAAs 质量浓度分别为 50.9 μg/L 和 23.1 μg/L。相比之下, 采用二次加氯方案 I [(1.1 + 0.7) mg/L] 不仅能够使管网全段余氯浓度达标, 还可将氯的总投加质量浓度降低至 1.8 mg/L, 末梢水中 THMs 和 HAAs 质量浓度也分别下降至 44.1 μg/L 和 16.3 μg/L, 显著提升了供水系统的水质安全保障水平。【结论】加氯反演模型能够精确地计算出山地农村多级加压供水系统所需的初始加氯量或中途补氯量, 并快速比选出最优加氯方案, 有助于实现供水系统消毒过程的精细化调控与智慧化管理。

关键词 多级加压 供水管网 氯 反演模型 方案优化

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)05-0171-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.05.020

Inverse Modeling and Application of Chlorination in Multi-Stage Pressurized Water Supply Network in Mountainous Rural Areas

Zhang Bowen¹, Hu Tiantian¹, Xin Peixia², Qu Mengyu³, Yin Mengru¹, Li Wei^{3,*}

(1. Qingdao Shunqingyuan Environmental Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

2. Qingdao Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266061, China;

3. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract [Objective] To address the uneven distribution of residual chlorine in mountainous rural multi-stage pressurized water supply systems caused by complex terrain, dispersed consumers, and large fluctuations in water demand, this paper develops an inverse model for chlorination for such water supply systems to achieve an optimized distribution of residual chlorine throughout the pipe network. [Methods] The EPANET software was applied to simulate water age throughout the distribution network. By prescribing the target residual chlorine concentration at network extremities as a boundary constraint and coupling chlorine decay kinetic equations, the required initial chlorination dose and/or second chlorination requirements were inversely determined. On this basis, the spatiotemporal evolution of residual chlorine throughout the network under one-step and two-step chlorination modes was systematically analyzed. In addition, the effects of different chlorination schemes on the formation of trihalomethanes (THMs) and haloacetic acids (HAAs) in

[收稿日期] 2025-09-09

[基金项目] 国家自然科学基金(51308437); 陕西省自然科学基金项目(2024JC-YBMS-229)

[作者简介] 张博文(1992—), 男, 工程师, 主要从事城乡管网模拟与优化等工作, E-mail: zbwazq@163.com。

[通信作者] 李伟(1985—), 男, 副教授, 研究方向为水处理理论与技术, E-mail: liwei@xauat.edu.cn。

terminal water were comparatively evaluated, thereby facilitating the identification of the optimal disinfection strategy. [Results] The proposed inversion model was applied to the Shanseyue water supply project in Chengyang District, Qingdao City. The result indicated that under one-step chlorination, a minimum initial chlorine dose of 2.2 mg/L was required to ensure compliance of residual chlorine at the network extremities. However, residual chlorine in upstream sections exceeded the 2 mg/L limit, with an overall non-compliance rate of 5.47%, while THMs and HAAs mass concentrations in terminal water reached 50.9 $\mu\text{g/L}$ and 23.1 $\mu\text{g/L}$, respectively. In contrast, two-step chlorination scheme I [(1.1 + 0.7) mg/L] ensured network-wide residual chlorine compliance, reduced the total chlorine dose to 1.8 mg/L, and decreased terminal THMs and HAAs mass concentrations to 44.1 $\mu\text{g/L}$ and 16.3 $\mu\text{g/L}$, significantly enhancing water quality safety. [Conclusion] The inversion model for chlorine concentration enables accurate determination of the required initial and intermediate chlorination dosages in multistage pressurized water supply systems in mountainous rural areas, while allowing rapid identification of optimal chlorination schemes. This approach supports refined control and intelligent management of disinfection processes in mountainous rural multi-stage pressurized water supply systems.

Keywords multi-stage pressurization water supply distribution network chlorine inverse model scheme optimization

近年来,随着我国城乡供水一体化进程的推进,树状多级加压供水系统在山地农村地区得到了广泛应用。然而,该类系统通常具有输水路径长、用户分散且用水量波动大等特点,易导致管网前端余氯浓度过高或末梢余氯不足问题^[1]。为提升饮用水的感官品质,我国最新版《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)将出厂水中游离氯质量浓度的上限值由 4 mg/L 下调至 2 mg/L,同时要求管网末梢水中余氯质量浓度不得低于 0.05 mg/L^[2]。该标准的调整在进一步保障水质安全的同时,也对供水系统的加氯策略与运行管理提出了更高要求。

为确保管网末端余氯达标,工程实践中通常采用提高初始加氯量或设置二次加氯点的方式进行调控。然而,传统的“单点加氯”模式可能难以满足新标准对余氯限值的要求。为优化余氯时空分布并提升管网水质稳定性,“二次加氯”技术逐渐被应用于实际运行^[3]。目前,现有二次加氯方案多依赖经验,缺乏对管网水力条件、水龄变化及余氯衰减过程的系统性量化分析。如何在保障末梢余氯达标的前提下,实现管网余氯合理分布与精细化调控,已成为山地农村供水系统运行管理中的关键技术问题。

近年来,水质模拟软件(如 EPANET、WaterGEMS)已成为分析和预测供水管网余氯分布的重要工具^[4-5]。该类软件能够综合考虑水温、水龄、管材特性等因素,定量分析余氯在输配过程中的衰减过程,为供水系统运行管理提供科学依据。然而,现有研究多侧重于正向模拟,即在给定加氯条件下分析余氯在管网中的空间分布及其衰减特征,而通过管网末梢余氯目标浓度反推初始或中途加氯量的反演建模研究仍较为有限。通过构建余氯反演模

型,可在保障管网末端余氯达标的前提下优化加氯策略,提升管网水质安全,对实现精细化管理具有重要的理论价值和工程意义。

本文针对山地农村多级加压供水系统的运行特征,构建了一种以管网末梢余氯目标浓度为初始条件的加氯反演模型。该模型结合管网水龄模拟与余氯衰减动力学方程,可实现对初始加氯量及中途补氯量的反向求解,并可用于不同加氯方案的比选与优化。

1 材料与方法

1.1 加氯反演模型

在供水管网中,若已知管段入口处的余氯浓度,则余氯沿管段输配过程中的衰减过程通常可用准一级动力学模型进行描述^[6],其管段末端余氯浓度可由式(1)进行计算。

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (1)$$

其中: C_0 ——某一管段起始端的余氯质量浓度, mg/L;
 C ——某一管段末端的余氯质量浓度, mg/L;
 k ——衰减系数, (mg·h)/L;
 t ——水体从始端流至末端所需的水力时间,即水龄, h。

反之,若管段末端余氯浓度为已知条件,对该管段起始端余氯浓度进行反向推导时,则可采用式(2)进行计算。

$$C_0 = C e^{kt} \quad (2)$$

在单点加氯模式下,以管网末梢节点余氯目标值作为起始条件,可反演得到所需的初始加氯量;在

二次加氯模式下,模型首先根据末梢余氯浓度反演计算出中途加氯点的补氯量,再结合上游管段水龄与衰减关系,反向推导出初始加氯量。

1.2 研究背景

如图1所示,山色峪供水工程源自崂山水厂,管网沿山路向东敷设,途经8个行政村36个自然村,

服务人口有3 931。所有输水管道均采用高密度聚乙烯(HDPE)给水管,其中给水主管管径为DN100~DN200,长度约为14 km;村庄内敷设De20~De90支管,长度约为94 km。本工程地形高差超过200 m,采用逐级加压方式(设置7个加压泵站)为沿途居民供水。



图1 山色峪供水工程管网及加压泵站布置

Fig. 1 Layout of the Shanseyu Water Supply Network and Booster Pump Stations

供水系统改造前采用“单点加氯”模式,即在崂山水库水厂统一投加消毒剂。为确保管网末梢余氯质量浓度满足0.05 mg/L的最低限值,原运行方案中氯的初始投加质量浓度为2.5~3.0 mg/L。然而,在该投加浓度下,靠近水厂前端的用户处余氯浓度普遍偏高,自来水常伴有明显氯味,频繁引发用户投诉,严重影响供水服务质量。自《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)于2023年4月1日正式实施后,出厂水中游离氯质量浓度的上限值由4 mg/L下调至2 mg/L,供水企业相应降低了初始氯投加浓度。尽管该调整在一定程度上改善了前端用户的感官体验,但管网末梢余氯浓度频繁低于标准限值,存在污染隐患。因此,亟需对现有加氯方案进行系统优化,以实现全管网范围内余氯分布均衡与饮用水水质安全。

1.3 研究方案

为解决现有“单点加氯”模式下前端余氯偏高、末端余氯不足问题,本文利用水质模拟软件对山色峪供水工程开展氯衰减模拟与优化分析。首先,构建完整的管网水力与水质模型,并依据实测数据校准氯衰减参数(包括管道壁反应速率和体积反应速率),模拟计算现有工况下关键节点的水龄。其次,引入余氯反演模型,在既定末梢余氯目标值约束条件下,反算单点加氯模式下所需的初始加氯量。再

次,在管网中下游适宜位置增设中途加氯点,利用反演模型先确定中途补氯量,再向上反推初次加氯量,从而构建多个二次加氯方案。最后,对不同加氯模式下管网余氯的时空分布特征进行分析,对消毒副产物(DBPs)生成量进行试验测试,经过比选后获取最优氯投加方案。

加压泵站具有水力条件稳定、工程实施条件成熟等优势,因而成为配水管网二次加氯的理想位置^[7]。在山色峪供水工程中,2#、4#和5#泵站均位于输水主干管,覆盖范围广且泵站内部具备布设加氯设施及在线监测设备的空间,因此将其确定为二次加氯的候选节点。

1.4 软件模拟

采用EPANET水质模拟软件构建山色峪供水工程的管网模型,该模型包括702个节点和7个泵站组。结合水量、高程、管径、管材、水泵运行参数等要素对模型进行系统校核,建立可靠的管网水力与水质模型。在此基础上,引入以管网末梢余氯目标值为初始条件的加氯反演模型,综合管网水龄分布及余氯衰减动力学规律,对不同加氯节点的氯投加量进行反向求解,探讨“单点加氯”(仅在崂山水厂处加氯)和“二次加氯”(在2#、4#和5#泵站加氯)2种模式下余氯的分布特征及对管网水质达标率的影响。同时,对管网末梢处的水龄进行模拟计算,为后

续 DBPs 生成量的试验研究提供数据支持。建模过程中涉及的主要参数包括:氯在水中的扩散率 k_d , 体积反应速率常数 k_b 和管壁反应速率常数 k_w 。其中, k_d 反映氯在水体中的分子扩散能力, 取值为 $1.44 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[8]; 根据已有研究^[6], k_b 的数值通过实际水样的氯衰减试验拟合获得, k_w 采用余氯浓度反演法确定。

1.5 小试试验

1.5.1 原水水质

试验用水于 2024 年 9 月取自崂山水厂滤后水, 水样采集后立即置于 4 °C 冰箱中保存备用, 其主要水质指标如表 1 所示。

表 1 崂山水厂滤后水的水质特征
Tab. 1 Water Quality Characteristics of Filtered Water in Laoshan WTP

指标	数值
温度/°C	20
pH 值	7.5
色度	8
氨氮/(mg · L ⁻¹)	0.06
TOC/(mg · L ⁻¹)	3.77
UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	0.058

1.5.2 氯衰减试验

取水样置于棕色具塞密封瓶中, 投加次氯酸钠使初始自由氯质量浓度达到 1.5 mg/L。将加氯后的水样置于 20 °C 恒温、避光条件下反应, 并每隔 1 h 取样测定余氯浓度, 以获取余氯随反应时间的衰减规律。

1.5.3 DBPs 生成试验

(1) 单点加氯

取水样置于系列棕色具塞密封瓶中, 投加次氯酸钠使初始自由氯质量浓度达到 2.2 mg/L (根据模拟结果确定)。为模拟实际管网环境, 将加氯后的水样置于 20 °C 恒温、避光条件下反应 24 h 后, 测定水中三卤甲烷 (THMs) 和卤乙酸 (HAAs) 的生成量。

(2) 二次加氯

反应条件与“单点加氯”模式相同, 仅调整氯的投加方式。初始加氯量以目标泵站节点或青岭方向管网末端 (即 4# 泵站作为补氯节点时的最不利点, 图 1) 余氯质量浓度不低于 0.2 mg/L 为设定依据; 二次加氯量以整个供水管网最不利点处余氯质量浓度不低于 0.2 mg/L 作为控制依据。基于上述原则, 确定了如下 3 种“二次加氯”方案。方案 I: 初始加

氯质量浓度为 1.1 mg/L, 反应 6 h (对应 2# 泵站及其水箱的水龄) 后补加 0.7 mg/L。方案 II: 初始加氯质量浓度为 1.5 mg/L, 反应 7.5 h (对应 4# 泵站及其水箱的水龄) 后补加 0.5 mg/L。方案 III: 初始加氯质量浓度为 1.7 mg/L, 反应 12 h (对应 5# 泵站及其水箱的水龄) 后补加 0.3 mg/L。3 组试验的总反应时长均设定为 24 h。反应结束后分别测定水样中 THMs 和 HAAs 的生成量, 以系统评估不同加氯模式对 DBPs 生成量的影响。

1.5.4 检测方法

水样中余氯采用 N,N-二乙基对苯二胺 (DPD) 分光光度法进行测定^[9]。挥发性 THMs 采用液液微萃取进行样品预处理, 进而利用气相色谱-串联四极杆质谱法 (GC-EI-MS/MS, Agilent) 进行定量分析; 色谱分离使用 DB-5MS 毛细管柱 (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm, Agilent), 质谱检测采用多反应监测 (MRM) 模式, 以提高检测灵敏度^[10]; 该方法的检出限 (LODs) 为 0.003 ~ 0.014 μg/L; 通过配制 0.1 ~ 100.0 μg/L 的标准溶液建立标准曲线, 其相关系数 r^2 均大于 0.997。难挥发性的 HAAs 则采用超高效液相色谱-串联四极杆质谱法 (UPLC-MS/MS, Waters) 进行测定, 色谱分离使用 UPLC HSS T3 色谱柱 (100 mm × 2.1 mm, Waters), 质谱检测采用 MRM 模式^[11]; 该方法的 LODs 为 0.06 ~ 0.16 μg/L; 在 0.5 ~ 100.0 μg/L, 其 $r^2 > 0.999$ 。

2 结果与讨论

2.1 模型参数的确定

氯在水中的衰减曲线如图 2 所示。反应 12 h 后, 余氯质量浓度由初始的 1.50 mg/L 逐渐降低至

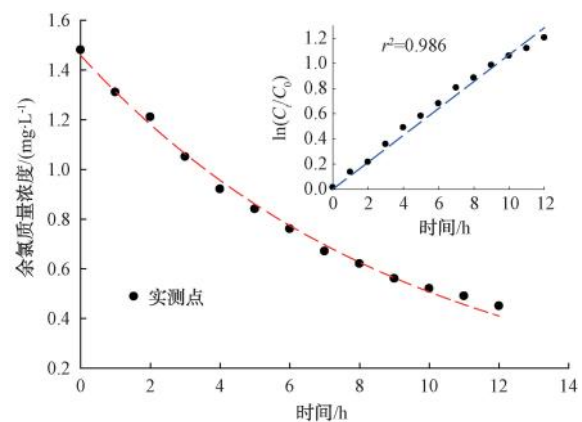


图 2 余氯随时间的衰减曲线

Fig. 2 Decay Curve of Residual Chlorine with Time

0.45 mg/L,表明出厂水对氯的消耗较为显著,且具有明显的时间依赖性。

已有研究^[6]表明,氯在水中的衰减规律符合准一级反应动力学模型,其体积反应速率常数 k_b 可通过式(3)进行计算。

$$k_b = \ln(C_t/C_{ini}) \quad (3)$$

其中: C_{ini} ——氯的初始质量浓度,mg/L;

C_t ——反应时间 t h 后余氯的质量浓度,mg/L。

计算可得 $k_b = -0.10$ (mg·h)/L 或 2.40 (mg·d)/L。

管壁反应速率常数 k_w 可根据壁面反应衰减方程[式(4)]进行反演计算^[6]。

$$\frac{C_t - C_{t,0}}{t} = -k_w C_{t,0} - \frac{4}{D} k_w C_{t,0} \quad (4)$$

其中: $C_{t,0}$ —— I 管段起始端的余氯质量浓度,mg/L;

k_w ——管壁反应速率常数,m/h;

C_t —— I 管段末端的余氯浓度,mg/L;

D ——管道直径,m。

选择1#泵站至2#泵站之间的管段为对象,对两点进行取样测定,结果显示 $C_{t,0}$ 为 1.62 mg/L(1#泵站附近), C_t 为 0.84 mg/L(2#泵站附近),依据所建水质模型计算得到 t 为 4.29 h, D 为 0.20 m,由以上数据可计算出 k_w 为 -0.0006 m/h 或 -0.0147 m/d。该值与 Mompremier 等^[12]报道的新 HDPE 管道管壁反应速率常数相近($k_w = -0.0007$ m/h),略高于聚氯乙烯(PVC)管($k_w = -0.0004$ m/h),远低于钢管($k_w = 0.0083$ m/h)。氯与管壁反应速率主要受生物膜附着和管道材质等因素的影响^[12-13]。本工程为新建工程,可忽略生物膜的作用;塑料管材(如PVC、HDPE)与氯的反应性极低,因此新管道对氯的衰减速率影响甚微^[13]。此外,将该值代入模型对3#~7#泵站处水中余氯模拟值与实测值进行精度计算,均方根误差(RMSE)值为 0.011 mg/L,低于 0.05 mg/L,符合模型建立的要求^[6]。

2.2 单点加氯量对余氯达标率的影响

所建模型仅对主干管进行水质模拟。考虑到实际运行中余氯会在支管中进一步衰减,本文采纳世界卫生组织(WHO)对中小型供水系统中余氯质量浓度最低限值的建议(≥ 0.2 mg/L)作为模拟的下

限控制标准^[14];上限值则依据《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中关于出厂水及管网末梢水中游离氯质量浓度不高于 2.0 mg/L 的规定设定^[2]。因此,本文将 0.2~2.0 mg/L 作为管网余氯质量浓度的合格值,用以评估不同加氯策略下供水系统的水质达标率。

当管网末梢最不利点处余氯质量浓度控制目标设定为 0.2 mg/L 时,利用余氯反演模型计算得到所需的初始加氯质量浓度为 2.2 mg/L。将该初始加氯量输入 EPANET 所构建的管网模型进行验证模拟,末梢余氯质量浓度为 0.203 mg/L,与目标值的偏差仅为 1.5%,表明反演模型具有较高的计算精度。然而,在该加氯条件下,管网前段部分节点余氯质量浓度超过 2 mg/L 的限值(图3),导致管网整体余氯不达标率为 5.47%。该结果表明,单点加氯模式难以实现供水管网整体余氯浓度的全面达标。

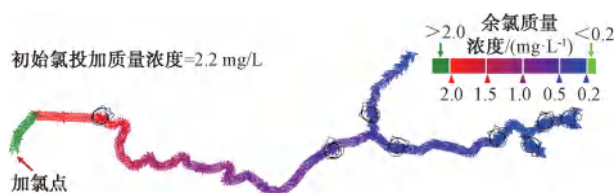


图3 “单点加氯”模式下管网中余氯浓度的分布

Fig. 3 Distribution of Residual Chlorine Concentration in the Network under “One-Step Chlorination” Mode

2.3 二次加氯方案比选

考虑到加氯操作的工程可行性与运维便利性,管网补氯点通常设置在加压泵站处^[15]。结合山色峪供水工程管网布局,本研究选取主干管2#、4#和5#加压泵站作为二次加氯节点(图1),以管网末梢最不利点余氯质量浓度 0.2 mg/L 为初始条件,利用加氯反演模型计算各泵站处的补氯量及对应的初次加氯量,结果如表2所示。

如图4所示,与传统“单点加氯”相比,“二次加氯”能够有效改善管网内余氯的空间分布均匀性。模拟结果表明,3种加氯方案均可实现管网全线余氯浓度达标。对比3组模拟结果可知,方案I的总加氯质量浓度为 1.8 mg/L,低于方案II和方案III的 2.0 mg/L;同时,其初始氯投加质量浓度仅为 1.1 mg/L,显著低于方案II(1.5 mg/L)和方案III(1.7 mg/L)。该方案在确保管网末梢余氯达标的同时,可有效降低靠近水厂出口处的余氯浓度,从而

表 2 二次加氯方案的加氯位置与投加量
Tab. 2 Locations and Dosages of Two-Step Chlorination Schemes

方案编号	补氯位置	水泵型号 (2用1备)	二次加氯质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	初始氯投加质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总加氯质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
I	2#泵站	KQDQE65-32-14	0.7	1.1	1.8
II	4#泵站	KQDQE40-10-76	0.5	1.5	2.0
III	5#泵站	KQDQE40-10-54	0.3	1.7	2.0

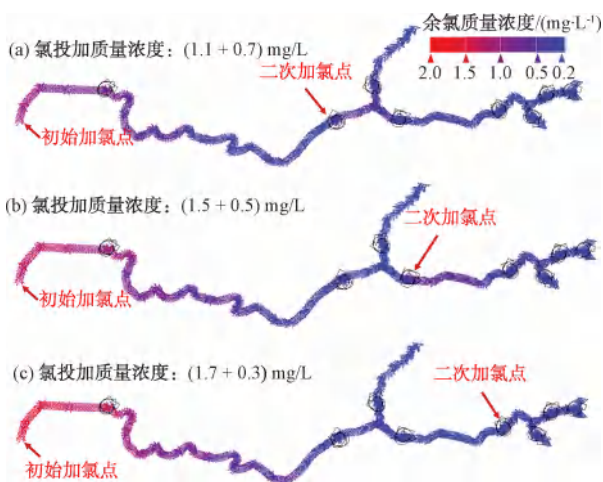


图 4 “二次加氯”模式下管网中余氯浓度的分布

Fig. 4 Distribution of Residual Chlorine Concentration in the Network under “Two-Step Chlorination” Mode

有效减小氯味等感官刺激对敏感人群的影响。因此,方案 I 被确定为最优二次加氯方案。

2.4 加氯方案对 DBPs 生成量的影响

对比研究了“单点加氯”和“二次加氯”2 种模式对水中典型 DBPs (THMs 和 HAAs) 生成量的影响。如图 5(a) 所示,随着氯投加量的升高,THMs 总量和三氯甲烷 (TCM) 均呈现上升趋势。单点加氯方式下,THMs 的生成总质量浓度可达 $50.9 \mu\text{g/L}$; 其中 TCM 的质量浓度为 $39.4 \mu\text{g/L}$, 约占总量的 77%, 为主要的 THMs 类别。采用 3 种“二次加氯”方案, THMs 的生成总质量浓度分别降低至 $44.1 \mu\text{g/L}$ (方案 I)、 $47.5 \mu\text{g/L}$ (方案 II) 和 $49.2 \mu\text{g/L}$ (方案 III), TCM 的生成质量浓度分别为 33.8 、 $36.9 \mu\text{g/L}$ 和 $38.1 \mu\text{g/L}$, 依然为主要的 THMs 类别。相比之下, 3 种加氯条件下一溴二氯甲烷 (BDCM) 和二溴一氯甲烷 (DBCM) 的生成质量浓度相差不大, 分别为 $2.9 \sim 3.2 \mu\text{g/L}$ 和 $7.4 \sim 8.2 \mu\text{g/L}$, 且与加氯总量无显著相关性。这可能是由于氯优先与水中存在的溴离子反应生成次溴酸 (HOBr), 而 HOBr 与天然有机物 (NOM) 的反应速率远高于次氯

酸 (HOCl), 从而在一定程度上减弱了氯投加量对含溴 THMs 生成量的影响^[16]。

与 THMs 相比, 水中 HAAs 的生成总量相对较低。如图 5(b) 所示, 单点加氯模式下 HAAs 总质量浓度为 $23.1 \mu\text{g/L}$, 而采用二次加氯策略后, HAAs 的生成质量浓度分别降低至 $16.3 \mu\text{g/L}$ (方案 I)、 $18.1 \mu\text{g/L}$ (方案 II) 和 $20.7 \mu\text{g/L}$ (方案 III), 呈现出随补氯位置后移而递增的趋势。与单点加氯相比, 方案 I 的 HAAs 生成量降幅约为 29.4%。研究^[17]表明, 在总加氯量相同的条件下, 分段投加方式可显著降低高浓度氯的暴露时间, 从而能够有效减少 HAAs 的生成。方案 I 的初始加氯质量浓度为 1.1 mg/L , 低于其他方案, 因此在初始阶段形成的 HAAs 量相对较低。尽管后续补氯 0.7 mg/L , 水中

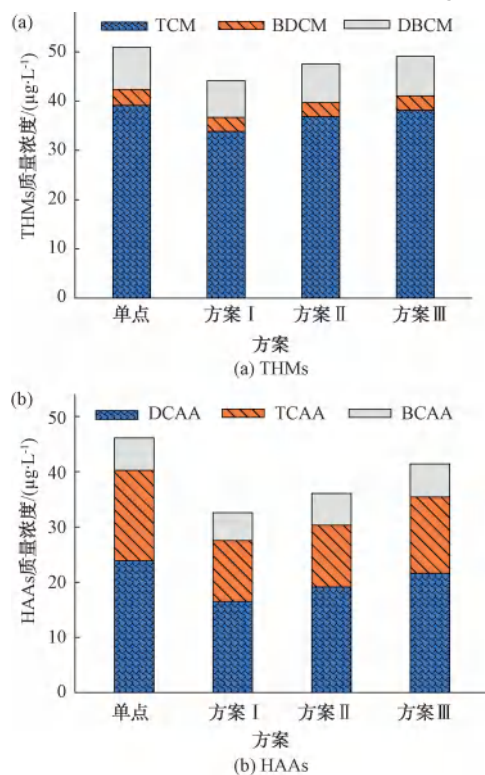


图 5 单点加氯和二次加氯模式下消毒副产物生成量

Fig. 5 DBPs Formation under One-Step and Two-Step Chlorination

NOM 在前段氯化反应中已发生部分氧化或结构改变,反应活性降低,也相应降低了 HAA 的生成量^[16]。

从组分特征来看,二氯乙酸(DCAA)和三氯乙酸(TCAA)是 HAA 的主要组分,两者之和在各加氯条件下均占总量的 83% 以上。相比之下,溴氯乙酸(BCAA)的质量浓度在不同加氯方式下变化不大,始终维持在 2.7 μg/L 左右,表明其生成量基本不受氯投加方式的影响,该趋势与溴代 THMs 类似,可能与具有更高氧化活性 HOBr 的生成有关^[18]。

综上所述,与单点加氯方式相比,方案 I 可使 THMs 浓度降低 13.4%,同时使 HAA 浓度下降 29.4%。该结果表明,合理优化补氯位置与剂量分配,既有助于提升管网中余氯分布的合理性,又可有效抑制 DBPs 的累积生成,从而提升饮用水输配系统的水质安全水平。

3 结论

为实现山地农村多级加压供水系统管网余氯的优化分布,本文构建了加氯反演模型,并结合 EPANET 管网水龄模拟与余氯衰减动力学方程,对单点加氯与二次加氯方案进行比选,并获得最优加氯方案。主要结论如下。

(1) 构建了适用于树状管网的加氯反演模型,以管网末梢余氯目标浓度为初始条件,结合水龄与余氯衰减动力学方程,实现初次加氯量及中途补氯量的精确反向计算,为科学制定加氯方案提供了理论依据。

(2) 将模型应用于青岛市城阳区山色峪供水工程,结果表明,单点加氯虽可保证末梢余氯达标,但管网前端部分节点超标,整体不达标率为 5.47%;采用二次加氯方案 I [(1.1 + 0.7) mg/L] 后,管网全段余氯达标,总投加质量浓度降低至 1.8 mg/L,末梢水中 THMs 和 HAA 浓度显著下降,显示模型在加氯方案优化与水质提升中的实际价值。

(3) 当前模型适用于树状管网加氯方案的制定与优化,未来可结合神经网络或深度学习等智能化方法,进一步拓展至水力条件更复杂的环状管网。

参考文献

[1] 吴新楷,张易凯,许振中,等. 丘陵山区农村供水系统设计的探讨[J]. 水利技术监督, 2025(9): 304-307.
Wu X K, Zhang Y K, Xu Z Z, et al. Discussion on the design of

rural water supply system in hilly and mountainous areas[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2025(9): 304-307.

[2] GB 5749—2022 生活饮用水卫生标准[S].
GB 5749—2022 Standards for drinking water quality[S].

[3] 段婷,王琦. 供水管网分区后加氯策略优化方法[J]. 中国给水排水, 2025, 41(7): 56-62.
Duan T, Wang Q. Optimization methodology for chlorination strategy following partition of water supply network[J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(7): 56-62.

[4] Kowalska B, Suchorab P, Kowalski D. Division of district metered areas (DMAs) in a part of water supply network using WaterGEMS (Bentley) software: A case study[J]. Applied Water Science, 2022, 12(7): 166.

[5] 陈晓晨. 基于水力水质的供水管网可靠性综合评估建模[J]. 净水技术, 2025, 44(8): 63-68.
Chen X C. Comprehensive evaluation and modeling of reliability for water supply pipelines network based on hydraulics and water quality[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(8): 63-68.

[6] Obaid S, Hosoi K, Ngoc N M, et al. Modelling free residual chlorine decay in a residential district water distribution network using smart water meter data[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2025, 22(12): 11809-11816.

[7] 庄海峰,朱涛. 浅析二级泵站补充加氯保障措施[J]. 净水技术, 2020, 39(2): 154-158.
Zhuang H F, Zhu T. Brief analysis of safeguard measures of chlorination supplement for secondary pumping stations[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(2): 154-158.

[8] Fisher I, Kastl G, Sathasivan A. Validity of chlorine-wall reaction models for drinking water distribution systems[J]. Urban Water Journal, 2023, 20(9): 1157-1168.

[9] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
Editorial Board of *Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods*, State Environmental Protection Administration. *Methods for water and wastewater monitoring and analysis*[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Sciences Press, 2002.

[10] 刘玉灿,王颖,朱玉良,等. 气相色谱-串联质谱法同时测定水中 13 种挥发性消毒副产物的方法研究[J]. 分析化学, 2022, 50(1): 145-152.
Liu Y C, Wang Y, Zhu Y L, et al. Simultaneous determination of thirteen kinds of volatile disinfection by-products in water by gas chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2022, 50(1): 145-152.

[11] Duan J M, Li W, Si J, et al. Rapid determination of nine haloacetic acids in water using ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry in multiple reactions

- monitoring mode[J]. *Analytical Methods*, 2011, 3(7): 1667.
- [12] Mompremier R, Fuentes Mariles Ó A, Ghebremichael K, et al. Impact of pipe material on the wall reaction coefficients and its application in the rehabilitation of water supply system of San Pedro Nexapa, State of Mexico [J]. *Water Supply*, 2022, 22(4): 4296–4306.
- [13] Hallam N B, West J R, Forster C F, et al. The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems[J]. *Water Research*, 2002, 36(14): 3479–3488.
- [14] World Health Organization. Principles and practices of drinking-water chlorination: A guide to strengthening chlorination practices in small-to medium sized water supplies[M]. New Delhi: World Health Organization Regional Office for South-East Asia, 2017.
- [15] Mao R Y, Zhang K J, Zhang Q Z, et al. Joint majorization of waterworks and secondary chlorination points considering the chloric odor and economic investment in the DWDS using machine learning and optimization algorithms [J]. *Water Research*, 2022, 220: 118595. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118595.
- [16] 牛志广, 张玉彬, 吕志伟, 等. 溴离子对预氯化和常规水处理工艺中消毒副产物的影响[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 44(1): 109–117.
- Niu Z G, Zhang Y B, Lü Z W, et al. Effects of bromide ions on disinfection by-products during water treatment processes [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, 44(1): 109–117.
- [17] 韩迪, 雷亚萍, 徐小存, 等. 饮用水中氯消毒副产物控制技术中的应用[J]. *城镇供水*, 2025(4): 42–48, 63.
- Han D, Lei Y P, Xu X C, et al. Application of control technologies for chlorinated by-products in drinking water [J]. *City and Town Water Supply*, 2025(4): 42–48, 63.
- [18] Mazhar M A, Khan N A, Ahmed S, et al. Chlorination disinfection by-products in municipal drinking water-A review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 273: 123159. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123159.

(上接第 170 页)

- [14] Yamijala S, Guikema S D, Brumbelow K. Statistical models for the analysis of water distribution system pipe break data [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009, 94(2): 282–293.
- [15] Barton N A, Farewell T S, Hallett S H, et al. Improving pipe failure predictions: Factors affecting pipe failure in drinking water networks [J]. *Water Research*, 2019, 164: 114926. DOI: 10.1016/j.watres.2019.114926.
- [16] Seo J, Koo M, Kim K, et al. A study on the probability of failure model based on the safety factor for risk assessment in a water supply network [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 119: 206–215. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.877.
- [17] GB 50282—2016 城市给水工程规划规范[S]. GB 50282—2016 Code for urban water supply engineering planning[S].
- [18] 宋花玲. ROC 曲线的评价研究及应用[D]. 上海: 第二军医大学, 2006: 66.
- Song H L. Evaluation study and application of ROC curve[D]. Shanghai: Second Military Medical University, 2006: 66.