水源与饮用水保障

朱斌. 消毒方式切换对管网水消毒效能与消毒副产物影响特性[J]. 净水技术, 2026, 45(10): 41-48.
Zhu B. Characteristics of disinfection efficacy and DBPs formation in a water distribution system following the switching of disinfection methods [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(10): 41-48.

消毒方式切换对管网水消毒效能与消毒副产物影响特性

朱 斌*
(上海城投水务<集团>有限公司,上海 200082)

摘 要 **【目的】** 本文旨在评估供水系统由氯胺消毒方式切换为自由氯消毒方式的可行性。**【方法】** 本文以上海某供水系统为研究对象,开展了氯胺消毒切换为自由氯消毒的生产性试验,并对出厂水和管网水的消毒效能与消毒副产物(DBPs)生成风险进行了长期监测评估。**【结果】** 切换过程仅引起水厂内余氯约 3 h 的短暂波动。长期运行中,自由氯在长距离输水中的稳定性优于氯胺,夏季高温期总氯衰减率从氯胺时的 88.3%降至 68.0%,且彻底消除了硝化风险。DBPs 谱系显著变化:含碳 DBPs(三卤甲烷、卤乙酸)含量有所升高但总体可控,仅末梢点位在咸潮或高温期偶有接近上海市地方标准《生活饮用水水质标准》(DB31/T 1091—2025)限值,但远低于国标限值;而含氮 DBPs(三氯硝基甲烷、卤乙腈)及碘代三卤甲烷含量下降超 1 个数量级,致嗅物 N-氯代亚胺也大幅降低。**【结论】** 在本区域条件下,采用自由氯消毒可保障微生物安全、抑制硝化并降低高毒性 DBPs 风险。

关键词 自由氯; 氯胺; 消毒副产物(DBPs); 供水管网; 消毒方式切换
中图分类号: TU991 **文献标志码**: A **文章编号**: 1009-0177(2026)10-0041-08
DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.10.005

Characteristics of Disinfection Efficacy and DBPs Formation in a Water Distribution System Following the Switching of Disinfection Methods

Zhu Bin*
(*Shanghai Chengtou Water Group Co., Ltd., Shanghai* 200082, *China*)

Abstract [**Objective**] This paper aims to evaluate the feasibility of switching the disinfection strategy in a drinking water supply system from chloramination to chlorination. [**Methods**] A full-scale trial of switching from chloramination to chlorination was conducted in a drinking water supply system in Shanghai. The disinfection performance and the formation risks of disinfection by-products (DBPs) in finished water and distribution system water were monitored and evaluated over an extended period. [**Results**] The switching process only caused a brief fluctuation in residual chlorine within the water treatment plant, lasting approximately 3 hours. During long-term operation, free chlorine demonstrated better stability than chloramine under long-distance transmission conditions. Under summer high-temperature conditions, the attenuation rate of residual chlorine decreased from 88.3% during chloramination to 68.0% after switching to free chlorine, and nitrification risk was completely eliminated. The DBPs profile changed significantly: the contents of carbonaceous DBPs (trihalomethanes and haloacetic acids) increased but remained generally controllable. They occasionally approached the Shanghai local standard *Standard for Drinking Water Quality* (DB31/T 1091—2025) limits at terminal points during saline intrusion or high-temperature periods, though still far below the national standard limits. In contrast, the contents of nitrogenous DBPs (trichloronitromethane and haloacetonitriles) and iodinated trihalomethanes decreased by

[**收稿日期**] 2026-02-03
[**基金项目**] 上海城投水务(集团)有限公司科研项目(KY.JT.23.002)
[**通信作者**] 朱斌(1969—),男,正高级工程师,主要从事水厂工艺处理、供水管网及二次供水技术开发与管理等工作, E-mail:zhubin@shanghaiwater.com。

more than an order of magnitude, and the odorant N-chloroaldimine was also substantially reduced. [**Conclusion**] Under the specific conditions of the study area, adopting free chlorine disinfection can ensure microbiological safety, inhibit nitrification, and reduce the risk of highly toxic DBPs.

Keywords free chlorine; chloramine; disinfection by-products (DBPs); water supply distribution network; disinfection mode switching

饮用水消毒是保障公共健康的核心环节,氯消毒自推广应用以来,已被公认为20世纪“十大公共健康成就”之一。目前,水厂常用的消毒方式包括自由氯消毒与氯胺消毒。自由氯主要通过次氯酸发挥强氧化作用,消毒效率高但衰减较快;氯胺则依靠一氯胺水解缓慢释放次氯酸,持久性更好,但其氧化能力较弱,在管网中易引发硝化作用,导致亚硝酸盐积累与生物膜增殖[1]。在消毒副产物(DBPs)风险方面,氯胺消毒可降低常规含碳DBPs(C-DBPs)的生成风险,但该体系中共存活性氯和含氮中间体,导致高毒性含氮DBPs和碘代DBPs(I-THMs)的生成风险高于自由氯消毒。国际上,纽约、巴黎、东京等多数发达国家大型城市仍以自由氯消毒为主[2-4]。然而,美国部分供水系统在采用氯胺消毒以降低常规C-DBPs风险的同时,也面临管网硝化和生物膜控制压力。针对这一问题,部分地区会阶段性恢复自由氯消毒,以强化管网余氯控制并抑制硝化相关微生物活性。例如,华盛顿特区曾实施短期自由氯切换,用于改善氯胺消毒条件下的管网水质稳定性,体现了消毒方式动态调控的实际需求[5]。

在2011年前,受黄浦江原水氨氮较高的影响,上海水厂长期采用氯胺消毒。随着青草沙等优质水源地的建成,原水氨氮显著降低,水厂逐渐转为“接触池自由氯消毒+出厂补加硫酸铵”的氯胺维持工艺[6]。近年来,上海供水系统在水源保护、深度处理工艺升级、管网改造等方面取得显著进展,为消毒工艺优化创造了有利条件。然而,氯胺消毒依旧存在高毒性含氮DBPs、I-DBPs生成风险,管网硝化、氯嗅味等问题[7]。为此,本文选取上海市某相对封闭、完整的岛屿供水区域,组织实施了从“自由氯+氯胺”模式向纯自由氯消毒模式切换的生产性试验。该区域具有单一水源、长距离输水、管网相对独立且受咸潮影响等特点,是评估自由氯消毒在复杂输配条件下余氯维持能力、微生物控制效果及DBPs生成风险的典型场景。基于此,本文对该区域从出厂水到管网末梢的水质变化进行了长期跟踪监测。重点评估切换过程中余氯衰减、微生物控制及各类DBPs的生成与演变特性,以期为上海市水厂消毒工艺优化与风险管控提供科学依据。

1 试验方案与保障措施

1.1 试验区域概况与监测方案

本文选取上海市某相对独立的岛屿供水区域开展生产性试验。该区域由单一水源经专管输送至区域内唯一1座水厂,水厂设计规模为10万m^3/d,采用“预臭氧-混凝沉淀-砂滤-后臭氧-生物活性炭过滤”的深度处理工艺,采用次氯酸钠消毒,接触30 min后补硫酸铵出厂。供水管网覆盖本岛及另一附属岛屿,在附属岛屿上设有3座中途加压泵站,负责该区域的二次加压与消毒剂补充,共同构成一个相对封闭、完整的供水系统。

为全面评估消毒方式切换对管网水质的影响,建立了涵盖“水厂-泵站-管网末梢”的全流程监测体系。如表1所示,共设置16个人工采样点,覆盖水厂出厂水、3座泵站(PS1~PS3)的进出水及本岛与附属岛屿上不同水龄(8.4~45.0 h)的代表性管网点位(表1),特别是5个位于管网末梢的“最不利点”。人工监测指标包括余氯、菌落总数、各类DBPs(C-DBPs、含氮DBPs、I-DBPs)及消毒衍生嗅味物质等。人工采样在试验准备期及切换初期频率为2次/周,进入稳定运行期后根据水质情况调整监测频次。整个生产性试验监测周期覆盖切换前的基准调查、切换过程及切换后的长期稳定运行阶段,以确保数据的完整性与代表性。

1.2 消毒方式切换方案与实施阶段

本次生产性试验的核心是将区域内现行的“自由氯接触消毒+出厂氯胺消毒+泵站中途补氯补氨”的氯胺消毒模式,切换为全流程自由氯消毒模式。切换工作分2个阶段审慎实施。

第一阶段(附属岛屿泵站切换试验)于2024年8月19日启动。此阶段水厂消毒工艺保持不变,仍维持氯胺消毒出厂,仅停止附属岛屿上3座泵站(PS1、PS2、PS3)的硫酸铵投加,保留次氯酸钠投加,

表 1 采样点位选择及其水龄

Tab. 1 Selection of Sampling Points and Water Ages

监测点位		水龄/h
水厂与泵站	出厂水	0.0
	PS1 (In/Out)	23.0
	PS2 (In/Out)	26.5
	PS3 (In/Out)	33.0
管网	ZC	8.4
	HD	20.7
	SS	32.0
	JY	36.0
	MX	33.0
	JS	27.5
	FL	40.0
	MJ	45.0
	XL	43.1

将泵站的中途消毒方式由氯胺消毒切换为自由氯消毒。泵站出站自由氯目标质量浓度控制在 0.6~0.8 mg/L(日间)和 0.5~1.0 mg/L(夜间)。该阶段旨在验证泵站在取消补氨、仅补自由氯条件下,对附属岛屿管网水质的维持能力与控制风险。

在第一阶段试验证明泵站自由氯消毒可行后,第二阶段(全区域整体切换试验)于 2024 年 12 月 11 日启动全区域消毒方式切换。此阶段水厂停止清水库的硫酸铵投加,将出厂消毒方式由氯胺消毒改为自由氯消毒,同时泵站维持第一阶段已实施的自由氯消毒模式。对水厂出厂自由氯质量浓度采取分阶段、梯度下调的控制策略:初始阶段(第 1 周)控制在 0.8~1.0 mg/L;优化阶段(第 2~3 周)下调至 0.6~0.8 mg/L;长期稳定运行阶段(第 4 周起)进一步调整至 0.5~0.7 mg/L。泵站出站自由氯控制目标与第一阶段相同。该阶段旨在评估从水厂源头到管网末梢全部采用自由氯消毒的全面影响与系统风险。

1.3 生产性试验运行保障措施

为确保生产性试验安全、有序进行,并有效防控水质风险,制定了系统的综合保障措施。首先,强化工艺监控与动态调整。试验期间,加密对水厂及泵站加氯(氨)设备的巡检频次,确保投加系统稳定运行;对在线余氯、浊度仪表进行定期校验与数据核对,保障实时监测数据的准确性;建立试验数据日报与快速分析机制,根据管网末端(特别是最不利点)的水质监测结果,动态优化调整水厂及泵站的自由氯投加量,确保管网余氯分布合理、水质达标。

其次,建立完善的水质预警与应急响应机制。制定详细的应急预案,明确在水质出现异常(如余氯持续偏低、浑浊度突升、微生物指标异常、用户投诉“黄水”或嗅味问题等)时的处置流程。设立应急处置工作组,一旦发现不可控风险,可立即指令水厂及泵站恢复氯胺消毒工艺运行。同时,密切跟踪用户端水质反馈,与区域供水服务部门保持联动,确保对任何水质异常投诉能够第一时间响应、采样分析与排查处置。

最后,注重全过程的数据管理与技术支撑。所有在线与人工监测数据均录入统一数据库,进行趋势分析与比对,为阶段性决策提供科学依据。试验方案设计充分吸收了前期小试与中试的研究成果,确保了生产性试验切换质量浓度、控制策略的科学性与安全性。通过上述多层次、全方位的保障措施,力求在真实供水系统中安全、稳妥地完成消毒方式切换,并获取真实、可靠的研究数据。

2 结果与分析

2.1 消毒方式切换后余氯衰减特征

2.1.1 切换过程余氯变化

消毒方式切换操作的核心步骤在于停止加氨,使水厂消毒工艺由氯胺消毒转变为自由氯消毒。现场密集监测结果如图 1 所示,在切换执行的瞬间,由于投加的次氯酸钠(自由氯)与清水库及出厂管道中残留的一氯胺、二氯胺发生反应,总氯质量浓度出现了约 2 h 的短暂下降。这一现象符合氯胺在自由氯作用下发生氧化还原反应并加速衰减的化学原理。当反应结束后,系统总氯的质量浓度开始上升,3 h 后恢复到切换前的水平(约为 1.0 mg/L)。该过程表明,尽管消毒剂形态的转换会引发水厂内部氯体系的短期动态调整,但整个系统具备良好的缓冲与自恢复能力,切换过程对出厂水余氯稳定性的影响是短暂且可控的,对后续管网输配的持续消毒能力构成实质性风险较低。

2.1.2 切换后管网余氯变化

切换为自由氯消毒并进入稳定运行阶段后,对该水厂供水区域内全流程管网余氯分布进行了长期跟踪。如图 2 所示,在本岛区域,出厂水自由氯质量浓度根据季节和水温进行了阶段性优化调整,整体

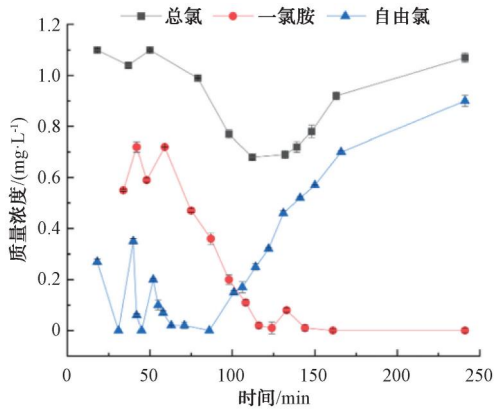


图 1　氯胺切换自由氯过程中余氯变化特性

Fig. 1　Residual Chlorine Variation during the Switching Process from Chlorination to Chloramination

控制在 0.63～0.95 mg/L，均值为 0.75 mg/L，如图 2(a)所示。出厂水经管网输配后，各监测点自由氯呈现沿程衰减趋势。距离水厂较近的节点如 ZC、HD，自由氯质量浓度均值分别维持在 0.48、0.37 mg/L；而位于管网末梢、水龄(32～45 h)较长的 SS 与 JY，自由氯质量浓度均值分别为 0.11 mg/L 与 0.17 mg/L。尽管 2 个最不利点位均出现过自由氯质量浓度低于 0.05 mg/L 的偶发情况：SS 在累计 22 次监测中出现 2 次(占 9%)，JY 在累计 16 次监测中出现 2 次(占 12.5%)，但其均值仍高于国家标准《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)对管网末梢水余氯的限值要求，表明本岛区域管网在自由氯消毒下的余氯维持整体有效。

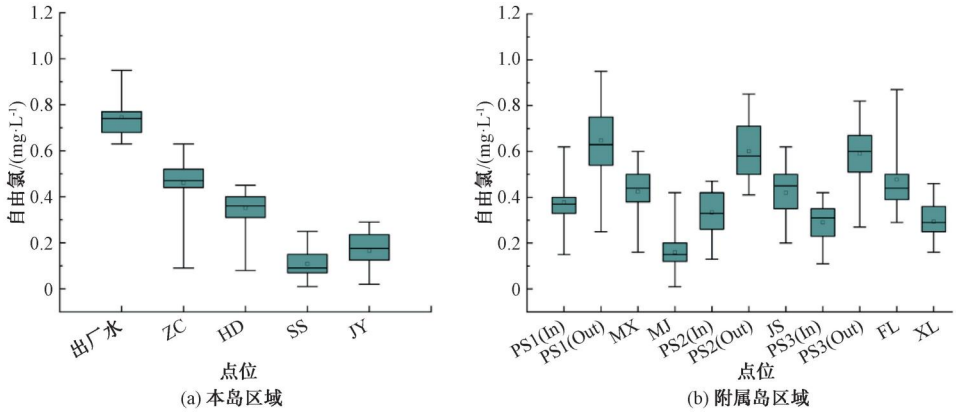


图 2　切换后管网余氯变化

Fig. 2　Variation of Residual Chlorine in the Pipeline Network after Disinfection Switching

在附属岛区域，情况则更为复杂，涉及长距离原水管输水及泵站二次补氯。如图 2(b)所示，水厂出厂水经 23～33 h 输送至附属岛区域 PS1、PS2、PS3 这 3 个泵站时，进水自由氯质量浓度已衰减至 0.29～0.38 mg/L。泵站停止加氨、仅进行自由氯二次投加后，出水自由氯质量浓度控制在 0.59～0.65 mg/L，与预设目标基本吻合。经附属岛本地管网输配后，各管网点位自由氯进一步衰减，除 MJ 点位有 1 次(占 4.5%)检出值略低外，其余均满足标准。特别值得注意的是末端点位 MJ 和 XL，其自由氯质量浓度均值仍分别达到 0.16 mg/L 和 0.29 mg/L，余氯维持效果良好。值得注意的是，自由氯消毒体系在夏季高温条件下，从水厂出厂至附属岛屿 3 个泵站进水的平均总氯衰减率[(出厂水总氯质量浓度−泵站进站水总氯质量浓度)/出厂水总氯质量浓度×100%]约为 68.0%，远低于去年同期氯胺消毒模式下 88.3%的总氯衰减率(表 2)。这一结果表明，在本项目特定的长距离输水条件下，自由氯在管网中的稳定性实际上优于氯胺，尤其在抑制高温导致的加速衰减方面表现更具优势。其原因是，氯胺生成过程中，加氯加氨的精准控制存在较大难度，实际生产过程中产生的一氯胺质量分数并非 100%，其中尚混有一定量自由氯，在长距离输水过程中一氯胺还可转化产生二氯胺，这种混氯状态会加速总氯的消耗[8]。此外，高温期间氯胺的硝化作用明显加强，使管网余氯加速衰减。

2.2　消毒方式切换后微生物风险变化

消毒方式切换为自由氯后，供水系统全流程的微生物安全得到了有效保障。如图 3 所示，对菌落总数这一指示性微生物指标的检测显示，切换消毒方式后的水厂出厂水每次检测中均未检出菌落总数。在本岛及附属岛区域的管网及泵站进出水点

表 2 消毒方式切换前后高温期(7 月—10 月)各泵站进水总氯对比

Tab. 2 Comparison of Total Chlorine at Pump Stations Inflow during High-Temperature Period (July-October) before and after Disinfection Method Switching

数据采集时段	总氯平均质量浓度/(mg·L^{-1})				平均总氯衰减率
	出厂水	PS1 泵站进站水	PS2 泵站进站水	PS3 泵站进站水	
2024-07-01—2024-10-20(切换前:氯胺消毒)	1.05	0.18	0.12	0.07	88.3%
2025-07-01—2025-10-20(切换后:自由氯消毒)	0.76	0.29	0.26	0.18	68.0%

位,菌落总数虽偶有检出,但检出值普遍低于 25 CFU/mL,远低于上海市地方标准《生活饮用水水质标准》(DB31/T 1091—2025)(50 CFU/mL)及国家标准《生活饮用水水质标准》(GB 5749—2022)(100 CFU/mL)的限值。此外,所有出厂水、泵站进出水及管网末梢水样品中均未检出大肠杆菌。这表明自由氯的瞬时消毒能力及管网中的持续消毒效果均十分可靠。

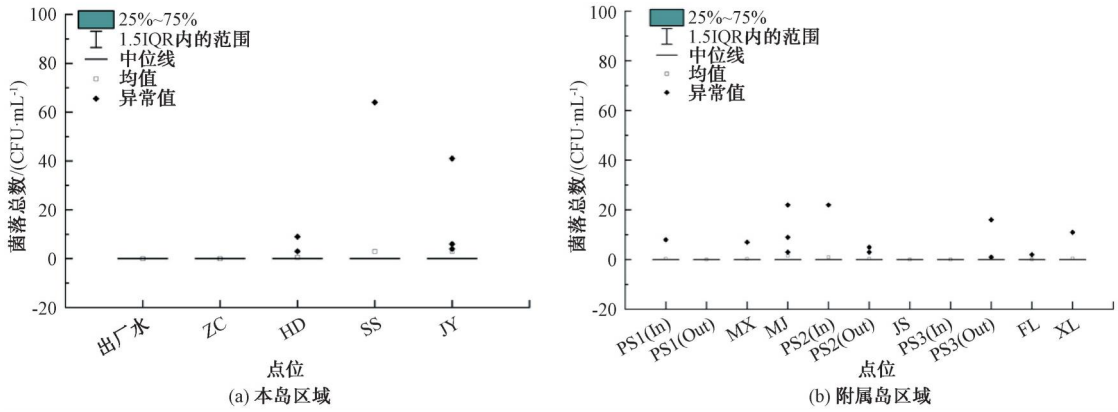


图 3 切换后管网菌落总数变化

Fig. 3 Variation of Total Bacterial Counts in the Pipeline Network after Disinfection Switching

此外,微生物控制效果的提升还与硝化风险的消除相辅相成。氯胺消毒体系中残留的氨氮是硝化细菌生长的底物,容易导致亚硝酸盐积累和生物膜增殖。切换为自由氯后,氨氮投加被取消,管网水中亚硝酸盐质量浓度(<0.001 mg/L)普遍低于检测限,硝化过程被有效抑制。这从另一方面减少了以氨氮为营养源的微生物群落,降低了生物膜相关风险,进一步巩固了管网微生物安全性[1]。综合菌落总数、大肠杆菌及硝化指标来看,自由氯消毒在保障从水厂到用户龙头全流程的微生物学安全方面,效能显著,风险完全可控。

2.3 常规与新兴 DBPs 变化特性

2.3.1 三卤甲烷(THMs)与卤乙酸(HAAs)

THMs 和 HAAs 是两类法规管控最为严格的常规 C-DBPs。切换为自由氯消毒后,其生成规律发生预期变化。如图 4 所示,THMs 方面,出厂水生成总量(均值为 0.15)维持在较低水平,但经管网输配,尤其在本岛区域的 JY、SS 及附属岛区域的 MJ 等水龄超长的末端点位,THMs 呈现累积趋势,个别点位 THMs 值(实测质量浓度/限值之和)在 4 月—5 月及 8 月—9 月接近或略超上海市地方标准《生活饮用水水质标准》(DB31/T 1091—2025)限值(0.5),但远低于国家标准《生活饮用水水质标准》(GB 5749—2022)限值(1)。如图 4(d)所示,4 月—5 月 THMs 升高可能与咸潮期原水受海水入侵影响增强有关,监测期内原水氯化物含量在同期呈升高趋势,表明水源中海源卤离子输入增加,可能促进了溴代 THMs 的生成;而 8 月—9 月的风险则可能与水温升高加速自由氯与有机物反应有关。尽管如此,全年监测数据显示,THMs 超标仅为偶发现象,各点位年均值仍远低于限值,总体风险可控。HAAs 的变化趋势类似,切换后各点位质量浓度有所上升,但所有检测结果均严格控制在国家标准《生活饮用水水质标准》(GB 5749—2022)限值(60 μg/L)以内,多数

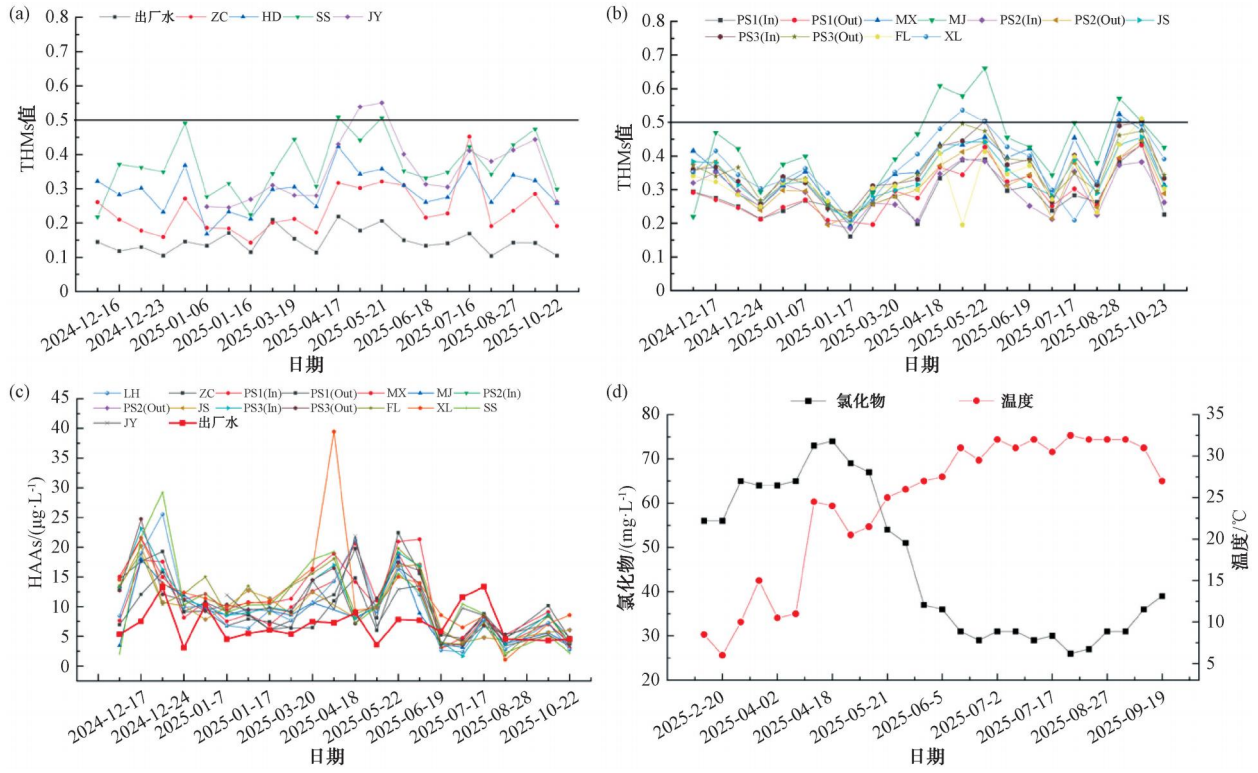


图 4　消毒工艺切换后(a)本岛区域 THMs;(b)附属岛区域 THMs;(c)全区域内 HAAs 的变化;(d)原水氯化物质量浓度与水温变化

Fig. 4　Variation of (a) THMs in Main Island Area; (b) THMs in Surrounding Island Area; (c) HAAs in All Areas after Disinfection Switching; (d) Raw Water Chloride Mass Concentration and Water Temperature Variation

维持在 9~21 μg/L 的较低水平,且长期监测呈现稳定或缓降趋势,如图 4(c)所示。这表明自由氯消毒下常规 C-DBPs 的生成处于可接受范围,通过优化前处理工艺和管网管理,风险可进一步降低。

2.3.2　三氯硝基甲烷(TCNM)与卤乙腈(HANs)

与 C-DBPs 不同,两类重要的含氮 DBPs——TCNM 和 HANs 在切换为自由氯后质量浓度显著下降,显示出自由氯工艺在控制高毒性含氮 DBPs 方面的优势。如图 5 所示,TCNM 在切换后质量浓度均值下降约 1 个数量级,由切换前的 0.051~0.220 μg/L 下降至 0.015 μg/L 以下的极低水平,HANs(以二氯乙腈为主)的质量浓度也由氯胺消毒时期

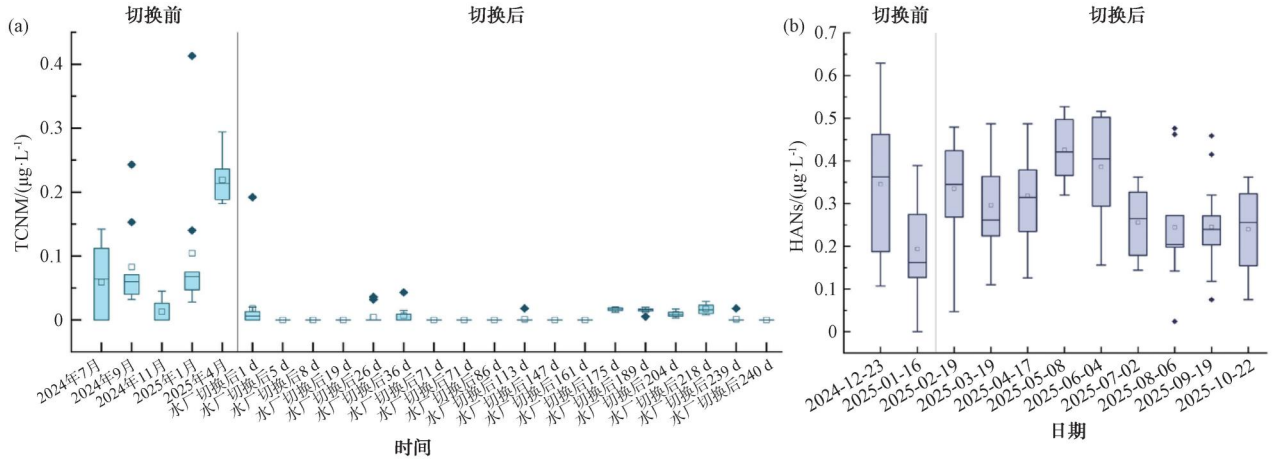


图 5　消毒工艺切换前后全系统(a) TCNM 与(b) HANs 变化

Fig. 5　Variation of (a) TCNM and (b) HANs in All Systems before and after Disinfection Switching

的 0.4～0.7 μg/L 降至 0.15～0.35 μg/L。这种下降主要归因于反应路径的改变：自由氯消毒体系不额外提供氨氮，中断了氯胺消毒中由氨氮、有机氮参与形成含氮 DBPs 的关键反应链。鉴于 TCNM 和 HANs 均具有比常规 THMs 更高的细胞毒性与遗传毒性[9]，其含量的大幅降低显著提升了饮用水的化学安全性。

2.3.3 I-THMs

I-THMs 是一类新兴的、高关注度的 DBPs，其毒性和致癌风险通常高于氯代和溴代同类物。本次试验对此进行了重点跟踪。如图 6 结果显示，在氯胺消毒模式下，部分点位 I-THMs 质量浓度可达 2.0～3.0 μg/L；切换为自由氯消毒后，其质量浓度迅速下降并长期稳定在 0.1～0.3 μg/L，降幅超过 1 个数量级。其机理在于，自由氯能更快地将水体中的碘离子氧化为化学性质更稳定、不易生成有机碘代物的碘酸根，从而从源头抑制了 I-THMs 的生成。尽管切换初期个别点位因管网扰动出现质量浓度短暂波动，但总体持续时间较短，可能与余氯形态转换、局部水力扰动及管壁沉积物或生物膜轻微释放有关，且在高水龄点位更为明显。总体上，系统很快达到新的平衡并持续保持低位，表明自由氯消毒能够有效降低 I-THMs 生成风险。后续应用中，建议在切换初期加强关键末梢点位监测，并优化泵站调度与补氯稳定性，以降低短时波动风险。

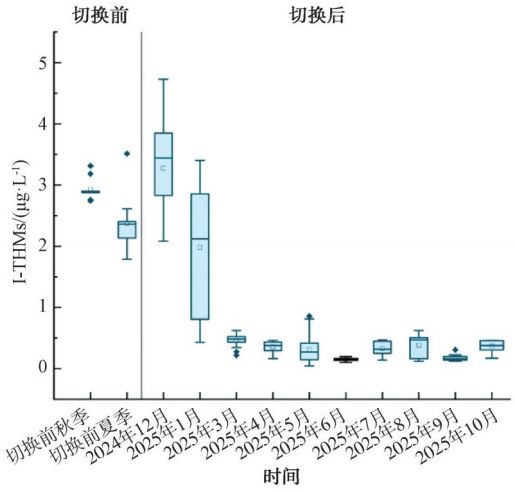


图 6 消毒工艺切换前后全系统 I-THMs 变化

Fig. 6 Variation of I-THMs in All Systems before and after Disinfection Switching

2.3.4 消毒衍生嗅味物质(N-氯代亚胺)

N-氯代亚胺是近年来被识别的导致饮用水中典型氯嗅味的关键物质，其嗅阈值极低，仅为 200～250 ng/L，有强烈的氯嗅味[10]。在氯胺消毒时期，管网水中尤其是末梢区域，N-氯代亚胺质量浓度较高，部分点位检出值为 200～400 ng/L，明显超过嗅阈值。切换为自由氯消毒后，情况得到根本性改善。尽管切换初期个别点位出现短暂波动，但持续时间较短，可能与余氯形态转换、局部水力扰动及管壁沉积物或生物膜轻微释放有关。如图 7 所示，所有点位的 N-氯代亚胺质量浓度在切换后迅速下降 1～2 个数量级，长期稳定在 2～20 ng/L 的极低质量浓度。这主要因为 N-氯代亚胺化学性质并不稳定，自由氯氧化性较氯胺更强，能更快地分解这类致嗅 DBPs[11]。这表明，消毒方式由氯胺转为自由氯，在实际感官体验上也表现良好，有效降低了用户氯嗅味投诉的潜在风险。

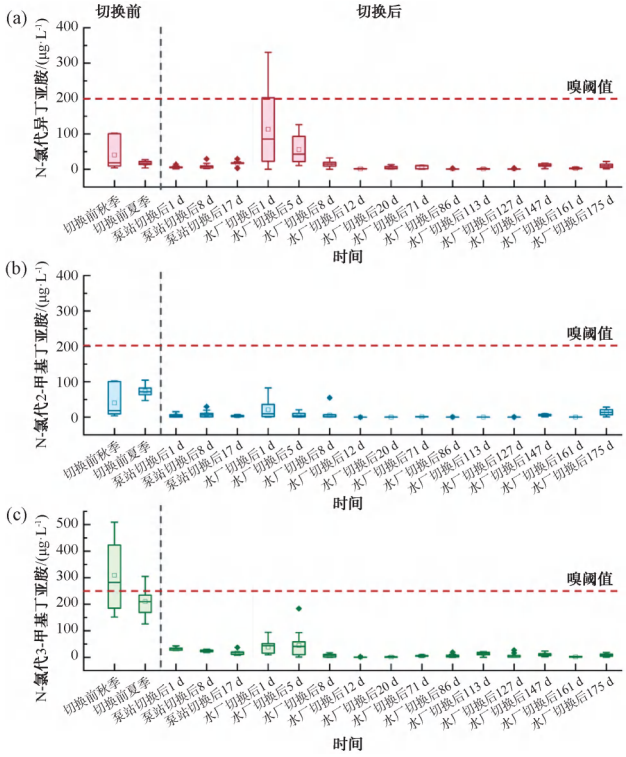


图 7 消毒工艺切换前后全系统 N-氯代亚胺变化

Fig. 7 Variation of N-Chloroaldimine in All System before and after Disinfection Switching

3 结论

本文通过生产性试验将某供水区域消毒方式由氯胺切换为全流程自由氯，并对长期运行效果进行

了系统评估。结果表明,切换过程平稳,仅造成水厂内部余氯的短暂可控波动。在优质原水与深度处理工艺背景下,自由氯在该长距离供水系统中表现出良好的适用性,其消毒余量维持效果优于氯胺,并完全消除了管网硝化风险。DBPs 生成特征发生有利转变:虽然常规 C-DBPs 生成量增加,需关注末梢区域在特定时期的累积风险,但多种高毒性 DBPs 如 TCNM、HANs 和 I-THMs 的质量浓度均下降超过 1 个数量级,同时氯嗅味物质 N-氯代亚胺质量浓度也降至极低水平。综上,本文的自由氯消毒在保障生物安全、抑制硝化、降低高毒性 DBPs 及改善嗅味方面表现优异,具备替代氯胺消毒技术的可行性,为类似供水系统的消毒工艺优化提供了实践依据。后续工程应用中,应进一步加强夏季高温和咸潮期的自由氯精细化投加控制,并优化末梢高水龄区域的水力调度,以降低余氯衰减和常规 C-DBPs 累积风险。需要指出的是,本文依托相对独立的岛屿供水系统开展,其水源条件、输配方式及管网结构具有一定特殊性,因此相关结论对内陆城市或其他类型供水管网的适用性仍有待在更广泛场景下进一步验证。

参考文献

[1] 蔡栩丞, 胡宇星, 周爽, 等. 饮用水系统硝化微生物分布规律、环境影响因素及调控应用的研究进展[J]. 微生物学通报, 2023, 50(4): 1607-1620.
Cai Y C, Hu Y X, Zhou S, et al. Distribution characteristics, environmental influencing factors and engineering application of nitrifiers in drinking water systems: A review[J]. Microbiology China, 2023, 50(4): 1607-1620.

[2] NYC Environmental Protection. New York City drinking water supply and quality report - 2020 [R]. New York: NYC Environmental Protection, 2020.

[3] Poitelon J B, Joyeux M, Welté B, et al. Variations of bacterial 16S rDNA phylotypes prior to and after chlorination for drinking water production from two surface water treatment plants[J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 2010, 37(2): 117-128.

[4] 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.

[5] Alfredo K. The "Burn": Water quality and microbiological impacts related to limited free chlorine disinfection periods in a chloramine system[J]. Water Research, 2021, 197: 117044. DOI:10.1016/j.watres.2021.117044.

[6] 陈国光. 精准加氯降低消毒副产物改善自来水口感[J]. 给水排水, 2019, 45(9): 9-12.
Chen G G. Precise addition of chlorine to reduce disinfection byproducts and improves the taste of tap water[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(9): 9-12.

[7] 朱煜. 饮用水消毒切换过程水质变化与风险解析[J]. 给水排水, 2025, 51(7): 8-14.
Zhu Y. Analysis of water quality changes and risks during the switching process of drinking water disinfection[J]. Water & Wastewater Engineering, 2025, 51(7): 8-14.

[8] 刘志. 水厂混合态余氯对消毒副产物的生成影响机制与控制方法[D]. 上海: 同济大学, 2022.
Liu Z. Formation mechanisms and control of disinfection by-products during mixed residual chlorine process in water treatment plant[D]. Shanghai:Tongji University, 2022.

[9] 郝亚梅, 丁新良. 含氮类消毒副产物毒性研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2025, 42(6): 546-551.
Hao Y M, Ding X L. Toxicity of nitrogenous disinfection by-products:A review of recent studies[J]. Journal of Environment and Health, 2025, 42(6): 546-551.

[10] 周斌, 朱斌, 张天阳, 等. 氯胺消毒供水管网中途补氯补氨衍生水质风险解析[J]. 给水排水, 2025, 51(4): 1-7.
Zhou B, Zhu B, Zhang T Y, et al. Analysis of water quality risks associated with booster chloramination in chloramine disinfected water supply networks[J]. Water & Wastewater Engineering, 2025, 51(4): 1-7.

[11] 卢泳珊, 徐斌, 张天阳, 等. 饮用水中嗅味物质 N-氯代亚胺的分布规律研究[J]. 给水排水, 2020, 46(12): 19-24.
Lu Y S, Xu B, Zhang T Y, et al. Investigation on the distribution of N-chloroaldimine odorants in drinking water[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(12): 19-24.