

## 供排水企业运行及管理成果专栏

张刚, 刘浩东, 吴辉, 等. 紫外消毒技术在水厂的应用及工程实例[J]. 净水技术, 2024, 43(6):196-203.

ZHANG G, LIU H D, WU H, et al. Application and engineering cases of UV disinfection technology in WTPs [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6):196-203.

## 紫外消毒技术在水厂的应用及工程实例

张刚<sup>1</sup>, 刘浩东<sup>2</sup>, 吴辉<sup>1</sup>, 沈东春<sup>1</sup>, 马云涛<sup>1</sup>, 樊丞越<sup>2</sup>, 严嘉明<sup>2</sup>, 刘宏远<sup>2,3,\*</sup>

(1. 嘉兴市水务投资集团有限公司, 浙江嘉兴 314000; 2. 浙江工业大学土木工程学院, 浙江杭州 310023; 3. 浙江工业大学水工程与应急技术研发中心, 浙江杭州 310023)

**摘要** 与氯消毒、臭氧消毒等化学消毒相比, 紫外线 (ultraviolet, UV) 消毒具有广谱灭菌、消毒接触时间短、不使用化学药剂、不会产生消毒副产物、便于实现自动化控制等优点。浙江某水厂供水能力为 20 万 m<sup>3</sup>/d, 工艺采用 UV+次氯酸钠联合消毒工艺, 充分利用 UV 消毒技术无消毒副产物的优势以及次氯酸钠消毒的持续消毒能力。工程应用中设定 UV 剂量为 40.00 mJ/cm<sup>2</sup>, UV 穿透率为 90.00%, 实际 UV 剂量为 48.99 mJ/cm<sup>2</sup>。UV 消毒后, 菌落总数为未检出。补加氯量与常规投量相比下降约 30%, UV 消毒的应用可以在降低化学药剂投加成本的同时兼顾饮用水化学和生物安全性。工程的成功应用为相同类型的水厂消毒工艺的升级改造提供经验。

**关键词** 紫外线消毒 次氯酸钠 联合消毒工艺 消毒副产物 水厂

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-0177(2024)06-0196-08

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.06.023

## Application and Engineering Cases of UV Disinfection Technology in WTPs

ZHANG Gang<sup>1</sup>, LIU Haodong<sup>2</sup>, WU Hui<sup>1</sup>, SHENG Dongchun<sup>1</sup>, MA Yuntao<sup>1</sup>, FAN Chengyue<sup>2</sup>, YAN Jiaming<sup>2</sup>, LIU Hongyuan<sup>2,3,\*</sup>

(1. Jiaxing Water Investment Group Co., Ltd., Jiaxing 314000, China;

2. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

3. Water Engineering and Emergency Technology R&D Center of Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract** Compared with chlorine disinfection, ozone disinfection and other chemical disinfection, ultraviolet (UV) disinfection has the advantages of broad-spectrum sterilization, short disinfection contact time, no chemicals, no disinfection by-products, and easy to achieve automatic control. A water treatment plant (WTP) in Zhejiang with a water supply capacity of  $2 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/d uses a combined UV and sodium hypochlorite disinfection process, making full use of the advantages of UV disinfection technology with no disinfection by-products and the continuous disinfection capability of sodium hypochlorite disinfection. The UV dose is set at 40.00 mJ/cm<sup>2</sup>, the UV penetration rate is 90.00%, and the actual UV dose is 48.99 mJ/cm<sup>2</sup>. After UV disinfection, the total number of colonies is not detected. The amount of supplemental chlorine dropped 30% compared to the conventional dosage. The application of UV disinfection can reduce the cost of chemical injection while taking into account the chemical and biological safety of drinking water. The successful application of this project provides experience for upgrading the disinfection process in the same type of WTPs.

**Keywords** UV disinfection sodium hypochlorite combined disinfection process disinfection by-products (DBPs) water treatment plant (WTP)

[收稿日期] 2023-06-29

[基金项目] 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07403003)

[作者简介] 张刚(1983—),男,主要从事给水处理技术研究及运行管理工作,E-mail:28893022@qq.com。

[通信作者] 刘宏远(1971—),男,教授,博士生导师,E-mail:lhyzy@zjut.edu.cn。

氯消毒是目前我国水厂使用最普遍的消毒技术<sup>[1]</sup>,但其对耐氯菌的去除能力较差且会产生消毒副产物(disinfection by-products, DBPs)<sup>[2-5]</sup>。臭氧消毒能力更强,主要通过直接氧化或生成·OH间接氧化达到消毒的目的<sup>[6]</sup>,但其仍会产生次溴酸盐和溴代有机物,此类DBPs可能存在更强的细胞毒性和致癌性<sup>[7-8]</sup>。基于UV的饮用水消毒技术可以有效去除水中病原微生物,其对耐氯的隐孢子虫、贾第鞭毛虫等有显著的灭杀效果<sup>[9]</sup>,不会产生DBPs。但UV无法在饮用水输送过程中对其进行持续的消毒,需要与化学消毒剂联合<sup>[4]</sup>。本文在UV消毒技术特点的分析基础上,研究了浙江某供水量为20万m<sup>3</sup>/d的水厂中UV+次氯酸钠联合消毒工艺的特点,介绍了其消毒的效果以及运营管理的经验。

## 1 UV消毒技术特点与应用

### 1.1 UV消毒的机理和特点

UV于1910年首次用于饮用水消毒,是一种安全有效的饮用水消毒方法。UV是波长处于100~400 nm的电磁波,根据波长的不同一般分为长波黑斑效应UV(UVA, 315~400 nm)、中波红斑效应UV(UVB, 275~315 nm)、短波灭菌UV(UVC, 200~275 nm)以及真空UV(VUV, 100~200 nm)。细菌、病毒和单细胞微生物的核酸会吸收UV的UVC波段,诱导形成核酸碱基的二聚体,包括环丁烷嘧啶二聚体(cyclobutene pyrimidine dimers, CPDs)、6-4嘧啶-嘧啶二聚体(6-4PPs)和其杜瓦价同分异构体。这种嘧啶二聚体的形成是UV辐照对微生物最常见的损伤<sup>[10-11]</sup>。此外,UV辐照产生的自由基引发光电离,使细胞遗传物质出现氧化损伤<sup>[12]</sup>,从而达到消毒的目的。微生物吸收的UV剂量和其对UV的抵抗能力决定了细胞损坏的程度,低剂量的UV辐照即可灭活大多数的病原微生物<sup>[13]</sup>。

和传统的化学消毒相比,UV消毒作为物理消毒具有诸多优势:(1)低剂量的UV就能够实现广谱灭菌,对于耐氯的致病性微生物如铜绿假单胞菌、隐孢子虫和贾第鞭毛虫有显著的去杀效果,不会产生耐消毒剂的细菌;(2)不需要添加额外的化学药剂,不产生DBPs;(3)仅在较短的辐照时间内即可有效灭菌,可以实现管道式设备杀毒;(4)以UV消毒为主的消毒工艺可以提高水质的微生物安全性,降低后续氯消毒的药剂投加量,进一步提升管网的水质

安全性。

除了对病原微生物有显著的去杀效果外,在较高的剂量下,1 h内UVC波段可以去除超过80%的土臭素以及2-甲基异茨醇(2-MIB)<sup>[14]</sup>。此外,添加H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、Cl<sub>2</sub>等氧化剂构建UV高级氧化体系可以有效应对《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中对于饮用水中土臭素以及2-MIB的限值要求<sup>[15]</sup>。UV照射可能会改变水中溶解性有机物的特征,例如·OH裂解芳香环后会形成脂肪族化合物<sup>[16]</sup>。目前,基于UV的高级氧化工艺对于控制DBPs生成的研究较多,UV与氧化剂联用可以有效控制DBPs的生成,UV剂量为30~220 mJ/cm<sup>2</sup>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>投加量为10 mg/L、反应时间为40 min时,卤乙腈(HANs)的生成势减少49%<sup>[17]</sup>。UV辐射照度为0.16 mW/cm<sup>2</sup>,氯胺物质的量浓度为200 μmol/L,反应时间为30 min,能够有效抑制HANs、二氯乙酰胺和三氯乙酰胺的生成<sup>[18]</sup>。

UV的消毒效果取决于系统能够照射到微生物上的UV剂量,并且与照射时间、UV辐射照度成正比。其效率可能会受到水中悬浮物的影响,水中的悬浮固体会吸收或反射UV,使得UV消毒的效率受到限制。UV消毒的作用时间较短,其对微生物造成的光化学损伤有可能会恢复<sup>[19]</sup>,已有研究表明细胞受损后修复的程度与UV的剂量直接相关。UV并没有持续性的消毒能力,而饮用水在进行UV消毒后,仍然需要较长的时间才能抵达用户端,仅依靠UV消毒并不能满足饮用水长距离输送中的抑菌要求,需要和其他化学消毒方法联用。

### 1.2 UV消毒技术的发展

UV消毒技术发展的关键在于UV光源的发展。当前,市政供水领域UV消毒系统采用的光源以低压或中压汞灯为主。低压汞灯可以分为热阴极和冷阴极,冷阴极低压汞灯利用阳离子轰击阴极,当产生的二次电子达到一定速度时,与管内的汞蒸气产生作用使其被激发,从而发光。热阴极汞灯通过加热阴极产生热电子发射现象,汞蒸气在热电离和热电子碰撞下产生辉光。汞蒸气在汞灯发射UV的过程中起了至关重要的作用,由于气体的高不透明度,254 nm的光子在离开灯之前经过多次散射,并且原子间的碰撞也可能将已经激发的光子转移到非辐射状态。这些过程都会导致辐照效率的损失<sup>[20]</sup>,而改变7种特定的汞同位素百分比,可以使得UV效率

提高 22%,这可能是未来汞灯进一步发展的方向之一<sup>[21]</sup>。

掺入少量 TiO<sub>2</sub> 的低压汞灯可以提供单色峰值波长(253.7 nm)的辐射即 UVC 波段,中压汞灯输出 200~400 nm 多色光谱,即 UVA 和 UVC 波段<sup>[22]</sup>。UVA 波段产生活性氧造成的间接细胞损伤和 UVC 波段的直接辐射损伤相比更难恢复,因此,中压汞灯对微生物的灭活与低压汞灯相比更加彻底<sup>[23]</sup>。由于中压汞灯的微生物灭菌效果更好,微生物复活率远低于低压灯,且其单灯输出功率比低压汞灯更高,灯管数量少、占地面积小,在大规模市政供水中被更加广泛地应用。

作为一种新的 UV 辐射产生源,UV-发光二极管(UV-LED)的技术逐渐成熟。LED 是一种半导体器件,能够产生 PN 结(空穴和电子)。电子和空穴在结处复合发射辐射,辐射波长取决于半导体材料,发射的 UV 波长为 255~405 nm。其与传统汞灯相比有着明显的优势,如不含有毒物质、更快的启动时间、更长的使用寿命、更加紧凑的设备、更加多样的波长和脉冲照明以及等<sup>[24]</sup>。UV-LED 具有结构紧凑、辐射模式(发射波长、视角和辐射分布)可调节的特点,其波长多样的优势使其能够实现多波长组合的高效灭菌<sup>[25]</sup>。

UV-LED 光电转化率较低,深 UV-LED 的外量子效率基本不超过 10%<sup>[26]</sup>,大功率的 UV-LED 受限于较为严重的发热,无法持续工作。由于这些技术瓶颈,UV-LED 暂时无法大规模取代传统汞灯,在市政饮用水消毒的工程应用较少<sup>[27]</sup>,主要用于个人健康和家庭卫生领域的消毒。但随着半导体技术的发展,基于氮化铝镓材料的 UV-LED 是目前氮化物技术以及第三代半导体材料技术发展的主要趋势,可能拥有广阔的应用前景<sup>[26]</sup>。对于 UV-LED 的最佳波长、LED 灯珠的合理发光强度和方式、达到灭菌效果所需要的照射时间等问题尚不明朗,并不能完全参考 UV 汞灯的应用经验,特别是在大规模的市政供水领域,仍需要更加详细的 UV-LED 应用规范。

### 1.3 UV 消毒的应用

UV 消毒技术在欧美地区的水处理领域的应用已有几十年的历史,已建成数千余座采用 UV 消毒技术的水厂,如美国西雅图水厂(规模为 68 万 m<sup>3</sup>/d)、荷兰鹿特丹水厂(规模为 47 万 m<sup>3</sup>/d)、加拿大维多利亚水厂(规模为 58 万 m<sup>3</sup>/d)、纽约 Catskil/

Delware 水厂(规模为 832 万 m<sup>3</sup>/d)、美国中心湖水厂(规模为 18 万 m<sup>3</sup>/d)、德国 Styrum-Ost 水厂(规模为 19.2 万 m<sup>3</sup>/d)、俄罗斯圣彼得堡主水厂(规模为 86 万 m<sup>3</sup>/d)。其中纽约市的 Catskil/Delware 水厂,采用 56 个 UV 消毒单元,对隐孢子虫的灭活率可以达到 3log 的水平,是目前世界上最大的 UV 消毒水厂<sup>[28]</sup>。

国内在 UV 技术方面的应用起步较晚,且 UV 消毒主要用于污水的处理,UV 消毒处理污水量占国内现有污水处理量的 70%以上。2009 年,天津开发区净水厂三期(15 万 m<sup>3</sup>/d)和上海临江水厂(60 万 m<sup>3</sup>/d)的 UV 消毒设备投入运营,是 UV 消毒技术在国内大规模水厂最早的应用案例<sup>[29]</sup>。国内水厂应用较多的是先 UV 消毒后补氯的消毒方式,这种方式能够缩短 UV 辐照时间降低氯消毒剂的投加量。先投加氯消毒剂再进行 UV 消毒的方式能够实现 UV/氯同步消毒,产生具有强氧化性的自由基可以显著灭活致病微生物。但 UV/氯同步消毒的方式会加快氯消毒剂的消耗,为维持管网中的余氯量,水厂需要增加氯消毒剂的投加量,最终可能导致水中产生更多的 DBPs<sup>[30]</sup>。目前,UV/氯同步消毒的方式没有实际工程应用案例的相关报道。表 1 列举了部分国内采用 UV 消毒技术的水厂,均采用先 UV 消毒后补氯的投加方式。

表 1 国内部分采用 UV 消毒工艺的水厂  
Tab. 1 UV Disinfection Process Applied in Some Domestic WTPs

水厂	消毒工艺	规模/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	参考文献
北京郭公庄水厂	UV+次氯酸钠	50 万	[31]
北京第十水厂	UV+氯胺	50 万	[32]
济南玉清水厂	UV+液氯	20 万	[33]
天津泰达水厂	UV+氯胺	22 万	[34]
十堰市第三水厂	UV+二氧化氯	20 万	[35]
北京门头沟门城水厂	UV+氯胺	32 万	[36]
拉萨纳金水厂	UV+次氯酸钠	48 万	[13]

北京郭公庄水厂为南水北调示范工程,拉萨纳金水厂是全球高原地区规模最大的、使用国产 UV 消毒设备的地表水厂。为满足优质饮用水的要求,很多水厂在原有工艺的基础上增加臭氧-生物活性炭深度处理工艺,但炭池微生物泄漏的风险不可忽视。深圳某水厂为控制“臭氧-炭砂滤池”的微生物泄漏问题,加装 2 套管道 UV 消毒设备,总设计规模均为 50 万 m<sup>3</sup>/d。经过 UV 消毒后,出水菌落总数

基本为未检出,运行成本同比增加 0.008 元/m<sup>3</sup>[37]。

已建成的 UV 消毒系统,能够添加氧化剂构建 UV 高级氧化体系,但 UV 高级氧化的主要目标是去除水中的 DBPs、药品及个人护理品(PPcPs)、土臭素以及对微污染源进行预氧化处理,且多以小试、中试为主,有关饮用水工程应用的相关报道较少。应用饮用水 UV 消毒技术的目的是高效去除水中病原微生物,UV 高级氧化与 UV 消毒在实际工程应用

的目的上存在差异,应根据实际原水情况进行选取。

## 2 工程应用实例

浙江省某水厂优质水供水工程三期(规模为 20 万 m<sup>3</sup>/d)于 2021 年 6 月建成并网投入运行,工程的工艺流程如图 1 所示。砂滤池出水进入紫外加注室,采用管道式 UV 设备消毒。UV 消毒后,在管道中直接补氯后进入清水池。该工艺采用的实际消毒方式为 UV+次氯酸钠联合消毒。

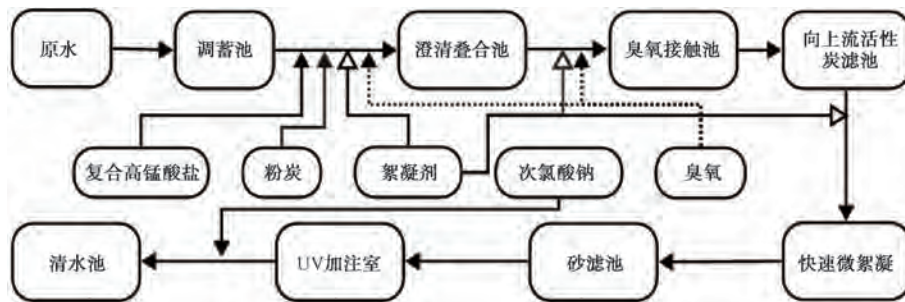


图 1 水厂工艺流程

Fig. 1 Process Flow Chart of WTP

该水厂原水水质达到了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)湖库 I 类标准,进厂原水各项年平均指标如表 2 所示。工艺出水水质优于现行的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求,并达到了《浙江省城市供水现代化水厂评价标准》。

表 2 原水水质指标

Tab. 2 Raw Water Quality Indices and Limited Values

检测指标	单位	数值
浑浊度	NTU	0.87±0.32
可见物	/	微颗粒
pH 值	/	8.15±0.31
氨氮	mg/L	0.02±0.01
COD <sub>Mn</sub> (以 O <sub>2</sub> 计)	mg/L	0.91±0.20
总碱度	mg/L	72.63±12.83
总硬度(以 CaCO <sub>3</sub> 计)	mg/L	50.48±5.62
溶解氧	mg/L	7.5±1.7

### 2.1 消毒设备

#### (1) UV 消毒设备

水厂采用的 UV 消毒设备采用特洁安 TrojanUVSwift 的中压汞灯,灯管老化系数为 0.94,运行功率为 30%~100%,UV 穿透率为 90%,设定 UV 计量为 40 mJ/cm<sup>2</sup>,清洗方式采用机械清洗+化学清洗。根据《紫外线消毒器卫生要求》(GB 28235—2020)的要求,UV 线照射设定剂量为 40

mJ/cm<sup>2</sup>。UV 剂量计算如式 1。

$$U = E \times t \quad (1)$$

其中:U——UV 辐射剂量,mJ/cm<sup>2</sup>;

E——单位面积上的 UV 辐射照度,mW/cm<sup>2</sup>;

t——照射时间,s。

实际运行中,UV 辐射照度在 35 mW/cm<sup>2</sup> 左右,正常工作状态下的波动不大于均值的 5%,照射时间控制在 1.4 s 左右,实际中的 UV 运行剂量为 48.99 mJ/cm<sup>2</sup>。

设定灯管擦拭频率为 24 h/次。单个 UV 灯管镇流器的功率为 3~12 kW。

#### (2) 次氯酸钠发生器

水厂采用现场制备 0.8% 次氯酸钠的方式,次氯酸钠发生器型号为 SES-20000,直流电压、电流分别为 48~68 V、600~800 A,电极材料为钛/钛涂层,盐水质量分数为 3.0%,有效氯产量为 20 kg/h,生成的有效氯质量分数为 0.8%。

### 2.2 联合消毒的实际运行效果

#### 2.2.1 试验方法

所有化学试剂都采用分析纯或更高纯级别。连续采样、测样的时间为 5 月。对砂滤出水、UV 消毒出水、次氯酸钠消毒出水进行取样,每周两次检测菌

落总数取平均值。DBPs 检测为每周一次,取样点位于砂滤池出水以及 UV 消毒出水。COD<sub>Mn</sub> 取各工艺出水进行检测,每天一次。总有机碳(TOC)作为高锰酸盐的补充指标每周取样一次进行检测。

### 2.2.2 联合消毒的目的

(1) 水厂三期工程原水为低浊度、低有机物、低氮磷的优质水源,经过砂滤池处理后,出水浊度为 0.06 NTU, COD<sub>Mn</sub> 为 0.40 mg/L, 无可见物。由于 UV 消毒效果受水质影响较大,悬浮物、有机物都可以吸收 UV,降低水中的 UV 强度。微生物隐藏在颗粒中可以免受 UV 辐照,使得 UV 消毒的灭活效果变差<sup>[38]</sup>。因此,高效的前置处理工艺以及优质原水可以更好地发挥 UV 消毒的作用。

(2) 水厂三期工程原水为湖库水,pH 值高于本地河网水,最高可达 8.46。现场制备的次氯酸钠消毒剂有效氯质量分数为 0.8%,pH 值在 9.10 左右,次氯酸钠的直接投加会使水体 pH 上升。pH 值为 6.0~8.5 时,由于三卤甲烷的生成属于碱催化过程,三卤甲烷浓度会随着水体 pH 值增大而增大。而以 UV 消毒为主要消毒工艺,再进行补氯一定程度上能够减缓 pH 的上升。

### 2.2.3 联合消毒的效果

#### (1) 菌落总数

进厂原水的菌落总数波动较大。虽然前置工艺在一定程度上去除了部分病原微生物,但是砂滤池出水后仍存在 14 CFU/mL 左右的菌落总数。经过 UV 消毒后,菌落总数下降至 0。UV 消毒后补加 0.9 mg/L 余氯,菌落总数未检出。UV 辐照和次氯酸钠消毒都可以去除水中的病原微生物,绝大多数病原微生物在 40 mJ/cm<sup>2</sup> 的 UV 消毒剂量下可达到 4 个对数单位的去除率<sup>[39]</sup>。实际工艺运行中,UV 消毒后偶有检出的细菌,可能是由于少量细菌附着于水中的颗粒物上,未被 UV 辐照,或部分细菌在培养过程中出现光化学复活现象<sup>[40]</sup>。但经次氯酸钠消毒后,可以有效去除未被 UV 辐照的病原微生物,并防止其在后续管网运输中出现复活现象。

#### (2) DBPs

工程调试阶段,取砂滤池和 UV 加注室出水,分别投加次氯酸钠(以有效氯计)约 0.80、1.10 mg/L,经过 30 min 接触消毒后,余氯质量浓度为 0.60、0.90 mg/L。其中,0.90 mg/L 为原水厂工艺出厂水余氯量内控值。随着管网更新及水质条件的改善,

根据管网末梢余氯值反馈以及研究需要,选取余氯量 0.6 mg/L 进行对比。饮用水采用次氯酸钠消毒时需检测的目标 DBPs 指标及限值按照《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求,其中,三氯甲烷、三卤甲烷和氯酸盐的限值按更加严格的《浙江省城市供水现代化水厂评价标准》。图 2 是直接投加次氯酸钠消毒和 UV+次氯酸钠联合消毒两种消毒方式的 DBPs 产量对比,由图 2 可知,一氯二溴甲烷、二氯一溴甲烷、三溴甲烷均低于检测限。余氯控制相同时,UV+次氯酸钠联合消毒后水中具有代表性的 DBPs(如三卤甲烷、氯乙酸)生成量整体略低于仅进行次氯酸钠消毒。三氯乙酸无显著变化,质量浓度仅上升 0.000 2 mg/L 左右,仅占 5%。随着余氯控制量从 0.6 mg/L 上升至 0.9 mg/L,和联合消毒相比,仅进行次氯酸钠消毒时水中 DBPs 的生成量上升更加明显。

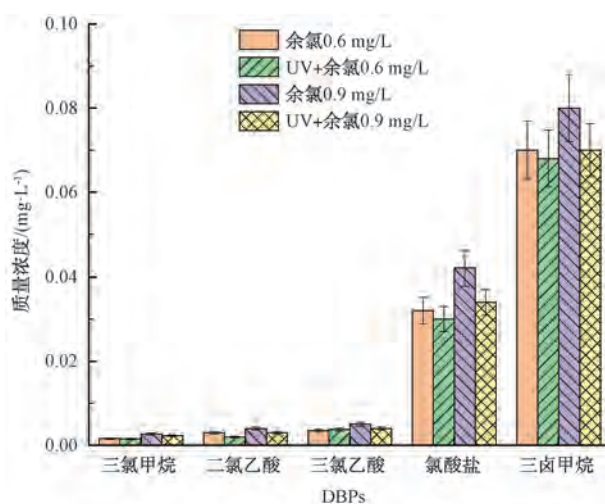


图 2 DBPs 产量

Fig. 2 DBPs Formation

由于 DBPs 的生成与水中的有机物存在较强的相关性,因此,通过对有机物代表性指标的检测,进一步分析 UV+次氯酸钠联合消毒的 DBPs 的生成规律。图 3 是 5 月各周水厂各工艺段 COD<sub>Mn</sub> 变化的情况。由图中可知,砂滤出水经过 UV 消毒工艺后, COD<sub>Mn</sub> 质量浓度小幅度下降 0.02~0.04 mg/L。天然水体中存在一定量的腐植酸,在腐植酸参与下有机物会吸收光能发生光敏反应<sup>[41]</sup>,UV 辐照可以去除部分的溶解性腐植酸<sup>[42]</sup>,将其降解为低分子质量的有机物,UV 还可以使得水中的有机物种类减少<sup>[43]</sup>,在一定程度上改善水质。由于在弱碱性条件

下,次氯酸钠的氧化性强于高锰酸钾。投加次氯酸钠后,次氯酸钠可以氧化部分有机物,使得  $COD_{Mn}$  进一步下降。

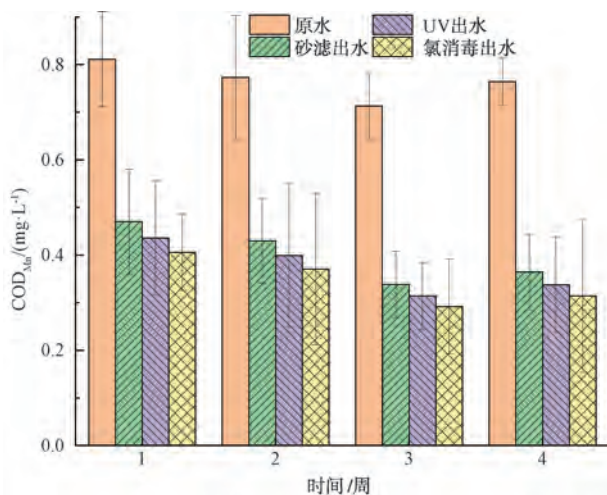


图3 各工艺段  $COD_{Mn}$  的变化情况

Fig. 3 Variation of  $COD_{Mn}$  in Each Process Section

对 UV 辐照后,TOC 的变化情况进行检测,水中的 TOC 质量浓度从 1.50 mg/L 下降至 1.33 mg/L 左右,与  $COD_{Mn}$  的变化趋势一致。有机污染物的下降一定程度上代表着水中卤代 DBPs 的前驱体下降,此外,当 UV+次氯酸钠联合消毒与单一氯消毒的次氯酸钠投量相同时,UV+次氯酸钠联合消毒的耗氯量(以余氯计)较次钠消毒略高 0.03~0.10 mg/L,说明 UV 辐照后余氯衰减速度变快<sup>[44]</sup>。水中的余氯与 DBPs 前驱体发生反应的几率减少。因此,UV+次氯酸钠联合消毒在 DBPs 的控制上优于仅进行次钠消毒,同时能够构建多屏障消毒体系。

### 2.2.4 经济成本分析

本工程的 UV 消毒室占地面积为 443.43 m<sup>2</sup>, DN800 中压式 UV 消毒设备 3 套。所需成本如下:市政配套设施为 132 869.78 元,土建为 162 957.79 元,配套设备为 651 655.98 元,UV 消毒设备(3 套)为 1 150 万元。UV 设备运行中,每吨水耗电量为 0.001 9 kW·h,电价为 0.75 元/(kW·h),电费为 0.001 4 元/m<sup>3</sup>,后期的灯管更换费用为 0.001 5 元/m<sup>3</sup>。UV 消毒后,投氯量下降 30%,每吨水消耗次氯酸钠成本减少 0.006 6 元,整体的工艺制水成本减少 0.003 7 元/m<sup>3</sup>。

## 3 结论

(1)文献研究表明,UV 消毒具有广谱灭菌、消

毒接触时间短、不产生 DBPs、便于实现自动化控制等优点。水厂构建以 UV 消毒技术为主,氯消毒剂为辅的联合消毒体系,能够提高水质的微生物安全性。中压汞灯占地面积更小、灭菌效果更好,在大型市政供水领域的应用更具优势。

(2)文献和现场工程研究均表明,水源水 pH 较高时,单一的次氯酸钠消毒会进一步提高 pH,UV+次氯酸钠联合消毒能够有效缓解 pH 的上升,也可以抑制三卤甲烷的碱催化生成过程。

(3)工程研究表明,UV+次氯酸钠联合消毒工艺与单一的次氯酸钠消毒相比,加氯量下降 30%。联合消毒工艺能够通过 UV 去除饮用水中大部分的细菌和病毒以及部分有机污染物,DBPs 生成量均明显下降。试验水厂 UV 消毒设备的运行造成制水成本增加 0.002 9 元/m<sup>3</sup>(电费与灯管更换费用),但由于加氯量的下降,整体工艺的制水成本实际反而减少了 0.003 7 元/m<sup>3</sup>。

## 参考文献

- [1] 贺斌,张静怡,李伟光.城市给水厂紫外-氯消毒工艺运行效能的综合评价[J].环境工程学报,2021,15(10):3463-3470.  
HE B, ZHANG J Y, LI W G. Comprehensive evaluation of operational efficiency of UV-chlorine disinfection process in urban water supply plants [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(10): 3463-3470.
- [2] 高雪,杨唯艺,雷培树.饮用水紫外线组合消毒技术发展现状[J].中国给水排水,2021,37(18):52-55.  
GAO X, YANG W Y, LEI P S. Development status of the combined ultraviolet disinfection technology in drinking water [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(18): 52-55.
- [3] 杜月皎,塔娜,杨晨辉,等.新兴饮用水消毒技术研究进展[J].给水排水,2022,58(s1):1083-1089.  
DU Y J, TA N, YANG C H, et al. Research progress of newly emerging drinking water disinfection technologies [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 58(s1): 1083-1089.
- [4] 蒋绍阶,张智瑞.小城镇自来水厂消毒技术的经济评价[J].中国给水排水,2007,23(4):15-18.  
JIANG S J, ZHANG Z R. Economic analysis of various disinfection techniques for water treatment plant in small towns [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(4): 15-18.
- [5] 李洁,李红岩,郑蓓,等.北京市村镇中小型供水厂二氧化氯消毒现状调研及问题分析[J].给水排水,2023,59(2):30-36.  
LI J, LI H Y, ZHENG P, et al. Investigation and analysis on chlorine dioxide disinfection of small and medium-sized water

- supply plants in rural area of Beijing [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 59(2): 30–36.
- [ 6 ] 岳尚超. 预臭氧化工艺对微污染原水消毒副产物影响的试验研究[D]. 天津: 南开大学, 2012.  
YUE S C. Effects of pre-ozonation on disinfection by-products for micro-polluted raw water [D]. Tianjin: Nankai University, 2012.
- [ 7 ] 仲鑫. 东太湖水源水臭氧化过程中羰基化合物的生成与转化机制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
ZHONG X. Formation and transformation mechanism of carbonyl compounds during ozonation of source water in east Tai Hu Lake [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [ 8 ] LIU X, LIU R, ZHU B, et al. Characterization of carbonyl disinfection by-products during ozonation, chlorination, and chloramination of dissolved organic matters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(4): 2218–2227.
- [ 9 ] ADEYEMO F E, SINGH G, REDDY P, et al. Efficiency of chlorine and UV in the inactivation of *Cryptosporidium* and *Giardia* in wastewater [J/OL]. *Plos One*, 2019, 14(5): e0216040. DOI:10.1371/journal.pone.0216040.
- [ 10 ] 景自博. 紫外线对给水管网中典型耐氯菌灭活特性和机理 [D]. 北京: 北京化工大学, 2022.  
JING Z B. Inactivation characteristics and mechanism of typical chlorine-resistant bacteria by ultraviolet in drinking water [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2022.
- [ 11 ] RASTOGI R P, RICHA, KUMAR A, et al. Molecular mechanisms of ultraviolet radiation-induced DNA damage and repair [J]. *Journal of Nucleic Acids*, 2010: 592980. DOI: 10.4061/2010/592980.
- [ 12 ] 孙绪敏, 刘建广. 紫外高级氧化工艺控制消毒副产物生成研究进展 [J]. *净水技术*, 2022, 41(11): 7–15.  
SUN X M, LIU J G. Research progress of UV-AOPs for DBPs formation control [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(11): 7–15.
- [ 13 ] 孙文俊, 吕东明. 紫外线技术在我国城镇给排水处理中应用的挑战和趋势 [J]. *净水技术*, 2023, 42(3): 1–6.  
SUN W J, LÜ D M. Challenge and trend of UV technology application in urban water supply and drainage treatment at home [J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(3): 1–6.
- [ 14 ] KIM T K, MOON B R, KIM T, et al. Degradation mechanisms of geosmin and 2-MIB during UV photolysis and UV/chlorine reactions [J]. *Chemosphere*, 2016, 162: 157–164. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.07.079.
- [ 15 ] SON M, CHO D, LIM J H, et al. Real-time monitoring of geosmin and 2-methylisoborneol, representative odor compounds in water pollution using bioelectronic nose with human-like performance [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2015, 74: 199–206. DOI:10.1016/j.bios.2015.06.053.
- [ 16 ] SONG Z M, YANG L L, LU Y, et al. Characterization of the transformation of natural organic matter and disinfection byproducts after chlorination, ultraviolet irradiation and ultraviolet irradiation/chlorination treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 426: 131916. DOI:10.1016/j.cej.2021.131916.
- [ 17 ] SRITHEP S, PHATTARAPATTAMAWONG S. Kinetic removal of haloacetonitrile precursors by photo-based advanced oxidation processes (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/O<sub>3</sub>, and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) [J]. *Chemosphere*, 2017, 176: 25–31. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.02.107.
- [ 18 ] 刘汝鹏, 郝玉友, 罗从伟, 等. 紫外/一氯胺降解水中氯霉素的性能与机理研究 [J]. *中国给水排水*, 2021, 37(9): 51–56.  
LIU R P, HAO Y Y, LUO C W, et al. Performance and mechanism of chloramphenicol degradation in aqueous solution by ultraviolet/monochloroamine [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(9): 51–56.
- [ 19 ] 林佳玲. 紫外消毒和氯消毒对典型微塑料吸附性能的影响 [D]. 广州: 暨南大学, 2021.  
LI J L. Effect of ultraviolet and chlorine disinfection on the adsorption performance of typical microplastics [D]. Guangzhou: Jinan University, 2021.
- [ 20 ] RAIZEN M G. Mercury isotopes for efficient UV lamps and fluorescent lighting [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, 52(6): 5231–5234.
- [ 21 ] WLER J E, RAIZEN M G. Enhanced escape rate for Hg 254 nm resonance radiation in fluorescent lamps [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 46(41): 415204. DOI:10.1088/0022-3727/46/41/415204.
- [ 22 ] BECK S E, WRIGHT H B, HARGY T M, et al. Action spectra for validation of pathogen disinfection in medium-pressure ultraviolet (UV) systems [J]. *Water Research*, 2015, 70: 27–37. DOI:10.1016/j.watres.2014.11.028.
- [ 23 ] CHEVREMONT A C, FARNET A M, COULOMB B, et al. Effect of coupled UV-A and UV-C LEDs on both microbiological and chemical pollution of urban wastewaters [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 426: 304–310. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.03.043.
- [ 24 ] JARVIS P, AUTIN O, GOSLAN E H, et al. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LED) to full-scale drinking-water disinfection [J]. *Water*, 2019, 11(9): 1894. DOI: 10.3390/w11091894.
- [ 25 ] SONG K, TAGHIPOUR F, MOHSENI M. Microorganisms inactivation by wavelength combinations of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 665: 1103–1110. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.041.
- [ 26 ] 闫建昌, 孙莉莉, 王军喜, 等. 紫外发光二极管发展现状及展望 [J]. *照明工程学报*, 2017, 28(1): 2–4.

- YAN J C, SUN L L, WANG J X, et al. UV light-emitting diode development status and outlook [J]. *Journal of Lighting Engineering*, 2017, 28(1): 2-4.
- [27] SONG K, MOHSENI M, TAGHIPOUR F. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review [J]. *Water Research*, 2016, 94: 341-349.
- [28] 郟燕秋, 朱晓辉, 吕东明, 等. 饮用水紫外线消毒——实施安全消毒的重要技术选择 [J]. *给水排水*, 2008, 44(6): 9-13.
- QIE Y Q, ZHU X H, LÜ D M, et al. UV disinfection of drinking water - An important technical choice for implementing safe disinfection [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2008, 44(6): 9-13.
- [29] 刘超然, 张达, 侯宇, 等. 给水厂紫外线消毒设备运行效果及节能降耗研究 [J]. *给水排水*, 2022, 58(7): 21-26.
- LIU C R, ZHANG D, HOU Y, et al. Study on application effect, energy saving and consumption reduction of ultraviolet disinfection equipment in water plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 58(7): 21-26.
- [30] 王黛瑶, 李恩, 李刚, 等. 饮用水紫外-氯联合消毒工艺研究进展 [J]. *净水技术*, 2020, 39(10): 94-101.
- WANG D Y, LI E, LI G, et al. Advances in research of combined ultraviolet-chlorine disinfection process for drinking water treatment [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(10): 94-101.
- [31] 饶磊. 浅谈郭公庄水厂的工艺选择 [J]. *城镇供水*, 2012(4): 41-44.
- RAO L. Introduction to the process selection of Guogongzhuang water plant [J]. *City and Town Water Supply*, 2012(4): 41-44.
- [32] 周大农. 关于北京第十水厂处理工艺的选择 [J]. *城镇供水*, 2015(2): 43-47.
- ZHOU D N. Selection of treatment process in Beijing No. 10 water treatment plant [J]. *City and Town Water Supply*, 2015(2): 43-47.
- [33] 郭敬华, 刘衍波, 李世俊, 等. 济南玉清水厂技改工程的设计、施工与运行 [J]. *中国给水排水*, 2012, 28(18): 57-59.
- GUO J H, LIU Y B, LI S J, et al. Design, construction and operation of technical transformation project of Jinan Yuqing waterworks [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(18): 57-59.
- [34] 孙淑琴, 常华. 紫外线消毒技术在天津泰达净水厂中的应用 [J]. *中国给水排水*, 2013, 29(11): 44-46.
- SUN S Q, CHANG H. Application of ultraviolet disinfection technology in TEDA water treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(11): 44-46.
- [35] 朱昱, 陈卫国. “紫外线+氯”联合消毒技术用于十堰市第三水厂工程 [J]. *中国给水排水*, 2013, 29(18): 56-59.
- ZHU Y, CHENG W G. Application of combined disinfection technology of UV radiation and chlorine in third waterworks in Shiyan City [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(18): 56-59.
- [36] 兰旭. 南水北调配套水厂深度处理和消毒工艺的选择 [J]. *市政技术*, 2014, 32(2): 106-108.
- LAN X. Processes selection of advanced water treatment and disinfection in supporting water works of south-to-north water diversion project [J]. *Municipal Technology*, 2014, 32(2): 106-108.
- [37] 黄孟斌, 王长平, 张毅, 等. 净水厂紫外消毒工艺改造工程实践 [J]. *水处理技术*, 2020, 46(8): 132-134.
- HUANG M B, WANG C P, ZHANG Y, et al. Water purification plant UV disinfection process renovation project practice [J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(8): 132-134.
- [38] 赵琳. 紫外与次氯酸钠消毒效果及影响因素研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- ZHAO L. Study on disinfection effect and influencing factors of UV disinfection and sodium hypochlorite disinfection [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.
- [39] 杨超. 基于细菌活性及可培养性的饮用水紫外线消毒机理研究 [D]. 北京: 清华大学, 2019.
- YANG C. Study on ultraviolet disinfection for drinking water based on bacterial viability and culturability assessment [D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.
- [40] 刘佳, 黄翔峰, 陆丽君, 等. 紫外消毒出水的微生物光复活及其控制技术 [J]. *中国给水排水*, 2006, 22(15): 1-4, 8.
- LIU J, HUANG X F, LU L J, et al. Study on control of microorganism photoreactivation during UV disinfection of wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(15): 1-4, 8.
- [41] 潘小军. 紫外消毒中水前后有机物的 GC/MS 分析研究 [C]. 南京: 2020 年中国环境科学学会科学技术年会, 2020.
- PAN X J. Study on GC/MS analysis of organic matter before and after UV disinfection in water [C]. Nanjing: 2020 Annual Scientific and Technical Conference of the Chinese Society of Environmental Science, 2020.
- [42] RICHARD G, ZEPP R G, GEORGE L, et al. Comparison of photochemical behavior of various humic substances in water: II. Photosensitized oxygenations [J]. *Environmental Science & Technology*, 1981, 10(1): 119-126.
- [43] 李华, 王文东, 王晓昌, 等. 臭氧-紫外预处理对高有机物原水混凝效果的影响 [J]. *环境科学*, 2010, 31(8): 1807-1812.
- LI H, WANG W D, WANG X C, et al. Effect of ozone-UV pretreatment on coagulation of raw water with high organic matter [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(8): 1807-1812.