



文章栏目：水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202208001 中图分类号 X703.1 文献标识码 A

周琳, 李子浩, 李沛卓, 等. UV-NaClO 顺序消毒对污水中大肠菌群的灭活效果[J]. 环境工程学报, 2022, 16(10): 3213-3220. [ZHOU Lin, LI Zihao, LI Peizhuo, et al. Inactivation of coliforms in wastewater by UV-NaClO disinfection[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(10): 3213-3220.]

UV-NaClO 顺序消毒对污水中大肠菌群的灭活效果

周琳¹, 李子浩¹, 李沛卓¹, 杨强¹, 高爱丽¹, 程丽华^{1,2,✉}, 毕学军^{1,2}

1. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 青岛 266033; 2. 城镇污水处理与资源化国家地方联合工程中心, 青岛 266033

摘要 紫外(UV)和次氯酸钠(NaClO)消毒广泛应用于城市污水处理中,但目前2种消毒方式均存在不足。为实现既可高效消毒又能同时降低消毒所带来负面影响的目的,通过对比研究,分析了达到与UV或NaClO相同的消毒效果时,紫外-次氯酸钠(UV-NaClO)顺序消毒所需的消毒剂量以及UV-NaClO顺序消毒对微生物复活和消毒副产物(DBPs)生成的影响。结果表明:当UV剂量为 $9\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$,NaClO投加量为3、4和 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,UV-NaClO顺序消毒可达到与单独UV消毒时(剂量为12、20或 $60\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$)以及单独NaClO消毒时(NaClO投加量为4、10或 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的相同消毒效果;且当需要的微生物灭活效率越高时,UV-NaClO顺序消毒的优势越明显。同单独UV消毒相比,UV-NaClO顺序消毒后微生物的光复活率和暗修复率明显降低。当达到与单独NaClO消毒相同的微生物灭活效果时,UV-NaClO顺序消毒可有效降低DBPs的生成量,例如完全灭活*E.coli*,采用UV-NaClO顺序消毒,DBPs的生成量可较单独NaClO消毒降低了76.87%。本研究可为污水排放与再生利用消毒技术的选择提供参考。

关键词 紫外;次氯酸钠;消毒;大肠菌群;复活;消毒副产物

水质安全是污水排放与再生回用的关键。病原微生物风险是保障水质安全需要优先控制的问题。总大肠菌群、粪大肠菌群和大肠埃希氏菌(*E.coli*)常被作为粪便污染的指示微生物,被国内外学者广泛用于评价水的生物安全性^[1]。大肠菌群主要以粪口途径传播、通过侵染肠道系统引发疾病,甚至危及人的生命^[2]。污水处理厂既是各种污水的汇集地,又是污水经过处理达到一定标准后重新回到生态系统或加以再生利用的重要环节^[3]。污水处理厂被认为是大肠菌群的重要来源及传播场所^[4]。消毒作为污水处理的最后一道工序,在灭活病原微生物、减少水传染疾病的传播等方面发挥着重要作用。在污水处理厂中,通常采用UV或NaClO消毒对大肠菌群进行灭活^[5]。

有研究表明,NaClO消毒可有效灭活细菌,同时水中残留的氯具有持续消毒作用,可保证消毒后水的生物稳定性,但次氯酸钠消毒会产生消毒副产物(DBPs),威胁再生水的用水安全^[6]。UV消毒可以在较低剂量下有效灭活病原微生物^[7],但UV消毒无持续杀菌能力,且经UV消毒后部分细菌难以被完全杀灭而处于亚致死或活的但不可培养状态^[8],这些细菌可在一定条件下通过光

收稿日期:2022-08-01;录用日期:2022-09-17

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2020ME223);青岛西海岸新区科技攻关“揭榜”专项(2020-25)

第一作者:周琳(1997—),女,硕士研究生,3077085089@qq.com;✉通信作者:程丽华(1973—),女,博士,教授,chenglihua666@163.com

复活或暗修复的方式重新获得活性, 进而增加再生水储存和输送过程中病原微生物二次滋生的潜在风险。

迄今为止, 已有学者在 UV-NaClO 顺序消毒灭活病原微生物方面开展了相关的研究工作^[9-10], 但达到与 UV 或 NaClO 相同的消毒效果时, UV-NaClO 顺序消毒在投加量的优势, 消毒后水在输送、储存及再生利用过程中 UV-NaClO 顺序消毒控制大肠菌群二次滋生的研究却相对较少。本研究以青岛市某市政污水处理厂消毒前的深度处理出水为研究对象, 分别采用 UV、NaClO 以及 UV-NaClO 顺序消毒, 对比分析了在达到排放要求以及再生水不同回用标准时, UV-NaClO 顺序消毒对微生物光复活与暗修复的抑制能力及其对 DBPs 生成量的削减作用。本研究结果可为强化污水消毒, 降低污水排放与再生回用的生物安全风险提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验原水

本实验原水取自青岛市某市政污水处理厂, 该厂进水主要为生活污水, 生物处理采用 A²O+MBBR 工艺, 深度处理工艺为混凝/沉淀/过滤及 UV 消毒工艺, 实验期间该厂过滤后出水, 水质的 pH 为 6.93~7.17、PO₄³⁻-P 为 0.11~0.19 mg·L⁻¹、NH₄⁺-N 为 2.26~3.40 mg·L⁻¹、COD 为 27.00~30.00 mg·L⁻¹、TOC 为 9.01~11.10 mg·L⁻¹ 和浊度为 1.69~2.94 NTU。采用经过灭菌处理的取样设备取该厂过滤后出水, 将水样于 4 °C 下保存并尽快进行消毒实验。

1.2 实验方法

通过系列实验研究了不同消毒方式消毒后污水中大肠菌群的灭活效果、复活特性和 DBPs 生成的影响。每个实验均设 3 次重复。

1) UV 消毒实验。UV 消毒实验在自制的平行光束仪下进行。平行光束仪上部有 2 个功率为 20 W 的 UV 灯管, 开启 UV 灯 30 min 后, 用紫外辐照计检测紫外线强度。每次实验时将 300 mL 水样注入 500 mL 灭菌后的烧杯中, 放入灭菌后的转子, 将烧杯置于磁力搅拌器上均匀接受 UV 辐射, 通过调节紫外强度和照射时间确定紫外辐射剂量^[11]。

2) NaClO 消毒实验。将一定量的 NaClO 溶液投加到已盛装一定体积水样的 500 mL 灭菌烧杯中, 在磁力搅拌器的搅拌作用下接触反应 30 min, 用硫代硫酸钠终止反应, 取消毒反应前后的水样测定其中的大肠菌群类微生物的数量。

3) UV-NaClO 顺序消毒实验。将水样先经一定剂量的 UV 消毒后, 再向其中投加一定量的 NaClO 溶液, 在磁力搅拌器的搅动作用下消毒反应 30 min, 用硫代硫酸钠终止反应。

4) 光复活和暗修复实验。取一定剂量消毒后的水样, 分别在日光灯照射(光复活)或避光(暗修复)条件下于 25 °C 恒温搅拌放置一定时间, 期间定时取样, 测定细菌的菌落数。

1.3 分析检测方法

采用孔径为 0.45 μm 的滤膜对消毒前后的水样进行预处理, 之后采用滤膜法对大肠菌群进行测定。截留了菌体的滤膜分为 3 份, 1 份置于品红亚硫酸钠培养基上, 于 37 °C 下培养 24 h 后转至乳糖蛋白胨半固体培养基上, 于 37 °C 下培养 6~8 h, 测定总大肠菌群的数量; 1 份置于 M-FC 培养基上, 于 45 °C 下培养 24 h 后测定粪大肠菌群的数量; 1 份置于品红亚硫酸钠培养基上, 于 37 °C 下培养 24 h 后转至 MUG 培养基上, 于 37 °C 下继续培养 4 h 后, 计算大肠埃希氏菌 (*E.coli*) 的菌落数。采用顶空气相色谱法测定水中 DBPs 的浓度^[12]。

1.4 数据分析

采用对数灭活率来评价消毒后细菌的灭活效果, 灭活率根据式 (1) 进行计算。利用复活百分比来表征光复活和暗修复程度, 复活率百分比根据式 (2) 进行计算。

$$A = \lg\left(\frac{N_0}{N}\right) \quad (1)$$

$$B = \frac{N_p - N}{N_0 - N} \times 100\% \quad (2)$$

式中: A 为灭活率, %; B 为复活百分比, %; N_0 和 N 分别为消毒前和消毒后水样中的大肠菌群数量, $\text{CFU}\cdot\text{L}^{-1}$; N_p 为光复活或暗修复后水样中的大肠菌群数量, $\text{CFU}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 单独 UV 或 NaClO 消毒对大肠菌群的灭活

不同剂量下单独 UV 消毒或 NaClO 消毒对总大肠菌群、粪大肠菌群和大肠埃希氏菌 (*E.coli*) 的灭活情况如图 1 所示。消毒剂量对大肠菌群类微生物的灭活影响较大, 随着 UV 剂量或 NaClO 投加量的增加, 大肠菌群数量随之下降。当 UV 剂量仅为 $12 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, 大肠菌群类微生物的灭活率即可达到接近或超过 3 个对数级; 当 NaClO 投加量仅为 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 大肠菌群类微生物可达到 2 个对数级的灭活率。此后, 进一步增加消毒剂量, 微生物数量下降幅度趋缓, 如当 UV 剂量由 $12 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 增加到 $60 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, 总大肠菌群和粪大肠菌群的灭活率仅提高不足 1 个对数级, 当 NaClO 的投加量从 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 总大肠菌群的灭活率也仅增加了 1.22 个对数级。相较于其他的粪大肠菌, *E.coli* 更易被灭活, 当 UV 剂量达到 $60 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, 已检测不到 *E.coli*。完全灭活总大肠菌群或粪大肠菌群需要 $80 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ UV 或 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NaClO。

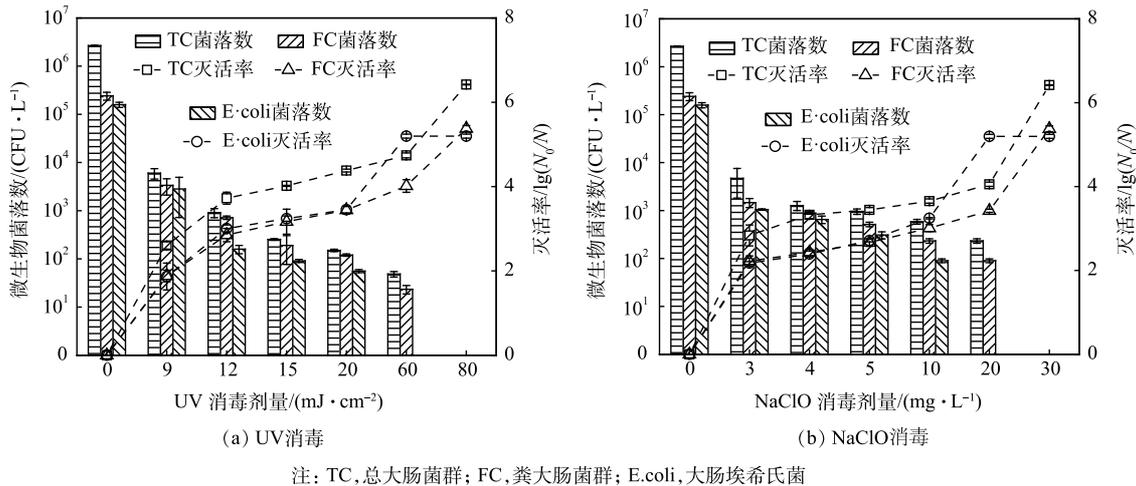


图 1 不同剂量 UV 消毒与 NaClO 消毒对大肠菌群数量的影响

Fig. 1 Effect of UV disinfection and NaClO disinfection dose on coliforms quantity

当 UV 消毒剂量达到 $12 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $20 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, 粪大肠菌群数量可分别满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 排放标准^[13](简称“一级 A 标准”)中“ $\leq 1000 \text{ CFU}\cdot\text{L}^{-1}$ ”以及《城市污水再生利用绿地灌溉水质》(GB/T 25499-2010)(简称“绿地灌溉标准”)中非限制性绿地的“ $\leq 200 \text{ CFU}\cdot\text{L}^{-1}$ ”的要求^[14]。当 UV 消毒剂量达到 $60 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, *E.coli* 可满足《城市污水再生利用城市杂用水水质》(GB/T 18920-2020)中“大肠埃希氏菌不得检出”的要求^[15](简称“杂用水标准”)^[16]。消毒后的水样要达到一级 A 标准、绿地灌溉标准以及杂用水标准, NaClO 投加量分别需达到 4、10 和 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2.2 UV-NaClO 顺序消毒对大肠菌群灭活的影响

为探究 UV-NaClO 顺序消毒应用于污水消毒的可行性, 在不同 UV 和 NaClO 剂量组合条件下分析了 UV-NaClO 顺序消毒对水样中大肠菌群的灭活效果, 结果如图 2 所示。UV-NaClO 顺序消毒更有利于大肠菌群的灭活, 顺序消毒的效果好于 UV 或 NaClO 单独消毒的效果。仅采用 UV 消毒, 当 UV 剂量为 $9 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, 粪大肠菌群的菌落数可由 $2.4 \times 10^5 \text{ CFU}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $3.4 \times 10^3 \text{ CFU}\cdot\text{L}^{-1}$; 仅采

用 NaClO 消毒, 当 NaClO 投加量为 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 消毒后粪大肠菌群的数量降为 $1.5 \times 10^3 \text{ CFU} \cdot \text{L}^{-1}$; 若采用 UV-NaClO 顺序消毒, UV 和 NaClO 的剂量分别为 $9 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 消毒后粪大肠菌群的数量可降至 $9.0 \times 10^2 \text{ CFU} \cdot \text{L}^{-1}$, 与单独 UV 或单独 NaClO 消毒相比, 粪大肠菌群的数量分别降低了 73.5% 和 40.0%。

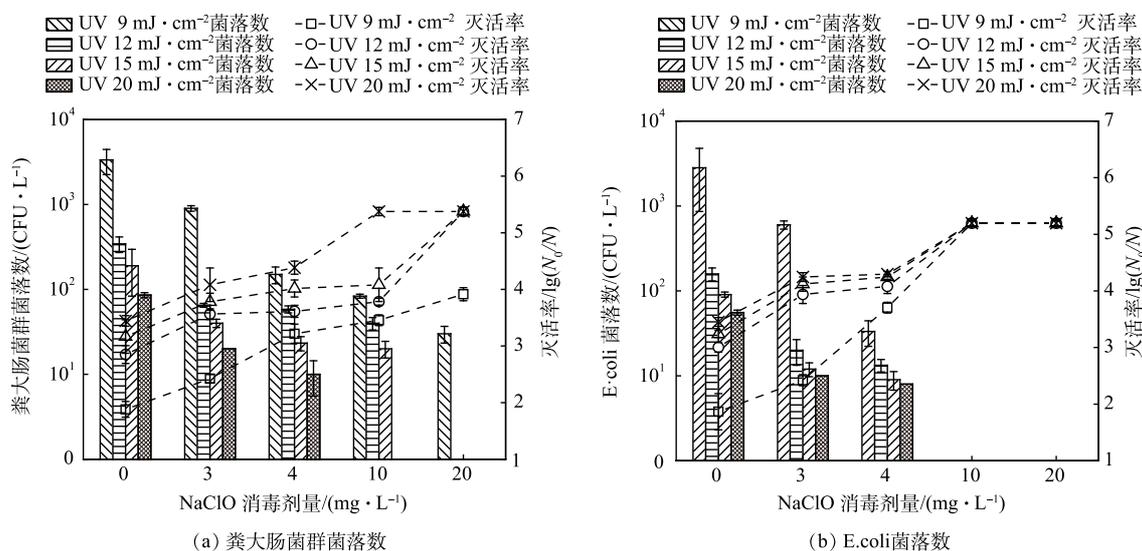


图 2 UV-NaClO 顺序消毒对大肠菌群灭活的影响

Fig. 2 Effects of UV-NaClO combined disinfection on inactivation of coliforms

表 1 对比了达到不同处理效果时不同消毒方式所需消毒剂的最低投加量。由对比结果可知, 采用 UV-NaClO 顺序消毒, 可以在相对较低的消毒剂投加量下就可达到单一消毒剂在较高剂量下所达到的消毒效果, 尤其是当需要达到的排放标准较高时, 采用 UV-NaClO 顺序消毒的优势更加明显。例如, 当出水仅需满足一级 A 标准, 即粪大肠菌群数量 $\leq 1000 \text{ CFU} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 采用 UV-NaClO 顺序消毒需要的 UV 及 NaClO 剂量分别为 $9 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 同单独 UV 或 NaClO 消毒在消毒剂投加量上相比未表现出较大优势; 若出水需满足杂用水标准规定的 *E. coli* 不得检出的要求, 单独 UV 或 NaClO 消毒需要的 UV 或 NaClO 剂量分别为 $60 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 或 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而采用 UV-NaClO 顺序消毒则仅需 $9 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ UV 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ NaClO。若达到完全灭活粪大肠菌群的目标, UV-NaClO 顺序消毒在投加量上的优势则更加明显。

UV-NaClO 顺序消毒相比单一消毒剂所具有的优势, 可能是由于微生物对不同消毒方式的耐受程度不同。有研究表明, 经 UV 消毒后磺胺类抗生素耐药菌的比例显著升高, 而低剂量的 NaClO 消毒则能有效降低此类细菌的比例^[17-18], 因而投加低剂量的 NaClO 即可达到或超过高剂量

表 1 不同污水排放标准下不同消毒方式所需的最小消毒剂量

Table 1 Minimum disinfection dosage required by different disinfection methods for different sewage discharge standards

出水标准	限值要求/ ($\text{CFU} \cdot \text{L}^{-1}$)	UV消毒/ ($\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$)	NaClO消毒/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	UV- NaClO顺序消毒 UV($\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$)/NaClO($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
一级A标准	$\text{FC} \leq 1000$	12	4	9/3
绿地灌溉标准	$\text{FC} \leq 200$	20	10	9/4
杂用水标准	<i>E. coli</i> 不得检出	60	20	9/10
完全灭活FC		80	30	20/10

UV 消毒所达到的效果。同样有一些细菌 (*Cryptosporidium*) 对氯消毒具有很强的耐受能力^[19], 对于这类细菌采用低剂量的 UV 辐射也可能达到较好的灭活效率。因而, UV-NaClO 顺序消毒中 UV 和 NaClO 具有协同效应, 可以灭活单一消毒剂所不能完全灭活的微生物, 且可以在 UV 和 NaClO 剂量均不高的组合方式下即可达到更优的消毒效果。

2.3 UV-NaClO 顺序消毒对微生物复活的抑制作用

在满足相同出水标准时, 经 UV-NaClO 顺序消毒后微生物的复活能力明显低于单独 UV 消毒 (图 3), 尤其是当 NaClO 的投加量较高时, 对微生物复活的抑制作用更为明显。在满足一级 A 排放

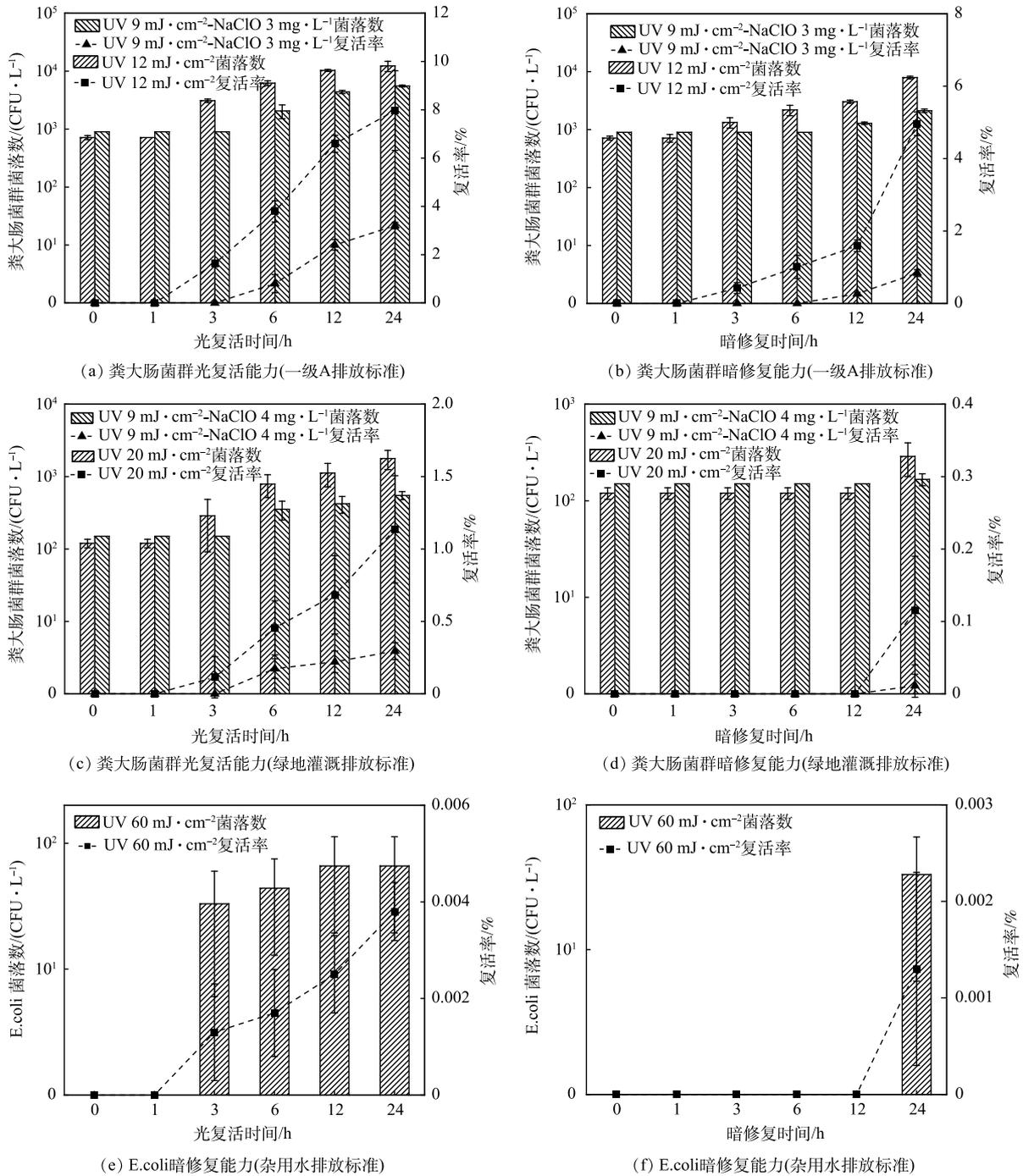


图 3 满足不同出水标准时 UV 和 UV-NaClO 顺序消毒后大肠菌群复活能力

Fig. 3 The reactivation ability of coliforms after UV and UV-NaClO disinfection

标准的消毒剂投加量下, 单独 UV($12 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$) 消毒后分别经 24 h 光复活和暗修复后, 粪大肠菌群的复活率为 7.97% 和 4.96%, 而经 UV-NaClO(UV 剂量 $9 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NaClO) 顺序消毒后粪大肠菌群复活率仅为 3.21% 和 0.84%, 较单独 UV 消毒分别减少了 4.76% 和 4.12%。当 UV 剂量不变, NaClO 投加量增加到 $4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, UV-NaClO 顺序消毒后在相同的复活时间内, 粪大肠菌群的复活率仅为 0.3%(光复活) 和 0.01%(暗修复), 虽然 NaClO 投加量仅增加了 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 但细菌复活率明显降低。

当 UV 剂量为 $60 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, 单独 UV 消毒可完全灭活 *E.coli*, 但在光照下经 3 h 复活后, *E.coli* 的数量即可增加为 $33 \text{ CFU}\cdot\text{L}^{-1}$; 经 24 h 的暗修复, *E.coli* 可增加至 $66 \text{ CFU}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 3(e))。采用 UV-NaClO 顺序消毒, 当 UV 剂量为 $9 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 NaClO 投加量 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 也可完全灭活 *E.coli*, 但是, 消毒后的水样无论是在光照下还是在暗处, 24 h 内均未出现细菌复活的现象。因而, 在 UV 消毒后, 继续投加少量的 NaClO 可以减小微生物复活的概率。UV-NaClO 顺序消毒之所以可以抑制微生物的复活主要是由于 NaClO 作为强氧化剂, 其对微生物的灭活作用是通过氧化细胞中的酶、阻止蛋白质合成这一途径实现的, 这种对细胞的破坏作用不具有可逆性, 因此, 被 NaClO 灭活的微生物不会出现复活的现象。

当处理后出水再生回用于绿地灌溉时, 仅采用 UV 消毒, 在光照条件下, 3 h 后再生水中的粪大肠菌群数即会超标, 采用 UV-NaClO 顺序消毒, 6 h 后粪大肠菌群数可能会超标; 当处理后出水再生回用于城市杂用时, 仅采用 UV 消毒, 在光照条件下, 3 h 后 *E.coli* 的数量超标, 而采用 UV-NaClO 顺序消毒, 24 h 后 *E.coli* 数量仍然可以满足标准要求。同光复活相比, 细菌暗修复的能力较弱, 如仅采用 UV 消毒满足绿地灌溉或城市杂用标准时, 经 24 h 暗修复后, 细菌数量才出现超标的现象, 采用 UV-NaClO 顺序消毒后的水样, 在暗处放置 24 h 后, 细菌数量均未出现超标的现象。因而, 考虑到再生水输配管网的长度以及再生水使用的非连续性特点, 采用 UV-NaClO 顺序消毒更有利于保证再生水的水质安全。同时在实际工程中, 再生水的输送及储存应尽量采用密闭式系统, 以降低消毒后细菌复活的可能性。

通过本研究可知, 单独 UV 消毒不能有效的防止大肠菌群从污水处理厂向环境中传播, 而采用 UV-NaClO 顺序消毒可在一定程度上抑制大肠菌群的二次滋生, 减少了消毒后水在输送, 储存及再生利用过程中潜在的生物风险。

2.4 UV-NaClO 顺序消毒对 DBPs 生成的影响

为考察 UV-NaClO 顺序消毒对 DBPs 生成的影响, 采用顶空气相色谱法分析了不同方式消毒后三氯甲烷、四氯化碳、二溴一氯甲烷和一溴二氯甲烷的生成量, 并计算了 DBPs 的总生成量, 结果如表 2 所示。在满足相同出水标准时, UV-NaClO 顺序消毒 DBPs 的生成量明显低于单独 NaClO 消毒。尤其是当需要达到的出水标准越高时优势越明显。满足一级 A 排放标准时, 采用 UV-NaClO 顺序消毒产生的总 DBPs 比单独 NaClO 消毒可减少 24.53%; 达到绿地灌溉标准时, 单独

表 2 NaClO 和 UV-NaClO 顺序消毒时 DBPs 生成量的比较

Table 2 Comparison of DBPs generation after NaClO and UV-NaClO disinfection

出水标准	NaClO 消毒/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	DBPs 生成量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	UV- NaClO 顺序消毒 UV($\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$)/NaClO($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	DBPs 生成量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
一级 A 标准	4	3.18 ± 2.14	9/3	2.4 ± 1.68
绿地灌溉标准	10	11.56 ± 2.03	9/4	5.79 ± 1.76
杂用水标准	20	52.27 ± 2.65	9/10	12.09 ± 2.23
完全灭活 FC	30	65.32 ± 2.87	20/10	14.47 ± 1.89

NaClO 消毒生成的总 DBPs 量为 $11.56 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, UV-NaClO 顺序消毒生成的总 DBPs 为 $5.79 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 比 NaClO 消毒 DBPs 生成量降低了 49.91%; 满足杂用水标准时, UV-NaClO 顺序消毒总 DBPs 的生成量比单独 NaClO 消毒可降低 76.87%; 在达到完全灭活粪大肠菌群的条件, DBPs 的减量可高达 77.85%。

DBPs 的生成量同氯的投加量密切相关, 随着氯投加量的增加, DBPs 的生成量显著增加^[20]。采用 UV-NaClO 顺序消毒之所以可以降低 DBPs 的生成量, 主要是由于在达到相同消毒效果时 UV-NaClO 顺序消毒所需的 NaClO 投加量低于单独 NaClO 消毒时的投加量, 而且, 当需要达到的消毒标准越高时, 所需 NaClO 投加量低的优势越明显, 如完全灭活粪大肠菌群时, 单独 NaClO 消毒需要的 NaClO 投加量为 $30 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而采用 UV-NaClO 顺序消毒则只需投加 $10 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaClO, 因而, 采用 UV-NaClO 顺序消毒可大幅降低 DBPs 的生成量。

大部分 DBPs 具有潜在的致癌、致畸和致突变毒性, 较高浓度 DBPs 排入水体或再生利用时会威胁生态系统安全, 并对人体健康具有潜在危害^[21], UV-NaClO 顺序消毒可避免大量的 DBPs 排入水体或进入再生水利用系统, 因而, 其在保护人体健康与生态环境等方面更具优势。

3 结论

1) UV 和 NaClO 对大肠菌群的灭活具有协同效应, 采用 UV-NaClO 顺序消毒, 在 UV 和 NaClO 投加量均不高的组合方式下即可达到单独 UV 或单独 NaClO 高剂量下的消毒效果, 且当需要达到的消毒标准越高时, UV-NaClO 顺序消毒的优势越明显。

2) 经 UV-NaClO 顺序消毒后, 大肠菌群的光复活和暗修复能力相比单独 UV 消毒有所下降, NaClO 投加量越高下降幅度越明显, 因而, 采用 UV-NaClO 顺序消毒可在一定程度上抑制大肠菌群的二次滋生。

3) 由于在达到相同消毒效果的前提下, UV-NaClO 顺序消毒可以有效降低 NaClO 的投加量, 因而, 采用 UV-NaClO 顺序消毒可以降低 DBPs 的生成量, 从而降低消毒对人体健康与生态环境的潜在危害。

参 考 文 献

- [1] 杨蓉, 李垒, 霍晓芹, 等. 水质标准中指示微生物的发展及现状[J]. *中国环境监测*, 2020, 36(4): 1-10.
- [2] 潘均悦. 粪大肠菌群检测方法探究[J]. *生物化工*, 2020, 6(4): 152-155.
- [3] LAPARA T M, BURCH T R, MCNAMARA P J, et al. Tertiary-treated municipal wastewater is a significant point source of antibiotic resistance genes into Duluth-Superior Harbor[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(22): 9543-9549.
- [4] BEN W W, WANG J, CAO R K, et al. Distribution of antibiotic resistance in the effluents of ten municipal wastewater treatment plants in China and the effect of treatment processes[J]. *Chemosphere*, 2017, 172: 392-398.
- [5] WANG H C, WANG J, LI S M, et al. Synergistic effect of UV/chlorine in bacterial inactivation, resistance gene removal, and gene conjugative transfer blocking[J]. *Water Research*, 2020, 185: 116290-116290.
- [6] 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, 123159: 226-239.
- [7] 蔡璇, 张云, 李然, 等. 饮用水紫外线消毒研究进展[J]. *中国公共卫生*, 2012, 28(4): 562-564.
- [8] GUO M T, HUANG J J, HU H Y, et al. Growth and repair potential of three species of bacteria in reclaimed wastewater after UV disinfection[J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2011, 24(4): 400-407.
- [9] 孔秀娟, 马军, 文刚, 等. 紫外-氯对细菌的协同消毒效果[J]. *水处理技术*, 2016, 42(1): 41-44.
- [10] 张天阳, 魏海娟, 姚杰, 等. 污水处理厂不同紫外/氯化组合工艺的消毒效能对比[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(17): 19-24.
- [11] BOLTON J R, LINDEN K G. Standardization of methods for fluence (UV Dose) determination in bench-scale UV experiments[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2003, 129(3): 209-215.
- [12] 国家环境保护总局. HJ 620-2011 水质挥发性卤代烃的测定顶空气相色谱法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [13] 国家环境保护总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准: GB 18918-2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

- [14] 国家质量检验检疫总局. 城市污水再生利用绿地灌溉水质: GB/T 25499-2010, [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [15] 国家质量检验检疫总局. 城市污水再生利用城市杂用水水质: GB/T 18920-2020, [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.
- [16] 李腾, 胡静, 宋海旺, 等. 污水厂二级出水中抗生素抗性细菌的紫外灭活与复活特性[J]. *环境工程*, 2022, 40(2): 14-19.
- [17] ZHANG Z G, LI B X, LI N, et al. Effects of UV disinfection on phenotypes and genotypes of antibiotic-resistant bacteria in secondary effluent from a municipal wastewater treatment plant[J]. *Water Research*, 2019, 157: 546-554.
- [18] PING Q, YAN T T, WANG L, et al. Insight into using a novel ultraviolet/peracetic acid combination disinfection process to simultaneously remove antibiotics and antibiotic resistance genes in wastewater: Mechanism and comparison with conventional processes[J]. *Water Research*, 2022, 210: 118019-118019.
- [19] WEI F Q, LU Y, SHI Q, et al. A dose optimization method of disinfection units and synergistic effects of combined disinfection in pilot tests[J]. *Water Research*, 2022, 211: 118037-118037.
- [20] 邵晓晖, 李轶, WANG C S, 等. 操作条件及水质对海水氯消毒过程中消毒副产物生成的影响[J]. *环境工程*, 2016, 34(3): 6-10.
- [21] CHOWDHURY S, MAZUMDER M A J, ALHOOSHANI K, et al. Reduction of DBPs in synthetic water by indoor techniques and its implications on exposure and health risk[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 691: 621-630.
- (责任编辑: 曲娜)

Inactivation of coliforms in wastewater by UV- NaClO disinfection

ZHOU Lin¹, LI Zihao¹, LI Peizhuo¹, YANG Qiang¹, GAO Aili¹, CHENG Lihua^{1,2,*}, BI Xuejun^{1,2}

1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China; 2. State and Local Engineering Center of Urban Sewage Treatment and Recycling, Qingdao 266033, China

*Corresponding author, E-mail: chenglihua666@163.com

Abstract Ultraviolet (UV) and sodium hypochlorite (NaClO) disinfection are widely used in wastewater treatment, but both disinfection methods have deficiencies. In order to achieve efficient disinfection while reducing the negative impact of disinfection, a comparative study was conducted to analyze the disinfectant amount required for combined UV-NaClO disinfection with the same disinfection effect as UV or NaClO and the effect of UV-NaClO disinfection on microbial reactivation and disinfection by-products (DBPs) formation. The results showed that at UV dosage of $9 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ and NaClO dosages of 3, 4 and $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, UV-NaClO disinfection was as effective as UV disinfection alone at UV dosages of 12, 20 or $60 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ and NaClO disinfection alone at NaClO dosages of 4, 10 or $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The higher the desired microbial inactivation efficiency, the more obvious the advantages of UV-NaClO disinfection. Compared to UV disinfection alone, UV-NaClO disinfection showed significantly lower rates of microbial photo-reactivation and dark repair. Achieving the same microbial inactivation effect as NaClO disinfection alone, UV-NaClO disinfection could effectively reduce the production of DBPs, for example, achieving complete inactivation of *E.coli*, the production of DBPs decreased by 76.87% using UV-NaClO disinfection compared with NaClO disinfection alone. This study can provide a theoretical basis for the selection of disinfection technology for wastewater discharge and recycling.

Keywords ultraviolet; sodium hypochlorite; disinfection; coliforms; reactivation; disinfection by-products