

陈家斌, 同济大学环境科学与工程学院教授, 博士生导师。国家优秀青年基金获得者, 入选上海市青年科技启明星计划。围绕污水深度处理与水质安全保障技术原理和方法展开系统研究, 在新污染物、病原微生物等污染控制方向取得多项创新性成果。作为负责人主持国家自然科学基金、国家重点研发计划课题、上海市科技计划项目等项目 10 余项。在《Nature Communications》《Environmental Science & Technology》《Water Research》等期刊发表 SCI 论文 100 余篇; 出版著作 2 部; 授权发明专利 20 项, 并获 2019 年上海市技术发明一等奖, 2020 年上海市科技进步一等奖。先后担任《能源环境保护》《Frontiers of Environmental Science & Engineering》等期刊青年编委。



移动扫码阅读

陈家斌, 姚广磊, 纪睿成, 等. 污水处理厂过氧乙酸消毒特性及应用进展[J]. 能源环境保护, 2023, 37(4): 38-45.

CHEN Jiabin, YAO Guanglei, JI Ruicheng, et al. Peracetic acid disinfection characteristics and application progress in wastewater treatment plants[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(4): 38-45.

污水处理厂过氧乙酸消毒特性及应用进展

陈家斌*, 姚广磊, 纪睿成, 张龙龙, 张亚雷, 周雪飞

(同济大学环境科学与工程学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 消毒是污水处理的必要环节, 氯是常用化学消毒剂, 但消毒过程会产生有害副产物, 对人类健康和生态环境造成威胁。过氧乙酸(PAA)是具有氧化性的有机过氧酸, 是替代氯的新型绿色消毒剂。本综述系统介绍了 PAA 消毒剂的结构特征、消毒特性、副产物生成特性以及生物毒性。随后介绍了 PAA 在污水处理过程中的消毒效果, 探讨了 PAA 和 UV 耦合工艺在污水消毒中的增效作用, 分析了 PAA 消毒过程中的综合影响因素。进一步总结了 PAA 在污水消毒领域的具体应用, 并介绍了北美、欧洲国家相关典型工程应用案例, 以及我国污水处理厂中试研究进展。最后, 对 PAA 在未来污水处理消毒领域的发展方向进行了展望, 提出了改进和优化 PAA 消毒技术的策略和方向, 以促进 PAA 绿色消毒技术在我国污水处理厂的推广应用。

关键词: 过氧乙酸; 消毒; 病原微生物; 污水处理

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2023)04-0038-08

Peracetic acid disinfection characteristics and application progress in wastewater treatment plants

CHEN Jiabin*, YAO Guanglei, JI Ruicheng, ZHANG Longlong, ZHANG Yalei, ZHOU Xuefei

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Disinfection is an essential process in wastewater treatment. Chlorine disinfection is a commonly used chemical disinfectant, but it produces harmful by-products that pose threats to human health and the ecological environment. Peracetic acid (PAA) is an oxidizing organic peracid and an emerging green disinfectant that can replace chlorine. This review systematically introduces the structural characteristics, disinfection properties, by-product formation characteristics, and biotoxicity of PAA disinfectants. The disinfection effect of PAA in wastewater treatment processes is also discussed, including the synergistic effect of PAA and UV coupling technology in wastewater disinfection, as well as the comprehensive influencing factors in the PAA disinfection process. Furthermore, specific applications of PAA in wastewater disinfection are summarized, including typical engineering

application cases in North America and European countries, along with research progress in pilot-scale studies conducted in sewage treatment plants in China. Finally, an outlook is provided on the future development direction of PAA in the field of wastewater treatment and disinfection. Strategies and directions for improving and optimizing PAA disinfection technology are proposed to promote the widespread application of PAA green disinfection technology in sewage treatment plants in China.

Keywords: Peracetic acid; Disinfection; Pathogenic microorganisms; Wastewater treatment

0 引言

消毒是保障饮用水和再生水安全的关键环节^[1]。目前,氯消毒和紫外(UV)消毒是广泛应用的消毒技术。氯消毒作为一种常用的污水消毒方法,在再生水的生物风险控制方面效果显著,能有效杀灭病原微生物^[2];然而,氯消毒的一个主要缺点是在消毒过程中会产生有害消毒副产物(DBPs),对人体健康和环境造成潜在风险,引起了人们广泛关注^[3]。相比之下,UV消毒技术作为一种物理消毒方法,具有操作简便、安全可靠等优点;UV可以通过破坏病原微生物的遗传物质来达到消毒效果^[4];然而,UV消毒无法有效阻止病原微生物再次繁殖,导致光复活现象发生^[5]。因此,如何控制有害消毒副产物的生成并防止病原微生物再生,已成为消毒过程中亟待解决的难题;迫切需要研发绿色高效的新型消毒技术,在高效杀菌的同时最大限度地减少或消除有害副产物的产生,从而确保水质安全。

过氧乙酸(PAA)作为一种备受关注的新型消毒剂,在消毒过程中产生的有害副产物较少,被国际水协认为是最具潜力的消毒剂之一^[6-7]。PAA具有氧化性,能够有效破坏细菌的细胞壁、细胞膜以及其他细胞结构,损伤病毒蛋白质外壳和核酸,从而实现高效的灭活作用。PAA消毒剂在医疗、卫生、工业等领域应用广泛;近年来,PAA也逐渐应用于水处理领域,在污水处理中发挥着重要作用。

本综述对PAA化学结构、消毒特性、有害DBPs产生特性、生物毒性进行了系统的介绍;阐述了PAA及其耦合工艺在污水处理过程中的消毒效果及其影响因素;介绍了国内外PAA污水消毒的相关典型工程应用案例;最后对PAA在未来污水处理消毒领域的发展方向进行了展望,为推动PAA消毒技术在我国的应用提供参考。

1 PAA 消毒剂的特性

1.1 化学结构特性

PAA分子结构如图1所示,从重叠构象到交替构象的能量差小,且在室温下自由旋转。在二面体III构象中,分子内氢键形成的PAA构象最稳定,羟基的氢(O—H)与羰基的氧(—C=O)旋转角接近,表明分子内氢键的弱酸性行为。PAA的弱酸性在氧化和消毒过程中具有重要作用,避免了后续调节pH的需求^[8]。此外,PAA具有氧化性(1.81 eV),能直接氧化部分有机物。PAA的最低空分子轨道能(-0.25 eV)低于H₂O₂(0.57 eV),且PAA的过氧键(O—O)不对称,其键能(159.1 kJ/mol)远低于H₂O₂(213.5 kJ/mol)。因此,PAA更容易发生断裂,产生羟基自由基(·OH)和过氧乙酰自由基(CH₃COOO·)等多种活性物质。·OH具有强氧化性,能引发蛋白质的氧化反应和核酸断裂,阻止微生物的生理过程和复制能力。CH₃COOO·则能与微生物细胞内的生物大分子结合,干扰其正常代谢活动,并破坏细胞结构。因此,PAA通过产生这些活性物质,显著增强其对病原微生物的消杀效果,确保消毒过程的高效性和可靠性。

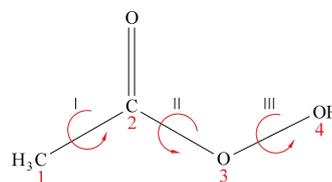


图1 过氧乙酸的结构

Fig. 1 Structure of peracetic acid

1.2 消毒特性

PAA能够氧化破坏生物大分子,导致病原微生物失去活性。PAA与蛋白质的还原性基团或双键发生反应,导致蛋白质的结构改变、酶活性丧失以及蛋白质聚集,从而阻断病原微生物的重要代谢途径和功能。此外,PAA能够破坏细胞膜的磷脂双分子层,使其丧失选择透过性功能。细胞膜的破坏会导致细胞内外物质的不平衡,干扰细胞内部的正常代谢和离子平衡,最终导致病原微生物

物死亡。PAA 还可以通过扩散作用进入病原微生物内部,进一步氧化破坏 DNA、RNA 等遗传物质,从而阻止其正常的生长和繁殖。PAA 对大多数病

原微生物具有优异的消毒效果(见表 1),尤其在对诺如病毒的灭活上,PAA 的效果优于传统消毒剂^[9],即使在低浓度下,PAA 仍有较好消毒性能。

表 1 PAA 对病原微生物的作用效果

Table 1 Effectiveness of PAA on pathogenic microorganisms

病毒种类	PAA 浓度/(mg · L ⁻¹)	作用时间	处理效果	参考文献
大肠杆菌	0.5~2.0	10~20 min	100%灭活	[10]
粪大肠菌	2.0~6.0	24.9 min	4.3-log 灭活	[11]
鱼虱属虫	0.6~0.9	48 h	39%~82%灭活	[12]
大肠杆菌	9.0	3 min	7-log 灭活	[13]
大肠杆菌	8.0	120 min	3.52-log 灭活	[14]
肠球菌	9.0	3.5 min	6-log 灭活	[15]
人诺如病毒	80.0	10 min	3.66-log 灭活	[16]
鼠诺如病毒	85.0	1 min	3-log 灭活	[17]
脊髓灰质炎病毒	1 800.0	7.5 min	6.33-log 灭活	[18]
仙台病毒	2 000.0	5 min	>4-log 灭活	[19]

1.3 消毒副产物生成特性

含氯消毒剂已在污水处理中得到了广泛应用,但其消毒过程中会产生大量有害 DBPs。这些 DBPs 主要包括三卤甲烷、三卤乙烷、卤酸、卤醇和酚等物质,具有潜在的毒性和致癌风险。相比之下,PAA 消毒后的产物是羧酸类物质,不具有致癌风险,但是羧酸类物质会导致出水中有机碳浓度升高^[20]。此外,PAA 消毒可能会产生一些低分子量的醛和酮,此类化合物主要是氨基酸、酚类和其他芳香物质的氧化产物^[21]。其中醛类化合物也可以进一步被 PAA 氧化为相应的羧酸,最终可能完全氧化为二氧化碳^[22]。PAA 与卤素离子反应会形成次生氧化剂(HOCl,HOBr),二级速率常数分别为 $(1.47 \pm 0.58) \times 10^{-5}$ 、 $(0.24 \pm 0.02) \text{ M}^{-1} \cdot \text{ s}^{-1}$ 。然而,PAA 组分中的 H₂O₂ 可以将次氯酸或次溴酸还原为氯或溴,导致次卤酸的稳态浓度较低,溴代(氯代)DBPs 的形成受到限制^[23]。因此,这些特性使得 PAA 在污水处理中成为一种相对安全的消毒剂。

1.4 生物毒性

长时间接触含氯消毒剂可能会对人体造成一定的伤害,而使用 PAA 消毒剂相对安全。PAA 消毒剂的使用可以减少人体长期接触有害化学物质的风险,为工作环境和公共场所消毒提供更安全的选择。PAA 消毒(浓度为 2.0~4.1 mg/L,接触时间为 26~37 min)对废水的遗传毒性未产生明显影响^[24]。同时,经过 PAA 消毒的地表水中鲤鱼未观察到 DNA 损伤^[25]。在对大鼠的急性和亚急性毒性进行研究时,发现 PAA 未引发异常现

象^[26]。此外,PAA 的脂水分配系数(log K_{ow})为-0.52,而 H₂O₂为-1.57,均远低于 3,表明 PAA 不具有生物积累潜力,对水生态系统中捕食者的次生风险低^[27]。在对较为敏感的淡水循环水养殖系统进行研究时,发现 PAA 对大西洋鲑鱼的生长没有明显影响,表明 PAA 对水生环境的潜在影响相对较小^[28]。在适当的使用浓度下,PAA 消毒剂不会对水生生物的生长和生态系统的稳定性产生不利影响。

可见,相比于含氯消毒剂,PAA 消毒剂具有生物风险和化学风险低等特点。这些优越的特征使得 PAA 消毒剂在安全性方面表现出明显的优势,不仅能够有效杀灭病原微生物,还能够减少有害副产物的生成,降低潜在的环境和健康风险。

2 污水处理 PAA 消毒

根据 PAA 污水消毒相关关键词的共现网络图(图 2),PAA 在污水消毒及其相关领域得到了广泛研究。PAA 作为一种常用的污水消毒剂,其研究领域涵盖了很多方面,研究者们对 PAA 在水处理中的应用进行了深入研究,以验证其在污水消毒方面的潜力。共现网络图的分析表明,与 PAA 相关的关键词之间的连接,这进一步证明了 PAA 在这一领域的研究价值。

PAA 在污水消毒中与其他消毒剂相比效率较高,只需较少的剂量就能够达到理想的消毒效果。相比之下,其他消毒剂可能会产生更多的有害物质,对环境 and 人体健康造成潜在风险。另外,PAA

进一步证实 UV/PAA 处理相较于单独使用 UV 或 PAA 处理,在细胞结构的破坏程度上表现出更好的效果。UV/PAA 显示出显著的微生物再生抑制作用,并且能够有效杀灭细菌、病毒和真菌。尽管 UV/PAA 消毒效果显著,但仍需要深入研究其作用机制,并进一步优化处理条件,以提高其在实际污水处理中的效率和可靠性。

2.3 PAA 消毒的影响因素

PAA 对污水的消毒效率受到消毒剂浓度、水质条件等多种因素的影响。PAA 浓度越高,细菌、病毒和其他微生物的杀灭效果越好。在污水处理过程中,通常选取适当的 PAA 剂量确保消毒剂在污水中的浓度达到有效杀菌水平。PAA 溶液中存在的 H_2O_2 组分,可能会提升消毒效果。 H_2O_2 与 PAA 活化后生成活性氧自由基,增加了消毒剂的活性,进而提高了消毒效率。此外,污水的 pH 也对 PAA 消毒效率起重要影响。一般而言,在中性到弱碱性 pH 下,PAA 的消毒效果较好。在这个 pH 范围内,PAA 能更稳定地存在并释放活性氧自由基,实现有效的杀菌作用。此外,水质的成分也会影响 PAA 消毒的效率。例如,污水中存在的某些水质组分(溶解性盐和重金属等),可能与 PAA 发生反应或阻碍活性氧自由基的生成,从而降低 PAA 的消毒效果。同时,水体中的有机物和氨氮等也可能对 PAA 消毒产生影响。部分有机物可能与 PAA 发生化学反应,降低其有效浓度,进而降低消毒效果。氨氮则可能与 PAA 互相竞争,减少 PAA 对微生物的作用。因此,在处理有机物或氨氮浓度较高的水体时,需要采取适当的预处理措施,如氧化、吸附或氯化,以减少这些化学物质对 PAA 消毒效果的干扰。

PAA 消毒效果也可能受水温、搅拌等其他因素的影响。水温对 PAA 消毒效果有一定影响,通常情况下,较高的水温可以提高 PAA 的反应速率和溶解度,从而增加其消毒效果。然而,过高的水温可能导致 PAA 分解速度加快,从而降低消毒效率。因此,在选择合适的水温时需要综合考虑 PAA 的稳定性和消毒效果之间的平衡,以确保取得最佳的杀菌效果。同时,PAA 消毒效果与 PAA 和微生物的接触时间也有关。较长的接触时间可以增加 PAA 与微生物的接触机会,从而提高杀菌效果。在实际应用中,适当延长接触时间可以增强 PAA 消毒的效果,确保充分杀灭水体中的微生物。此外,水体的搅拌也会影响 PAA 消毒效果。

良好的搅拌可以使 PAA 均匀分布于水体中,增加与微生物的接触机会,进而提高消毒效果。因此,在消毒过程中,适当的搅拌有助于提高 PAA 消毒效率。

可见,PAA 消毒的效果受到多种因素的综合影响。通过合理调控这些因素可以提高 PAA 消毒的效率。此外,还有其他一些因素也可能对 PAA 消毒效果产生影响,例如水体中的悬浮物和沉淀物可能与 PAA 发生反应或阻碍其有效分布,从而降低消毒效果。因此对水中固体颗粒进行预处理或过滤,可以减少对 PAA 消毒效果的干扰。综合考虑这些因素,并根据具体情况进行调整,可以获得最佳的 PAA 消毒效果。实际应用中,监测消毒后水样中微生物的浓度,评估消毒剂的残留浓度,以及考察水体中潜在的微生物再生和复活情况,可以更好地判断 PAA 消毒的实际效果,及时发现潜在的问题,从而保障水处理过程中消毒效果。

3 PAA 污水消毒技术的工程应用

3.1 北美洲污水处理厂

在北美洲的部分污水处理厂,PAA 消毒技术已被推广应用(表 2),以取代传统的氯消毒技术。造成该转变的推动因素有几个方面,首先,PAA 消毒技术具有广谱杀菌作用,可有效控制病原微生物;对一些常见的对氯耐受的致病微生物也具有高效杀灭效果。第二,PAA 消毒过程中产生的有害副产物相对较少,这是替代传统氯消毒的另一个重要因素。PAA 消毒技术在北美地区已经广泛获得行业认可,并制定了相关的法规和标准,确保了 PAA 消毒技术的操作和应用规范性,并保证其在消毒过程中的安全性和有效性。这些法规和标准不仅规范了 PAA 消毒技术在污水消毒处理的使用条件和剂量控制,还对监测和评估其消毒效果提供了指导。第三,政府机构在 PAA 消毒技术的推广中发挥了重要的角色;通过支持和推动相关研究和开发,制定相应的政策和指导文件,以确保 PAA 消毒技术合理应用。

3.2 欧洲污水处理厂

近年来,PAA 消毒在欧洲引起了广泛的关注和认可。在欧洲地区,PAA 被认为是一种相对安全的消毒剂,并已纳入多个行业标准和指南中。欧洲对于消毒剂的使用法规和标准十分严格,而 PAA 在这些法规和标准中得到了明确的规定和指导。PAA 消毒技术在欧洲得到了相关机构的支持,其安全性和有效性得到了广泛认可。欧洲的

行业标准和指南不仅规定了 PAA 消毒剂的使用方法和剂量,还对其在不同领域中的应用提供了详细的指导。由表 2 可知,在欧洲的污水处理厂中,PAA 被广泛用于污水消毒,以确保再生水的安全性。近年来,意大利等国家的一些大型污水处理厂工程应用实践表明,PAA 在消杀污水中的细

菌和噬菌体方面展现出优异的性能。当 PAA 浓度为 1.5 mg/L 时,可使污水处理后的出水达到意大利的排放标准^[31]。此外,相较于 NaClO 等其他消毒剂,PAA 表现出更为出色的消毒性能^[32]。工程实践结果表明,PAA 作为一种有效的污水消毒剂,能够满足严格的排放标准,并有效去除病原微生物。

表 2 国外不同污水处理厂 PAA 消毒效果

Table 2 Effect of PAA disinfection in different foreign wastewater treatment plants

区域	污水处理厂	处理能力/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	PAA 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	接触时间/min	最佳消毒效果	参考文献
北美洲	Montreal 城市污水处理厂	2.46×10^6	0.6~1.6	120	10 000 CFU/100 mL	[33]
	Miami 污水处理厂	9.36×10^4	6.0	15	4.5-log 灭活	[34]
	Langley 污水处理厂	2.58×10^3	2.5	45	2.7-log 灭活	[35]
欧洲	Peschiera Borromeo 污水处理厂	1.26×10^5	5.0	49	3.5-log 灭活	[7]
	West Bari 市政污水处理厂	2.40×10^3	10.0	30	1 000 CFU/100 mL	[36]
	Kuopio 市政污水处理厂	2.06×10^4	2.0~7.0	27	3-log 灭活	[37]
	Oulu 污水处理厂	1.78×10^4	12.0	60	30 PFU/100 mL	[38]
	意大利北部某污水处理厂	2.98×10^3	30.0	1.61	38 CFU/100 mL	[39]
	Bologna 污水处理厂	1.10×10^5	1.2/1.5	20	0.52-log 灭活	[40]

3.3 中国污水处理厂

尽管我国没有 PAA 污水消毒的工程案例,但已有对城镇生活污水 PAA 消毒处理中试研究的报道。已有研究分析了不同投加浓度和反应时间下,PAA 对污水消毒效率、出水水质和消毒副产物的影响。当 PAA 浓度为 4 mg/L、接触时间为 10 min 时,可实现对污水中粪大肠杆菌 99.9% 灭活率。同时,PAA 消毒过程对出水水质(COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TOC)会造成一定程度的干扰,但出水水质仍达到 GB18918—2002 一级 A 排放标准。此外,与传统的 NaClO 消毒过程相比,PAA 不会产生三卤甲烷 (THMs) 和卤乙酸 (HAAs) 等消毒副产物^[41]。以上研究为我国城镇污水 PAA 消毒处理提供了可靠实证数据,为 PAA 消毒技术在我国推广应用奠定了基础。

PAA 在我国污水处理中推广应用还面临着一些挑战,如 PAA 消毒剂价格相对较高,使得其在实际应用中存在一定的限制。此外,PAA 处理系统的投资成本也相对较高,对于规模相对较小的污水处理厂而言,PAA 具备更好的经济竞争力。尽管 PAA 在我国的实际应用面临一些困难,但通过合理的技术改进、经济优化和政策支持等手段,PAA 消毒技术将在我国有着广泛的推广前景。

4 结语与展望

PAA 作为一种新型消毒剂,由于其优异的氧化和消毒性能,在取代传统氯消毒剂方面被广泛研究。目前 PAA 污水消毒在国外已开展大规模应用,在我国已经开展了初步探索;随着研究的推进,PAA 在我国污水处理领域的应用前景将更加广阔,并将持续推动污水处理行业的可持续发展。基于 PAA 在污水消毒中的应用,提出了 PAA 消毒的未来发展方向:

(1) 提高 PAA 稳定性: 在污水处理中,PAA 的稳定性对其消毒效果至关重要。未来的研究可以集中于改进 PAA 的稳定性,延长其在水中的存在时间,从而提高其消毒效果和效率。

(2) 降低 PAA 成本: 寻找更经济、可持续的生产方法,以降低 PAA 的生产成本,有助于促进 PAA 的广泛应用,并使其在污水处理领域更具竞争力。

(3) 耦合其他技术: 将 PAA 与其他消毒技术相结合,如紫外辐照、臭氧氧化等,以进一步提高污水消毒效率。这种综合应用可以实现多重杀菌机制,提高应对不同类型污染物和微生物污染。

(4) 推进自动化和智能化: 应用自动化和智能化技术,开发 PAA 消毒系统的智能控制和监测装置。这些装置可以实时监测 PAA 浓度、pH 和

消毒效果,并进行精确的控制,提高消毒过程的稳定性和效率。

(5)拓宽 PAA 应用的领域:除了污水处理,未来还可以探索 PAA 在其他领域的应用,如 PAA 在医疗废物处理、农业灌溉水的消毒、环境清洁等方面的潜在应用。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] JI R, CHEN J, LIU T, et al. Critical review of perovskites-based advanced oxidation processes for wastewater treatment: Operational parameters, reaction mechanisms, and prospects [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2022, 33(2): 643-652.
- [3] FURST K E, COYTE R M, WOOD M, et al. Disinfection by-products in Rajasthan, India: Are trihalomethanes a sufficient Indicator of disinfection byproduct exposure in low-income countries? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(20): 12007-12017.
- [4] LUO X, ZHANG B, LU Y, et al. Advances in application of ultraviolet irradiation for biofilm control in water and wastewater infrastructure[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 421: 126682.
- [5] OGUMA K, IZAKI K, KATAYAMA H. Effects of salinity on photoreactivation of *Escherichia coli* after UV disinfection [J]. *Journal of Water and Health*, 2013, 11(3): 457-464.
- [6] SCHMITZ B W, WANG H, SCHWAB K, et al. Selected mechanistic aspects of viral inactivation by peracetic acid[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(23): 16120-16129.
- [7] FOGLIA A, ANDREOLA C, CIPOLLETTA G, et al. Comparative life cycle environmental and economic assessment of anaerobic membrane bioreactor and disinfection for reclaimed water reuse in agricultural irrigation: A case study in Italy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 293: 126201.
- [8] DA SILVA W P, CARLOS T D, CAVALLINI G S, et al. Peracetic acid: Structural elucidation for applications in wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2020, 168: 115143.
- [9] DUNKIN N, WENG S, COULTER C G, et al. Reduction of human norovirus GI, GII, and surrogates by peracetic acid and monochloramine in municipal secondary wastewater effluent[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(20): 11918-11927.
- [10] DROSOU C, COZ A, XEKOUKOULOTAKIS N P, et al. Peracetic acid-enhanced photocatalytic and sonophotocatalytic inactivation of *E. coli* in aqueous suspensions [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2010, 85(8): 1049-1053.
- [11] HASSABALLAH A H, NYITRAI J, HART C H, et al. A pilot-scale study of peracetic acid and ultraviolet light for wastewater disinfection[J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2019, 5(8): 1453-1463.
- [12] MEINELT T, MATZKE S, STÜBER A, et al. Toxicity of peracetic acid (PAA) to tomites of *Ichthyophthirius multifiliis* [J]. *Diseases of Aquatic Organisms*, 2009, 86(1): 51-56.
- [13] SUN P, ZHANG T, MEJIA TICKNER B, et al. Rapid disinfection by peracetic acid combined with UV irradiation [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, 5(6): 400-404.
- [14] FORMISANO F, FIORENTINO A, RIZZO L, et al. Inactivation of *Escherichia coli* and *Enterococci* in urban wastewater by sunlight/PAA and sunlight/H₂O₂ processes [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, 104: 178-184.
- [15] ZHANG T, WANG T, MEJIA TICKNER B, et al. Inactivation of bacteria by peracetic acid combined with ultraviolet irradiation: Mechanism and optimization [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(15): 9652-9661.
- [16] ANFRUNS Estrada E, BOTTARO M, PINTÓ RM, et al. Effectiveness of consumers washing with sanitizers to reduce human norovirus on mixed salad [J]. *Foods*, 2019, 8(12): 637.
- [17] GIRARD M, MATTISON K, FLISS I, et al. Efficacy of oxidizing disinfectants at inactivating murine norovirus on ready-to-eat foods [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2016, 219: 7-11.
- [18] 于海玲, 李海帅, 丁士翔, 等. 一种过氧乙酸与过氧化氢混合消毒液对细菌芽孢与病毒杀灭效果比较 [J]. *中国消毒学杂志*, 2018, 35(11): 813-815.
YU Hailing, LI Haishuai, DING Shixiang, et al. Comparison of the killing effect of a disinfectant mixture of peracetic acid and hydrogen peroxide on bacterial bud-hold and virus [J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2018, 35(11): 813-815.
- [19] 孙凤萍, 胡建华, 高骏, 等. 四种消毒剂对仙台病毒的灭活效果 [J]. *中国消毒学杂志*, 2007, 100(6): 524-526.
SUN Fengping, HU Jianhua, GAO Jun, et al. Inactivation effect of four disinfectants on Sendai virus [J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2007, 100(6): 524-526.
- [20] MONARCA S, RICHARDSO S D, FERETTI D, et al. Mutagenicity and disinfection by-products in surface drinking water disinfected with peracetic acid [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2002, 21(2): 309-318.
- [21] NURIZZO C, ANTONELLI M, PROFIZER M, et al. By-products in surface and reclaimed water disinfected with various agents [J]. *Desalination*, 2005, 176(1): 241-253.
- [22] DELL'ERBA A, FALSANISI D, LIBERTI L, et al. Disinfection by-products formation during wastewater disinfection with peracetic acid [J]. *Desalination*, 2007, 215(1): 177-186.
- [23] SHAH A D, LIU Z Q, SALHI E, et al. Peracetic acid oxidation of saline waters in the absence and presence of H₂O₂: Secondary oxidant and disinfection byproduct formation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(3): 1698-1705.
- [24] CREBELLI R, CONTI L, MONARCA S, et al. Genotoxicity of

- the disinfection by-products resulting from peracetic acid- or hypochlorite- disinfected sewage wastewater [J]. *Water Research*, 2005, 39(6): 1105-1113.
- [25] BUSCHINI A, MARTINO A, GUSTAVINO B, et al. Comet assay and micronucleus test in circulating erythrocytes of *Cyprinus carpio* specimens exposed in situ to lake waters treated with disinfectants for potabilization[J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2004, 557(2): 119-129.
- [26] 杜宏举, 马玲, 郑珊, 等. 过氧乙酸消毒剂的毒性试验[J]. *中国比较医学杂志*, 2014, 24(10): 12-17.
DU Hongju, MA Ling, ZHENG Shan, et al. Toxicity test of peracetic acid disinfectant [J]. *Chinese Journal of Comparative Medicine*, 2014, 24(10): 12-17.
- [27] CHHETRI R K, BAUN A, ANDERSEN H R. Acute toxicity and risk evaluation of the CSO disinfectants performic acid, peracetic acid, chlorine dioxide and their by-products hydrogen peroxide and chlorite[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 677: 1-8.
- [28] CARLETTO D, FURTADO F, ZHANG J, et al. Mode of application of peracetic acid-based disinfectants has a minimal influence on the antioxidant defences and mucosal structures of atlantic salmon (*Salmo salar*) Parr[J]. *Frontiers in Physiology*, 2022, 13: 900593.
- [29] KOIVUNEN J, HEINONEN TANSKI H. Peracetic acid (PAA) disinfection of primary, secondary and tertiary treated municipal wastewaters[J]. *Water Research*, 2005, 39(18): 4445-4453.
- [30] XU X, ZUO J, WAN Q, et al. Effective inactivation of fungal spores by the combined UV/PAA: Synergistic effect and mechanisms [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 430: 128515.
- [31] BERTANZA G, STEIMBERG N, PEDRAZZANI R, et al. Wastewater toxicity removal: Integrated chemical and effect-based monitoring of full-scale conventional activated sludge and membrane bioreactor plants[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851: 158071.
- [32] COLLIVIGNARELLI MC, ABBÀ A, ALLOISIO G, et al. Disinfection in wastewater treatment plants: Evaluation of effectiveness and acute toxicity effects[J]. *Sustainability*, 2017, 9(10): 1704.
- [33] WAGNER M, BRUMELIS D, GEHR R. Disinfection of wastewater by hydrogen peroxide or peracetic acid: Development of procedures for measurement of residual disinfectant and application to a physicochemically treated municipal effluent[J]. *Water Environment Research*, 2002, 74(1): 33-50.
- [34] GARG Achal, NARASIMMAN LM, HOGG Jacob, et al. Wastewater disinfection with peracetic acid[J]. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2016(13): 1798-1808.
- [35] NGUYEN L GRAFFE A CANDY T. In peracetic acid as a method of effluent wastewater disinfection in Langley, BC, WEFTEC 2014 [R]. New Orleans: Water Environment Federation, 2014.
- [36] LIBERTI L, LOPEZ A, NOTARNICOLA M, et al. Comparison of advanced disinfecting methods for municipal wastewater reuse in agriculture[J]. *Water Science and Technology*, 2000, 42(1-2): 215-220.
- [37] KOIVUNEN J, HEINONEN TANSKI H. Peracetic acid (PAA) disinfection of primary, secondary and tertiary treated municipal wastewaters[J]. *Water Research*, 2005, 39(18): 4445-4453.
- [38] LUUKKONEN T, TEERINIEMI J, PROKKOLA H, et al. Chemical aspects of peracetic acid based wastewater disinfection [J]. *Water SA*, 2014, 40(1): 73-80.
- [39] COLLIVIGNARELLI M C, ABBÀ A, ALLOISIO G, et al. Disinfection in wastewater treatment plants: Evaluation of effectiveness and acute toxicity effects[J]. *Sustainability*, 2017, 9(10): 1704.
- [40] ZANETTI F, DE LUCA G, SACCHETTI R, et al. Disinfection efficiency of peracetic acid (PAA): Inactivation of coliphages and bacterial indicators in a municipal wastewater plant[J]. *Environmental technology*, 2007, 28(11): 1265-1271.
- [41] 徐垚, 陈家斌, 刘统才, 等. 过氧乙酸污水消毒的中试研究[J]. *工业水处理*, 2022, 42(10): 71-76.
XU Yao, CHEN Jiabin, LIU Tongcai, et al. Pilot study of peracetic acid effluent disinfection [J]. *Industrial Water Treatment*, 2022, 42(10): 71-76.