

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2025. 03. 006

UV₂₂₂/H₂O₂预氧化强化PAC混凝除藻效能及机理

冯树兴¹, 孙明亮², 罗从伟¹, 王金晓¹, 孙宇¹, 许瑞颀¹,
武玮¹, 王洪香¹, 秦玢¹

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院 资源与环境创新研究院, 山东 济南 250101;

2. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250101)

摘要: 对比研究了UV₂₂₂/H₂O₂、UV₂₅₄/H₂O₂预氧化体系强化混凝除藻的效能。结果表明,在H₂O₂投量为0.3 mmol/L、聚合氯化铝(PAC)投加量为0.8 mg/L、UV辐射剂量为1 300 mJ/cm²、UV₂₂₂/UV₂₅₄辐照时间为30 min/15 min的条件下,UV₂₂₂/H₂O₂、UV₂₅₄/H₂O₂预氧化强化混凝系统对藻细胞的去除率分别高达80%和87.5%,相较PAC单独处理分别提高了55%和62.5%;沉降后胞外有机物中具有芳香结构的蛋白质和可溶性微生物代谢产物显著减少。机理研究表明,UV₂₂₂/H₂O₂、UV₂₅₄/H₂O₂预氧化会产生大量的羟基自由基,氧化藻细胞表面的有机物,使Zeta电位升高,从而提高混凝除藻效能。此外,倒置荧光及扫描电镜分析结果显示,UV₂₅₄/H₂O₂预氧化相较UV₂₂₂/H₂O₂预氧化对藻细胞的破坏性更强,UV₂₂₂/H₂O₂预氧化是一种更温和的强化混凝除藻方式,且无二次污染。

关键词: UV₂₂₂; 过氧化氢; 聚合氯化铝; 混凝; 藻类

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)03-0035-08

UV₂₂₂/H₂O₂ Pre-oxidation Enhanced PAC Coagulation for Algae Removal: Performance and Mechanism

FENG Shu-xing¹, SUN Ming-liang², LUO Cong-wei¹, WANG Jin-xiao¹, SUN Yu¹,
XU Rui-di¹, WU Wei¹, WANG Hong-xiang¹, QIN Bin¹

(1. Resources and Environment Innovation Institute, School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co. Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: The performance of UV₂₂₂/H₂O₂ and UV₂₅₄/H₂O₂ pre-oxidation systems on enhanced coagulation for algae removal were compared. Under the conditions of H₂O₂ dosage of 0.3 mmol/L, polyaluminum chloride (PAC) dosage of 0.8 mg/L, UV irradiation dose of 1 300 mJ/cm², and UV₂₂₂/UV₂₅₄ irradiation time of 30 min/15 min, the removal efficiencies of algal cells by the UV₂₂₂/H₂O₂ and UV₂₅₄/H₂O₂ pre-oxidation enhanced coagulation systems were 80% and 87.5%, respectively. These values represented improvements of 55% and 62.5% over the removal efficiency achieved with PAC alone. Following the completion of the sedimentation process, there was a significant reduction in aromatic proteins and soluble

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(52270200); 山东省高等学校“青创科技计划”项目(2023KJ125); 山东省引进顶尖人才“一事一议”项目(0031504); 济南市市校融合发展战略工程项目(JNSX2021048)

通信作者: 罗从伟 E-mail: luocongwei2009@163.com

microbial products within the extracellular organic matter. The mechanism study revealed that the pre-oxidation processes using UV_{222}/H_2O_2 and UV_{254}/H_2O_2 generated a significant amount of hydroxyl radicals. These radicals oxidized organic matters on the surface of algal cells, leading to an increase in Zeta potential, thereby enhancing the efficiency of coagulation for algae removal. Furthermore, the results from inverted fluorescence and scanning electron microscopy analysis demonstrated that UV_{254}/H_2O_2 pre-oxidation exhibited greater destruction towards algal cells compared to UV_{222}/H_2O_2 pre-oxidation. The latter method was found to be a gentler approach for enhanced coagulation for algae removal, effectively preventing secondary pollution.

Key words: UV_{222} ; H_2O_2 ; polyaluminum chloride (PAC); coagulation; algae

近年来,因水体富营养化而导致的藻类细胞大量繁殖产生了一系列饮用水处理问题^[1-2],而由蓝藻引发的水华现象已经成为供水水质安全、公共健康和水生态系统的最大威胁之一,对生态环境造成了严重的影响^[3]。在水华发生期间,铜绿微囊藻会穿过滤池进入供水管网,造成饮用水色度、浊度及嗅味物质超标,对人体健康和饮用水安全造成潜在的威胁^[4]。混凝沉淀是饮用水处理中主要的除藻工艺单元,三氯化铝($AlCl_3$)和聚合氯化铝(PAC)等铝盐通常被用作混凝剂^[5]。但由于含藻水均匀、稳定且藻细胞表面带负电荷等,使得传统的混凝工艺无法有效去除藻细胞,因此为了达到高效除藻目的,需向水体中投加大量混凝剂,容易造成水体中絮凝剂含量过高而导致二次污染^[6]。

预氧化是一种常规、高效且对环境影响较小的强化混凝除藻方式^[7]。传统的预氧化方法,例如臭氧、高锰酸钾、高铁酸盐等通过改变藻细胞表面的Zeta电位、破坏藻细胞表面有机物及灭活藻细胞等方式来强化混凝,但这会因氧化剂投量高、接触反应时间长等导致藻细胞破裂和胞内有机物的释放^[8-10]。在新冠疫情暴发期间, UV_{222} 已作为一种新兴的紫外技术用于杀菌消毒,对人体皮肤和眼睛没有危害^[11-13];且 UV_{222} 紫外灯是一种氯化氪分子($KrCl^*$)灯,不含汞,在水处理应用中没有汞释放的潜在危险^[14-16]。但目前有关 UV_{222} 紫外灯在除藻方面的应用还未见报道。鉴于此,笔者探讨了 UV_{222}/H_2O_2 体系强化混凝除藻的效能,并传统 UV_{254}/H_2O_2 体系进行对比,通过扫描电镜和倒置荧光分析藻细胞的活性,对 UV_{222}/H_2O_2 强化混凝除藻机理进行研究,以为这种新的耦合工艺在水厂除藻中的应用提供参考。

1 材料与方 法

1.1 实验水样

实验用铜绿微囊藻藻种购买自中国科学院淡水藻种库(FACHB-905),在无菌BG-11培养基中培养。铜绿微囊藻的培养条件如下:25℃恒温,光照度为5 000 lx、光照时间为12 h/d。采用稳定期(培养至少35 d)的藻细胞,用超纯水将藻细胞稀释至 1.0×10^6 cells/mL,初始pH为 8.5 ± 0.2 ,以模拟天然水体水华暴发时藻细胞的实际密度。

1.2 实验方法

实验分为预氧化和混凝沉淀两部分,实验装置如图1所示。在室温下,采用全波长紫外辐射计测得实验用222和254 nm紫外灯的平均光强分别为2.2和1.1 mW/cm²,为保证二者在实验过程中的辐射剂量相等(均为1 300 mJ/cm²),需控制 UV_{254} 辐照时间为 UV_{222} 辐照时间的2倍。预氧化实验开始前,先将紫外灯预热30 min,以保证光强稳定输出。该实验分为6组:A组(只进行PAC混凝)、B组(H_2O_2 预氧化后进行PAC混凝)、C1组(UV_{222} 光照15 min,关闭紫外灯继续反应15 min后进行PAC混凝)、C2组(UV_{254} 光照30 min后进行PAC混凝)、D1组(UV_{222}/H_2O_2 预氧化15 min,关闭紫外灯继续反应15 min后进行PAC混凝)、D2组(UV_{254}/H_2O_2 预氧化30 min后进行PAC混凝)。

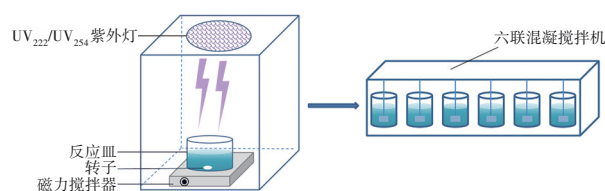


图1 实验装置

Fig.1 Schematics of experimental device

首先在1 000 mL水样中投加0.3 mmol/L的H₂O₂,然后开始计时进行预氧化实验(D1、D2组投加H₂O₂后直接放入灯箱进行),所有预氧化实验的溶液放置在磁力搅拌器上以200 r/min的转速均匀混合。预氧化结束后,取150 mL预氧化后水样加入过量硫代硫酸钠终止反应进行检测分析。将剩余水样放入混凝搅拌机后加入0.8 mg/L的PAC,250 r/min快速搅拌3 min、100 r/min中速搅拌5 min、50 r/min慢速搅拌15 min,静置20 min,取液面下2 cm处水样加入过量硫代硫酸钠终止反应,测定Zeta电位、OD₆₈₅等相关指标。

1.3 分析项目与方法

铜绿微囊藻浓度采用分光光度法测定,铜绿微囊藻的密度与藻细胞溶液在685 nm处的吸光度呈正相关,故采用实验前后的OD₆₈₅吸光度计算铜绿微囊藻细胞的去除率。

采用总有机碳分析仪测定水样的溶解性有机碳(DOC)浓度,检测前先用0.45 μm滤膜过滤;采用激光粒度仪对藻液粒度分布进行分析;采用哈希便携式浊度仪测定水样的浊度;由于含藻水中的部分有机物如蛋白质类和腐殖质类物质具有荧光特性,因此利用日立F-7000型荧光分光光度计对水样的荧光有机物变化进行测定分析;Zeta电位可以分析铜绿微囊藻的带电性,因此可以间接反映藻细胞的凝聚性,Zeta电位利用粒径分布和Zeta电位测定仪进行测定分析。

利用倒置荧光显微镜对藻液的荧光强度进行检测,首先取10 mL含藻水在避光处自适应10 min,随后置于倒置荧光显微镜下,选取标准绿色荧光激发荧光模块进行观察。另外,采用扫描电子显微镜分别对藻细胞和藻细胞絮体进行观察,以表征藻细胞及其絮体形态。

2 结果与讨论

2.1 对藻细胞的去除效果

不同预氧化方式强化混凝对藻细胞的去除效果如图2(a)所示。含藻原水在685 nm处的吸光度为0.04,单独预氧化对藻细胞的去除效果不显著,单独投加0.8 mg/L的PAC进行混凝对藻细胞的去除率也仅为25%。投加0.3 mmol/L H₂O₂后再投加PAC进行混凝,对藻细胞的去除率为45%;UV₂₂₂和UV₂₅₄分别辐照15和30 min后再进行混凝,对藻细胞

的去除率分别为37.5%和52.5%,与单独混凝相比,采用这3种预处理方式使得藻细胞去除率分别提高了20%、12.5%和27.5%,这表明单独H₂O₂和单独光照预处理对铜绿微囊藻细胞表面结构影响有限,所以强化混凝效果不显著。UV₂₂₂和UV₂₅₄耦合H₂O₂对铜绿微囊藻进行预氧化处理,然后再投加PAC进行混凝,对藻细胞的去除率高达80%和87.5%,相较于单独PAC混凝,对藻细胞的去除率提高了55%和62.5%,表明UV₂₂₂和UV₂₅₄耦合H₂O₂预氧化都可显著提高混凝除藻效能。

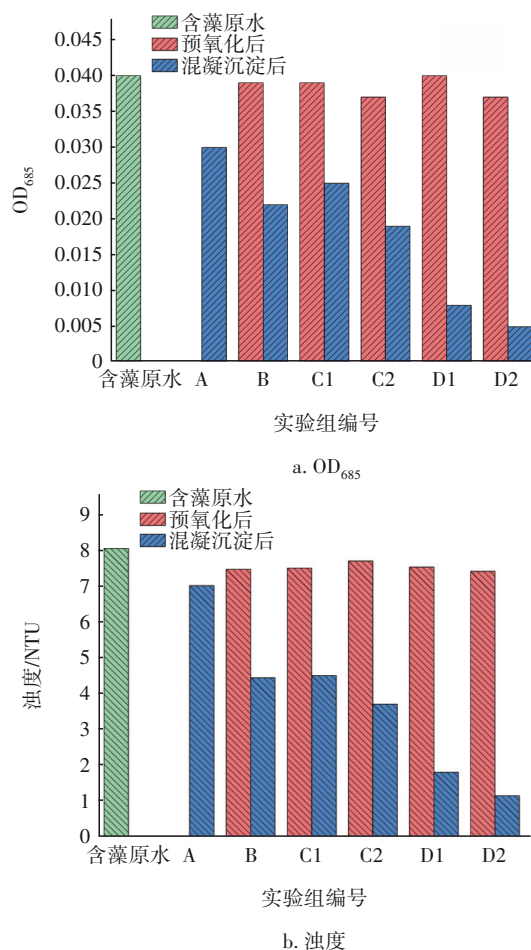


图2 不同预氧化方式强化混凝去除藻细胞和浊度的效果

Fig.2 Removal of algal cells and turbidity by different pre-oxidation methods enhanced coagulation

浊度的去除效果与藻细胞相似,如图2(b)所示,含藻原水的浊度为8.07 NTU,单独投加0.8 mg/L的PAC后浊度下降到7.03 NTU,去除率仅为12.89%。预氧化后水样的浊度略有下降,其中UV₂₅₄耦合H₂O₂预氧化对浊度的去除效果最佳,预氧化后浊度下降到7.43 NTU。采用不同方式预处理

后投加相同剂量的PAC进行混凝,对浊度的去除效果明显提高,B、C1、C2、D1、D2组的浊度去除率分别为44.73%、43.99%、53.90%、77.45%和85.63%,UV₂₂₂和UV₂₅₄耦合H₂O₂预处理再进行混凝对浊度的去除效果最佳。

2.2 藻细胞粒径变化

各预处理方式强化混凝对藻细胞团聚的影响如图3所示。藻细胞在未处理水样中分散均匀,粒径基本分布在1.76~6.41 μm之间,平均粒径为3.33 μm,符合铜绿微囊藻细胞的粒径。单独投加PAC后,形成了微小的藻细胞絮体,絮体粒径主要分布在0.61~53.37 μm之间,平均粒径为9.67 μm。经H₂O₂预氧化再进行混凝,藻细胞絮体的平均粒径提高到72.17 μm。仅UV₂₅₄和UV₂₂₂预氧化再进行混凝,藻细胞絮体的平均粒径变为91.37和70.97 μm。所以,单独H₂O₂和单独UV辐照预处理都会破坏藻细胞表面的电负性有机物,导致藻细胞壁表面发生变化,使得藻细胞的混凝效果得到强化,进而增大了藻细胞混凝后所形成絮体的平均粒径。为进一步强化混凝除藻,将UV与H₂O₂耦合(D1和D2组)对藻细胞进行预氧化处理,混凝后可形成致密且粒径较大的絮体,其粒径主要分布在1.56~351.2和1.97~351.2 μm,藻细胞絮体的平均粒径也提高到114.3和125.1 μm。综上,UV₂₅₄和UV₂₂₂耦合H₂O₂预氧化处理可以显著促进藻细胞形成更大的絮体,使得混凝效果得到明显增强。

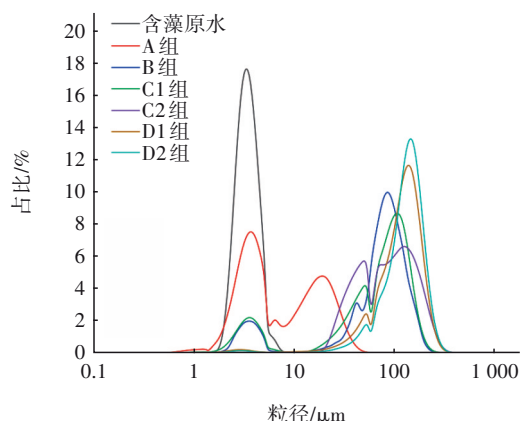


图3 不同预氧化方式强化混凝对含藻水粒径的影响

Fig.3 Effect of different pre-oxidation methods enhanced coagulation on particle size of algae-containing water

2.3 对DOC的去除效果

不同预氧化方式强化混凝对DOC的去除效果

如图4所示。可以看出,各预处理方式在强化混凝去除铜绿微囊藻的同时,对DOC也有很好的强化去除效果。含藻原水的DOC浓度为1.147 mg/L;经预处理后,水样的DOC浓度均有所下降,去除率在5.41%~18.61%之间;单独混凝处理后DOC浓度降为0.742 mg/L,去除率为35.33%。当经过预氧化处理再投加PAC混凝后,DOC浓度可进一步降低,B、C1、C2、D1、D2组对DOC的去除率分别为42.86%、40.25%、41.81%、47.52%和50.53%。与单一混凝工艺相比,预氧化耦合混凝对水中DOC有更好的去除效果,且相较于单独H₂O₂和单独UV辐照预处理,UV₂₂₂/H₂O₂和UV₂₅₄/H₂O₂体系在预氧化阶段和混凝阶段对DOC的去除效果均明显更强,主要是由于UV₂₂₂和UV₂₅₄可催化H₂O₂快速产生·OH,·OH可以氧化破坏有机物的结构^[17],加快后续混凝阶段对有机物的吸附去除。

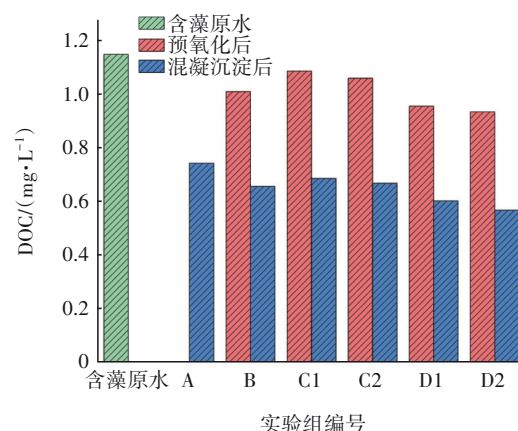


图4 不同预氧化方式强化混凝对DOC的去除效果

Fig.4 Removal effect of DOC by different pre-oxidation methods enhanced coagulation

2.4 对含藻水荧光特性的影响

藻类有机物主要由藻类光合作用生成^[18],包括胞内有机物(IOM)和胞外有机物(EOM),其中EOM是藻类生长代谢释放到水环境中的有机物。为了全面了解各预处理方式强化混凝对含藻水中EOM的去除情况,对水样进行了三维荧光光谱(EEM)分析,结果如图5所示。参考Chen等^[19]的方法将光谱分为5个区域,如图5(a)所示,区域I, $\lambda_{\text{ex}}/\lambda_{\text{em}}=200\sim 250/280\sim 330$ nm,表征具有芳香结构的蛋白质类物质I(代表物质为酪氨酸);区域II, $\lambda_{\text{ex}}/\lambda_{\text{em}}=200\sim 250/330\sim 380$ nm,表征具有芳香结构的蛋白质类物质II(代表物质为色氨酸);区域III, $\lambda_{\text{ex}}/\lambda_{\text{em}}=200\sim$

250/380~500 nm,表征富里酸类物质;区域Ⅳ, $\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}=250\sim450/280\sim380$ nm,表征溶解性微生物代谢产物;区域Ⅴ, $\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}=250\sim450/380\sim500$ nm,表征腐殖酸类物质。

由图5可知,在含藻原水中检测到4个明显的特征峰。经不同方式预处理后,区域Ⅰ和区域Ⅱ表征的芳香结构蛋白质都得到了有效去除,而对于区域Ⅳ表征的溶解性微生物代谢产物,仅UV₂₂₂/H₂O₂预处理体系对其去除效果较明显,主要是因为该区域表征的代谢产物为大分子蛋白质,Taylor等^[20]研究发现,UV₂₂₂对蛋白质的降解速率为UV₂₅₄的数倍,所以UV₂₂₂/H₂O₂体系对该区域物质的去除效果相对较好。对区域Ⅴ进行分析发现,经H₂O₂、UV₂₅₄和UV₂₅₄/H₂O₂预处理后,该区域表征的腐殖酸类物质有所增加,主要是因为预处理导致部分藻细胞发生破裂,释放出少部分有机物且去除能力有限,而UV₂₂₂和UV₂₂₂/H₂O₂体系对该区域物质具有一定的去除能力,Gao等^[21]研究发现,较短波长的紫外光对腐殖酸类物质的降解速率更快,这主要归因于较短波长紫外光对腐殖酸类物质的摩尔吸光系数更大,所以在相同的预氧化时间内,UV₂₂₂较UV₂₅₄对腐殖酸的降解效果更好。由图5(g)~(l)可知,不同预处理方式对混凝去除藻类有机物有不同程度的强化效果,强化作用呈现为:UV₂₂₂/H₂O₂>H₂O₂>UV₂₂₂>UV₂₅₄/H₂O₂>UV₂₅₄,这与图4中对有机物的去除效果有一定差别,可能是因为EEM只能识别一些带荧光信号的有机物,一些非荧光的藻类有机物如多糖不能被EEM识别,由此导致二者处理结果有所差别。

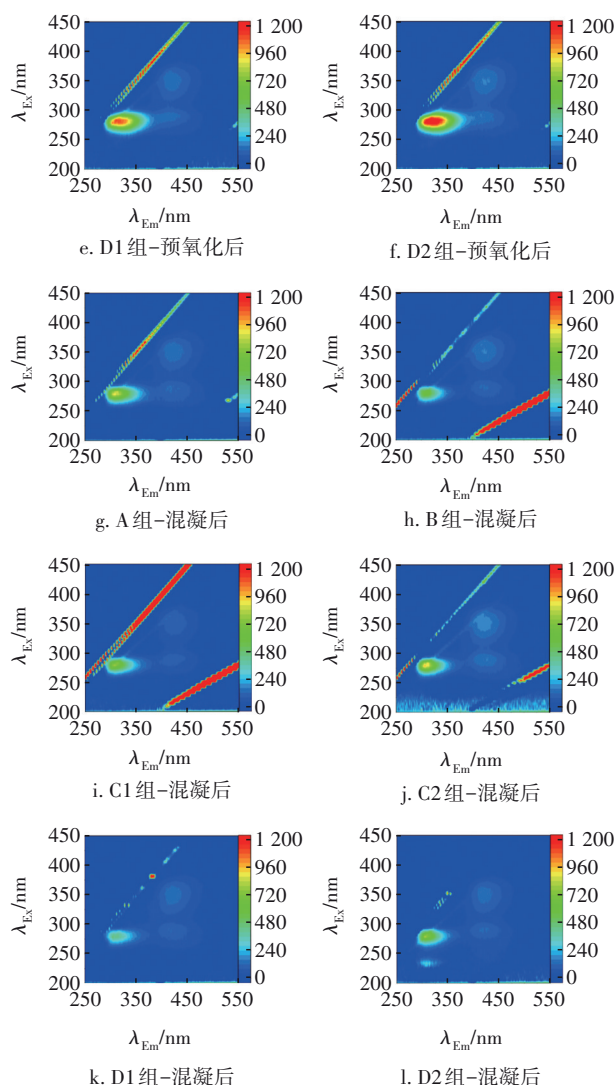
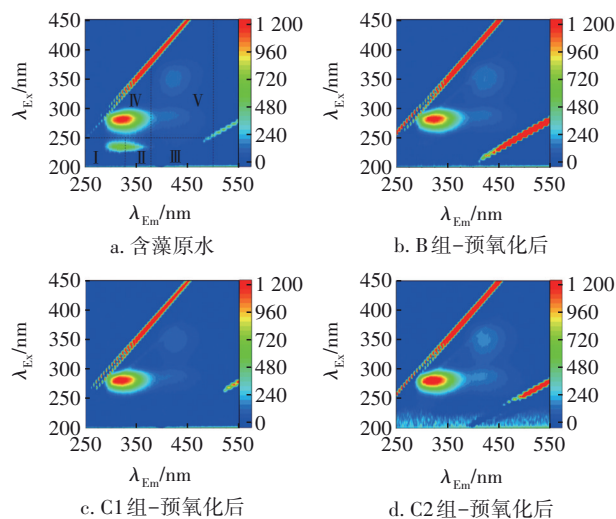


图5 不同预氧化方式强化混凝对EOM的去除效果

Fig.5 Removal effects of EOM by different pre-oxidation methods enhanced coagulation

2.5 对藻细胞活性的影响

为进一步探究预氧化强化混凝后藻细胞的完整性及形态的变化,对混凝后的藻细胞絮体进行倒置荧光和扫描电镜分析,结果如图6和图7所示。单独PAC混凝处理后的藻细胞呈现出较为饱满的球形;经H₂O₂预氧化强化混凝处理后,藻细胞基本变化不大,且倒置荧光处理显示荧光成分呈现出很强的红色自身荧光强度;经UV₂₅₄与UV₂₂₂辐照后再混凝,藻细胞表面有轻微的皱缩,且UV₂₅₄组皱缩相对严重一些,同时二者的红色自身荧光强度有所减弱,但藻细胞活性仍然保持良好。UV₂₂₂和UV₂₅₄耦合H₂O₂预氧化后再混凝,两组均保持较好的红色自身荧光强度,且团聚情况较其他处理组要好,扫描

电镜显示,经 UV_{254}/H_2O_2 处理后部分藻细胞出现破裂,经 UV_{222}/H_2O_2 处理后藻细胞也有一部分发生皱缩,但大部分藻细胞还维持较好的活性,所以 UV_{222} 耦合 H_2O_2 是一种温和且高效的强化混凝方式。

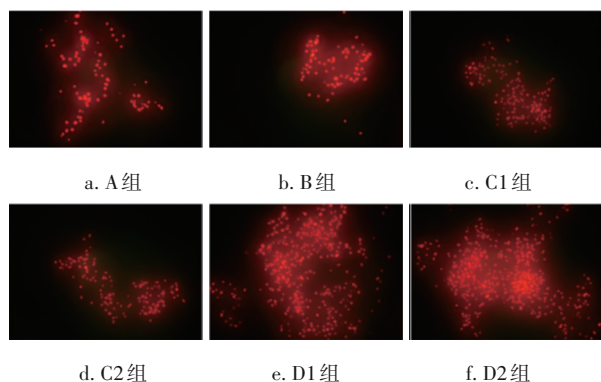


图6 不同预氧化方式强化混凝后藻细胞中叶绿素a自发荧光情况

Fig.6 Autofluorescence of chlorophyll-a in algal cells after different pre-oxidation methods enhanced coagulation

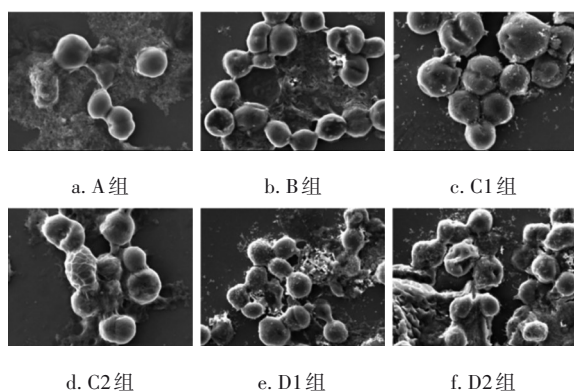


图7 不同预氧化方式强化混凝后藻细胞的SEM图像

Fig.7 SEM images of algal cells after different pre-oxidation methods enhanced coagulation

2.6 UV_{222}/H_2O_2 预氧化强化混凝除藻的机理

Zeta 电位反映了铜绿微囊藻细胞表面的带电性,其绝对值越大表示藻细胞之间的静电斥力越大,对混凝沉淀就越不利,藻细胞表面带负电的原因之一是其上附着的有机物含带负电的羧基等官能团^[22]。为了研究各预氧化方式强化混凝除藻的机理,考察了各预氧化方式强化混凝后 Zeta 电位的变化情况,结果如图 8 所示。含藻原水中藻细胞表面的 Zeta 电位为 -46.9 mV, B、C1、C2、D1、D2 组经预氧化后藻细胞表面的 Zeta 电位分别变为 -44.4 、 -43.4 、 -39.2 、 -33.9 、 -32.1 mV,即单独 H_2O_2 和单独 UV 对 Zeta 电位略有影响,而将二者耦合对藻细胞

进行预氧化处理,可使藻细胞表面 Zeta 电位显著升高。该结果表明,UV 可以催化 H_2O_2 产生大量的 $\cdot OH$,进而使得藻细胞表面带负电的有机物得到充分氧化,最终导致藻细胞表面的 Zeta 电位显著提高。单独投加 PAC 混凝,Zeta 电位可升高到 -27.3 mV,经各预氧化方式处理后再混凝,B、C1、C2、D1、D2 组藻细胞表面 Zeta 电位分别变为 -25.8 、 -25.5 、 -22.4 、 -12.3 、 -9.92 mV,Zeta 电位绝对值显著降低会导致静电斥力减弱, UV_{222} 和 UV_{254} 耦合 H_2O_2 预氧化后再混凝对含藻水都具有较好的处理效果,其中, UV_{254} 耦合 H_2O_2 预氧化体系中含藻水的 Zeta 电位升高更多、除藻效果更好。但是 Blatchley 等^[12]研究发现, UV_{222} 体系对细胞的穿透能力比 UV_{254} 体系要弱,所以对于含藻水体,相比 UV_{254}/H_2O_2 工艺, UV_{222}/H_2O_2 工艺避免了因过度氧化造成藻细胞破裂而导致的水质二次污染,同时两者几乎可以达到相同的有机物去除效果。而之前被广泛关注的 UV_{185} 等低波长紫外灯,由于其在使用过程中会产生一定量的臭氧,而臭氧会显著破坏藻细胞结构,造成藻毒素等大量释放,因此不适合用于含藻水体的处理^[23]。所以综合而言, UV_{222}/H_2O_2 体系在含藻水体处理方面具有广阔的应用前景。

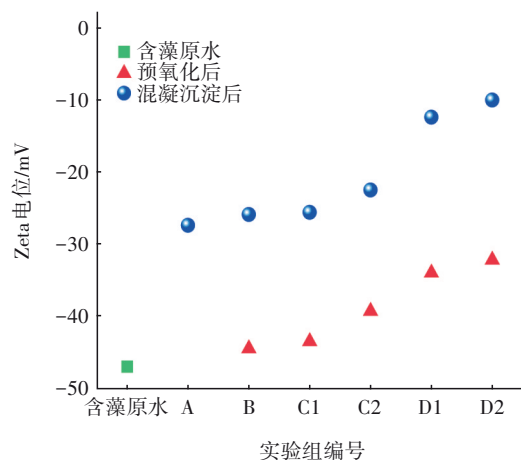


图8 不同预氧化方式及混凝后 Zeta 电位的变化情况

Fig.8 Changes in Zeta potential after different pre-oxidation and coagulation

2.7 UV_{222}/H_2O_2 预氧化强化混凝的工况优化

为了探究 UV_{222}/H_2O_2 预氧化强化混凝除藻的最优工况,控制 PAC 投加量为 0.8 mg/L,设置 H_2O_2 投加量分别为 0.1 、 0.3 、 0.5 mmol/L, UV_{222} 辐照时间分别为 5 、 10 、 15 min,通过测定处理后水样的 OD_{685} 和

DOC浓度,确定最佳H₂O₂投加量和UV₂₂₂辐照时间。结果发现,随着UV₂₂₂辐照时间和H₂O₂投加量的增加,OD₆₈₅和DOC的去除率整体呈增加趋势,但在UV₂₂₂辐照时间为15 min条件下,当H₂O₂投加量由0.3 mmol/L增至0.5 mmol/L时,OD₆₈₅和DOC的去除率增加不明显。综合考虑处理效果和经济成本,确定最佳UV₂₂₂辐照时间为15 min、H₂O₂投加量为0.3 mmol/L。

3 结论

① UV/H₂O₂预氧化体系可显著提高混凝工艺对含藻水中藻细胞的去除效果,在PAC投加量为0.8 mg/L、H₂O₂投加量为0.3 mmol/L的条件下,UV₂₂₂/H₂O₂和UV₂₅₄/H₂O₂预氧化强化混凝系统对藻细胞的去除率分别为80%和87.5%,对浊度的去除率分别为77.45%和85.63%。在去除藻细胞和浊度方面,UV₂₅₄/H₂O₂体系略优于UV₂₂₂/H₂O₂体系。

② UV₂₂₂/H₂O₂和UV₂₅₄/H₂O₂预氧化体系均对混凝去除DOC具有较好的强化效果,DOC去除率可提高到50%左右;但对于具有荧光特性的有机物,UV₂₂₂/H₂O₂预氧化体系的强化去除效果更优。

③ UV/H₂O₂预氧化和PAC混凝作用均对藻细胞表面有不同程度的影响,使得Zeta电位上升,藻细胞更加团聚,进而有利于通过混凝沉淀作用去除。通过三维荧光光谱和藻细胞活性分析发现,相对于UV₂₅₄/H₂O₂体系,UV₂₂₂/H₂O₂体系对藻细胞的破坏性更小,UV₂₂₂/H₂O₂预氧化是一种安全、高效且温和的强化混凝除藻方式。

参考文献:

- [1] 郭长友. 紫外/过硫酸盐预氧化强化混凝同步除藻和三氯酚[J]. 中国给水排水, 2023, 39(1): 45-48.
WU Changyou. UV/persulfate pre-oxidation enhanced coagulation for simultaneous removal of algae and trichlorophenol[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(1): 45-48(in Chinese).
- [2] 王永磊,王兴林,李亚男,等. 两亲性壳聚糖制备优化及其气浮除藻研究[J]. 中国环境科学, 2022, 42(8): 3704-3712.
WANG Yonglei, WANG Xinglin, LI Yanan, et al. Preparation optimization of amphiphilic chitosan and removal of algae by air flotation [J]. China Environmental Science, 2022, 42(8): 3704-3712 (in Chinese).
- [3] JIA P L, ZHOU Y P, ZHANG X F, et al. Cyanobacterium removal and control of algal organic matter (AOM) release by UV/H₂O₂ pre-oxidation enhanced Fe(II) coagulation [J]. Water Research, 2018, 131: 122-130.
- [4] XIE P C, MA J, FANG J Y, et al. Comparison of permanganate preoxidation and preozonation on algae containing water: cell integrity, characteristics, and chlorinated disinfection byproduct formation [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(24): 14051-14061.
- [5] DAI R H, XIONG Y M, MA Y X, et al. Algae removal performance of UV-radiation-enhanced coagulation for two representative algal species[J]. Science of the Total Environment, 2020, 745: 141013.
- [6] JANCULA D, MARSALEK B. Critical review of actually available chemical compounds for prevention and management of cyanobacterial blooms [J]. Chemosphere, 2011, 85(9): 1415-1422.
- [7] CHENG X X, LIAN J C, LIU B, et al. Integrated ferrate and calcium sulfite to treat algae-laden water for controlling ultrafiltration membrane fouling: high-efficiency oxidation and simultaneous cell integrity maintaining [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 461: 141880.
- [8] CHEN J J, YEH H H, TSENG I C. Effect of ozone and permanganate on algae coagulation removal—pilot and bench scale tests [J]. Chemosphere, 2009, 74(6): 840-846.
- [9] MA J, LIU W. Effectiveness and mechanism of potassium ferrate(VI) preoxidation for algae removal by coagulation [J]. Water Research, 2002, 36(4): 871-878.
- [10] CHEN J J, YEH H H. The mechanisms of potassium permanganate on algae removal [J]. Water Research, 2005, 39(18): 4420-4428.
- [11] ZHANG H H, LAI A. Evaluation of single-pass disinfection performance of far-UVC light on airborne microorganisms in duct flows [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(24): 17849-17857.
- [12] BLATCHLEY E R, BRENNER D J, CLAUS H, et al. Far UV-C radiation: an emerging tool for pandemic control [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2023, 53(6): 733-753.
- [13] LI T, ZHANG Y Z, GAN J M, et al. Superiority of UV₂₂₂ radiation by in situ aquatic electrode KrCl excimer

- in disinfecting waterborne pathogens: mechanism and efficacy [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 452: 131292.
- [14] ZHAO J, SHANG C, YIN R. A high-radical-yield advanced oxidation process coupling far-UVC radiation with chlorinated cyanurates for micropollutant degradation in water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(47): 18867–18876.
- [15] ZHAO J, PAYNE E M, LIU B Y, *et al.* Making waves: opportunities and challenges of applying far-UVC radiation in controlling micropollutants in water [J]. *Water Research*, 2023, 241: 120169.
- [16] WANG Y Y, MA B, HE C, *et al.* Nitrate protects microorganisms and promotes formation of toxic nitrogenous byproducts during water disinfection by far-UVC radiation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(24): 9064–9074.
- [17] LI Z, CHEN J L, WANG C M, *et al.* Study on the removal and degradation mechanism of microcystin-LR by the UV/Fenton system [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 892: 164665.
- [18] REN B X, WEITZEL K A, DUAN X D, *et al.* A comprehensive review on algae removal and control by coagulation-based processes: mechanism, material, and application[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 293: 121106.
- [19] CHEN W, WESTERHOFF P, LEENHEER J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(24): 5701–5710.
- [20] TAYLOR W, CAMILLERI E, CRAFT D L, *et al.* DNA damage kills bacterial spores and cells exposed to 222-nanometer UV radiation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2020, 86(8): e03039.
- [21] GAO Z C, LIN Y L, XU B, *et al.* Effect of UV wavelength on humic acid degradation and disinfection by-product formation during the UV/chlorine process [J]. *Water Research*, 2019, 154: 199–209.
- [22] HERZBERG M, KANG S, ELIMELECH M. Role of extracellular polymeric substances (EPS) in biofouling of reverse osmosis membranes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(12): 4393–4398.
- [23] LIU B, QU F S, CHEN W, *et al.* *Microcystis aeruginosa*-laden water treatment using enhanced coagulation by persulfate/Fe(II), ozone and permanganate: comparison of the simultaneous and successive oxidant dosing strategy [J]. *Water Research*, 2017, 125: 72–80.

作者简介:冯树兴(1999–),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为饮用水处理理论与技术。

E-mail:617564458@qq.com

收稿日期:2023-12-25

修回日期:2024-04-22

(编辑:刘贵春)

扎实推进水源地规范化建设和备用水源地
建设,保障好城乡饮用水安全