

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.17.011

给水厂颗粒直链藻污染应急集成技术研究

王 渊¹, 邓俊杰¹, 梁晓燕¹, 谭剑荣¹, 聂嘉健¹, 李汉杰¹,
邓 苑¹, 劳志雄¹, 何旭雄¹, 罗英杰²

(1. 佛山市高明佛水供水有限公司, 广东 佛山 528500; 2. 佛山大学 环境与化工学院,
广东 佛山 528000)

摘 要: 为应对直链藻污染对水厂运行的冲击,某给水厂对预氧化、强化混凝及协同工艺的除藻效能进行评估,重点考察了藻密度、pH、Zeta电位对处理效果的影响。结果表明,强化混凝工艺对藻密度低于 10^5 个/L的水体除藻率达98.71%;加氯预氧化工艺在藻密度为 $10^5\sim 10^6$ 个/L时除藻率提升至99.19%;预氧化-强化混凝协同工艺对藻密度为 $10^6\sim 10^7$ 个/L的原水可保持99.95%的除藻率。机理分析表明,水体pH与Zeta电位呈负相关性,调节pH至7.5~8.0范围可有效提高Zeta电位,进而显著提升混凝沉淀效果。黄原胶助凝可高效去除水中多肽、蛋白质及腐殖酸类有机质,其通过氢键结合、静电吸引和吸附架桥等作用促进絮体形成与沉降。研究成果为高藻期水厂工艺调控提供了理论依据。

关键词: 颗粒直链藻; 强化混凝; 预氧化; 除藻联合工艺

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)17-0076-08

Research on Emergency Treatment Technology for *Melosira granulata* Pollution in Water Treatment Plants

WANG Yuan¹, DENG Jun-jie¹, LIANG Xiao-yan¹, TAN Jian-rong¹, NIE Jia-jian¹,
LI Han-jie¹, DENG Yuan¹, LAO Zhi-xiong¹, HE Xu-xiong¹, LUO Ying-jie²

(1. Foshan Gaoming Foshui Water Supply Co. Ltd., Foshan 528500, China; 2. School of
Environment and Chemical Engineering, Foshan University, Foshan 528000, China)

Abstract: To address the operational challenges posed by *Melosira granulata* contamination in water treatment plants, this study evaluated algae removal efficiency through pre-oxidation, enhanced coagulation, and their hybrid processes, with a focus on algal density, pH, and Zeta potential. Experimental results demonstrated that enhanced coagulation achieved a removal rate of 98.71% for algae in raw water with algal density below 10^5 cells/L. Chlorine-based pre-oxidation improved removal efficiency to 99.19% at algal densities of $10^5\sim 10^6$ cells/L, while the hybrid pre-oxidation-coagulation process maintained 99.95% removal efficiency even under high algal loading ($10^6\sim 10^7$ cells/L). Mechanistic analysis revealed a negative correlation between pH and Zeta potential. Adjusting pH to 7.5–8.0 effectively increased Zeta potential, thereby enhancing coagulation efficiency. Xanthan gum as a coagulant aid significantly removed peptides, proteins, and humic acids through hydrogen bonding,

基金项目: 佛山市自筹经费类科技创新项目(2420001003512); 佛山市高明佛水供水有限公司项目

通信作者: 罗英杰 E-mail: 2980249467@qq.com

electrostatic attraction, and adsorption-bridging effects, promoting floc formation and sedimentation. These findings provide data support for process optimization in water treatment plants during algal bloom periods.

Key words: *Melosira granulata*; enhanced coagulation; pre-oxidation; hybrid algae removal process

近年来,在人类活动与气候变迁影响下,西江水体内源营养盐浓度上升、氮磷比持续失衡^[1]。西江中下游流域冬季常年干旱少雨,同时上游水库群的蓄水调控导致水体流速进一步降低,形成有利于藻类暴发的富营养环境^[2]。2024年1月西江流域广佛段突发藻华污染,沿岸给水厂出现平流沉淀池絮体上浮、滤池堵塞等问题。针对藻华实际情况,以颗粒直链藻生物特性为基础,对比不同应急工艺的除藻效果,考察原水藻密度、pH及Zeta电位对应急除藻工艺的影响,并对絮体面积、有机质去除及药剂成本等进行系统分析,旨在为给水厂应对季节性突发直链藻污染提供参考。

1 给水厂概况及藻污染的影响

1.1 给水厂概况

某给水厂位于广佛地区西南部,设计处理规模为 $31\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,现产水量为 $22\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。取水构筑物位于西江干流,根据《2023年度佛山市生态环境状况公报》饮用水源水质公示,该水源属于地表Ⅱ类水,水质状况良好。该厂主要净水流程为絮凝沉淀+过滤+消毒(见图1),其中核心处理构筑物为折板反应池、平流沉淀池、V型滤池等,并在配水井前设矾、氯和应急药剂投加点,具备一定的抗污染冲击能力。

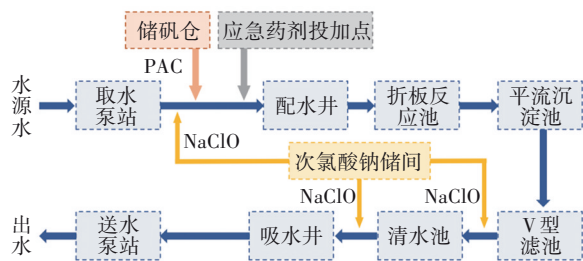


图1 水厂工艺流程

Fig.1 Flow chart of a water treatment plant

1.2 藻污染对生产的影响

藻类暴发期间,厂区共计16组V型滤池因严重堵塞而减产,反冲洗周期缩短至8h,V型滤池单池反冲洗水量增至 350 m^3 。平流沉淀池出现严重含藻

絮体上浮现象,排泥水处理系统超负荷运行,日间产水量显著下降。提升前加氯量或聚合氯化铝投加量的应急处置方案虽能增强混凝效果,却引发次生问题:过量氯氧化剂导致藻细胞裂解释放胞内有机物^[3-4],其电负性硅质外壳黏附絮体无法沉降,漂浮至滤池后加重了滤池堵塞,最终形成“加药强化-藻体破碎-絮体上浮-滤池堵塞”的恶性循环^[5]。

光学显微镜分析显示,原水优势藻呈圆柱形壳体结构,直径约为 $17\text{ }\mu\text{m}$,具放射状皱褶,带面分布斜行孔纹,胞体间通过壳面紧密连接形成链状体,胞内可见片状色素体。基于上述形态特征判定该优势种属为硅藻门圆筛藻科直链藻属的颗粒直链藻^[6]。颗粒直链藻暴发对水厂运行的威胁机制具有多途径联合作用:藻源性有机物激增大幅提升了药剂消耗量;胞内物质的释放增加了消毒副产物生成风险;同时,硅藻壳体还会破坏絮体沉降性能。上述作用机制为建立基于藻密度分级的工艺优选策略提供了理论依据。

2 试验材料和方法

2.1 试剂与仪器

试剂(均为分析纯):次氯酸钠溶液,质量分数为10.57%;聚合氯化铝,质量分数为10.13%;黄原胶(XG),相对分子质量为 $(1.3\sim 1.8)\times 10^7$;阴离子型聚丙烯酰胺,相对分子质量为 $(1.5\sim 1.8)\times 10^7$ 。

仪器:岛津 Shimadzu RF-6000 三维荧光光谱、岛津 Shimadzu UV-3600 Plus 紫外-可见-近红外分光光度计、IPDA 透光脉动絮体检测仪、pHS-25 数显式pH计、中润 ZR-6 台式混凝搅拌仪。

2.2 试验方法

2.2.1 暴发期含藻水特性试验

选取2024年1月中旬至2月初藻类暴发期开展原水水质监测工作,监测指标包括藻密度、叶绿素a浓度、浊度、水温、pH等,表征水文环境因素与藻类生物量、藻生物特性、叶绿素a浓度的相关性。

2.2.2 不同原水藻密度的工艺优选试验

为应对季节性突发直链藻污染并为高藻期水厂工艺调控提供理论支撑,于藻华暴发期间通过烧杯试验考察常规混凝、强化混凝、预氧化混凝及预氧化联合强化混凝等工艺的除藻效能。共设计了6种投药组合,即:PAC、PAC+PAM、PAC+XG、NaClO+PAC、NaClO+PAC+PAM、NaClO+PAC+XG(分别记作1#~6#)。其中,PAC、PAM、XG、NaClO投量分别为6.0、0.10、0.10、1.5 mg/L。

试验流程为:量取1 000 mL原水于烧杯中,常规混凝工艺投加PAC(投加量以商品药液计)后进行混凝沉淀试验;预氧化混凝工艺投加NaClO(投加量以有效浓度计)后先以200 r/min快搅1 min,经充分接触氧化后进行混凝沉淀试验;强化混凝工艺在投加PAC后30 s同步投加PAM或XG(投加量以有效浓度计)进行混凝沉淀试验;协同工艺依次进行预氧化与强化混凝操作。混凝程序设定为三段式搅拌:先在250 r/min下快速搅拌30 s,再于200 r/min下搅拌1 min,最后在40 r/min下慢速搅拌10 min,静置沉淀30 min后取样检测。

2.2.3 水体pH的影响试验

以 6.8×10^6 个/L含藻水为处理对象,分别调节水体pH为8.0和7.5,以除藻率、除浊率、叶绿素a去除率及Zeta电位变化等指标表征pH对各工艺除藻除浊效果的影响。

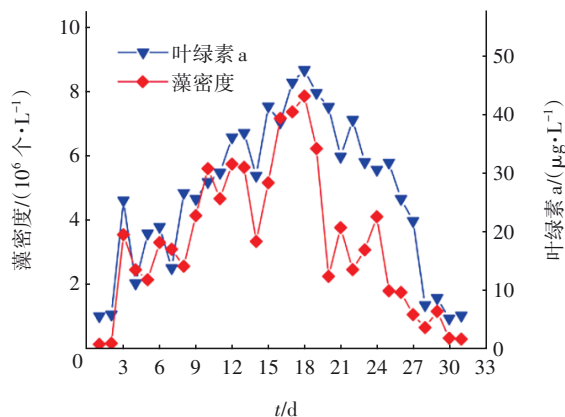
3 结果与讨论

3.1 暴发期含藻水特性

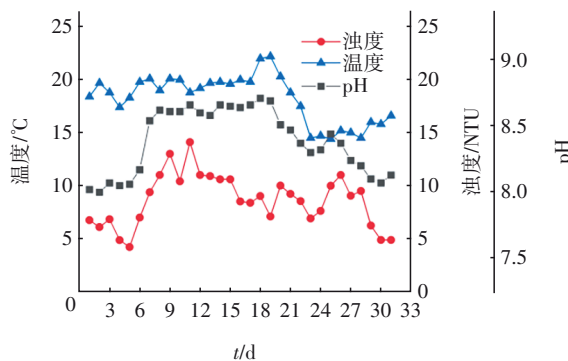
据原水监测数据显示,藻密度峰值达 7.8×10^6 个/L,叶绿素a浓度随藻密度增加而提高,峰值可达46.32 $\mu\text{g/L}$,二者变化趋势相近(见图2)。水温维持在13~23 $^{\circ}\text{C}$,处于直链藻最适生长温度区间^[6]。暴发期 10^6 个/L数量级的直链藻光合作用会显著消耗水中溶解性 CO_2 ,导致水体pH最高升至8.82,同时高密度的直链藻还提升了水体浊度。

研究表明,常规水质条件下PAC水解后生成单体铝 Al_a 、低聚体铝 Al_b 及高聚体铝 Al_c ,可高效去除水中有机质^[7]。但在高碱度水质条件下, Al_a 的存留量较高,同时 $\text{pH} > 8.0$ 会促使 Al_b 进一步水解生成偏铝酸盐等可溶性铝盐^[8],易导致出水铝含量超标^[9],并降低 Al_c 絮凝形成絮体的致密性,致使上清液残留悬浮絮体^[10]。综上所述,在藻类暴发期原水呈现

显著的低温、低浊、高碱度特征,藻密度与pH、水温等指标具有显著的相关性,水体pH异常升高可作为判断藻类暴发的关键指标,并根据水体的碱度水平初步预测藻污染的严重程度。



a. 叶绿素a和藻密度



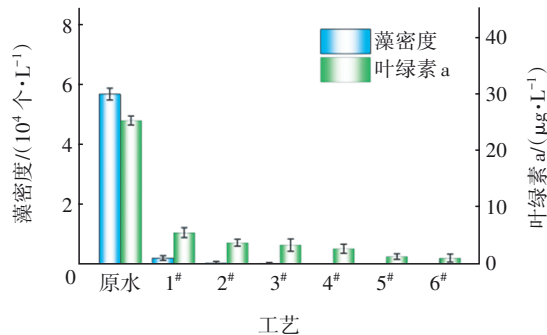
b. 浊度、温度和pH

图2 2024年1月原水水质

Fig.2 Raw water quality in January 2024

3.2 不同原水藻密度的工艺优选

依据藻密度的变化特征,将藻密度划分为 $<10^5$ 、 $10^5 \sim 10^6$ 、 $10^6 \sim 10^7$ 个/L三个数量级,考察藻密度对各工艺去除藻类及叶绿素a的影响,并建立基于藻密度分级的工艺优选策略。试验结果见图3。



a. 低藻密度

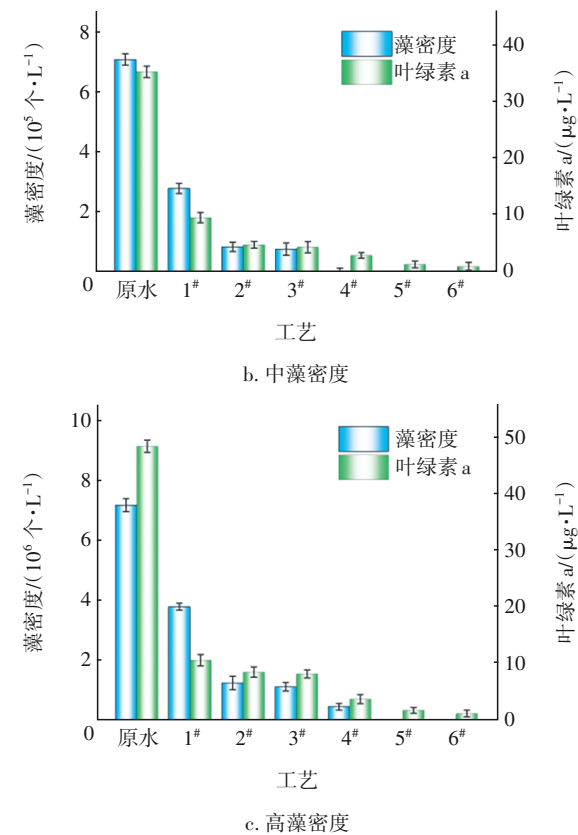


图3 不同原水藻密度条件下各工艺对藻类的去除效果
Fig.3 Algae removal by various processes under different algal density conditions

在不同原水藻密度条件下,各工艺去除效能差异显著。当直链藻密度<10⁵个/L时,除1#的上清液检出少量藻细胞外,其余工艺均未检出,此时2#~6#对藻类和叶绿素a的去除率均达95%以上。当藻密度升至10⁵~10⁶个/L时1#失效,大量含藻悬浮絮体难以被去除;2#、3#的除藻率分别下降至87.75%和88.87%。延长沉淀时间至40min,1#~3#出现絮体上浮现象,而4#~6#上清液仍未检出藻细胞。当藻密

表1 不同pH下各工艺的出水指标

Tab.1 Effluent indicators of various processes at different pH levels

项目		1#	2#	3#	4#	5#	6#
pH=8.0	藻密度/(10 ⁵ 个·L ⁻¹)	20.69	6.13	5.47	1.17	0.01	0.01
	叶绿素a/(μg·L ⁻¹)	9.76	6.69	6.37	2.91	1.83	1.58
	浊度/NTU	1.89	1.31	1.29	0.98	0.77	0.58
	Zeta电位/mV	-25.39	-24.27	-23.85	-16.54	-13.97	-13.51
pH=7.5	藻密度/(10 ⁵ 个·L ⁻¹)	10.07	2.46	2.77	0.07	0.01	0.01
	叶绿素a/(μg·L ⁻¹)	8.16	5.59	5.27	2.51	1.52	1.43
	浊度/NTU	1.73	1.17	1.12	0.88	0.61	0.38
	Zeta电位/mV	-24.56	-23.32	-22.93	-15.86	-13.61	-13.07

在pH为8.0和7.5时,1#除藻率较原水pH的(除藻率为47.03%)分别提高22.63和38.18个百

度达10⁶~10⁷个/L时,1#~3#除藻率进一步降至47.03%、82.36%、84.03%,并出现絮体上浮现象,5#、6#则稳定维持除藻率、除浊率及叶绿素a去除率大于95%。

基于上述试验结果,研究认为应根据藻密度分级优选除藻工艺,即在上述三种藻密度下应该分别采用强化混凝、预氧化和预氧化联合强化混凝工艺(见图4),同时需深入分析水体pH对各工艺出水效果的影响。

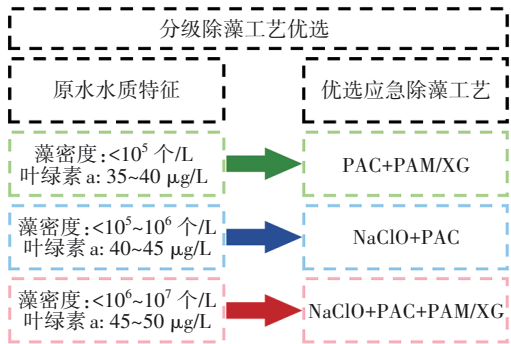


图4 基于藻密度分级的除藻工艺优选

Fig.4 Optimization of algae removal process based on algal density classification

3.3 水体pH的影响

监测发现藻类暴发期水质呈低温、低浊、高碱度等特征,其中原水碱度过高会影响混凝沉淀效果,不利于控制出水铝含量。为此,考察了pH对各工艺出水效果的影响,结果见表1。其中,当原水pH调节为8.0时,其藻密度、叶绿素a浓度、浊度、Zeta电位分别为6.82×10⁶个/L、45.31 μg/L、14.18 NTU、-28.56 mV;当原水pH调节为7.5时,其藻密度、叶绿素a浓度、浊度、Zeta电位分别为6.81×10⁶个/L、44.57 μg/L、13.79 NTU、-27.55 mV。

分点;在pH=7.5时,2[#]、3[#]除藻率较原水pH的(除藻率为82.36%、84.03%)分别提升14.03和11.89个百分点;在pH=8.0时4[#]的氧化除藻率提升至98.28%。

当pH=8.0时,1[#]~6[#]对叶绿素a的去除率分别达到78.46%、85.23%、85.95%、93.58%、95.96%、96.51%,且除浊率均高于85%,证明调节pH可有效提升除藻除浊效能。

Zeta电位分析显示,原水pH由8.0降至7.5时,Zeta电位从-28.56 mV升至-27.55 mV,其中1[#]~3[#]因仅存在PAC水解产生的电中和效应,对电位调节幅度小于5.0 mV,而4[#]通过氧化协同作用Zeta电位分别提升12.02和11.69 mV。有研究发现,当Zeta电位处于等电点附近时絮凝效果最佳^[11]。因此,通过调节pH改变水体Zeta电位,可有效提高对藻类、叶绿素a及浊度的去除率。试验结果表明,水体pH与Zeta电位具有显著的负相关性,调节pH至7.5~8.0并联合氧化剂投加可有效增强体系电中和效应,使除藻率提升11.89~38.18个百分点,同时有效降低絮体上浮风险。

3.4 絮体形态检测与粒径分析

3.4.1 透光脉动形态检测

根据3.2节试验结果,部分工艺存在絮体上浮现象。为进一步明确絮体上浮原因,通过透光脉动检测对各工艺处理藻密度为10⁶个/L的沉淀絮体形态进行表征,1[#]~6[#]工艺沉淀絮体的透光脉动检测照片如图5所示。

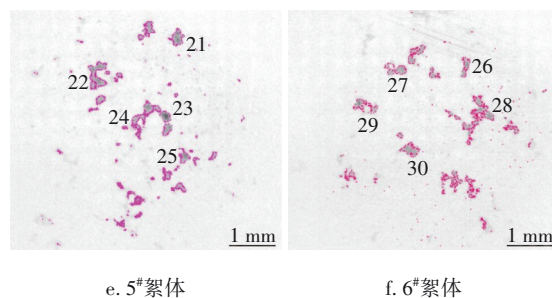
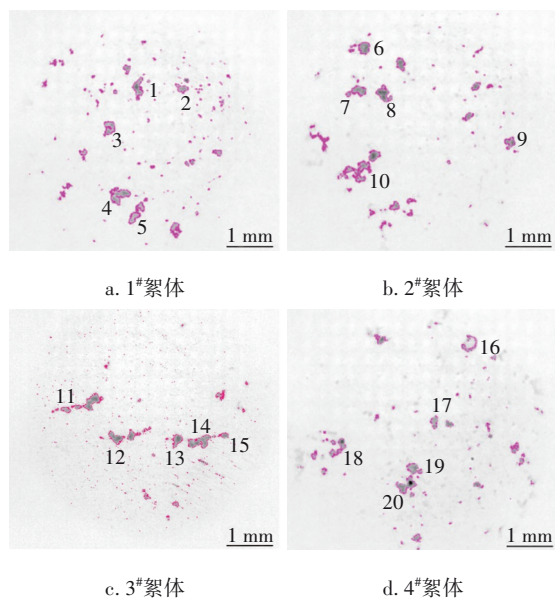


图5 不同工艺沉淀絮体透光脉动检测照片

Fig.5 IPDA detection images of precipitated flocs in different processes

由图5可以看到,不同处理工艺形成的絮体形态特征存在显著差异:1[#]形成的絮体呈分散态分布,粒径低于250 μm的絮体占比高达72.26%,絮体细小且沉降性能较差,沉淀后易上浮;4[#]因预氯化引发的胶体再稳定效应,叠加助凝剂缺失,形成松散的絮体结构而难以沉降;5[#]、6[#]的絮体则呈现典型的团簇结构,平均粒径可达500 μm,具有良好的沉降性能。

细胞检测结果表明,2[#]中絮体7、10和3[#]中絮体11、12、14存在活性直链藻细胞被絮体完整包裹的情况,而4[#]~6[#]的絮体中未检出完整藻细胞。进一步分析显示,被包裹的活性藻细胞通过光合产氧生成微气泡,导致絮体-气泡复合体密度下降,这是引发沉淀絮体上浮的关键原因。

3.4.2 絮体粒径分布统计

统计3.4.1节各工艺沉淀絮体的粒径分布,结果如图6所示。

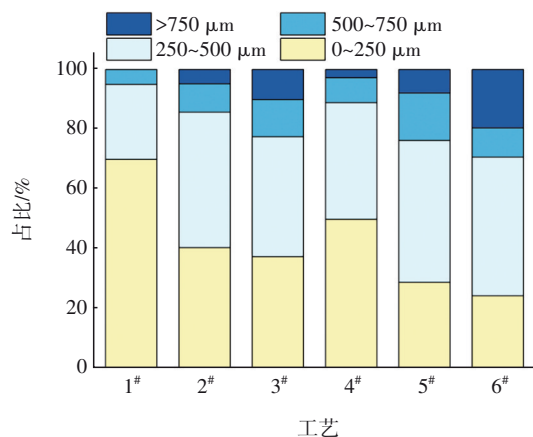


图6 含藻絮体粒径分布

Fig.6 Particle size distribution of algal flocs

对比1[#]~6[#],随着助凝剂、氧化剂的投加,尺寸低于250 μm的絮体数量逐渐减少,除1[#]、4[#]外,其余工

艺絮体尺寸均是250~500 μm 占比最高,絮体沉降性能显著提升。

结合3.3节内容及Cao等^[12]的研究发现,预氧化过程中氧化剂通过提升表面Zeta电位削弱藻细胞电负性,促进混凝剂与藻细胞的电荷中和作用。同步投加PAM、XG助凝剂时,其分子链通过吸附架桥作用连接带电胶体颗粒形成空间网状结构,同时网捕卷扫效应有效捕获分散相物质,二者协同作用使絮体平均粒径由1#的175.28 μm 提升至5#、6#的438.77及459.91 μm ,絮体结构稳定性显著增强,最终实现对藻类与胶体颗粒的高效去除。

3.5 三维荧光光谱分析

三维荧光光谱技术具有响应灵敏、准确度高、表征准确等特点,近年来被广泛应用于溶解性有机物的表征中。为进一步分析各工艺对水中有机质的去除效果,对原水及1#~6#工艺出水进行荧光光谱特性表征,结果如图7所示。

Chen等^[13]根据激发波长(λ_{Ex})/发射波长(λ_{Em})将荧光光谱图划分为5个区域,分别代表具有不同荧光特性的有机物。区域I($\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}$ 为200~250 nm/280~330 nm)与区域II($\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}$ 为200~250 nm/330~380 nm)代表蛋白质、多肽、含芳香烃类的物质;区域III($\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}$ 为200~250 nm/380~500 nm)代表富里酸类物质;区域IV($\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}$ 为250~320 nm/300~380 nm)代表溶解性微生物代谢产物;区域V($\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}$ 为250~450 nm/380~500 nm)代表腐殖酸类物质。由图7可知,原水中富含蛋白质、氨基酸、多肽、芳香烃、富里酸等成分,经1#工艺处理后区域III、V的富里酸类和腐殖酸类成分有效减少,但对区域IV的溶解性微生物代谢产物去除效果较差。经过2#、3#工艺处理后,区域I、II的荧光强度显著降低,表明对蛋白质、多肽、含芳香烃类物质的去除效果进一步提升;5#工艺对各区域有机质去除效果明显,但仍有少量溶解性微生物代谢产物(区域IV)残留在上清液中^[14]。因此,应重点关注溶解性微生物代谢产物的去除。5#与6#工艺对水中溶解性及颗粒态有机物均表现出显著去除效能。同时,黄原胶作为助凝剂在联合氧化工艺中展现的除藻效能与聚丙烯酰胺相近,证实其同样具备高效去除水中有机物的助凝能力,但黄原胶在联合工艺中的除藻机理仍需深入解析。

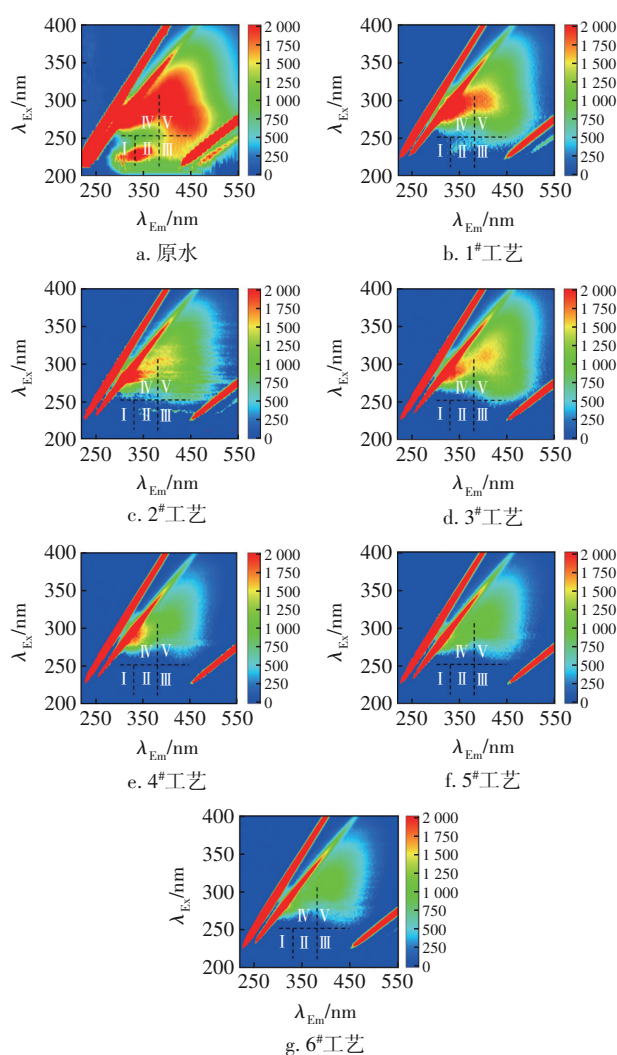


图7 不同工艺对有机质的去除效果

Fig.7 Removal effect of organics by different processes

3.6 次氯酸钠+黄原胶协同工艺除藻机理

在6组除藻工艺中,6#工艺能有效抑制含藻絮体上浮并高效去除水中有机质。次氯酸钠具有除藻效果好、消毒效果稳定及使用简便等优点^[3],适量加氯预氧化可有效应对突发水质波动。黄原胶(XG)为可生物降解、无毒无害的天然高分子多糖,作为助凝剂在水处理中展现出良好助凝性^[15]。如图8所示,黄原胶本体长链具有羟基结构,可卷捕网扫高效去除水中的悬浮物、胶体颗粒和重金属离子,溶解后分子链吸水膨胀并扩散至水中形成稳定的胶体溶液,其分子链的羟基与羧基结构通过氢键结合及静电吸引等作用吸附架桥形成密实絮体结构。黄原胶在助凝过程中赋予交联体额外的稳定性,絮体抗剪切能力大幅提升,处理效果与PAM相近且安全无毒,在净水领域具有良好的应用前景。

次氯酸钠+黄原胶协同除藻试验

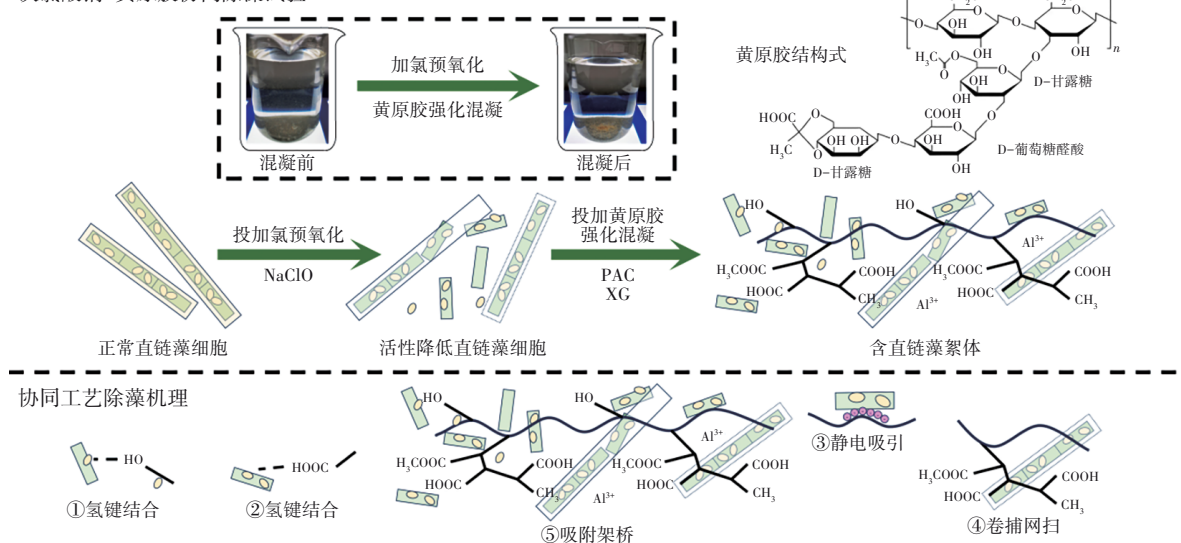


图8 次氯酸钠+黄原胶协同工艺除藻机理

Fig.8 Mechanisms of algae removal by NaClO+XG

3.7 经济成本分析

针对不同藻密度水体的应急处理需求,对比分析了不同工艺的适用条件、除藻效率及材料成本等,结果见表2。各应急除藻工艺的效能及药剂成本存在差异:1#常规混凝工艺成本最低,但除藻效果有限;采用黄原胶助凝的3#和6#工艺成本高于使用PAM助凝的2#和5#工艺,黄原胶与聚丙烯酰胺体系的处理效果相近,同时《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)规定出水丙烯酰胺残留量需低于0.5 $\mu\text{g/L}$ 。因此,应根据原水藻密度、水质特征与处理要求优选不同工艺。当原水藻密度 $<10^5$ 个/L时,可优选2#、3#工艺;当需严格控制出水化学残留时,可采用3#工艺;当原水藻密度高于 10^6 个/L时,可选用5#、6#工艺。基于原水藻密度的除藻工艺优选方案,可为实际应用提供理论依据。

表2 应急工艺除藻效能分析

Tab.2 Efficacy of emergency algae removal processes

藻密度/(个 $\cdot\text{L}^{-1}$)	工艺	除藻率/%	成本/(元 $\cdot\text{m}^{-3}$)
$<10^5$	1#	95.78	0.002~0.005
	2#	98.71	0.005~0.008
	3#	99.17	0.006~0.009
$10^5\sim10^6$	4#	99.19	0.003~0.006
$10^6\sim10^7$	5#	99.95	0.006~0.016
	6#	99.98	0.010~0.017

3 结论

① 2024年1月—2月冬季枯水期西江广佛段

发生严重的藻华污染事件,原水藻密度峰值达 7.8×10^6 个/L,优势藻种为硅藻门圆筛科颗粒直链藻。对此,建议将冬季枯水期(每年12月至次年2月)列为西江藻类群落动态重点监控时段,实施藻密度与优势种演替的常态化监测。

② 建立不同原水藻密度的工艺优选方案,当藻密度低于 10^5 个/L时优先选用黄原胶或聚丙烯酰胺强化混凝工艺,当原水藻密度为 $10^5\sim10^6$ 个/L时可采用加氯预氧化工艺,当原水藻密度为 $10^6\sim10^7$ 个/L时,采用预氧化联合强化混凝工艺。

③ 采用黄原胶作为助凝剂的净水除藻效果与聚丙烯酰胺相近,形成的絮体密实且沉降性能良好,对水中有机质的去除效果明显,具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 肖丹,南军,范雅倩,等.某自来水厂应对水源藻类突发污染的运行探索与实践[J].中国给水排水,2024,40(3):9-14.
XIAO Dan, NAN Jun, FAN Yaqian, et al. Exploration and practice of a waterworks to deal with sudden algae pollution in water source[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(3):9-14 (in Chinese).
- [2] 植许望,陈兴祥,张慧欢.西江流域肇庆段高藻污染及某水厂除藻措施[J].中国给水排水,2025,41(4):92-97.
ZHI Xujun, CHEN Xingxiang, ZHANG Huihuan. High algae pollution in Zhaoqing section of Xijiang River

- basin and algae removal measures of a waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41 (4) : 92-97 (in Chinese).
- [3] 田俊丽,姜建伟,魏国强,等. 投氯方式对水厂控制藻类及消毒副产物生成的影响[J]. 中国给水排水, 2023,39(11):30-34.
- TIAN Junli, JIANG Jianwei, WEI Guoqiang, *et al.* Effect of chlorine dosing mode on algae control and disinfection by-products formation in waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(11) : 30-34 (in Chinese).
- [4] 谢鹏超. 化学预氧化对藻类特性及氯化消毒副产物生成规律的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.
- XIE Pengchao. Effect of Chemical Pre-oxidation on Algal Characteristics and Formation of Chlorinated Disinfection By-products [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011 (in Chinese).
- [5] LEE J D, LEE M S, SHIN W S, *et al.* Removal of freshwater diatoms (*Synedra acus* and *Stephanodiscus* sp.) by preozonation and addition of polyamine coagulant-aid [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2005, 22: 682-686.
- [6] 葛大艳. 珠江链状硅藻物种组成及生态特征研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2021.
- GE Dayan. Species Composition and Ecological Characteristics of Chain-forming Diatoms in the Pearl River [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021 (in Chinese).
- [7] 张大为,徐慧,王东升,等. 混凝剂中的铝形态对藻类混凝过程的影响 [J]. 中国给水排水, 2020,36(5): 39-45.
- ZHANG Dawei, XU Hui, WANG Dongsheng, *et al.* Effects of aluminum speciation in coagulants on algae coagulation process [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(5) : 39-45 (in Chinese).
- [8] DUAN S X, XU H, XIAO F, *et al.* Effects of Al species on coagulation efficiency, residual Al and floc properties in surface water treatment [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, 459: 14-21.
- [9] 夏萍,叶辉. 常规水处理工艺降铝方案研究 [J]. 给水排水, 2021, 47(S2):23-26.
- XIA Ping, YE Hui. Residual aluminum control in conventional water treatment processes [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47 (S2) : 23-26 (in Chinese).
- [10] 刘丽娟,汪琳,李明玉,等. 不同混凝剂强化除藻、除浊的研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(5):80-83.
- LIU Lijuan, WANG Lin, LI Mingyu, *et al.* Enhanced algae and turbidity removal by different coagulants [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26 (5) : 80-83 (in Chinese).
- [11] 吴志荣,徐磊,王彤. 有机羧酸对硫酸铝混凝絮体特性的影响分析 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(1):61-64.
- WU Zhirong, XU Lei, WANG Tong. Effect of organic carboxylic acid on floc characteristics in aluminum sulfate coagulation [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(1) : 61-64 (in Chinese).
- [12] CAO L, WANG J, WANG Z, *et al.* Comparison of peracetic acid and sodium hypochlorite enhanced Fe(II) coagulation on algae-laden water treatment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 445: 130571.
- [13] 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.
- [14] 谭强,沈吉敏,祝鑫炜,等. 聚硅酸铝铁强化处理低温低浊高有机物原水研究[J]. 给水排水, 2020, 46 (S2):64-69.
- TAN Qiang, SHEN Jimin, ZHU Xinwei, *et al.* Enhanced treatment of low-temperature, low-turbidity and high-organic raw water using polyaluminum ferric silicate[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46 (S2):64-69 (in Chinese).
- [15] RASHIDI A R, AZELEE N I W, ZAIDEL D N A, *et al.* Unleashing the potential of xanthan: a comprehensive exploration of biosynthesis, production, and diverse applications [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2023, 46: 771-787.
-
- 作者简介:王渊(1984-),男,广东佛山人,学士,给排水设计工程师,主要从事水厂运行管理及市政管道建设工作。
- E-mail:491299511@qq.com
- 收稿日期:2025-06-05
- 修回日期:2025-07-07

(编辑:李德强)