

混凝/预氧化去除微污染水源水中拟柱孢藻的效能

任鹏飞¹, 蒋白懿², 何南浩², 李振兴¹, 唐曾晖¹, 周午阳¹,
孙志民¹

(1. 广州市市政工程设计研究院有限公司, 广东 广州 510060; 2. 沈阳建筑大学 市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 饮用水源中藻类的大量繁殖极易给饮用水的生产带来诸多困难, 尤其是对于微污染水中拟柱孢藻这种线状藻类。考察了不同混凝剂和预氧化剂对藻类的去除效果, 并据此在水厂进行了氯梯度生产性试验。结果表明, 单独采用聚合氯化铝(PAC)混凝剂的除藻效果优于氯化铁, 预氧化的除藻效果优于高锰酸钾预氧化。预氧化剂的投加可以明显改善水中由于藻类活动而形成的小尺寸的松散絮体, 进而形成尺寸较大、密实度较高、沉降性较好的絮体。生产性试验表明, 对于这种典型的低纬度微污染水库水, 采用 PAC 最佳投加量为 15 mg/L, 同时将前加氯量控制在 2.0 ~ 3.0 mg/L 时, 对藻类的去除率可以达到 92% 以上, 并且可以使沉后水浊度控制在 1.60 NTU 以下。这为低纬度地区微污染水中拟柱孢藻的去除提供了很好的指导作用。

关键词: 微污染水源水; 拟柱孢藻; 混凝; 预氧化; 浊度

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)11-0021-06

Removal of *Cylindrospermopsis raciborskii* from Micro-polluted Source Water by Coagulation and Preoxidation

REN Peng-fei¹, JIANG Bai-yi², HE Nan-hao², LI Zhen-xing¹, TANG Zeng-hui¹,
ZHOU Wu-yang¹, SUN Zhi-min¹

(1. Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510060, China; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: The large-scale reproduction of algae in drinking water sources has brought many difficulties to production of potable water, especially for linear algae such as *Cylindrospermopsis raciborskii* in micro-polluted water. The performance of different coagulants and preoxidants was studied by coagulation experiment along with productive experiment of chlorine gradient. The results showed that the PAC coagulant was more efficient than that of ferric chloride in the coagulation treatment. Further research showed that compared with potassium permanganate, chlorine preoxidation could more effectively remove algae. The addition of the preoxidant could significantly improve the small-sized loose flocs formed in the water due to algae activity, thereby forming flocs with larger size, higher density and better settleability. The productive experiment proved that for this typical low-latitude micro-polluted reservoir water, the optimal dosage of PAC was 15 mg/L, and when the prechlorination was controlled at 2.0 -

3.0 mg/L, the algae could be removed by more than 92% and the effluent turbidity of sedimentation tank could be controlled below 1.60 NTU. This method provides a good guiding role for the removal of *Cylindrospermopsis raciborskii* in the micro-polluted water at low latitudes.

Key words: micro-polluted source water; *Cylindrospermopsis raciborskii*; coagulation; preoxidation; turbidity

随着我国经济的高速发展和城市化进程的加快,工农业废水和生活污水的排放量逐年增加,致使河流、湖泊水体污染逐渐加重,甚至出现水体富营养化现象。尤其到了夏季,藻类大量繁殖而引发水质恶化,给水处理带来一定的难度和危害^[1]。这些问题主要有:①藻类代谢产物大部分为有机物,这阻碍了絮凝作用的顺利进行,增加了水处理成本;②混凝过程中藻类会形成大颗粒状有机物,阻碍絮体的成长,导致后续沉淀效果不佳,堵塞滤池,进而影响水处理效果^[2-3]。

在饮用水处理工艺中,能够有效去除夏季高藻水中藻类细胞的方法主要有混凝、预氧化等^[4-5]。笔者选取以我国南方低纬度水库水为水源的水厂,对原水中的藻类做了定性及定量检测后,研究在聚合氯化铝(PAC)和氯化铁(FC)分别作为混凝剂、高锰酸钾和次氯酸钠分别作为氧化剂的情况下,对藻类、浊度、有机物的去除情况,并进行了生产性试验,分析实际工艺中预氧化与混凝组合的除藻效果。

1 试验材料及方法

1.1 仪器和试剂

仪器与设备:米欧 Miulab MS-40 数字顶置式搅拌器、哈希 TL23 系列台式浊度仪、Hydrolab 多参数水质分析仪、PHS-3C 型精密 pH 计、高速摄像系统、电子显微镜、普析通用紫外分光光度计等。

材料与试剂:聚合氯化铝(工业级),氯化铁(工业级),高锰酸钾(分析纯),次氯酸钠(分析纯)。

1.2 原水藻类检测和计数方法

采用传统沉淀法和紫外分光光度计对该水厂原水中的藻类进行检测。其中紫外分光光度计检测方法是利用拟柱孢藻的吸光度,采用紫外分光光度计进行扫描。在相关文献中拟柱孢藻的吸光度测量采用的波长是 681 nm,因此本次试验采用 UV_{681} 为计数依据^[6]。

1.3 烧杯试验

采用数字顶置式搅拌器进行混凝,搅拌条件参照该水厂网格絮凝池的运行条件^[7],见表 1。搅拌

结束后用高速摄像系统采集絮体图像,水样静置沉淀 0.2 h 后,在水面 1 cm 以下抽取上清液测定浊度、 UV_{681} 值。

表 1 混凝试验的搅拌条件

Tab. 1 Mixing condition of coagulation test

项 目	混合	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
转速/($r \cdot \min^{-1}$)	200	120	95	80	62
搅拌时间/min	1	4	5	6	4
G 值/ s^{-1}	110	50	35	28	19

1.4 生产性试验

该水厂工艺流程见图 1。为了研究预氧化剂与混凝剂联用对实际生产中的絮体形成是否有促进作用,采用通过烧杯试验确定的预氧化剂与混凝剂联用的最佳方案进行生产性试验。

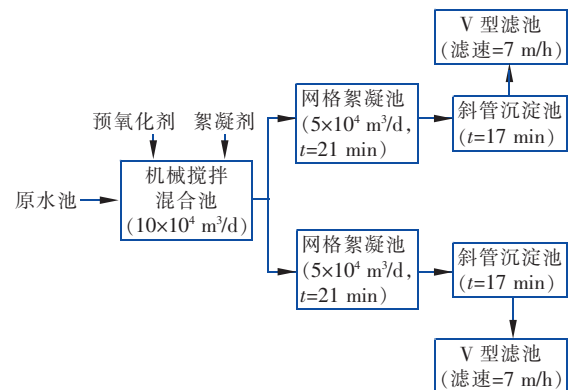


图 1 水厂生产工艺流程

Fig. 1 Flow chart of water treatment process

2 结果与分析

2.1 原水中的藻类类型及数量

该水厂的水源为我国南方某水库,原水中含有大量的藻类,且浊度、 COD_{Mn} 等指标均较低。对水中的藻类进行观测发现(见图 2),原水中的多数藻类呈直线形或略微弯曲,大小介于 50 ~ 250 μm 之间,细胞壁处无收缢,符合拟柱孢藻的特征^[6]。拟柱孢藻在形态学上属于蓝藻门念珠藻目的念珠藻科,适宜生长的水温为 27 ~ 30 $^{\circ}C$,以水中的碳、氮类无机物为能量进行生长。

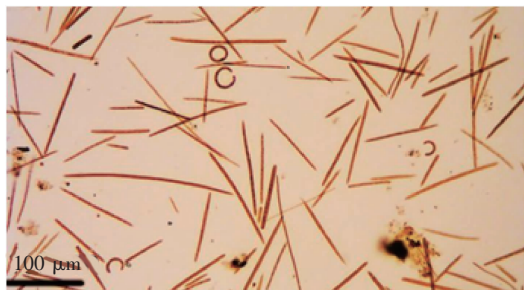


图2 原水中藻类细胞形态

Fig. 2 Morphology of algae cell in raw water

在7月—8月试验过程中,原水藻类数量可以达到 $7 \times 10^7 \sim 1 \times 10^8$ 个/L,拟柱孢藻数量与吸光度值(UV_{681})具有相似的变化趋势,因此,本研究利用 UV_{681} 来表征藻数量(见图3)。

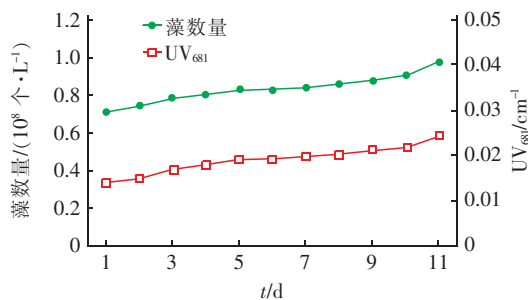
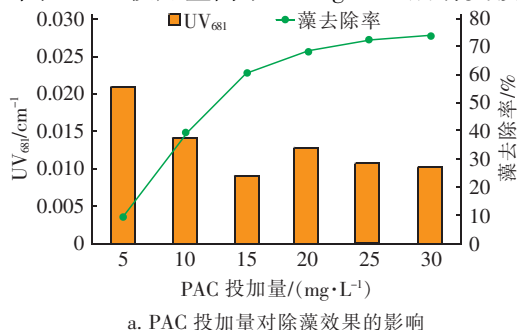


图3 拟柱孢藻的数量与吸光度的关系

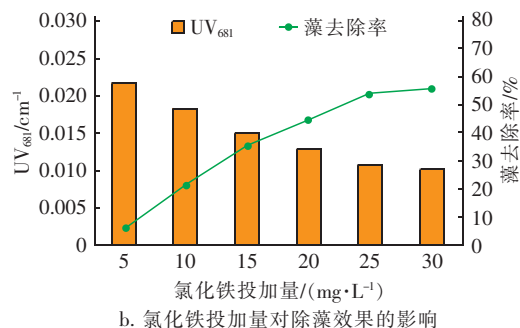
Fig. 3 Relationship between the number of algae and absorbance

2.2 不同投药条件下对拟柱孢藻的去除效果

为了尽可能去除藻类,降低其对过滤和出水水质的影响,首先从混凝剂入手,考察不同混凝剂对藻类的去除效果。图4为聚合氯化铝与氯化铁两种典型的铝盐和铁盐混凝剂的除藻效果对比。在两种混凝剂条件下,藻类去除率均随着混凝剂投加量的增加而增加。当PAC投量从5 mg/L增加到15 mg/L时藻类去除率从9%增加到61%左右,继续增加投量到30 mg/L时,藻类去除率增加至74%,藻类去除率在PAC投加量高于15 mg/L之后有变缓趋势。



a. PAC投加量对除藻效果的影响



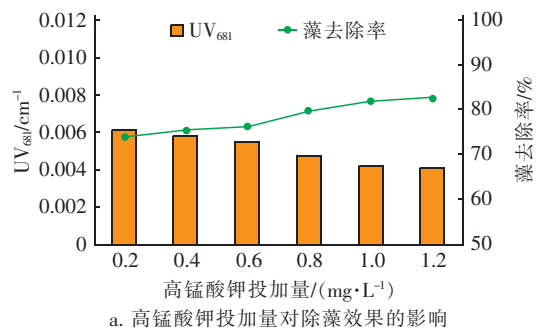
b. 氯化铁投加量对除藻效果的影响

图4 PAC与氯化铁的除藻效果对比

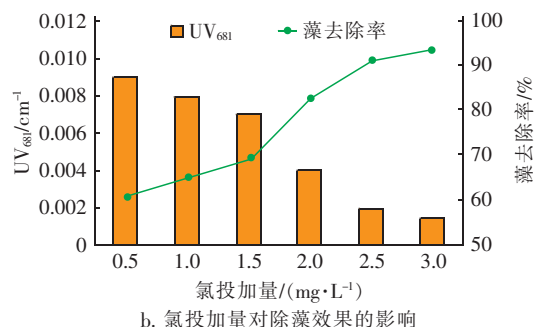
Fig. 4 Comparison of algae removal effects between polyaluminum chloride and ferric chloride

当氯化铁投加量从5 mg/L增加到30 mg/L时,藻类的去除率从6%增加到56%,当投加量高于25 mg/L后,去除率增幅开始放缓。在相同的投加量条件下,PAC对拟柱孢藻的去除效果明显优于氯化铁,从藻类去除效果及成本角度考虑,混凝剂宜选用PAC,且其最佳投加量为15 mg/L。

为了达到更好的除藻效果,选取高锰酸钾和次氯酸钠作为预氧化剂,进一步研究对藻类的去除效果,结果见图5。其中,混凝剂选用PAC,投加量为15 mg/L。



a. 高锰酸钾投加量对除藻效果的影响



b. 氯投加量对除藻效果的影响

图5 高锰酸钾与次氯酸钠的除藻效果对比

Fig. 5 Comparison of algae removal effects between potassium permanganate and sodium hypochlorite

当高锰酸钾投加量为 0.2 mg/L 时,藻类去除率为 74%,继续增加高锰酸钾投量,藻类去除率增幅缓慢,当高锰酸钾投加量增加至 1.2 mg/L 时,藻类去除率提高至 83%。当预氧化剂为次氯酸钠,且有效氯低于 1.5 mg/L 时,藻类去除率低于 70%,而随着投氯量的增加,藻类去除率增幅明显,当投加量增加到 2.5 mg/L 时,藻类去除率提高到了 91%,继续增大氯投加量到 3.0 mg/L 时,藻类去除率增加到 93%。由此可知,次氯酸钠预氧化可以促进 PAC 的效能,使工艺达到更好的除藻效果,在经济投药量条件下对拟柱孢藻的去除率能达到 90% 以上。

2.3 不同投药条件下的混凝效果

2.3.1 不同投药条件下的絮体形态

为了进一步探究不同混凝剂与预氧化剂去除藻类和提升混凝效能的效果,采用絮体原位识别技术采集不同条件下形成的絮体,结果如图 6 所示。由图 6(a)可知,当使用 PAC 作为混凝剂时,能在短时间内形成较多絮体,但大小不一,形态均比较松散,密实度很低。当以氯化铁为絮凝剂时形成的絮体则较为密实,形态规则,强度更大,但絮体尺寸较小,沉降速度较慢。当经高锰酸钾预氧化后再投加 PAC 时,絮体的形成时间提前,絮体尺寸明显增加,但结构仍较松散。预氯化对 PAC 具有明显的助凝作用,矾花的形成时间较不加氯情况下有所提前,形成的絮体枝杈较多,具有较多的粘附点,能碰撞粘附成密实度较高的大尺寸絮体,更易于沉降。

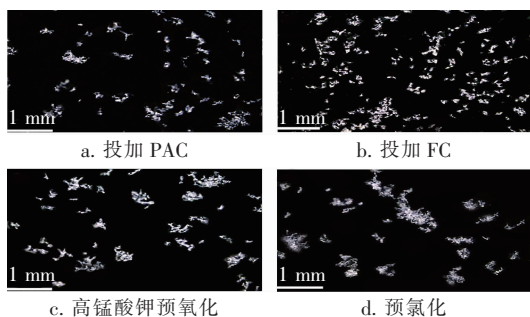


图 6 不同混凝条件下形成的絮体

Fig. 6 Floc formation under different coagulation conditions

2.3.2 不同投药条件下的浊度去除效果

当单独投加 PAC 和氯化铁时,沉后水浊度随着两种混凝剂投量的增加而不断降低(见图 7)。投加 PAC 条件下能将沉后水浊度从 8.21 NTU 降低到 2.61 NTU,而投加氯化铁条件下沉后水浊度能从

13.5 NTU 降低到 7.43 NTU,由此可知在混凝剂投加量相同的情况下,PAC 对浊度的去除效果优于氯化铁。在 PAC 投加量从 5 mg/L 提高到 15 mg/L 时,浊度的去除效果变化最为显著,之后增加 PAC 投加量对浊度去除效果的改善趋势放缓,这与去除藻类的 PAC 经济投加量吻合。

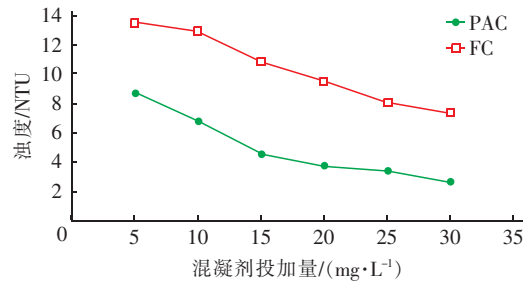
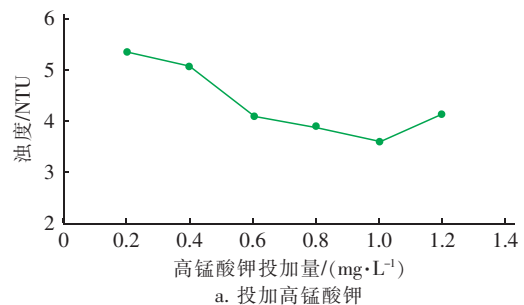


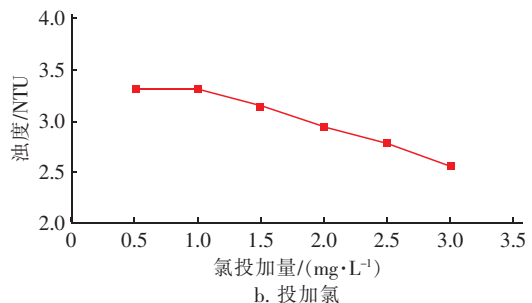
图 7 PAC 及氯化铁投加量对沉后水浊度的影响

Fig. 7 Effect of PAC and FC dosage on turbidity after sedimentation

图 8 为投加两种预氧化剂对沉后水浊度的影响,随着高锰酸钾投加量从 0.2 mg/L 提高到 1.0 mg/L,沉后水浊度能从 5.35 NTU 降低到 3.61 NTU,继续增加高锰酸钾投加量至 1.2 mg/L,沉后水浊度又升高到 4.12 NTU。



a. 投加高锰酸钾



b. 投加氯

图 8 高锰酸钾和氯投加量对沉后水浊度的影响

Fig. 8 Effect of preoxidant dosage on turbidity after sedimentation

而随着氯投加量从 0.5 mg/L 提高到 3.0 mg/L,

沉后水浊度从 3.32 NTU 降低到 2.56 NTU。由此可见,预氯化对该水厂原水的浊度去除效果优于高锰酸钾预氧化的效果。

2.4 水厂运行效果

基于前期试验结果进行了生产性试验,PAC 投加量为 15 mg/L,因为工艺中以氯气为消毒剂,因此在前端投加氯气代替次氯酸钠,投加量同样以有效氯计算。图 9 为氯投加量对去除藻类和浊度的影响。当氯投加量介于 0.5~2.0 mg/L 之间时,藻类的去除效率有明显的提升,投氯量为 2.0 mg/L 时对藻类的去除率可以达到 92%,继续提高氯投加量,藻类的去除率增加缓慢,当投加量达到 3.0 mg/L 时,对藻类的去除率可以达到 97%。在去除藻类的同时,沉后水浊度也可以得到一定的控制,当氯投加量从 0.5 mg/L 增加至 2.0 mg/L 时,沉后水浊度从 2.54 NTU 降低至 1.60 NTU,进一步提高氯投加量至 3.0 mg/L 时,沉后水浊度降低至 1.43 NTU。可见,在保证 PAC 投加量的情况下,适当地增加前加氯量可以有效控制沉后水的藻类数量和浊度。

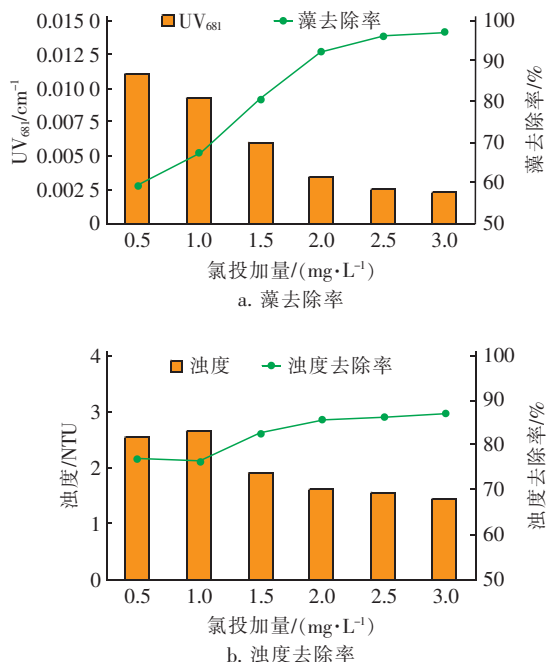


图9 预氯化处理出水藻类和浊度的变化

Fig. 9 Removal of algae and turbidity by prechlorination enhanced coagulation

3 结论

① 单独使用 PAC 和氯化铁作为混凝剂,混凝沉淀对藻类、浊度均有一定的去除效果,从经济角度

考虑,采用 PAC 且投加量为 15 mg/L 时,对微污染原水中以拟柱孢藻为优势种群的藻类有较好的去除效果。

② 与单独混凝相比,在前端投加预氧化剂可以达到更好的除藻效果,其中预氯化的除藻效果优于高锰酸钾预氧化。预氯化配合 PAC(15 mg/L) 的除藻率能够达到 93%,而单独投加 15 mg/L 的 PAC 时除藻率仅为 61% 左右。同时该组合工艺对浊度也有较好的去除效果,能够将沉后水浊度控制在 2.61 NTU。

③ 投加预氧化剂对藻类有较好的抑制作用,使单独投加混凝剂形成的松散、不易结合的絮体成长为尺寸较大、密实度更高、沉降性能更好的絮体。

④ 生产性试验结果显示,以氯气为预氧化剂,当投加量为 2.0 mg/L 时,藻类去除率可达到 92%,同时,沉后水浊度可以控制在 1.60 NTU。因此,水厂可以采用提高 PAC 投加量同时增加前加氯的手段来控制水中的拟柱孢藻。

参考文献:

- [1] 梁文艳,曲久辉. 饮用水处理中藻类去除方法的研究进展[J]. 应用与环境生物学报,2004,10(4):502-506.
Liang Wenyan, Qu Jiuhui. Research progress about algae removal in drinking water treatment[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2004, 10(4): 502-506 (in Chinese).
- [2] 雷青,乔俊莲,王国强,等. 藻类混凝过程的影响因素探讨[J]. 工业用水与废水,2010,41(6):6-11.
Lei Qing, Qiao Junlian, Wang Guoqiang, et al. Influencing factors of algae removal during coagulation[J]. Industrial Water & Wastewater, 2010, 41(6): 6-11 (in Chinese).
- [3] 冯森,崔亚伟. 二氧化氯在水处理技术中的应用[J]. 水处理技术,2012,38(S1):12-14.
Feng Miao, Cui Yawei. Chlorine dioxide in water treatment technology of application[J]. Technology of Water Treatment, 2012, 38(S1): 12-14 (in Chinese).
- [4] 刘广奇,刘杰,宋兰合. 给水处理除藻技术最新进展[J]. 净水技术,2008,27(2):27-31.
Liu Guangqi, Liu Jie, Song Lanhe. The latest improvement of treatment techniques for algae in drinking water treatment process[J]. Water Purification Technology, 2008, 27(2): 27-31 (in Chinese).

(下转第32页)