

工程实例

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2025. 04. 015

西江流域肇庆段高藻污染及某水厂除藻措施

植许鋆, 陈兴祥, 张慧欢

(肇庆市水务集团有限公司, 广东 肇庆 526060)

摘要: 近年来西江流域肇庆段藻华污染愈发严重,特别在2023年高藻暴发期,对沿线各水厂均造成了不同程度的影响。对该地区的高藻污染进行调研,基于实际情况采取了高锰酸钾盐预氧化、PAM强化混凝与二氧化碳调节pH的除藻措施,并在某自来水厂进行烧杯试验与工艺优化调整。结果表明,高藻污染对水厂的冲击主要表现在原水pH上升、滤池反冲洗周期缩短以及混凝剂消耗增加。烧杯试验表明,高藻污染期间该水厂高锰酸钾复合盐、聚氯化铝、PAM投加量宜分别控制在0.1、15、0.1 kg/10³ m³。该厂进行工艺优化后,各项出水水质指标正常,聚氯化铝消耗量相对减少,且两种滤池的反冲洗周期均得到延长。

关键词: 藻类污染; 低浊度; 预氧化; 强化混凝; 二氧化碳

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)04-0092-06

High Algae Pollution in Zhaoqing Section of Xijiang River Basin and Algae Removal Measures of a Waterworks

ZHI Xu-jun, CHEN Xing-xiang, ZHANG Hui-huan

(Zhaoqing Water Group Co. Ltd., Zhaoqing 526060, China)

Abstract: In recent years, the algal bloom pollution in the Zhaoqing section of Xijiang River basin has shown an increasingly significant trend, especially during the high algal bloom period in 2023, which has caused varying degrees of impact on waterworks along the line. Based on a survey on the high algae pollution in the region, the measures such as potassium permanganate pre-oxidation, PAM enhanced coagulation, and carbon dioxide pH regulation were taken to remove algae, and jar test and process optimization were conducted in a waterworks. The results indicate that the impact of high algae pollution on waterworks is mainly reflected in the increase of raw water pH, shortened backwash cycle of filters, and increased consumption of coagulants. According to the jar test analysis, during the period of high algae pollution, the dosage of potassium permanganate composite salt, polyaluminum chloride, and PAM in the waterworks should be controlled at 0.1 kg/10³ m³, 15 kg/10³ m³, and 0.1 kg/10³ m³, respectively. After process optimization of the waterworks, all effluent quality indicators are normal, the consumption of polyaluminum chloride is relatively reduced, and the backwash cycles of both filters are extended.

Key words: algal pollution; low turbidity; pre-oxidation; enhanced coagulation; carbon dioxide

高藻污染是指水体中藻类、细菌或浮游生物突发性过度增殖的一种自然现象。藻类暴发会严重制

约水资源的利用,同时产生的生态环境和经济问题直接威胁社会的绿色和可持续发展。近年来,西江

部分流域内藻类迅速繁殖,给肇庆市区的饮用水安全带来严峻挑战。首先对近4年西江流域肇庆段原水高藻污染进行调研,其次分析2023年藻类污染对原水水质变化及自来水厂制水的影响,最后分析了某水厂采用预氧化、强化混凝与调节pH多种措施联合除藻的情况,可为其他水厂应对突发原水高藻污染提供借鉴。

1 西江流域肇庆段高藻污染调研

1.1 高藻污染特点

近年来,受到地区性气候变迁以及人类活动的影响,全国各地的水资源受富营养化以及藻华问题的影响日益显著且持续深化,肇庆地区也出现这种情况。与往年相比,2023年在原水中持续发现藻类的时间与高峰期的藻密度均大幅上升。2020年在西江原水中没有发现明显藻类,2021年—2023年持续检测出藻类时间分别为10、21、71 d,西江流域肇庆段出现高藻污染的天数呈现持续上升趋势,且通过显微镜发现其优势藻种为直链藻。特别是2023年1月—3月中旬,在原水中长时间连续检测出藻细胞,藻密度峰值约 $1\,000\times 10^4$ 个/L(见图1),按照《水华程度分级与监测技术规程》(DB44/T 2261—2020),藻华污染程度达到Ⅱ~Ⅲ级。

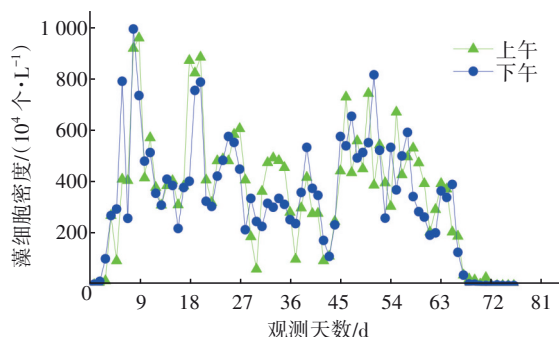


图1 2023年1月—3月中旬原水藻细胞密度

Fig.1 Algal cell density in raw water from January to mid-March in 2023

研究^[1-2]表明,适合的氮磷营养盐、光照、水温及流速等条件有利于藻类繁殖。虽然在藻类暴发期间原水氮、磷等营养盐指标并无异常上升,但自2022年12月以来,肇庆地区干旱少雨,再加上近年来西江流域上游多处修筑水库人为蓄水,导致西江水量降低且流速缓慢,多因素综合影响导致河水水位下降。此外,该流域处于广东省中西部,冬季日照充足且水温偏高(见图2),气候条件适合硅藻生

长。因此,较低的流速、充足的光照与合适的水温共同导致藻类的暴发。

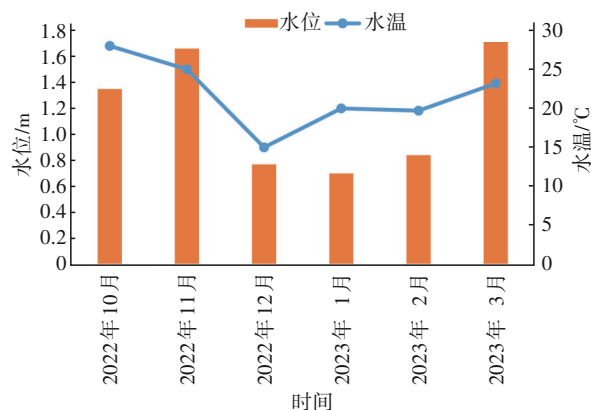


图2 西江流域肇庆段原水水位与水温情况

Fig.2 Water level and temperature of raw water in Zhaoqing section of Xijiang River basin

1.2 对水厂的影响

1.2.1 水厂概况

某自来水处理厂位于肇庆城区西北部,设计处理规模为 30×10^4 m³/d。该厂取水口位于西江干流,根据肇庆市生态环境局2020年—2022年的饮用水源水质公示,该水源属于地表Ⅱ类水。该厂主要工艺流程为絮凝沉淀+过滤+消毒,其中一期为网格絮凝池+斜管沉淀池+虹吸滤池,二期为回转絮凝池+平流沉淀池+V型滤池,三期为网格絮凝池+平流沉淀池+V型滤池,处理规模均为 10×10^4 m³/d。

1.2.2 原水水质变化

原水浊度与pH变化见图3。

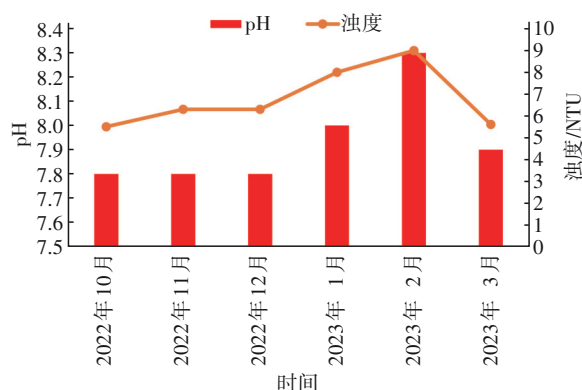


图3 原水浊度与pH的变化

Fig.3 Variation of turbidity and pH of raw water

在藻类暴发期间浊度仍维持在5~11 NTU,西江高藻原水具有低浊度的特征,因此仅加大混凝剂投加量也未必能达到更好的絮凝效果。此外,2023年

1月—2月藻类暴发期原水pH明显升高,最高达到8.3,其原因是藻细胞的光合作用会大量消耗水中的二氧化碳^[3]。原水的pH过高不仅影响矾花的形成进而影响混凝效果,还会使聚氯化铝水解出的氢氧化铝胶体发生反应,生成溶解态的偏铝酸盐,使水中铝浓度升高,从而威胁用水安全^[4]。

1.2.3 对水厂运行的冲击

2023年西江流域肇庆段高藻暴发期间,对西江肇庆段沿线采用常规工艺的自来水厂受影响情况进行调研,统计结果见表1。

表1 西江肇庆段沿线自来水厂受高藻影响情况

Tab.1 Impact of high algae on waterworks along the Zhaoqing section of Xijiang River

| 项目 | 水厂A | 水厂B | 水厂C | 水厂D | 某水厂 |
|--|--------------------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------|----------------------------|
| 2023年暴发期藻密度/(10 ⁴ 个·L ⁻¹) | 平均:500~600;高峰期:约1 000 | 平均:500~600;高峰期:约1 000 | 平均:300~400;高峰期:约800 | 平均:300~500;高峰期:约600 | 高峰期:约1 000 |
| 滤池反冲洗周期/h | 正常周期:24~48;高峰期:虹吸滤池2~3,V型滤池5~6 | 正常周期:24~48;高峰期:V型滤池5~6 | 正常周期:24~48;高峰期:虹吸滤池3~4,V型滤池7~8 | 正常周期:24~48;高峰期:快滤池8 | 正常周期:24~48;高峰期:虹吸滤池3,V型滤池8 |
| 产生的问题 | 滤池堵塞,反洗周期缩短 | 滤池板结,无法运行 | 滤池堵塞,反洗周期缩短 | 滤池堵塞,反洗周期缩短 | 滤池堵塞,反洗周期缩短 |

由表1可知,多座水厂在原水中发现了高密度硅藻,而且严重影响制水效率,这主要体现在滤池反洗周期大幅缩短。对水处理构筑物的影响主要集中在V型滤池和虹吸滤池,虹吸滤池反冲洗周期缩短为2~3 h,V型滤池反冲洗周期缩短为7~8 h,滤池运行时间缩短为正常运行的10%~40%,在高峰期沉淀池甚至出现污染物外溢情况。

与正常时期相比,在高藻暴发期某水厂的聚氯化铝、次氯酸钠用量均有提升,具体药耗见图4。该厂聚氯化铝耗量正常为1.8~2.1 kg/10³ m³,但在2023年1月高藻暴发期间耗量猛增至11.52 kg/10³ m³,次氯酸钠耗量也从12月的13.24 kg/10³ m³升高至15.32 kg/10³ m³。有研究表明,藻细胞表面负电荷与分泌藻源有机物的特性会降低混凝剂的混凝效果^[5]。因此,藻类污染对该厂净水工艺的主要影响是聚铝絮凝效果变差,藻细胞难以彻底沉淀去

除,从而导致后续滤池堵塞以及滤料板结。

综上,原水中藻类的过量繁殖会导致常规的絮凝与沉淀效果变差,并且在过滤过程中藻细胞会黏附在滤砂表面,使过滤周期变短,造成频繁反冲洗,从而影响制水工艺的正常运行,因此亟需采取相应的解决措施。

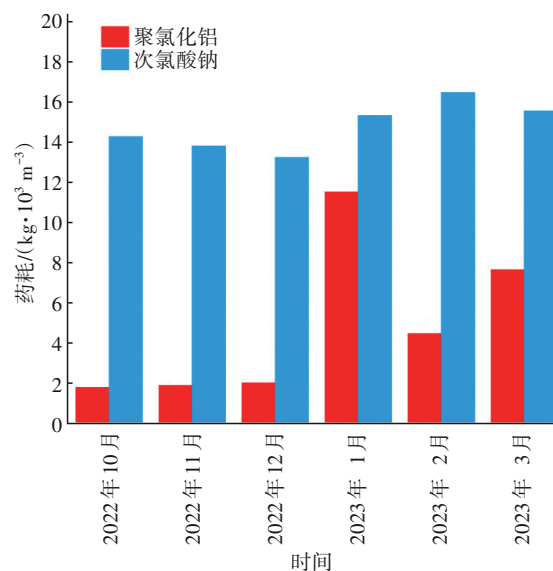


图4 聚氯化铝与次氯酸钠消耗量

Fig.4 Consumption of aluminium chlorohydrate and sodium hypochlorite

2 常用除藻方法及某水厂除藻实践

2.1 常用除藻方法

目前针对淡水蓝藻水华问题,较常用的方法主要分为物理、化学、生物技术三大类。其中,物理法包括机械打捞、气浮法、活性炭吸附、超声波灭藻等^[6-7]。物理法能直接清除水体中的藻类,可以作为藻类大面积暴发时的应急措施,但存在效果期短、治标不治本、使用成本较高等问题。生物法主要使用微生物杀藻^[8],成本较低、不会带来负面效应,但是见效周期较长且易受环境条件影响。化学法包括投加除藻剂、氧化剂以及进行混凝沉淀等^[9-10]。化学法效果好、见效快,是目前水厂最常用的应急手段。其中,高锰酸钾具有高效除藻的特性,能安全去除多种有机物和重金属,同时避免藻细胞的破裂带来二次污染与含氯副产物的产生^[11]。

2.2 某水厂除藻实践

此次高藻污染事发突然且原水藻密度长时间处于高位水平,结合该水厂实际工艺与生产需求,拟采用预氧化、强化混凝与调节pH的方式联合除

藻。高锰酸钾属于危险化学品,对物流、仓储、工艺、相关手续流程等管理要求很高。而高锰酸钾复合盐以高锰酸钾为主剂,通过特殊工艺复配,强化其氧化、催化和吸附等功能,不仅对传统污染物的处理效果更加稳定,还具有较好的超微污染物、环境激素、抗生素去除能力,且采购和管理成本都能大幅降低,更加适合实际生产。聚丙烯酰胺(PAM)是线性高分子聚合物,在减少絮凝剂用量的同时可明显改善水质,是一种成熟的助凝剂。水厂实际生产常采用投加聚合硫酸铁、盐酸、二氧化碳等方式调节 pH 与控铝。相比其他调节方式,投加二氧化碳具有简单方便、效果好、经济性好等优势^[12]。因此,该水厂应急除藻采用高锰酸钾复合盐预氧化、PAM 强化混凝、二氧化碳调节 pH 联用的方式。

2.3 烧杯试验

试验以藻类暴发期的西江水为对象,水样浊度为 8.40 NTU,藻细胞密度为 720×10^4 个/L。分别设置不同浓度梯度的聚氯化铝(9~21 mg/L)、高锰酸钾复合盐(0~0.3 mg/L)、聚丙烯酰胺(0~0.3 mg/L)。根据该水厂实际生产情况,以上试验统一设置混凝搅拌程序为快速混合搅拌 350 r/min,搅拌 1 min;模拟絮凝转速为 80 r/min,搅拌 20 min;模拟沉淀 30 min,以矾花完全沉淀时间、沉淀后浊度以及剩余藻类数量作为评价沉淀效果的标准。试验 1 研究聚铝投药量对除藻效果的影响,结果见表 2。随着聚氯化铝投加量的增加,沉淀后浊度与矾花完全沉淀时间呈现先下降后上升的趋势,除投加量为 21 mg/L 试验组外,其余均未在上清液中检测出藻细胞,投加量为 $15 \text{ kg}/10^3 \text{ m}^3$ 时沉淀效果最好。

表 2 试验 1 设置条件与结果

Tab.2 Setting conditions and results of test one

| 项目 | 试验 1 编号 | | | | |
|---|---------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 聚氯化铝投加量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 |
| 矾花完全沉淀时间/min | 30 | 25 | 25 | 25 | 30 |
| 沉淀后浊度/NTU | 1.60 | 0.77 | 0.62 | 0.87 | 1.18 |
| 剩余藻类/(10^4 个 $\cdot \text{L}^{-1}$) | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 15 |

试验 2 研究在聚氯化铝为 15 mg/L 的最佳投加量下,高锰酸钾复合盐投加量对除藻效果的影响,结果见表 3。沉淀后均未在上清液中检测出藻细胞,但与试验 1 相比,沉淀后浊度均有所降低,说明投加高锰酸钾复合盐使混凝剂混凝效果提高,处理

效果最佳的投药量为 0.1 mg/L。

表 3 试验 2 设置条件与结果

Tab.3 Setting conditions and results of test two

| 项目 | 试验 2 编号 | | | | |
|--|---------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 高锰酸钾复合盐投加量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 0 | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.3 |
| 矾花完全沉淀时间/min | 20 | 25 | 20 | 20 | 30 |
| 沉淀后浊度/NTU | 0.46 | 0.82 | 0.37 | 0.56 | 0.52 |
| 剩余藻类/(10^4 个 $\cdot \text{L}^{-1}$) | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 |

试验 3 研究在聚氯化铝和高锰酸钾复合盐分别为 15、0.1 mg/L 的最佳投加量下,PAM 投加量对除藻效果的影响,结果见表 4。在 PAM 投加量为 0.1 mg/L 时,矾花完全沉淀时间最短,且沉淀后浊度达到最低且矾花颗粒体积最大。因此该水厂的聚氯化铝投加量宜控制在 $15 \text{ kg}/10^3 \text{ m}^3$,高锰酸钾复合盐投加量宜控制在 $0.1 \text{ kg}/10^3 \text{ m}^3$,PAM 投加量宜控制在 $0.1 \text{ kg}/10^3 \text{ m}^3$,在此投药量下能达到最好的净水效果。

表 4 试验 3 设置条件与结果

Tab.4 Setting conditions and results of test three

| 项目 | 试验 3 编号 | | | | |
|--|---------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 聚丙烯酰胺投加量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 0 | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.3 |
| 矾花完全沉淀时间/min | 20 | 20 | 15 | 15 | 15 |
| 沉淀后浊度/NTU | 0.76 | 0.49 | 0.30 | 0.66 | 0.57 |
| 剩余藻类/(10^4 个 $\cdot \text{L}^{-1}$) | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 |

2.4 实际处理效果

采用上述烧杯试验得到的参数对该水厂的生产进行指导,高藻污染期间出厂水各项水质指标正常,且未收到异味投诉。供水量与电耗变化见图 5。

由图 5 可见,仅 2023 年 1 月与 2 月供水量略有下降,单位电耗的变化幅度不大。对除藻工艺优化的效果进行分析,与 1 月相比,2 月和 3 月的聚氯化铝耗量明显下降,说明投加高锰酸钾复合盐和 PAM 能增强聚氯化铝对高藻水的混凝效果,从而节省铝盐混凝剂,降低出厂水铝盐超标的风险。

采取应急除藻措施后,高藻污染对滤池的冲击也得到缓解。该水厂两种滤池的反冲洗周期均得以延长,其中虹吸滤池反冲洗周期恢复至 7 h,V 型滤池反冲洗周期恢复至 12 h。

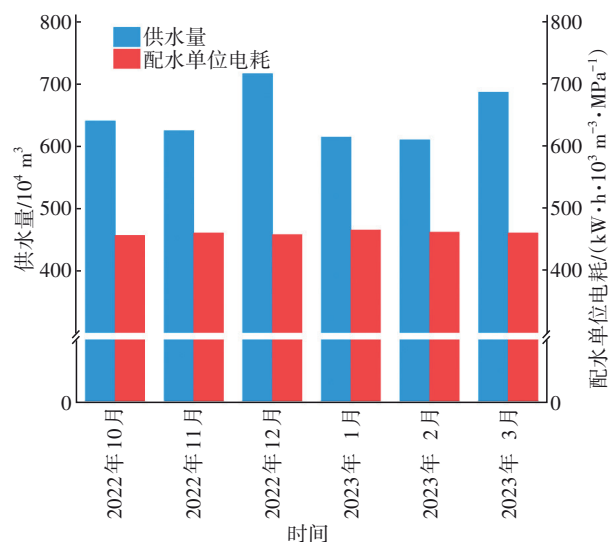


图5 供水量与配水单位电耗

Fig.5 Actual water supply quantity and unit power consumption of water distribution

沉淀池末端藻类密度见图6。偶然在上清液中仍能检测出高浓度硅藻,特别是在一期的网格斜管沉淀池,说明通过预氧化强化混凝的方式对二、三期的优化效果明显优于一期。为应对西江日益严重的高藻污染问题,未来仍需对一期工艺进行更深入的优化调整。

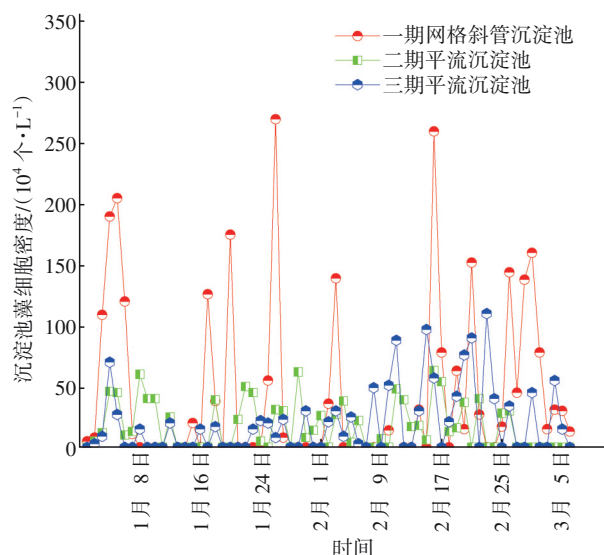


图6 沉淀池的藻细胞密度变化

Fig.6 Variation of algal cell density in sedimentation tanks

此外,2023年1月中旬—2月底发现原水pH异常上升后,该水厂采取投加二氧化碳的应急措施,投加量约为 $3 \text{ kg}/10^3 \text{ m}^3$,pH下降幅度为0.4~0.6,达到了预期效果。

3 结论

① 近年来西江流域肇庆段原水藻华污染日益严重,2023年藻密度峰值达到 $1\,000 \times 10^4$ 个/L,优势藻种为硅藻,并且暴发时间主要集中在冬季,因此未来应加强对原水藻类的监测。

② 高藻污染对水厂产生了多方面的冲击,主要表现在原水pH上升、铝盐浓度超标风险提高、滤池的反洗周期缩短以及混凝剂消耗增加。

③ 针对高藻污染,某水厂采取了预氧化、强化混凝与调节pH的措施。其中,高锰酸钾复合盐投加量宜控制在 $0.1 \text{ kg}/10^3 \text{ m}^3$,PAM投加量宜控制在 $0.1 \text{ kg}/10^3 \text{ m}^3$,二氧化碳投加量约为 $3 \text{ kg}/10^3 \text{ m}^3$,取得了较好的净水效果。

参考文献:

- [1] 王菁,陈家长,孟顺龙. 环境因素对藻类生长竞争的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(17): 52-56.
WANG Jing, CHEN Jiachang, MENG Shunlong. The effect of environmental factors on the growth and competition of algae[J]. Chinese Journal of Agriculture, 2013, 29(17): 52-56(in Chinese).
- [2] 赵颖. 水文、气象因子对藻类生长影响作用的试验研究[D]. 南京:河海大学,2006:4-6.
ZHAO Ying. Experimental Study on the Effects of Hydrological and Meteorological Factors on Algae Growth [D]. Nanjing: Hohai University, 2006: 4-6 (in Chinese).
- [3] 罗肖丽. 地表水中藻类代谢对溶解氧含量及pH值的影响[J]. 广东化工, 2021, 48(21): 138-139.
LUO Xiaoli. The influence of algae metabolism on dissolved oxygen and pH in surface water [J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(21): 138-139 (in Chinese).
- [4] 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. Study on scheme of aluminum reduction suitable for traditional water treatment process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(S2): 23-26(in Chinese).
- [5] 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).
- [6] 赵志红, 李亚妮, 廖婧璇. 洱海蓝藻水华应急控制措施及机械除藻效果初探[J]. 环境科学导刊, 2018, 37(2):33-35.
- ZHAO Zhihong, LI Yani, LIAO Jingxuan. Emergency control measures of cyanobacteria bloom in Erhai Lake and preliminary study on the effect of mechanical removal of algae [J]. Introduction to Environmental Science, 2018,37(2):33-35(in Chinese).
- [7] 刘佩蕊, 洪喻, 谢兴. 藻华防控方法及灭活与捕获新技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(2): 171-185.
- LIU Peirui, HONG Yu, XIE Xing. Research progress on the prevention and control methods of algal bloom and the new technologies for algal capture and inactivation [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(2):171-185(in Chinese).
- [8] 许艳婷, 李祎, 赵国威, 等. 絮凝菌株 *Shinella* sp. xn-1 对铜绿微囊藻的絮凝效果[J]. 微生物学通报, 2017, 44(8):1808-1816.
- XU Yanting, LI Yi, ZHAO Guowei, *et al.* Flocculation effect of *Shinella* sp. xn-1 on *Microcystis aeruginosa* [J]. Microbiology China, 2017, 44(8):1808-1816(in Chinese).
- [9] JANČULA D, MARŠÁLEK B. Critical review of actually available chemical compounds for prevention and management of cyanobacterial blooms [J]. Chemosphere, 2011, 85(9): 1415-1422.
- [10] DONG F, LIU J, LI C, *et al.* Ferrate (VI) pre-treatment and subsequent chlorination of blue-green algae: quantification of disinfection byproducts [J]. Environment International, 2019,133(Pt B):105195.
- [11] 张杰, 臧景红, 刘俊良, 等. 高锰酸钾预氧化替代预氯化的实用性[J]. 中国给水排水, 2002, 18(1):76-78.
- ZHANG Jie, ZANG Jinghong, LIU Junliang, *et al.* Practical research on potassium permanganate pre-oxidation in place of pre-chlorination [J]. China Water & Wastewater, 2002, 18(1):76-78(in Chinese).
- [12] 陈德放, 李梅, 张华军, 等. 投加二氧化碳控制出厂水铝含量的生产性试验[J]. 中国给水排水, 2021, 37(23):9-14.
- CHEN Defang, LI Mei, ZHANG Huajun, *et al.* Control aluminum content in finished water of waterworks by dosing carbon dioxide [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(23):9-14(in Chinese).
-
- 作者简介:植许鋆(1996-),男,广东肇庆人,硕士,主要研究方向为藻华的预警与处理、水处理技术。
- E-mail:13450159786@163.com
- 收稿日期:2023-12-06
- 修回日期:2024-01-11

(编辑:衣春敏)

坚持山水林田湖草沙一体化和系统治理,
构建从山顶到海洋的保护治理大格局