

孙维民, 秦红杰, 张志勇, 等. 双氧水协同凤眼莲去除富营养化水体中高浓度蓝藻的效果[J]. 江苏农业学报, 2023, 39( 1 ): 97-105.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.01.012

## 双氧水协同凤眼莲去除富营养化水体中高浓度蓝藻的效果

孙维民<sup>1,2,3</sup>, 秦红杰<sup>4,5</sup>, 张志勇<sup>2,3</sup>, 张迎颖<sup>2,3</sup>, 陈金峰<sup>4</sup>, 姜智绘<sup>2,3</sup>, 宋雪飞<sup>2,3</sup>

(1. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 江苏 南京 210014; 3. 国家农业环境六合观测实验站, 江苏 南京 210014; 4. 广东省农业科学院环境园艺研究所/广东省园林花卉种质创新综合利用重点实验室, 广东 广州 510640; 5. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室肇庆分中心, 广东 肇庆 526000)

**摘要:** 为了实现蓝藻治理与富营养化水体氮、磷等污染物高效削减的双重目标, 以暴发蓝藻的城市富营养化河道水体为分析对象, 通过模拟试验, 研究  $H_2O_2$  与凤眼莲协同去除水体中高质量浓度蓝藻的效果。 $H_2O_2$  除藻质量浓度阈值探索试验结果显示, 15 mg/L  $H_2O_2$  处理 4 h 后, 蓝藻的光合活性下降了 75%, 24 h 内其活性无明显恢复。 $H_2O_2$  与凤眼莲协同试验结果表明, 在处理后的前 72 h, 单一  $H_2O_2$  处理的除藻效果最好, 在处理 72 h 至处理后 96 h,  $H_2O_2$  与凤眼莲处理的除藻效果最好, 单一凤眼莲处理在试验后 96 h 内无明显除藻效果。研究还发现, 单一  $H_2O_2$  处理的水体  $NO_2^-$ -N、 $NH_4^+$ -N、 $PO_4^{3-}$ -P 质量浓度较对照组显著升高, 可能存在藻华再次暴发的风险。试验后 96 h,  $H_2O_2$  与凤眼莲处理对藻生物量的去除率为 74.58%, 对总氮(TN)、总磷(TP)的去除率分别为 54%、36%。此外, 微生物群落分析结果表明,  $H_2O_2$  与凤眼莲处理对水体中蓝藻的去除效果较显著, 微生物群落多样性较对照显著提高, 由此可见,  $H_2O_2$  协同凤眼莲处理可有效控制蓝藻水华并改善水质。

**关键词:** 双氧水; 凤眼莲; 蓝藻水华; 富营养化; 水体修复

**中图分类号:** X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)01-0097-09

## Effect of hydrogen peroxide combined with *Eichhornia crassipes* on removal of high concentration cyanobacteria in eutrophic water

SUN Wei-min<sup>1,2,3</sup>, QIN Hong-jie<sup>4,5</sup>, ZHANG Zhi-yong<sup>2,3</sup>, ZHANG Ying-ying<sup>2,3</sup>, CHEN Jin-feng<sup>4</sup>, JIANG Zhi-hui<sup>2,3</sup>, SONG Xue-fei<sup>2,3</sup>

(1. School of Environmental and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Environment of Lower Yangtze River Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. National Agricultural Environment Liuhe Observation Experimental Station, Nanjing 210014, China; 4. Environmental Horticulture Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Guangdong Provincial Key Lab of Ornamental Plant Germplasm Innovation and Utilization, Guangzhou 510640, China; 5. Zhaoqing Branch Center of Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agricultural Science and Technology, Zhaoqing 526000, China)

**收稿日期:** 2022-04-02

**基金项目:** 江苏省治太专项资金项目(TH2018403); 国家自然科学基金项目(41877510); 广东省农业科学院创新基金产业专项(202136)

**作者简介:** 孙维民(1996-), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事水体治理研究。(E-mail) 1902454339@qq.com

**通讯作者:** 张志勇, (E-mail) jaaszyzhang@126.com; 秦红杰, (E-mail) hongjieqin111@126.com

**Abstract:** To achieve the dual objectives of cyanobacteria treatment and efficient reduction of pollutants such as nitrogen and phosphorus in eutrophic water, the urban eutrophic river water with cyanobacteria outbreak was taken as the object, and the synergistic removal effect of  $H_2O_2$  and *Eichhornia crassipes* on high concentration cyanobacteria in water was studied through simulation experiment. The experi-

mental results showed that the photosynthetic activity of cyanobacteria decreased by 75% after treatment with 15 mg/L  $H_2O_2$  for four hours, and there was no obvious recovery of its activity within 24 hours. The synergistic experiment of  $H_2O_2$  and *E. crassipes* showed that the algae removal effect of single  $H_2O_2$  treatment was the best in the first 72 hours, from 72 hours to 96 hours, the algae removal effect of  $H_2O_2$ +*E. crassipes* treatment was the best, and the single *E. crassipes* treatment had no obvious algae removal effect in 96 hours. It was found that the concentrations of  $NO_2^-$ -N,  $NH_4^+$ -N,  $PO_4^{3-}$ -P in the water treated with single  $H_2O_2$  were significantly higher than those in the control group, and there may be a risk of algal blooms again. At 96 h after the experiment, the removal rate of algae biomass by  $H_2O_2$ +*E. crassipes* treatment was 74.58%, and the removal rates of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were 54% and 36%, respectively. In addition, the results of microbial community analysis showed that  $H_2O_2$ +*E. crassipes* had a significant removal effect on cyanobacteria in water, and the diversity of microbial community was significantly improved. Therefore,  $H_2O_2$  combined with *E. crassipes* can effectively control cyanobacteria bloom and improve water quality.

**Key words:** hydrogen peroxide; *Eichhornia crassipes*; cyanobacterial bloom; eutrophication; water restoration

随着经济与社会的飞速发展,越来越多富含氮、磷等营养物质的污水流入自然水域中,加速了水体的富营养化进程<sup>[1]</sup>,蓝藻水华的频繁暴发便是其中一个重要表征。同时,由于全球变暖、大气  $CO_2$  浓度逐渐升高等气候原因,蓝藻水华暴发的频率、强度及持续时间均有升高趋势<sup>[2]</sup>。近年来,中国蓝藻水华现象尤为严重,云南滇池、江苏太湖、安徽巢湖蓝藻水华反复暴发<sup>[3]</sup>。2020 年 4 月,中国生态环境部作出重要指示:太湖、巢湖、滇池、洱海、丹江口水库等 5 个重点湖库所在省份,要依照相关规定做好水华的监测预警。自 2007 年江苏无锡等地因太湖蓝藻水华暴发引起居民用水危机以来,江苏省每年投入数百亿元资金用于解决太湖等湖泊的水质问题<sup>[4]</sup>。蓝藻水华不仅会破坏水体生态环境、危害水生生物安全,还会直接或间接威胁人类健康<sup>[5]</sup>,对蓝藻水华的防控已经成为全球广泛关注的热点问题之一。

为了有效防控蓝藻水华,诸多治理方法与技术应运而生,主要包括物理法、化学法和生物法 3 大类<sup>[6]</sup>。物理法主要有机械法、气浮法、遮光法、高频电磁脉冲法、黏土絮凝法、稀释冲刷法等<sup>[7]</sup>,其成本低、见效快,但处理能力有限、耗时耗力、治标不治本。化学法依靠投放各种化学试剂进行控藻,常用的除藻剂有高锰酸钾、硫酸铜、二氧化氯等,虽然效果立竿见影,但存在一定的生态安全风险<sup>[8]</sup>。例如,氯化过程会形成“三致”物质等有害副产物<sup>[9]</sup>。双氧水( $H_2O_2$ )是一种化学氧化剂,地表水体及其中的有机生物体均含有低浓度的  $H_2O_2$ ,因其分解产物( $H_2O$  和  $O_2$ )具有无毒害、不引入新的污染物等优点,逐渐被用于蓝藻水华的应急消杀,并受到较多关注。 $H_2O_2$  除藻的原理主要是破坏胞内色素合成、损伤超微结构、抑制光合作用等<sup>[10]</sup>。研究发现, $H_2O_2$

对蓝藻的抑制效果优于对其他浮游藻类的抑制效果,如 Drábková 等<sup>[11]</sup>发现,绿藻和硅藻受到  $H_2O_2$  影响的最低浓度比蓝藻高 10 倍;Matthijs 等<sup>[12]</sup>发现, $H_2O_2$  对蓝藻具有高效、选择性的抑制作用,2 mg/L  $H_2O_2$  能导致蓝藻死亡,且目前未发现  $H_2O_2$  对其他真核藻类、浮游动物生长有显著影响。然而, $H_2O_2$  致使蓝藻死亡后其细胞发生裂解,藻细胞中的氮、磷等营养物质释放至水体中,水体中的氮、磷等营养负荷未得到根本性改变,当环境条件适宜后,仍存在再次暴发蓝藻水华的风险。因此,最根本有效的除藻方法是削减水体中氮、磷等营养负荷。

水生植物控藻作为一种重要的生物控藻方法,因其经济、安全、可逐渐恢复水体自净能力等优势而被广泛应用于藻型富营养化水体的治理<sup>[13]</sup>。凤眼莲又称水葫芦,是一种多年生漂浮植物,其耐污能力强,通过其浓密发达根系的拦截吸附作用、根系化感作用、茎叶遮光作用等可高效抑制蓝藻水华<sup>[14]</sup>。同时,凤眼莲可高效吸收和富集氮、磷等营养盐<sup>[15]</sup>并降低藻毒素等有害物质的释放速度<sup>[16]</sup>。此外,随着凤眼莲控养技术、打捞技术和资源化利用技术的日臻成熟,凤眼莲过度泛滥引发生态危机的风险得到了有效规避<sup>[17]</sup>。

因此,本研究协同利用应急除藻( $H_2O_2$  除藻)与长效除藻(水生植物控藻)2 种技术,通过该协同模式进行优势互补,以期在实现蓝藻快速消杀的同时,实现水体氮、磷等营养物质的高效削减,从而达到蓝藻水华防控与水质净化的双重目标,为  $H_2O_2$  和凤眼莲用于蓝藻水华控制和水体修复提供借鉴和参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料来源

本试验用发生蓝藻水华的水体于 2020 年 9 月

采集于江苏省农业科学院内的一条河道,该河道主要承接上游紫金山降雨径流和商业区部分生活污水,因水体流动性较差、富营养化程度高等原因,河道经常暴发蓝藻水华,经检测水体中叶绿素 a 质量

浓度高达  $1.40 \mu\text{g/ml}$ ,绝对优势藻为微囊藻 (*Microcystis* spp.),占藻类生物量的 95% 以上,河道水体的水质指标见表 1。

表 1 供试蓝藻水华水体的水质指标

Table 1 Water quality index of water with cyanobacterial bloom

气温波动 ( $^{\circ}\text{C}$ )	平均水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH 值	溶解氧(DO) 质量浓度( $\text{mg/L}$ )	叶绿素 a 质量 浓度( $\mu\text{g/ml}$ )	总氮质量 浓度( $\text{mg/L}$ )	总磷质量 浓度( $\text{mg/L}$ )
15~34	$28.40 \pm 1.10$	$8.54 \pm 0.57$	$5.58 \pm 0.37$	1.40	$10.52 \pm 0.16$	$1.06 \pm 0.02$

凤眼莲取自江苏省农业科学院水生植物种植基地,选取生长良好、大小相近的植株,试验前去除茎叶、根系中的杂质,放置于室温下,在自来水中暂养 7 d 备用。本试验所用  $\text{H}_2\text{O}_2$  (30%) 为分析纯,购于天津市大茂化学试剂厂。

## 1.2 试验设计

1.2.1  $\text{H}_2\text{O}_2$  阈值试验 分别将 200 ml 蓝藻水华水体分装至 24 个容量为 250 ml 的玻璃烧杯中,烧杯底部和外周用锡箔纸包裹。试验设置 0 mg/L、2 mg/L、4 mg/L、6 mg/L、8 mg/L、10 mg/L、15 mg/L、30 mg/L 等 8 个  $\text{H}_2\text{O}_2$  质量浓度处理,每组处理设置 3 个平行。试验在智能光照培养箱中进行,光照度 5 000 lx,温度  $25^{\circ}\text{C}$ ,光周期 12 h(日)/12 h(夜)。分别在试验 2 h、4 h、8 h、12 h、24 h 时测定各处理组蓝藻的光合活性、叶绿素 a 质量浓度,根据各处理组蓝藻的光合活性和叶绿素 a 质量浓度的变化,确定  $\text{H}_2\text{O}_2$  除藻的最佳质量浓度阈值。

1.2.2  $\text{H}_2\text{O}_2$  协同凤眼莲除藻试验 基于上述试验结果,明确适宜除藻的  $\text{H}_2\text{O}_2$  质量浓度,开展凤眼莲与  $\text{H}_2\text{O}_2$  的协同试验。分别将 1.5 L 蓝藻水华水样摇匀后分装至 12 个容量为 2 L 的烧杯中,设置 4 个不同处理组:对照组(仅有藻华水样)、 $\text{H}_2\text{O}_2$  组、凤眼莲组、凤眼莲+ $\text{H}_2\text{O}_2$  组,每个处理设置 3 个平行。将同一批长势良好的凤眼莲用纯净水(RO)冲洗干净,去除根系上附着的颗粒杂质,凤眼莲起始生物量为每烧杯 100 g。将各处理组置于培养箱中,光照度为 5 000 lx,温度为  $25^{\circ}\text{C}$ ,光周期为 12 h(日)/12 h(夜)。分别在处理 0 h、2 h、4 h、8 h、12 h、24 h、48 h、72 h、96 h 测定各处理组中蓝藻的光合活性,并取样用于测定不同水质指标,同时用玻璃纤维滤纸(GF/C)滤膜和醋酸纤维滤膜抽滤水样,用于测定叶绿素 a 的质量浓度和微生物多样性。

## 1.3 检测指标

水质检测。用多参数水质分析仪(哈希, HQ40D, 美国)测定起始溶解氧(DO)质量浓度和 pH 值;水样总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )等质量浓度用紫外分光光度计(菲勒, D-8PC, 中国)测定。

叶绿素 a 质量浓度的测定。用 GF/C 滤膜过滤 30 ml 水样,在过滤后获得的蓝藻中加入 95% 乙醇并用匀浆器捣碎,转入 10 ml 离心管中,再将其放入  $4^{\circ}\text{C}$  冰箱中,在黑暗条件下静置 12 h,之后离心并收集上清液,用紫外分光光度计(菲勒, D-8PC, 中国)测定叶绿素 a 的质量浓度<sup>[18-19]</sup>。

采用便携式水体叶绿素荧光仪(AquaPen AP100)在室温下测定藻细胞的光合活性,用光合参数 PSII 最大光化学量子产量( $F_v/F_m$ )表征藻细胞的光合活性,当藻类生长受到抑制时,其值会显著下降。

微生物分析。将用于分析的微生物样品送至南京集思慧远生物科技股份有限公司,通过 16S 微生物多样性测序分析,检测水体中微生物群落的变化。

## 1.4 绘图与统计

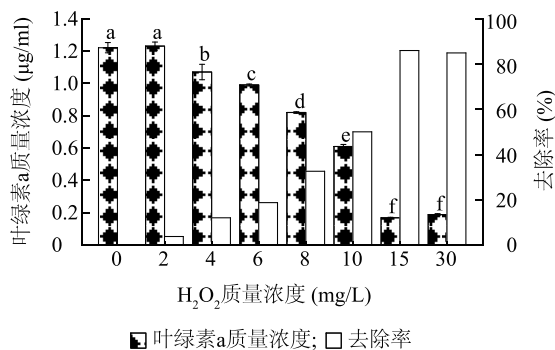
将本研究中所获得数据经 Excel 2007 进行处理后,使用软件 Origin 2018 进行绘图,用 IBM SPSS22 进行组间差异分析, $P < 0.05$  表示具有显著差异。

# 2 结果与分析

## 2.1 $\text{H}_2\text{O}_2$ 除藻的质量浓度阈值

处理 96 h 后,不同质量浓度  $\text{H}_2\text{O}_2$  对水体中叶绿素 a 的去除效果如图 1 所示,低质量浓度  $\text{H}_2\text{O}_2$  对群体蓝藻叶绿素 a 的去除率并不高;当  $\text{H}_2\text{O}_2$  质量浓度  $> 2 \text{ mg/L}$  时,水体中叶绿素 a 的质量浓度随着与  $\text{H}_2\text{O}_2$  接触时间的增加而明显下降。当  $\text{H}_2\text{O}_2$  质量浓度为 15 mg/L 时,叶绿素 a 的质量浓度最低,为 0.17

$\mu\text{g/ml}$ 。此外,15 mg/L、30 mg/L  $\text{H}_2\text{O}_2$  对叶绿素 a 的去除率无明显差异,去除率分别为 88%、87%。

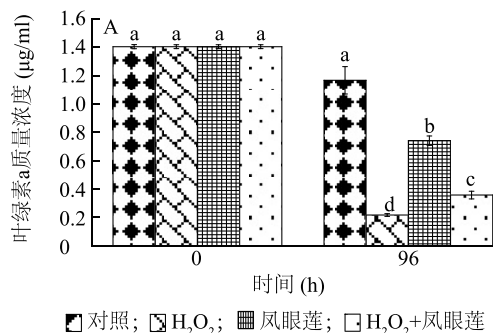


不同  $\text{H}_2\text{O}_2$  质量浓度处理间标有不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 1 叶绿素 a 质量浓度的变化

Fig.1 Change of chlorophyll a concentration

如图 2 所示,当用质量浓度大于 4 mg/L 的  $\text{H}_2\text{O}_2$  处理 2 h 后,可显著抑制蓝藻细胞的光合活性 ( $P < 0.05$ ),并且随着  $\text{H}_2\text{O}_2$  质量浓度的升高,抑制效果越明显。当  $\text{H}_2\text{O}_2$  质量浓度超过 15 mg/L 时,蓝藻细胞的光合活性稳定在较低水平,显著低于相同处理时间  $\text{H}_2\text{O}_2$  质量浓度  $< 15$  mg/L 的处理组 ( $P < 0.05$ ),且 24 h 内无反弹。基于此,选择 15 mg/L  $\text{H}_2\text{O}_2$  作为本研究中应急处理池塘藻华的适宜  $\text{H}_2\text{O}_2$  质量浓度阈值。

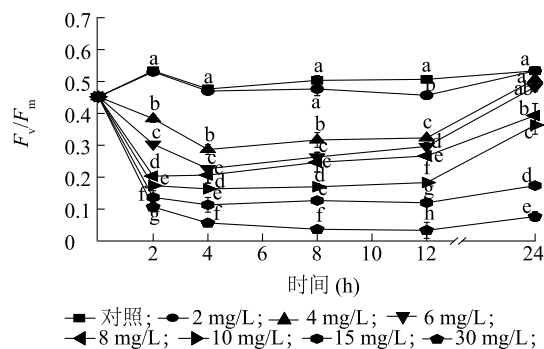


A: 叶绿素 a 质量浓度; B: 蓝藻去除率(用叶绿素 a 质量浓度表征水体中蓝藻的生物量)。不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 3 处理 96 h 后各处理组水体中叶绿素 a 质量浓度及蓝藻去除率

Fig.3 Concentration of chlorophyll a and removal rate of cyanobacteria in water after 96 h treatment

2.2.2 蓝藻细胞光合活性的变化 在上述研究的基础上,用 15 mg/L  $\text{H}_2\text{O}_2$  与凤眼莲协同去除蓝藻。如图 4 所示,与对照相比,在单一  $\text{H}_2\text{O}_2$  处理 12 h 内,蓝藻细胞的光合活性被显著抑制 ( $P < 0.05$ ),4 h 后蓝藻细胞的光合活性接近 0.1,24 h 后蓝藻细胞的光合活性逐渐恢复。在用单一  $\text{H}_2\text{O}_2$  处理 96 h 后,藻细胞的光合活性仍显著高



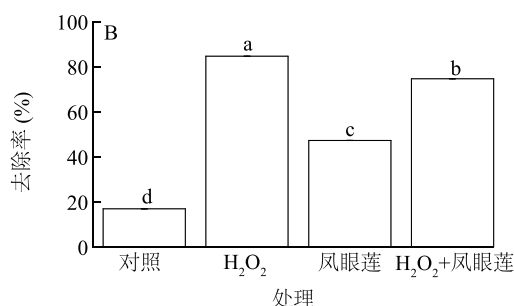
同一时间的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 2 不同质量浓度  $\text{H}_2\text{O}_2$  对蓝藻细胞光合活性 ( $F_v/F_m$ ) 的影响

Fig.2 Photosynthetic activity changes of algal cells response to different concentrations of  $\text{H}_2\text{O}_2$

## 2.2 双氧水协同凤眼莲去除蓝藻的效果

2.2.1 蓝藻生物量的变化 本研究选择叶绿素 a 质量浓度表征水体中蓝藻的生物量。如图 3 所示,蓝藻水华水体中的叶绿素 a 的初始质量浓度为 1.4  $\mu\text{g/ml}$ ;处理 96 h 后,各处理组的叶绿素 a 质量浓度均下降,显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ), $\text{H}_2\text{O}_2$  处理组的叶绿素 a 质量浓度最低,为 0.22  $\mu\text{g/ml}$ 。与初始值相比,处理 96 h 后  $\text{H}_2\text{O}_2$  组、凤眼莲组、 $\text{H}_2\text{O}_2$  + 凤眼莲组的叶绿素 a 去除率分别为 84.62%、47.22%、74.58%,去除效果表现为  $\text{H}_2\text{O}_2 > \text{H}_2\text{O}_2 + \text{凤眼莲} > \text{凤眼莲}$ 。



于对照组 ( $P < 0.05$ )。与对照组相比,单一凤眼莲处理的蓝藻细胞光合活性在处理 96 h 内整体无显著差异, $\text{H}_2\text{O}_2$  + 凤眼莲处理组的蓝藻细胞光合活性在处理 96 h 内均显著低于对照组。在处理的前 72 h,单一  $\text{H}_2\text{O}_2$  处理的抑制效果最好,处理 72 h 后至处理 96 h, $\text{H}_2\text{O}_2$  + 凤眼莲处理的抑制效果最好。



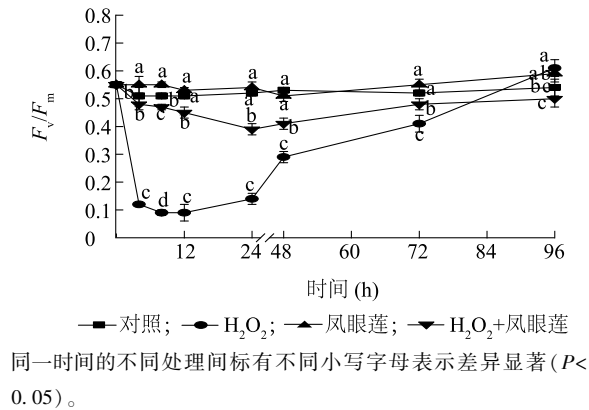
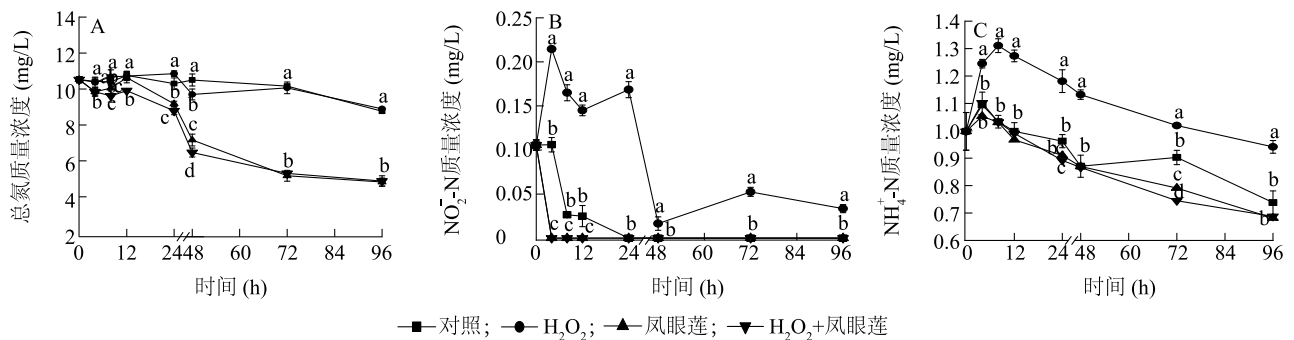


图4 各处理组蓝藻细胞光合活性( $F_v/F_m$ )的变化

Fig.4 Changes of photosynthetic activity of algal cells in each treatment group



A:总氮质量浓度;B: $\text{NO}_2\text{-N}$ 质量浓度;C: $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度。同一时间的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

图5 水体中不同形态氮质量浓度的变化

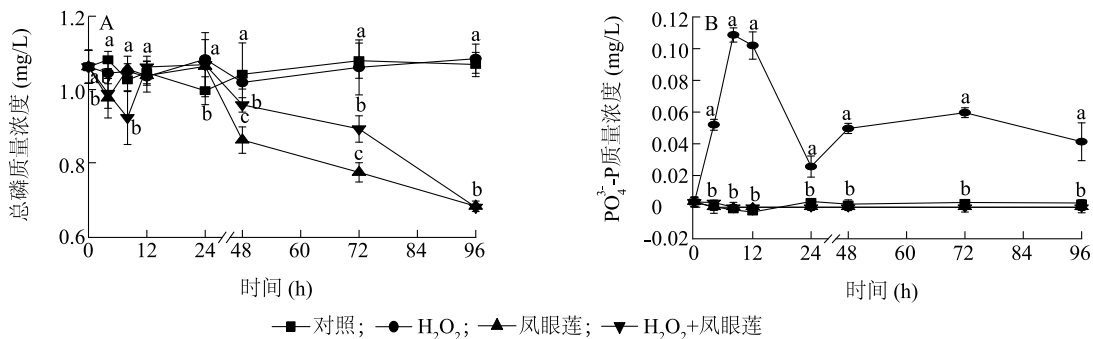
Fig.5 Changes of concentration of different forms of nitrogen in water

2.3.2 水体磷的去除效果 如图6A所示,凤眼莲组和 $\text{H}_2\text{O}_2$ +凤眼莲组中的TP质量浓度整体上随时间的推进而逐渐降低,处理96 h后,这2个试验组对水体磷的去除率都约为36%, $\text{H}_2\text{O}_2$ 组与对照组相比无显著差异。由图6B可以看出,对照组、凤眼莲

## 2.3 双氧水协同凤眼莲去除水体中氮、磷的效果

2.3.1 水体氮的去除效果 与对照组相比, $\text{H}_2\text{O}_2$ 组对TN的去除效果不明显,而凤眼莲组、 $\text{H}_2\text{O}_2$ +凤眼莲组对TN的去除效果都较明显(图5A),处理96 h时这2组对TN的去除率都约为54%。凤眼莲组、 $\text{H}_2\text{O}_2$ +凤眼莲组的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 质量浓度在处理开始后呈下降趋势,处理2 h后接近0并且后续无波动; $\text{H}_2\text{O}_2$ 组的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 质量浓度与对照组相比有显著升高( $P < 0.05$ ),在处理4 h达到最大值(0.21 mg/L),为对照组的1.98倍(图5B)。各处理组的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度在处理4 h内均有一定升高,之后慢慢降低,但 $\text{H}_2\text{O}_2$ 组的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度一直显著高于其他处理组( $P < 0.05$ )(图5C)。

组及 $\text{H}_2\text{O}_2$ +凤眼莲组水体中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的质量浓度在整个试验周期内均很低,处于检测线附近; $\text{H}_2\text{O}_2$ 组水体中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度显著高于对照组( $P < 0.05$ ),其最大值为0.11 mg/L。



A:总磷质量浓度;B: $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度。同一时间的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

图6 水体中不同形态磷质量浓度的变化

Fig.6 Changes of concentration of different forms of phosphorus in water

## 2.4 双氧水协同凤眼莲对水体中微生物多样性的影响

通过分析几种常见的微生物多样性指标,得到各处理组微生物群落中物种的相对丰度和多样性等信息。由表 2 可以看出, $H_2O_2$ +凤眼莲处理组(WH+ $H_2O_2$ )的 Chao、Shannon 指数均显著高于其他处理组( $P<0.05$ ),在  $H_2O_2$ +凤眼莲处理下,微生物多样性指数最高,表明在本试验条件下, $H_2O_2$ +凤眼莲协同模式对水体中微生物的生长繁殖最有利。

如图 7A、图 7B 所示,试验处理前(CKT0),水体中以蓝藻(Cyanobacteria)为主,相对丰度为 37%,其中 *Microcystis* PCC-7914 属占 38%;试验结束时对照组(CKT96)蓝藻的相对丰度为 35%,为优势菌, $H_2O_2$ 组( $H_2O_2$ )中蓝藻的相对丰度仅为 2%,变形杆菌(Proteobacteria)的数量激增,成为优势菌,相对丰

度为 51%,凤眼莲处理组(WH)蓝藻的相对丰度为 49%,*Microcystis* PCC-7914 属的相对丰度为 30%。与对照(CKT96)相比, $H_2O_2$ +凤眼莲处理组(WH+ $H_2O_2$ )蓝藻的相对丰度有所降低,约为 26%。

表 2 水体中微生物群落多样性指数

Table 2 Microbial community diversity index in water

处理	Chao 指数	Shannon 指数	Simpson 指数
CKT0	3 366.85b	6.27c	0.93b
CKT96	3 591.56b	7.85b	0.97a
$H_2O_2$	3 526.11b	7.71b	0.97a
WH	3 739.58b	6.68c	0.93b
$H_2O_2$ +WH	4 579.22a	8.39a	0.97a

CKT0: 试验起始阶段对照组; CKT96: 试验结束阶段对照组;  $H_2O_2$ :  $H_2O_2$ 处理组; WH: 凤眼莲处理组;  $H_2O_2$ +WH:  $H_2O_2$ +凤眼莲处理组。同列数据后标有不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

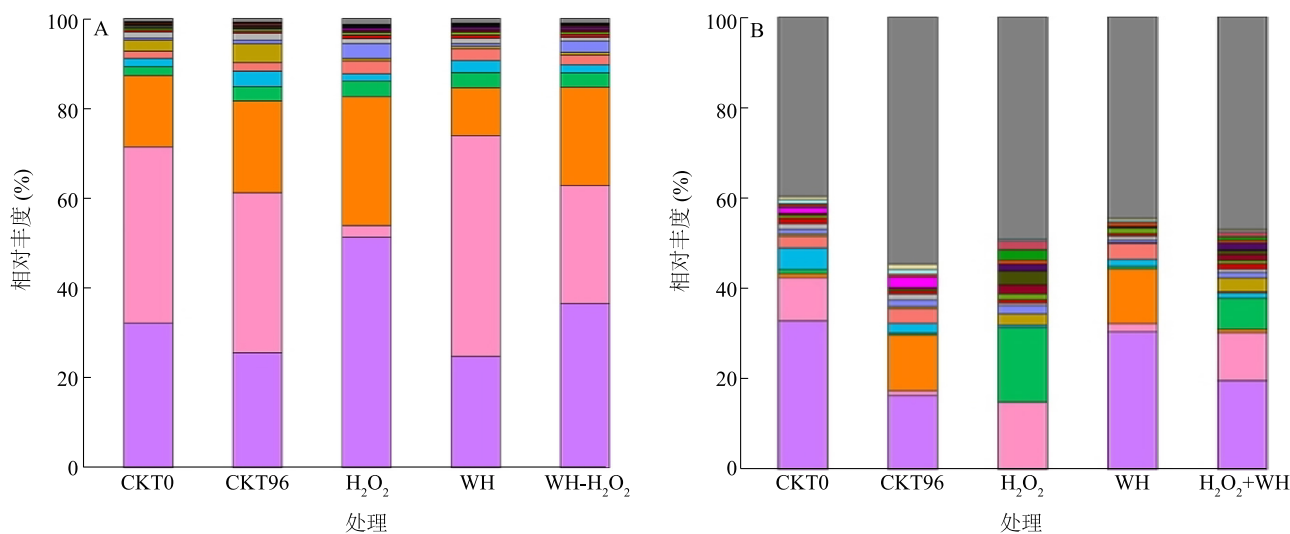


图7A中, Proteobacteria; Cyanobacteria; Bacteroidetes; Acidobacteria; Planctomycetes; Chloroflexi; Actinobacteria; Firmicutes; Gemmatimonadetes; Latescibacteria; Spirochaetes; Caldritrichaeota; Armatimonadetes; Nitrospirae; Rokubacteria; Verrucomicrobia; Omnitrophicaeota; Zixibacteria; Fibrobacteres; TA06; 其他  
图7B中, *Microcystis* PCC-7914; *Flavobacterium*; *Sphaerospermopsis* BCCUSP55; *Paucibacter*; *Roseomonas*; *Planktothricoides* SR001; *Comamonas*; *Rhodobacter*; *Azohydromonas*; *Leptothrix*; *Niveispirillum*; *Hydrogenophaga*; *Rheinheimera*; hgcl clade; *Flectobacillus*; *Thiobacillus*; *Bacillus*; *Pseudomonas*; *Gemmatimonas*; *Cyanobium* PCC-6307; 其他

A: 微生物门水平相对丰度; B: 微生物属水平相对丰度。CKT0: 试验起始阶段对照组, CKT96: 试验结束阶段对照组;  $H_2O_2$ :  $H_2O_2$ 处理组; WH: 凤眼莲处理组;  $H_2O_2$ +WH:  $H_2O_2$ +凤眼莲处理组。

图 7 各处理水体中微生物群落的变化

Fig.7 Changes of microbial community in water under different treatments

## 3 讨论

### 3.1 $H_2O_2$ 除藻效果及最佳阈值的选择

叶绿素 a 是计算浮游植物生物量的重要指标<sup>[20-21]</sup>,本研究以叶绿素 a 质量浓度来表征水体中

蓝藻的生物量。有研究发现, $H_2O_2$ 质量浓度越大,越有利于去除藻细胞<sup>[22]</sup>。本研究发现,随着  $H_2O_2$ 质量浓度的升高, $H_2O_2$ 对蓝藻的抑制效果越强。试验结果表明,添加  $H_2O_2$ 处理 24 h 后,叶绿素 a 的质量浓度有明显变化,当  $H_2O_2$ 质量浓度 $<8$  mg/L 时,

$H_2O_2$ 对叶绿素 a 的去除率并不高,为13%~29%;随着  $H_2O_2$  质量浓度的进一步升高,水体中的叶绿素 a 质量浓度逐渐降低,最低值出现在 15 mg/L  $H_2O_2$  质量浓度组,仅为 0.17  $\mu\text{g}/\text{ml}$ ;此外,15 mg/L、30 mg/L  $H_2O_2$  对叶绿素 a 的去除率分别为 88%、87%,无明显差异。 $F_v/F_m$  常用来代表蓝藻 PS II 光合系统的活性,在本研究中,从对蓝藻细胞光合活性的抑制效果来看,当  $H_2O_2$  质量浓度>15 mg/L时,蓝藻的光合活性显著降低, $F_v/F_m$  趋于 0,且 24 h 内不会恢复。由此可见,添加  $H_2O_2$  能在短期内快速有效地去除蓝藻,主要有以下 2 个原因:一是  $H_2O_2$  可以释放羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ ),这种活性氧有极强的氧化能力,与蓝藻细胞接触后会导致细胞受损、藻蓝素脱落,使得蓝藻细胞的正常生长受到严重影响<sup>[23]</sup>;二是  $H_2O_2$  分子的膜穿透性很强,可快速渗入蓝藻细胞,且  $H_2O_2$  对蓝藻的毒性要远高于其他浮游植物。本研究通过微生物群落分析也发现,单一  $H_2O_2$  对蓝藻的去除效果非常好,在试验末期  $H_2O_2$  处理组中蓝藻的相对丰度仅为 2%,去除率高达 94%。

然而, $H_2O_2$  质量浓度过高时可增加藻细胞内容物如藻毒素的释放风险<sup>[24]</sup>。有研究发现,当水体中  $H_2O_2$  质量浓度为 50 mg/L 时,能够有效去除甲藻(*Alexandrium*),而对鱼类和大型无脊椎动物的影响很小,对环境的破坏很小,且水中的  $H_2O_2$  残留量很快就会衰减<sup>[25]</sup>。通过对最佳阈值的分析发现,15 mg/L、30 mg/L  $H_2O_2$  不仅可以高效抑制蓝藻水华,而且比以往研究中使用的质量浓度要低,安全性更好,且 15 mg/L  $H_2O_2$  的杀藻能力较强,24 h 内光合活性下降了 93%,叶绿素 a 去除率为 88%,与 30 mg/L  $H_2O_2$  组没有明显差异,所以用 15 mg/L  $H_2O_2$  进行后续试验。

### 3.2 $H_2O_2$ 协同风眼莲的除藻效果

试验结果表明,处理 96 h 后,单一  $H_2O_2$  (15 mg/L) 处理组的叶绿素 a 质量浓度仅为 0.22  $\mu\text{g}/\text{ml}$ ,去除率达 84.62%, $H_2O_2$  (15 mg/L) + 风眼莲处理组的叶绿素 a 质量浓度为 0.36  $\mu\text{g}/\text{ml}$ ,去除率为 74.58%。而单一风眼莲组的叶绿素 a 的质量浓度仍然很高,为 0.74  $\mu\text{g}/\text{ml}$ ,蓝藻的相对丰度为 49%。结合各处理组对蓝藻细胞光合活性的抑制效果来看,不同处理组对蓝藻的去除效果表现为前 72 h 内  $H_2O_2$  处理组的除藻效果最好,72~96 h  $H_2O_2$  + 风眼莲处理组的除藻效果最好,风眼莲处理组在处

理 96 h 内无明显除藻效果,这主要是因为  $H_2O_2$  与含藻水体反应的过程是一个产生和捕获  $\cdot\text{OH}$  的动态平衡过程<sup>[26]</sup>, $H_2O_2$  在水体中是逐渐降解的,随着试验的进行,其抑藻能力逐渐下降。陈超等<sup>[27]</sup>发现,初始藻细胞质量浓度对  $H_2O_2$  控藻效果影响较大,细胞质量浓度越大, $H_2O_2$  降解率越高,当初始藻质量浓度为 100  $\mu\text{g}/\text{L}$  时,5 mg/L  $H_2O_2$  可以在 48 h 内完全降解藻细胞。然而,风眼莲对水体中藻类的去除主要通过根系吸附与拦截、化感作用抑制、遮光控制生长等途径<sup>[28]</sup>,是一个缓慢生效的过程。杨小杰等<sup>[16]</sup>研究发现,与风眼莲一同培养的铜绿微囊藻细胞在培养 4 d 后出现萎缩现象。

虽然  $H_2O_2$  有强大的除藻能力,但它的安全性一直是人们所关注的,本研究结果显示,在添加  $H_2O_2$  的处理组中,大量蓝藻细胞受到氧化胁迫而死亡甚至裂解,引起胞内营养物质释放,短时间内水体中  $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的质量浓度有较大波动,这与  $H_2O_2$  处理微囊藻后引起水体可溶性总氮(TDN)、可溶性总磷(TDP)积累<sup>[29]</sup>的结果相吻合。有研究发现,蓝藻在死亡裂解过程中会向水体释放大量营养物质<sup>[30]</sup>。当水中  $\text{NO}_2^--\text{N}$  的质量浓度积累到 0.1 mg/L 时, $\text{NO}_2^--\text{N}$  将对水体中养殖的鱼类、虾类产生危害<sup>[31]</sup>。使用  $H_2O_2$  后可溶性氮、磷质量浓度升高的原因可能有 2 个:一是  $H_2O_2$  会氧化破坏蓝藻细胞,使胞内物质释放至水体中,在微生物作用下矿化或者氧化成不同形态的氮素、磷素,导致水体中可溶性氮、磷质量浓度升高<sup>[32]</sup>;二是由于蓝藻细胞的光合活性受到抑制,其生理状态不佳,减少了对水体中营养盐的利用<sup>[27]</sup>。

单独使用  $H_2O_2$  对水体中蓝藻的去除效果较  $H_2O_2$  + 风眼莲协同使用的效果好,但是用  $H_2O_2$  处理后短时间内水体中的可溶性氮、磷质量浓度均有数倍增长,存在一定的安全风险。而用  $H_2O_2$  + 风眼莲协同处理后,水体中各种形态的氮、磷均维持在较低水平,这是因为风眼莲除了对水体氮素的吸收和富集能力突出外,还可以促进水体的硝化、反硝化脱氮作用<sup>[33]</sup>。同位素示踪试验研究结果表明,风眼莲可以吸收转化 80% 以上蓝藻释放的氮素<sup>[34]</sup>。本研究结果表明, $H_2O_2$  + 风眼莲协同处理对 TN、TP 的去除率分别为 54%、36%。由于风眼莲对藻细胞死亡裂解外泄营养物质具有高效削减作用,未发生可溶性氮、磷质量浓度升高的现象。张迎颖等<sup>[35]</sup>的研究发

现,在蓝藻水华暴发期间,凤眼莲可以通过密集根系捕获蓝藻并吸收利用其衰亡所释放的磷素。

## 4 结 论

本研究探讨了  $\text{H}_2\text{O}_2$  与凤眼莲协同处理对蓝藻水华水体除藻与水质修复的效果,明确了  $15\text{ mg/L}$   $\text{H}_2\text{O}_2$  可设置为有效抑制蓝藻水华的质量浓度,但是单独使用  $\text{H}_2\text{O}_2$  除藻易引发水体中可溶性氮、磷 ( $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P) 质量浓度的急剧升高,不能从根本上改善水质,蓝藻水华暴发的风险依然存在,建议用作应急处理。单一凤眼莲短期除藻能力较弱, $\text{H}_2\text{O}_2$  + 凤眼莲处理在整个试验过程中都能很好地抑制蓝藻生长。 $\text{H}_2\text{O}_2$  与凤眼莲协同作用可以有效去除蓝藻和削减水体中的氮、磷,微生物群落多样性也有升高,能从根本上改善水质。

## 参考文献:

- [1] 刘旻慧,闻学政,张志勇,等. 生物浮岛与漂浮植物对开放池塘水质净化效果[J]. 水生生物学报, 2017, 41(6): 1318-1326.
- [2] HO J C, MICHALAK A M, PAHLEVAN N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s[J]. Nature, 2019, 574(7780): 667-670.
- [3] 张振华,高 岩,郭俊尧,等. 富营养化水体治理的实践与思考——以滇池水生植物生态修复实践为例[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(1): 129-135.
- [4] 童克难. “十年治太”成效与流域氮磷污染变化特征解析[N]. 中国环境报, 2020-07-09(04).
- [5] 张 民,史小丽,阳 振,等. 太湖和巢湖中微囊藻 (*Microcystis*) 与长孢藻 (*Dolichospermum*) 的长时序变化及其驱动因子[J]. 湖泊科学, 2021, 33(4): 1051-1061.
- [6] 邓 莎,周 键. 蓝藻水华的危害及主要控制技术研究进展[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(18): 150-151, 198.
- [7] 赵 芳. 基于海绵城市理念的公园建设研究——以武汉韵湖公园为例[C]//《工业建筑》杂志社有限公司.《环境工程》2019 年全国学术年会论文集(下册), 2019: 41-43, 71.
- [8] 李宝磊,刘 舒,曾 乐,等. 我国污染河流治理与修复技术现状[J]. 科技创新与应用, 2020(1): 137-138.
- [9] 洪 喻,胡洪营. 水生植物化感抑藻作用研究与应用[J]. 科学通报, 2009, 54(3): 287-293.
- [10] BARRINGTON D J, GHADOUANI A. Application of hydrogen peroxide for the removal of toxic cyanobacteria and other phytoplankton from wastewater[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(23): 8916-8921.
- [11] DRÁBKOVÁ M, ADMIRAAL W, MARSÁLEK B. Combined exposure to hydrogen peroxide and light-selective effects on cyanobacteria, green algae, and diatoms[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(1): 309-314.
- [12] MATTHIJS H C P, VISSER P M, REEZE B, et al. Selective suppression of harmful cyanobacteria in an entire lake with hydrogen peroxide[J]. Water Research, 2012, 46(5): 1460-1472.
- [13] 陈志超,张志勇,刘海琴,等. 4 种水生植物除磷效果及系统磷迁移规律研究[J]. 南京农业大学学报, 2015, 38(1): 107-112.
- [14] HASIBUAN A A, YUNIATI R, WARDHANA W, et al. The growth rate and chlorophyll content of water hyacinth under different type of water sources[J]. Iop Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 902(1): 012064.
- [15] 洪昌红,曾焯翀,邱 静,等. 不同覆盖度水葫芦对藻类水华的抑制效应研究[J]. 广东水利水电, 2020, 297(11): 25-29.
- [16] 杨小杰,韩士群,唐婉莹,等. 凤眼莲对铜绿微囊藻生理、细胞结构及藻毒素释放与削减的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(2): 376-382.
- [17] 秦红杰,张志勇,刘海琴,等. 两种漂浮植物的生长特性及其水质净化作用[J]. 中国环境科学, 2016, 36(8): 2470-2479.
- [18] 徐 黎,路荣昭,施定基. 蓝藻叶绿素 a 提取方法的比较[J]. 植物学通报, 1988(4): 246-249.
- [19] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [20] WANG B L, SONG Q Y, LONG J J, et al. Optimization method for *Microcystis* bloom mitigation by hydrogen [J]. Chemosphere, 2019, 228: 503-512.
- [21] 陈宇炜,陈开宁,胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. 湖泊科学, 2006(5): 550-552.
- [22] 王应军,全 皓,李 娟. 过氧化氢除藻及相关环境条件优化[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(5): 247-252.
- [23] RODRÍGUEZ E, MAJADO M E, MERILUOTO J, et al. Oxidation of microcystins by permanganate: reaction kinetics and implications for water treatment[J]. Water Research, 2007, 41(1): 102-110.
- [24] QIAN H F, YU S Q, SUN Z Q, et al. Effects of copper sulfate, hydrogen peroxide and N-phenyl-2-naphthylamine on oxidative stress and the expression of genes involved photosynthesis and microcystin disposition in *Microcystis aeruginosa*[J]. Aquatic Toxicology, 2010, 99(3): 405-412.
- [25] BURSON A, MATTHIJS H C P, DE BRUIJNE W, et al. Termination of a toxic *Alexandrium* bloom with hydrogen peroxide[J]. Harmful Algae, 2014, 31: 125-135.
- [26] 景 江,周 明,汪 星,等.  $\text{H}_2\text{O}_2$  与 UV-C 灭藻的协同效果研究及工程实验[J]. 环境科学研究, 2006(6): 59-63.
- [27] 陈 超,范 帆,史小丽,等. 化学氧化剂对水华蓝藻的控制研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(11): 4307-4313.
- [28] KIM Y, KIM W J. Roles of water hyacinths and their roots for reducing algal concentration in the effluent from waste stabilization ponds[J]. Water Research, 2000, 34(13): 3285-3294.
- [29] JESPERSEN A, CHRISTOFFERSEN K J. Measurements of chlorophyll-a from phytoplankton using ethanol as extraction solvent



- [J]. *Archiv Fur Hydrobiologie*, 1987, 109(3): 445-454.
- [30] 吴馨婷, 祁 闯, 许晓光, 等. 蓝藻腐解对水中营养盐影响的模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(8): 2846-2853.
- [31] 彭小云. 亚硝酸盐在水产养殖中的危害[J]. *渔业致富指南*, 2015(12): 63-64.
- [32] RAMSEIER M K, VON GUNTEN U, FREIHOFER P, et al. Kinetics of membrane damage to high (HNA) and low (LNA) nucleic acid bacterial clusters in drinking water by ozone, chlorine, chlorine dioxide, monochloramine, ferrate (VI), and permanganate[J]. *Water Research*, 2011, 45(3): 1490-1500.
- [33] 高 岩, 易 能, 张志勇, 等. 凤眼莲对富营养化水体硝化、反硝化脱氮释放  $N_2O$  的影响[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(2): 349-359.
- [34] QIN H J, ZHANG Z Y, LIU M H, et al. Efficient assimilation of cyanobacterial nitrogen by water hyacinth [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 241: 1197-1200.
- [35] 张迎颖, 严少华, 刘海琴, 等. 富营养化水体生态修复技术中风眼莲与磷素的互作机制[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(4): 721-728.

(责任编辑:徐 艳)