

# 过氧化钙对武汉东湖浮游植物群落及水环境的影响

张羽珩<sup>1</sup>, 李波<sup>2,3</sup>, 宋高飞<sup>3</sup>, 邱昌恩<sup>1</sup>, 毕永红<sup>3</sup>

(1. 湖北师范大学生命科学院, 湖北黄石 435002;

2. 大连海洋大学, 辽宁大连 116023;

3. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北武汉 430072)

**摘要:** 蓝藻等浮游植物的过量繁殖会严重污染水质, 常常需要借助化学手段进行处置; 过氧化钙是一种对环境友好且具有高效性的强氧化剂, 能在水中缓慢释放过氧化氢。为探讨过氧化钙作为化学除藻剂对浮游植物群落和水质的影响, 2020年10月采集武汉东湖原水, 利用特制装置, 模拟深度为2 m的水柱中使用不同剂量的过氧化钙进行处理。通过 $I_5$ 法测定释放的过氧化氢含量, 利用磷钼蓝-抗坏血酸法和丙酮萃取法分别测定水柱中正磷酸盐以及叶绿素a含量, 对不同处理的原水进行浮游植物群落检测。结果显示, 40 mg/L、60 mg/L和80 mg/L的过氧化钙在东湖原水中释放的过氧化氢最高浓度分别为(17.04±0.82) mg/L、(22.21±0.81) mg/L和(31.67±2.47) mg/L; 0~1.0 m水层的过氧化氢含量高于1.0~2.0 m水层, 持续释放时间可达36~48 h。过氧化钙能显著减少底层水体的正磷酸盐含量, 还可显著降低水柱中叶绿素a含量和蓝藻的相对丰度( $P<0.05$ ), 提高绿藻和硅藻的相对丰度, 改变浮游植物群落的物种优势度, 具有选择性杀灭蓝藻的效果, 在改善水生态系统方面能有效缓解水体磷含量, 调整浮游植物群落结构并相对减少蓝藻生物量。本研究可为过氧化钙在蓝藻水华处置、水体富营养化治理等方面提供参考。

**关键词:** 浮游植物; 过氧化钙; 水环境; 武汉东湖

**中图分类号:** X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2022)06-0035-08

水体富营养化和水华是当前全球面临的主要水环境问题, 目前有物理、化学、生物等多种处理方法(孟红明和张振克, 2007; 何淑英等, 2008)。物理方法成本高昂(沈银武等, 2004; 田静思等, 2018), 生物方法耗时较长(崔晓英, 2014); 相对而言, 化学方法具有快速高效的优点。传统的化学处理方法诸如采用硫酸铜(兰智文等, 1992)、高锰酸钾等容易造成二次污染(方雨博等, 2020)。过氧化氢是一种生态友好型处理剂, 在水中最终分解为 $H_2O$ 和 $O_2$ , 不造成二次污染。采用多次添加过氧化氢处置蓝藻水华的围隔试验, 确认过氧化氢不仅可杀灭蓝藻, 改变藻类群落结构, 还可增加水体溶解氧含量(Wang et al, 2019); 但该处理技术仅仅针对蓝藻水华, 对水体营养状况没有直接影响。考虑到水体富营养化与水华问题经常同时出现, 学者们一直致力于寻找对藻类水华和水体营养负荷兼具处置效应的环境友好型化学处理剂。

过氧化钙被称作“固体双氧水”, 作为一种环保型消毒剂, 在水中能缓慢释放过氧化氢, 生成氢氧化钙并释放氧气, 增加水体溶解氧。使用30 min即可杀灭大肠杆菌, 45 min的杀灭效果可达到100%(Novotortsev et al, 2012)。过氧化钙能较好补充淡水鱼塘中的溶解氧, 在夏季对于抢救鱼类浮头有一定作用(蒋静南和吴湛霞, 1992); 0.001%浓度的过氧化钙明显促进卤虫的孵化率, 但高于1%浓度则会对孵化率产生严重抑制(王春德等, 2012)。过氧化钙能有效处理底泥(张启超等, 2015), 与生物炭联用能改善底泥的缺氧状况, 提高脱氮除硫微生物如热单胞菌属(*Thermomonas*)、脱硫微菌属(*Desulfomicrobium*)和变形菌属(*Proteus*)的相对丰度(李雨平等, 2020), 改变底泥上覆水的微生物群落结构(Wang et al, 2018)。过氧化钙还具有改善潜育化土壤的作用(胡柯鑫等, 2020); 此外, 过氧化钙的钙离子与水体正磷酸盐可形成不溶于水的羟基磷灰石沉积到底泥中, 有效降低水体磷的含量, 并适度调整水体pH(Cho & Lee, 2002)。尽管过氧化钙具有上述特性和优点, 但相关应用研究并不多见, 仅有少量该物质对微囊藻杀灭作用的报道(Hu et al, 2020)。有鉴如此, 选择武汉东湖开展过氧化钙处置效果研究, 以确定其对浮游植物群落组成及水质的影响, 为过氧化钙作为化学杀藻剂的推广应用提供依据。

收稿日期: 2021-05-06 修回日期: 2022-06-26

基金项目: 国家十三五水专项(No2017zx07108-001)。

作者简介: 张羽珩, 1997年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为环境毒理学。E-mail: 2584657149@qq.com

通信作者: 邱昌恩, 1966年生, 男, 博士, 教授, 主要从事藻类生物技术和环境科学研究。E-mail: qiuchangen@163.com

毕永红, 1974年生, 男, 博士, 研究员, 主要从事水域生态学研究。E-mail: biyh@ihb.ac.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 水样采集与处理

2020 年 10 月 27 日,使用 5 L 采水器取武汉东湖透明度较低区域(30°32′46.1″N,114°21′16.9″E)的水样,注入 2.0 m 高的圆柱体容器中,该容器由亚克力材质制作而成,管径为(14.8±1.0) cm,厚度为(0.5±0.1) cm,从上至下每隔 50 cm 打一个小孔并连接长约 15 cm 的橡胶软管作为不同深度的取样点(图 1)。添加浓度分别为 40、60、80 mg/L 的过氧化钙(麦克林生物化学有限公司,上海)到容器中,并设置不添加过氧化钙的对照组(CK)。处理前和处理 24 h 后,于各处理组不同深度采集水样 500 mL 并加入鲁哥氏液固定,静置 48 h 后去掉上清,沉淀浓缩至 30 mL,用作浮游植物定性和定量检测样本。

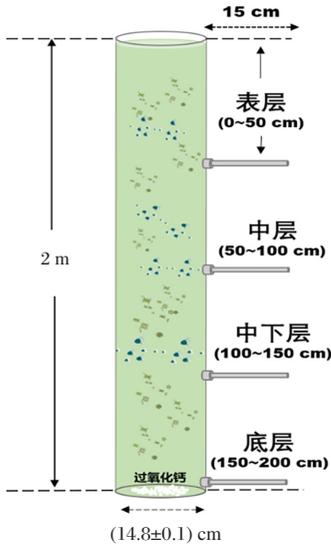


图 1 试验装置

Fig.1 Experimental apparatus

此外,另取该水域水样 1 L 加入上述不同浓度的过氧化钙于烧杯中,设置室内温度 25℃,自然光照,测定其产生的过氧化氢含量并比较不同浓度过氧化钙的降解动力学。

### 1.2 水质指标及浮游植物定性定量检测

取不同深度水样进行正磷酸盐、叶绿素 a 以及过氧化氢浓度测定。水样使用 GF/C 滤膜(Whatman)过滤,过滤水样用磷钼蓝-抗坏血酸分光光度法测定正磷酸盐的含量;滤膜用 90% 丙酮萃取 24 h,用于测定叶绿素 a 含量,测定方法见《水和废水监测分析方法》(国家环境保护总局,2002);过氧化氢浓度测定采用 I<sub>3</sub><sup>-</sup>法测定(Klassen et al,1994)。

鲁哥氏液固定浓缩后的水样在 Olympus CX23 显微镜下进行藻类物种鉴定,并用计数框(0.1 mL)计

数藻类细胞密度并进行物种鉴定(章宗涉和黄祥飞等,1995;胡鸿钧和魏印心,2006)。

### 1.3 物种优势度

以物种优势度(Y)来确定优势种群(张春梅等,2021):

$$Y=(n_i/N) \times f_i \quad (1)$$

式中: $n_i$ 为物种*i*的个体数, $N$ 为群落样本个体总数, $f_i$ 为该物种在本区域出现的频率,本研究将 $Y>0.02$ 的种类确定为优势种。

### 1.4 数据分析

本次研究的数据处理、图表制作使用 SPSS 22.0 和 GraphPad-Prism7,各个样本之间的差异性采用单因素方差分析(One-way ANOVA),统计检验方法使用 Games-Howell。

## 2 结果

### 2.1 过氧化氢释放

不同处理的过氧化氢释放动力学比较见图 2。3 种不同剂量过氧化钙在东湖原水中释放过氧化氢的最高浓度分别为(17.04±0.82) mg/L、(22.21±0.81) mg/L 和(31.67±2.47) mg/L,其 12 h 残留浓度分别为(7.40±0.48) mg/L、(12.96±1.91) mg/L 和(20.20±2.2) mg/L,之后过氧化氢降解速率放缓;48 h 相应残留浓度分别为(0.62±0.46) mg/L、(10.79±2.57) mg/L 和(17.54±2.31) mg/L。过氧化氢降解过程的拟合方程见表 1。

表 1 过氧化钙在东湖原水中释放过氧化氢浓度的拟合方程

Tab.1 Fitting equations of hydrogen peroxide concentration released by calcium peroxide in raw water from Donghu Lake

处理组 / mg·L <sup>-1</sup>	拟合方程	R <sup>2</sup>
40	$y = -1.989x + 0.0805x^2 - 0.001006x^3 + 21.74$	0.9599
60	$y = -1.363x + 0.03954x^2 - 0.00035x^3 + 24.82$	0.9107
80	$y = -1.725x + 0.04967x^2 - 0.0004194x^3 + 35.15$	0.8121

### 2.2 水柱中过氧化氢释放量

由过氧化钙所释放的过氧化氢在水柱中的分布表现为表层和中层接近,中下层和底层更为接近(图 3)。12 h 前过氧化钙所释放的过氧化氢在水柱表层、中层和中下层含量达到最高;其中,表层由 3 种剂量过氧化钙释放的过氧化氢浓度分别为(5.09±0.04) mg/L、(8.30±0.16) mg/L 和(13.39±0.61) mg/L(图 3-a),中层的最高浓度分别为(6.21±0.41) mg/L、(8.46±0.20) mg/L 和(13.73±0.53) mg/L(图 3-b),中下

层分别为  $(4.32 \pm 0.08)$  mg/L、 $(9.05 \pm 0.23)$  mg/L 和  $(11.51 \pm 0.17)$  mg/L(图 3-c), 底层在 6 h 达到最高浓度, 分别为  $(5.80 \pm 0.27)$  mg/L、 $(11.36 \pm 0.10)$  mg/L 和  $(9.58 \pm 0.05)$  mg/L(图 3-d)。在 12 h 时, 底层的过氧化氢浓度略有下降, 3 种剂量过氧化钙所释放的过氧化氢浓度分别为  $(4.85 \pm 0.08)$  mg/L、 $(10.32 \pm 0.09)$  mg/L 和  $(11.76 \pm 0.14)$  mg/L。表层水体中, 过氧化氢在 36 h 的残留浓度分别为  $(0.07 \pm 0.01)$  mg/L、 $(0.98 \pm 0.04)$  mg/L 和  $(4.44 \pm 0.22)$  mg/L, 底层水体过氧化氢在 36 h 的残留浓度分别为  $(1.46 \pm 0.03)$  mg/L、 $(2.14 \pm 0.01)$  mg/L 和  $(5.66 \pm 0.09)$  mg/L, 可见过氧化氢的最高浓度出现在水柱的中层和中下层; 此外, 过氧化钙释放到水柱中的过氧化氢在 48 h 时可被全部降解。

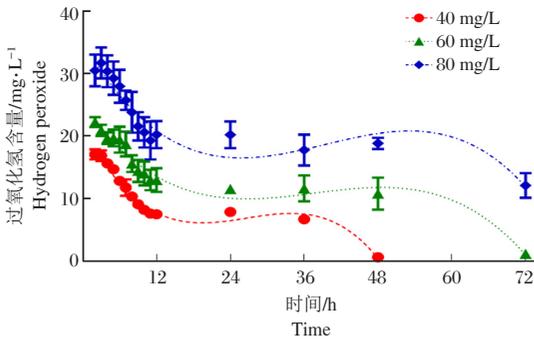


图2 不同过氧化钙处理组的过氧化氢释放动力学比较  
Fig.2 Release of hydrogen peroxide for each  $\text{CaO}_2$  treatment

### 2.3 正磷酸盐含量

本试验添加了不同剂量过氧化钙之后, 水柱中正磷酸盐发生显著变化(图 4)。48 h 时, 40、60、80 mg/L 处理组的底层正磷酸盐含量较对照组分别降低了 81%、82%、90%。可见添加过氧化钙改变了水柱中正磷酸盐的分布。

### 2.4 浮游植物群落变化

东湖原水共鉴定出浮游植物 80 种, 分属 6 门, 以蓝藻、绿藻、硅藻为主, 甲藻、隐藻、裸藻较少, 其中蓝藻细胞密度占绝大多数(图 5-a)。40、60、80 mg/L 组的过氧化钙处理组分别将表层水体中的蓝藻相对丰度降低至处理前的 43.90%、25.15%、29.91%, 中层水体分别降至 49.47%、40.56%、27.73%(图 5-b), 中下层水体分别降至 28.98%、21.02%、28.47%(图 5-c), 底层水体则降低至 21.42%、20.91%、43.78%(图 5-d)。

4 个深度中, 40 mg/L 和 60 mg/L 组的绿藻和硅藻相对丰度均逐渐上升, 尤其是 60 mg/L 处理组中, 表层、中层与中下层处的绿藻和硅藻丰度上升, 60 mg/L 处理组表层水体中绿藻相对丰度较对照组的 17.33% 上升至 45.39%; 而在中下层水体中, 绿藻相对丰度则从 21.14% 上升为 26.63%, 硅藻相对丰度则从 25.08% 升至 52.33%。

过氧化钙处理后, 群落中物种优势度发生了改变, 蓝藻优势度普遍下降。绿藻优势度下降的包括

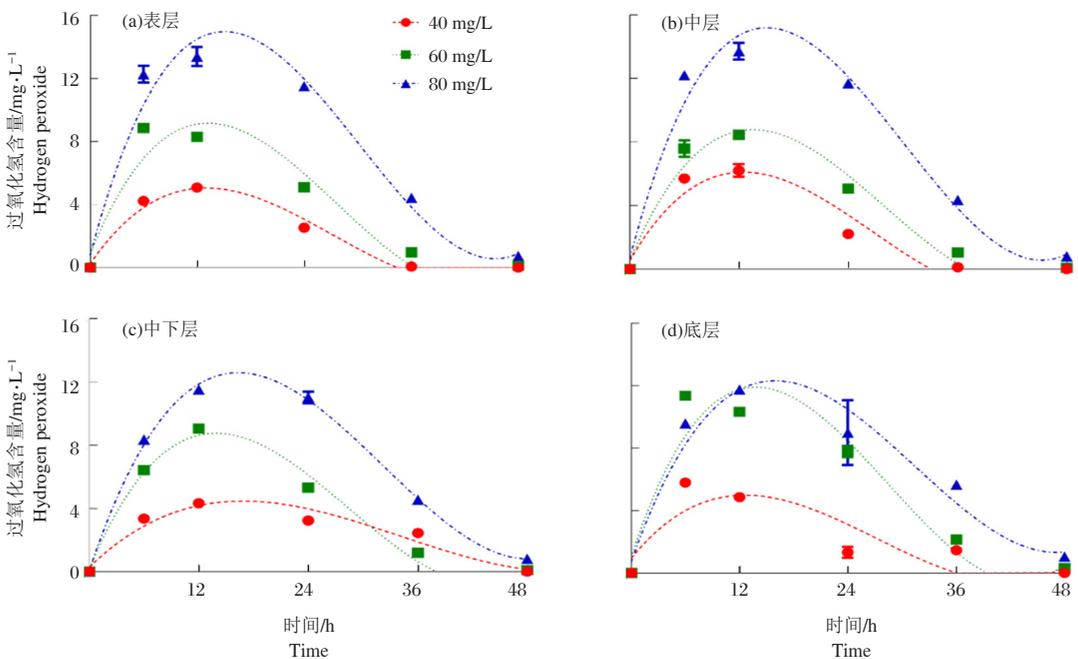


图3 水柱不同深度水体的过氧化氢含量变化  
Fig.3 Hydrogen peroxide content at different depths for each  $\text{CaO}_2$  treatment

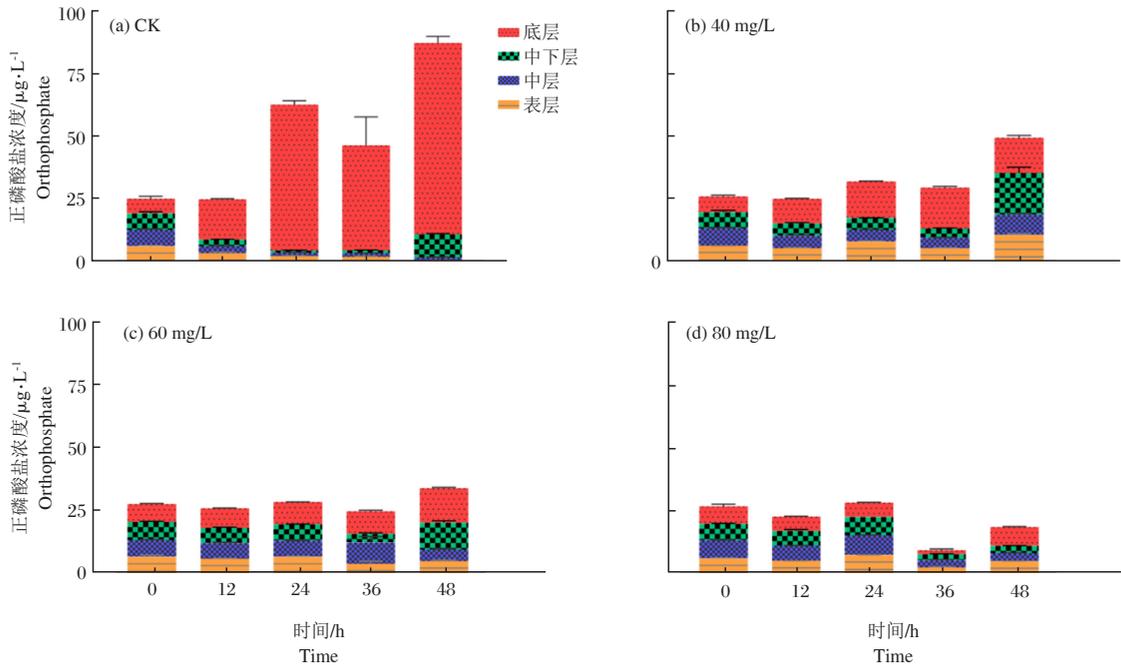


图 4 不同剂量过氧化钙处理下正磷酸盐含量变化

Fig.4 Orthophosphate concentrations at different depths for each treatment

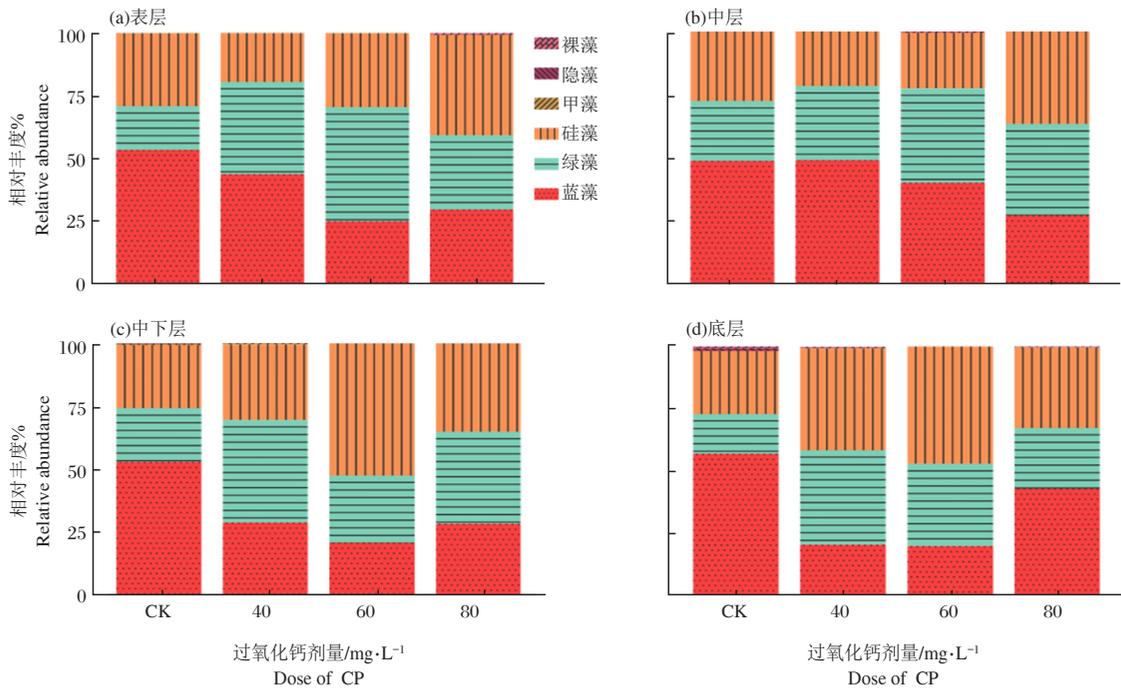


图 5 不同水层浮游植物群落变化

Fig.5 Phytoplankton community changes at different depths for each treatment

二尾栅藻 (*Scenedesmus bicanda*)、四尾栅藻 (*Scenedesmus quadricanda*)、狭形纤维藻 (*Ankistrodesmus angustus*)、小球藻 (*Chlorella vulgaris*)、硅藻门中小环藻 (*Cyclotella* sp.)、颗粒直链藻极狭变种 (*Melosira granulata* var. *angustissima*)、针杆藻 (*Syne-*

*dra* sp.) 的优势度均出现了下降。绿藻中双对栅藻 (*Scenedesmus bijuga*) 和卷曲纤维藻 (*Ankistrodesmus convolutus*) 的优势度增加, 硅藻直链藻 (*Melosira* sp.) 优势度在低剂量的过氧化钙处理下有一定下降, 在 80 mg/L 剂量处理下反而增加 (表 2)。

表2 浮游植物群落不同物种的优势度变化  
Tab.2 Variation of dominant phytoplankton species for each treatment

门类	种属	不同组别优势度			
		CK	40 mg/L	60 mg/L	80 mg/L
蓝藻门	假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp.	0.7394	0.0556	0.0829	0
	平裂藻 <i>Merismopedia</i> sp.	0.0929	0.0529	0	0.0227
	泽丝藻 <i>Limnothrix redekei</i>	0.2668	0.1052	0.0433	0.1434
	长孢藻 <i>Dolichospermum</i> sp.	0.0409	0.0097	0.0291	0.0298
	微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.	0.0835	0.0072	0.0431	0.0497
	蓝纤维藻 <i>Dactylococcopsis raphidiodes</i>	0.0357	0.0106	0.0022	0.0053
	二尾栅藻 <i>Scenedesmus bicanda</i>	0.0630	0.0291	0.0043	0.0189
绿藻门	双对栅藻 <i>Scenedesmus bijuga</i>	0.0157	0.0379	0.0232	0.0624
	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricanda</i>	0.1218	0.0278	0.0608	0.0288
	卷曲纤维藻 <i>Ankistrodesmus convolutus</i>	0.0042	0.0225	0.0223	0.0149
	狭形纤维藻 <i>Ankistrodesmus angustus</i>	0.0273	0.0119	0.0093	0.0096
	小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	0.0221	0.0086	0.0062	0.0064
硅藻门	颗粒直链藻极狭变种 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	0.1260	0.0125	0.0490	0.0213
	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	0.4285	0.1774	0.2360	0.2300
	直链藻 <i>Melosira</i> sp.	0.0252	0.0159	0.0233	0.0284
	针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	0.0630	0.0167	0.0229	0.0274

以叶绿素 a 含量表征的藻类生物量呈现逐渐降低趋势(图6)。随时间延长,水柱中的叶绿素 a 含量显著降低( $P<0.05$ ),80 mg/L 过氧化钙处理组的效果极其显著( $P<0.001$ )。底层叶绿素 a 含量在 0~24 h 升高,最高达到(271.00±15.66)  $\mu\text{g/L}$ ,随后逐渐下降。

### 3 讨论

#### 3.1 过氧化钙防控藻类增殖和水华的作用机理

作为一种强氧化剂,过氧化钙能持续释放过氧化氢(Wang et al, 2016),其在水体形成活性氧簇(ROS),包括  $\text{HO}\cdot$  和  $\text{O}_2\cdot^-$ (Ma et al, 2007)。40、60、80 mg/L 的过氧化钙在东湖原水中所释放的过氧化氢含量分别可达(16.85±0.84) mg/L、(20.87±0.92) mg/L、(31.67±2.47) mg/L,这与 Lu(2017)得出的过氧化钙能释放 0.47 g/g 过氧化氢的结论相接近。由过氧化钙

释放的过氧化氢在水柱表层和中层含量最高,一方面是因为过氧化钙作为固体,进入水体后快速沉积在底部,释放的过氧化氢从底层往上扩散;另一方面,释放的过氧化氢从水柱底层逐步向表层扩散的过程中,与从表层逐渐沉降的藻细胞等发生反应,消耗水柱中的过氧化氢,改变了其在水柱中的分布状况(Hu et al, 2020)。

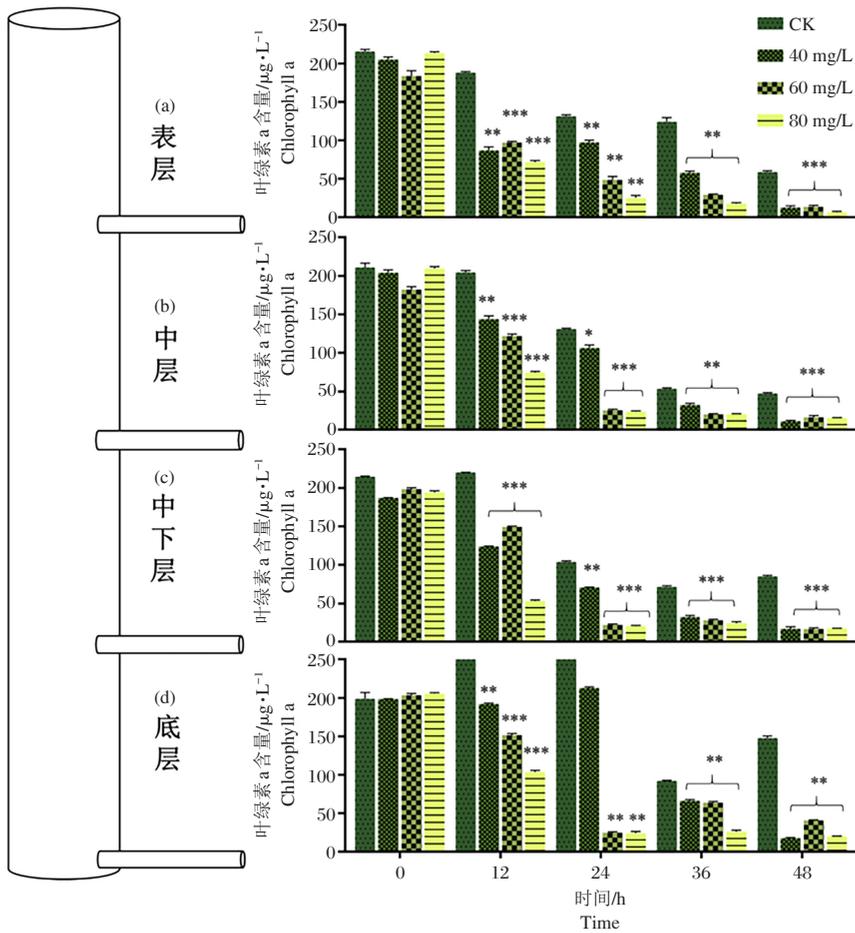
值得一提的是,过氧化钙处理后钙离子与水体正磷酸盐可形成不溶于水的羟基磷灰石逐渐沉积到底泥中(Zhou et al, 2019; Cho & Lee, 2002),可显著降低水柱中正磷酸盐浓度( $P<0.05$ )。由于磷酸盐被认为是藻类增殖所必需的主要限制性营养物质,因此能通过控制水体中磷酸盐含量来防控藻类增殖和水华暴发。

#### 3.2 过氧化钙通过絮凝作用降低叶绿素 a 含量

由于不同水体具有不同的还原能力,受水体其他还原物质的影响,过氧化钙所释放的过氧化氢残留含量不同,对叶绿素 a 的影响作用也不同。赵春禄(2011)使用 2.5 mg/L 的过氧化氢对颤藻进行预氧化,同时辅以 34 mg/L 高岭土和 3.5 mg/L 的聚合氯化铝(PAC)对水体中叶绿素 a 的去除率达到 98.2%;李今和华江环(2011)研究表明,0.0004% 以上的过氧化氢能有效抑制铜绿微囊藻生长;王应军等(2016)通过正交实验,确认对铜绿微囊藻叶绿素 a 的最低作用浓度为 1.010 mg/m<sup>3</sup>。本研究中,过氧化钙所释放的过氧化氢最高浓度保持在 30 mg/L 左右,这导致微囊藻、假鱼腥藻等蓝藻发生氧化损伤(李娟等, 2015; Wang et al, 2015),促使叶绿素 a 降解和细胞裂解死亡(Zhou et al, 2020);此外,过氧化钙能作为促凝剂促进藻细胞絮凝成团,进一步减少了水柱的叶绿素 a 含量(Xin et al, 2020)。因此,过氧化钙不仅能依靠所释放的过氧化氢对浮游植物的生物量产生影响,还可以通过絮凝作用促使藻细胞形成团聚体下沉,改变藻类生物量在水柱中分布状况。

#### 3.3 过氧化钙具有选择性杀灭蓝藻的能力

对于水柱中浮游植物群落结构而言,过氧化钙的处理导致蓝藻相对丰度下降、绿藻和硅藻的相对丰度上升,这与 Wang 等(2019)的围隔试验结果相似。在浮游植物优势种的变化中,绿藻和硅藻中部分物种的优势度经过氧化钙处理后反而上升,这可能是与原核生物和真核生物的细胞结构与功能密切相关,真核藻类具有良好的双膜屏障结构,且具有超氧化物歧化酶、过氧化氢酶以及抗坏血酸过氧化物酶等抗氧化酶来抵抗氧化胁迫(Shigeoka et al, 2002),



\*代表  $P < 0.05$ , \*\*代表  $P < 0.01$ , \*\*\*代表  $P < 0.001$

图 6 不同深度叶绿素 a 含量变化

\* means  $P < 0.05$ , \*\* means  $P < 0.01$ , \*\*\* means  $P < 0.001$

Fig.6 Chl-a concentration at different depths for each treatment

蓝藻细胞内缺少完整的抗氧化酶系统和双膜屏障结构(Passardi et al, 2007);过氧化氢能将藻胆体从蓝藻细胞的类囊体膜上解离,从而使细胞的光系统II彻底失活(Wang et al, 2012);这也使得蓝藻对过氧化氢比绿藻和硅藻更敏感(Weenink et al, 2015)。可见过氧化钙具有选择性杀灭蓝藻的能力,但对真核藻类的作用有限。

综上所述,过氧化钙对蓝藻有良好的选择性杀灭效果,能显著降低水体叶绿素a的含量,可有效调控浮游植物群落结构,提高绿藻和硅藻的相对丰度;同时,除了杀藻剂的作用外,过氧化钙还能有效促进底层水体复氧并减少磷酸盐含量,具有良好的应用前景。

#### 参考文献

崔晓英, 2014. 浅谈关于生物修复技术治理水污染方面的应用[J]. 内蒙古石油化工, 40(4):96-98.

方雨博,王趁义,汤唯唯,等,2020. 除藻技术的优缺点比较、应用现状与新技术进展[J]. 工业水处理, 40(9):1-6.

国家环境保护总局, 2002. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社:243-285.

何淑英,李继香,徐亚同, 2008. 污染河流的治理技术研究进展[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 36(2):75-78.

胡鸿钧,魏印心, 2006. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京:科学出版社.

胡柯鑫,董春华,罗尊长,等,2020. 不同缓释过氧化钙对潜育环境下水稻土微生物特性的影响[J]. 应用生态学报, 31(5): 1467-1475.

蒋静南,吴湛霞, 1992. 过氧化钙对淡水鱼类养殖的增氧作用[J]. 淡水渔业, (6):23-26.

兰智文,赵鸣,尹澄清, 1992. 藻类水华的化学控制研究[J]. 环境科学, (1):12-15,94.

李今,华江环, 2011. 几种除藻剂对铜绿微囊藻生长的毒性效应[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 29(3):444-448.

李娟,王应军,高鹏, 2015. 过氧化氢对铜绿微囊藻的损伤效应

- 研究[J]. 环境科学学报, 35(4):1183-1189.
- 李雨平,姜莹莹,刘宝明,等,2020. 过氧化钙( $\text{CaO}_2$ )联合生物炭对河道底泥的修复[J]. 环境科学, 41(8):3629-3636.
- 孟红明,张振克,2007. 我国主要水库富营养化现状评价[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 35(2):133-136,141.
- 沈银武,刘永定,吴国樵,等,2004. 富营养湖泊滇池水华蓝藻的机械清除[J]. 水生生物学报, 28(2):131-136.
- 田静思,都凯,王金恒,等,2018. 水华蓝藻物理控制方法研究进展[J]. 资源节约与环保, (12):45-46.
- 王春德,齐翠红,李朝霞,2012. 过氧化钙的净水增氧效果评估[J]. 生命科学研究, 16(4):345-349.
- 王应军,全皓,李娟,2016. 过氧化氢除藻及相关环境条件优化[J]. 安全与环境学报, 16(5):247-252.
- 张春梅,朱宇轩,宋高飞,等,2021. 南水北调中线干渠浮游植物群落时空格局及其决定因子[J]. 湖泊科学, 33(3):675-686.
- 张启超,杨鑫,孙淑云,等,2015. 过氧化钙在处理厌氧底泥中的应用初探[J]. 湖泊科学, 27(6):1087-1092.
- 章宗涉,黄祥飞,1995. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京:科学出版社.
- 赵春禄,侯孝来,孙鹏程,2011.  $\text{H}_2\text{O}_2$ 预氧化颤藻及其复合高岭土除藻性能研究[J]. 环境工程学报, 5(2):357-360.
- Cho I, Lee K, 2002. Effect of calcium peroxide on the growth and proliferation of *Microcystis aeruginosa*, a water-blooming cyanobacterium[J]. Biotechnology and Bio-process Engineering, 7(4):231-233.
- Hu Y W, Shen L, Ren X, et al, 2020. Properties of  $\text{CaO}_2$  for  $\text{H}_2\text{O}_2$  release and phosphate removal and its feasibility in controlling *Microcystis* blooms[J]. Environment Science and Pollution Research, 27:35239-35248.
- Klassen N V, Marchington D, McGowan H C E, 1994.  $\text{H}_2\text{O}_2$  Determination by the  $\text{I}_3^-$  Method and by  $\text{KMnO}_4$  Titration [J]. Analytical Chemistry, 66(18):2921-2925.
- Lu S, Zhang X, Xue Y, 2017. Application of calcium peroxide in water and soil treatment: A review[J]. Journal of Hazardous Material, 337:163-177.
- Ma Y, Zhang B T, Zhao L, et al, 2007. Study on the generation mechanism of reactive oxygen species on calcium peroxide by chemiluminescence and UV-visible spectra[J]. Luminescence, 22(6):575-580.
- Novotortsev V M, Mel'nikov I O, Tripol'skaya T A, et al, 2012. Examination of the disinfecting properties of calcium peroxide and its suitability for improving hydrodynamic characteristics of surface water bodies[J]. Russian Journal of Applied Chemistry, 85(5):726-730.
- Passardi F, Zamocky M, Favet J, et al, 2007. Phylogenetic distribution of catalase-peroxidases: are there patches of order in chaos?[J]. Gene, 397(1/2):101-113.
- Shigeoka S, Ishikawa T, Tamoi M, et al, 2002. Regulation and function of ascorbate peroxidase isoenzymes[J]. Journal of Experimental Botany, 53:1305-1319.
- Wang Z, Li D, Qin H, et al, 2012. An integrated method for removal of harmful cyanobacterial blooms in eutrophic lakes [J]. Environment Pollution, 160(1):34-41.
- Wang B L, Wang X, Hu Y, et al, 2015. The combined effects of UV-C radiation and  $\text{H}_2\text{O}_2$  on *Microcystis aeruginosa*, a bloom-forming cyanobacterium[J]. Chemosphere, 141: 34-43.
- Wang H F, Zhao Y, Li T, et al, 2016. Properties of calcium peroxide for release of hydrogen peroxide and oxygen: A kinetics study[J]. Chemical Engineering Journal, 303:450-457.
- Wang Y, Wang W H, Yan F L, et al, 2018. Effects and mechanisms of calcium peroxide on purification of severely eutrophic water[J]. Science of The Total Environment, 650: 2796-2806.
- Wang B L, Song Q Y, Long J J, et al, 2019. Optimization method for *Microcystis* bloom mitigation by hydrogen peroxide and its stimulative effects on growth of chlorophytes [J]. Chemosphere, 228:503-512.
- Weenink E F, Luimstra V M, Schuurmans J M, et al, 2015. Combatting cyanobacteria with hydrogen peroxide: a laboratory study on the consequences for phytoplankton community and diversity[J]. Front Microbiol, 6:7-14.
- Xin H J, Yang S, Tang Y L, et al, 2020. Mechanisms and performance of calcium peroxide-enhanced Fe(ii) coagulation for treatment of *Microcystis aeruginosa*-laden water [J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 6(5):1272-1285.
- Zhou J, Li D, Chen S, et al, 2019. Sedimentary phosphorus immobilization with the addition of amended calcium peroxide material[J]. Chemical Engineering Journal, 357:288-297.
- Zhou T R, Cao H S, Zhen J, et al, 2020. Suppression of water-bloom cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* by algicide hydrogen peroxide maximized through programmed cell death[J]. Journal of Hazardous Materials, 393:122394.

(责任编辑 万月华)

## Effects of Calcium Peroxide on the Phytoplankton Community and Water Quality of Donghu Lake, Wuhan

ZHANG Yu-heng<sup>1</sup>, LI Bo<sup>2,3</sup>, SONG Gao-fei<sup>3</sup>, QIU Chang-en<sup>1</sup>, BI Yong-hong<sup>3</sup>

(1. College of Life Sciences, Hubei Normal University, Huangshi 435002, P.R. China;

2. University of Dalian Ocean, Dalian 116023, P.R. China;

3. State Key Laboratory of Fresh Water Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P.R. China)

**Abstract :** Overgrowth of phytoplankton, particularly cyanobacteria, seriously impairs water quality and is frequently removed with chemicals. Calcium peroxide is an environment friendly and highly effective strong oxidant that slowly releases hydrogen peroxide to water. Although calcium peroxide is widely used for substrate improvement and oxygenating aquaculture ponds, little research has been conducted on its effects on water quality and phytoplankton. In this study, we investigated the effects of calcium peroxide on the phytoplankton community and water quality of Donghu Lake, Wuhan, aiming to provide guidance for the application of calcium peroxide for treating cyanobacteria blooms and managing eutrophication. Water was collected from Donghu Lake on October 27, 2020 and placed in 2.0 m cylindrical containers, with three calcium peroxide treatments (40, 60, 80 mg/L) and a control group. Twenty-four hours before and after treatment, water samples from each treatment were collected for quantitative and qualitative determination of phytoplankton and water quality parameters. The hydrogen peroxide concentration was determined by the  $I_3^-$  method, orthophosphate by the phosphomolybdenum blue-ascorbic acid method and chlorophyll-a by the acetone extraction method. The highest concentrations of hydrogen peroxide released in the calcium peroxide treatments (40 mg/L, 60 mg/L and 80 mg/L) were, respectively,  $(17.04 \pm 0.82)$  mg/L,  $(22.21 \pm 0.81)$  mg/L and  $(31.67 \pm 2.47)$  mg/L. Release of hydrogen peroxide lasted 36–48 h in all calcium peroxide treatments, and the hydrogen peroxide content at a water depth of 0–1.0 m was higher than at 1.0–2.0 m. Calcium peroxide significantly reduced the orthophosphate content of bottom water as well as the chlorophyll-a concentration and the relative abundance of cyanobacteria in all treatments ( $P < 0.05$ ). The relative abundances of chlorophyta and diatoms increased, consequently altering the dominant phytoplankton species. Calcium peroxide effectively improves water quality by reducing phosphorus, restructuring the phytoplankton community and reducing the biomass of cyanobacteria.

**Key words :** phytoplankton; calcium peroxide; water environment; Donghu Lake