

H₂O₂ 与 UV 工艺对铜绿微囊藻灭活特点比较

郭建伟¹, 张永吉^{1*}, 曾果¹, 周玲玲², 高一²

(1. 长江水环境教育部重点实验室(同济大学), 上海 200092; 2. 同济大学污染控制与资源化研究重点实验室, 上海 200092)

摘要:以铜绿微囊藻为研究对象, 考察了H₂O₂与UV工艺对铜绿微囊藻的灭活特点及光合活性的影响. 结果表明, 在0~2 mmol·L⁻¹ H₂O₂投加范围内, 随H₂O₂投加量的增大, 对铜绿微囊藻的灭活效果不断提高, 藻的光合活性不断下降; 而投加量超过2 mmol·L⁻¹后, 灭活率并无明显提高; UV工艺对铜绿微囊藻有较好的灭活效果, 在藻浓度为35×10⁸个/L条件下, 紫外线剂量达91.8 mJ·cm⁻²即可使藻停滞生长7 d以上; UV工艺对藻光合活性的降低效率高于H₂O₂工艺, 且各活性参数随紫外线剂量的升高呈指数衰减; 在达到较好的灭活效果时, UV工艺对藻液UV₂₅₄升高的控制优于H₂O₂工艺.

关键词:铜绿微囊藻; H₂O₂; 紫外线照射; 灭活; 光合活性

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)08-1801-06

Comparison of H₂O₂ and UV Processes on the Inactivation Efficiency of *Microcystic aeruginosa*

GUO Jian-wei¹, ZHANG Yong-ji¹, ZENG Guo¹, ZHOU Ling-ling², GAO Nai-yun²

(1. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education(Tongji University), Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Setting *Microcystic aeruginosa* as study subject, the inactivation efficiency and its effect on photosynthetic activity by H₂O₂ and UV processes were investigated. The results showed that the inactivating efficiency increased with H₂O₂ dosage in the range of 0-2 mmol·L⁻¹, and the photosynthetic activity decreased with it gradually, but the efficiency wasn't enhanced when the dosage exceeded 2 mmol·L⁻¹. The inactivation by UV process was high. Under the algae concentration of 35×10⁸ cells/L, UV dosage of 91.8 mJ/cm² was enough to inhibit its growth by 7d; UV process was superior to H₂O₂ in terms of photosynthetic activity, also the parameters could be fitted exponentially well; To guarantee high removal of algae, H₂O₂ must be dosed excessively, so UV₂₅₄ of algae solution would be higher than that of UV process.

Key words: *Microcystic aeruginosa*; H₂O₂; UV irradiation; inactivation; photosynthetic activity

高藻水处理是水处理界普遍关心的问题之一. 高藻水一般具有高浊度、高有机物的特征, 藻类的分泌物是饮用水消毒副产物的前体物, 藻类的存在会消耗更多的混凝剂与消毒剂、产生堵塞滤池及在沉淀池或清水池池壁滋生黏泥等问题^[1]. 鉴于水源水质的不断恶化及对给水厂出厂水水质的要求不断提高, 寻找一种经济、高效且安全的除藻技术成为一个十分紧迫的问题.

投加硫酸铜或其它化学氧化剂虽然除藻效果显著, 但由于对藻细胞的破坏, 容易导致藻毒素的大量释放, 并且投加的化学物质往往也会在水体产生二次污染^[2~4]. H₂O₂是一种无二次污染的氧化剂, 其氧化还原电位高于KMnO₄, 对藻类具有较好的灭活效果. 紫外线技术可以有效地抑制藻类生长, 由于不投加任何化学试剂, 不会产生残留的有毒物质, 是一种绿色高效的新型除藻技术^[5~8]. 本研究对比了H₂O₂与UV工艺对铜绿微囊藻的灭活特点及活性的影

响, 以期为实际应用提供理论指导.

1 材料与方法

1.1 铜绿微囊藻的培养

铜绿微囊藻藻种(FACHB-912)购自武汉水生生物研究所, 采用BG11培养基进行培养. 铜绿微囊藻母液在恒温培养箱中25℃±1℃下进行培养, 培养箱内光照强度为1500 lx, 光暗周期为12 h:12 h. 实验时, 取一定量处于对数期的藻母液用灭菌BG11培养基稀释得到浓度为35×10⁸个/L的实验使用液.

1.2 实验过程

收稿日期: 2009-08-24; 修订日期: 2010-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878164); 长江水环境教育部重点实验室自主课题项目(YRWEY1001); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07422-005)

作者简介: 郭建伟(1984~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水处理理论与技术, E-mail: guojianwei11@126.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangyongji@tongji.edu.cn

1.2.1 紫外线实验

实验装置采用按国际紫外线协会推荐标准制作的准平行光束仪(collimated beam apparatus),装置如图1所示.紫外灯管安装在一个封闭的圆柱体内,在筒体的底部中央开口,下端接一段长度为44 cm,外径为10.8 cm的圆管,紫外灯管功率为75 W,额定工作电压为220 V.实验时取40 mL藻液,采用10.5 cm直径的培养皿作反应器,根据国际紫外线协会提供的计算表格计算紫外线的平均强度^[9,10],其平均光强为 0.153 mW/cm^2 ,通过改变照射时间来获得不同的紫外线剂量.

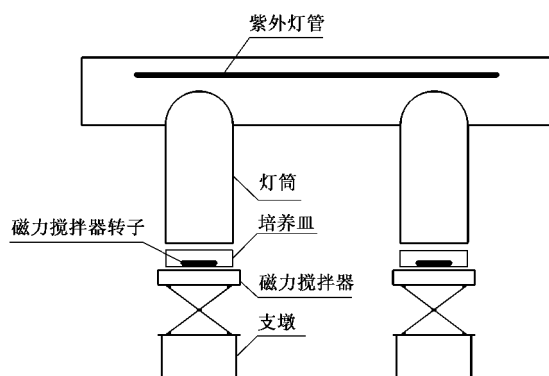


图1 准平行光束仪装置示意

Fig.1 Schematic diagram of collimated beam device

1.2.2 H_2O_2 氧化实验

H_2O_2 采用30%的分析纯,每次使用前用 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KMnO_4 标准溶液标定其真实浓度.实验藻浓度为 35×10^8 个/L,取40 mL的藻液分别投加10、30、50、100、150、200及300 μL 的 $8.8 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ 的 H_2O_2 母液,分别得到2.2、6.59、10.99、21.98、39.57、52.76及79.14 mmol/L H_2O_2 投加量.

1.3 实验方法

D_{680} 和 UV_{254} 采用UV1800型紫外/可见分光光度计测定,因 D_{680} 与叶绿素等含量成正比关系,本研究中以 D_{680} 反映藻类的数量;藻的光合量子产量 Y (Y 值反映藻细胞的光合效率)及快速光响应曲线(rapid light curves,RLC)采用叶绿素荧光分析技术(PHYTO-PAM,德国Walz公司)测定.快速光响应曲线的测量条件设定为:步长20 s,最大光照强度 $1164 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. α 、 P_m 、 L_k 由如下RLC方程拟合得到^[11,12].

$$P = P_m \cdot (1 - \alpha \cdot \text{PAR}/P_m) \cdot e^{-\beta \cdot \text{PAR}/P_m}$$

式中,PAR为光强, $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$;P为相对电子

传递速率; P_m 为最大相对电子传递速率,反映最大光合速率; α 为初始斜率,反映了光能的利用效率; L_k 为半饱和光强,反映了藻细胞对强光的耐受能力, $L_k = P_m/\alpha$.

2 结果与讨论

2.1 H_2O_2 与UV工艺对铜绿微囊藻的灭活效果比较

2.1.1 高浓度 H_2O_2 对铜绿微囊藻的灭活效果

从图2可见, H_2O_2 对藻有较好的灭活效果,如在 H_2O_2 投加量为2.2 mmol/L时,1 d后其 D_{680} 为0.086,为初始的53.09%;4 d后其 D_{680} 为0.047,为初始的29.01%. H_2O_2 在第1 d的去除率最高,而后续3 d的去除率则较低,这是因为 H_2O_2 属于化学氧化灭活,其效果比较明显但随着氧化剂的消耗及分解使得后期的灭活效果逐渐降低.此外,增大投加量并未取得更高的灭活效果,在 H_2O_2 投加量为79.14 mmol/L时,1 d后其 D_{680} 为0.087,为初始的53.70%;4 d后其 D_{680} 为0.049,为初始的30.25%,其投加量为2.2 mmol/L的近36倍,而其灭活效果并无明显提高.

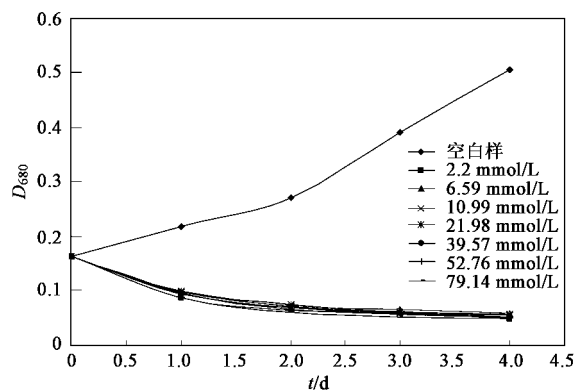


图2 高浓度 H_2O_2 对铜绿微囊藻生长曲线的影响

Fig.2 Effects of high concentration of H_2O_2 on growth curvature of *Microcystis aeruginosa*

一般来讲,氧化剂的灭活机制主要是以下两方面:第一步是氧化剂氧化破坏细胞壁和细胞膜;其次是氧化剂扩散入细胞内进而灭活酶、破坏胞内物质及干扰蛋白质的合成.影响反应第一步的主要因素是氧化剂的标准氧化还原电位;影响第二步扩散的主要因素是氧化剂的电荷、分子量以及半衰期.考虑到 H_2O_2 的电位较高,因此,第二步传质反应是整个反应的控制步骤. H_2O_2 分子较难进入细胞内部,这可能是增大 H_2O_2 的投加量,其灭活效果并无明显提

高的原因. Mamane 等^[13,14] 也发现单独 H₂O₂ 对 *E. coli*、*B. subtilis*、MS-2、T4 和 T7 基本无灭活效果,且·OH的灭活效果也较差,二者较难扩散到病毒及细菌细胞内可能是其较低消毒效率的主要原因.

2.1.2 低浓度H₂O₂对铜绿微囊藻的灭活效果

为了找到最佳的H₂O₂投加量,实验同时考察了 0~2 mmol/L H₂O₂投加量的灭活效果. 其结果见图 3. 结果表明,0.3 mmol/L 的 H₂O₂投加量即开始出现明显的灭活效果. 培养 1 d 后,其藻密度 D_{680} = 0.096,为初始值的 61.94%;然而培养 7 d 后,其 D_{680} = 0.237,为初始值的 153%,这表明H₂O₂的投加量较小,随着H₂O₂的浓度降低,其灭活抑制作用逐渐减弱. 而在H₂O₂投加量为 2 mmol/L时,培养 1 d 后其 D_{680} 为 0.096,7 d 后其 D_{680} 为 0.045. 与 0.3 mmol/L效果相比较,发现第 1 d 的去除率并未随投加量的增大而显著提高,但在第 7 d 效果则十分明显. 这表明,H₂O₂氧化除藻时在投加量达到一定值后,其短时间灭活效果并不会随投加量增大而显著提高,但增大投加量会起到延长抑制其生长的作用. 将每一投加量下藻浓度开始出现增长的时刻与 H₂O₂的投加量进行对比,其结果见表 1. 可以看出, H₂O₂投加量越大,其开始出现增长的时刻越晚,且增长时的藻密度越小,即说明投加量越大,灭活效果越好.

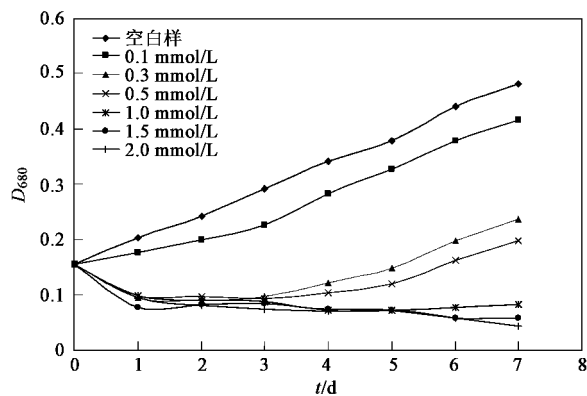


图 3 低浓度H₂O₂对铜绿微囊藻生长曲线的影响
Fig.3 Effects of low concentration of H₂O₂ on growth curvature of *Microcystic aeruginosa*

2.1.3 UV 工艺对铜绿微囊藻的灭活效果

实验中藻的初始浓度约为 35×10^8 个/L (D_{680} = 0.155), 紫外线光强为 0.153 mW/cm², 照射时间为 0、5、10、15、20、30、45、60 min 得到相应的紫外线剂量为 0、45.9、91.8、137.7、183.6、275.4、413.1、550.8 mJ/cm². 实验结果见图 4. 由图 4 可

知,紫外线对铜绿微囊藻有很好的灭活效果,并能显著抑制其生长. 在紫外线剂量仅为 91.8 mJ·cm⁻² 下,铜绿微囊藻出现明显停滞生长现象. 在该剂量下照射后 1 d 其 D_{680} 达到 0.201,而对照组的 D_{680} 为 0.249,藻密度相比降低近 19.28%;而在紫外线剂量达到 550.8 mJ·cm⁻²时,7 d 后 D_{680} 仅为 0 d 时的 21.52%,这说明在此剂量下,藻直接进入了衰亡期. 紫外线可以破坏细胞的 DNA,与细胞膜、线粒体或细胞膜内某些组分作用产生自由基、活性氧等,继而发生脂质过氧化反应,最终影响藻细胞的增殖.

表 1 H₂O₂投加量与藻浓度开始增长时刻及藻密度的关系

Table 1 Relationship of initial increase time and algae concentration with dosages of H ₂ O ₂			
H ₂ O ₂ 浓度 /mmol·L ⁻¹	藻浓度开始 增长时刻/d	增长时的藻 密度 (D_{680})	备 注
0	1	0.204	未进入衰亡期
0.1	1	0.177	未进入衰亡期
0.3	3	0.098	
0.5	4	0.104	
1.0	5	0.073	
1.5	>7	<0.058	
2.0	>7	<0.045	

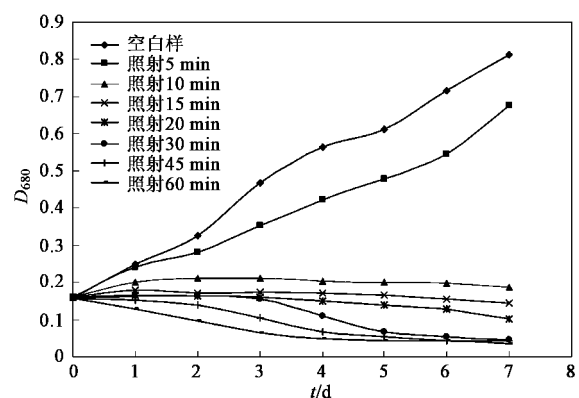


图 4 UV 工艺对铜绿微囊藻的灭活效果
Fig.4 Effects of UV dosages on growth curvature of *Microcystic aeruginosa*

对比 UV 与H₂O₂的灭活曲线可以发现,UV 的灭活相对比较缓和,经紫外线照射的藻,其生长活性迅速减弱,但并不会迅速导致大量细胞死亡. 紫外线剂量 ≥ 91.8 mJ·cm⁻²时在随后的 7 d 内基本处于停滞生长或衰亡期;而H₂O₂的灭活则比较迅速,1 d 后藻的去除率为最高,但在 H₂O₂ 投加量小 (< 2 mmol·L⁻¹)时,藻会较快的恢复生长. 来讲,UV 的灭活效果要优于H₂O₂工艺.

2.2 H₂O₂与 UV 工艺对铜绿微囊藻光合活性的影响

实验中藻的 D_{680} = 0.155,藻密度为 35×10^8

个/L. 考察了 0、0.1、0.3、0.5、1.0、1.5 及 2.0 mmol/L H_2O_2 投加量下,反应 15 min 后光合活性的变化. 结果见表 2.

表 2 H_2O_2 投加量对藻光合活性的影响

Table 2 Effects of dosages of H_2O_2 on photosynthetic activity of *Microcystis aeruginosa*

H_2O_2 浓度/ $mmol \cdot L^{-1}$	Y	α	P_m	L_k
0	0.43	0.184	90.7	493.1
0.1	0.42	0.184	35.4	191.7
0.3	0.36	0.157	28.2	180.4
0.5	0.30	0.133	19.6	147.1
1.0	0.25	0.113	11.3	100.2
1.5	0.24	0.111	9.5	85.7
2.0	0.20	0.111	8.2	73.4

从表 2 可见,在 H_2O_2 投加量为 0.1 mmol/L 下,15 min 后其 Y 值为 0.42,相对空白样仅降低了 2.33%;而投加 0.3 mmol/L 时,其 Y 值降低为 0.36,相比空白样降低了 16.28%. 因此,在实验条件下,0.3 mmol/L 的投加量下开始出现明显的灭活效果. 当投加量增大到 2.0 mmol/L 时,其 Y 值则进一步降低至 0.20. α 值及 P_m 的变化与 Y 值的变化趋势相似. 但 α 值的变化相对 P_m 的变化较小. 在 H_2O_2 投

加量为 0~2 mmol/L 下, α 值在 0.111~0.184,最大变化率为 65.77%;而 P_m 值在 8.2~90.7 之间,最大变化率达到 90.96%. L_k 的变化也呈现随 H_2O_2 的投加量增大而显著下降. 空白样值高达 493.1;而投加量为 0.3 mmol/L 时其 L_k 仅为 180.4. 将各个参数与 H_2O_2 的投加量进行指数拟合,见表 3. 发现除了 Y 值的变化趋势符合指数函数外,其余参数呈指数衰减的程度较小(R^2 较小),而 UV 灭活时各个活性参数均呈现较好的指数衰减,并且光合活性参数下降迅速,见表 4、表 5. 这是因为 UV 与 H_2O_2 的灭活机制不同所致,UV 主要是通过破坏藻细胞的 DNA 并影响其光合作用,藻细胞类囊体膜上存在 2 种光系统:光系统 I (PS I) 和光系统 II (PS II). 现有研究已经表明,紫外线辐射对 PS II 的影响更显著^[15,16]. 紫外线辐射会降解叶绿素,同时会使 PS II 的 D1 蛋白被破坏,使其电子传递受阻,叶绿素吸收光而激发的高能电子传不出去,积累的能量导致叶绿素的卟啉环发生氧化-开环,光系统反应中心失活,PS II 的电子传递效率降低^[17,18]. 而 H_2O_2 则主要是靠氧化作用,当氧化剂投加到一定量时,传质过程成为反应的控制阶段,因而此时再增加氧化剂的量反应效果并未明显提高.

表 3 光合活性参数的拟合结果(H_2O_2 工艺)

Table 3 Fitting of photosynthetic activity parameters of *Microcystis aeruginosa* (H_2O_2 process)

项目	Y	α	P_m
拟合方程 ¹⁾	$Y = 0.4049e^{-0.3762c}$	$\alpha = 0.1711e^{-0.273c}$	$P_m = 44.91e^{-1.0117c}$
相关系数 R^2	0.9296	0.8048	0.7989

1) 式中 c 为 H_2O_2 的浓度

表 4 紫外线剂量对铜绿微囊藻光合活性的影响

Table 4 Effects of UV doses on photosynthetic activity of *Microcystis aeruginosa*

紫外线剂量/ $mJ \cdot cm^{-2}$	Y	α	P_m	L_k
0	0.44	0.191	59	311.4
45.9	0.37	0.159	56.1	424.4
91.8	0.26	0.112	41.9	342.7
137.7	0.20	0.107	25.3	275.1
183.6	0.13	0.066	22	328
275.4	0.06	0.028	11	253.4
413.1	0.03	0.015	3.7	175.3
550.8	0.02	0.012	0.6	39.2

2.3 H_2O_2 与 UV 工艺对藻液 UV_{254} 的影响

2.3.1 H_2O_2 工艺对藻液 UV_{254} 的影响

为了保证较好的灭活效果,实验条件同 2.1.1 节中高浓度 H_2O_2 实验,结果见图 5. 从图 5 可以发现, H_2O_2 的投加量对藻液 UV_{254} 的含量有显著影响,

在 H_2O_2 投加量为 0 mmol/L 时,1 d 后其 UV_{254} 为 0.09,增加了 9.76%,4 d 后其 UV_{254} 为 0.107,增加了 30.49%;而在 H_2O_2 投加量为 79.14 mmol/L 时,1 d 后其 UV_{254} 为 0.652,增加了 695%,4 d 后其 UV_{254} 为 0.553,增加了 674%. 对于未投加 H_2O_2 的藻液,其 UV_{254} 随时间逐渐增加,这是由于藻液浓度增加所致,将 UV_{254} 与 D_{680} 进行线性拟合,得到方程为:

$$UV_{254} = 0.0592D_{680} + 0.0727$$

$$(R^2 = 0.7551)$$

对于投加 H_2O_2 的藻液,其 UV_{254} 在第 1 d 达到最高值,且峰值与 H_2O_2 的投加量呈线性关系,线性拟合方程为:

$$UV_{254} = 0.0071[H_2O_2] + 0.1196$$

$$(R^2 = 0.9839)$$

之后随时间逐渐降低,但降低的幅度有限,这是

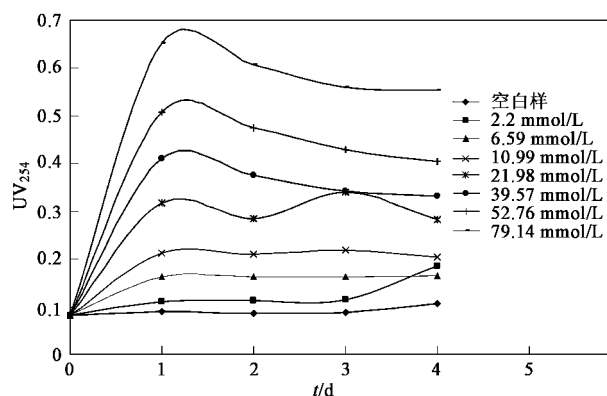
表 5 光合活性参数的拟合结果 (UV 工艺)

Table 5 Fitting of photosynthetic activity parameters of *Microcystis aeruginosa* (UV process)

项目	Y	α	P_m
拟合方程 ¹⁾	$Y = 0.4281e^{0.0554D}$	$\alpha = 0.1869e^{-0.0509D}$	$P_m = 82.5311e^{-0.0754D}$
相关系数 R^2	0.9767	0.9582	0.9737

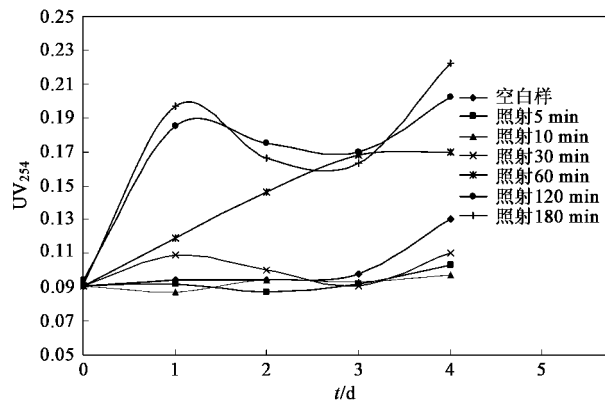
1) 式中 D 为紫外线剂量

因为 H_2O_2 对藻毒素等强紫外吸收物质的降解能力较差. 现有研究已经表明, 单独 H_2O_2 对 MC-LR 基本无降解, 这是由于 H_2O_2 氧化能力 (电极电位 1.77 V) 不足以破坏 MC-LR 的化学键^[19].

图 5 不同 H_2O_2 投加量对藻液 UV_{254} 的影响Fig. 5 Effects of H_2O_2 dosages on UV_{254} of *Microcystis aeruginosa* solution

2.3.2 UV 工艺对藻液 UV_{254} 的影响

实验中藻的 $D_{680} = 0.155$, 藻密度为 35×10^8 个/L. 实验中考察了紫外线照射时间分别为 5、10、30、60、120 及 180 min 对藻液 UV_{254} 的影响, 对应的紫外线剂量分别为 45.9、91.8、275.4、550.8、1101.6 及 1652.4 $mJ \cdot cm^{-2}$. 结果见图 6. 结果表明, 照射时间低于 30 min 时, 其 UV_{254} 并无明显提高, 照射 30 min 时, 4 d 后其 UV_{254} 比空白样甚至低

图 6 不同紫外线剂量对藻液 UV_{254} 的影响Fig. 6 Effects of UV dosages on UV_{254} of *Microcystis aeruginosa* solution

15.39%; 而照射 60 min 时, 其 UV_{254} 为 0.17, 增大 30.77%; 继续增大紫外线剂量, UV_{254} 含量继续增大, 照射 180 min 4 d 后, UV_{254} 则增至 0.222.

对比 UV 与 H_2O_2 工艺对藻液 UV_{254} 的影响. 可以发现, UV 工艺对藻细胞的破坏程度较小, 而 H_2O_2 在达到较好的灭活效果时, 对藻细胞的破坏程度很大.

3 结论

(1) H_2O_2 对铜绿微囊藻有一定的灭活效果, 在 H_2O_2 投加量 < 2 mmol/L 条件时, 随着 H_2O_2 的投加量增加, 对铜绿微囊藻的灭活效果不断提高, 在 H_2O_2 投加量 > 2 mmol/L 条件下, 增大 H_2O_2 的投加量对铜绿微囊藻灭活效果提高较少.

(2) UV 工艺对铜绿微囊藻有较好的抑制生长作用, $91.8 mJ \cdot cm^{-2}$ 的紫外剂量可对 35×10^8 个/L 浓度的藻产生 7 d 以上的抑制作用, 增大紫外线剂量, 灭活效果不断提高.

(3) H_2O_2 对铜绿微囊藻光合活性的降低效率不如 UV 工艺, UV 工艺时光合活性参数随紫外线剂量的升高均呈明显的指数衰减.

(4) UV 工艺比 H_2O_2 工艺更有利于控制灭活藻过程中藻液 UV_{254} 的升高, 因此, 紫外线技术相对化学氧化灭藻技术有较好的安全优势.

参考文献:

- [1] 贾瑞宝, 周善东. 城市供水藻类污染控制研究[M]. 济南: 山东大学出版社, 2006.
- [2] La M A, Prepas E, Spink D, et al. Control of hepatotoxic phytoplankton blooms implication for human health[J]. Water Res, 1995, 29(8):1845-1854.
- [3] Rodriguez E M, Acero J L, Spoof L, et al. Oxidation of MC-LR and-RR with chlorine and potassium permanganate: Toxicity of the reaction products[J]. Water Res, 2008, 42(6):1744-1752.
- [4] Daly R I, Lionel H O, Brookes J D, et al. Effect of chlorination on *Microcystis aeruginosa* cell integrity and subsequent microcystin release and degradation[J]. Environ Sci Technol, 2007, 41(12):4447-4453.
- [5] 樊杰, 陶涛, 张顺, 等. 紫外线对给水除藻作用的研究[J]. 工业用水与废水, 2005, 36(6):17-20.
- [6] Alam M Z B, Otaki M, Furumai H, et al. Direct and indirect inactivation of *Microcystis aeruginosa* by UV radiation[J]. Water

- Res, 2001, **35**(4):1008-1014.
- [7] 樊杰, 陶涛, 张顺, 等. 紫外光预处理与预氯化强化除藻的作用比较[J]. 工业用水与废水, 2005, **36**(5):24-26.
- [8] 景江, 周明, 汪星, 等. H₂O₂ 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, **19**(6):59-63.
- [9] Linden K G, Shin G A, Sobsey M D. Relative efficacy of UV wavelengths 246 for the inactivation of *Cryptosporidium parvum* [J]. Wat Sci Technol, 2001, **43**(12):171-174.
- [10] Sommer R, Pribil W, Appelt S, *et al.* Inactivation of bacteriophages in water by means of non-ionizing (UV-253.7nm) and ionizing (gamma) radiation: a comparative approach [J]. Water Res, 2001, **35**(13):3109-3116.
- [11] 韩博平, 韩志国, 付翔. 藻类光合作用机理与模型[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 57-78.
- [12] 韩志国, 雷腊梅, 韩博平. 利用调制荧光仪在线监测叶绿素荧光[J]. 生态科学, 2005, **24**(3):246-249.
- [13] Watts R J, Kong S, Orr M P, *et al.* Photocatalytic inactivation of coliform bacteria and viruses in secondary wastewater [J]. Water Res, 1995, **29**(1):95-100.
- [14] Mamane H, Shemer H, Linden K G. Inactivation of *E. coli*, *B. subtilis* spores, and MS-2, T-4, and T-7 phage using UV/H₂O₂ advanced oxidation [J]. J Hazard Mater, 2007, **146**(3):479-486.
- [15] Okada M, Kitajima M, Buder W L. Inhibition of photosystem I and photosystem II in chloroplasts by UV radiation [J]. Plant Cell Physiol, 1976, **17**:35-43.
- [16] Van T K, Corrad L A, West S H. Effect of 298nm radiation on photosynthetic reactions of leaf discs and chloroplast preparations of some crop species [J]. Environ Exp Bot, 1977, **17**:107-112.
- [17] Vass I, Sass L, Spetea C, *et al.* UV-B induced inhibition of photosystem II electron transport studied by EPR and chlorophyll fluorescence. Impairment of donor and acceptor side components [J]. Biochemistry, 1996, **35**(27):8964-8973.
- [18] Chaturvedi R. Degradation and de novo synthesis of D1 protein and psbA transcript level in *Chlamydomonas reinhardtii* during UV-B inactivation of photosynthesis and its reactivation [J]. Bioscience, 2000, **25**(1):65-71.
- [19] 郭建伟, 高一, 殷娣娣, 等. UV/H₂O₂ 工艺降解微囊藻毒素-LR [J]. 环境科学, 2009, **30**(2):457-462.