

紫外线照射对铜绿微囊藻活性的影响

张永吉¹, 郭建伟¹, 周玲玲², 高乃云²

(1. 同济大学 长江水环境教育部重点实验室, 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, 考察了紫外线照射对铜绿微囊藻的灭活效果及光合活性的影响, 并研究了经紫外线照射后藻溶液水质的变化情况. 结果表明, 紫外线对铜绿微囊藻的灭活效果随着紫外线剂量的增大而提高, 而光合活性随着紫外线剂量的增加呈指数下降; 在藻浓度为 35×10^8 个 \cdot L^{-1} 条件下, $91.8 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的紫外线剂量即可对其产生有效的抑制作用, 紫外线照射时间 10 min 是抑制藻类生长的最佳时间; 藻的浓度对紫外线灭活藻有一定影响, 紫外线对高浓度藻灭活效果明显; 紫外线照射对藻液的 UV_{254} 影响较小, 但藻液的 DOC(溶解性有机碳)随着紫外线剂量的增加呈现先增大后降低的趋势.

关键词: 铜绿微囊藻; 紫外线; 照射; 灭活; 光合活性

中图分类号: X 524

文献标识码: A

Effect of UV Irradiation on Microcystic Aeruginosa Activity

ZHANG Yongji¹, GUO Jianwei¹, ZHOU Lingling², GAO Naiyun²

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

Abstract: A study was made of the effect of ultraviolet rays (UV) irradiation on the inactivation and photosynthetic activity of microcystic aeruginosa, and an investigation was made into the change of water quality in the algae solution. Results show that the inactivating efficiency increases with the increasing of UV fluence, but the photosynthetic activity decreases exponentially with the increasing of UV fluence. Under the algae concentration of 35×10^8 (cell) \cdot L^{-1} , the algae is suppressed effectively at the UV fluence of $91.8 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$. The corresponding optimum irradiation duration is 10 min. The concentration of microcystic aeruginosa determines its inactivation, and the removal efficiency of the algae with high

concentration is more obvious. UV radiation is less influential on the UV_{254} of algae solution. With the increasing of UV radiation intensity, the removal of DOC presents an initial increase and then a decrease.

Key words: microcystic aeruginosa; ultraviolet rays (UV); irradiation; inactivation; photosynthetic activity

季节性藻类含量过高是我国部分地区存在的主要水质问题, 高藻水不仅会引起沉淀效果差、药耗增加及滤池堵塞等运行问题, 而且还会增加出水的浊度、色度和毒性, 导致出水余氯下降. 因此, 如何对藻类进行有效的去除是一个亟待解决的问题^[1-2]. 目前关于藻类去除的报道多采用混凝气浮、化学氧化和微絮凝过滤等方法^[3], 而对于紫外线除藻的研究较少. 紫外线具有抑藻杀藻的作用, 藻类经紫外线预处理后, 易于被后续工艺去除^[4-5]. 樊杰等^[6]采用紫外线-气浮工艺除藻试验表明, 出水的平均藻类去除率高达 87.6%; 景江等^[7]研究了 UV/H_2O_2 工艺对鱼腥藻的灭活效果, 在 H_2O_2 投加量为 $1 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ 、紫外线强度为 $0.37 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 条件下, 5 d 后藻的去除率高达 85%. 本文以铜绿微囊藻为研究对象, 考察了不同紫外线剂量对藻的去除效果及活性的影响, 并对紫外线照射后藻溶液水质的变化情况进行了研究.

1 材料与方法

1.1 试验装置

试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, 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

收稿日期: 2009-07-27

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

作者简介: 张永吉(1974—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为饮用水深度处理. E-mail: zhangyongji@tongji.edu.cn

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.圆筒底部紫外线的平均强度为 $0.153\text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$,通过改变溶液的照射时间达到所需紫外线剂量.

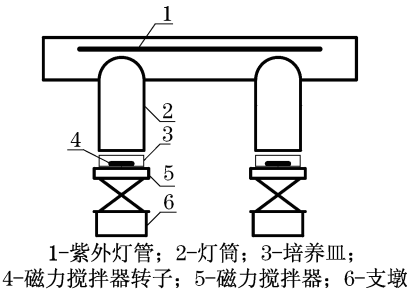


图 1 准平行光束仪装置图

Fig.1 Schematic diagram of the colimated beam device

1.2 试验水样

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. BG11 培养基的配方见表 1 和表 2(A_5 溶液为微量元素储备液).铜绿微囊藻母液在恒温培养箱中(25 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 下进行培养,培养箱内光照强度为 1500Lux,光暗周期 12h:12h.试验时,取一定量处于对数期的藻母液用灭菌 BG11 培养基稀释到所需浓度,得到实验使用液.

表 1 BG11 培养基组成

Tab.1 Components of BG11 culture

组成物质	浓度	组成物质	质量浓度/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
NaNO_3	$1.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{K}_2\text{HPO}_4\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	0.040
$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$0.075\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.036
柠檬酸	$0.006\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$	柠檬酸铁铵	0.006
Na-EDTA	$0.001\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$	Na_2CO_3	0.020
A_5 溶液	$1\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$		

表 2 A_5 溶液组成

Tab.2 Components of A_5 solution

组成物质	质量浓度/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	组成物质	质量浓度/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
H_3BO_3	2.860	$\text{MnCl}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$	1.810
$\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.222	$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.079
$\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.390	$\text{Co}(\text{NH}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.049

1.3 紫外线照射试验

将配制好的藻溶液(藻密度为 $35\times 10^8\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$ ($\text{OD}_{680}=0.155$, OD_{680} 为 680 nm 处的吸光度))40 mL 置于准平行光束仪下的 10.5 cm 培养皿中,经过不同紫外线照射时间后,置于微电脑光照培养箱(SPX-250B-G)中进行培养,分别于照射后的 1,2,3 和 4 d 取样测定 OD_{680} 值及 UV_{254} 值(UV_{254} 为藻液过 0.45

μm 膜后 254 nm 处的吸光度).

OD_{680} 和 UV_{254} 采用 UV1800 型紫外/可见分光光度计测定; DOC (溶解性有机碳)采用岛津公司 TOC-VCPH 型 TOC 仪测定; $Zeta$ 电位采用 Zetasizer Nano Z 型 Zeta 电位分析仪测定; TDS (总溶解性固体)、电导率及盐度采用 Leizi DDSJ-308A 型电导率仪测定; pH 采用 Leizi PHS-3C 型 pH 计测定;藻的光合量子产量 Y (Y 值反应藻细胞的光合效率)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 $1\text{ }164\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.初始斜率 α ,最大相对电子传递速率 P_m ,半饱和强度 L_k ,由如下 RLC 方程拟合得到^[8-9].

$$P = P_m(1 - \alpha P_{AR}/P_m)e^{-\beta P_{AR}/P_m}$$

式中: P_{AR} 为光强, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; P 为相对电子传递速率,量纲一; P_m 反映最大光合速率; β 为 RLC 在高光强下降部分的斜率; α 反映了光能的利用效率; L_k 反映了藻细胞对强光的耐受能力,且 $L_k = P_m/\alpha$.

2 结果与讨论

2.1 紫外线照射剂量对铜绿微囊藻生长的影响

藻密度随紫外线剂量的变化见图 2.由图 2 知,紫外线剂量对藻的灭活效果有较大影响.在没有紫外线照射下,铜绿微囊藻的 OD_{680} (OD_{680} 为 680 nm 处的吸光度,与藻密度相关)随时间的延长而逐渐增加,如初始的 OD_{680} 为 0.155(藻浓度 $35\times 10^8\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$),而 4 d 后的 OD_{680} 升高到 0.564.当紫外线剂量小于 $91.8\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,紫外线对铜绿微囊藻的灭活效果较低,而当紫外线剂量达到 $91.8\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,铜绿微囊藻出现明显生长停滞现象.在该剂量下 1 d 以后的 OD_{680}

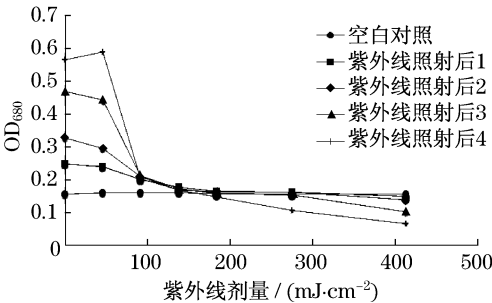


图 2 藻密度(OD_{680})随紫外线剂量的变化

Fig.2 Change of OD_{680} with UV fluence

降低到 0.201,而对照组的 OD₆₈₀ 为 0.249,藻密度相比降低近 19.28%;而以 550.8 mJ · cm⁻² 的紫外线剂量照射后,4 d 以后 OD₆₈₀ 仅为初始的 30.01%,这说明在此剂量下,藻直接进入了衰亡期,这与 Sakai 等人的研究成果一致^[10].

2.2 藻初始浓度对紫外线灭活效果的影响

试验采用的三种初始藻浓度分别为 8.97 × 10⁸, 2.12 × 10⁹ 和 4.93 × 10⁹ 个 · L⁻¹,其相应 OD₆₈₀ 分别为 0.044,0.096 和 0.215,紫外线对三种浓度藻的灭活效果如图 3 所示.图中 *t* 表示紫外线照射时间.可以看出,藻初始浓度对紫外线灭活藻效果有一定影

响,而紫外线对高浓度藻液效果更明显,如照射 5 min 时,三种藻液培养 7 d 后 OD₆₈₀ 分别相应增加了 91.84%,65.63%和 42.57%,而紫外线照射 10 min 后,7 d 后的 OD₆₈₀ 增加值分别为 -20.83%, -1.05%和 12.45%.这可能是因为藻液浓度越高,经紫外线照射后藻细胞释放的藻毒素等有害物质浓度越高,加之高浓度条件下个体生长所获得的光照、营养元素等的比重减小,从而致使高浓度时对藻的灭活效果明显.在试验光强下,紫外线照射时间为 10 min 是抑制藻类生长的最佳时间.

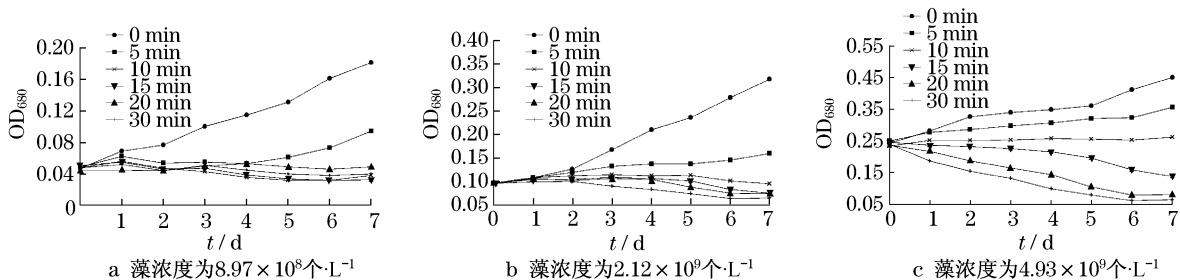


图 3 藻初始浓度对紫外线灭活效果的影响

Fig.3 Effect of initial algae concentrations on effects of microcystis aeruginosa by UV irradiation

2.3 紫外线照射剂量对铜绿微囊藻光合活性的影响

从表 3 可见,随着紫外线剂量的不断增大,藻细胞的 *Y*,*α*,*P_m* 三个参数均不断减小,对 *Y*,*α*,*P_m* 三个参数分别与紫外线剂量采用指数函数进行拟合,得到的拟合参数见表 4.在所研究的紫外剂量范围内,藻的光合活性基本呈指数下降趋势,相关系数均大于 0.95.紫外线剂量高于 275.4 mJ · cm⁻² 时,各参数明显降低,如紫外线剂量为 275.4 mJ · cm⁻² 时,其 *Y*,*α* 和 *P_m* 仅为初始值的 13.64%,14.66%和 18.64%.同时 *Y*,*α*,*P_m* 三个参数的降低幅度不同,如在紫外线剂量为 91.8 mJ · cm⁻² 时,*Y* 和 *α* 值分别降低 40.91%和 41.36%,而 *P_m* 值仅降低

28.98%,这表明藻的光合效率比光合速率更易受紫外线剂量的影响,Sakai 等^[11] 人的研究也表明经紫外线处理后铜绿微囊藻细胞光合活性会降低,这与本研究的结论是一致的.

表 4 光合活性参数的拟合结果

Tab.4 Fitting results of photosynthetic activity parameters of microcystis aeruginosa

	<i>Y</i>	<i>α</i>	<i>P_m</i>
拟合方程	$Y = 0.4281 \times e^{-0.0554F_U}$	$\alpha = 0.18691 \times e^{-0.0509F_U}$	$P_m = 82.5311 \times e^{-0.0754F_U}$
相关系数 <i>R</i> ²	0.9767	0.9582	0.9737

注:*F_U* 为紫外线剂量,mJ · cm⁻².

表 3 紫外线辐射剂量对铜绿微囊藻光合活性的影响
Tab.3 Effect of UV fluence on photosynthetic activity of microcystis aeruginosa

紫外线剂量/ (mJ · cm ⁻²)	<i>Y</i>	<i>α</i>	<i>P_m</i>	<i>L_k</i>
0	0.44	0.191	59.0	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	22.0	328.0
275.4	0.06	0.028	11.0	253.4
413.1	0.03	0.015	3.7	175.3
550.8	0.02	0.012	0.6	39.2

2.4 紫外线照射对水质的影响

图 4 是经过紫外线照射后,藻溶液中水质的变化情况.在紫外线剂量为 0~550.8 mJ · cm⁻² 下,藻液的 UV₂₅₄ 变化不大,其值在 0.107~0.122 之间;DOC 质量浓度呈现明显的先上升后下降再上升的波浪式趋势,在紫外剂量为 45.9 mJ · cm⁻² 时,其 DOC 质量浓度为 13.64 mg · L⁻¹,相比空白样增长 43.72%;在紫外剂量为 413.55 mJ · cm⁻² 时,其 DOC 质量浓度仅为 6.912 mg · L⁻¹,相比空白样降低 27.17%,而当剂量达到 550.8 mJ · cm⁻²,其 DOC

质量浓度为 $9.144\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 相对于 $413.55\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时的 DOC 质量浓度又增长 32.29% . 其原因在于不同剂量的紫外线对藻细胞具有不同的作用, 使藻细胞的结构受到不同程度的破坏^[11-16]. 在剂量较小时 ($<100\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$), 紫外线对藻细胞的破坏作用使藻细胞内的物质释放出来, 但在该剂量下其能量不足以对释放物质进行降解, 表现为 DOC 的质量浓度升高; 在剂量为 $100\sim 413.55\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 下, 紫外线对藻类释放物的降解量大于细胞内物质的释放量, 导致 DOC 的质量浓度下降; 而当剂量 $>413.55\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, 紫外线对细胞的破坏作用增强, 从而导致细胞内物质的释放速度远大于紫外线对其降解速度, 因而使溶液 DOC 的质量浓度增加.

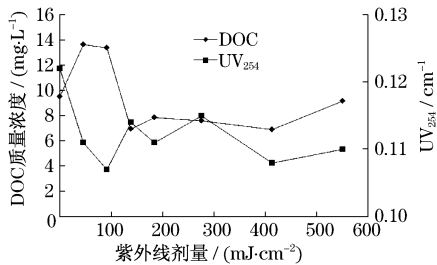


图 4 初始藻浓度为 35×10^8 个 $\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下藻培养液 DOC 质量浓度, UV_{254} 随紫外线剂量的变化
Fig. 4 Change of UV_{254} and DOC with UV fluence at the initial algae concentration of $35\times 10^8\text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$

表 5 所示的是经紫外线照射后测得的 Zata 电位、TDS(总溶解性固体)、电导率、盐度及 pH 值水质指标的影响. 从表 5 可以发现, 经紫外线照射后溶液的 TDS、电导率、盐度及 Zata 电位等均变化不大, 但 pH 值明显下降, 照射 60 min 时其 pH 值降低了近 14.66% , 可能主要是因为紫外线会激发产生羟基自由基, 进而会消耗水中的 CO_3^{2-} 或 HCO_3^- , 所以水样的 pH 值会降低, 而 pH 值的降低必然会影响藻的正常生长.

表 5 紫外线照射对藻液水质引起其他指标的影响
Tab.5 Influence of UV irradiation on some parameters in the algae solution

照射时间 t/min	Zata 电 位/mV	TDS 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	电导率/ ($\text{ms}\cdot\text{cm}^{-1}$)	盐度/ 10^{-12}	pH 值
0	-30.0	1 015	2.03	1.1	8.73
5	-34.7	1 019	2.03	1.2	8.22
10	-27.3	1 024	2.04	1.2	7.97
15	-29.0	1 038	2.07	1.2	7.86
20	-28.6	1 048	2.09	1.2	7.83
30	-31.6	1 084	2.16	1.2	7.61
45	-29.4	1 052	2.11	1.2	7.57
60	-31.9	1 028	2.05	1.2	7.45

3 结论

- (1) 紫外线照射能够很好地降低铜绿微囊藻的生长活性, 紫外线剂量为 $91.8\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时对铜绿微囊藻开始具有明显的抑制作用, 在试验光强下, 紫外线照射时间 10 min 是抑制藻类生长的最佳时间;
- (2) 随着紫外线剂量的增加, 紫外线照射后藻的光合活性呈指数下降趋势;
- (3) 藻初始浓度对紫外线灭活铜绿微囊藻有一定影响, 藻密度越高其效果越显著;
- (4) 紫外线照射对藻液的 UV_{254} 影响较小, 而 DOC 质量浓度呈现先上升后下降再上升的趋势.

参考文献:

[1] 余国忠, 刘军, 王占生. 藻细胞特性对净水工艺的影响研究[J]. 环境科学研究, 2000, 13(6): 56.
YU Guozhong, LIU Jun, WANG Zhansheng. Effects of the algae characteristics on the drinking water treatment processes[J]. Research of Environmental Sciences, 2000, 13(6): 56.

[2] 陈超, 张晓健, 朱玲侠, 等. 高藻期控制消毒副产物及其前体物的优化工艺组合[J]. 环境科学, 2007, 28(12): 2722.
CHEN Chao, ZHANG Xiaojian, ZHU Lingxia, et al. Optimal process combination for control of disinfection by-products and precursors during high algae laden period[J]. Environmental Science, 2007, 28(12): 2722.

[3] 雷国元, 张晓晴, 王丹鹭. 聚合铝盐混凝剂混凝除藻机理与强化除藻措施[J]. 水资源保护, 2007, 23(5): 50.
LEI Guoyuan, ZHANG Xiaoqing, WANG Danyuan. The algae removal mechanism by polymerized aluminium salt coagulants and methods to improve algae removal[J]. Water Resources Protection, 2007, 23(5): 50.

[4] 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.
FAN Jie, TAO Tao, ZHANG Shun, et al. Effects of ultraviolet radiation on algae-removal of feedwater[J]. Industrial Water & Wastewater, 2005, 36(6): 17.

[5] Alam M Z B, Otaki M, Furumai H, et al. Direct and indirect inactivation of microcystis aeruginosa by UV radiation[J]. Wat Res, 2001, 35(4): 1008.

[6] 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.
FAN Jie, TAO Tao, ZHANG Shun, et al. Comparisons between enhanced effect of ultraviolet light C pretreatment and pre-chlorination on algae removal [J]. Industrial Water & Wastewater, 2005, 36(5): 24.

[7] 景江, 周明, 汪星, 等. H_2O_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, 19(6): 59.

(下转第 1806 页)