

UV-C 辐照抑制铜绿微囊藻生长的动态实验研究

袁侃,毛献忠*,陶益,张锡辉

(清华大学深圳研究生院环境工程与管理研究中心,深圳 518055)

摘要:以我国典型淡水水华藻种铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa* 905)为研究对象,采用推流式低压紫外灯反应器研究在动态条件下 Ultraviolet-C(UV-C)辐照对蓝藻生长抑制作用的效果.对数培养期的蓝藻液流经反应器进行 UV-C 辐照处理,其后正常培养,在培养期 2 h、1 d、3 d、5 d、7 d、9 d 分别取样,通过研究级倒置荧光显微镜在荧光视野下进行细胞计数.结果表明,辐照处理未引起铜绿微囊藻细胞的大量破裂死亡,36~115 mW·s·cm⁻² 剂量范围的 UV-C 辐照能在 9 d 内有效抑制 2.6×10⁵~2.7×10⁵ cells·mL⁻¹ 的铜绿微囊藻细胞密度增长,31~50 mW·s·cm⁻² 剂量范围的 UV-C 辐照能在 9 d 内有效抑制 9.0×10⁵~1.15×10⁶ cells·mL⁻¹ 的铜绿微囊藻细胞密度增长.

关键词:铜绿微囊藻;紫外线反应器;UV-C 辐照;藻细胞生长抑制;动态实验

中图分类号:X52 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)02-0310-08

Dynamic Experiment on Controlling of *Microcystis aeruginosa* by UV-C Irradiation

YUAN Kan, MAO Xian-zhong, TAO Yi, ZHANG Xi-hui

(Research Center for Environmental Engineering and Management, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: A plug-flow UV-C reactor equipped with low pressure UV lamp was utilized to study the suppression effect after UV-C irradiation under the dynamic conditions on *Microcystis aeruginosa*, a typical cyanobacterium in algae blooms in China. The culture fluid of *Microcystis aeruginosa* was exposed to UV-C irradiation when pumped through the reactor. After that, the fluid was incubated under the normal culture condition, and sampled at 2 h, 1 d, 3 d, 5 d, 7 d, 9 d for determination of cell density using the inverted system fluorescence microscope. The experiments showed that, UV-C irradiation did not cause severe cell lysis, and UV-C irradiation at dose ranged from 36 to 115 mW·s·cm⁻², and 31 to 50 mW·s·cm⁻² could suppress *Microcystis aeruginosa* biomass growth for the 2.6×10⁵~2.7×10⁵ cells·mL⁻¹ and 9.0×10⁵~1.15×10⁶ cells·mL⁻¹ fluid in 9 days, respectively.

Key words: *Microcystis aeruginosa*; UV reactor; UV-C irradiation; growth suppression on algae cells; dynamic experiment

近年来,我国湖泊等水体有害藻类暴发现象频繁^[1],超过 60% 的湖泊已经富营养化并发生水华现象,而蓝藻类铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)是水华中的一种优势藻种^[2].*Microcystis aeruginosa* 的暴发引发恶臭,释放藻毒素,甚至影响到饮用水水源^[3-5].降低氮磷营养盐水平,是解决蓝藻水华问题的最根本途径^[6],但是,外源氮磷营养输入、底泥中大量沉积的内源营养负荷难以短时间内控制.传统治理蓝藻水华方法大多是水华发生后的应急措施,如硫酸铜等除藻剂,是化学方法,见效快但可能引起二次污染并加速藻细胞体内藻毒素的释放^[7];絮凝等物理方法则成本较高,难以运用于大面积的藻类去除^[8].因此,有必要研究开发蓝藻水华控制预防性措施.

紫外线是一种能量较高的短波辐射,利用紫外辐照可以消毒、抑制微生物生长.其中,消毒常用的紫外光波长为紫外线 C 波段(UV-C 200~280 nm),

特别是 254 nm 附近. UV-C 辐照可造成绝大多数微生物 DNA 结构的破坏,阻止蛋白质合成而使细胞丧失繁殖能力^[9,10].紫外线在消毒领域得到广泛应用^[11],美国将紫外消毒工艺作为自来水消毒的最佳手段写入供水法规中^[12].

UV-C 波段紫外辐照能杀灭藻细胞或较长时间抑制蓝藻生长. Iseri 等^[13]在 1993 年进行了船载紫外灯处理湖水中赤潮的研究,发现多甲藻细胞数在超过 1.0×10⁴ cells·mL⁻¹ 的情况下,需要 50 s 以上的辐照时间才能够杀灭 90% 的藻细胞,达到控制赤潮的目的. Alam 等^[14]研究表明,静态条件下 75 mW·s·cm⁻² 的紫外剂量辐照对 *Microcystis aeruginosa* 来说是致命的,而 37 mW·s·cm⁻² 的紫

收稿日期:2009-04-02;修订日期:2009-06-10

基金项目:国家自然科学基金项目(U0773002)

作者简介:袁侃(1984~),男,硕士研究生,主要研究方向为水环境修复,E-mail:hitless@gmail.com

* 通讯联系人,E-mail:maoxz@sz.tsinghua.edu.cn

外剂量照射后的 7 d 内没有发生细胞分裂,细胞密度维持在 $6 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$. Sakai 等^[15,16]研究发现,利用较低剂量($180 \text{ mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$)的 UV-C 辐照能在 7 d 内抑制铜绿微囊藻(*M. aeruginosa* PCC 7806)细胞数目增长,从而抑制水体内藻毒素的增加.由于紫外线并不是对藻类细胞直接造成物理伤害,藻细胞密度逐渐减少,细胞体内的藻毒素缓慢释放,防止了细胞破裂造成藻毒素大量释放^[14-16].较低剂量的 UV-C 辐照方式不同于传统的消毒工艺,其目的是抑制蓝藻细胞繁殖而非直接杀灭细胞.这种较低剂量的 UV-C 辐照方式,即为亚致死剂量 UV-C 辐照.目前,使用亚致死剂量 UV-C 辐照抑制藻类生长仍限于室内静态情况下的剂量效应及机制方面,缺乏动态条件下实验研究数据.

本研究在静态实验的基础上^[17],以我国常见水华蓝藻铜绿微囊藻(*M. aeruginosa* 905)为试验对象,采用 L 型推流式动态紫外反应器进行 UV-C 辐照,分析了动态条件下 UV-C 辐照对铜绿微囊藻的生长抑制效果,以期今后 UV-C 辐照抑制藻类生长在实际水体中的工程应用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 材料

实验选用铜绿微囊藻(*M. aeruginosa* 905,

1998 年分离于滇池).藻种购自于中国科学院典型培养物保藏委员会淡水藻种库(FACHB).采用 BG11 培养基,在光照培养箱中进行培养.培养条件为温度(25 ± 1)℃、光源为冷白荧光灯,光强 $2\,000 \text{ lx}$ 、光暗周期比为 12 h: 12 h、人工手动摇藻 $3 \sim 5 \text{ 次} \cdot \text{d}^{-1}$.

1.2 实验装置及方法

实验使用推流式反应器,反应器长 40 cm,直径为 4 cm,内含一根外径 24 mm 的石英套管用于保护紫外灯,如图 1 所示.使用 Philips TUV 16W 4P-SE 型号低压紫外灯管,具体参数如表 1.

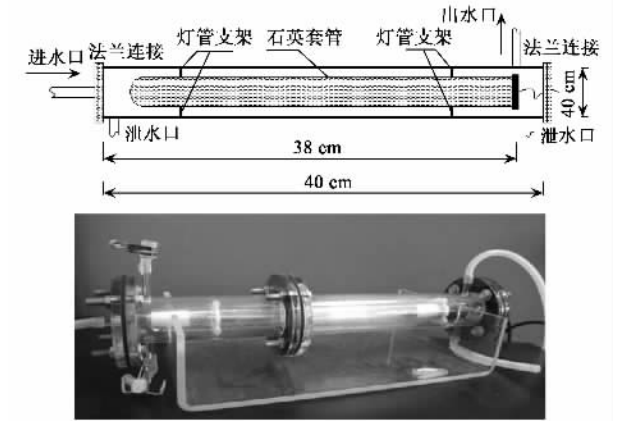


图 1 紫外反应器示意图及实物照片
Fig. 1 Schematic diagram of the UV reactor and photograph

表 1 低压紫外灯参数
Table 1 Parameters of low-pressure UV lamp

型号	功率/W	UV-C 功率(100 h 后)/W	有效寿命/h	弧长/cm
TUV 16W 4P-SE	16	3.4	8 000	23.7

实验系统如图 2 所示.培养对数生长期的铜绿微囊藻液,置于 10 L 的玻璃容器 C1 中,利用蠕动泵 P 抽取原藻液,使之从玻璃容器 C1 经流量计 F 输送至 L 型紫外反应器 R 中.藻液沿紫外线灯管轴向方向流过紫外反应器,接受反应器中心紫外灯管的紫外线辐照.藻液通过紫外反应器后流入到玻璃容器 C2 内,流入 C2 前在取水口 SP 处通过阀门 T 在间隔时间 Δt (Δt 时间内通过体积 ≥ 3 倍反应器容积)接取 100 mL 的处理后样品,转移至已灭菌的 250 mL 玻璃三角瓶中,于光照培养箱中培养.本研究中反应器系统在实验前后均使用超纯水清洗 5 min,其余器材均经过高温灭菌.

1.3 UV-C 辐照剂量计算模型

采用上述装置进行 UV-C 辐照,紫外线的剂量

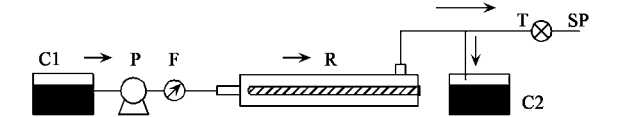


图 2 实验系统示意
Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system

可以表示为紫外线强度与辐照时间的乘积,在紫外线灯管以及原藻液紫外透过率 UVT 确定的情况下,本实验通过调节蠕动泵转速/流量以改变辐照时间从而调整 UV-C 辐照剂量.

紫外辐照剂量由反应器中平均光强 I 与停留时间 t 的乘积求得,即剂量 $D = I \times t$.反应器为推流式反应器,则其停留时间 t 可通过反应器的容积和流

量换算得到.

$$t = \pi L (R^2 - r_0^2) / Q \quad (1)$$

式中, Q 为流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), L 为反应器腔体长度 (cm), r_0 为紫外灯石英套管外径 (cm), R 为反应器内径. 反应器内平均紫外光照强度 I 可通过紫外辐照光强计算得到, 反应器中某点处的紫外辐照光强公式为^[10]:

$$I(r) = \frac{P}{2\pi r L_0} e^{-\alpha(r-r_0)} \quad (2)$$

式中, P 为灯管有效紫外功率 (mW), L_0 为灯管弧长 (cm), r 为空间中某点距离线光源的距离 (cm), α 为媒介的紫外光吸收系数, $\alpha = -\ln(\text{UVT})$. 反应器内的平均紫外光照强度 I 为:

$$I = \frac{2\pi \int_{r_0}^R I(r) r dr}{\pi(R^2 - r_0^2)} \quad (3)$$

则剂量 D 为:

$$D = I \times t = \frac{PI[1 - e^{-\alpha(R-r_0)}]}{QL_0\alpha} \quad (4)$$

1.4 分析测定

1.4.1 取样及细胞计数

于辐照处理前、后(2 h 内)、1 d、3 d、5 d、7 d、9 d 取样, 测定铜绿微囊藻细胞密度. 细胞计数采用浮游生物计数框, 于倒置型荧光显微镜(Olympus IX71, 日本)的荧光视野下计数. 除因破裂或褪色造成荧光视野下观察不到的细胞, 具有荧光特征的细胞均被计数为活细胞. 检测下限为 $10^4 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$.

1.4.2 紫外透过率 UVT 253.7 nm

水样在 253.7 nm 波长处的紫外线穿透率或紫外吸收系数由紫外分光光度计(岛津 UV-1700)测得. 样品置于 1 cm 石英比色皿中, 使用去离子水做空白对比.

1.4.3 统计分析

本实验样品均设置 3 个平行, 实验数据采用 3 个平行样的平均值, 并计算标准方差. 采用 Origin 进行绘图, 统计分析采用 SPSS for Windows 10.0.

2 结果与讨论

蓝藻生物量水平 $2 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 被认为是较低水华风险, $10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 是中度水华风险水平, 如果水体中细胞数增加至 $10^7 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$, 则被认为是高度水华风险水平^[18]. 本实验选取 $2.6 \times 10^5 \sim 2.7 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 为低生物量组和 $9.0 \times 10^5 \sim 1.15 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 高生物量组 2 组蓝藻生物量

水平进行实验.

2.1 低藻生物量组

2.1.1 实验结果

低生物量组针对 $2.6 \times 10^5 \sim 2.7 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 铜绿微囊藻细胞密度进行不同剂量的 3 个组次实验.

(1) 第 1 组次, 起始藻细胞密度为 $2.7 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$.

本组次实验分别采用 0、153、195、445 $\text{mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 UV-C 辐照进行处理, 实验结果如图 3 所示. 剂量为 153、195 $\text{mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 UV-C 辐照均在 5 d 内抑制铜绿微囊藻细胞密度的增长, 藻细胞密度基本维持在 $2.7 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 左右, 辐照后的第 7 d 起 2 组辐照样品的藻细胞密度均出现下降. 剂量为 445 $\text{mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 UV-C 辐照后, 藻细胞密度在 9 d 内呈持续下降状态, 抑制效果较前 2 组剂量偏大. 剂量 153、195、445 $\text{mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 处理组的铜绿微囊藻细胞 9 d 内的生长速率分别为 -0.078、-0.101、-0.189, 显著低于对照组 0.170 的生长速率, 辐照处理后样品的生物量增长受到明显抑制.

(2) 第 2 组次, 起始藻细胞密度为 $2.6 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$.

本组次实验分别采用 0、90、115、422 $\text{mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 剂量的 UV-C 辐照进行处理, 实验结果如图 4 所示. 剂量为 90、115 $\text{mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 UV-C 辐照均在 9 d 内抑制铜绿微囊藻细胞密度的增长, 藻细胞密度基本维持在 $2.6 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 左右, 藻细胞密度没有发生显著性变化($p > 0.05$). 同样, 剂量为 422 $\text{mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 UV-C 辐照则抑制效果偏大, 藻细胞密度在辐照后的 9 d 内呈持续下降状态. 剂量 90、115、422 $\text{mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 处理组的铜绿微囊藻细胞 9 d 内的生长速率分别为 -0.013、-0.013、-0.094, 显著低于对照组 0.181 的生长速率, 辐照处理样品的生物量增长受到明显抑制.

(3) 第 3 组次, 起始藻细胞密度为 $2.7 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$.

本组次实验分别采用 0、27、36 $\text{mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 剂量的 UV-C 辐照进行处理, 结果如图 5 所示. 剂量为 36 $\text{mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 UV-C 辐照后在 9 d 时间内抑制铜绿微囊藻细胞密度的增长, 藻细胞密度基本维持在 $2.7 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 左右. 剂量为 27 $\text{mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 UV-C 辐照后的样品在辐照后 5 d 内保持在 $2.7 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 左右, 而从第 5 d 起

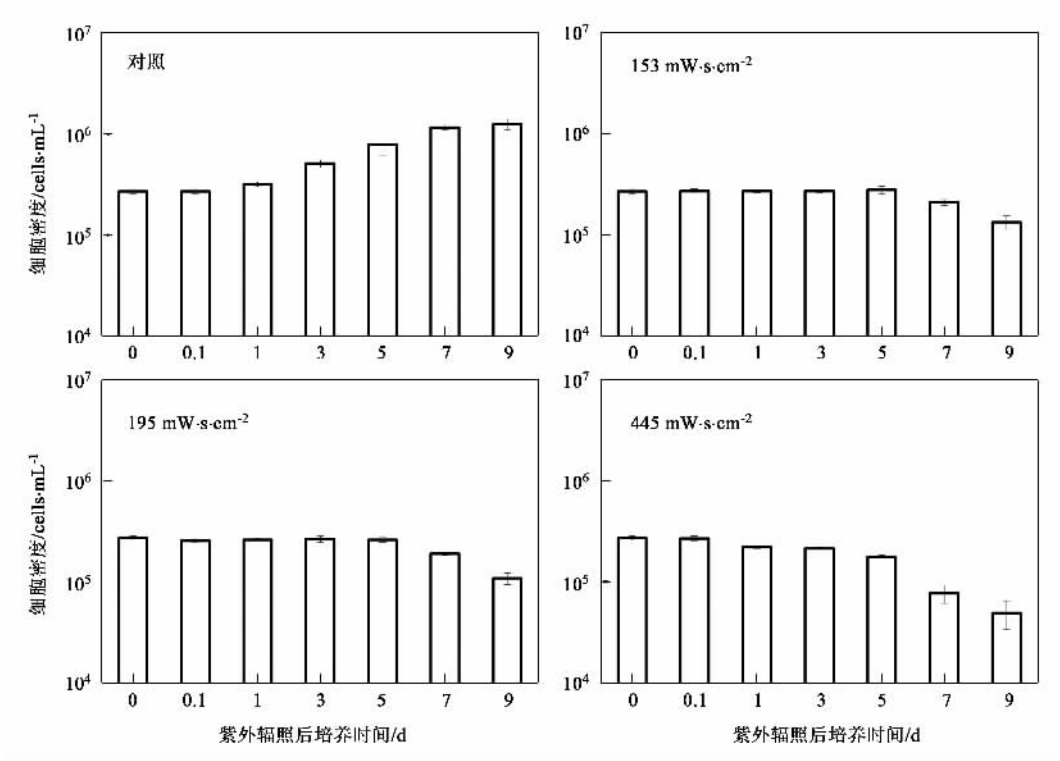


图3 第1组次实验结果

Fig.3 Experimental result of the first group

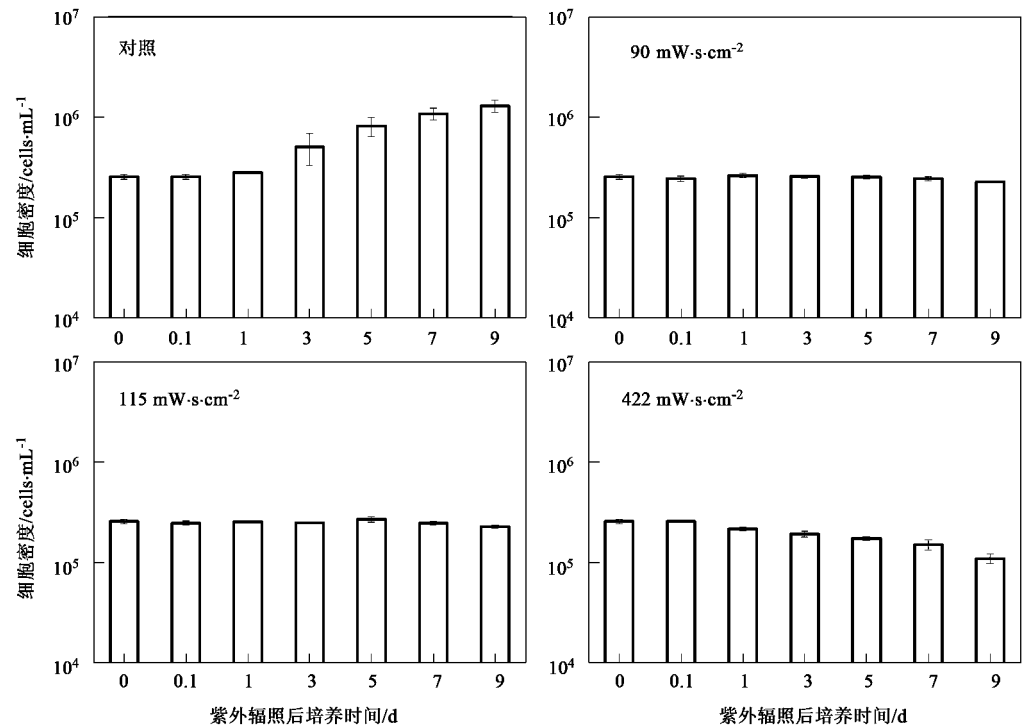


图4 第2组次实验结果

Fig.4 Experimental result of the second group

其生物量开始增加,第9 d 时增长至 $3.6 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$. 27、36 $\text{mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 处理组的铜绿微

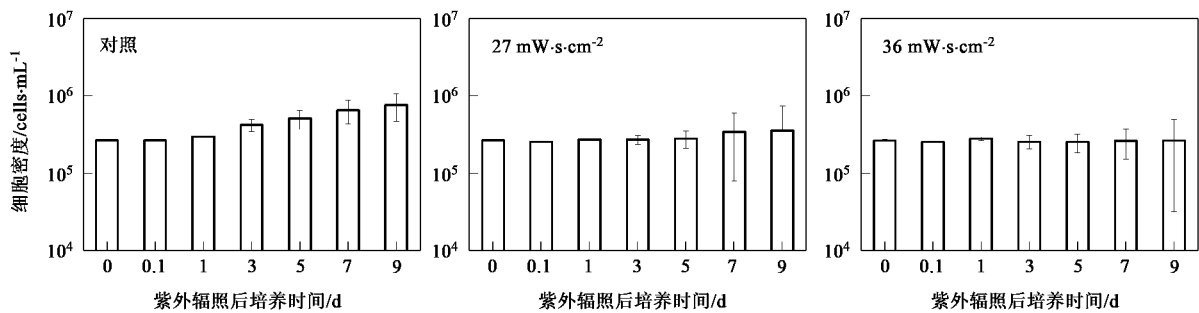


图 5 第 3 组次实验结果
Fig. 5 Experimental result of the third group

囊藻细胞 9 d 内的生长速率分别为 0.032、-0.001,显著低于对照组 0.117 的生长速率。

2.1.2 辐照前后藻细胞密度变化

如图 3~5 所示,对辐照后 2 h 与辐照前样品的藻类细胞密度进行对比发现,在 UV-C 辐照后 2 h 内 3 组次实验中 $2.6 \times 10^5 \sim 2.7 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的铜绿微囊藻的细胞密度没有发生明显变化.对所有样品处理前及辐照后 2 h 的细胞密度进行 t 检验分析,发现辐照前后的藻类细胞数目无显著性差异 ($n = 24, p > 0.05$),同时,在倒置荧光显微镜的明视野与荧光视野下观察未发现大量褪色细胞或破裂细胞,证明实验中 UV-C 辐照不会引起铜绿微囊藻细胞短时间内大量破裂死亡。

2.1.3 剂量效应分析

藻细胞密度的对数减少 L_r 采用公式(5)计算^[10]:

$$L_r = \lg \frac{N_0}{N} \tag{5}$$

式中 N_0 为初始藻细胞密度, N 为辐照后第 9 d 的藻细胞密度。

图 6 所示为低生物量组 $2.6 \times 10^5 \sim 2.7 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的铜绿微囊藻经 UV-C 辐照后 9 d 培养期时辐照剂量与藻细胞密度的对数减少的剂量-效应关系.其中对数减少轴的负值表示细胞密度对数增加,正值表示细胞密度对数减少.由图 6 可知,在 $0 \sim 500 \text{ mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的剂量范围内,初始浓度为 $2.6 \times 10^5 \sim 2.7 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的铜绿微囊藻的剂量-效应关系曲线基本符合对数曲线 ($R^2 = 0.8977$),在 $36 \sim 115 \text{ mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 剂量区间范围内时,铜绿微囊藻细胞密度的对数减少趋近于 0,即其细胞密度维持在一个比较稳定的数值,铜绿微囊藻细胞的生长 9 d 内被抑制.剂量-效应对数关系显

示 $67 \text{ mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 剂量藻细胞密度 9 d 内的对数减少为 0,即藻细胞没有增长。

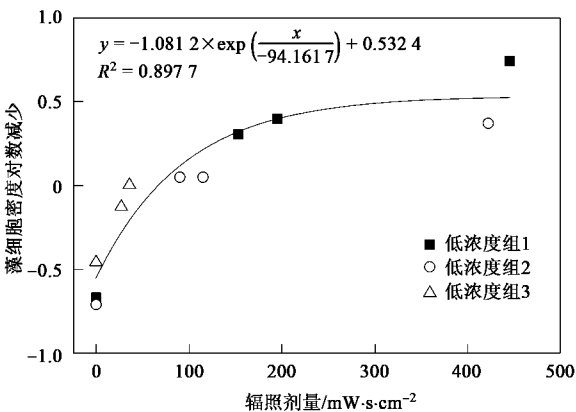


图 6 低生物量组 UV-C 辐照剂量-效应关系曲线
Fig. 6 Dose-response relationship between UV doses and logarithmic reduction values

2.2 高藻生物量组

2.2.1 实验结果

(1)第 1 组次,起始藻细胞密度为 $9.0 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。

本组次实验分别采用 0、50、126、755 $\text{mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 剂量的 UV-C 辐照进行处理,实验结果如图 7 所示.剂量为 $50 \text{ mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 UV-C 辐照在 9 d 时间内抑制住了铜绿微囊藻细胞密度的增长,藻细胞密度基本维持在 $9.0 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 左右,藻细胞密度无显著性变化 ($p > 0.05$).剂量为 126、755 $\text{mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 UV-C 辐照后的样品均从辐照后第 1 d 起开始持续下降,755 $\text{mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 UV-C 辐照剂量较高,在第 9 d 时荧光视野下检测不到活的藻细胞.50、126 $\text{mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 处理组的铜绿微囊藻细胞 9 d 内的生长速率分别为 -0.011、

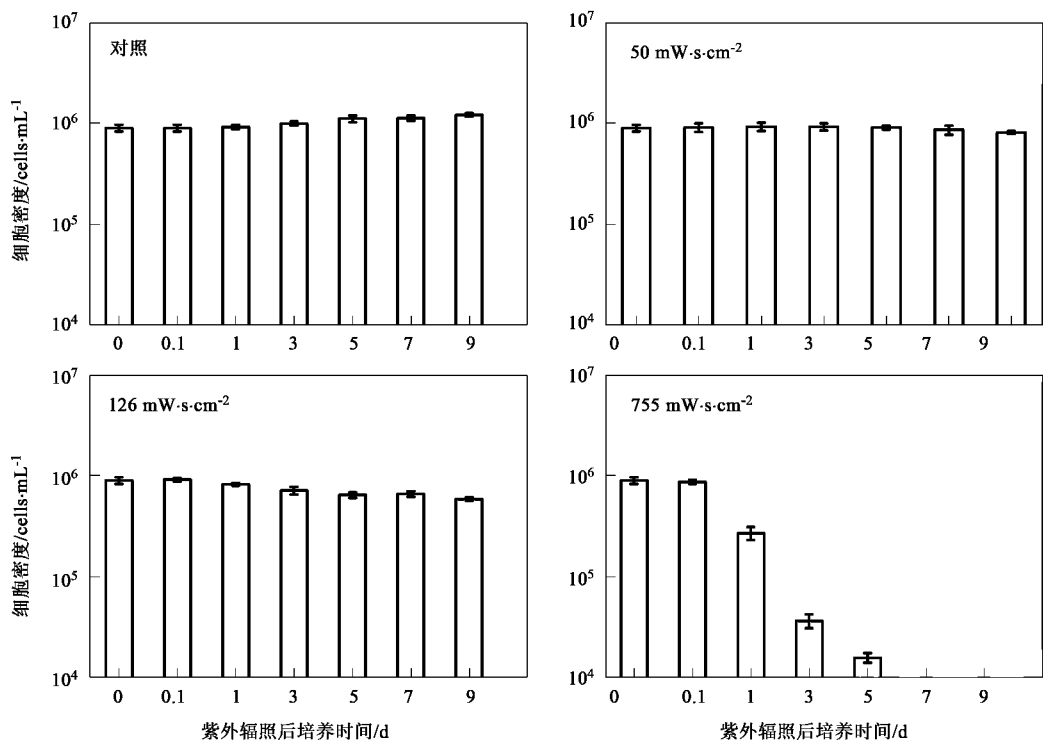


图 7 第 1 组次实验结果

Fig. 7 Experimental result of the first group

-0.047,显著低于对照组 0.034 的生长速率,辐照处理样品的生物量增长受到明显抑制.而 755 mW·s·cm⁻²处理组的铜绿微囊藻细胞在 7 d 内的生长速率为 -0.687,第 9 d 时大量藻细胞死亡,低于检测限,呈现了明显的杀灭效果.

(2)第 2 组次,起始藻细胞密度为 1.15 × 10⁶ cells·mL⁻¹.

本组次实验分别采用 0、31、47、251 mW·s·cm⁻²剂量的 UV-C 辐照进行处理,实验结果如图 8 所示.剂量为 31、47 mW·s·cm⁻²的 UV-C 辐照均在 9 d 时间内抑制住了铜绿微囊藻细胞密度的增长,藻细胞密度基本维持在 1.15 × 10⁶ cells·mL⁻¹左右,藻细胞密度无显著性变化($p > 0.05$).251 mW·s·cm⁻²剂量 UV-C 辐照后的样品在辐照后的 9 d 内藻细胞密度持续下降.31、47、251 mW·s·cm⁻²处理组的铜绿微囊藻细胞 9 d 内的生长速率分别为 -0.002、-0.007、-0.130,显著低于对照组 0.048 的生长速率,辐照处理样品的生物量增长受到明显抑制.

2.2.2 辐照前后藻细胞密度变化

如图 7~8 所示,辐照后 2 h 与辐照前样品的藻类细胞密度进行对比发现,在 UV-C 辐照后 2 h 内,

9.0 × 10⁵ ~ 1.15 × 10⁶ cells·mL⁻¹的铜绿微囊藻的细胞密度没有发生明显变化.对所有样品处理前及辐照后 2 h 的细胞密度进行 t 检验分析,发现辐照前后的藻类细胞数目无显著性差异($n = 18, p > 0.05$),同时,在倒置荧光显微镜的明视野与荧光视野下观察未发现大量褪色细胞或破裂细胞,证明实验中 UV-C 辐照不会引起铜绿微囊藻细胞短时间内大量破裂死亡.

2.2.3 剂量效应分析

图 9 所示为初始浓度为 9.0 × 10⁵ ~ 1.15 × 10⁶ cells·mL⁻¹的铜绿微囊藻经 UV-C 辐照后 9 d 培养期时辐照剂量与藻细胞密度的对数减少的剂量-效应关系.如图 9 所示,在 0 ~ 251 mW·s·cm⁻²的剂量范围内,初始浓度为 9.0 × 10⁵ ~ 1.15 × 10⁶ cells·mL⁻¹的铜绿微囊藻细胞密度的减少呈现良好的剂量-效应关系($R^2 = 0.9766$),在 31 ~ 50 mW·s·cm⁻²剂量区间范围内时,铜绿微囊藻细胞密度的对数减少趋近于 0,即其细胞密度维持在一个比较稳定的数值,铜绿微囊藻细胞的生长在 9 d 时间内被抑制.剂量-效应对数关系显示,43 mW·s·cm⁻²剂量藻细胞密度 9 d 内的对数减少为 0,即藻细胞没有增长.

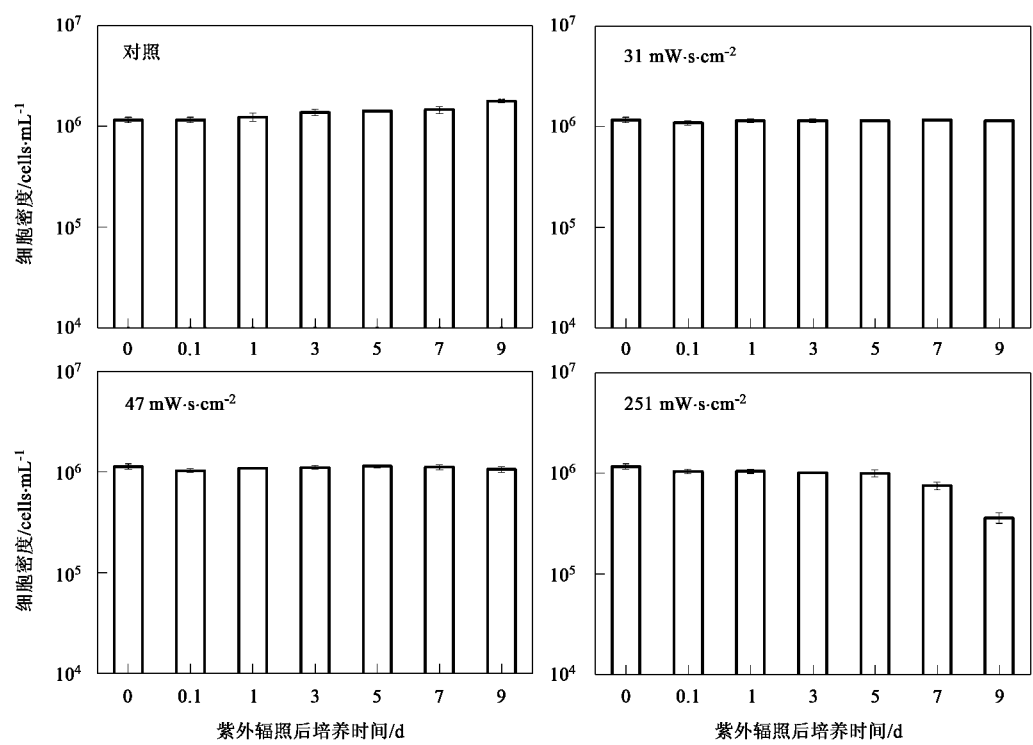


图 8 第 2 组次实验结果

Fig.8 Experimental result of the second group

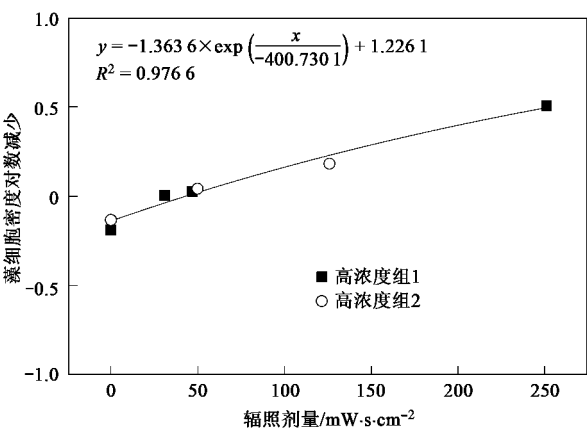


图 9 高生物量组铜绿微囊藻的剂量-效应关系曲线

Fig.9 Dose-response relationship between UV doses and logarithmic reduction values

3 讨论

亚致死剂量控制藻类水华的方法有别于投加高剂量紫外线直接杀灭藻类的方法. 无论从低生物量组, 还是高生物量组实验结果看, 都存在一个亚致死剂量范围, 可以在 9 d 内抑制藻类细胞生长. 藻类生长周期一般为 14 d, 前 7 d 为对数生长期, 7 ~ 9 d 对数生长期基本结束(如图 3 所示), 9 d 基本可以涵

盖藻细胞高速生长期的范围, 因此, 实验选定 9 d 为 1 个周期. 在实际工程应用中, 可以 9 d 为 1 个周期, 运用确定的 UV-C 亚致死剂量辐照水体, 抑制藻类细胞的繁殖暴发, 从而达到抑制藻类水华的目的.

以低生物量组 ($2.6 \times 10^5 \sim 2.7 \times 10^5$ cells · mL⁻¹) 和高生物量组 ($9.0 \times 10^5 \sim 1.15 \times 10^6$ cells · mL⁻¹) 蓝藻生物量水平实验结果比较, 高生物量组空白样品的藻类细胞密度增长趋势不明显, 生长速率分别为 0.034 和 0.048, 所需的亚致死剂量也相对较低, 推测其原因是由于高生物量组实验所需藻液量较大, 培养到高生物量所需时间较长, 藻细胞处于生长期后期, 藻细胞活性有所下降造成.

由于液体在反应器中流动并非完全混合, UV-C 辐照剂量的分布不均匀, 而本研究中所采用剂量计算方法是基于理想推流假设下的简化计算, 可能存在一定误差. 今后的研究工作将通过 UV-C 辐照强度分布和计算流体力学相结合更准确地确定各种实验工况下的剂量.

应用亚致死剂量 UV-C 辐照抑制水华蓝藻是预防蓝藻水华的一种新思路. 据文献[14]分析, UV 辐照对藻细胞的抑制作用可能是辐照对藻细胞沉降性的直接作用和藻细胞胞外物质受辐照后的产物对藻

细胞的间接抑制作用的共同影响. 但抑制蓝藻细胞增长的机制尚不清楚,亚致死剂量 UV-C 辐照引起藻细胞损伤及修复等一系列动力学机制需要进一步实验研究,对于环境的安全性方面也有待进一步验证.

4 结论

(1) $36 \sim 115 \text{ mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 剂量范围的 UV-C 辐照能在 9 d 内有效抑制 $2.6 \times 10^5 \sim 2.7 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的铜绿微囊藻细胞密度增长. $31 \sim 50 \text{ mW} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 剂量范围的 UV-C 辐照在 9 d 内有效抑制 $9.0 \times 10^5 \sim 1.15 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的铜绿微囊藻细胞密度增长. 亚致死剂量 UV-C 辐照技术具有控制铜绿微囊藻水华的应用潜力.

(2) 动态实验中 UV-C 辐照处理未引起短时间内铜绿微囊藻细胞的大量破裂死亡,实验现象与静态实验相符. UV-C 辐照抑制蓝藻技术机制和环境风险有待于进一步研究.

参考文献：

[1] Jin X C , Xu Q J , Huang C Z. Currents status and future tendency of lake eutrophication in China[J]. Science in China , Series C : Life Science , 2005 , **48** : 948-954.

[2] Pan G , Zhang M M , Chen H , *et al.* Removal of cyanobacterial blooms in Taihu Lake using local soils. I. Equilibrium and kinetic screening on the flocculation of *Microcystis aeruginosa* using commercially available clays and minerals [J]. Environmental Pollution , 2006 , **141**(2) : 195-200.

[3] Tarczynska M , Romanowska-Duda Z , Jureczak T , *et al.* Toxic cyanobacterial blooms in a drinking water reservoir-causes , consequences and management strategy[J]. Water Supply and Water Quality , 2001 , **1**(2) : 237-246.

[4] Codd G A , Morrison L F , Metcalf J S. Cyanobacterial toxins : risk management for health protection[J]. Toxicology and Applied Pharmacology , 2005 , **203**(3) : 264-272.

[5] WHO. Toxic Cyanobacteria in Water : A guide to their public health consequences , monitoring and management[M]. Bury St Edmunds , Suffolk , St Edmundsbury Press , 1999.

[6] Perovich G , Dortch Q , Goodrich J , *et al.* Causes , Prevention , and Mitigation Workgroup Report[A] In : Hudnell H K (ed). Cyanobacterial Harmful Algal Blooms : State of the Science and Research Needs[M]. New York , USA : Springer Science and Business Media , LLC , 2008. 198-203.

[7] McKnight D M , Chisholm S W , Harleman D R F. CuSO_4 treatment of nuisance algal blooms in drinking water reservoirs [J]. Environmental Management , 1983 , **7** : 311-320.

[8] 潘纲,张明明,闫海,等. 黏土絮凝沉降铜绿微囊藻的动力学及其作用机理[J]. 环境科学, 2003 , **24**(5) : 1-10.

[9] 刘文君,给水处理消毒技术发展展望[J]. 给水排水, 2004 , **30**(1) 2-5.

[10] USEPA. Ultraviolet Disinfection Guidance Manual [R]. Washington , DC : 2006 , EPA 815-R-806-007.

[11] 陈健,王长生,张国占,等. 紫外线消毒在给排水中的应用[J]. 中国给水排水, 2002 , **18**(7) : 29-31.

[12] Pontius F W. Regulations in 2000 and Beyond[J]. J AWWA , 2000 , **92**(3) : 40-54.

[13] Iseri Y , Kawabata Z I , Sasaki M. Development of boat equipped with UV lamps for suppression of freshwater red tide in a reservoir [J]. Japanese J Water Treat Biol , 1993 , **29**(2) : 61-70.

[14] Alam M Z B , Otaki M , Furumai H , *et al.* Direct and indirect inactivation of *Microcystis aeruginosa* by UV-radiation[J]. Water Research , 2001 , **35**(4) : 1008-1014.

[15] Sakai H , Oguma K , Katayama H , *et al.* Effects of low-or medium-pressure ultraviolet lamp irradiation on *Microcystis aeruginosa* and *Anabaena variabilis*[J]. Water Research , 2007 , **41** : 11-18.

[16] Sakai H , Oguma K , Katayama H , *et al.* Effects of low or medium-pressure UV irradiation on the release of intracellular microcystin[J]. Water Research , 2007 , **41** : 3458-3464.

[17] 袁侃. 紫外辐照技术抑制蓝藻生长的实验研究[D]. 北京 : 清华大学 , 2009.

[18] WHO. Guidelines for safe recreational water environments , volume 1 : Coastal and fresh waters[R]. 2003. 136-139.