

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0205

刘畅, 吴文娟, 李建宏, 等. 2014. 不同光强对阿特拉津和百草枯藻类毒性的影响[J]. 环境科学学报, 34(5): 1339-1343

Liu C, Wu W J, Li J H, et al. 2014. Effects of different light intensities on the toxicities of atrazine and paraquat to algae[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(5): 1339-1343

不同光强对阿特拉津和百草枯藻类毒性的影响

刘畅¹, 吴文娟¹, 李建宏^{1,*}, 梁霞¹, 郭康宁¹, 葛峰², 周军英²

1. 南京师范大学生命科学学院, 南京 210023

2. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042

收稿日期: 2013-08-07

修回日期: 2013-10-18

录用日期: 2013-11-05

摘要: 分别在 20 和 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光照强度下, 研究了两种除草剂阿特拉津和百草枯对 3 株蓝藻: 铜绿微囊藻 *Microcystis aeruginosa* PCC7806、*M. aeruginosa* XW01、集胞藻 *Synechocystis* PCC6803 和两株绿藻: 蛋白核小球藻 *Chlorella pyrenoidosa*、四尾栅藻 *Scenedesmus quadricauda* 的毒害效应。通过测定藻的生长, 计算出了半效抑制浓度 EC_{50} 值, 结果表明: 高光强下两种除草剂对 5 株藻的 96 h- EC_{50} 值均明显低于低光强下的值, 显示高光强有促进两种除草剂对藻类毒害的效应。高光强可促使阿特拉津显著提高藻细胞的丙二醛 (MDA) 含量, 提示高光强促进阿特拉津产生更多的自由基破坏细胞膜脂。

关键词: 阿特拉津; 百草枯; 藻; 毒性; MDA

文章编号: 0253-2468(2014)05-1339-05

中图分类号: X171.5

文献标识码: A

Effects of different light intensities on the toxicities of atrazine and paraquat to algae

LIU Chang¹, WU Wenjuan¹, LI Jianhong^{1,*}, LIANG Xia¹, GUO Kangning¹, GE Feng², ZHOU Junying²

1. College of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023

2. The Environmental Protection Department of Nanjing Institute of Environmental Science, Nanjing 210042

Received 7 August 2013;

received in revised form 18 October 2013;

accepted 5 November 2013

Abstract: To investigate the effect of light on the toxicity, two light intensities, 20 and 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ were used for testing the toxicities of atrazine and paraquat to three Cyanophyta strains (*Microcystis aeruginosa* PCC7806, *M. aeruginosa* XW01 and *Synechocystis* PCC6803) and two green algae (*Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus quadricauda*). The EC_{50} (Median Effect Concentration) was calculated by algal growth in different concentrations of atrazine and paraquat. The experimental results showed that the 96 h- EC_{50} values of five test strains under stronger light were significantly lower than those under weaker light, and higher light intensity could increase the toxicities of atrazine and paraquat to algae. The malondialdehyde (MDA) contents of the algae caused by the atrazine significantly rised under higher light intensity, since atrazine could produce more radicals to destroy the membrane lipids under higher light.

Keywords: atrazine; paraquat; algae; toxicity; MDA

1 引言 (Introduction)

阿特拉津和百草枯均为广谱型除草剂, 它们能通过抑制光合作用而达到杀灭杂草的目的, 在全世

界范围内大量使用。据 Roberts 等 (2002) 的报道百草枯在全球范围内已使用约 40 余年, 在全球约 100 多个国家被批准使用。在我国据陈建军等 (2010) 的报道, 仅 2000 年阿特拉津的使用量就达 2835.2 t, 并且

基金项目: 环保部环保公益性行业科研专项经费 (No. 210009033); 国家自然科学基金 (No. 31370217); 江苏省优势学科建设工程项目; 国家自然科学基金人才培养基金 (No. J1103507)

Supported by the National Environmental Protection Public Welfare Science and Technology Research Program of China (No. 210009033), the National Natural Science Foundation of China (No. 31370217), the Advantages of Disciplines in Jiangsu Province Construction, and the NSFC for Talents Training in Basic Science (No. J1103507)

作者简介: 刘畅 (1991—), 女, E-mail: changliu2012@126.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: lijianhong@njnu.edu.cn

Biography: LIU Chang (1991—), female, E-mail: changliu2012@126.com; * **Corresponding author**, E-mail: lijianhong@njnu.edu.cn

每年用量以 20% 的速度递增. 这类除草剂在使农作物获得高产的同时, 也对生态环境造成了很大的影响. 它们稳定性强, 降解缓慢, 能在土壤中大量残留 (孟顺龙等, 2009; 苏少泉和耿贺利, 2008), 并能通过地表径流、淋溶等途径进入地表及地下水中, 对水体造成污染, 毒害水生生物 (Bintein and Devillers, 1996; Eisler, 1990). 藻类是水体中的初级生产者, 也是水体中生物链的基础环节. 由于藻类对环境因子变化十分敏感 (DeLorenzo *et al.*, 1999), 当藻类暴露于有害物时, 毒害效应将会对整个水体生态产生影响. 因此对藻类的毒害效应常被作为农药环境毒性测试的必须指标 (沈宏和周培疆, 2002; 赵玉艳和蔡磊明, 2004).

除草剂对藻类的毒害效应, 通常与除草剂的浓度有关, 近年来国内外有关除草剂对藻生长影响的报道很多 (Sáenz *et al.*, 1997; 马建义和陈杰, 2000; 徐小花等, 2008), 但目前的研究大多关注于除草剂的暴露浓度, 其他环境因子对藻类毒害效应的影响, 研究较少.

阿特拉津和百草枯杀灭杂草的主要机理是通过阻断光合作用电子传递, 产生氧自由基破坏细胞. 不同的光照强度下阿特拉津对藻的毒害作用不同 (Mayasich *et al.*, 1986), 对大多数藻而言, 较高的光照强度下有较高的毒性 (Deblois *et al.*, 2013), 不同光照预适应条件下的藻暴露于阿特拉津的毒性反应也不同 (Guasch and Sabater, 1998). 但目前关于光强对这两种除草剂对藻类毒性的研究报道十分有限, 对于百草枯也未见较详细研究报道.

为进一步评价两种除草剂的环境毒害效应, 本研究以常见的蓝藻铜绿微囊藻、集胞藻和绿藻蛋白核小球藻、四尾栅藻作为材料, 研究了不同光照强度下阿特拉津和百草枯对藻的毒害效应, 以期为全面评价除草剂对水生态系统的毒性提供科学数据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 实验材料

阿特拉津由浙江省长兴第一化工有限公司生产, 纯度 97%; 百草枯由江苏省南京市红太阳生物化学有限责任公司生产, 农药母液浓度为 30.5% (农药中百草枯的纯度为 305 g·L⁻¹).

实验采用的蓝藻藻株有: 铜绿微囊藻 *Microcystis aeruginosa* PCC7806 (简称“PCC7806”), *M. aeruginosa* XW01 (简称“XW01”), 集胞藻

Synechocystis PCC6803 (简称“PCC6803”); 选用的绿藻藻株有: 蛋白核小球藻 *Chlorella pyrenoidosa* (简称“小球藻”), 四尾栅藻 *Scenedesmus quadricauda* (简称“栅藻”). PCC7806 和 PCC6803 源自法国巴斯德研究所, 其余藻株均为本实验室分离培养.

2.2 实验方法

2.2.1 藻的培养 实验所用的培养基及所有器皿均经过 121 °C 高压灭菌 20 min, 实验在无菌条件下进行, 所有藻种均用 BG-11 培养液培养, 培养至对数生长期备用. 培养温度为 25 °C, 由两支 40 W 日光灯提供光照, 通过调节培养三角瓶与灯管间的距离设置不同光照强度. 每天定时摇晃 3 次.

2.2.2 除草剂对藻生长影响的测定 农药浓度的设定: 基于前期实验测得的毒害浓度范围, 用 BG-11 培养液将阿特拉津稀释到 0.01、0.05、0.1、0.5、1.0 mg·L⁻¹, 百草枯稀释为浓度 0.01、0.05、0.1、1.0、10.0 mg·L⁻¹. 将 5 mL 处于对数生长期的藻液接入装有 50 mL 培养液的容量为 100 mL 的锥形瓶中, 使 OD₇₂₀ 的值为 0.10 左右 (初始藻细胞密度约为 1.0 × 10⁴ mL⁻¹), 每个浓度设置 3 个平行实验, 以加蒸馏水为空白对照.

不同光照的设定: 实验设置两种光照强度, 使培养瓶处的光照强度分别调为 20 (低光强) 和 50 μmol·m⁻²·s⁻¹ (高光强). 将上述暴露于不同浓度除草剂下的藻分别置于这两种光照强度下培养, 间隙摇晃. 定时测定藻浓度 (OD₇₂₀).

2.2.3 半效抑制浓度 EC₅₀ 值的测定 藻生长抑制率采用光密度法:

$$P = \frac{I_1 - I_2}{I_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中, I_1 为对照组光密度 (OD) 净增长值; I_2 为处理组光密度 (OD) 净增长值.

然后建立抑制率 (P) 和浓度的自然对数 ($\ln C$) 的线性回归关系, 求解抑制率为 50% 时的 EC₅₀ 值 (赵玉艳和蔡磊明, 2004).

2.2.4 MDA 活性的测定 采用硫代巴比妥酸 (TBA) 法 (Stewart and Bewley, 1980) 测定. 取藻液 5.0 mL, 离心收集藻细胞, 加入 5.0 mL (5%) 的三氯乙酸, 在漩涡振荡仪上充分振荡反应后离心, 取 2.0 mL 上清液, 加入 2.0 mL (0.6%) TBA. 混合物于 95 °C 沸水浴上反应 10 min, 迅速冷却后离心, 以 0.6% TBA 溶液为空白, 测定 450、532 和 600 nm 处的吸光值 (李合生, 2000). MDA 含量以公式 (2)

计算:

$$\text{MDA 浓度 } (\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}) = 6.45 \times (A_{532} - A_{600}) - 0.56 \times A_{450} \quad (2)$$

$$\text{MDA 含量 } (\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}) = \text{MDA 浓度 } (\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}) \times \text{提取液体积 (L)} / \text{样品鲜重 (g)} \quad (3)$$

2.3 数据分析

数据采用 Excel 作图分析,用 SPSS 17.0 对结果进行方差分析.数据均为 3 次重复测定值的平均值.

3 结果 (Results)

3.1 不同光照强度下阿特拉津对各藻的生长影响

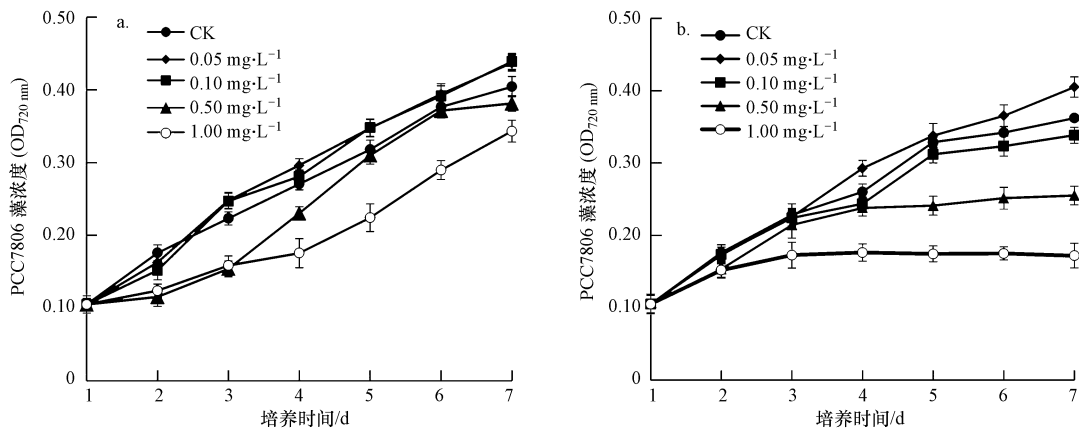


图 1 不同光照强度下阿特拉津对 PCC7806 生长的影响 (a. $20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; b. $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.1 Effects of different concentrations of atrazine on the growth of *Microcystis aeruginosa* PCC7806 under different light intensities (a. $20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; b. $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

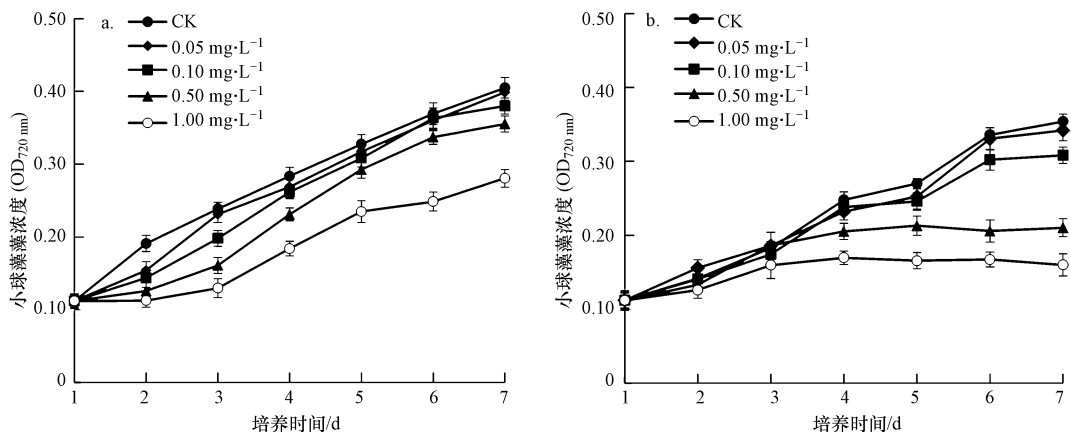


图 2 不同光照强度下阿特拉津对小球藻生长的影响 (a. $20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; b. $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.2 Effects of different concentrations of atrazine on the growth of *Chlorella pyrenoidosa* under different light intensities (a. $20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; b. $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

3.2 不同光照强度下两种除草剂对不同藻类的 EC_{50} 值
通过分别测定阿特拉津和百草枯,在不同光照

由图 1 可以看出,阿特拉津对蓝藻 PCC7806 的毒害作用具有明显的剂量-效应关系,浓度越高,抑制作用就越明显.比较不同光强下的毒害效应可见:在质量浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,低光强 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 下,未表现出明显的生长抑制,而在高光强 $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 下,有明显的抑制作用.当阿特拉津的质量浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,高光强下 PCC7806 的生长几乎被完全抑制.

阿特拉津对绿藻小球藻也显示出与蓝藻相似的毒害效应(图 2),在相同的浓度下,高光强表现出显著的毒害促进作用.

强度下对 5 种常见蓝藻和绿藻的生长影响,根据浓度效应曲线,计算出了在不同光照强度下 96h- EC_{50} 值,列于表 1 中.

从表 1 中数据可以看出,各藻在相对高光照时的 EC_{50} 值要明显小于低光强时的 EC_{50} 值,在用除草剂阿特拉津处理时,蓝藻中的 PCC7806 在 $20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光照强度下的 EC_{50} 值是 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光照强度下的 1.725 倍.另外,在光照强度为 $20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, XW01、PCC6803、蛋白核小球藻和四尾栅藻的 96 h 的 EC_{50} 值分别比光照强度为 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时高出 1.92、2.07、1.73、1.62 倍.这表明高光照强度照射下能够促进阿特拉津对各藻的毒性.

光强对百草枯毒害效应的影响与阿特拉津相似,5 株藻在高光照强度时的 EC_{50} 值要明显小于低光照强度时的 EC_{50} 值,蓝藻 PCC7806 在 $20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光照强度下的 EC_{50} 值是 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强下的 11.8 倍.另外,在光照强度为 $20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, XW01、PCC6803、蛋白核小球藻和四尾栅藻 96 h- EC_{50} 值分别是光照强度 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的 1.84、1.65、2.28、2.43 倍.这表明高光照照射能够促进百草枯对各藻的毒性.

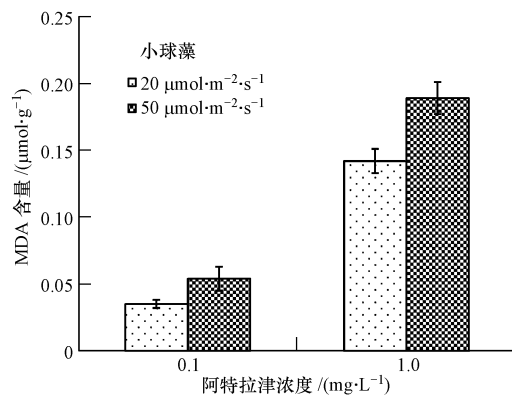
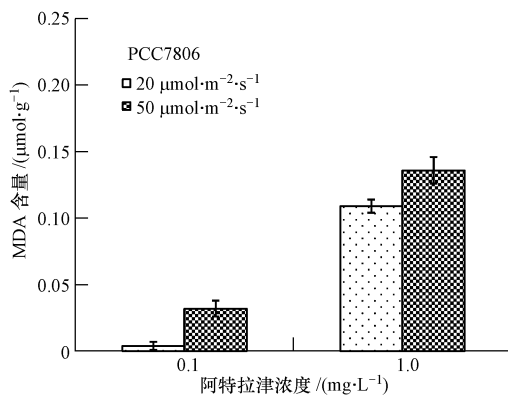


图 3 不同光强下阿特拉津对 PCC7806 和小球藻 MDA 含量的影响

Fig.3 Effects of atrazine on MDA contents of *Microcystis aeruginosa* PCC7806 and *Chlorella pyrenoidosa* under different light intensities

4 讨论 (Discussion)

除草剂阿特拉津和百草枯均为光合作用抑制剂,阿特拉津为典型的光合系统 II 抑制剂,百草枯为典型的光合系统 I 抑制剂.这两种除草剂毒性的发挥均与光合作用电子传递有关,通过阻挡光合体系中电子的转移而阻止光化合成反应 (Forney and Davis, 1981).同时,由于电子传递链的阻断,藻细胞吸收的光能,可转化成高能的氧自由基等有害成分,毒害细胞.在一定的光强范围内,光照强度越大,

表 1 不同光照强度下两种除草剂对 5 种藻的 96 h 的毒性值 EC_{50}

Table 1 96 h- EC_{50} of atrazine and paraquat to 5 algal strains under different light intensities

除草剂	藻株	$EC_{50}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	
		$20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
阿特拉津	微囊藻 XW01	1.621	0.845
	微囊藻 PCC7806	1.106	0.641
	集胞藻 PCC6803	1.229	0.594
	蛋白核小球藻	1.197	0.691
	四尾栅藻	0.778	0.480
百草枯	微囊藻 XW01	2.584	1.405
	微囊藻 PCC7806	4.655	0.394
	集胞藻 PCC6803	1.407	0.851
	蛋白核小球藻	10.722	4.709
	四尾栅藻	1.004	0.412

3.3 光强对阿特拉津破坏藻细胞生物膜的影响

MDA 是自由基氧化细胞膜脂的产物,其在细胞中的含量显示了氧化胁迫对细胞膜系统的破坏 (Qian *et al.*, 2009).从图 3 中可以看出,在藻细胞暴露于不同浓度阿特拉津 24 h 后,高光强下两种藻的 MDA 含量均显著高于低光强 ($p < 0.01$).说明在高光强下,同样浓度的阿特拉津可产生更多的自由基,对藻细胞的生物膜系统产生较大的伤害.

植物细胞吸收的光能越多,如光合电子传递链被阻断,溢出的能量可产生大量的自由基.因此,较高的光照强度理应促进这类除草剂毒性的作用,本文的实验结果与这一机理吻合,与对水生高等植物的毒害效应一致 (Brain *et al.*, 2012).Deblois 等 (2013) 对 10 种藻类光电子传递过程的研究也显示,高光强促进了阿特拉津对藻类的毒害.但在 Mayasich 等 (1986) 的研究中,低光强下阿特拉津对绿藻 *Nannochloris oculata* 和硅藻 *Phaeodactylum tricornutum* 的毒害性更强,其原因解释为这两种藻

在适宜的光强下积累较多的抗损伤成分.这也说明除草剂对不同藻的毒害效应存在差异,同时不同的预光照和温度也会影响毒害效应.

The Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) 提出的淡水藻生长抑制试验规范(OECD, 2011), 已被广泛应用于污染物对藻类的毒性实验研究中去, 已成为国际公认的进行除草剂对藻类风险评价的实验规范.为评价环境风险, 关于阿特拉津和百草枯对藻类和高等植物毒害效应的研究已有报道, 但已报道的结果主要关注了暴露的农药浓度 (Ma *et al.*, 2002; 张慧等, 2013), 而未考虑光强.从实际运用环境来看, 自然光强远高于室内通常的培养条件.因此, 很多室内测定的对植物毒害的效应浓度, 可能会被低估.

从目前的国内外环境可以看出, 阿特拉津和百草枯的使用量在逐年升高.他们在环境中降解缓慢, 在地表水中达到一定浓度后, 会毒害许多水体低等动物, 影响水生植物生长 (Graymore *et al.*, 2001). 百草枯在水环境中降解缓慢, 其半衰期约为 6.6 年 (Bromilow, 2004). 已有报道显示阿特拉津能有效抑制植物和藻类的光合作用和生长 (刘爱菊等, 2002). 从本文测定获得的阿特拉津和百草枯对藻类的毒害可以看出, 在高光强 $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 96 h-EC_{50} 值最低低于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这一结果提示应注意这类农药的施用限量.

5 结论 (Conclusions)

1) 光照强度能增加除草剂阿特拉津和百草枯对藻类的毒害作用, 在高光照强度 $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 受试藻的 EC_{50} 值都明显低于光照强度 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的 EC_{50} 值.

2) 高光照强度下相同浓度的阿特拉津可使藻的 MDA 含量大大增加.

责任作者简介: 李建宏, 男, 博士, 教授, 主要研究方向为藻类细胞生物学、藻类与微生物环境的关系以及蓝藻水华发生机理. E-mail: lijianhong@njnu.edu.cn.

参考文献 (References) :

Bintein S, Devillers J. 1996. Evaluating the environmental fate of atrazine in France [J]. *Chemosphere*, 32(12): 2441-2456
Brain R A, Hoberg J, Hosmer A J, *et al.* 2012. Influence of light intensity on the toxicity of atrazine to the submerged freshwater aquatic macrophyte *Elodea canadensis* [J]. *Ecotoxicology and*

Environmental Safety, 79: 55-61
Bromilow R H. 2004. Paraquat and sustainable agriculture [J]. *Pest Management Science*, 60(4): 340-349
陈建军, 何月秋, 祖艳群, 等. 2010. 除草剂阿特拉津的生态风险与植物修复研究进展 [J]. *农业环境科学学报*, 29(S1): 289-293
Deblois C P, Dufresne K, Juneau P. 2013. Response to variable light intensity in photoacclimated algae and cyanobacteria exposed to atrazine [J]. *Aquatic Toxicology*, 126: 77-84
DeLorenzo M E, Lauth J, Pennington P L, *et al.* 1999. Atrazine effects on the microbial food web in tidal creek mesocosms [J]. *Aquatic Toxicology*, 46(3/4): 241-251
Eisler R. 1990. Paraquat hazards to fish, wildlife, and invertebrates: A synoptic review [R]. 85(1. 22), Center Laurel, Maryland; U. S. Fish and Wildlife Service, Patuxent Wildlife Research. 1-38
Forney D R, Davis D E. 1981. Effects of low concentrations of herbicides on submersed aquatic plants [J]. *Weed Science*, 29: 677-685
Graymore M, Stagnitti F, Allinson G. 2001. Impacts of atrazine in aquatic ecosystems [J]. *Environment International*, 26(7/8): 483-495
Guasch H, Sabater S. 1998. Light history influences the sensitivity to atrazine in periphytic algae [J]. *Journal of Phycology*, 34(2): 233-241
李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社. 260-261
刘爱菊, 朱鲁生, 王军, 等. 2002. 除草剂阿特拉津的环境毒理研究进展 [J]. *土壤与环境*, 11(4): 405-408
Ma J Y, Xu L G, Wang S F, *et al.* 2002. Toxicity of 40 herbicides to the green alga *Chlorella vulgaris* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 51(2): 128-132
马建义, 陈杰. 2000. 24 种除草剂对蛋白核小球藻生长的效应 [J]. *环境化学*, 19(6): 518-522
Mayasich J M, Karlander E P, Terlizzi Jr D E. 1986. Growth responses of *Nannochloris oculata* Droop and *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin to the herbicide atrazine as influenced by light intensity and temperature [J]. *Aquatic Toxicology*, 8(3): 175-184
孟顺龙, 胡庚东, 瞿建宏, 等. 2009. 阿特拉津在水环境中的残留及其毒理效应研究进展 [J]. *环境污染与防治*, 31(6): 64-68
Organisation for Economic Co-operation and Development, 2011. 201. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test [S]. Paris, France
Qian H F, Chen W, Li J J, *et al.* 2009. The effect of exogenous nitric oxide on alleviating herbicide damage in *Chlorella vulgaris* [J]. *Aquatic Toxicology*, 92(4): 250-257
Roberts T R, Dyson J S, Lane M C G. 2002. Deactivation of the biological activity of paraquat in the soil environment: A review of long-term environmental fate [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(13): 3623-3631
Súenz M E, Alberdi J L, Di Marzio W D, *et al.* 1997. Paraquat toxicity to different green algae [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 58(6): 922-928
沈宏, 周培疆. 2002. 环境有机污染物对藻类生长作用的研究进展 [J]. *水生生物学报*, 26(5): 529-535
Stewart R C, Bewley J D. 1980. Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes [J]. *Plant Physiology*, 65(2): 245-248
苏少泉, 耿贺利. 2008. 百草枯特性与使用 [J]. *农药*, 47(4): 244-247
徐小花, 肖铭, 潘慧云, 等. 2008. 阿特拉津对铜绿微囊藻和四尾栅藻生长的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 24(1): 72-76
张慧, 李静, 李建宏, 等. 2013. 除草剂百草枯对蓝藻和绿藻的毒性 [J]. *环境科学学报*, 33(5): 1441-1445
赵玉艳, 蔡磊明. 2004. 几种藻类毒性试验统计方法的差异 [J]. *农药*, 43(7): 298-299