

# 不同质量浓度苦草对铜绿微囊藻生长及抗氧化酶系统的影响

陈国元 李青松 黄晓鸣 朱木兰  
(厦门理工学院水资源环境研究所, 厦门 361024)

**摘要** 采用苦草 (*Vallisneria spiralis* Linn.) 和铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 共生培养的实验方法, 通过追踪测定铜绿微囊藻的生物量、叶绿素 a 含量、丙二醛 (MDA) 含量、超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化物酶 (POD) 活性, 研究了不同质量浓度苦草对铜绿微囊藻生长及抗氧化酶系统的影响。结果表明, 质量浓度大于 10 g/L 时, 苦草对铜绿微囊藻有明显的抑制作用, 表现为苦草质量浓度为 10、20 和 40 g/L 时, 第 15 天对铜绿微囊藻的抑制率分别为 63.3%、94.7% 和 99.8%, 培养过程中, 铜绿微囊藻的叶绿素 a 含量逐渐减少, 而 SOD、POD 活性及 MDA 含量呈现先增加后逐渐降低的趋势, 表明苦草释放的化感物质在经过一定时间积累后能够明显抑制铜绿微囊藻 SOD 和 POD 的活性, 引起细胞的氧化损伤, 促进叶绿素的分解, 从而导致藻类死亡, 这是苦草抑制铜绿微囊藻生长的原因之一。

**关键词** 苦草 铜绿微囊藻 共生培养 化感物质

中图分类号 X171 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)11-4107-06

## Effects of different concentrations of *Vallisneria spiralis* Linn. on growth and antioxidant system of *Microcystis aeruginosa*

Chen Guoyuan Li Qingsong Huang Xiaoming Zhu Mulan

(Water Resources and Environmental Institute, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

**Abstract** The evaluation of different concentrations of *Vallisneria spiralis* Linn. on *Microcystis aeruginosa*'s growth and antioxidant system was carried out through co-cultivation of *Vallisneria spiralis* Linn. and *Microcystis aeruginosa* by monitoring the alga density, chlorophyll-a content, MDA content, SOD and POD activities. Results showed there was significant inhibition on *Microcystis aeruginosa*'s growth when the co-cultivated *Vallisneria spiralis* Linn.'s concentration was over 10 g/L. After 15 days incubation, the inhibition rates of *Microcystis aeruginosa*'s growth were 63.3%, 94.7% and 99.8% versus the concentration of *Vallisneria spiralis* Linn. at 10, 20 and 40 g/L, respectively. During the incubation period, chlorophyll-a content of *Microcystis aeruginosa* decreased gradually, whereas MDA content, SOD and POD activities increased initially and decreased gradually thereafter. The study indicated that one of the mechanisms which led the inhibition of *Microcystis aeruginosa*'s growth by co-cultivation with *Vallisneria spiralis* Linn. demonstrated that the accumulated allelopathical substance which released from *Vallisneria spiralis* Linn. effectively inhibited SOD and POD activities of *Microcystis aeruginosa*, induced the oxidative damage to cells and eventually facilitated chlorophyll degradation of *Microcystis aeruginosa*.

**Key words** *Vallisneria spiralis* Linn.; *Microcystis aeruginosa*; co-cultivation; allelopathical substance

近年来, 水体富营养化程度日趋严重, 藻类“水华”频繁发生。铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 是最常见的水华藻类之一<sup>[1]</sup>, 其属蓝藻门, 微囊藻属, 原核单细胞藻类, 能合成和分泌细胞毒素, 使水环境质量恶化, 不仅导致水产养殖业蒙受经济损失, 同时也破坏水域生态景观<sup>[2]</sup>。因此, 有效控制富营养化水体中的藻类, 防止“水华”发生是迫切需要研究解决的问题。

水生植物对藻类化感抑制作用的发现, 使化感

**基金项目:** 厦门理工学院引进高层次人才科研启动项目 (YKJ09022R); 厦门市科技计划项目 (3502Z 20110016); 福建省教育厅 A 类资助项目 (JA10252)

**收稿日期:** 2012-03-04; **修订日期:** 2012-05-02

**作者简介:** 陈国元 (1980 ~), 男, 博士研究生, 主要从事污染水体生态修复研究工作。E-mail: cgy1117@yahoo.com.cn

作用开始应用于富营养化水体藻类控制领域,相关研究已受到国内外广泛关注<sup>[3-6]</sup>。抑藻水生植物普遍存在于水体中,容易获得、栽种或移植,且数量丰富<sup>[7]</sup>。水生植物不但可以吸收水体中的营养物质<sup>[8,9]</sup>,而且能够分泌化感物质抑制藻类的生长<sup>[10,11]</sup>。目前,已报道的具有抑藻活性的高等水生植物至少有37种<sup>[12]</sup>。其中,苦草(*Vallisneria spiralis* Linn.)是水鳖科多年生无茎沉水植物,在我国南北各省均有分布,常见于浅水湖泊、池塘、溪旁及沟边。大量研究表明,苦草对藻类具有化感作用。如陈卫民等<sup>[3]</sup>通过对苦草和铜绿微囊藻进行混合培养和分开培养,表明苦草对铜绿微囊藻的生长有明显的化感抑制。黄新颖等<sup>[11]</sup>从苦草种植水中检出脂肪酸、酚酸和羧基酸等成分,并认为2-甲基乙酰乙酸乙酯(EMA)可能具有抑藻活性。高云霓等<sup>[10]</sup>通过研究发现,苦草种植水中的酚酸类物质具有较强的抑藻活性。

但是,水生植物与藻类之间化感互作的强弱与植物种类和生物量以及藻类初始密度相关<sup>[13]</sup>。张维昊等<sup>[14]</sup>研究表明,抑制效应取决于菖蒲(*Acorus calamus*)和铜绿微囊藻之间的相对生物量,实验条件下100 g 菖蒲在初始藻液光密度为0.2时有最强抑藻效应。赵坤等<sup>[15]</sup>研究表明,不同浓度的水网藻(*Hydrodictyon reticulatum*)对铜绿微囊藻的抑制作用不同。而目前关于苦草与铜绿微囊藻在不同生物量时的化感效应还不清楚。本实验系统研究了共生培养条件下不同质量浓度苦草对铜绿微囊藻生物量、叶绿素a含量、丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性的影响,旨在探讨不同质量浓度苦草对铜绿微囊藻的化感抑制作用,为苦草应用于富营养化水体的修复提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

苦草购自福建省亚热带植物研究所花卉市场,用蒸馏水清洗干净后以无菌水冲洗3遍,然后用BG-11<sup>[16]</sup>培养液预培养;铜绿微囊藻由中国科学院水生生物研究所淡水藻种库提供,实验前1周用BG-11培养液于MGC-450BPY-2智能型光照培养箱中进行扩大培养,培养条件为:恒温(25±1℃)光照3000 lx,明暗比12 h/12 h。

### 1.2 实验设计

将生长良好的苦草植入一系列灭菌的内装2 L

BG-11培养液的玻璃培养缸,设定质量浓度分别为5、10、20和40 g/L(鲜重)。随后,接入扩大培养的铜绿微囊藻,接种密度为 $1.0 \times 10^6$  ind/mL。同时,设定未植入水生植物的对照组,每组设定3个平行。培养缸置于MGC-450BPY-2智能型光照培养箱中培养。每3天取1次样,测定铜绿微囊藻的密度、叶绿素a含量、SOD活性和MDA含量,并测定培养液中N、P浓度,据此适量添加N、P溶液,保持培养液中N、P浓度稳定。

### 1.3 测定方法

藻细胞密度用藻细胞计数板测定;叶绿素a含量采用丙酮提取法<sup>[17]</sup>测定;MDA含量采用硫代巴比妥酸方法<sup>[18]</sup>测定;SOD活性采用Stewart<sup>[19]</sup>方法测定;POD活性采用愈创木酚氧化法<sup>[17]</sup>,记录470 nmOD降低速度,用 $\Delta OD_{470}/\text{min} \cdot 10^7 \text{ cells}$ 表示。

藻类抑制率的计算:  $IR = (N_0 - N_s)/N_0 \times 100\%$ ,其中IR为抑制率, $N_0$ 为对照组藻细胞密度, $N_s$ 为处理组藻细胞密度<sup>[4]</sup>。

### 1.4 数据处理与统计

运用SPSS10.0软件及Sigmaplot10.0软件对数据进行统计分析和计算。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同质量浓度苦草对铜绿微囊藻生物量的影响

Mulderij等<sup>[20]</sup>研究表明,实际环境中化感作用在大型水生植物对浮游植物的抑制中占据重要地位。本实验中保证了一定的营养水平、光照条件及适宜温度,因此,苦草对铜绿微囊藻的抑制作用应该是由化感作用引起的。但是,不同质量浓度的苦草对铜绿微囊藻的化感抑制作用存在显著差异(图1)。苦草质量浓度为5 g/L时,铜绿微囊藻生物量在实验期间持续上升,第15天藻细胞密度较实验初始时上升了126%,抑制率仅为9.3%(表1);苦草质量浓度为10 g/L时,铜绿微囊藻生物量随着培养时间增加而增加,在第12天略有降低,第15天急剧降低,此时藻细胞密度较实验初始时下降了8.3%,抑制率为63.3%(表1);苦草质量浓度为20 g/L时,铜绿微囊藻生物量随着培养时间增加而增加,在第12天急剧降低,第15天时藻细胞密度较实验初始时下降了86.7%,抑制率为94.7%(表1);苦草质量浓度为40 g/L时,培养前6天,铜绿微囊藻生物量略有增加,第9天急剧降低,第15天时藻细胞

密度较实验初始时下降了 99.5%,抑制率为 99.8% (表 1),表明苦草在质量浓度大于 10 g/L 时对铜绿微囊藻有明显的抑制作用,并且苦草质量浓度越高,抑制强度越大,抑制效果越快。这主要是因为化感抑藻物质对藻类生长存在“低促高抑”现象<sup>[3, 21]</sup>。苦草生物量越高,短时间内分泌的化感抑藻物质就越多,当化感物质达到一定浓度时,实验组藻细胞死亡速度加快。而苦草质量浓度较低时,苦草分泌的化感物质浓度很低,不足以抑制铜绿微囊藻的生长,相反却在一定程度上促进了铜绿微囊藻的生长。并且有研究表明,铜绿微囊藻对苦草也存在一定的抑制<sup>[3]</sup>。当藻类生物量过高时,则抑制苦草化感物质的释放,导致化感物质减少,从而降低苦草对铜绿微囊藻的抑制<sup>[3]</sup>。因此,当苦草质量浓度较低时,苦草对铜绿微囊藻的抑制作用较弱。

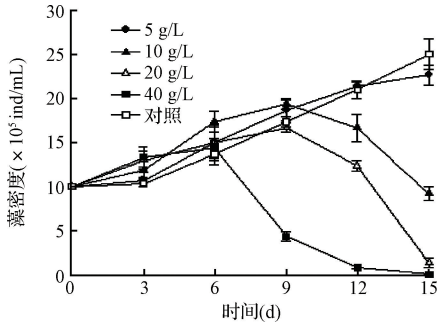


图 1 不同质量浓度苦草下铜绿微囊藻的生长曲线  
Fig. 1 Growth curves of *Microcystis aeruginosa* under different initial *Vallisneria spiralis* Linn. biomass

表 1 不同质量浓度苦草对铜绿微囊藻的抑制率  
Table 1 Inhibition rates of *Microcystis aeruginosa* by *Vallisneria spiralis* Linn. under different initial biomass (%)

时间 (d)	苦草质量浓度 (g/L)			
	5	10	20	40
3	-3.2	-14.8	-25.4	-28.6
6	-9.5	-26.5	-9.5	-4.6
9	-7.9	-11.8	3.7	74.9
12	-1.6	20.6	41.3	96.0
15	9.3	63.3	94.7	99.8

## 2.2 不同质量浓度苦草对铜绿微囊藻叶绿素 a 含量的影响

藻体中叶绿素 a 含量与藻类光合作用密切相关。图 2 为铜绿微囊藻叶绿素 a 含量随培养时间变化的曲线。对照组叶绿素 a 含量在培养过程中相对

比较稳定,仅在培养后期略有下降;苦草质量浓度为 5 g/L 时,第 15 天叶绿素 a 含量为同期对照组的 93.3%;苦草质量浓度为 10 g/L 时,第 15 天叶绿素 a 含量为同期对照组的 15.1%;苦草质量浓度为 20 和 40 g/L 时,第 15 天检测不到叶绿素 a,说明铜绿微囊藻叶绿素 a 可能是苦草化感物质的作用对象之一。其他水生植物及化感物质对藻类叶绿素的破坏也有报道。如李小路等<sup>[22]</sup>研究表明,金鱼藻与铜绿微囊藻共生情况下能显著降低铜绿微囊藻的叶绿素 a 含量;李锋民等<sup>[23]</sup>研究表明,凤眼莲根系附着的藻细胞中叶绿素 a 含量明显下降,其降解产物脱镁叶绿素 a 的含量升高。芦苇中分离出的化感物质 EMA 能加速铜绿微囊藻的叶绿素 a 的降解,提高脱镁叶绿素 a 的含量<sup>[24]</sup>。而不同质量浓度的苦草对铜绿微囊藻叶绿素 a 含量的影响有显著的差异,苦草质量浓度越高越能促进叶绿素 a 的降解。另外,苦草质量浓度为 10 g/L 和 20 g/L 时,叶绿素 a 含量从第 9 天开始急剧降低,而藻生物量却从第 12 天开始急剧降低;苦草质量浓度为 40 g/L 时,叶绿素 a 含量在第 6 天开始急剧降低,而藻生物量却从第 9 天开始急剧降低,表明在铜绿微囊藻死亡之前苦草释放的化感物质已经对叶绿素 a 造成了破坏,也说明苦草促进叶绿素 a 降解,从而破坏藻类正常的光合作用可能是导致铜绿微囊藻死亡的原因之一。

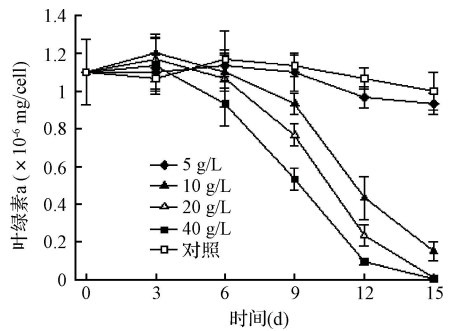


图 2 不同质量浓度苦草下铜绿微囊藻叶绿素 a 含量的变化  
Fig. 2 Chlorophylla content of *Microcystis aeruginosa* under different initial *Vallisneria spiralis* Linn. biomass

## 2.3 不同质量浓度苦草对铜绿微囊藻 SOD 和 POD 活性的影响

SOD 和 POD 是酶促防御系统重要保护酶。正常条件下,两者相互协调,使细胞内活性氧 (ROS) 的产生与消除之间处于动态平衡状态,ROS 维持在不至于对植物造成伤害的水平上<sup>[25]</sup>。但在藻类受到



严重胁迫时,体内 ROS 的增加超过了正常的歧化能力,导致大量的 ROS 积累<sup>[26]</sup>。当细胞内 ROS 浓度超过一定范围而不能被及时清除时,过量的 ROS 会抑制 SOD 和 POD 活性<sup>[26, 27]</sup>。由图 3 和图 4 可知,对照组 SOD 和 POD 活性在培养过程中相对比较稳定。所有处理组中 SOD 活性在第 3 天都有不同程度的上升,POD 活性在第 3 天或第 6 天也有不同程度的上升,说明苦草对铜绿微囊藻产生了一定的胁迫,导致体内 ROS 的增加,促进了 SOD 和 POD 的活性。不同质量浓度苦草下铜绿微囊藻 SOD 和 POD 活性的变化规律有差异。苦草质量浓度为 5 g/L 时,SOD 和 POD 活性呈现缓慢上升后趋于平稳的趋势;苦草质量浓度为 10 g/L 和 20 g/L 时,SOD 活性在第 9 天急剧降低,POD 活性在第 12 天也显著减少;苦草质量浓度为 40 g/L 时,SOD 和 POD 活性在第 6 天开始急剧降低,说明苦草在质量浓度大于 10 g/L 时,经过一定时间的积累,苦草对铜绿微囊藻的胁迫增加,导致体内 ROS 的大量增加,进而对 SOD 和 POD 产生了抑制,其抑制强度随苦草质量浓度的高低和培养时间的长短而变化。

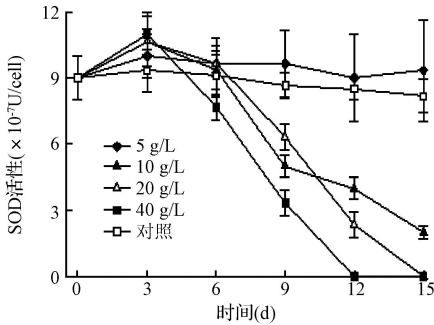


图3 不同质量浓度苦草下铜绿微囊藻 SOD 活性的变化

Fig. 3 SOD activity of *Microcystis aeruginosa* under different initial *Vallisneria spiralis* Linn. biomass

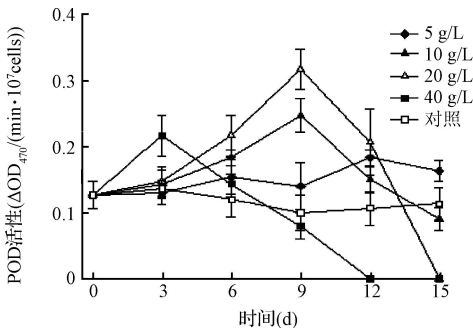


图4 不同质量浓度苦草下铜绿微囊藻 POD 活性的变化

Fig. 4 POD activity of *Microcystis aeruginosa* under different initial *Vallisneria spiralis* Linn. biomass

## 2.4 不同质量浓度苦草对铜绿微囊藻 MDA 含量的影响

MDA 是植物器官衰老活在逆境条件下发生膜脂过氧化的产物之一,其含量可指示细胞内氧自由基含量的多少和膜脂过氧化水平的高低,可作为细胞膜结构损伤,藻体受胁迫程度的一种标志<sup>[28]</sup>。正常情况下,细胞内 ROS 处于较低的水平,不易导致膜脂过氧化。当植物处于逆境胁迫下,ROS 的产生与消除之间的动态平衡被打破,导致 ROS 积累,从而引发膜脂过氧化,损伤细胞膜系统,干扰植物的代谢过程,严重时导致植物细胞死亡<sup>[29]</sup>。由图 5 可知,对照组 MDA 含量在培养过程中相对比较稳定。苦草质量浓度为 5 g/L 时,MDA 含量变化平缓,与对照组无显著性差异;苦草质量浓度为 10 g/L 和 20 g/L 时,MDA 含量从第 6 天开始略有上升,第 9 天达到最大值,第 12 天开始急剧降低,此时藻密度也呈下降趋势;苦草质量浓度为 40 g/L 时,MDA 含量从第 3 天开始略有上升,第 6 天达到最大值,在第 9 天开始急剧降低,此时藻密度也急剧降低,说明苦草在质量浓度大于 10 g/L 时,都能对铜绿微囊藻产生胁迫作用,造成细胞膜系统的损伤,从而引起藻细胞大量死亡,随着苦草质量浓度的升高胁迫程度也随之加重。

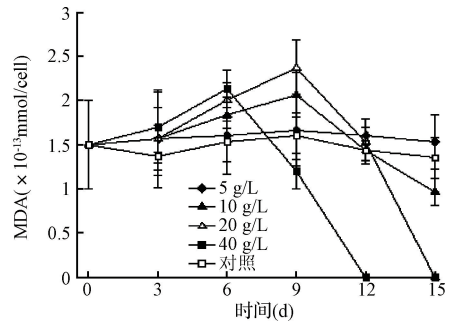


图5 不同质量浓度苦草下铜绿微囊藻 MDA 含量的变化

Fig. 5 MDA content of *Microcystis aeruginosa* under different initial *Vallisneria spiralis* Linn. biomass

## 3 结论

共生培养情况下,苦草在质量浓度大于 10 g/L 时对铜绿微囊藻有明显的抑制作用。在培养过程中,苦草释放的化感物质经过一定时间积累后能够显著抑制铜绿微囊藻 SOD 和 POD 的活性,引起细胞的氧化损伤,促进叶绿素的分解,从而导致藻类死亡。苦草质量浓度越高,短时间内分泌的化感抑藻

物质就越多,抑制强度越大,抑制效果越快。

## 参考文献

- [1] 金相灿. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 1995
- [2] Carmichael W. W. The cyanotoxins. In: Callow J. A. (Ed.). *Advances in Botanical Research*. London: Academic Press, 1997
- [3] 陈卫民, 张清敏, 戴树桂. 苦草与铜绿微囊藻的相互化感作用. *中国环境科学*, 2009, 29(2): 147-151  
Chen W. M., Zhang Q. M., Dai S. G. The mutual allelopathy of *Vallisneria spiralis* Linn. and *Microcystis aeruginosa*. *China Environmental Science*, 2009, 29(2): 147-151 (in Chinese)
- [4] 浦寅芳, 孙颖颖, 阎斌伦, 等. 3 种沉水植物对水华藻类生长的影响. *水生态学杂志*, 2009, 2(6): 46-50  
Pu Y. F., Sun Y. Y., Yan B. L., et al. Effects of three submerged macrophytes on the growth of bloom algae in the laboratory. *Journal of Hydroecology*, 2009, 2(6): 46-50 (in Chinese)
- [5] Sun M. L., Song Z. Q., Fang G. Z. Allelopathy and chemical components of extract from green peel of *Juglans mandshurica* Maxim. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2008, 28(3): 45-49
- [6] Hilt S., Gross E. Can allelopathically active submerged macrophytes stabilize clear-water state in shallow lakes? *Basic and Applied Ecology*, 2008, 9(4): 422-432
- [7] 胡洪营, 门玉洁, 李锋民. 植物化感作用抑制藻类生长的研究进展. *生态环境*, 2006, 15(1): 153-157  
Hu H. Y., Men Y. J., Li F. M. Research progress on phyto-allelopathic algae control. *Ecology and Environment*, 2006, 15(1): 153-157 (in Chinese)
- [8] 卜发平, 罗固源, 许晓毅, 等. 美人蕉和菖蒲生态浮床净化微污染源水的比较. *中国给水排水*, 2010, 26(3): 14-17  
Bu F. P., Luo G. Y., Xu X. Y., et al. *Canna indica* and *Acorus calamus* ecological floating beds for purification of micro-polluted source water. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(3): 14-17 (in Chinese)
- [9] 周真明, 叶青, 沈春华, 等. 3 种浮床植物系统对富营养化水体净化效果研究. *环境工程学报*, 2010, 4(1): 91-95  
Zhou Z. M., Ye Q., Shen C. H., et al. Study on purification effects by three floating-bed plant systems in eutrophic water bodies. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(1): 91-95 (in Chinese)
- [10] 高云霓, 刘碧云, 葛芳杰, 等. 三种水鳖科沉水植物释放的脂肪酸类化感物质的分离与鉴定. *水生生物学*, 2011, 35(1): 170-174  
Gao Y. N., Liu B. Y., Ge F. J., et al. Isolation and identification of allelopathic fatty acids exuded from three submerged hydrocharitaceae species. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, 35(1): 170-174 (in Chinese)
- [11] 黄新颖, 种云霄, 汤仲恩, 等. 3 种沉水植物水培液中抑藻活性物质的分析. *华南农业大学学报*, 2010, 31(3): 19-23  
Huang X. Y., Chong Y. X., Tang Z. E., et al. Analysis on antialgal allelochemicals in culture solutions of three submerged macrophytes. *Journal of South China Agricultural University*, 2010, 31(3): 19-23 (in Chinese)
- [12] Mulderij G. Chemical Warfare in Freshwater—Allelopathic Effects of Macrophytes on Phytoplankton. The Netherlands: Netherlands Institute of Ecology, 2006
- [13] 巨颖琳, 李小明. 南四湖 3 种沉水植物对铜绿微囊藻化感作用研究. *山东大学学报 (理学版)*, 2011, 46(3): 1-8  
Ju Y. L., Li X. M. Allelopathic effects of three submerged macrophytes in the Nansi Lake on *Microcystis aeruginosa*. *Journal of Shandong University (Nature Science)*, 2011, 46(3): 1-8 (in Chinese)
- [14] 张维昊, 周连凤, 吴小刚, 等. 菖蒲对铜绿微囊藻的化感作用. *中国环境科学*, 2006, 26(3): 355-358  
Zhang W. H., Zhou L. F., Wu X. G., et al. Allelopathic effect of *Acorus calamus* on *Microcystis aeruginosa*. *China Environmental Science*, 2006, 26(3): 355-358 (in Chinese)
- [15] 赵坤, 傅海燕, 柴天, 等. 水网藻对铜绿微囊藻的化感作用及对氮磷去除能力研究. *环境科学*, 2011, 32(8): 2267-2272  
Zhao K., Fu H. Y., Cai T., et al. Allelopathy of *Hydrodictyon reticulatum* on *Microcystis aeruginosa* and its removal capacity on nitrogen and phosphorus. *Environmental Science*, 2011, 32(8): 2267-2272 (in Chinese)
- [16] Stanier R. Y., Kunisawa R., Mandel M., et al. Purification and properties of unicellular blue-green algae order. *Bacteriological Reviews*, 1971, 35(2): 171-205
- [17] 陈建勋, 王晓峰. *植物生理学实验指导 (第 2 版)*. 广州: 华南理工大学出版社, 2006
- [18] Heath R. L., Parker L. Photoperitration in isolated chloroplasts kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1968, 75(2): 189-198
- [19] Stewert R. C., Bewley J. D. Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. *Plant Physiology*, 1980, 65(3): 245-248

- [20] Mulderij G., Van New E. H., Van Donk E. Macrophyte-phytoplankton interactions: The relative importance of allelopathy versus other factors. *Ecological Modelling*, **2007**, 204(1-2): 85-92
- [21] 李磊, 侯文华. 荷花和睡莲种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究. *环境科学*, **2007**, 28(10): 2180-2186  
Li L., Hou W. H. Inhibitory effects of liquor cultured with *Nelumbo nucifera* and *Nymphaea tetragona* on the growth of *Microcystis aeruginosa*. *Environmental Science*, **2007**, 28(10): 2180-2186 (in Chinese)
- [22] 李小路, 潘慧云, 徐洁, 等. 金鱼藻与铜绿微囊藻共生情况下的化感作用. *环境科学学报*, **2008**, 28(11): 2243-2249  
Li X. L., Pan H. Y., Xu J., et al. Allelopathic effects of *Ceratophyllum demersum* and *Microcystis aeruginosa* in cocultivation. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **2008**, 28(11): 2243-2249 (in Chinese)
- [23] 李峰民, 胡洪营. 植物化感作用控制天然水体中有害藻类的机理与应用. *给水排水*, **2004**, 30(2): 1-4  
Li F. M., Hu H. Y. Mechanism of phyto-allelochemicals and its application for harmful algae control in nature water body. *Water & Wastewater Engineering*, **2004**, 30(2): 1-4 (in Chinese)
- [24] 李锋民, 胡洪营, 种云霄, 等. 芦苇化感物质 EMA 对铜绿微囊藻生理特性的影响. *中国环境科学*, **2007**, 27(3): 377-381  
Li F. M., Hu H. Y., Chong Y. X., et al. Influence of EMA isolated from *Phragmites communis* on physiological characters of *Microcystis aeruginosa*. *China Environmental Science*, **2007**, 27(3): 377-381 (in Chinese)
- [25] 李合生. 现代植物生理学. 北京: 高等教育出版社, **2001**
- [26] Oncel I., Yurdakulol E., Keles Y., et al. Role of antioxidant defense system and bio-chemical adaptation on stress tolerance of high mountain and steppe plants. *Acta Oecologica-International Journal of Ecology*, **2004**, 26(3): 211-218
- [27] Hejl A. M., Koster K. Juglone disrupts root plasma membrane  $H^+$ -ATPase activity and impairs water uptake, root respiration, and growth in soybean (*Glycine max*) and corn (*Zea mays*). *Journal of Chemical Ecology*, **2004**, 30(2): 453-471
- [28] 唐萍, 吴国荣, 陆长梅, 等. 凤眼莲根系分泌物对栅藻机构及代谢的影响. *环境科学学报*, **2000**, 20(3): 354-359  
Tang P., Wu G. R., Lu C. M., et al. Effects of the excretion from root system of *Eichhornia crassipes* on the cell structure and metabolism of *Scenedesmus arcuatus*. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **2000**, 20(3): 354-359 (in Chinese)
- [29] 陈少裕. 膜脂过氧化对植物的伤害. *植物生理学通讯*, **1991**, 27(2): 84-90  
Chen S. Y. Injury of membrane lipid peroxidation to plant cell. *Plant Physiology Communication*, **1991**, 27(2): 84-90 (in Chinese)