

# N-苯基-2-萘胺对青菜种子萌发及幼苗 生理参数变化的影响

薛延丰<sup>1 2 3</sup> 冯慧芳<sup>1 4</sup> 石志琦<sup>1 2 3</sup> 刘海琴<sup>5</sup> 严少华<sup>5</sup> 郑建初<sup>5</sup>

(1. 江苏省农业科学院 食品质量安全检测研究所 江苏 南京 210014; 2. 江苏省食品质量安全重点实验室, 省部共建国家重点实验室培育基地 江苏 南京 210014; 3. 农业部食品安全监控重点开放实验室 江苏 南京 210014; 4. 南京师范大学 生命科学学院 江苏 南京 210097; 5. 江苏省农业科学院 农业资源与环境研究所 江苏 南京 210014)

**摘要:**以青菜为材料,研究了不同浓度 N-苯基-2-萘胺对青菜种子进行浸种后对种子发芽、生长、叶绿素含量及抗氧化酶活性的影响。结果表明,N-苯基-2-萘胺浸种可以提高种子的发芽势和发芽率,但与对照相比差异不显著;发芽指数和活力指数的变化趋势与发芽势和发芽率的变化趋势相似,在低浓度 N-苯基-2-萘胺处理下,发芽指数和活力指数增加,但与对照相比差异不显著;当 N-苯基-2-萘胺浓度小于 1 mg/L 时,随着 N-苯基-2-萘胺浓度的增加,青菜的株高不同程度增加,在 0.50 mg/L 处理下,株高增加最多,显著大于对照;根长和鲜质量的变化趋势相似,随着 N-苯基-2-萘胺使用量的增加呈现先增加而后降低。在低浓度 N-苯基-2-萘胺处理下,青菜体内的叶绿素含量和抗氧化酶活性与对照相比显著增加,当使用高浓度 N-苯基-2-萘胺处理后,叶绿素含量与抗氧化酶活性和对照相比显著降低。

**关键词:**N-苯基-2-萘胺;青菜;发芽;抗氧化酶

中图分类号:Q945 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2012)01-0140-05

## Effects of N-phenyl-2-naphthylamine on the Seed Germination and Characteristics of Physiology Parameters in Chinese Cabbage Seedlings

XUE Yan-feng<sup>1 2 3</sup> FENG Hui-fang<sup>1 4</sup> SHI Zhi-qi<sup>1 2 3</sup> LIU Hai-qin<sup>5</sup> ,  
YAN Shao-hua<sup>5</sup> ZHENG Jian-chu<sup>5</sup>

(1. Institute of Food Quality and Safety, Jiangsu Academy of Agriculture Sciences, Nanjing 210014, China;  
2. Key Lab of Food Quality and Safety of Jiangsu Province-State Key Laboratory Breeding Base, Nanjing 210014, China; 3. Key Lab of Agro-Food Safety and Quality, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China; 4. College of Life Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China; 5. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** The seeds of Chinese cabbage were soaked by the various concentrations of N-phenyl-2-naphthylamine. The effects of N-phenyl-2-naphthylamine on the seed germination, the growth, the chlorophyll content and the change of antioxidant enzymes in Chinese cabbage were studied in this paper. The results showed that the germination energy and the germination percentage increased with the increase of N-phenyl-2-naphthylamine concentration, whereas they did not have significant difference compared to the control. The change trends of the germination index and the vigor index were the same with the germination energy and the germination percentage. The germination index and the vigor index increased under the lower N-phenyl-2-naphthylamine concentration, but there were no difference compared to the control. When the N-phenyl-2-naphthylamine concentration was less than 1.00 mg/L, the shoot height increased with the increase of N-phenyl-2-naphthylamine concentration. Especially, in the 0.50 mg/L treatment, the shoot height was biggest and had significant difference compared to the control. The trend of the root length change liked as the fresh weight. The root length and fresh weight indicated the trend of increase-decrease

收稿日期:2011-11-22

基金项目:国家科技支撑项目(2009BAC63B01)资助

作者简介:薛延丰(1978-),男,河南孟州人,副研究员,农学博士,主要从事产地环境与食物链安全研究。

通讯作者:严少华(1956-),男,江苏滨海人,研究员,博士生导师,主要从事资源环境研究。

with the increase of N-phenyl-2-naphthylamine concentration. Under the lower N-phenyl-2-naphthylamine concentration, the chlorophyll content and antioxidant enzymes activities markedly increased with the increase of N-phenyl-2-naphthylamine concentration. However, the chlorophyll content and antioxidant enzymes activities markedly decreased compared with the control in the higher N-phenyl-2-naphthylamine concentration.

**Key words:** N-phenyl-2-naphthylamine; Chinese cabbage; Germination; Antioxidant enzyme

水葫芦(*Eichhornia crassipes*) 学名凤眼莲,原产于南美洲,属雨久花科,庞大的根须不断地吸收水中的污染物,其惊人的繁殖速度造就了超强的净化水质的本领,因此,水葫芦也成为实际生态修复工程中应用较广,研究最早、最深入的水生植物<sup>[1]</sup>。水葫芦的资源化利用成了人们关注的热点,研究发现水葫芦体内富含植物生长的所有营养元素<sup>[2]</sup>。同时发现,水葫芦中存在多种化感物质如 N-苯基-2-萘胺、亚油酸、亚油酸甘油酯、壬酸和丙酰胺等<sup>[3]</sup>,关于水葫芦化感物质活性研究的报道也很多<sup>[4-5]</sup>,但多集中在以下几方面:抑菌活性、抗氧化活性、免疫生物活性、保幼激素类似物活性、抑藻活性等<sup>[6-8]</sup>。N-苯基-2-萘胺是效果很好的藻类抑制剂<sup>[9-10]</sup>,其抑藻率可达 90%。当浓度大于 500  $\mu\text{g/L}$  时 N-苯基-2-萘胺表现出明显的植物毒素特性<sup>[11]</sup>。笔者的工作主要放在对水葫芦所含活性成份 N-苯基-2-萘胺进行研究,为此选取青菜为试验材料,研究在不同浓度 N-苯基-2-萘胺处理下对青菜种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、生物量、叶绿素含量和抗氧化酶活性变化,同时对种子发芽参数和生长参数变化与叶片叶绿素含量变化的相关性进行了分析,为达到取其利、去其害的目的,旨在为水葫芦的资源利用提供基础依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料和处理

供试蔬菜:青菜(绿领矮抗 1 号)(*Brassica rapa*); N-苯基-2-萘胺标准样购自 Sigma 公司。该试验在江苏省农业科学院培苗室进行。

青菜种子用 0.3% 的  $\text{H}_2\text{O}_2$  消毒后,用蒸馏水洗净,然后挑选均一、形态正常的种子置于铺 3 层滤纸的培养皿(直径 15 cm)中,每皿 100 粒,设置 3 个重复。N-苯基-2-萘胺处理浓度分别为:0.25, 0.50, 1.00, 2.50, 5.00  $\text{mg/L}$ ,以蒸馏水作为对照(CK)。光照时间 12 h,温度( $25 \pm 1$ ) $^\circ\text{C}$ 。第 1 天向各培养皿中加入 15 mL 不同浓度的 N-苯基-2-萘胺和蒸馏水,使滤纸完全浸湿,每日补充等量蒸发掉的溶液以保持滤纸湿润。青菜处理 10 d 后,将其收获,用于生理生化指标测定。

### 1.2 测定方法

1.2.1 植株生物量用称量法进行测定 将植株用去离子水洗净吸干后测定其鲜质量,样品经 110 $^\circ\text{C}$  杀青 30 min, 70 $^\circ\text{C}$  烘干至恒重,称其干质量。

1.2.2 种子发芽指标的测定和计算 根据发芽试验期间的记录,计算各项发芽指标:发芽势(GE) = 前 3 d 发芽种子数/种子总数  $\times 100\%$ ;发芽率(GP) = 7 d 发芽种子数/种子总数  $\times 100\%$ ;发芽指数(GI) =  $\sum G_t/D_t$  ( $G_t$  指在时间 t 日内的发芽数,  $D_t$  为相应的发芽天数);活力指数(VI) =  $\sum G_t/D_t \times$  幼苗生长势(长度单位:cm);幼苗生长势 = 预选时间内供试种子平均芽长 + 平均根长(芽长:发芽第 7 天量取的幼苗芽长;根长:发芽第 7 天量取的幼苗根长)。

1.2.3 叶绿素含量 取 0.2 g 左右叶片,用 WFZ UV-4802H 紫外可见分光光度计[龙尼柯(上海)仪器有限公司],参照 Wellburn<sup>[12]</sup> 方法进行测定。

1.2.4 抗氧化酶活性 测定参照 Xue 等<sup>[13]</sup> 的方法。取幼苗 0.5 g 左右,加入 5 mL 预冷的 65 mmol/L pH7.8 磷酸缓冲液[内含 1% 聚乙烯吡咯烷酮(PVP)]于冰浴研磨,在 4 $^\circ\text{C}$  下 10 000 r/m 离心 20 min,上清液为酶液。超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD) 活性测定采用氮蓝四唑(Nitroblue tetrazolium, NBT) 光化还原法测定<sup>[14]</sup>,以抑制 NBT 光化还原的 50% 为一个酶活性单位(U 表示)。过氧化物酶(Peroxidase, POD) 活力采用愈创木酚法测定<sup>[15]</sup>,以每分钟内  $A_{470}$  变化 0.01 为一个过氧化物酶活性单位(U);过氧化氢酶(Catalase, CAT) 活性采用过氧化氢法测定<sup>[16]</sup>,以每分钟内  $A_{240}$  变化 0.01 为一个过氧化物酶活性单位(U)。蛋白质含量采用考马斯亮蓝法<sup>[14]</sup>。

### 1.3 统计分析

运用 EXCEL 和 SPSS 生物统计软件进行相关数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 对青菜种子萌发的影响

由表 1 可以看出,使用不同浓度化感物质处理对青菜种子发芽有不同的影响。发芽势随着化感物

质使用量的增加呈现先增加而后降低的趋势;在 0.25 0.50 1.00 mg/L 处理下,发芽势分别比对照高 0.8% 7.0% 1.6%,但与对照相比差异均不显著;在 2.50 mg/L 和 5.00 mg/L 处理下,发芽势与对照相比均显著降低。发芽率的变化趋势与发芽势有所不同,在 0.25 mg/L 处理下,发芽率比对照增加 2.2%,但与对照差异不显著;在 0.50 mg/L 处理下,发芽率与对照相比显著增加;在 1.00 mg/L 处理下,发芽率与对照相比虽有所增加,但差异不显著;在

2.50 mg/L 和 5.00 mg/L 处理下,发芽率与对照相比均显著降低。

就发芽指数而言,其变化趋势与发芽势相似。在 0.25 0.50 1.00 mg/L 处理下,发芽指数分别比对照高 2.3% 7.0% 2.8%,但与对照相比差异均不显著;在 2.50 5.00 mg/L 处理下,发芽势分别比对照小 21.9% 和 30.5%,与对照差异显著。活力指数的变化趋势与发芽指数相似。

表 1 不同浓度 N-苯基-2-萘胺处理对青菜种子发芽的影响

Tab.1 Effects of different N-phenyl-2-naphthylamine concentration on the germination of Chinese cabbage seeds

N-苯基-2-萘胺浓度/(mg/L) N-phenyl-2-naphthylamine concentration	发芽势/% Germinating viability	发芽率/% Germination percentage	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index
CK	85.33 ± 1.15 a	91.33 ± 3.06 b	91.36 ± 2.83 a	712 ± 26 a
0.25	86.00 ± 2.00 a	93.33 ± 1.15 ab	93.48 ± 1.84 a	746 ± 15 a
0.50	91.33 ± 1.15 a	96.67 ± 1.15 a	97.79 ± 3.60 a	767 ± 25 a
1.00	86.67 ± 2.31 a	94.67 ± 1.15 ab	93.88 ± 1.98 a	756 ± 9.8 a
2.50	69.33 ± 3.06 b	85.33 ± 1.15 c	71.32 ± 4.77 b	518 ± 24 b
5.00	64.67 ± 5.03 b	84.67 ± 1.15 c	63.53 ± 3.14 c	401 ± 29 c

2.2 对青菜生长的影响

由表 2 可以看出,在不同浓度化感物质处理下,对植株的株高、根长和鲜质量影响不同。在 0.25 mg/L 处理下,株高比对照增加 1.9%,但与对照差异不显著;在 0.50 mg/L 处理下,株高比对照增加

5.7%,与对照差异显著;在 1.00 mg/L 处理下,株高与对照相比虽有所增加,但差异不显著;在 2.50 mg/L 和 5.00 mg/L 处理下,株高分别比对照降低 4.9% 和 9.4%,与对照相比差异显著。

表 2 不同浓度 N-苯基-2-萘胺处理对青菜生长及生物量的影响

Tab.2 Effects of different N-phenyl-2-naphthylamine concentration on the growth and biomass in Chinese cabbage

N-苯基-2-萘胺浓度/(mg/L) N-phenyl-2-naphthylamine concentration	株高/cm Shoot height	根长/cm Root length	鲜质量/mg Fresh weight
CK	3.21 ± 0.05 b	7.80 ± 0.22 a	23.09 ± 0.31 ab
0.25	3.27 ± 0.05 ab	7.99 ± 0.13 a	23.03 ± 0.81 ab
0.50	3.39 ± 0.08 a	8.06 ± 0.07 a	23.78 ± 0.33 a
1.00	3.27 ± 0.04 ab	7.85 ± 0.19 a	23.14 ± 0.27 ab
2.50	3.05 ± 0.07 c	7.28 ± 0.31 b	22.14 ± 0.22 b
5.00	2.91 ± 0.12 d	6.32 ± 0.20 c	20.48 ± 0.55 c

就根长而言,在 0.25 0.50 1.00 mg/L 处理下,根长分别比对照增加 2.4% 3.3% 和 0.6%,但与对照相比差异均不显著;在 2.50 mg/L 和 5.00 mg/L 处理下,根长分别比对照减少 6.7% 和 19.0%,与对照相比均显著降低。鲜质量的变化趋势与根长相似。

2.3 对青菜体内叶绿素含量影响

由表 3 可知,叶绿素含量随着化感物质处理浓度的增加而呈现出先增加后降低的趋势。在 0.25 mg/L 处理下,叶绿素含量比对照增加 1.5%,但与对照差异不显著;在 0.50 mg/L 处理下,叶绿素含量比对照增加 5.4%,与对照差异不显著;在 1.00 2.50 5.00 mg/L 处理下,叶绿素含量分别比对照减

少 17.8% 23.5% 30.7%,与对照相比差异均显著。

表 3 不同浓度 N-苯基-2-萘胺处理对青菜幼苗叶绿素含量及叶绿素 a/b 的影响

Tab.3 Effects of different N-phenyl-2-naphthylamine concentration on the chlorophyll content and ratio of Chl a/Chl b in Chinese cabbage

N-苯基-2-萘胺浓度/(mg/L) N-phenyl-2-naphthylamine concentration	叶绿素含量 /(mg/g) Chlorophyll content	叶绿素 a/b Ratio Chl a /Chl b
CK	0.778 ± 0.027 b	2.329 ± 0.439 b
0.25	0.790 ± 0.024 b	2.327 ± 0.447 b
0.50	0.820 ± 0.028 a	3.053 ± 0.249 a
1.00	0.640 ± 0.010 c	2.839 ± 0.170 b
2.50	0.595 ± 0.010 d	2.956 ± 0.316 b
5.00	0.539 ± 0.031 d	2.818 ± 0.341 b

就叶绿素 a 和叶绿素 b 的比值而言,从表 3 可

以看出,在 0.50 mg/L 处理下,叶绿素 a 和叶绿素 b 的比值最大,是对照的 1.31 倍,显著大于对照;其他处理与对照相比均无显著差异。

#### 2.4 对青菜体内抗氧化酶活性的影响

由图 1 可知,SOD、POD 和 CAT 三种抗氧化酶活性随着化感物质处理浓度的增加变化不同。SOD 活性(图 1-A)随着化感物质处理浓度的增加与对照相比呈现先增加后降低的趋势,在低浓度 0.25 mg/L 处理下,SOD 活性与对照相比有所降低,但是差异不显著;当在 0.50 mg/L 浓度处理下,SOD 活性与对照相比显著增加,是对照的 1.08 倍;在 1.00 mg/L 处理下,SOD 活性与对照相比虽有所增加,但是差异不显著;当处理浓度大于 1.00 mg/L 时,SOD 活性降低,但与对照相比差异均不显著。

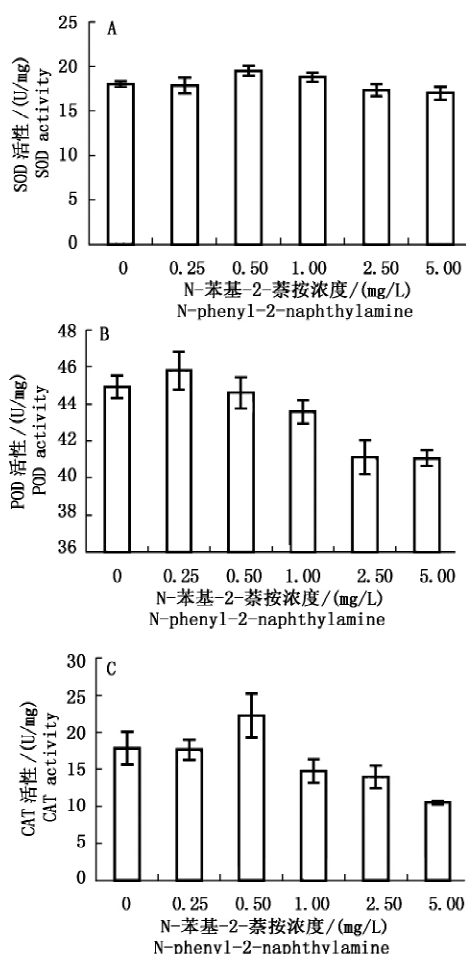


图 1 不同浓度 N-苯基-2-萘胺处理对青菜体内 SOD(A)、POD(B) 和 CAT(C) 活性的影响

Fig.1 Effects of different N-phenyl-2-naphthylamine concentration on the ability of SOD(A), POD(B) and CAT(C) of Chinese cabbage seedlings

POD 活性(图 1-B)变化趋势与 SOD 活性变化趋势不同,POD 活性随着化感物质处理浓度的增加与对照相比呈现出逐渐降低的趋势。在低浓度

0.25 mg/L 处理下,POD 活性是对照的 1.02 倍,但与对照相比差异不显著;在 0.50 mg/L 和 1.00 mg/L 处理下,POD 活性分别是对照的 99.2% 和 97.0%,与对照相比差异均不显著;当处理浓度大于 1.00 mg/L 时,随着处理浓度的增加,POD 活性与对照相比显著降低。

CAT 活性(图 1-C)随着化感物质处理浓度的增加而呈现出的变化趋势相似于 SOD,在低浓度 0.25 mg/L 处理下,CAT 活性与对照相比有所降低,但与对照相比差异不显著;当在 0.50 mg/L 浓度处理下,CAT 活性与对照相比显著增加,是对照的 1.25 倍;在 1.00 mg/L 和 2.50 mg/L 处理下,CAT 活性分别是对照的 82.9% 和 87.3%,与对照相比差异均不显著;在 5.00 mg/L 处理下,CAT 活性与对照相比显著降低。

#### 2.5 叶绿素含量与种子萌发参数、生长参数和抗氧化酶活性变化的相关性分析

试验结果显示,随着 N-苯基-2-萘胺浓度增加,叶绿素含量显著上升,同时引起种子萌发参数、生长参数和抗氧化酶活性的明显变化。对叶绿素含量与萌发参数、生长参数和抗氧化酶活性变化进行的相关性分析结果如表 4。叶片叶绿素含量的变化与发芽势、发芽指数、活力指数、根长、鲜质量、POD 和 CAT 的变化均显著相关。从时间上看,发芽势、发芽指数、活力指数、根长、鲜质量、POD 和 CAT 变化同步于叶绿素含量的变化。

表 4 叶绿素含量与种子萌发参数、生长参数和酶活性变化的相关性分析

Tab.4 Correlations analysis of seed germination parameters, growth indexes and enzyme activity with chlorophyll content

参数 Parameters	公式 Formula	R <sup>2</sup> 值 R <sup>2</sup> value
发芽势 Germinating viability	$y = -446.04x^2 + 690.68x - 178.81$	0.841 6
发芽指数 Germination index	$y = -698.14x^2 + 1059.5x - 305.78$	0.861 9
活力指数 Vigor index	$y = -9335.9x^2 + 13867x - 4369.3$	0.879 4
根长 Root length	$y = -44.022x^2 + 65.033x - 15.876$	0.933 7
鲜质量 Fresh weight	$y = -68.863x^2 + 102.59x - 14.626$	0.876 8
POD	$y = -51.174x^2 + 85.837x + 9.1827$	0.883 7
CAT	$y = 16.022x^2 + 10.262x + 1.1586$	0.886 0

### 3 讨论

种子萌发是植物生命开始的重要事件,也是植物最早接受环境胁迫的阶段。本试验结果表明,发芽势和发芽率均随着 N-苯基-2-萘胺使用量的增加呈现先增加而后降低的趋势,在低浓度的 N-苯基-2-萘胺处理下,发芽势和发芽率均比对照高,但是与对

照相比差异均不显著;发芽指数和活力指数的变化趋势与发芽势和发芽率的变化趋势相似,在低浓度N-苯基-2 萘胺处理下,发芽指数和活力指数增加,但与对照相比差异不显著,随着N-苯基-2 萘胺浓度增加,发芽指数和活力指数显著降低。说明在低浓度N-苯基-2 萘胺处理下,对青菜种子的萌发没有显著的影响,但随着N-苯基-2 萘胺浓度的增加,当N-苯基-2 萘胺浓度大于1 mg/L时,显著抑制种子的萌发。

种子萌发后,幼苗的株高、根长和鲜质量受到不同程度的影响。当N-苯基-2 萘胺浓度小于1 mg/L时,随着N-苯基-2 萘胺浓度的增加,青菜的株高不同程度增加,在0.25 mg/L和1.00 mg/L处理下,株高虽然有所增加但与对照差异不显著;根长和鲜质量的变化趋势相似,随着N-苯基-2 萘胺使用量的增加呈现出先增加而后降低,在0.50 mg/L处理下,根长和鲜质量最大,但与对照差异不显著,大于1.00 mg/L时,随着处理浓度的增加而显著降低。这些与前人研究结果相同<sup>[17]</sup>。

植物叶片叶绿素含量是直接反映植物光合能力的一个重要指标<sup>[18-23]</sup>,同时植物体内SOD、POD和CAT等清除活性氧的酶类活性较强,可及时清除植物受环境胁迫时产生的过量活性氧,从而使活性氧的产生和清除保持一种动态平衡<sup>[20,21]</sup>。本试验研究表明,通过N-苯基-2 萘胺浸种之后,青菜体内的叶绿素含量与抗氧化酶SOD、POD和CAT活性均有不同程度改变。在0.50 mg/L N-苯基-2 萘胺处理下,叶绿素含量、Chla/Chlb、SOD和CAT均达最大,且叶绿素含量、Chla/Chlb和CAT与对照相比显著增加,随着处理浓度的增加叶绿素含量与抗氧化酶活性降低,当在5.00 mg/L处理下,叶绿素含量与抗氧化酶活性降低与对照相比,均显著降低。这说明低浓度的化感物质可有效促进光合系统物质的产生,增加了植株自身的防御能力。

同时研究发现,叶片叶绿素含量与种子发芽参数、生长参数和抗氧化酶活性变化相一致,且呈正相关关系。这说明任何一种化感物质都可能影响植物的许多基本代谢过程和生长调节系统;任何一种化感物质对植物的作用机制都与化感物质的浓度有关,表现为低促高抑<sup>[22-23]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 张文明,王晓燕.水葫芦在水生态修复中的研究进展[J].江苏环境科技,2007,20(1):55-58.
- [2] Gunnarsson C C, Petersen C M. Water hyacinths as a resource in agriculture and energy production: a literature review[J]. Waste Management, 2007, 27(1):117-129.
- [3] 胡廷尖,王雨辰,陈丰刚,等.凤眼莲对铜绿微囊藻的

化感抑制作用研究[J].水生生态学杂志,2010,3(6):47-51.

- [4] 陈芝兰,杨维东,刘洁生,等.凤眼莲根系分泌物对塔玛亚历山大藻的化感作用[J].水生生物学报,2005,29(3):313-317.
- [5] 刘洁生,杨维东,陈芝兰.凤眼莲根对东海原甲藻生长的抑制作用及机制研究[J].热带海洋学报,2007,26(3):43-47.
- [6] 周蓓蕾,彭进平,郭建维,等.凤眼莲活性提取物的抑菌活性研究[J].江苏农业学报,2009,25(3):547-550.
- [7] 唐洁.植物多糖生物活性功能的研究进展[J].食品研究与开发,2006,27(5):130-132.
- [8] 潘凤莲,章玉平.水葫芦活性化学物质研究进展[J].饲料研究,2010,6:81-82.
- [9] Qian H F, Xu X Y, Chen W *et al.* Allelochemical stress causes oxidative damage and inhibition of photosynthesis in *Chlorella vulgaris* [J]. Chemosphere, 2009, 75: 368-375.
- [10] Qian H H, Yu S Q, Sun Z Q *et al.* Effects of copper sulfate, hydrogen peroxide and N-phenyl-2-naphthylamine on oxidative stress and the expression of genes involved in photosynthesis and microcystin disposition in *Microcystis aeruginosa* [J]. Aquatic Toxicology, 2010, 99: 405-412.
- [11] Altenburger R, Brack W, Greco W R *et al.* On the mode of action of N-Phenyl-2-naphthylamine in plants [J]. Environ Sci Technol, 2006, 40(19):6163-6169.
- [12] Wellburn A R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids using various solvents with spectrophotometers of different resolution [J]. J Plant Physiol, 1994, 144: 307-313.
- [13] Xue Y F, Liu L, Liu Z P *et al.* Protective role of Ca against NaCl toxicity in Jerusalem artichoke by up-regulation of antioxidant enzymes [J]. Pedosphere, 2008, 18(6):766-774.
- [14] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].1版.北京:北京高等教育出版社,2000:164-165;167-169;182-184.
- [15] 张志良.植物生理学实验指导[M].3版.北京:北京高等教育出版社,2003:121-124;274-277.
- [16] Yin L, Huang J, Li D, *et al.* Microcystin-RR uptake and its effects on the growth of submerged macrophyte *Vallisneria spiralis* (Lour) Hara [J]. Environmental Toxicology, 2005, 20(3):308-313.
- [17] Gouveia S P, Boyer G L, Twiss M R. Influence of ultraviolet radiation, copper and zinc on microcystin content in *Microcystis aeruginosa* (Cyanobacteria) [J]. Harmful Algae, 2008, 7: 194-205.
- [18] Willekens H, Van Camp W, Van Montagu M *et al.* Ozone, sulfur dioxide and ozone ultraviolet-B have similar effect on mRNA accumulation of antioxidant genes in *Nicotiana glauca* L [J]. Plant Physiol, 1994, 106: 1007-1014.
- [19] 周芬,曾长立,王建波.外源钙降低拟南芥幼苗盐害效应[J].武汉植物学研究,2004,22(2):179-182.
- [20] 薛延丰,李慧明,石志琦.微囊藻毒素(MC-RR)对白三叶种子萌发及幼苗生理生化特性影响[J].草业学报,2009,18(6):180-185.
- [21] 姜义宝,郑秋红,王成章,等.超干贮藏对菊苣种子活力与抗氧化性的影响[J].草业学报,2009,18(5):93-97.
- [22] 张远莉,陈建群,卫春,等.薄荷化感物质及其初步分离[J].应用与环境生态学报,2003,9(6):611-615.
- [23] 李雪利,李正,李彦涛,等.植物化感作用研究进展[J].中国农学通报,2009,25(23):142-146.