

# 芘胁迫对菠菜生长、叶片叶绿素和抗氧化酶活性的影响

蔡顺香<sup>1,2</sup>

(1. 福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福建 福州 350013;  
2. 福建省农业科学院农业资源与环境研究中心, 福建 福州 350013)

**摘要:** 采用盆栽试验研究土壤中不同施芘水平对菠菜 (*Spinacia oleracea L.*) 生长、叶片叶绿素和抗氧化酶活性的影响。结果表明: 50~200 mg·kg<sup>-1</sup>施芘水平下菠菜幼苗叶片的各项叶绿体色素含量、不同时期的根长与对照均无显著差异; 施芘浓度大于 50 mg·kg<sup>-1</sup>, 菠菜苗期的株高、根和茎叶的鲜重显著降低; 芈大于 100 mg·kg<sup>-1</sup>时, 菠菜收获期的根和茎叶干重显著受到抑制; 芈胁迫导致菠菜幼苗叶片的丙二醛累积量提高, 可溶性糖含量增加; 同时叶片的 APX、CAT、POD 活性和非酶抗氧化剂 AsA 含量均随芘浓度增加而显著增加。

**关键词:** 菠菜; 芈胁迫; 生长; 叶绿素; 抗氧化酶

中图分类号: Q 945.78

文献标识码: A

## Effect of pyrene stress on growth, chlorophyll and anti oxidative enzyme activity in spinach leaf

CAI Shun xiang<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350013, China;  
2. Research Centre of Agricultural Resource and Environment, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350013, China)

**Abstract:** An experiment was conducted in flowerpots to study the effect of the pyrene level in soil on the growth leaf, chlorophyll content and anti oxidative enzyme activity of the spinach (*Spinacia oleracea L.*). No significant differences were found on the root length in different growth periods or the contents of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a+b and carotenoid in the leaves, when 50~200 mg kg<sup>-1</sup> pyrene was applied. However, when pyrene application was greater than 50 mg kg<sup>-1</sup>, significant reductions on plant height, fresh root, stem and leaf weights at the seedling stage were observed. As the pyrene increased beyond 100 mg kg<sup>-1</sup>, the dry root, stem and leaf weights at harvesting stage decreased significantly. Pyrene stress increased MDA and SS in the leaves of the spinach seedling. It also significantly increased the APX, CAT and POD activities, as well as the antioxidant AsA contents in the leaves.

**Key words:** spinach; pyrene stress; growth; chlorophyll; anti oxidative enzyme

多环芳烃 (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是指 2 个或 2 个以上的苯环以稠环形式相连的化合物, 是环境中普遍存在的一类有机污染物。PAHs 较难降解, 90% 以上的 PAHs 最终随着大气沉降、污水灌溉和污泥等废弃物的使用而进入土壤<sup>[1]</sup>。芘是带有 4 个苯环的 PAHs, 在我国许多城郊地区土壤污染调查中均有检出<sup>[2~3]</sup>, 通常作为监测 PAHs 污染的指示化合物<sup>[4]</sup>。残留在土壤中的 PAHs 不仅影响土壤的正常功能, 不利作物生长, 而且还可能通过生物富集进入食物链, 危及人体健康。

近年来, 国内外有关 PAHs 对植物生长及其生理生化指标影响的研究取得了一些进展<sup>[5~12]</sup>。尹颖等<sup>[8]</sup>研究发现随着芘浓度的增加, 苦草的叶绿素、谷胱甘肽含量下降, 可溶性糖、POD 活性和 MDA 含量升高, 当污染加重时, 升高现象有减弱趋势。陆志强等<sup>[9]</sup>通过沙培试验研究不同浓度芘处理对红树植物秋茄幼苗生长的影响, 发现低浓度芘对幼苗生长有一定刺激作用, 高浓度芘则显著抑制幼苗的根、茎、叶和总量。杨志峰等<sup>[10]</sup>沙培试验表明: 芈胁迫条件下, 随处理浓度升高, 辣椒生长受到明显抑制, 生物量、株高及叶绿素含量下降,

MDA 含量显著增加。但是以上试验所涉及研究对象的胁迫时间都不长, 研究方法也多为水培或沙培。对于人们日常生活必不可少的叶菜类蔬菜, 在遭受土壤 PAHs 污染时其生长及生理的变化目前国内鲜见报道。本试验以目前广泛种植的绿叶蔬菜菠菜为材料, 研究土壤中不同浓度芘对菠菜生长、叶片叶绿素和抗氧化酶活性的影响, 旨在探讨芘对叶菜类蔬菜毒害的机制, 为蔬菜的污染生态行为提供相关的基础理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试菠菜 (*Spinacia oleracea* L.) 为新西兰 999 大叶菠菜, 购自福州华闽进出口有限公司; 芈购自鞍山市天长化工有限公司, 纯度大于 98%; 试验用土壤为菜园土, 其基本理化性质: pH 5.62, 有机质  $18.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全氮  $1.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全磷  $0.915 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全钾  $35.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 碱解氮  $144.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 有效磷  $129.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $161.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 芈含量  $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计

盆栽试验在福建省农科院土肥所网室内进行。用  $20 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$  塑料盆, 每盆装过  $2 \text{ mm}$  筛风干土  $3 \text{ kg}$ 。试验设 5 个处理, 土壤施芘量分别为  $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 分别用 Py0、Py50、Py100、Py200 和 Py400 表示。芘以丙酮溶解后添加于土壤中, 待丙酮挥发干净, 将土壤搅拌均匀。每个处理设 6 次重复, 随机排列。每千克土施 N 0.32 g、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.10 g、K<sub>2</sub>O 0.25 g, 氮肥为尿素, 磷肥为过磷酸钙, 钾肥为硫酸钾。全部肥料作基肥, 在装盆时与土壤混匀一次性施入。

筛选子粒饱满的菠菜种子, 催芽后每盆播种 10 粒种子, 常规管理。25 d 时连根挖取苗期菠菜样品, 根系用清水洗净并吸干水分, 测量菜苗的株高、根长, 根和茎叶的鲜重, 从菜苗顶部往下数 1~2 片展开叶测定: 叶绿素 a (Chl a)、叶绿素 b (Chl b)、类胡萝卜素 (Car)、丙二醛 (MDA)、可溶性糖 (SS)、抗坏血酸 (AsA) 的含量, 以及抗坏血酸过氧化物酶 (APX)、过氧化氢酶 (CAT) 和过氧化物酶 (POD) 的活性, 每处理 3 个重复。剩余的 3 个重复菠菜每盆定植 5 株, 不久之后发现菜苗出现缺硼症状, 于是每盆叶面喷施 0.2% 的硼酸溶液, 每次用量 200 mL, 共喷施 3

次。3 个月后收获, 测定菠菜的株高、根长, 根和茎叶的干重。

### 1.3 测定方法

生理指标的测定参照陈建勋等<sup>[14]</sup>的方法: Chl 和 Car 采用 80% 丙酮溶液浸提, 多波长分光光度法测定; MDA 和 SS 采用硫代巴比妥酸法; AsA 采用 2, 2- 二联吡啶比色法; APX 活性根据 APX 催化 AsA 与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 反应, 随着 AsA 被氧化, 溶液在 290 nm 处的 OD 值减少, 酶活性用  $\mu\text{mol} (\text{AsA}) \cdot \text{g}^{-1} (\text{FW})$  表示; POD 活性采用愈创木酚法, 以每分钟 470 nm 处 OD 值增加 0.01 定义为 1 个活力单位, 以  $\text{U} \cdot \text{mg}^{-1} (\text{FW})$  表示; CAT 活性采用紫外分光光度法, 将每分钟 240 nm 处 OD 值减少 0.01 为 1 个活力单位, 用  $\text{U} \cdot \text{mg}^{-1} (\text{FW})$  表示, 各项指标测定 3 次重复, 取平均值。

### 1.4 数据统计分析

原始数据的计算采用 EXCEL 软件, 采用 DPS 软件进行方差分析和显著性检验, 数据表示形式为平均数 ± 标准误差 ( $n=3$ ),  $P<0.05$  为差异显著,  $P<0.01$  为差异极显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 芈胁迫对菠菜生长的影响

2.1.1 芈胁迫对苗期菠菜株高、根长和生物量的影响 低浓度 ( $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 芈胁迫下, 苗期菠菜的株高无显著变化。 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  芈浓度下, 菠菜的株高分别比对照降低了 24.68%、33.30% 和 42.84%, 均极显著低于对照。同样, 苗期菠菜的茎叶鲜重也随着土壤中芘浓度的增加而极显著下降,  $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理的菜苗茎叶鲜重比对照下降了 74.01% (表 1)。由表 1 还可以看出,  $50\sim200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  芈浓度下苗期菠菜的根长与对照均无显著差异, 施芘大于  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 芈极显著地抑制苗期菠菜根的鲜重,  $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理的菜苗根的鲜重比对照下降了 50%。根冠比随施芘量的增加呈上升趋势, 说明芘对菠菜幼苗地上部的抑制大于地下部。

2.1.2 芈胁迫对收获期菠菜株高、根长和生物量的影响 从表 2 可看出, 芈胁迫对菠菜收获时株高和根长的影响均不显著。超过  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  浓度的芘显著抑制菠菜生长, 表现为茎叶和根的干重显著低于对照处理。高浓度芘胁迫下, 收获期菠菜的根冠比较对照明显下降, 表明芘对收获期菠菜根的影响大于其对茎叶的影响。说明在菠菜整个生长过程中, 芈对前期 (25 d 以前苗期) 的影响远大于

对生长后期的影响。

表1 茴胁迫对苗期菠菜株高、根长和生物量的影响

Table 1 Effect of pyrene stress on plant height, root length and biomass of spinach at seedling stage

处理	株高 (cm)	根长 (cm)	茎叶鲜重 (g)	根鲜重 (g)
Py0	10.90±0.38 aA	5.81±0.31 aA	7.35±0.23 aA	0.34±0.02 aA
Py50	10.0±0.34 aA	6.15±0.50 aA	5.65±0.44 bB	0.35±0.03 aA
Py100	8.21±0.44 bB	6.15±0.51 aA	3.09±0.16 cC	0.25±0.02 bB
Py200	7.27±0.32 bcBC	5.13±0.36 aA	2.65±0.18 cdCD	0.23±0.01 bC
Py400	6.23±0.12 cC	4.85±0.64 aA	1.91±0.12 dD	0.17±0.01 cC

注: 各列数值间不同小写字母表示差异达显著水平, 不同大写字母表示差异达极显著水平, 下同。

表2 茴胁迫对收获期菠菜株高、根长和生物量的影响

Table 2 Effect of pyrene stress on plant height, root length and biomass of spinach at harvesting stage

处理	株高 (cm)	根长 (cm)	茎叶干重 (g)	根干重 (g)
Py0	20.60±0.10 aA	9.45±0.16 aA	8.91±0.28 aA	0.52±0.04 aABC
Py50	20.10±0.82 aA	9.47±0.54 aA	8.62±0.50 abA	0.56±0.02 aAB
Py100	21.20±1.33 aA	8.90±1.01 aA	8.52±0.13 abcA	0.61±0.01 aA
Py200	20.80±1.73 aA	9.73±0.55 aA	7.82±0.34 bcA	0.36±0.05 bBC
Py400	22.30±1.62 aA	9.73±0.68 aA	7.62±0.19 cA	0.33±0.08 bC

## 2.2 茴胁迫对菠菜幼苗叶片叶绿素含量的影响

叶绿素是植物进行光合作用的重要色素。表3显示: 25 d 龄菠菜幼苗叶片的 Chl a、Chl b、Car 及叶绿素总量随茴胁迫表现出相同的规律, 低浓度 ( $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 胁迫下各叶绿体色素含量略有上升, 随着土壤中茴浓度的增加, 菠菜幼苗叶片中的叶绿体色素含量呈下降趋势, 方差分析表明各处理

之间差异不显著。低浓度的茴对叶片的光合作用有一定刺激作用, 茴浓度增加则对叶片的光合作用不利。叶绿素 a/b 随茴浓度的增加表现为先上升后下降的过程, Py100 处理的叶片叶绿素比率最高, 与对照差异极显著, Py400 处理的叶片叶绿素比率则极显著低于对照; 这一现象还表明高浓度的茴对菠菜幼苗叶片叶绿素 a 的抑制程度要大于叶绿素 b。

表3 茴胁迫对菠菜幼苗叶片叶绿体色素含量的影响

Table 3 Effect of pyrene stress on chlorophyll contents of spinach seedling leaves

处理	叶绿素 a $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (FW)	叶绿素 b $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (FW)	类胡萝卜素 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (FW)	叶绿素 a+b $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (FW)	叶绿素 a/b
Py0	1.89±0.06 aA	0.55±0.02 aA	0.56±0.02 aA	2.43±0.07 aA	3.44±0.02 bC
Py50	1.93±0.06 aA	0.55±0.02 aA	0.55±0.01 aA	2.48±0.07 aA	3.55±0.003 aAB
Py100	1.85±0.10 aA	0.52±0.03 aA	0.55±0.03 aA	2.37±0.12 aA	3.57±0.02 aA
Py200	1.81±0.09 aA	0.52±0.02 aA	0.53±0.02 aA	2.33±0.11 aA	3.47±0.03 bBC
Py400	1.69±0.07 aA	0.51±0.02 aA	0.52±0.02 aA	2.21±0.10 aA	3.32±0.02 cD

## 2.3 茴胁迫对菠菜幼苗叶片 APX、CAT、POD 酶活性的影响

抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 是利用抗坏血酸作为电子供体的  $\text{H}_2\text{O}_2$  的清除剂, 是植物叶绿体中清除  $\text{H}_2\text{O}_2$  的关键的酶。茴胁迫下, 25 d 龄菠菜

幼苗叶片中的 APX 活性均高于对照。除 Py50 处理的叶片 APX 活性与对照差异不显著外, 其余各个处理菠菜幼苗叶片中的 APX 活性显著或极显著高于对照。且随茴胁迫浓度增加而递增, Py400 处理的酶活性比对照增加了 48.92% (表4)。

过氧化氢酶 (CAT) 是一种包含血红素的四聚体酶, 存在于所有的植物细胞中, 它可将  $H_2O_2$  迅速分解为  $H_2O$  和  $O_2$ , 也担负着相当数量的  $H_2O_2$  清除任务。表 4 显示, 施芘处理的菠菜幼苗叶片中 CAT 酶的活性增强, 芨浓度超过  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 菠菜幼苗叶片的 CAT 活性极显著增加,  $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, CAT 活性为对照的 2 倍以上。

过氧化物酶 (POD) 广泛存在于植物体内的不同组织中, 作为活性较高的适应性酶, 能够反应植物生长发育的特点、体内代谢状况以及对外界的适应性。在植物生长初期, POD 与 CAT、APX 一样作为植物细胞活性氧保护酶系统的成员之一, 能够清除植物细胞内产生的  $H_2O_2$ , 对植物起保护作用。与 CAT 酶活性的变化趋势相同, POD 活性在低浓度胁迫下增加不显著, 在  $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  以上芘浓度胁迫下, 菠菜幼苗叶片的 POD 活性极显著增加 (表 4)。

表 4 芈胁迫对菠菜幼苗叶片 APX、CAT 和 POD 活性的影响

Table 4 Effect of pyrene stress on APX, CAT and POD activities in spinach seedling leaves

处理	APX 活性 $\mu\text{mol AsA} \cdot \text{g}^{-1}(\text{FW})$	CAT 活性 $\text{U} \cdot \text{mg}^{-1}(\text{FW})$	POD 活性 $\text{U} \cdot \text{mg}^{-1}(\text{FW})$
Py0	3.23±0.39 cB	0.22±0.01 dD	0.53±0.04 bB
Py50	3.51±0.27 bcB	0.32±0.02 cBC	0.54±0.02 bB
Py100	3.98±0.04 bAB	0.24±0.00 dCD	0.56±0.02 bB
Py200	4.12±0.04 abAB	0.39±0.04 bAB	0.80±0.03 aA
Py400	4.81±0.21 aA	0.47±0.02 aA	0.87±0.02 aA

#### 2.4 芈胁迫对菠菜幼苗叶片 MDA、SS、AsA 含量的影响

丙二醛 (MDA) 是常用的反映膜脂过氧化的生理指标, 其含量的高低可反映出细胞质膜脂过氧化的水平和逆境胁迫下质膜受伤害的程度。而可溶性糖 (SS) 含量在植物遭受逆境胁迫时通常会增加。表 5 中施芘处理的菠菜幼苗叶片中的 MDA 含量均高于对照, Py100 和 Py400 处理的 MDA 含量比对照显著增加。SS 含量除 Py50 处理略低于对照, 经方差分析与对照差异不显著外, 其余各处理的可溶性糖含量显著或极显著高于对照, Py400 处理的 SS 含量最高, 比对照提高了 32.72%。

抗坏血酸 (AsA) 存在于叶绿体基质中, 它可以作为抗氧化剂直接清除活性氧, 是植物非酶促清除系统的主要成员之一。表 5 显示, 菠菜幼苗叶片的 AsA 含量随施芘浓度增加表现为先上升再下降的趋势, Py100 处理的 AsA 含量最高, 之后虽然

AsA 含量有所下降, 但仍然极显著高于对照。

表 5 芈胁迫对菠菜幼苗叶片 MDA、SS 和 AsA 含量的影响  
Table 5 Effect of pyrene stress on MDA, SS and AsA contents in spinach seedling leaves

处理	MDA $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}(\text{FW})$	SS $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}(\text{FW})$	AsA $\text{mg} \cdot 100\text{g}^{-1}(\text{FW})$
Py0	13.63±0.08 aA	76.22±3.83 cCD	57.85±0.16 dC
Py50	14.25±2.76 aA	69.43±4.73 cD	62.66±0.08 cC
Py100	19.78±3.54 bA	91.10±2.05 bAB	100.06±0.25 aA
Py200	14.35±1.58 aA	86.88±0.09 bBC	87.16±2.13 bB
Py400	21.04±4.72 bA	101.16±0.41 aA	87.02±1.94 bB

#### 3 讨 论

研究结果表明, 芈浓度超过  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 25 d 苗期菠菜的株高、茎叶鲜重和根鲜重均显著受抑制, 且随胁迫程度加强受抑制也越明显。到菠菜收获时, 各个处理之间的株高差异不显著, 茎叶干重和根干重也只有在高浓度 ( $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 芈胁迫下才显著下降。说明芘对菠菜地上部分的影响主要在苗期阶段, 根冠比上升显示了芘对苗期菠菜地上部的抑制大于对地下部分的抑制, 这与杨志峰等<sup>[10]</sup>在辣椒沙培上的试验结果相一致。到收获时, 高浓度芘胁迫下菠菜的根冠比下降, 此时芘对菠菜茎叶部分的抑制不明显。因此, 在植物的不同生长时期, 芈胁迫对植物生长的影响可能得出不同的结论, 原因可能是苗期植物的根系不发达, 土壤中的有机污染物直接影响根系的生长致使幼苗的胁迫症状显著。随着植株的生长, 体内抗氧化酶活性增强, 胁迫产生的活性氧被清除, 根系生长得以恢复, 植株又恢复到正常的生长状态; 另一方面, 土壤中的微生物能以多环芳烃作为碳源和能源, 并与其他有机质进行共代谢, 从而导致土壤中施加的芘随着植株的生长而被微生物降解大部分, 所以芘对收获期菠菜的影响远小于对苗期菠菜的影响。

芘胁迫对 25 d 龄菠菜幼苗叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 和类胡萝卜素的含量有所抑制, 但差异不显著。笔者之前研究发现芘胁迫 10 d 的小白菜幼苗叶片各项叶绿素含量随芘浓度的增加显著降低<sup>[11]</sup>, 尹颖等<sup>[8]</sup>通过芘溶液培养 10 d 后苦草的叶绿素含量下降, 杨志峰等<sup>[10]</sup>也得出沙培 10 d 后辣椒叶片叶绿素下降的结论。结论看似相左, 实则反映了有机污染对植物影响的动态变化规律, 这与芘胁迫对小白菜叶片叶绿素含量的动态影响结

果<sup>[6]</sup>相一致。说明芘对植物叶片叶绿素含量的影响受胁迫时间的影响很大，胁迫早期，叶绿素含量显著下降，随生长进行，中后期各个处理之间的叶绿素含量没有明显差别。

当植物处于逆境条件时，会导致活性氧在体内的过量积累，从而对植物造成伤害。而植物体为保护自身免受活性氧的伤害，形成了内源保护系统，包括植物细胞膜的酶保护系统和非酶抗氧化剂<sup>[13]</sup>。本研究发现：芘胁迫导致菠菜幼苗叶片的膜脂过氧化，叶片丙二醛累积量加大，可溶性糖含量显著增加。同时叶片的内源保护系统也随之启动，抗氧化酶（APX、CAT 和 POD）活性均显著上升，非酶抗氧化剂 AsA 含量显著增加。这些与水生植物<sup>[7]</sup>、拟南芥<sup>[12]</sup>、辣椒<sup>[10]</sup>和小白菜<sup>[11]</sup>对多环芳烃胁迫的生理反应相一致。

## 参考文献：

- [1] WILSON S C, JONES K C. Bioremediation of soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons: A review [J]. Environmental pollution, 1993, 81: 229– 249.
- [2] 陈来国, 冉勇, 麦碧娴, 等. 广州周边菜地中多环芳烃的污染现状 [J]. 环境化学, 2004, 23 (3): 341– 344.
- [3] 葛成军, 安琼, 董元华, 等. 南京某地农业土壤中有机污染分布状况研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15 (3): 361 – 365.
- [4] 孙铁珩, 李培军, 周启星, 等. 土壤污染形成机理与修复技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [5] WILD E, DENT J, THOMAS G O, et al. Direct observation of organic contaminant uptake, storage, and metabolism within plant roots [J]. Environ Sci Technol, 2005, 39: 3695 – 3702.
- [6] 蔡顺香, 何盈, 兰忠明, 等. 小白菜叶内叶绿素和抗氧化酶对芘胁迫的动态响应 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28 (3): 460– 465.
- [7] 刘建武, 林逢凯, 王郁, 等. 多环芳烃(萘)污染对水生植物生理指标的影响 [J]. 华东理工大学学报, 2002, 28 (5): 520– 524.
- [8] 尹颖, 孙媛媛, 郭红岩, 等. 芈对苦草的生物毒性效应 [J]. 应用生态学报, 2007, 18 (7): 1528– 1533.
- [9] 陆志强, 郑文教, 马丽, 等. 不同浓度萘和芘处理对红树植物秋茄胚轴萌发和幼苗生长的影响 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2005, 44 (4), 579– 582.
- [10] 杨志峰, 史衍玺. 芈胁迫对辣椒生理指标的影响 [J]. 山东农业科学, 2006 (4): 20– 23.
- [11] 蔡顺香, 何盈, 王煌平, 等. 芈对小白菜幼苗生长和一些生理生化指标的影响 [J]. 植物生理学通讯, 2008, 44 (4): 643– 646.
- [12] 叶媛蓓. 拟南芥对多环芳烃胁迫的生理响应 [D]. 福州: 福建农林大学, 2007.
- [13] 潘瑞炽. 植物生理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [14] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导 [M]. 第2版. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.

(责任编辑: 刘新永)