

## 两种光照条件下白花泡桐幼苗对 Pb胁迫的生理响应研究

郑巧巧, 刘相宁, 李月灵, 罗兴, 付嵩君, 王江\*

(台州学院 生命科学学院, 浙江 临海 317000)

**摘要:** 分析全光照和50%光照条件下,不同浓度Pb对白花泡桐根生理特性的影响,以研究白花泡桐根对Pb胁迫的生理响应机制。结果显示:超氧阴离子产生速率、过氧化氢和丙二醛含量均随Pb浓度增加而上升,而且50%光照条件下上升趋势要低于全光照条件。全光照条件下,SOD、CAT和APX活性随Pb浓度增加呈现先上升再下降的趋势,而POD活性则呈现持续上升趋势。50%光照条件下,SOD、POD、CAT和APX活性均呈现持续增加的趋势,SOD和POD活性均低于全光照条件。脯氨酸含量均随Pb浓度增加而增加,而且在50%光照条件下含量相对较低。这表明光照强度下降减弱了Pb胁迫对白花泡桐根的氧化损害。

**关键词:** 光; 铅; 白花泡桐; 抗氧化性

**中图分类号:** Q938.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2011)05-0659-05

## Effect of two light irradiances on physiological response of *Paulownia fortunei* seedling roots to Pb stress

ZHENG Qiao-Qiao, LIU Xiang-Ning, LI Yue-Ling,

LUO Xing, FU Song-Jun, WANG Jiang\*

(School of Life Sciences, Taizhou University, Linhai 317000, China)

**Abstract:** The physiological responses of *P. fortunei* seedling roots to Pb stress under natural light and 50% natural light treatments were investigated. Results showed that production rate of superoxide anion, hydrogen peroxide and MDA contents consistently increased with the increase of added Pb. Compared to natural light treatment, their increasing trends were less sharper under 50% natural light treatment. Under natural light treatment, the activities of SOD, CAT and APX increased firstly and then decreased with the increase of added Pb, while the activities of POD consistently increased. At 50% natural light treatment, all the antioxidant enzyme activities consistently increased with the increase of added Pb. The activities of SOD and POD under 50% natural light treatment were higher than those under natural light treatment. Results suggested that the decrease of light irradiance relieved the oxidative damage of Pb stress to the roots of *P. fortunei*.

**Key words:** light; Pb; *Paulownia fortunei*; antioxidant

白花泡桐(*Paulownia fortunei*)是中国的乡土物种,具有生长快速、适应性强、用途广泛等优点(Capenter, 1997)。目前已被移植到北美、澳大利

亚、欧洲和日本等地(Kumar, 1999)。在广东韶关铅锌冶炼厂附近,白花泡桐已被成功用来恢复3000亩重金属污染地,而且其体内Pb浓度大于1000 mg

收稿日期: 2010-09-01 修回日期: 2011-04-01

基金项目: 浙江省自然科学基金(Y5100016);台州学院大学生科研项目(10XS20)[Supported by the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China(5100016); the Student Science Foundation of Taizhou University(10XS20)]

作者简介: 郑巧巧(1989-),女,浙江平阳人,生物科学专业,(E-mail)zhengxiaqiao@tzc.edu.cn.

\* 通讯作者(Author for correspondence, E-mail; wangjiang@tzc.edu.cn)

· kg<sup>-1</sup>,超过了 Pb 超富集植物的标准(Wang 等, 2009)。但在修复过程中,白花泡桐出现与其它修复物种相似的问题,随着修复群落的演替,群落内部光环境发生了变化,对白花泡桐的生长和耐性产生了影响。全世界目前有超过 400 种陆地植物被确认为各类重金属的超富集植物(Zhou 等, 2006; 闫研等, 2008),这些植物都对相应的重金属表现出较高的耐性,但这些耐性试验均在某一特定的光照下进行。对于光环境变化条件下,这些植物的生理、生化和分子等耐性机制是如何变化的,国内外鲜有报道。

植物对抗重金属氧化胁迫的机制主要包括抗氧化酶系统和非酶抗氧化物质。常见的抗氧化酶主要有 SOD、CAT、APX 和 POD(刘云国等, 2005; 石贵玉等, 2009)。SOD 可以在 O<sub>2</sub><sup>-</sup>和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 反应生成 OH· 之前有效地去除 O<sub>2</sub><sup>-</sup>; CAT 和 APX 主要去除 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; POD 则可以 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 为底物生成细胞壁的合成物质(区炳庆等, 2003)。非酶抗氧化物质主要包括脯氨酸、有机酸、谷胱甘肽(GSH)和植物络合素(PCs),这些物质可以在重金属进入细胞之前对其进行解毒。光照被证明可以影响光合系统的光合效率,进而会影响到植物对重金属的抗氧化反应(Catriona 等, 2002, Shi 等, 2006)。但是,光照变化对植物体内抗氧化酶系统和非酶抗氧化物质的影响机制目前鲜有研究。本研究采用盆栽试验对白花泡桐幼苗同时进行不同浓度 Pb 和不同强度光照处理,分别测定白花泡桐苗根中抗氧化酶系统和非酶抗氧化物质的变化,以此研究光照变化对白花泡桐苗根抗氧化反应的影响。本研究可在不同光照条件下,对白花泡桐苗根的 Pb 耐性进行全面的评估,同时可为白花泡桐修复群落的光调控提供理论指导。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

供试土壤为浙江省临海市花鸟市场人工配置花土,土壤基本理化特性为:有机质含量(0.16±0.03) mg·g<sup>-1</sup>;全磷含量(0.209±0.02) g·kg<sup>-1</sup>;全氮含量(0.73±0.16) g·kg<sup>-1</sup>;铵态氮含量(6.84±1.17) mg·kg<sup>-1</sup>;有效磷含量(103.74±9.18) mg·kg<sup>-1</sup>。供试白花泡桐的种子采自深圳仙湖植物园。

### 1.2 实验设计

试验采用盆栽方法,设置了全光照(对照)和 50%全光照两个光照强度处理(利用遮荫网进行调

节,在 Wang 等(2009)广东韶关修复样地,群落演替后地面幼苗受到遮光大概在 50%左右,选择 100%作为对照,来研究遮光条件对幼苗产生的影响),设置 0(对照组)、200、400、800 和 1 600 mg·kg<sup>-1</sup>(以纯 Pb 计)Pb 处理浓度(按照计算量以 PbCl<sub>2</sub> 溶液形式与 2 mm 筛过的土壤反复混合均匀,室温下稳定两周,每盆装 1.5 kg 混合土),每个处理 5 个重复。白花泡桐种子用 2%的 NaClO 溶液消毒,用去离子水冲洗,放入装有石英砂的塑料盆中(20 cm×20 cm×10 cm)培养,待幼苗长出 1 片真叶后,选择均匀一致的幼苗,移栽至装有混合土的盆钵中,每盆 4 株。白花泡桐移栽 7 d 后进行遮光和重金属处理,每 3 d 每盆每次浇 200 mL 水,缓慢滴灌以防重金属流失。生长 60 d 后进行生理指标测定,整株收获称鲜重。

### 1.3 测定方法

超氧阴离子含量测定参照李光忠等(2005)的方法;过氧化氢含量测定参照刘俊等(2000)的方法;采用硫代巴比妥酸比色法测定 MDA 含量(赵世杰等, 1994);采用茚三酮显色法测定脯氨酸含量(张志良等, 2002)。酶液的制备:取样品 1.0 g 根加入 10 mL 酶提取液[以 1 L pH7.8 的 PBS 配制,含有 29.2 mg 的 EDTA-Na<sub>2</sub>、3 g 的 Triton X-100 和质量浓度为 4%聚乙烯吡咯烷酮(PVPP)40 g],在冷藏过的研钵中研磨后以漏斗过滤,经 4℃, 10 500 rpm/min 离心 20 min,上清液为粗酶液。采用愈创木酚法测定 POD 活性(张志良等, 2002);氮蓝四唑法测定 SOD 活性(张志良等, 2002);紫外吸收法测定 CAT 活性(何冰等, 2003);APX 活性的测定参照张志良等(2002)的方法。

### 1.4 数据处理

以光照处理为主因素(主区),主因素下设立不同 Pb 处理浓度为第二级因素(次区),进行两因素的裂区试验设计,采用 SPSS 11.5 软件进行双因素方差分析(主要分析两个因素的主效应),并用 Duncan 检验进行多重比较。同一 Pb 处理梯度下,不同光照处理间采用 *t* 检验进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 白花泡桐根超氧阴离子和过氧化氢的变化特征

由图 1 可知,全光照条件下超氧阴离子产生速率和过氧化氢含量随 Pb 处理浓度增加显著升高( $P < 0.05$ )。1 600 mg·kg<sup>-1</sup>Pb 浓度处理下超氧阴离

子的产生速率是对照的 2.07 倍;过氧化氢含量是对照的 5.56 倍。50%光照条件下超氧阴离子产生速率和过氧化氢含量同样呈现持续增加的趋势,但增加较缓慢,1 600 mg · kg<sup>-1</sup>Pb 浓度处理下分别是对照的 1.69 和 3.80 倍。50%光条件下超氧阴离子产生速率和过氧化氢含量均显著低于全光照条件。

## 2.2 白花泡桐根丙二醛(MDA)的变化特征

由图 2 可知,全光照和 50%光照条件下,MDA 含量均随 Pb 处理浓度的增加而增加,而且在各 Pb

处理浓度间均呈现显著差异( $P < 0.05$ )。1 600 mg · kg<sup>-1</sup>Pb 浓度处理下 MDA 的含量分别是对照的 9.69 和 7.06 倍。50%全光照条件下,除 800 mg · kg<sup>-1</sup>Pb 处理,其它处理梯度 MDA 含量均显著低于全光照条件。

## 2.3 白花泡桐根抗氧化酶的变化特征

由图 3 可知,全光照条件下 SOD 活性随 Pb 处理浓度增加呈现先升高后降低的趋势( $P < 0.05$ ),在 800 mg · kg<sup>-1</sup>Pb 处理时活性达最大值,为对照的

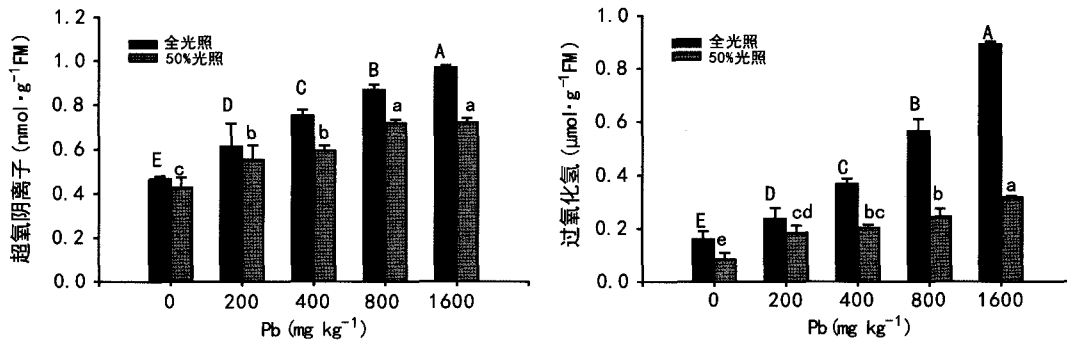


图 1 不同光照和 Pb 处理下白花泡桐根超氧阴离子和过氧化氢的变化  
Fig. 1 Effect of different light irradiances and Pb treatments on superoxide anion and hydrogen peroxide in seedling roots of *P. fortunei*

不同大小写字母表示 LSD 多重比较时差异具有显著性,  $\alpha = 0.05$ ; 相同字母表示不具显著差异性。下同。  
Different letters indicate significant difference at the level of 0.05; same letters indicate no difference. The same below.

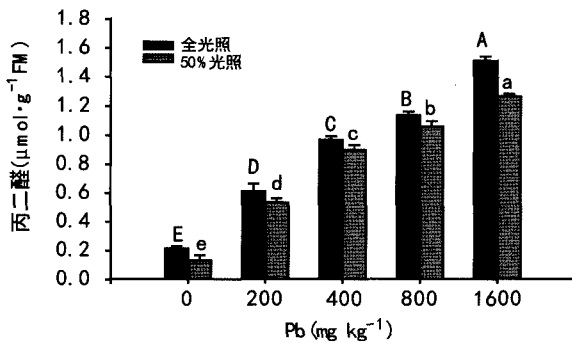


图 2 不同光照和 Pb 处理下白花泡桐根 MDA 含量的变化  
Fig. 2 Effect of different light irradiances and Pb treatments on MDA content in seedling roots of *P. fortunei*

2.72 倍;50%光照条件下 SOD 活性呈现持续上升趋势,1 600 mg · kg<sup>-1</sup>Pb 处理时达到对照的 3.39 倍。除 1 600 mg · kg<sup>-1</sup>Pb 处理,其它 Pb 处理梯度下,50%光照条件下 SOD 的活性均显著低于全光照条件。全光照条件下 POD 活性随 Pb 处理浓度增加呈现持续升高趋势( $P < 0.05$ ),1 600 mg · kg<sup>-1</sup>Pb

处理时达到对照的 5.89 倍;50%光照条件下 POD 活性增加趋势较缓,1 600 mg · kg<sup>-1</sup>Pb 处理时达到对照的 2.33 倍。除对照处理外,50%光照条件下 POD 的活性均显著低于全光照条件。全光照条件下 CAT 和 APX 活性均随 Pb 处理浓度增加呈现先升高后降低的趋势( $P < 0.05$ ),在 800 mg · kg<sup>-1</sup>Pb 处理时活性达到最大值,分别达到对照的 3.06 和 1.75 倍;50%光照条件下,CAT 和 APX 活性则随 Pb 处理浓度增加呈现持续升高的趋势( $P < 0.05$ ),1 600 mg · kg<sup>-1</sup>Pb 处理时分别达到对照的 5.32 和 2.12 倍。CAT 和 APX 活性在不同光照强度处理间呈现不规则变化。

## 2.4 白花泡桐根脯氨酸(Pro)含量的变化特征

由图 4 可知,全光照条件下脯氨酸含量随 Pb 处理浓度增加呈现增加趋势( $P < 0.05$ ),1 600 mg · kg<sup>-1</sup>Pb 处理时是对照的 6.29 倍;50%光照条件下脯氨酸含量增加较缓,1 600 mg · kg<sup>-1</sup>Pb 处理时是对照的 4.16 倍。50%全光照条件下脯氨酸含量均显著低于全光照条件。

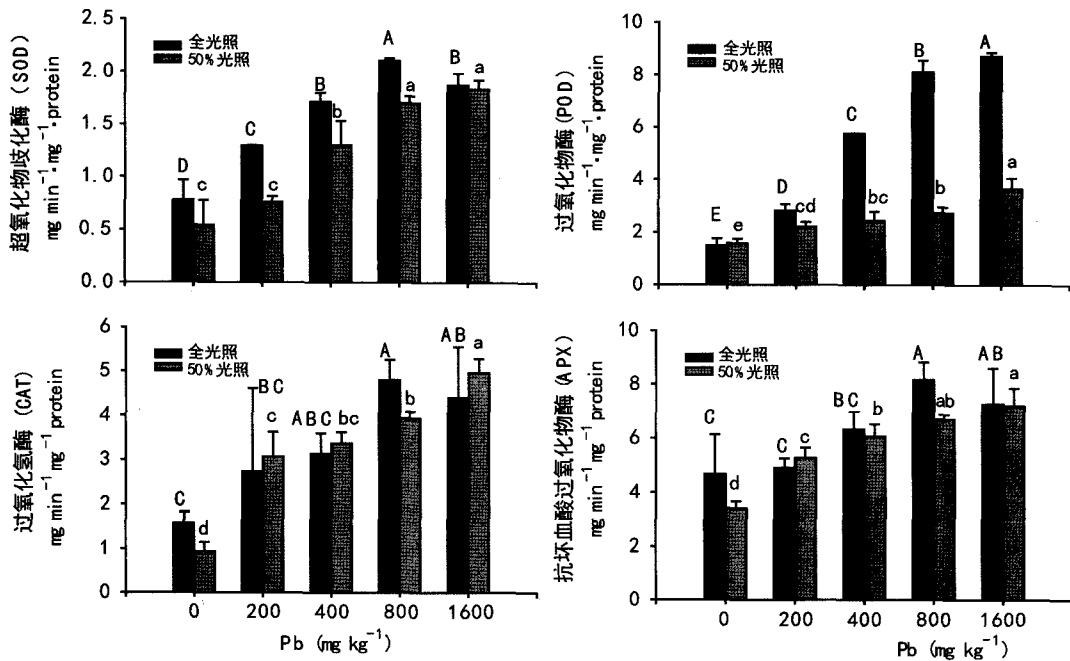


图3 不同光照和Pb处理下白花泡桐根抗氧化酶活性的变化  
Fig. 3 Effect of different light irradiancies and Pb treatments on the activities of antioxidant enzymes in seedling roots of *P. fortunei*

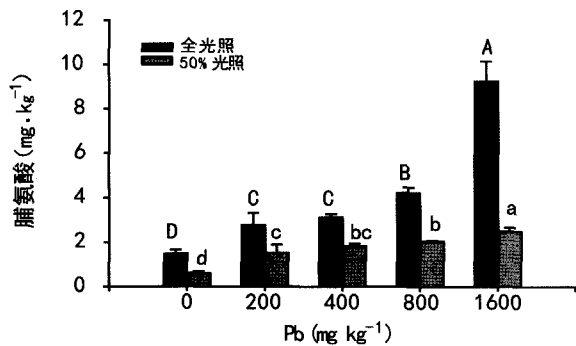


图4 不同光照和Pb处理下白花泡桐根脯氨酸含量  
Fig. 4 Effect of different light irradiancies and Pb treatments on proline content in seedling roots of *P. fortunei*

### 3 讨论

相比全光照条件,50%光照条件下白花泡桐根活性氧水平较低,表明受到Pb胁迫引起的氧化损害较小。目前认为活性氧水平升高会加剧细胞膜脂的过氧化程度,进而导致膜损伤。丙二醛(MDA)是细胞膜脂过氧化的产物之一,可用于表示细胞内的活性氧水平和膜脂过氧化的程度(梁强等,2009)。MDA的试验结果也表明50%全光照条件下,白花泡桐根受到Pb胁迫引起的氧化损害较小。

氧化酶和非酶抗氧化物质可以有效地除植物体内的活性氧(Noreen等,2009)。50%光照条件下,SOD、CAT和APX活性随着Pb浓度增加呈现持续上升的趋势,活性并未受抑制。而全光照条件下,SOD、CAT和APX活性在1600 mg·kg<sup>-1</sup>时受到抑制,表明活性氧含量超过白花泡桐苗的正常歧化能力,细胞内的多种功能受到破坏,生理代谢紊乱,酶活性受到抑制(刘爱中等,2008)。但POD在全光照和50%光照条件下均呈现持续上升的趋势,表明POD对Pb氧化胁迫有较高的耐性。相比全光照条件,50%光照条件下SOD和POD的活性相对较低,这与活性氧水平较低有关。但CAT和APX的活性接近甚至超过了全光照条件下的水平。CAT是一种含Fe的血红蛋白酶类,APX是一种包含原卟啉区的血红蛋白,两种酶主要在植物叶绿体和胞质中清除H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,光照降低对叶绿体的影响可能对其产生了倍增的应激反应(Asada,1992)。

脯氨酸(Pro)是水合能力较强的氨基酸,作为重要渗透调节物质,它的积累对逆境适应有重要意义(Kavi Kishor等,1995)。任安芝等(2000)认为脯氨酸的增加可能是植物对重金属的一种适应性反应,它减小了植物细胞膜脂过氧化程度,缓和膜透性的变化,从而对植物起到一定防护作用。白花泡桐根

脯氨酸含量的持续上升进一步证明了其是重要的非酶抗氧化保护物质。50%光照条件下,其增长趋势缓慢可能与白花泡桐根膜质过氧化损伤较弱有关。

白花泡桐苗根生物量在各梯度间并未现明显差异(数据未呈现),但全光照条件下,1 600 mg·kg<sup>-1</sup> Pb 处理时苗根颜色基本全部变黑。而 50%光照条件下,1 600 mg·kg<sup>-1</sup> Pb 处理时苗根变黑较少。表明 50%光照条件下白泡桐根受到的氧化损伤较小。在 800 mg·kg<sup>-1</sup> Pb 处理时,全光照和 50%光照条件下苗根均呈现正常颜色,表明白花泡桐根对 Pb 的耐受阈值可能在 800 mg·kg<sup>-1</sup>。

总的来说,光照强度变化对白花泡桐根的 Pb 耐性有着明显影响。光照强度降低,减少了白花泡桐叶片光能量吸收,从而减少了过剩能量转化为活性氧,进而降低根的活性氧水平,从而降低了 Pb 对根的氧化损伤。光作为生态系统中一个不稳定的生态因子,在植物群落演替过程中会产生明显的变化。因此随着修复植物群落的演替,耐性植物必将经历周围光环境的变化。本研究结果表明适当遮荫可使白花泡桐苗根的 Pb 耐性有所提高。但不同区域的光强水平存在差异,光强的变化可能会导致白花泡桐的 Pb 耐性机制产生不同的变化。此外,白花泡桐属于喜阳植物,喜阴耐性植物对光照的变化可能会有截然不同耐性机制反应。因此,试验结果建议光环境变化将对植物的重金属耐性产生影响,对于修复植物群落的光调控应在未来的植物修复工程中给予重视,而且对于不同地点和不同物种要进行有区别的科学的调控。

## 参考文献:

- 张志良,瞿伟青. 2002. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社:71-78
- Asada K. 1992. Ascorbate peroxidase: A hydrogen peroxide-scavenging enzyme in plants[J]. *Plant Physiol Planta*, **85**: 235-241
- Carpenter SB. 1997. This "princess" heals disturbed land[J]. *Am Forests*, **83**: 22-23
- Catriona MO, Macinnis N, Peter JR. 2002. Towards a more ecologically relevant assessment of the impact of heavy metals on the photosynthesis of the seagrass *Zostera capricorni*[J]. *Mar Pollut Bull*, **45**: 100-106
- He B(何冰), Ye HB(叶海波), Yang XE(杨肖娥). 2003. Effects of Pb on chlorophyll contents and antioxidant enzyme activity in leaf for Pb-accumulating and non-accumulating ecotypes of *Sedum alfredii* (Hance)(铅胁迫下不同生态型东南景天叶片抗氧化酶活性及叶绿素含量比较)[J]. *J Agro-Environ Sci*(农业环境科学学报), **22**(3): 274-278
- Kavi Kishor PB, Hong ZL, Miao GH. 1995. Overdispersion of pyroline carboxylate synthetase in transgenic plants[J]. *Plant Soil*, **108**: 1 387-1 394
- Kumar PP, Rao CD, Rajaseger G, et al. 1999. Seed surface architecture and random amplified polymorphic DNA profiles of *Paulownia fortunei*, *P. tomentosa* and their hybrid[J]. *Ann Bot*, **83**: 103-107
- Li GZ(李忠光), Gong M(龚明). 2005. Improvement of measurement method for superoxide anion radical in plant(植物中超氧阴离子自由基测定方法的改进)[J]. *Acta Bot Yunnan*(云南植物研究), **27**(2): 211-216
- Liang Q(梁强), Ye YP(叶燕萍), Gui J(桂杰). 2009. Effects of fulvic acid on chlorophyll fluorescence parameters and MDA of sugarcane seedling under water stress(喷施黄腐酸对干旱胁迫下甘蔗苗期叶绿素荧光参数及丙二醛的影响)[J]. *Guihaia*(广西植物), **29**(4): 527-532
- Liu AZ(刘爱中), Zou DS(邹冬生). 2008. Effects of Cd, Pb compound pollution on physiological and biochemical characteristics of *Eulaliopsis binata*(Cd, Pb 复合污染对龙须草生理化的影响)[J]. *J Hunan Inst Human Sci Tech*(湖南人文科技学院学报), **4**: 11-13
- Liu J(刘俊), Lv B(吕波), Xu LL(徐朗莱). 2000. An improved method for the determination of hydrogen peroxide in leaves(植物叶片中过氧化氢含量测定方法的改进)[J]. *Prog in Biochem Biophys*(生物化学与生物物理进展), **27**(5): 548-551
- Liu YG(刘云国), Tang CF(汤春芳), Zeng GM(曾光明). 2005. Cadmium-induced superoxide anion generation, lipid peroxidation and changes of antioxidant enzyme activities in radish seedlings(镉诱导萝卜幼苗活性氧产生、脂质过氧化和抗氧化酶活性的变化)[J]. *Guihaia*(广西植物), **25**(2): 164-168
- Noreen Z, Ashraf M. 2009. Assessment of variation in antioxidative defense system in salt-treated pea (*Pisum sativum*) cultivars and its putative use as salinity tolerance markers[J]. *J Plant Physiol*, **116**: 1 764-1 774
- Ou BQ(区炳庆), He LL(何丽烂). 2003. Reaction of activity of peroxidase, polyphenol oxidase and superoxide dismutase in tissue seedlings of banana to the stress of Ag(香蕉组培苗 POD、PPO 及 SOD 活性对银胁迫的反应)[J]. *Guihaia*(广西植物), **23**(1): 93-95
- Ren AZ(任安芝), Gao YB(高玉葆), Liu S(刘爽). 2000. Effects of Cr, Cd and Pb on free proline content in leaf of *Brassica chinensis*(铬、镉、铅胁迫对青菜叶片几种生理生化指标的影响)[J]. *Chin J Appl Environ Bio*(应用与环境生物学报), **6**(2): 112-116
- Shi GY(石贵玉), Kang H(康浩), Duan WF(段文芳). 2009. Effect of cadmium on physiological characteristics of mangrove *Avicennia marina* and *Aegiceras corniculatum* seedlings(重金属镉对红树植物白骨壤和桐花树幼苗生理特性的影响)[J]. *Guihaia*(广西植物), **29**(5): 644-647
- Shi QH, Zhu ZJ, Xu M, et al. 2006. Effect of excess manganese on the antioxidant system in *Cucumis sativus* under two light intensities[J]. *Environ Exp Bot*, **58**: 197-205
- Wang J, Zhang CB, Jin ZX. 2009. The distribution and phytoavailability of heavy metal fractions in rhizosphere soils of *Paulownia* (下转第 626 页 Continue on page 626)

- Qiao YJ(乔勇进), Xu JW(许景伟), Zhang DL(张敦论). 2003. Properties of *Vitex trifolia* Linn. var. *simplicifolia* Cham(单叶蔓荆人工扩繁技术及生理特性的研究)[J]. *Chin Wild Plant Res*(中国野生植物资源), **22**(2): 49-52
- Qiao YJ(乔勇进), Zhang DL(张敦论), Xi JB(郗金标). 2001. Study on biological and physiological characteristics of *Vitex trifolia* var. *simplicifolia* Cham(单叶蔓荆生物生理特性的研究)[J]. *Prot For Sci Tech*(防护林科技), **47**: 6-9
- Ren AC(任安才), Ren GY(任国业), Deng LJ(邓良基), et al. 2008. Temporal and spatial distribution of Litang rangeland's desertification on North-western plateau of Sichuan using TM image(基于TM影像的川西北理塘草地沙化的时空特征)[J]. *Southwest China J Agric Sci*(西南农业学报), **21**(2): 425-428
- Wang CL(王春玲), Guo QS(郭泉水), Tan DY(谭德远), et al. 2005. Haloxylon ammodendron community patterns in different habitats along southeastern edge of Zhunger Basin(准噶尔盆地东南缘不同生境条件下梭梭群落结构特征研究)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **16**(7): 1 224-1 229
- Wang YJ(王永健), Tao JP(陶建平), Peng Y(彭月). 2006. Advances in species diversity of terrestrial plant communities(陆地植物群落物种多样性研究进展)[J]. *Guihaia*(广西植物), **26**(4): 406-411
- Wu YN(乌云娜), Pei H(裴浩), Ran CQ(冉春秋), et al. 2008. Change of the community structure and soil physical and chemical property during vegetation restoration succession in Kerqin sandland(科尔沁沙地植被恢复演替过程中群落结构及土壤理化性状的变化)[J]. *J Anhui Agric Sci*(安徽农业科学), **36**(15): 6 471-6 475
- Yang J(杨洁), Zuo CQ(左长清). 2004. Adaptability and wind break function of *Vitex trifolia* L. in lake Poyang wind-sandy area(蔓荆在鄱阳湖风沙区的适应性及防风作用研究)[J]. *Res Soil Water Conserv*(水土保持研究), **11**(1): 47-49
- Yang X, Zhang K, Jia B et al. 2005. Desertification assessment in China: An overview[J]. *J Arid Environ*, **63**: 517-531
- Yu JT(于吉涛), Hu SH(胡胜华), Jing QQ(荆青青), et al. 2006. Research on species diversity on Duobao sandy hill in Duchang County and elementary discussion on its protection(都昌县多宝砂山物种多样性研究及保护初探. 环境科学研究)[J]. *Res Environ Sci*(环境科学研究), **19**(2): 39-43
- Zhao JJ(赵娟娟), Ouyang ZY(欧阳志云), Zheng H(郑华), et al. 2009. Proposed procedure in designing and planning stratified random selection investigation of urban vegetation(城市植物分层随机抽样调查方案设计的方法探讨)[J]. *Chin J Ecol*(生态学杂志), **28**(7): 1 430-1 436
- Zhao XM(赵小敏), Fu JC(傅建春). 2003. Study on sandy land investigation by remote sensing and its control in Poyang Lake region(鄱阳湖地区沙地遥感调查及治理研究)[J]. *Res Soil Water Conserv*(水土保持研究), **10**(4): 94-95
- Zuo CQ(左长清), Yang J(杨洁), Li XX(李相玺). 2003. Sand fixation benefits of *Vitex trifolia* in bank land of Poyang Lake in Jiangxi(江西省鄱阳湖湖滨沙地蔓荆的固沙效益)[J]. *Sci Soil Water Conserv*(中国水土保持科学), **1**(2): 38-41

(上接第 663 页 Continue from page 663)

- fortunei*(seem) Hems near a Pb/Zn smelter in Guangdong, PR China[J]. *Geoderma*, **148**: 299-306
- Wang ZQ(王正秋), Jiang XY(江行玉), Wang CH(王长海). 2002. Effects of Pb, Cd, and Zn on oxidative stress and antioxidative ability in *Phragmites australis*(铅、镉和锌污染对芦苇幼苗氧化胁迫和抗氧化能力的影响)[J]. *Chin J Process Engineering*(工程学报), **2**(6): 558-563
- Yan Y(闫研), Li JP(李建平), Zhao ZG(赵志国), et al. 2008. Advances in the mechanisms of heavy metal tolerance and accumulation in hyperaccumulators(超富集植物对重金属耐受和富集机制的研究进展)[J]. *Guihaia*(广西植物), **28**(4): 505-510
- Zhao SJ(赵世杰), Xu CC(许长城), Zou Q(邹琦). 1994. The improvement of the determined method of MDA(植物组织中丙二醛测定方法的改进)[J]. *Plant Physiol Commun*(植物生理学通讯), **30**(3): 207-210