

土壤镉污染对四种阔叶树苗木叶绿素荧光特性和生长的影响*

曹玲 王庆成** 崔东海

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

【摘要】 采用盆栽方法研究了土壤镉污染对白牛槭、刺玫果、金银忍冬和东北山梅花叶绿素荧光参数和生物量的影响。设置0、50、100和200 mg kg⁻¹风干土4种镉浓度处理,测定苗木在不同镉浓度土壤中生长70 d后叶叶绿素荧光参数。结果表明,随着镉处理浓度提高,4种树种的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 qP 均逐渐降低, qN 则逐渐上升。4种苗木在一个生长季中生物量积累随着镉浓度增大逐渐降低。树种间荧光参数和生物量变化幅度不同,白牛槭变化幅最大。刺玫果最小;以叶绿素荧光参数和生物量评价4树种抗镉污染能力,刺玫果最强、白牛槭最弱。

关键词 镉 叶绿素荧光 生物量 刺玫果 东北山梅花 白牛槭 金银忍冬
文章编号 1001-9332(2006)05-0769-04 中图分类号 X171 文献标识码 A

Impact of soil cadmium contamination on chlorophyll fluorescence characters and biomass accumulation of four broad-leaved tree species seedlings. CAO Ling, WANG Qingcheng, CUI Donghai (College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(5): 769 ~ 772.

In a greenhouse pot experiment, a gradient of soil Cd concentration was established by adding 0, 50, 100 and 200 mg CdCl₂ · kg⁻¹ air-dried soil, and the seedlings of one-year-old *Rosa davurica*, *Philadelphus schrenkii*, *Acer mandshurica* and *Lonicera maackii* were transplanted. The measurement of the seedlings' chlorophyll fluorescence parameters and biomass accumulation after 70 days of transplanting showed that with increasing soil Cd content, all the test tree species had a decrease of F_v/F_m , Φ_{PSII} , qP and biomass, but an increase of qN . *A. mandshurica* had the greatest responses, followed by *P. schrenkii* and *L. maackii*, and *R. davurica*. The tolerance of these tree species to soil Cd contamination followed the order of *R. davurica* > *P. schrenkii* and *L. maackii* > *A. mandshurica*.

Key words Cadmium, Chlorophyll fluorescence, Biomass, *Rosa davurica*, *Philadelphus schrenkii*, *Acer mandshurica*, *Lonicera maackii*.

1 引言

重金属对环境的污染在世界范围内广受关注。大量研究证明,城市土壤中重金属元素已有不同程度累积,并产生了一系列的环境问题^[3, 8, 12, 15],如城市园林绿化植物重金属中毒、水源污染等^[9, 11, 28]。由于镉在土壤中的迁移性和对植物的严重危害,被视为最具危害性的重金属污染元素之一^[2]。绿色植物是城市生态系统的主要成分之一,在减少城市污染、绿化、美化城市、维持城市生态平衡中发挥着重要作用^[27]。北方城市绿化植物缺乏,难以充分满足城市绿化的多种需求。选择适于城市环境、具有较高美学价值和环境效益的树种对于美化 and 改善城市环境具有重要意义。而引进新的绿化植物时必须充分考虑其对城市中污染胁迫的抗性。白牛槭(*Acer mandshurica*)、刺玫果(*Rosa davurica*)、金银忍冬(*Lonicera maackii*)和东北山梅花(*Philadelphus schrenkii*)是东北东部山地乡土树种,具有较高美学

价值和绿化价值^[22]。本文通过测定土壤镉污染胁迫下4种树种叶绿素荧光参数和生物量的变化,对其抗性进行评价,为其在东北地区城市绿化的应用提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 供试材料

本实验在黑龙江省哈尔滨市自然资源研究所苗圃内进行。栽培苗木为白牛槭、刺玫果、金银忍冬和东北山梅花4种树种生长相对均匀的1年生实生苗。栽培基质为风干黑土和河沙(3:1)的混合物。一次性将Cd(Cl)₂·2.5H₂O以溶液形式喷施到基质中,制成镉浓度分别为0、50、100和200 mg kg⁻¹4个处理,再次风干后,取10 kg装入上口径30 cm、下口径23 cm、高25 cm的塑料桶,每桶植苗3株,每个树种每处理栽植8桶。为突出植物对土壤镉处理反应,设计土壤

* 黑龙江省科技计划项目(GC01KB213)、国家自然科学基金项目(30371149)和东北林业大学校立科研基金资助项目。

** 通讯联系人。E-mail: wqcnefu@yahoo.com

2005-04-18收稿,2006-01-16接受。

镉处理浓度比实际城市土壤污染浓度高出十几倍至几十倍^[4,22,24]. 苗木定植后在温室内(透光率 60%, 温度 20~31 °C, 相对湿度 75%) 进行培养. 苗木生长 70 d(5月10日~7月20日) 后, 随机选取 3 株用于测定叶绿素荧光参数. 整个生长季结束后收获全部苗木用于植株生物量测定.

2.2 测定方法

2.2.1 叶绿素荧光参数 采用便携式脉冲调制荧光仪 FMS-2 (英国 Hansatech 公司生产) 测定植物连体叶片叶绿素 a 的荧光. 叶片暗适应 30 min 后, 用弱测量光测定初始荧光 (F_0), 随后给予饱和脉冲光 ($5\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 0.7 s), 得到黑暗中最大荧光 (F_m). 当荧光产量从 F_m 降到 F_0 时, 打开作用光 ($400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 3 min 后叶片光合作用达到稳态, 得到稳定荧光 F_v . 这时再进行饱和脉冲光处理, 一个脉冲后关闭, 得到光下最大荧光 (F_m'). 关闭作用光, 立即打开远红光, 5 s 后关闭, 得到光下最小荧光 (F_0')^[1,20]. 计算 PSII 光化学效率 (F_v/F_m')、光合电子传递量子速率 (ΦPSII)、光化学猝灭系数 (qP)、非光化学猝灭系数 (qN) 等参数^[20,21]. 每处理重复测定 4 次.

2.2.2 苗木生物量 苗木栽植前, 随机选择 10~15 株苗木, 收获后分别放入纸袋, 80 °C 恒温烘干至恒重, 称重, 计算苗木初始平均生物量; 实验结束后, 收获全部植株, 水洗除去根部土壤后, 80 °C 恒温烘干至恒重, 计算苗木平均生物量. 单株生物量为处理后生物量减去处理前生物量^[16,26].

2.3 数据处理

采用 Excel 2000 和 SPSS 11.5 进行数据处理.

3 结果与分析

3.1 镉对 4 种阔叶树种苗木叶绿素荧光参数的影响

3.1.1 光化学效率 (F_v/F_m') 由图 1 可见, 4 种树种苗木叶片 F_v/F_m' 随着镉处理浓度增加均呈下降趋势. 与对照处理相比, 4 种树种 F_v/F_m' 均在 0.80~0.85 之间. 经 Cd 50 处理, 白牛槭和金银忍冬的下降幅度较刺玫果和东北山梅花大. 随着镉处理浓度增加, 4 种树种 F_v/F_m' 值均比对照显著下降 ($P < 0.05$); Cd 200 处理中, 白牛槭、金银忍冬、东北山梅花和刺玫果分别下降 29.03%、22.06%、8.57% 和 8.07%.

3.1.2 光合电子传递量子效率 (ΦPSII) 由图 1 可以看出, 随着处理浓度的增加, 4 种树种的 ΦPSII 值均呈下降趋势. 4 种树种间 ΦPSII 的下降幅度明显不同, 刺玫果和东北山梅花的变化趋势最为接近, 而白牛槭和金银忍冬则相对接近. 其中, 白牛槭的下降幅度最大, 随镉浓度增加, 降幅分别为 9.88%、15.05% 和 35.11%; 刺玫果的下降幅度最小, 分别下降 1.95%、5.56% 和 10.23%. 金银忍冬和东北

山梅花的变化幅度介于二者之间.

3.1.3 荧光猝灭系数 (qP 和 qN) 随着处理浓度的增加, 4 个树种 qP 值均呈下降趋势 (图 1). 其中, 白牛槭的下降幅度最大, 分别下降 7.80%、14.60% 和 32.05%, 刺玫果的下降幅度最小, 分别下降 1.88%、4.76% 和 6.53%. 在 Cd 50~100 处理中, 金银忍冬、东北山梅花和白牛槭的变化趋势相近, 下降幅度均明显高于刺玫果; Cd 200 处理后, 4 种树种 qP 值有明显差异, 下降幅度依次为白牛槭 > 金银忍冬 > 东北山梅花 > 刺玫果. 与 F_v/F_m' 和 qP 的变化趋势相反, 随着镉处理浓度的增加, 4 种树种 qN 均呈上升趋势 (图 1). 其中, 白牛槭的变化幅度明显高于其它 3 个树种, 金银忍冬次之, 而刺玫果的上升幅度最小.

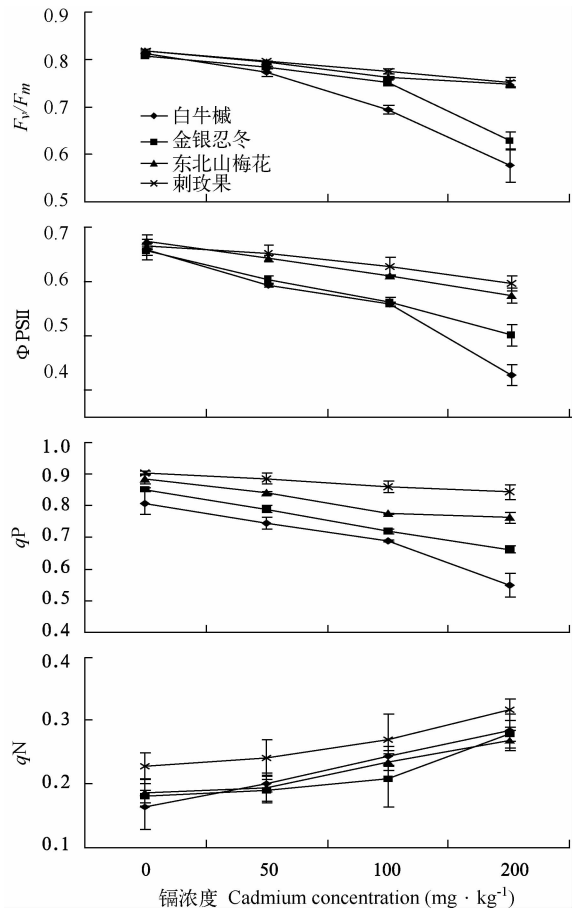


图 1 不同镉处理下 4 种苗木叶绿素荧光参数的差异
 Fig. 1 Difference in chlorophyll fluorescence parameters of leaves of four seedlings treated with different cadmium concentrations. 白牛槭 *A. mandshurica*; 金银忍冬 *L. maackii*; 东北山梅花 *P. schrenkii*; 刺玫果 *R. davurica*.

3.2 镉污染对 4 种阔叶树种生物量的影响

土壤镉污染对各树种苗木生长的影响表现在生物量累积的大小上. 不同树种单株生物量的累积量对不同浓度的镉污染反应不同 (表 1). 东北山梅花

表 1 镉污染对 4 种苗木单株生物量的影响*

Table 1 Effects of cadmium contamination on biomass in seedlings of four tree species

镉浓度 Cd concentration (mg kg ⁻¹)	白牛槭 <i>A. mandshurica</i>		金银忍冬 <i>L. maackii</i>		东北山梅花 <i>P. schrenkii</i>		刺玫果 <i>R. davurica</i>	
	生物量 ¹⁾	处理/对照 ²⁾	生物量	处理/对照	生物量	处理/对照	生物量	处理/对照
0	4. 61(0. 51) a	100. 00	5. 02(0. 53) a	100. 00	5. 69(0. 52) a	100. 00	11. 51(1. 25) a	100. 00
50	2. 05(0. 22) b	44. 47	3. 25(0. 53) b	64. 74	5. 91(0. 83) a	103. 87	12. 04(0. 74) a	104. 60
100	1. 08(0. 10) c	23. 43	2. 91(0. 31) b	57. 97	4. 70(0. 38) a	82. 60	9. 61(1. 33) a	83. 49
200	0. 97(0. 10) c	21. 04	2. 15(0. 33) b	42. 83	3. 10(0. 18) b	54. 48	6. 56(0. 34) b	56. 99

* 生物量为收获后植株生物量减去处理前植株生物量 Biomass represented the difference of dry weight per plant before and after treatment; 括号内为标准误差 Standard error was in bracket. 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0. 05$) Different letters in the same row indicated significant difference at 0. 05 level. 1) 生物量 Biomass (g); 2) 处理/对照 Ratio of treatment to control (%).

和刺玫果在 Cd 50 处理时略高于对照, 达到最高值, 而后迅速下降, Cd 200 处理时分别为对照的 54. 48% 和 56. 99%. 白牛槭和金银忍冬各处理生物量均显著低于对照, Cd 200 处理时分别为对照的 21. 04% 和 42. 83%. 刺玫果和东北山梅花下降幅度小于白牛槭和金银忍冬, 即前两个树种生物量累积对镉胁迫反应相对较弱.

4 讨 论

研究表明, 随着镉处理浓度 ($> 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的增加, 4 种树种 F_v/F_m 值均比对照显著下降, 说明土壤镉污染条件下 4 种树种苗木叶片 PSII 原初光化学效率和从天线色素到 PSII 反应中心传能效率均明显受到镉污染影响. 这与彭长连等^[14]和 Vassilev 等^[21]的研究结果相似. 本实验中 F_v/F_m 值在某些处理下 ($> 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的变化幅度较大, 可能与污染物和受试植物种类不同有关.

叶片 ΦPSII 反映了 PSII 反应中心在环式光合中部分关闭情况下的实际原初光能捕获效率, 可以反映实际 PSII 反应中心进行光化学反应的效率^[29]. 在本实验中, 随着处理浓度的增加, 除刺玫果外, 其他 3 个树种的 ΦPSII 值均显著降低, 说明土壤镉污染降低了 PSII 反应中心进行光化学反应的效率, 这在其它研究中也得到证实^[14, 18, 19].

光化学猝灭系数 q_p 的大小反映了 PSII 原初电子受体 QA 的氧化还原状态和 PSII 开放中心的状态, 其值越大, 说明 PSII 的电子传递活性越高^[19, 30]. q_p 下降表明 PSII 反应中心开放比例和参与 CO_2 固定的能量减少. q_n 值代表非光化学荧光猝灭系数, 反映光能被天线色素吸收, 但不被用于电子传递, 而以热耗散形式耗散那部分能量^[23]. q_p 和 q_n 反映了叶片对激发能利用的情况^[25]. 随着处理浓度的增加, 4 种树种的 q_p 值均呈下降趋势, q_n 值呈上升趋势, 表明镉污染胁迫降低了 4 种树种光合电子传递能力, 增加用于非光化学反应如热耗

散等的比例. 4 种树种 q_p 和 q_n 变化幅度明显不同, 表明其对土壤镉胁迫性的差异.

镉胁迫下, 多种植物生长受到抑制, 生理生化指标发生变化^[5~7, 10, 16, 17]. 本实验结果表明, 土壤中低浓度镉 ($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 有增加东北山梅花和刺玫果苗木生物量累积的趋势, 但差异均不显著 ($P > 0. 05$), 随着镉浓度的增加, 其生长量下降, 均郑逢中等^[31]的研究结果相类似. 低浓度重金属对植物生长的促进作用可能是对最严重伤害的一种保护反应^[16, 17], 也可能是镉刺激某些酶的活性促进了植物生长^[13]. 随着镉浓度的增大, 保护性反应消失, 导致植物生长下降.

在不同镉浓度处理下, 所有树种均表现出相同的变化趋势, 但变化幅度存在显著差异. 这种差异在不同树种苗木生物量累积方面具有相同的趋势, 证明土壤重金属污染条件下植物叶绿素荧光特性变化与生物量累积之间的相关性. 这为采用叶绿素荧光技术评价它们对土壤镉胁迫提供了有利证据.

白牛槭的几项叶绿素荧光参数及生物量的变化幅度均显著高于其它 3 个树种, 而刺玫果则明显低于其它 3 个树种, 东北山梅花和金银忍冬介于两者之间. 由此可以认为, 白牛槭对镉污染较为敏感, 而刺玫果则具有较高的耐受能力, 东北山梅花和金银忍冬介于二者之间. 从城市绿化树种应用角度来看, 刺玫果适合栽植在镉污染严重地区, 而东北山梅花、金银忍冬和白牛槭则更适合于镉污染较轻地区栽培.

致谢 张彦东教授被实验设计和论文写作过程中给予悉心指导, 谨致谢忱.

参考文献

- 1 Cai Z-Q(蔡志全), Cao K-F(曹坤芳), Feng Y-L(冯玉龙), et al. 2003. Effect of low nocturnal temperature stress on fluorescence characteristics and active oxygen metabolism in leaves of *Garcinia hanburyi* seedlings under two levels of irradiance. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 14(3): 326~331 (in Chinese)
- 2 Costa G, Morel JL. 1994. Efficiency of H^+ -ATP activity on cadmium uptake by four cultivars of lettuce. *J Plant Nutr*, 17: 627~637
- 3 De Kimpel CR, Jean LM. 2000. Urban soil management: A growing

- concern. *Soil Sci*, **161**: 31 ~ 40
- 4 Ding A-F(丁爱芳), Pan G-X(潘根兴). 2003. Contents of heavy metals in soils and Chinese cabbages(*Brassica chinensis*) from some urban vegetable fields around Nanjing and the human health risks. *Ecol Environ*(生态学报), **12**(4): 409 ~ 411(in Chinese)
 - 5 Ge C-L(葛才林), Yang X-Y(杨小勇), Jin Y(金阳), et al. 2003. Effect of heavy metals on superoxide dismutase in different rice species. *Acta Agric Nucl*(核农学报), **17**(4): 286 ~ 291(in Chinese)
 - 6 Kong X-S(孔祥生), Guo X-P(郭秀璞), Zhang M-X(张妙霞). 1999. Effect of cadmium stress on seedling growth and physiology-chemistry of maize. *J Huazhong Agric Univ*(华中农业大学学报), **18**(2): 111 ~ 113(in Chinese)
 - 7 Li Y(李元), Zu Y-Q(祖艳群), Wang H-X(王焕校). 1998. Effects of cadmium and iron on amino acid content in tobacco leaves. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **18**(6): 640 ~ 647(in Chinese)
 - 8 Lottermoser BG. 1997. Natural enrichment of top soils with chromium and other heavy metal, Port Macquarie, New South Wales, Australia. *Aust J Soil Res*, **35**: 1165 ~ 1176
 - 9 Lu Y(卢瑛), Gong Z-T(龚子同), Zhang G-L(张甘霖). 2002. The concentration and chemical speciation of Pb in Nanjing urban soils. *Acta Sci Circum*(环境科学学报), **22**(2): 156 ~ 160(in Chinese)
 - 10 Luo L-X(罗立新), Sun T-H(孙铁珩), Jin Y-H(靳月华). 1998. Accumulation of superoxide radical in wheat leaves under cadmium stress. *Acta Sci Circum*(环境科学学报), **18**(5): 495 ~ 499(in Chinese)
 - 11 Ma J-H(马建华), Zhang L(张丽), Li Y-L(李亚丽). 1999. Study of soil character and contamination in the city zone of Kaifeng. *Chin J Soil Sci*(土壤通报), **30**(2): 93 ~ 96(in Chinese)
 - 12 Markus JA, McBratney AB. 1996. An urban soil study: Heavy metal in glebe, Australia. *Aust J Soil Res*, **34**: 453 ~ 465
 - 13 Patra J, Ionka N, Panda BB. 1994. Tolerance and cotolerance of the grass *Chloris barbata* SW, to mercury, cadmium and zinc. *New Phytol*, **128**: 165 ~ 171
 - 14 Peng C-L(彭长连), Lin Z-F(林植芳), Lin G-Z(林桂珠), et al. 1998. Effect of tourism and industrialization on the atmospheric quality of subtropical forests and on chlorophyll fluorescence of two species of woody plants. *Acta Bot Sin*(植物学报), **40**(3): 270 ~ 276(in Chinese)
 - 15 Pouyat RV, McDonnell MJ. 1991. Heavy metal accumulation in forest soils along an urban-rural gradient in southeastern New York, USA. *Water Air Soil Pollut*, **57**: 797 ~ 807
 - 16 Qin T-C(秦天才), Wu Y-S(吴玉树), Wang H-X(王焕校). 1998. Effect of cadmium, lead and their interactions on the physiological and ecological characteristics of root system of *Brassica chinensis*. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **18**(3): 320 ~ 325(in Chinese)
 - 17 Qin T-C(秦天才), Wu Y-S(吴玉树), Wang H-X(王焕校). 1994. Effect of cadmium, lead and their interactions on the physiological and biochemical characteristics of *Brassica chinensis*. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **14**(1): 47 ~ 50(in Chinese)
 - 18 Su X(苏行), Hu D-Q(胡迪), Lin Z-F(林植芳), et al. 2002. Effect of air pollution on the chlorophyll fluorescence characters of two afforestation plants in Guangzhou. *Acta Phytoecol Sin*(植物生态学报), **26**(5): 599 ~ 604(in Chinese)
 - 19 Van Kooten O, Snel JFH. 1990. The use of chlorophyll nomenclature in plant stress physiology. *Photosynth Res*, **25**: 147 ~ 150
 - 20 Vassilev A, Manolov P. 1999. Chlorophyll fluorescence of barley(*H. vulgare* L.) seedlings grown in excess of Cd. *J Plant Physiol*, **25**: 67 ~ 76
 - 21 Vassilev A, Yordanov I, Chakalova E, et al. 1995. Effect of cadmium stress functional changes in photosynthetic apparatus. *Bulg J Plant Physiol*, **21**: 12 ~ 21
 - 22 Wang H-Z(王慧忠), He C-P(何翠屏). 2002. Effects of the heavy metals stress on root growth and vigour of turfgrass. *Grassland China*(中国草地), **24**(3): 55 ~ 63(in Chinese)
 - 23 Wang R-F(王荣富), Zhang Y-H(张云华), Qian L-S(钱立生), et al. 2003. Photooxidation characteristics of super hybrid rice "Liangyoupeijiu" and its parents. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **14**(8): 1309 ~ 1312(in Chinese)
 - 24 Wu X-M(吴新民), Pan G-X(潘根兴). 2003. The correlation analysis between the content of heavy metals and the factors influencing the pollution of heavy metals in urban soils in Nanjing City. *Acta Pedol Sin*(土壤学报), **30**(6): 921 ~ 928(in Chinese)
 - 25 Xu D-Q(许大全). 2002. The Efficiency of Photosynthesis. Shanghai: Shanghai Science Press. 29 ~ 37(in Chinese)
 - 26 Yang L-P(杨利平), Zhou X-F(周晓峰). 2004. Biomass and nutrient allocation of *Lilium pumilum*. *Acta Phytoecol Sin*(植物生态学报), **28**(1): 138 ~ 142(in Chinese)
 - 27 Yang X-B(杨小波), Wu Q-S(吴庆书), Zou W(邹伟), et al. 2001. Urban Ecology. Beijing: Science Press. 129 ~ 147(in Chinese)
 - 28 Yang Y-G(杨元根), Paterson E, Campbell C. 2001. Accumulation of heavy metals in urban soils and impacts on microorganisms. *Environ Sci*(环境科学), **22**(3): 44 ~ 486(in Chinese)
 - 29 Zhang L-M(张雷明), Shangguan Z-P(上官周平), Mao M-C(毛明策), et al. 2003. Effects of long term application of nitrogen fertilizer on leaf chlorophyll fluorescence of upland winter wheat. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **14**(5): 695 ~ 698(in Chinese)
 - 30 Zhang S-R(张守仁). 1999. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance. *Chin Bull Bot*(植物学通报), **16**(4): 444 ~ 448(in Chinese)
 - 31 Zheng F-Z(郑逢中), Lin P(林鹏), Zheng W-J(郑文), et al. 1994. Study on the tolerance of *Kandelia candel* mangrove seedlings to cadmium. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **14**(4): 408 ~ 413(in Chinese)
 - 32 Zhou Y-L(周以良), Dong S-L(董世林), Nie S-Q(聂绍荃), et al. 1986. Ligneous Flora of Heilongjiang. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press. (in Chinese)

作者简介 曹玲,女,1978年生,硕士研究生.主要从事城市林业和植物抗性生理研究. Tel: 0451-82190614; E-mail: cling2005@yahoo.com.cn

责任编辑 李凤^平