

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

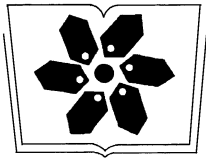
(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 1 期
Vol.31 No.1
2011



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 1 期 2011 年 1 月 (半月刊)

目 次

青藏高原东缘林线杜鹃-岷江冷杉原始林的空间格局	缪 宁, 刘世荣, 史作民, 等 (1)
季风常绿阔叶林不同恢复阶段藤本植物的物种多样性比较	李帅锋, 苏建荣, 刘万德, 等 (10)
越冬和复苏时期太湖水体蓝藻群落结构的时空变化	顾婷婷, 孔繁翔, 谭 啸, 等 (21)
海南新村湾海草床主要鱼类及大型无脊椎动物的食源	樊敏玲, 黄小平, 张大文, 等 (31)
广西涠洲岛造礁珊瑚种群结构的空间分布	梁 文, 张春华, 叶祖超, 等 (39)
宽窄行栽植模式下三倍体毛白杨根系分布特征及其与根系吸水的关系	席本野, 王 烨, 贾黎明, 等 (47)
干旱河谷-山地森林交错带土壤水分与养分特征	刘 彬, 罗承德, 张 健, 等 (58)
信号分子水杨酸减缓干旱胁迫对紫御谷光合和膜脂过氧化的副效应	易小林, 杨丙贤, 宗学凤, 等 (67)
UV-B 辐射对南方红豆杉生活史型和紫杉烷类含量的影响	于景华, 李德文, 庞海河, 等 (75)
模拟氮沉降对石栎和苦槠幼苗土壤呼吸的影响	李 凯, 江 洪, 由美娜, 等 (82)
环渤海湾地区连作苹果园土壤中酚酸类物质变化	孙海兵, 毛志泉, 朱树华 (90)
不同施肥方法对马来沉香和土沉香苗期根系生长的影响	王 冉, 李吉跃, 张方秋, 等 (98)
秋华柳和枫杨幼苗对镉的积累和耐受性	贾中民, 魏 虹, 孙晓灿, 等 (107)
祁连山北坡退化林地植被群落的自然恢复过程及土壤特征变化	赵成章, 石福习, 董小刚, 等 (115)
中国北方农牧交错带 C3 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与温度的关系及其对水分利用效率的指示	刘贤赵, 王国安, 李嘉竹, 等 (123)
不同退耕模式细根(草根)分解过程中 C 动态及土壤活性有机碳的变化	荣 丽, 李守剑, 李贤伟, 等 (137)
黑龙江省完达山东部林区东北虎猎物生物量	周绍春, 张明海, 孙海义 (145)
生态保护项目对大熊猫栖息地的影响	张玉波, 王梦君, 李俊清 (154)
石灰和 EM 处理条件下土壤动物群落在落叶分解中的变化	高梅香, 张雪萍 (164)
基于 EPG 的麦长管蚜、麦二叉蚜和禾谷缢管蚜取食行为比较	苗 进, 武予清, 郁振兴, 等 (175)
对映-贝壳杉烷型二萜类化合物对土壤纤毛虫群落的毒性效应	宁应之, 杜海峰, 王红军 (183)
红脂大小蠹种群空间格局地统计学分析及抽样技术	潘 杰, 王 涛, 宗世祥, 等 (195)
山西不同生态型大豆种质资源蛋白亚基的变异	王燕平, 李贵全, 郭数进, 等 (203)
施肥和覆膜垄沟种植对旱地小麦产量及水氮利用的影响	李廷亮, 谢英荷, 任苗苗, 等 (212)
近 40a 甘肃省气候生产潜力时空变化特征	罗永忠, 成自勇, 郭小芹 (221)
基于 GIS 的农村住区生态重要性空间评价及其分区管制——以兴国县长冈乡为例	谢花林, 李秀彬 (230)
农户收入差异对生活用能及生态环境的影响——以江汉平原为例	杨 振 (239)
河北省耕地生态经济系统能值指标空间分布差异及其动因	王 千, 金晓斌, 周寅康, 等 (247)
土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响	罗友进, 魏朝富, 李 渝, 等 (257)
专论与综述	
景观格局-土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性	刘 宇, 吕一河, 傅伯杰 (267)
美国煤矿废弃地的生态修复	张成梁, B. Larry Li (276)
农田土壤食物网管理的原理与方法	陈云峰, 胡 诚, 李双来, 等 (286)
学术信息与动态	
旱地、荒漠和荒漠化: 探寻恢复之路 —— 第三届国际荒漠化会议述评	吕一河, 傅伯杰 (293)

秋华柳和枫杨幼苗对镉的积累和耐受性

贾中民^{1,2}, 魏虹^{1,*}, 孙晓灿¹, 李昌晓¹, 孟翔飞¹, 谢小红¹

(1. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 西南大学生命科学学院, 重庆 400715;

2. 重庆市地质矿产勘查开发局川东南地质大队, 重庆 400038)

摘要:以秋华柳和枫杨当年实生幼苗为研究对象, 采用向土壤添加外源镉($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$)的形式设置了0(对照组)、10、20、50、100 mg/kg 5个处理, 研究了镉胁迫下秋华柳和枫杨幼苗的生长、生物量变化和根茎叶镉含量, 并评价了两树种的耐性指数(T_i)、转移系数(T_f)和生物富集系数(BCF)。结果表明:(1)在镉含量为10 mg/kg时, 秋华柳和枫杨幼苗基于生长和生物量参数的耐性指数(T_i)分别为91.72和91.62, 与对照组相比无显著变化, 其余各组(20、50、100 mg/kg)则显著低于对照植株($P < 0.05$);(2)土壤镉浓度小于20mg/kg时, 秋华柳植株茎、叶镉积累量分别高达61.73 mg/kg、163.04 mg/kg, 根镉积累量为91.05 mg/kg; 枫杨植株茎、叶镉积累量最高分别为7.9 mg/kg、5.25 mg/kg, 仅为秋华柳茎、叶的12.8%和3.2%, 根镉积累量高达190.68 mg/kg;(3)除对照外, 秋华柳幼苗各部分镉含量为叶>根>茎, 转移系数(T_f)介于0.789—1.513之间, 枫杨幼苗各部分镉含量为根>茎>叶, 转移系数(T_f)介于0.037—0.044之间, 远远小于秋华柳 T_f ;(4)秋华柳和枫杨幼苗在土壤镉浓度为10 mg/kg时具有很高的生长适应性和耐性, 秋华柳根吸收的镉向地上部分转移能力、地上部分积累镉的能力都远远大于枫杨, 生物富集系数(BCF)进一步证实了这一特性。研究证明, 秋华柳植株具有很高的镉耐性、镉转移能力及地上部分积累镉的能力, 适合于镉污染严重区域的植物修复。

关键词:秋华柳; 枫杨; 幼苗; 镉; 耐性; 积累特性

Accumulation and tolerance of *Salix variegata* and *Pterocarya stenoptera* seedlings to cadmium

JIA Zhongmin^{1,2}, WEI Hong^{1,*}, SUN Xiaocan¹, LI Changxiao¹, MENG Xiangfei¹, XIE Xiaohong¹

1 Key Laboratory of Eco-environments of the Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 Southeast Sichuan Geological Group, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 400038, China

Abstract: Cadmium (Cd) is the most popular heavy metal element in the contaminated soil of Three Gorges Reservoir Region. Cadmium has significant negative effects on the health of soil-plant system in the research area due to its high concentration and biological activity. Thus, it is essential to study the tolerance and accumulative ability of plant species in cadmium contaminated soils in order to protect the ecological environment and plan the reasonable land use. *Salix variegata* and *Pterocarya stenoptera* are two native riparian plants which can be used widely in the vegetation restoration of the hydro-fluctuation zone in Three Gorges Reservoir Region. In order to reveal the response of these two species to cadmium, five different kinds of cadmium treatment were applied to determine the growth, biomass and cadmium concentration in various parts of *S. variegata* and *P. stenoptera* seedlings. The cadmium treatments were 0 (control), 10, 20, 50, and 100 mg/kg. The results showed that: (1) The root biomass, aerial biomass, changes of stem length and stem diameter of *S. variegata* and *P. stenoptera* seedlings decreased with Cd content raised. Tolerance index (T_i) based on the dry biomass and growth parameters of two species showed no significant difference in 10 mg/kg in contrast with a significant decrease in 20, 50, and 100 mg/kg ($P < 0.05$), when compared to the control respectively. (2) The cadmium concentration reached up to

基金项目:重庆市自然科学基金项目(CSTC-2008BA7032, CSTC-2010BB7003); 国家林业公益性行业科研专项(201004039); 中央高校基本科研业务费专项资金重点项目(XDJK2009B032); 西南大学发展基金资助项目(SWUF2006003)

收稿日期: 2010-09-10; 修订日期: 2010-11-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weihong@swu.edu.cn

61.73, 163.04, and 91.05 mg/kg in stems, leaves, and roots of *S. variegata* in turn when treated with cadmium less than 20 mg/kg. However, in the same treated condition, the highest cadmium concentration was 7.9, 5.25, and 190.68 mg/kg in stems, leaves, and roots of *P. stenoptera*, respectively. (3) Cd accumulation in *S. variegata* was highest in leaves and lowest in stems except in the control, with the translocation factor (Tf) between 0.789—1.513. Very differently, Cd accumulation in *P. stenoptera* was highest in roots and lowest in stems also except in the control, with the translocation factor (Tf) between 0.037—0.044. Thus, the translocation factor (Tf) of *P. stenoptera* was far less than that of *S. variegata*. These characteristics indicated strategies of cadmium uptake and translocation by two plant species growing in Cd-contaminated soil were not totally different: Cd tended to be immobilised and held primarily in the roots of *P. stenoptera*, whereas it was more easily translocated to the aerial tissues of *S. variegata*. The tolerance of species to cadmium was demonstrated by these two strategies so that the plants were able to survive and had a high productivity. (4) The results indicated that *S. variegata* and *P. stenoptera* seedlings had a high capacity of growth adaptation and tolerance under 10 mg/kg Cd stress, and also, the capacities of translocation and cadmium accumulation in aerial parts of *S. variegata* seedlings were higher than that of *P. stenoptera* seedlings, which verified that the differences in accumulation of cadmium were not correlated with tolerance ability of plants. Such a behavior in the seedlings of two species was further confirmed by the calculation of the bio-concentration factor (BCF). The study suggested that *S. variegata* had considerable potential application to those cadmium contaminated areas in the hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir Region.

Key Words: *Salix variegata*; *Pterocarya stenoptera*; seedlings; cadmium; tolerance; accumulative characteristics

三峡库区段的多目标地球化学调查结果显示^[1], 镉是三峡库区表层土壤中污染最严重的重金属元素, 存在区域性轻度污染(0.2—0.6 mg/kg)及点状中度(0.6—1 mg/kg)以上污染; 而长江水系沉积物中镉异常明显, 含量为0.15—2.14 mg/kg, 存在连续的中至重度污染, 其中重度以上(>1 mg/kg)污染占36%; 该调查还发现, 长江上游来源镉是三峡库区长江水系沉积物镉污染的主要原因。

三峡库区建成后, 库区消落带的土壤母质主要为水系沉积物, 由于成库后水流减缓, 上游悬浮物、水系沉积物将在库区消落带及库底逐年沉积, 导致镉等重金属元素积累量进一步增加^[2]; 再者, 由于三峡库区特殊的环境条件, 库区重金属镉的生物有效性较强, 很容易被植物吸收^[1]。水系沉积物中的高镉异常及其较强的生物有效性将会对库区消落带的土壤-植物系统产生重要影响, 在消落带的土地利用中应当高度重视镉可能引起的生态后果。因此, 研究消落带湿生植物对重金属镉的耐性和积累能力, 对三峡库区生态环境保护、消落带土地利用规划具有重要现实意义。

秋华柳(*Salix variegata*)是杨柳科柳属多年生灌木^[3], 耐水淹, 生于河边或河床, 是优良的护堤护岸树种, 在三峡库区消落带有较为广泛的分布。枫杨(*Pterocarya stenoptera*)是胡桃科枫杨属落叶速生乔木^[3], 是我国亚热带地区的乡土树种, 耐水湿、耐旱, 深根性, 主、侧根均发达, 萌蘖能力强, 常见于河岸带和消落区^[4]。以往对秋华柳的研究主要集中在淹水条件下生长、存活率、根系碳水化合物含量及光合特性变化方面^[5-7]; 对枫杨的研究则主要集中在淹水后木材解剖学特征、生长及光合生理变化上^[4,8-9]。两树种对重金属镉的耐性、积累特性及其生长响应研究较少涉及。然而构建消落区植被恢复与重建所需的物种不仅要具有耐受水淹或耐水湿能力^[10], 对于受重金属污染的地区来说, 还要有较强的抗重金属污染能力, 甚至是较强的重金属积累能力。

本试验以秋华柳和枫杨当年实生幼苗为研究对象, 通过盆栽实验, 对其镉耐性、积累特性及生长响应开展研究, 并考察两树种的耐性指数、转移系数和生物富集系数。明确两树种是否具有较高的重金属镉耐性和积累能力, 其生长是否会受到较大影响, 以探明两树种是否能有效地应用于三峡库区消落带镉污染区域的植物修复。

1 材料与方法

1.1 实验材料与设计

本实验于 2009 年 3 月播种枫杨种子,萌发后间苗备用;2009 年 4 月初在北碚嘉陵江河岸带选取生长基本一致的 500 株秋华柳当年生实生苗,带回实验基地进行预培养。

2009 年 4 月底将风干的腐殖质土粉碎并过 5 mm 筛,以 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 溶液形式加入镉,设置 5 个处理组:CK(0 mg/kg,对照)、T1(10 mg/kg)、T2(20 mg/kg)、T3(50 mg/kg)和 T4(100 mg/kg)。拌匀稳定一个月后,选取生长基本一致的秋华柳和枫杨实生苗随机移栽入盛有含镉土壤的花盆中。盆高 20cm,内径 25cm,盆内土层高度约为 18 cm。每个处理 4 盆,每盆 2 株。将所有幼苗置于西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室实验基地大棚下培养,整个实验期间进行常规田间管理,适时浇水、除草、杀虫。土壤基本理化性质见表 1。

实验从 2009 年 6 月 6 日开始,经过 120 d 后取秋华柳和枫杨幼苗进行生长、生物量和根茎叶镉含量测定。整个实验于 2009 年 10 月 7 日结束。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 The basic physico-chemical characteristics of soils

pH 值 pH value	有机质 Organic matter /%	全氮 Total N /(g/kg)	全磷 Total N /(g/kg)	全钾 Total N /(g/kg)	碱解氮 Alkali hydrolysable N /(mg/kg)	有效磷 Available P /(mg/kg)	速效钾 Available K /(mg/kg)	总镉 Total Cd /(mg/kg)	有效镉 Available Cd /(mg/kg)
7.13	2.45	1.408	1.003	17.804	132.74	31.73	129.54	0.152	0.049

1.2 植物样品的前处理

在镉处理前和取样时分别对秋华柳和枫杨的株高、基茎进行测量,计算其主茎长变化和基茎增长量,取样后植株分为根、茎、叶 3 部分,用超纯水洗净,根部用 20 mmol/L EDTA Na_2 洗 5 min,然后迅速用超纯水冲洗干净。烘箱中 80 °C 下烘干至恒重,称重后用不锈钢植物粉碎机粉碎,过 60 目尼龙筛,储存于聚乙烯瓶中备用。

1.3 植株根、茎、叶镉含量的测定

用万分之一分析天平精确量取植物各部分样品干粉各 0.2000 g,加混合酸($\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}_2 = 3:1$,均为优级纯) 8 mL,在 ETHOS A/260 微波消解仪(Milestone, Italy)中消解,然后用 TAS-990 石墨炉原子吸收分光光度计(北京普析,中国)测定镉含量。

1.4 数据分析

主茎长变化(cm) = 实验取样时苗高(cm) - 开始镉处理时苗高(cm)

基茎增长量(mm) = 实验取样时基茎(mm) - 开始镉处理时基茎(mm)

耐性指数(Tolerance index, T_i)用两种生长指标量化:主茎长变化和生物量(根茎叶),按以下修正的公式^[11]计算:

$$T_i(\%) = [(LS + WR + WS + WL)/4] \times 100$$

式中,LS 代表重金属镉胁迫组主茎长变化与对照组主茎长变化的比值;WR、WS、WL 分别代表重金属镉胁迫组根、茎、叶平均生物量干重与对照平均生物量干重的比值。

转移系数(Translocation factor, T_f)按如下公式^[12]计算,以评价植物根吸收的镉向地上部分的转移能力。

$$\text{转移系数}(T_f) = \text{地上部分平均镉含量}(\text{mg/kg}) / \text{根部平均镉含量}(\text{mg/kg})$$

根部和地上部分镉生物富集系数(Bio-concentration factor, BCF)按下面公式计^[13]算:

$$\text{生物富集系数}(BCF) = \text{根或地上部分镉含量}(\text{mg/kg}) / \text{土壤中镉含量}(\text{mg/kg})$$

利用统计分析软件 spss13.0 和 Excel 2003 进行实验数据的处理和分析。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)揭示镉胁迫对秋华柳和枫杨的生长、生物量和根茎叶镉含量的影响。用 Duncan 多重比较(Duncan's

multiple range test) 检验不同镉胁迫组之间植株的生长、生物量和根茎叶镉含量的差异。

2 结果与分析

2.1 镉对秋华柳和枫杨幼苗生物量和地上部分生长的影响

2.1.1 镉对秋华柳和枫杨幼苗生物量的影响

秋华柳幼苗根生物量在镉浓度为 10、20 mg/kg 时与对照植株相比没有显著变化,在镉浓度为 50、100 mg/kg 时显著下降 ($P < 0.05$, 图 1A)。枫杨幼苗根生物量在镉浓度为 10 mg/kg 时与对照植株相比没有显著变化,在镉浓度为 20、50、100 mg/kg 时显著低于对照,且 3 个镉胁迫组之间有显著性差异 ($P < 0.05$, 图 1A)。镉胁迫 120 d 后, T1、T2、T3、T4 组秋华柳和枫杨幼苗的根生物量分别为对照的 101.44%、74.69%、60.16%、55.19% 和 101.92%、72%、60.15%、26.71%。10 mg/kg 组镉胁迫对两物种根部具有一定的“促进”作用。

T1 组秋华柳和枫杨幼苗地上部分生物量除镉浓度为 10 mg/kg 时与对照相比没有显著差异外,其余各组植株与对照相比均显著下降 ($P < 0.05$, 图 1B)。T1、T2、T3、T4 组秋华柳和枫杨幼苗地上部分生物量分别为对照组植株的 96.06%、65.76%、40.79%、34.59% 和 96.8%、80.7%、78.26%、30.39%。

2.1.2 主茎长变化和基茎增长量

秋华柳幼苗和枫杨幼苗主茎长变化和基茎增长量随着镉浓度的增加呈显著下降趋势 ($P < 0.05$, 图 1C、D)。秋华柳幼苗主茎长变化和基茎增长量在 5 个处理组之间均有显著性差异 ($P < 0.05$)。枫杨幼苗主茎长变化和基茎增长量在镉浓度为 10 mg/kg 时与对照相比没有显著变化,但在 20、50、100 mg/kg 时显著低于对照组植株。

2.2 重金属镉对秋华柳和枫杨幼苗耐性指数的影响

秋华柳和枫杨当年实生苗的耐性指数 (T_i) 随着土壤镉浓度的升高而逐渐下降,具有基本相同的变化趋势 (图 1E)。T1 组 (10 mg/kg) 秋华柳和枫杨植株 T_i 与对照组植株相比没有显著差异,而 T2、T3、T4 组秋华柳和枫杨植株 T_i 与对照组植株相比显著下降 ($P < 0.05$),且两物种下降幅度相差不大。T1、T2、T3、T4 组秋华柳和枫杨幼苗耐性指数分别为对照植株的 91.72%、65.78%、48.45%、37.55% 和 91.62%、71.79%、45.13%、38.12%。

2.3 秋华柳和枫杨幼苗根茎叶的镉含量

2.3.1 根镉含量

秋华柳和枫杨当年实生苗根部镉含量随着土壤镉含量的增加而增加,但两物种 T2、T3、T4 组之间植株根部镉含量没有显著性变化 ($P > 0.05$),均显著高于对照和 T1 组 (10 mg/kg) (图 2A)。4 个镉胁迫组秋华柳和枫杨幼苗根镉含量分别为: 42.54、91.05、143.5、152.23 mg/kg 和 113.87、190.68、213.82、240.97 mg/kg,秋华柳根镉含量均小于枫杨根镉含量。

2.3.2 茎镉含量

土壤镉含量为 10—100 mg/kg 时,秋华柳幼苗茎镉含量没有显著变化,而 50、100 mg/kg 组枫杨幼苗茎镉含量显著高于 10、20 mg/kg 组幼苗镉含量 (图 2B)。4 个镉胁迫组秋华柳和枫杨幼苗茎镉含量分别为 38.57、61.73、51.88、55.57 mg/kg 和 4.04、7.9、13.49、13.48 mg/kg,秋华柳茎镉含量均大于枫杨茎镉含量。

2.3.3 叶镉含量

T2、T3、T4 组秋华柳实生苗叶镉含量显著高于对照和 T1 组,但枫杨幼苗叶镉含量在各个镉胁迫组之间没有显著变化 (图 2C)。4 个镉胁迫组秋华柳和枫杨幼苗叶镉含量分别为 85.2、163.04、158.15、205.48 mg/kg 和 5.25、5.09、4.69、5.00 mg/kg,秋华柳叶镉含量均远大于枫杨叶镉含量。

2.3.4 根茎叶比较

秋华柳幼苗根茎叶镉含量在土壤镉浓度为 10—100 mg/kg 时表现为叶 > 根 > 茎;枫杨幼苗各部分镉含量在镉含量为 10 mg/kg 时表现为根 > 叶 > 茎,在镉含量为 50—100 mg/kg 时表现为根 > 茎 > 叶 (图 2A、B、C)。4 个镉胁迫组秋华柳根镉含量均小于枫杨叶镉含量,而秋华柳茎叶镉含量均大于枫杨茎叶镉含量。

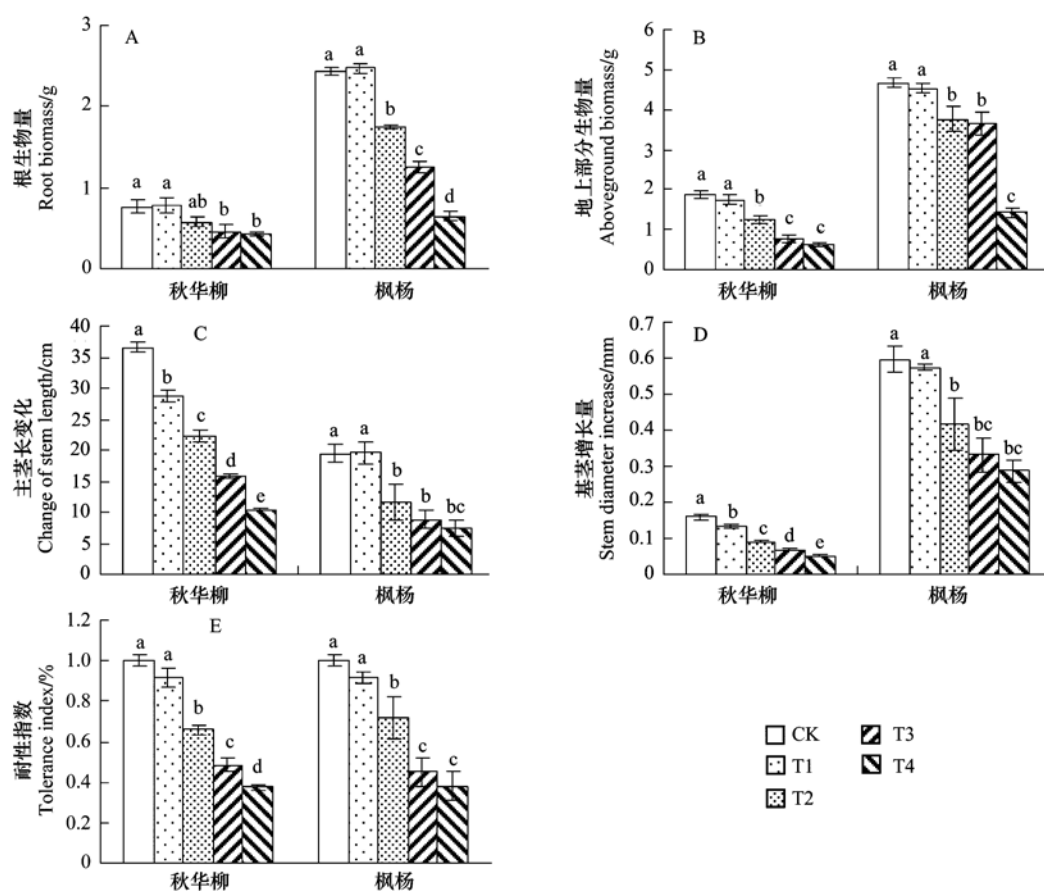


图1 不同镉浓度对秋华柳和枫杨生物量、主茎长、基茎和耐性指数的影响(平均值 ± 标准误)

Fig.1 Effects of the different Cd concentration on biomass, stem length, stem diameter and tolerance index of *S. variegata* and *P. stenoptera* (Mean ± SE)

CK; 0 mg/kg; T1: 10 mg/kg; T2: 20 mg/kg; T3: 50 mg/kg; T4: 100 mg/kg; 对每一镉浓度水平,标有不同字母的各处理之间有显著差异 (显著性水平 $P=0.05$)

2.4 秋华柳和枫杨幼苗的镉转移系数和生物富集系数

T1、T2、T3 镉胁迫组之间秋华柳幼苗根生物富集系数无显著差异,而显著高于 T4 组植株;T1、T2 镉胁迫组枫杨幼苗根生物富集系数显著高于 T3、T4 组(图 3A)。4 个镉胁迫组秋华柳根生物富集系数均小于枫杨根生物富集系数。

T1、T2 镉胁迫组秋华柳幼苗地上部分生物富集系数显著高于 T3、T4 组地上部分生物富集系数;4 个镉胁迫组枫杨幼苗地上部分生物富集系数依次显著下降(图 3B)。而秋华柳地上部分生物富集系数均大于枫杨地上部分生物富集系数。

4 个镉胁迫组秋华柳和枫杨幼苗镉转移系数均无显著性差异 ($P>0.05$, 图 3C), 其中枫杨镉转移系数介于 0.037—0.044 之间,秋华柳镉转移系数介于 0.789—1.513 之间,是枫杨的 18.62—34.6 倍。

3 讨论

生长的变化常常是植物受到胁迫后最先表现出的可见响应,尤其是当植物根部直接接触到污染的土壤时,其生长特性会表现出快速敏感的变化^[14]。云杉(*Picea asperata*)幼苗在含镉 2 mg/kg 的土壤中生长 18 周,与对照相比,根部和茎叶部生物量减少约 45%^[15];无花果(*Ficus carica*)在镉污染土壤中生长 90 d,植物根长和叶组织的生物量及主茎直径均受到影响,5 mg/kg 镉可使无花果树叶片生物量减少 30%^[16]。本试验结果说明土壤镉含量大于在 10—20 mg/kg 之间的某个值时,才显著抑制秋华柳和枫杨幼苗的生长,而在 10 mg/kg 以下其抑制作用并不显著,甚至会表现出一定的促进作用,尤其是对根生长的促进,这与 Greger^[17]等的研究

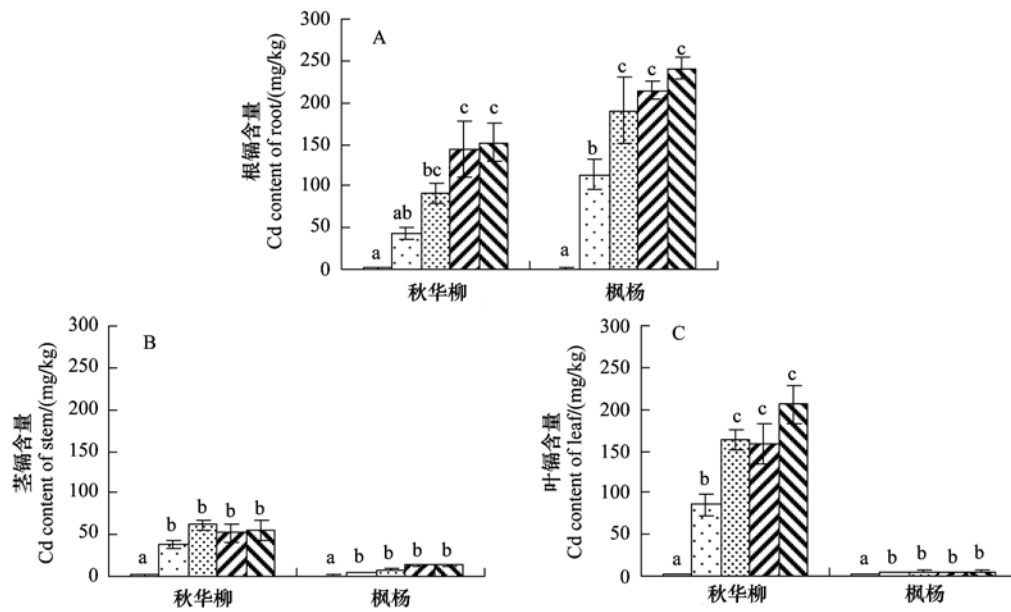


图2 秋华柳和枫杨根、茎、叶的镉含量(平均值±标准误)

Fig. 2 Cd content of root, stem and leaf of *S. variegata* and *P. stenoptera* (Mean ± SE)

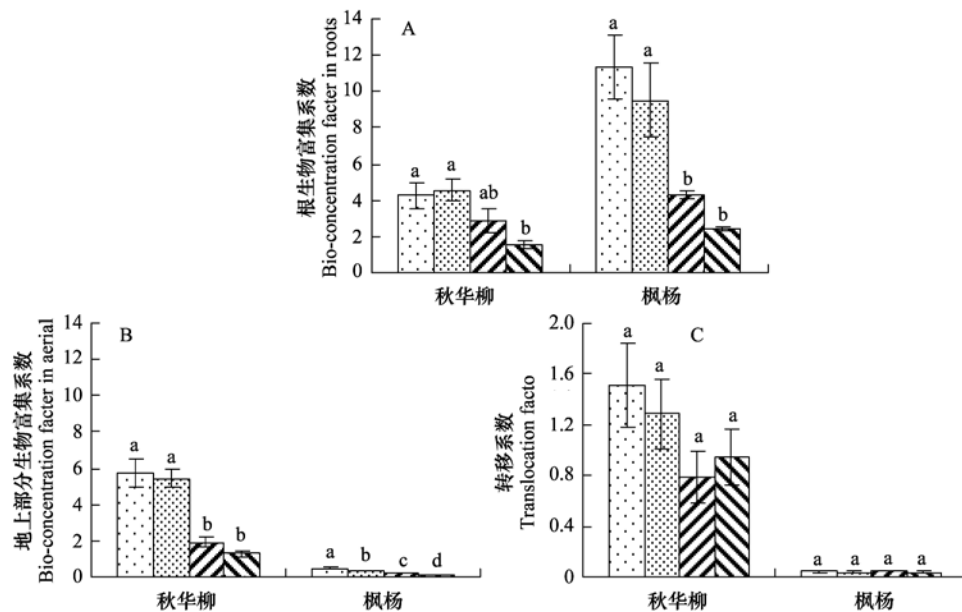


图3 秋华柳和枫杨的转移系数及生物富集系数(平均值±标准误)

Fig. 3 Translocation factor and bio-concentration factor in roots and aerial parts of *S. variegata* and *P. stenoptera* (Mean ± SE)

枫杨镉转移系数在4个镉胁迫组间的差异采用Dunnnett's T3检验

结果相一致。结果表明,秋华柳和枫杨幼苗对镉胁迫表现出较强的生长适应性。

敏感植物在重金属胁迫下,会抑制根系的生长,导致植物生长缓慢、生物量减少,而耐性植物则没有影响或者影响较小,因此耐性指数是用来反映植物对重金属耐性大小的一个重要指标^[18]。Lux 等人的研究建议:柳树无性系在 $Ti > 60$ 时定义为高忍耐力, $35 < Ti < 60$ 时定义为中等程度忍耐力^[19]。根据这个划分,含羞草(*Mimosa pudica*)、白雪姬(*Tradescantia sillamontana*)和树马齿苋(*Portulaca afra*)的平均耐性指数分别为105.57、81.35、79.88^[20],被认为对镉具有高忍耐力;而鸡冠菜(*Meristotheca papulosa*)^[21]和菖蒲(*Acorus calamus*)^[22]的平均耐性指数分别为52.6、59,对镉耐受性较低。相关研究中,试验处理浓度与本试验相近,处

理时间却远小于本实验,说明镉胁迫 120 d 后,秋华柳和枫杨幼苗在土壤镉含量为 20 mg/kg 时仍然具有较高的镉忍耐性(两物种 Ti 分别为 65.78、71.79),尤其是 10 mg/kg 时耐受性更高(两物种 Ti 分别为 91.72、91.62)。这可能依赖于保证营养元素均衡吸收能力的根部的高忍耐性^[23]。

植物能否成功地用于土壤重金属的萃取主要取决于该植物的生物量、金属积累能力和金属在植物体内的积累位置^[24]。本试验中,秋华柳和枫杨幼苗随着土壤镉浓度的增加,根和地上部分生物量下降而镉含量上升(图 1A、B、图 2)。说明植物高镉积累能力和高生物量的同时出现是不可能的,植物在高积累能力和低生物量之间必须有一种权衡,反之亦然,因此生长在镉污染土壤中的植物的高积累能力定会导致潜在的生物量下降^[25]。

不同物种、同一物种的不同生态型或者同一植株的不同部位积累某一金属的能力不同^[26]。生长在金属污染区域的植物采取的一般策略是把镉固定在根部,这种策略已经在生长于尾矿和金属冶炼厂附近的植物体内发现,与植物根部分泌的有机酸和根际酸碱度的变化有关^[27-28]。本实验结果发现,枫杨茎、叶镉积累量最高分别为 13.49、5.25 mg/kg,而根镉积累量则高达 240.97 mg/kg,镉转移系数(Tf)介于 0.037—0.044 之间,说明枫杨根吸收的镉主要积累在根部,通过某种机制阻止了镉向枫杨幼苗地上部分的转移,以减少镉向地上部分转移而产生危害,枫杨幼苗向地上部分低镉转移能力可能与此策略有关,同时也说明镉在植物体内的分布与植物耐性的高低没有关系^[29]。秋华柳幼苗茎、叶镉积累量最高分别为 61.73、205.48 mg/kg,根镉积累量最高为 152.23 mg/kg,镉转移系数(Tf)介于 0.789—1.513 之间,是枫杨的 18.62—34.6 倍,说明秋华柳幼苗向地上部分转移镉的能力很强,在实际积累镉的能力上远远大于枫杨幼苗,同时也表明秋华柳幼苗可能更倾向于利用植物内部的解毒机制来减少镉对自身的危害,这种耐镉策略与植物体镉诱导合成的植物螯合肽和金属硫蛋白有关^[30]。这两种策略都显示出了植物对重金属镉的耐性,以便能够存活并进行生物量生产。本实验中,秋华柳幼苗地上部分生物富集系数(BCF)占整株生物富集系数的 40.7%—57.3%,而枫杨幼苗仅占 3.2%—4%,进一步揭示了秋华柳幼苗萃取镉的潜力大于枫杨的萃取潜力。

综上所述,秋华柳作为一个耐水淹物种^[5-6],对三峡库区消落带这个特殊的区域而言,其幼苗根吸收镉后向地上部分高转移能力、地上部分高镉积累能力及其在土壤镉含量为 10 mg/kg 时的高耐受性,使之在三峡库区消落带土壤镉污染严重的区域具有较强的应用潜力。枫杨幼苗具有一定的耐水湿能力^[8-9],并在土壤镉含量为 10 mg/kg 时 also 具有很高的耐受性,但其根吸收的镉向地上部分转移能力较差,使之应用潜力大大减弱。

References:

- [1] Tang J. Study on the Regularity of Move, Enrichment, and Translation of Cadmium and Other Heavy Metals in the District of the Three Gorges Reservoir[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005:47-52,103.
- [2] Tang J, Liu A Y, Deng F Y, Lei J L. Geochemical characteristics of cadmium in soils and stream sediments in the Three Gorges reservoir area, China. Geological Bulletin of China, 2005, 24(8):750-754.
- [3] Botany Institute of Chinese Academy of Sciences. Iconographia Cormophytorum Sinicorum. Tomus I. Beijing: Science Press, 2001:372-379.
- [4] Xu Y M, Zou M H, Shi Y H, Hu X Y, Yuan K K. Advance on the biological properties and the resources utilization of *Pterocarya stenoptera*. Journal of Northeast Forestry University, 2002, 30(3):42-48.
- [5] Luo F L, Zeng B, Chen T, Ye X Q, Liu D. Response to simulated flooding of photosynthesis and growth of riparian plant *Salix variegata* in the Three Gorges Reservoir Region of China. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(5):910-918.
- [6] Li Y, Zeng B, Ye X Q, Qiao P, Wang H F, Luo F L. The effects of flooding on survival and recovery growth of the riparian plant *Salix variegata* Franch. in Three Gorges reservoir region. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5):1923-1930.
- [7] Zhang Y H, Zeng B, Fu T F, Ye X Q. Effects of long-term flooding on nonstructural carbohydrates content in roots of *Salix variegata* Franch. Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition), 2006(31):153-156.
- [8] Yi Y H, Fan D Y, Xie Z Q, Chen F Q. Effects of waterlogging on the gas exchange, chlortophyll fluorescence and water potential of *Quercus variabilis* and *Pterocarya stenoptera*. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(6):960-968.
- [9] Jia Z M, Wei H, Tian X F, Li C X. Effects of long-term flooding on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of *Pterocarya stenoptera* seedlings. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2009, 31(5):124-129.
- [10] Li C X, Zhong Z C, Liu Y. Effect of soil water change on photosynthetic characteristics of *Taxodium distichum* seedlings in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir Area. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8):1953-1959.

- [11] Wilkins D A. The measurement of tolerance to edaphic factors by mean of root growth. *New Phytologist*, 1978, 80:623-633.
- [12] Massimo Z, Fabrizio P, Giuseppe S M, Valentina I, Lucia P, Angelo M. Metal tolerance, accumulation and translocation in poplar and willow clones treated with cadmium in hydroponics. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2009, 197:23-34.
- [13] Zayed A, Gowthaman S, Terry N. Phytoaccumulation of trace elements by wetlands plants I. Duckweed. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27:715-721.
- [14] Baker A M J, Walker P L. Physiological responses of plants to heavy metals and the quantification of tolerance and toxicity. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 1989, 1:7-17.
- [15] Godbold D L, Huttermann A. Effect of zinc, cadmium and mercury on root elongation of *Picea abies* (Karst.) seedlings, and the significance of these metals to forest die-back. *Environmental Pollution*, 1985, 38: 375-381.
- [16] Kelly J M, Parker G, Mcfee W W. Heavy metal accumulation and growth of seedlings of five forest species as influenced by soil cadmium level. *Journal of Environmental Quality*, 1979, 8(3):361-364.
- [17] Grege M, Lindberg S. Effects of Cd^{2+} and EDTA on young sugar beets. I: Cd^{2+} uptake and sugar accumulation. *Plant Physiology*, 1986, 66: 69-74.
- [18] Yan M L, Liu L L, Wang H H, Xiang Y C, Feng T. Accumulation Characteristics of Cadmium for Three Plants in Red Soil. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1):72-77.
- [19] Lux A, ottn kov A, Opatrn J, Greger M. Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity. *Physiologia Plantarum*, 2004, 120:537-545.
- [20] Yan A L, Wu T T, Wang Y B, Zhang X Q. The characteristics of cadmium tolerance and accumulation in three kinds of ornamental plants. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(9): 2491-2498.
- [21] Xu S Q, Cheng W D. The Cd tolerance difference in the germination and seedling growth in *Brassica campestris* and leaf mustard. *Journal of Agricultural Science*, 2005, 6: 436-438.
- [22] Zhou S B, Wang C J, Yang H J, Bi D, Li J H, Wang Y. Stress responses and bioaccumulation of heavy metals by *Zizania latifolia*. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 281-287.
- [23] Ouairiti O, Gouia H, Ghorbal M H. Responses of bean and tomato plants to cadmium-growth, mineral nutrition and nitrate reduction. *Journal of Plant Growth Regulation*, 1997, 35:246-354.
- [24] Riddell-Black D. Heavy metal uptake by fast growing willow species// Aronsson P, Perttu K. Willow Vegetation Filters for Municipal Wastewaters and Sludges. A Biological Purification System. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 1994:145-151.
- [25] Banuelos G S, Ajwa H A. Trace elements in soils and plants: an overview. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 1999:34 (4): 951-974.
- [26] Osteras A H, Ekvall L, Greger M. Sensitivity to, and accumulation of, and cadmium in *Betula pendula*, *Picea abies*, and *Pinus sylvestris* seedlings from different regions in Sweden. *Canadian Journal of Botany*, 2000, 78:1440-1449.
- [27] Stoltz E, Greger M. Accumulation properties of As, Cd, Cu, Pb and Zn by four wetland plant species growing on submerged mine tailings. *Environmental and Experimental Botany*, 2002, 47:271-280.
- [28] Dahmani-Muller H, Gelie B, van Oort F, Balabane M. Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter. *Environmental Pollution*, 2000, 109:231-238.
- [29] Prasad M N V. Heavy Metal Stress in Plants: From Biomolecules to Ecosystems. Second edition. Berlin: Springer Press, 2004:19.
- [30] Aiman H S, Fariduddin Q, Ali B, Hayat S, Ahmad A. Cadmium: toxicity and tolerance in plants. *Journal of Environmental Biology*, 2009, 30 (2):165-174.

参考文献:

- [1] 唐将. 三峡库区镉等重金属元素迁移富集及转化规律. 成都:成都理工大学, 2005:47-52,103.
- [2] 唐将,刘安云,邓富银,雷家立. 长江三峡库区土壤与水系沉积物 Cd 地球化学特征研究. *地质通报*,2005, 24(8):750-754.
- [3] 中国科学院植物研究所. 中国高等植物图鉴 I. 北京:科学出版社,2001:372-379.
- [4] 徐有明,邹明宏,史玉虎,胡兴宜,袁克侃. 枫杨的生物学特性及其资源利用的研究进展. *东北林业大学学报*,2002, 30(3):42-48.
- [5] 罗芳丽,曾波,陈婷,叶小齐,刘巍. 三峡库区岸生植物秋华柳对水淹的光合和生长响应. *植物生态学报*, 2007, 31(5):910-918.
- [6] 李娅,曾波,叶小齐,乔普,王海锋,罗芳丽. 水淹对三峡库区岸生植物秋华柳存活和恢复生长的影响. *生态学报*,2008, 28(5):1923-1930.
- [7] 张艳红,曾波,付天飞,叶小齐. 长期水淹对秋华柳根部非结构性碳水化合物含量的影响. *西南师范大学学报(自然科学版)*,2006(31): 153-156.
- [8] 衣英华,樊大勇,谢宗强,陈芳清. 模拟淹水对枫杨和栓皮栎气体交换、叶绿素荧光和水势的影响. *植物生态学报*,2006, 30(6):960-968.
- [9] 贾中民,魏虹,田晓峰,李昌晓. 长期水淹对枫杨幼苗光合生理、叶绿素荧光特性的影响. *西南大学学报(自然科学版)*, 2009, 31(5): 124-129.
- [10] 李昌晓,钟章成,刘芸. 模拟三峡库区消落带土壤水分变化对落羽杉幼苗光合特性的影响. *生态学报*,2005, 25(8):1953-1959.
- [18] 严明理,刘丽莉,王海华,向言词,冯涛. 3种植物对红壤中镉的富集特性研究. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1):72-77.
- [20] 燕傲蕾,吴亭亭,王友保,张旭情. 三种观赏植物对重金属镉的耐性与积累特性. *生态学报*, 2010, 30(9): 2491-2498.
- [21] 徐素琴,程旺大. 油菜、芥菜萌芽与幼苗生长的耐镉性差异. *浙江农业科学*, 2005, 6:436-438.
- [22] 周守标,王春景,杨海军,毕得,李金华,王影. 菰和菖蒲对重金属的胁迫反应及其富集能力. *生态学报*, 2007, 27(1): 281-287.

CONTENTS

Spatial pattern analysis of a <i>Rhododendron-Abies</i> virginal forest near timberline on the eastern edge of Qinghai-Tibetan Plateau, China	MIAO Ning, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (1)
Changes of liana species diversity in different restoration stages of monsoonal broad-leaved evergreen forest	LI Shuaifeng, SU Jianrong, LIU Wande, et al (10)
Investigation on spatio-temporal pattern of cyanobacterial community structure by T-RFLP during overwinter and recruitment period in Taihu Lake	GU Tingting, KONG Fanxiang, TAN Xiao, et al (21)
Food sources of fish and macro-invertebrates in a tropical seagrass bed at Xincun Bay, Southern China	FAN Minling, HUANG Xiaoping, ZHANG Dawen, et al (31)
Spatial pattern of Scleractinian coral Population Structure in Weizhou Island, Beihai, Guangxi	LIANG Wen, ZHANG Chunhua, YE Zuchao, et al (39)
Property of root distribution of triploid <i>Populus tomentosa</i> and its relation to root water uptake under the wide-and-narrow row spacing scheme	XI Benye, WANG Ye, JIA Liming, et al (47)
Soil nutritional properties and moisture gradient of the ecotone between dry valley and montane forest of the Minjiang River	LIU Bin, LUO Chengde, ZHANG Jian, et al (58)
Signal chemical salicylic acid mitigates the negative effects of drought on photosynthesis and membrane lipid peroxidation of purple majesty	YI Xiaolin, YANG Bingxian, ZONG Xuefeng, et al (67)
Effects of supplementary UV-B radiation on life cycle forms and the accumulation of taxanes of <i>Taxus chinensis</i> var. <i>mairei</i>	YU Jinghua, LI Dewen, PANG Haihe, et al (75)
Effect of simulated nitrogen deposition on the soil respiration of <i>Lithocarpus glabra</i> and <i>Castanopsis sclerophylla</i>	LI Kai, JIANG Hong, YOU Meina, et al (82)
Changes of phenolic acids in the soil of replanted apple orchards surrounding Bohai Gulf	SUN Haibing, MAO Zhiqian, ZHU Shuhua (90)
Growing dynamic root system of <i>Aquilaria malaccensis</i> and <i>Aquilaria sinensis</i> seedlings in response to different fertilizing methods	WANG Ran, LI Jiyue, ZHANG Fangqiu, et al (98)
Accumulation and tolerance of <i>Salix variegata</i> and <i>Pterocarya stenoptera</i> seedlings to cadmium	JIA Zhongmin, WEI Hong, SUN Xiaocan, et al (107)
Dynamics of vegetation structure and soil properties in the natural restoration process of degraded woodland on the northern slope of Qilian Mountains, northwestern China	ZHAO Chengzhang, SHI Fuxi, DONG Xiaogang, et al (115)
Relationship between temperature and $\delta^{13}\text{C}$ values of C3 herbaceous plants and its implications of WUE in farming-pastoral zone in North China	LIU Xianzhao, WANG Guoan, LI Jiazhu, et al (123)
Carbon dynamics of fine root (grass root) decomposition and active soil organic carbon in various models of land use conversion from agricultural lands into forest lands	RONG Li, LI Shoujian, LI Xianwei, et al (137)
Prey biomass of the Amur tiger (<i>Panthera tigris altaica</i>) in the eastern Wanda Mountains of Heilongjiang Province, China	ZHOU Shaochun, ZHANG Minghai, SUN Haiyi (145)
The impact of conservation projects on giant Panda Habitat	ZHANG Yubo, WANG Mengjun, LI Junqing (154)
Fluctuation of soil fauna community during defoliation decomposition under lime and EM treatment	GAO Meixiang, ZHANG Xueping (164)
Comparative of feeding behaviors of <i>Sitobion avenae</i> , <i>Sitobion graminum</i> and <i>Rhopalosiphum padi</i> (Homoptera: Aphididae) using electrical penetration graph (EPG)	MIAO Jin, WU Yuqing, YU Zhenxing, et al (175)
Toxic effects of <i>ent</i> -kaurane diterpenoids on soil ciliate communities	NING Yingzhi, DU Haifeng, WANG Hongjun (183)
Geostatistical analysis and sampling technique on spatial distribution pattern of <i>Dendroctonus valens</i> population	PAN Jie, WANG Tao, ZONG Shixiang, et al (195)
Variation analysis of protein subunits of soybean germplasms of different eco-types in Shanxi	WANG Yanping, LI Guiquan, GUO Shujin, et al (203)
Effects of fertilization and plastic film mulched ridge-furrow cultivation on yield and water and nitrogen utilization of winter wheat on dryland	LI Tingliang, XIE Yinghe, REN Miaomiao, et al (212)
The changing characteristics of potential climate productivity in Gansu Province during nearly 40 years	LUO Yongzhong, CHENG Ziyong, GUO Xiaoqin (221)
Spatial assessment and zoning regulations of ecological importance based on GIS for rural habitation in Changgang Town, Xinguo county	XIE Hualin, LI Xiubin (230)
Influences of rural households' income differences on living energy consumption and eco-environment: a case study of Jiangnan Plain, China	YANG Zhen (239)
Spatial differences and its driving factors of emergy indices on cultivated land eco-economic system in Hebei Province	WANG Qian, JIN Xiaobin, ZHOU Yinkang, et al (247)
Effects of land use on distribution and protection of organic carbon in soil aggregates in karst rocky desertification area	LUO Youjin, WEI Chaofu, LI Yu, et al (257)
Review and Monograph	
Implication and limitation of landscape metrics in delineating relationship between landscape pattern and soil erosion	LIU Yu, LÜ Yihe, FU Bojie (267)
Ecological reclamation and restoration of abandoned coal mine in the United States	ZHANG Chengliang, B. Larry Li (276)
Managing farmland soil food web: principles and methods	CHEN Yunfeng, HU Cheng, LI Shuanglai, et al (286)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 1 期 (2011 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 1 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		

