

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

中国生态学学会 2013 年学术年会专辑



第 33 卷 第 19 期 Vol.33 No.19 **2013**

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33卷第19期 2013年10月 (半月刊)

目次

中国生态学会 2013 年学术年会专辑 卷首语

生态系统服务研究文献现状及不同研究方向评述	马凤娇,刘金铜,A. Egrinya Eneji (5963)
非人灵长类性打搅行为研究进展	杨斌,王程亮,纪维红,等 (5973)
密度制约效应对啮齿动物繁殖的影响	韩群花,郭聪,张美文 (5981)
食物链长度远因与近因研究进展综述	王玉玉,徐军,雷光春 (5990)
AM 真菌在植物病虫害生物防治中的作用机制	罗巧玉,王晓娟,李媛媛,等 (5997)
保护性耕作对农田碳、氮效应的影响研究进展	薛建福,赵鑫,Shadrack Batsile Dikgwatlhe,等 (6006)
圈养大熊猫野化培训期的生境选择特征	张明春,黄炎,李德生,等 (6014)
利用红外照相技术分析野生白冠长尾雉活动节律及时间分配	赵玉泽,王志臣,徐基良,等 (6021)
风速和持续时间对树麻雀能量收支的影响	杨志宏,吴庆明,董海燕,等 (6028)
白马雪山自然保护区灰头小鼯鼠的巢址特征	李艳红,关进科,黎大勇,等 (6035)
生境片段化对千岛湖岛屿上黄足厚结猛蚁遗传多样性的影响	罗媛媛,刘金亮,黄杰灵,等 (6041)
基于 28S, COI 和 Cytb 基因序列的薛荔和爱玉子传粉小蜂分子遗传关系研究	吴文珊,陈友铃,孙伶俐,等 (6049)
高榕榕果内 <i>Eupristina</i> 属两种榕小蜂的遗传进化关系	陈友铃,孙伶俐,武蕾蕾,等 (6058)
镉胁迫下杞柳对金属元素的吸收及其根系形态构型特征	王树凤,施翔,孙海菁,等 (6065)
邻苯二甲酸对萝卜种子萌发、幼苗叶片膜脂过氧化及渗透调节物质的影响	杨延杰,王晓伟,赵康,等 (6074)
极端干旱区多枝桧柳幼苗对人工水分干扰的形态及生理响应	马晓东,王明慧,李卫红,等 (6081)
贝壳砂生境酸枣叶片光合生理参数的水分响应特征	王荣荣,夏江宝,杨吉华,等 (6088)
陶粒覆盖对土壤水分、植物光合作用及生长状况的影响	谭雪红,郭小平,赵廷宁 (6097)
不同林龄短枝木麻黄小枝单宁含量及养分再吸收动态	叶功富,张尚炬,张立华,等 (6107)
珠江三角洲不同污染梯度下森林优势种叶片和枝条 S 含量比较	裴男才,陈步峰,邹志谨,等 (6114)
AM 真菌和磷对小马安羊蹄甲幼苗生长的影响	宋成军,曲来叶,马克明,等 (6121)
盐氮处理下盐地碱蓬种子成熟过程中的离子积累和种子萌发特性	周家超,付婷婷,赵维维,等 (6129)
CO ₂ 浓度升高条件下内生真菌感染对宿主植物的生理生态影响	师志冰,周勇,李夏,等 (6135)
预处理方式对香蒲和芦苇种子萌发的影响	孟焕,王雪宏,佟守正,等 (6142)
镉在土壤-金丝垂柳系统中的迁移特征	张雯,魏虹,孙晓灿,等 (6147)
马尾松人工林近自然化改造对植物自然更新及物种多样性的影响	罗应华,孙冬婧,林建勇,等 (6154)
濒危海草贝克喜盐草的种群动态及土壤种子库——以广西珍珠湾为例	邱广龙,范航清,李宗善,等 (6163)
毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮对凝结水形成和蒸发的影响	尹瑞平,吴永胜,张欣,等 (6173)
塔里木河上游灰胡杨种群生活史特征与空间分布格局	韩路,席琳乔,王家强,等 (6181)
短期氮素添加和模拟放牧对青藏高原高寒草甸生态系统呼吸的影响	宗宁,石培礼,蒋婧,等 (6191)
松嫩平原微地形下土壤水盐与植物群落分布的关系	杨帆,王志春,王云贺,等 (6202)

广州大夫山雨季林内外空气 TSP 和 PM _{2.5} 浓度及水溶性离子特征	肖以华,李 炯,旷远文,等 (6209)
马鞍列岛岩礁生境鱼类群落结构时空格局	汪振华,赵 静,王 凯,等 (6218)
黄海细纹狮子鱼种群特征的年际变化	陈云龙,单秀娟,周志鹏,等 (6227)
三种温带森林大型土壤动物群落结构的时空动态	李 娜,张雪萍,张利敏 (6236)
笔管榕榕小蜂的群落结构与物种多样性	陈友铃,陈晓倩,吴文珊,等 (6246)
海洋生态资本理论框架下的生态系统服务评估	陈 尚,任大川,夏 涛,等 (6254)
中国地貌区划系统——以自然保护区体系建设为目标	郭子良,崔国发 (6264)
生态植被建设对黄土高原农林复合流域景观格局的影响	易 扬,信忠保,覃云斌,等 (6277)
华北农牧交错带农田-草地景观镶嵌体土壤水分空间异质性	王红梅,王仲良,王 堃,等 (6287)
中国北方春小麦生育期变化的区域差异性与气候适应性	俄有浩,霍治国,马玉平,等 (6295)
中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应	盛茂银,刘 洋,熊康宁 (6303)
气候变化对东北沼泽湿地潜在分布的影响	贺 伟,布仁仓,刘宏娟,等 (6314)
内蒙古不同类型草地土壤氮矿化及其温度敏感性	朱剑兴,王秋风,何念鹏,等 (6320)
黑河中游荒漠绿洲区土地利用的土壤养分效应	马志敏,吕一河,孙飞翔,等 (6328)
成都平原北部水稻土重金属含量状况及其潜在生态风险评价	秦鱼生,喻 华,冯文强,等 (6335)
大西洋中部延绳钓黄鳍金枪鱼渔场时空分布与温跃层的关系	杨胜龙,马军杰,张 禹,等 (6345)
夏季台湾海峡南部海域上层水体的生物固氮作用	林 峰,陈 敏,杨伟锋,等 (6354)
北长山岛森林乔木层碳储量及其影响因子	石洪华,王晓丽,王 媛,等 (6363)
植被类型变化对长白山森林土壤碳矿化及其温度敏感性的影响	王 丹,吕瑜良,徐 丽,等 (6373)
油松遗传结构与地理阻隔因素的相关性	孟翔翔,狄晓艳,王孟本,等 (6382)
基于辅助环境变量的土壤有机碳空间插值——以黄土丘陵区小流域为例	文 雯,周宝同,汪亚峰,等 (6389)
基于生命周期视角的产业资源生态管理效益分析——以虚拟共生网络系统为例	施晓清,李笑诺,杨建新 (6398)
生态脆弱区贫困与生态环境的博弈分析	祁新华,叶士琳,程 煜,等 (6411)
“世博”背景下上海经济与环境的耦合演化	倪 尧,岳文泽,张云堂,等 (6418)



封面图说: 毛乌素沙地南缘沙丘的生物结皮——生物土壤结皮广泛分布于干旱和半干旱区,它的形成和发育对荒漠生态系统生态修复过程产生重要的影响。组成生物结皮的藻类、苔藓和地衣是常见的先锋植物,它们不仅能在严重干旱缺水、营养贫瘠恶劣的环境中生长、繁殖,并且能通过其代谢方式影响并改变环境。其中一个重要的特点是,生物结皮表面的凝结水显著大于裸沙。研究表明,凝结水是除降雨之外最重要的水分来源之一,在水分极度匮乏的荒漠生态系统,它对荒漠生态系统结构、功能和过程的维持产生着重要的影响。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201306091495

张雯, 魏虹, 孙晓灿, 顾艳文. 镉在土壤-金丝垂柳系统中的迁移特征. 生态学报, 2013, 33(19): 6147-6153.

Zhang W, Wei H, Sun X C, Gu Y W. Transfer characteristics of cadmium from soil to *Salix × aureo-pendula*. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6147-6153.

镉在土壤-金丝垂柳系统中的迁移特征

张 雯, 魏 虹*, 孙晓灿, 顾艳文

(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)

摘要:以金丝垂柳为试验对象, 采用盆栽试验方式, 设置无植物和金丝垂柳两组试验, 分别对两组试验的土壤做梯度浓度 Cd 处理: 0(无镉处理)、2(低浓度处理)、20(中浓度处理)、80(高浓度处理) mg/kg 土壤干重, 无植物组各处理分别定义为 CK(无镉处理)、L(低浓度处理)、M(中浓度处理)、H(高浓度处理), 金丝垂柳组各处理分别定义为 CKP(无镉处理)、LP(低浓度处理)、MP(中浓度处理)、HP(高浓度处理)。通过对土壤中各形态 Cd 含量及金丝垂柳叶、韧皮部、木质部、根部的 Cd 含量测定, 分析了金丝垂柳及不同浓度 Cd 处理对土壤中中性交换态、螯合态和残渣态 Cd 含量的影响, 并评价了富集指数(BCF)、转移系数(TF)和生物有效性(BF), 明确了 Cd 在土壤-金丝垂柳系统中的转移特征及金丝垂柳对土壤中 Cd 的清除效果。结果表明: (1) 金丝垂柳对土壤中中性交换态、有效态 Cd 含量及总 Cd 量的降低具有极显著影响, HP 组与无植物 H 组相比, 中性交换态及有效态 Cd 含量分别降低了 52.73%、25.34%, MP、HP 组与对应的无植物处理组的总 Cd 量相比分别降低了 11.33%、13.89%; (2) 金丝垂柳各处理组的 Cd 积累量随 Cd 处理浓度的增加和处理时间的延长而增加, 处理 90 d 后, HP 处理中木质部和根部的 Cd 含量可达 170.64 mg/kg、212.49 mg/kg; (3) 各浓度 Cd 处理下, 金丝垂柳各部位生物富集系数呈根>木质部>韧皮部、叶, 且随着 Cd 处理浓度的增加而显著降低, 随处理时间的延长而升高; 与 40 d 相比, 90 d 时 LP 组叶的生物富集系数增加了 6.90 倍, 增幅最大。 (4) 各部分转移系数均随处理时间的延长而降低, 90 d 时 LP、MP 的转移系数分别比 40 d 时的结果低 47.94%、41.34%。 (5) 金丝垂柳 LP、HP 组土壤 Cd 的生物有效性显著低于相应的无植物处理 L、H 组, 分别低 70.73%、88.46%, MP 组与 M 组无显著差异。研究结果表明, 金丝垂柳能有效地吸收土壤中的有效态 Cd, 降低土壤中 Cd 的生物有效性及总 Cd 量, 提高土壤的安全性, 并能将吸收的 Cd 有效地转移至地上部分, 尤其是木质部储存。随着植株不断生长, 生物量的增加, 金丝垂柳可有效地清除土壤中的 Cd, 适用于对 Cd 污染地区进行长期植物修复。

关键词: 金丝垂柳; 镉污染; 生物有效性; 木本植物修复

Transfer characteristics of cadmium from soil to *Salix × aureo-pendula*

ZHANG Wen, WEI Hong*, SUN Xiaocan, GU Yanwen

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

Abstract: Cadmium (Cd) is one of the most phytotoxic of the heavy metals, as Cd is highly water soluble and readily taken up by plants. It easily enters the food chain, and can be a serious threat to human health. Heavy metal soil contamination has become an environmental concern throughout China over the past decade. The acreage of arable lands contaminated with heavy metals such Cd, As, Cr, and Pb has been increasing in recent years, now totaling 2×10^7 hm² or about 1/5 of the country's arable land. Phytoremediation is a powerful technique for using growing plants to extract toxic metals from contaminated soil. However more information is needed concerning the optimum plant species, particularly for Cd contaminated soils. *Salix × aureo-pendula* is a fast-growing native riparian plant which has a high biomass, potential flood tolerance, and eurytopic to habitat. To determine the transfer characteristics of Cd from soil to *S. × aureo-pendula*, a microcosm experiment was conducted. Two groups of four treatments, with or without plants, were established with 5

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201004039); 重庆市基础与前沿研究计划重点项目(CSTC2013JJB00004); 重庆市自然科学基金项目(CSTC2012jjA8003); 中央高校基本科研业务费专项资金(XDJK2013A011)

收稿日期: 2013-06-09; **修订日期:** 2013-07-25

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

replicates per treatment for non-plant group, and 15 replicates for plant group. P referred to 'plant' *S. × aureo-pendula* (CKP, LP, MP, HP), where CK, L, M and H represent the control (0), low (2), medium (20), and high (80) treatments of Cd in mg/kg of soil dry weight. Soil and plant tissues were analyzed for various forms of Cd, the neutral exchange form of Cd concentration was extracted by CaCl_2 , the chelate form of Cd concentration was extracted by chelant DTPA, and residual fractions of Cd in soils were tested. These measurements were used to determine the effect of *S. × aureo-pendula* and different treatments of Cd on bioavailable and total Cd in soil, and also Cd accumulation in the leaf, root, xylem and phloem in the plant treatments. *Bio-concentration factor (BCF)*, *translocation factor (TF)*, and *bioavailability factor (BF)* were calculated as indicators of the translocation and accumulation capability. The results showed: 1. *S. × aureo-pendula* significantly decreased the content of bio-available Cd, total Cd, and the bioavailability factor of Cd in soil. The neutral exchange form and available Cd concentrations decreased 52.73 % and 25.34 % respectively in HP compared to H. The total Cd concentrations of MP, HP significantly decreased by 11.33 % and 13.89 % respectively compared to M, H. 2. The Cd concentration in all tissues of *S. × aureo-pendula* increased with greater Cd treatments. After 90 d's treatment, Cd concentrations reached 170.64 mg/kg and 212.49 mg/kg in xylem and root respectively in HP. 3. Under increasing concentrations of Cd, the *BCF* in measured parts of *S. × aureo-pendula* decreased significantly, but opposite results occurred with prolonged treatment. LP-*BCF* increased 6.9 times from the 40 d to 90 d measurement. 4. *TF* increased under lower treatments of Cd. The 90 d *TF* for LP, MP was 47.94 % and 41.34 % respectively, which was lower than the 40 d measurement. 5. Cd bioavailability in LP and HP was 70.73 % and 88.46 % lower than in corresponding non-plant treatments L, H. There was no significant difference between MP and M. In summary, this study has shown that *S. × aureo-pendula* could effectively translocate bioavailable Cd to the trunk and crown for storage, particularly concentrating in the xylem tissues. These results determined that *S. × aureo-pendula* is suitable for long-term phytoremediation of Cd contaminated areas to improve soil security. *S. × aureo-pendula* is a promising phytoremediation candidate for Cd contaminated areas.

Key Words: *Salix × aureo-pendula*; Cd pollution; bioavailability; phytoremediation by woody species

Cd 是毒性最强的重金属之一,因其易水溶、有效态含量较高,极易被植物吸收从而进入食物链,因此对人体健康造成了巨大威胁^[1]。工业排污、交通废气及农耕作业对农林土壤和城市土壤造成了不同程度的 Cd 污染^[2-3],目前我国重金属污染的土壤总面积已达 $2 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占全国耕地面积的 1/5^[4],可见其治理工作相当紧迫。传统的物理、化学修复方法存在资金、劳动力成本高,破坏土壤理化性质,易造成二次污染等弊端^[5]。与之相比,植物修复^[6-7](Phytoremediation)通过利用植物吸收土壤的有机物及重金属等污染物,转运到地上部分储存,降低污染物浓度,从而提高土壤安全性,被认为是一种廉价、安全的重金属修复技术。

近 20 年植物修复重金属污染得到了很高的关注,研究者们针对适合植物的筛选做了大量研究,得到了 *Thlaspi caerulescens*^[8]、黑麦草(*Lolium perenne*)^[9]、龙葵(*Solanum Nigrum* L.)^[10]、孔雀草(*Tagetes patula*)^[11]等许多具有重金属高富集能力的草本植物。研究筛选出的草本植物特别是超富集植物的重金属富集量较大,但由于其生物量小,根系不够发达,对重金属的绝对富集量及深层土壤的修复受到限制,且草本植物相对于木本植物生长周期短,需要收割与重新栽种,人工耗费更大^[12]。而木本植物则具有相对生物量大、生长速度快、根系发达、蒸腾作用大、富集和耐受性强、对贫瘠土壤更好的适应性等优势^[13-14],具有更大的重金属修复潜力。目前针对木本植物的研究较少,且多只对木本植物的富集能力以及胁迫下的生理响应做出评价^[15-16],未综合考虑植物的富集能力以及对土壤中重金属产生的影响,从整个土壤-植物系统综合地对修复效果做出评价。

金丝垂柳(*Salix × aureo-pendula*)为杨柳科柳属速生乔木,根系发达、生长速度快、适应性广、耐水淹^[17]。已有孙晓灿^[18]等人的研究表明,金丝垂柳幼苗对较低浓度的 Cd 胁迫具有较好的适应性,但其修复能力缺乏进一步研究。本文以金丝垂柳为研究对象,采用盆栽试验方式,设置梯度浓度 Cd 胁迫,测定了土壤中各形态的 Cd 含量以及在金丝垂柳各组织中的 Cd 含量,并评价了富集指数、转移系数和生物有效性指数,旨在探究 Cd 在土壤-金丝垂柳体系中的迁移特征,明确金丝垂柳对土壤中 Cd 的清除效果,评价其是否能提高土壤安全性,对土壤中的 Cd 进行植物修复。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2011 年 5 月从重庆市綦江苗圃基地选取金丝垂柳扦插条移栽入内径 15 cm、高 20 cm 的钵中,每钵 1 株。钵中装入经

风干后过 5 mm 筛的紫色土 4 kg,土壤基本理化性质见表 1。经 50 d 培养适应,待扦插条生根长成完整的植株。选取无植物土壤 20 盆及长势基本一致的金丝垂柳 60 盆,采取一次性浇灌的方式向 2 组盆钵的土壤中加入 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$,分别设置 Cd 浓度梯度为 0(无镉处理)、2(低浓度处理)、20(中浓度处理)、80(高浓度处理) mg/kg 土壤干重,无植物组各处理定义为无镉处理(CK)、低浓度处理(L)、中浓度处理(M)、高浓度处理(H),金丝垂柳组各处理定义为无镉处理(CKP)、低浓度处理(LP)、中浓度处理(MP)、高浓度处理(HP),无植物组各处理 5 个重复,金丝垂柳组各处理 15 个重复。所有盆钵置于西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室试验基地大棚下进行培养,试验期间进行常规田间管理。自试验处理之日算起,0、40 和 90 d 分别从金丝垂柳组各抽取 5 个重复对植物进行测定,试验结束时对两组 8 个处理的土壤进行测定。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 The basic physico-chemical characteristics of soils

pH	有机质 Organic matter / %	全氮 Total N / (g/kg)	全磷 Total P / (g/kg)	全钾 Total K / (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 Cd Total Cd / (mg/kg)	有效 Cd Available Cd / (mg/kg)
7.18	2.52	1.41	1.01	17.82	132.82	31.72	129.54	0.15	0.03

1.2 测定指标及方法

1.2.1 Cd 含量测定

收获植物全株,用 20 mmol EDTA- Na_2 浸泡 5 min 以除去表面吸附的 Cd 离子,而后迅速用超纯水冲洗干净,再用滤纸吸干植株表面多余的水分。将金丝垂柳分叶、韧皮部、木质部、根 4 部分,分别放入 80 °C 烘箱中烘至恒重后称得干重(DW)。将烘制好的各部分材料研磨碾细后装袋密封保存,待 3 次取样完成后一次性测量。各部分精确称取样品 0.2000 g 干样在 ETHOS A/269 微波仪(Milestone, Italy)中经双酸(6 mL HNO_3 、2 mL H_2O_2)消解后,采用 TAS-990 原子吸收分光光度计(北京普析,中国)进行 Cd 含量测定,Cd 含量表示成 mg/kg 干重。

经 3 次植物取样完毕后,取金丝垂柳和无植物 2 个处理组盆钵中的土壤,自然风干,滤过杂物,用木棒研磨后过 1 mm 尼龙网筛,采用简单连续提取法^[19]测定土壤中 Cd 各形态含量;分别用 CaCl_2 提取中性交换态,螯合剂 DTPA 提取螯合态 Cd^[20],最终用强酸溶解残渣提取残渣态,3 种不同形态的 Cd 含量均采用原子吸收分光光度计石墨炉法测定。

1.2.2 评价指数计算

利用金丝垂柳各部分的 Cd 含量进行生物富集系数(BCF)和转移系数(TF)计算,用以评价各部分对 Cd 的积累能力和土壤根系将 Cd 向地上部分转移的能力,公式如下:

生物富集系数^[21](BCF) = 根或地上部分 Cd 浓度(mg/kg 干重) / 土壤中 Cd 浓度(mg/kg 干重);

转移系数^[22](TF) = 地上部分平均 Cd 浓度(mg/kg 干重) / 根部平均 Cd 含量(mg/kg 干重)。

Cd 的生物有效性^[22](BF)即可被生物体吸收利用形态的 Cd 含量在土壤 Cd 总量中所占比例,公式如下:

土壤 Cd 生物有效性指数(BF) = (中性交换态 Cd 含量 + 螯合态 Cd 含量) / Cd 总量

1.2.4 数据分析

利用统计分析软件 SPSS 19.0 和 Excel 2003 进行数据处理。运用单因素方差分析(One-way ANOVA)分析不同浓度 Cd 处理对金丝垂柳各部分 Cd 积累量及土壤中各种形态 Cd 含量的影响,双因素方差分析(Two-way ANOVA)分析金丝垂柳和不同处理浓度对土壤中 Cd 形态和土壤生物有效性指数的影响。用 Duncan 多重比较(Duncan's multiple range test)检验各处理之间积累量的差异。采用 Origin 8.5 作图分析。

2 试验结果

2.1.1 金丝垂柳对土壤中 Cd 形态的影响

不同浓度处理对 8 个不同组合处理组土壤中的 Cd 形态具有极显著影响(表 2),土壤中 Cd 的生物有效态、残渣态和总 Cd 量均随处理浓度的增加而显著增加,说明被污染土壤中 Cd 含量越高,生物可摄取的 Cd 含量越高,风险越大。经 90 d 处理后,与无植物组相比,金丝垂柳各 Cd 浓度处理组土壤中总 Cd 量均呈下降趋势,MP、HP 组差异显著。Cd 的生物有效态同样呈下降趋势,金丝垂柳 HP 组生物有效态含量为无植物 H 组的 74.66%,差异显著,LP、MP 与相应的无植物处理组之间则无显著差异。金丝垂柳组中性交换态与螯合态 Cd 含量基本低于无植物组,HP 组与 H 组之间具有显著差异。与无植物组相比,金丝垂柳 MP、HP 组残渣态 Cd 含量均降低,LP 组呈上升趋势,差异均不显著。从双因素方差分析结果可知,金丝垂柳对中性提取态和生物有效态 Cd 含量以及总镉量具有极显著影响,浓度处理则对 5 个结果均有极显著影响,二者的交互效应与金丝垂柳产生的效应结果相同。

表 2 金丝垂柳对土壤中不同浓度 Cd 形态的影响

Table 2 Effects of *Salix × aureo-pendula* on Cd forms of different concentration in soils (mg/kg 干重)

处理 Treatment	中性交换态 Neutral exchange form	螯合态 Chelate form	生物有效态 Bio-available	残渣态 Residue	总镉量 Total Cd
CK	0.00±0.00 a	0.04±0.02 a	0.04±0.02 a	0.09±0.02 a	0.15±0.03 a
L	0.25±0.01 a	0.51±0.02 a	0.76±0.02 b	1.07±0.03 a	1.82±0.02 b
M	3.27±0.07 b	6.29±0.30 b	9.56±0.34 c	9.50±0.21 b	19.06±0.22 d
H	21.60±0.29 d	20.00±0.70 c	41.60±0.82 e	37.30±0.69 c	78.90±0.26 f
CKP	0.00±0.00 a	0.02±0.02 a	0.02±0.02 a	0.07±0.01 a	0.09±0.03 a
LP	0.19±0.01 a	0.28±0.01 a	0.47±0.00 b	1.15±0.05 a	1.61±0.04 b
MP	3.03±0.13 b	5.55±0.38 b	8.58±0.31 c	8.32±0.19 b	16.90±0.32 c
HP	10.21±0.95 c	20.86±0.50 c	31.06±1.08 d	36.88±1.31 c	67.94±1.24 e
植物处理 Plant treatment	**	ns	**	ns	**
浓度处理 Concentration	**	**	**	**	**
植物×浓度 Plant×Concentration	**	ns	**	ns	**

图中数值为平均值±标准误($n=5$);不同小写字母分别表示同列数据之间有显著差异($P<0.05$);**: $P<0.01$;ns: $P>0.05$;CK、L、M、H 分别代表无植物处理组无镉处理、低浓度处理、中浓度处理和高浓度处理,CKP、LP、MP、HP 分别代表金丝垂柳组无镉处理、低浓度处理、中浓度处理和高浓度处理

2.1.2 不同浓度 Cd 胁迫下金丝垂柳各部位的 Cd 积累量

金丝垂柳各组织中的 Cd 含量基本随处理时间的延长和处理 Cd 浓度的增加而增加(图 1)。处理 40 d 时,金丝垂柳各部位 Cd 积累量均随处理 Cd 浓度的增高而显著增加,3 个处理组中叶和韧皮部中镉含量比分别为 1:1.97:3.63 和 1:3.47:7.72,木质部和根部中比值分别为 1:7.38:10.07 和 1:1.72:9.21,说明在较高浓度 Cd 条件下,根部和木质部中的 Cd 含量变化程度较之于叶和韧皮部更为剧烈。

处理 90 d 时,金丝垂柳韧皮部、木质部和根部的 Cd 含量均随处理浓度的增加而显著增加,木质部和根部最高 Cd 含量分别为 170.64 mg/kg、212.49 mg/kg。叶的 Cd 含量则随胁迫程度的增加表现为先升高后下降的趋势,2 次取样相同浓度 Cd 处理的各部位均表现为根>木质部>叶、韧皮部的累积特征。

2.2 不同浓度 Cd 胁迫下金丝垂柳的转移特性

2.2.1 生物富集指数

金丝垂柳各部位在 40 d、90 d 2 次取样时生物富集系数均随处理 Cd 浓度升高而显著降低(表 3)。MP、HP 组叶部位生物富集系数较之于 LP 组分别降低 80.12%、90.68%,与其他部位的生物富集系数相比,LP 组降低幅度最大,说明相较于其他部位,叶对 Cd 的影响更为敏感。90 d 时金丝垂柳各部位生物富集系数普遍高于 40 d 时的结果,表明金丝垂柳对 Cd 的富集量会随着处理时间的延长而增加,其中 90 d 时 LP 组叶、韧皮部、木质部、根的富集系数与 40 d 相比,分别增加了 6.90、5.52、1.11、4.32 倍,较之 MP、HP 组,LP 富集系数增大效果最明显。

表 3 不同 Cd 浓度胁迫下金丝垂柳的生物富集系数

Table 3 Effects of different Cd concentrations on Bio-concentration factors (BCFs) of *S. aureo-pendula*

处理时间 Treat time/d	处理 Treatent	金丝垂柳 <i>Salix × aureo-pendula</i>			
		叶 Leaf	韧皮部 Phloem	木质部 Xylem	根 Root
40	LP	1.61±0.19 a	0.95±0.19 a	5.68±0.74 a	7.56±0.62 a
	MP	0.32±0.04 b	0.33±0.02 b	4.19±0.57 b	5.30±0.34 b
	HP	0.15±0.03 c	0.18±0.01 b	1.43±0.06 c	1.74±0.14 c
90	LP	6.72±2.22 a	6.19±0.96 a	12.01±0.49 a	40.23±3.49 a
	MP	1.31±0.40 b	1.82±0.16 b	3.51±0.42 b	8.90±0.42 b
	HP	0.20±0.05 c	0.70±0.07 c	2.13±0.12 c	2.66±0.12 c

图中数值为平均值±标准误($n=5$);不同小写字母分别表示同批次同列数据之间有显著差异($P<0.05$)

2.2.2 转移系数

金丝垂柳的转移系数在 40 d 时无显著差异,90 d 时 HP 组显著高于中低浓度处理组,分别为 LP、MP 组的 1.93、1.80 倍(图 2)。与 40 d 相比,90 d 时 LP、MP、HP 组的转移系数均降低,分别降低 47.94%、41.34%、0.28%。

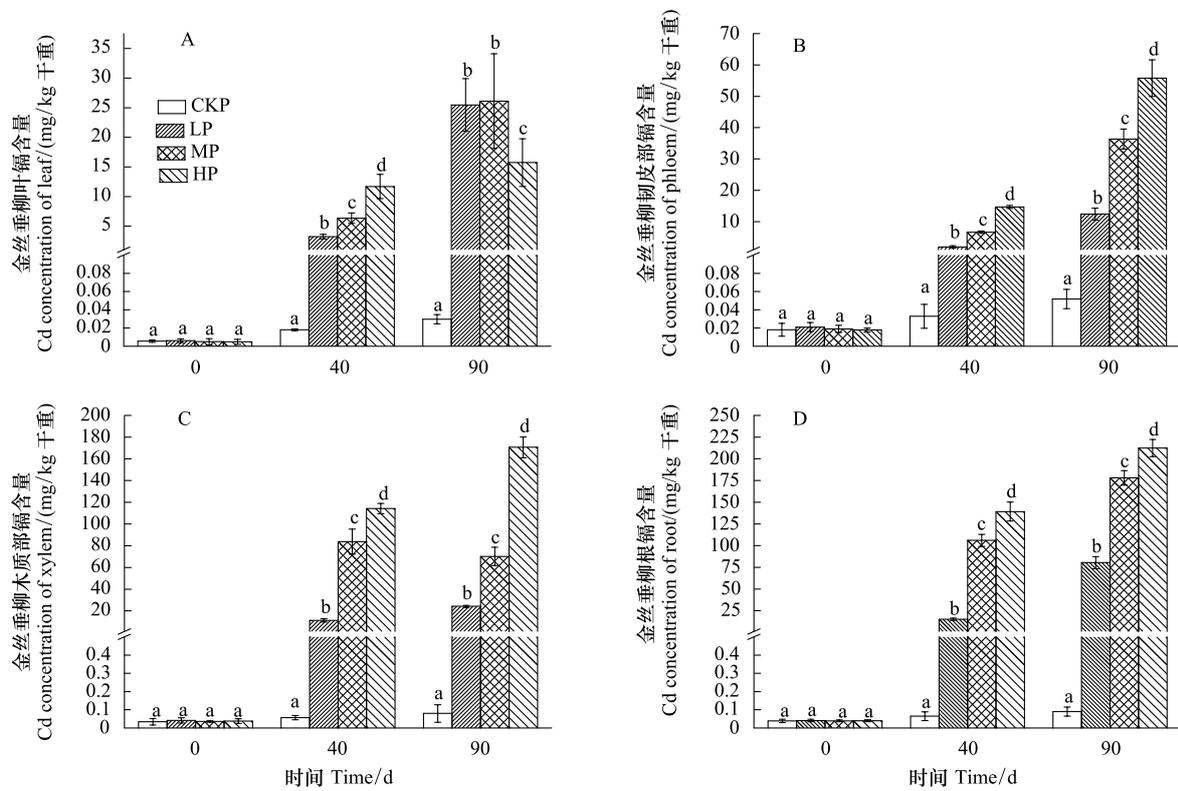


图 1 不同 Cd 浓度胁迫下金丝垂柳各部位的 Cd 累积量

Fig.1 Effects of different Cd concentration on Cd content of *Salix × aureo-pendula*

图中数值为平均值±标准误 (n=5);不同小写字母分别表示同批次各处理之间有显著差异 (P<0.05);CKP、LP、MP、HP 分别代表金丝垂柳组无镉处理、低浓度处理、中浓度处理和高浓度处理

2.2.3 土壤中 Cd 的生物有效性

金丝垂柳 LP、HP 组土壤中 Cd 的生物有效性显著低于无植物 L、H 组,分别为无植物组的 70.73%、88.46%,M 与 MP 组结果无显著差异(图 3)。金丝垂柳 LP 组结果显著低于 MP、HP,MP、HP 之间无显著差异。双因素方差分析结果表明,金丝垂柳处理和浓度处理均对生物有效应有极显著影响,二者的交互效应对其具有显著影响(结果未列出)。

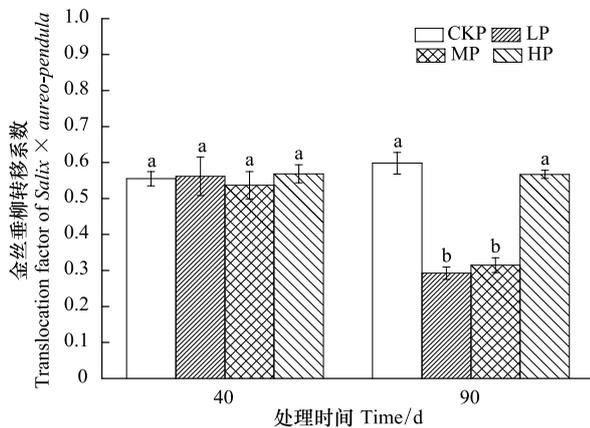


图 2 不同 Cd 浓度胁迫下金丝垂柳的转移系数

Fig.2 Effects of different Cd concentrations on translocation factors (TFs) of *S. × aureo-pendula*

图中数值为平均值±标准误 (n=5);不同小写字母分别表示同批次各处理之间有显著差异 (P<0.05)

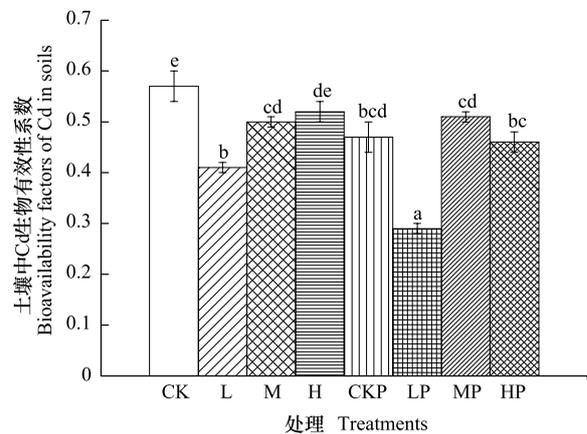


图 3 不同 Cd 浓度处理金丝垂柳和无植物土壤中 Cd 的生物有效性系数

Fig.3 Bioavailability factors (BFs) of Cd in soils with *S. × aureo-pendula* and no plant under different Cd treatments

图中数值为平均值±标准误 (n=5);不同小写字母分别表示各处理之间有显著差异 (P<0.05);CK、L、M、H 分别代表无植物处理组无镉处理、低浓度处理、中浓度处理和高浓度处理;CKP、LP、MP、HP 分别代表金丝垂柳组无镉处理、低浓度处理、中浓度处理和高浓度处理

3 讨论与结论

一般而言,土壤中 Cd 总量越高则潜在危害越大,但其生物有效性直接决定了该土壤中 Cd 的危险程度。沈阳张士灌区长期采用城市工业用水直接灌溉农田,造成该地区土壤产生严重的 Cd 污染,陈涛^[23]、吴燕玉^[24]等人的研究发现该地区水稻土壤中 Cd 活性较高,交换态 Cd 含量约占 78%,极易被水稻吸收,因此导致该地区农作物严重 Cd 超标,造成了巨大危害。植物会对其根际土壤中重金属的形态产生影响,但暂无定论。有研究认为植物可通过根际分泌物对土壤中难溶态的 Cd 进行活化来提高 Cd 的生物有效性。如李花粉^[25]等研究发现根际分泌物中的有机酸可促进难溶态 Cd 的溶解,如小麦和水稻在缺铁的情况下会从根部大量释放植物铁载体,能够活化根际难溶态的 Cd,从而影响土壤中 Cd 的形态。植物也可通过根系吸附、沉积,或者与重金属络合,降低金属离子价态来固定重金属,从而降低土壤中重金属的有效态含量^[5]。

本试验各组土壤样品中的 Cd 生物有效性指数均随处理浓度的增加而增加,说明 Cd 浓度越高,其有效态含量所占比例越大,与之前的研究结果一致^[23-24]。LP 组土壤中的 Cd 有效态含量降低,残渣态含量增加,由此可见,金丝垂柳可同时通过吸收和固定有效态 Cd 来降低土壤中 Cd 的生物有效性。双因素方差分析结果表明,金丝垂柳对降低土壤中 Cd 的生物有效性具有极显著的影响,LP、HP 组土壤中 Cd 的生物有效性均显著降低,说明金丝垂柳能有效地降低土壤中 Cd 的危害,提高土壤安全性,对 Cd 污染修复有重要意义。

从累积特性可知,金丝垂柳通过根部的吸水作用从土壤中吸收 Cd,再通过木质部中的导管运输到叶和韧皮部,因此呈现出根>木质部>叶、韧皮部的累积特征。有研究表明重金属离子通过和植物体内的蛋白质等有机物结合进入植物体内。木质部存在较多的氨基酸和有机酸,能够与重金属离子结合形成复合物,并以复合物的形式在木质部中运输^[26]。本研究表明金丝垂柳木质部中的 Cd 含量仅低于根部,具有较强的富集能力,今后的研究可通过提高木质部中有机酸等载体的方式来提高修复效率。生物量结果表明,与 CKP 组相比,Cd 胁迫会使各处理组植物干重显著下降,但不同浓度处理组之间无显著差异,表明金丝垂柳对一定浓度范围内的 Cd 具有较好的耐受性。

富集指数和转移系数可反映出植物对重金属吸收、积累能力。本试验中金丝垂柳各部位的富集指数随处理浓度的升高而下降,转移系数也随着处理时间的延长而降低,这可能是由于胁迫浓度的增加使根细胞活力下降致使吸收、转移能力受限所致,与之前孔雀草 (*Tagetes patula*)^[27]和胡杨 (*Populus euphratica*)^[28]的研究结果一致。Robinson 等人发现杨树 *Beaupré* (*Populus trichocarpa* × *Populus deltoides*) 组织中最高 Cd 积累量高达 209 mg/kg^[29],有研究表明短期轮作矮林 (Short rotation coppice) 8 种柳树对重金属污染土壤原地修复的移除平均水平可达到 72 g Cd 和 2.0 kg Zn hm⁻² a⁻¹,对被污染土壤的修复效果远远高于种植于相同土壤的玉米和油菜等草本植物^[30]。与之前的研究结果相似,本试验中随着处理时间的延长,金丝垂柳各部分的富集指数均上升,Cd 富集量增加,HP 处理组木质部和根部的 Cd 含量可达 170.64 mg/kg、212.49 mg/kg。通过对金丝垂柳各部分生物量 (数据未给出) 及 Cd 含量的计算可得,与三级土壤^[31] Cd 浓度相近的 LP 组每盆金丝垂柳转移 Cd 含量可达 0.019 mg,LP 组土壤中 Cd 含量为 8 mg,即根对土壤中 Cd 的转移率可到 0.23%,植株整体对 Cd 的吸收量可达土壤中 Cd 含量的 0.41%,与李佳华等人的研究结果一致^[32]。以上数据仅表示试验期间,即 90 d 内金丝垂柳对土壤中 Cd 的清除效果。随着金丝垂柳的生长,生物量增大,其对土壤中 Cd 的吸收量和转移量都会增加,能够更大程度上清除土壤中的 Cd。以上的结果均表明金丝垂柳的富集能力虽达不到超富集植物的富集水平,但综合其生物量,长期吸收、转移,对土壤中的 Cd 具有可观的清除效果。

总体而言,金丝垂柳通过根对土壤中有效态的 Cd 进行吸收,或者同时进行固定,使土壤中有效态的 Cd 含量降低,降低土壤 Cd 的生物有效性,再通过木质部的导管将吸收的 Cd 转运到叶、韧皮部进行隔离储存,从而使其地上部分的 Cd 积累量增加。处理浓度越高,土壤中有效态的 Cd 含量越高,因此金丝垂柳的 Cd 积累量随胁迫浓度的升高和时间的延长而增加,且生物量在试验中的处理 Cd 浓度范围内不受明显影响。由于金丝垂柳木质部的富集能力较高,其生物量的增大有利于 Cd 的富集,所以适于长期种植进行重金属污染修复。

References:

- [1] DalCorso G, Farinati S, Maistri S, Furini A. How plants cope with cadmium: staking all on metabolism and gene expression. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2008, 50(10): 1268-1280.
- [2] Zhang Y Y, Sun H, Gao M, Sun C W, Wang J K. Pollution level and bioavailability of heavy metals in ginseng soil Jilin province. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(6): 1306-1313.
- [3] Fang X, Tang Z J, Tian D L, Xiang W H, Sun W J. Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(23): 7595-7606.
- [4] Willey N. *Phytoremediation: Methods and Reviews*. Tang S R, Translation. Totowa, New Jersey: Humana Press, 2007: 351-379.
- [5] Hazrat A, Ezzat K, Muhammad A S. Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications. *Chemosphere*, 2013, 91(7): 869-881.
- [6] David E S, Blaylock M, Kumar N P B A, Dushenkov V, Ensley B D, Chet I, Raskin I. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Nature Biotechnology*, 1995, 13(5): 468-474.
- [7] Zhang C X, Chen W F. Physiological-ecological responses of *Iris germanica* L. to Cd stress and its accumulation of Cd. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(7): 2165-2172.
- [8] Baker A J M, Proctor J. The influence of cadmium, copper, lead, and zinc on the distribution and evolution of metallophytes in the British Isles.

- Plant Systematics and Evolution, 1990, 173(1/2): 91-108.
- [9] Wang K, Huang H G, Zhu Z Q, Li T Q, He Z L, Yang X E, Alva A. Phytoextraction of metals and rhizoremediation of PAHs in Co-contaminated soil by Co-planting of *sedum alfredii* with ryegrass (*Lolium perenne*) or castor (*Ricinus communis*). International Journal of Phytoremediation, 2013, 15(3): 283-298.
- [10] Wei S H, Clark G, Augustine Ignatius Doronila, Jin L, Alison Carol Monsanto. Cd hyperaccumulative characteristics of Australia ecotype *Solanum nigrum* L. and its implication in screening hyperaccumulator. International Journal of Phytoremediation, 2013, 15(3): 199-205.
- [11] Wei J L, Lai H Y, Chen Z S. Chelator effects on bioconcentration and translocation of cadmium by hyperaccumulators, *Tagetes patula* and *Impatiens walleriana*. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, 84: 173-178.
- [12] Cook R L, Hesterberg D. Comparison of trees and grasses for rhizoremediation of petroleum hydrocarbons. International Journal of Phytoremediation, 2013, 15(9): 844-860.
- [13] Pulford I D, Watson C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees—a review. Environment International, 2003, 29(4): 529-540.
- [14] Wuana R A, Okieimen F E. Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. ISRN Ecology, 2011, 2011: Article ID 402647, doi: 10.5402/2011/402647.
- [15] Zacchini M, Pietrini F, Mugnozza G S, Iori V, Pietrosanti L, Massacci A. Metal tolerance, accumulation and translocation in poplar and willow clones treated with cadmium in hydroponics. Water, Air, and Soil Pollution, 2009, 197(1/4): 23-34.
- [16] Jia Z M, Wei H, Sun X C, Li C X, Meng X F, Xie X H. Accumulation and tolerance of *Salix variegata* and *Pterocarya stenoptera* seedlings to cadmium. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(1): 107-114.
- [17] Xu A C, Chen Y T, Wang S F, Wu T L. Preliminary research on cadmium uptake, accumulation and tolerance in *Salix*. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(5): 96-100.
- [18] Sun X C, Wei H, Tian X F, Jia Z M. Effects of cadmium stress on growth and chlorophyll fluorescence characteristics of *Salix × aureo-pendula* seedlings. Guihaia, 2011, 31(4): 490-494.
- [19] Maiz I, Arambarri I, Garcia R, Millán E. Evaluation of heavy metal availability in polluted soils by two sequential extraction procedures using factor analysis. Environmental Pollution, 2000, 110(1): 3-9.
- [20] Tie M, Song L L, Hui X J, Zhang Z H, Xue S, Chen Z L, Wang J, Zhang Y. The available forms and bioavailability of heavy metals in soil amended with sewage sludge. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2173-2181.
- [21] Islam Md S, Ueno Y, Sikde Md T, Kurasaki M. Phytoremediation of arsenic and cadmium from the water environment using *Micranthemum umbrosum* (J.F. Gmel) S.F. Blake As A Hyperaccumulator. International Journal of Phytoremediation, 2013, 15(10): 1010-1021.
- [22] Park S, Kim K S, Kang D, Yoon H, Sung K. Effects of humic acid on heavy metal uptake by herbaceous plants in soils simultaneously contaminated by petroleum hydrocarbons. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(8): 2375-2384.
- [23] Chen T, Wu Y Y, Kong Q X, Tan F. Study on cadmium forms in soils in Zhang-shi irrigation area. Acta Ecologica Sinica, 1985, 5(4): 300-305.
- [24] Wu Y Y, Chen T, Zhang X X. Pollution ecology of Cd in the Zhangshi irrigation area of Shenyang. Acta Ecologica Sinica, 1989, 9(1): 21-26.
- [25] Li H F, Zheng Z Y, Zhang F S, Mao D R. Effect of iron untritional status on the uptake of Cd from different compounds by wheat plants. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(2): 170-173.
- [26] Furini A, DalCorso G, Manara A, Fasani E, Nesler A. Plants and Heavy Metals. Netherlands; Springer, 2012: 27-53.
- [27] Liu Y T, Chen Z S, Hong C Y. Cadmium-induced physiological response and antioxidant enzyme changes in the novel cadmium accumulator, *Tagetes patula*. Journal of Hazardous Materials, 2011, 189(3): 724-731.
- [28] Sun J, Wang R G, Zhang X, Yu Y C, Zhao R, Li Z Y, Chen S L. Hydrogen sulfide alleviates cadmium toxicity through regulations of cadmium transport across the plasma and vacuolar membranes in *Populus euphratica* cells. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 65: 67-74.
- [29] Robinson B H, Mills T M, Petit D, Fung L E, Green S R, Clothier B E. Natural and induced cadmium-accumulation in poplar and willow: Implications for phytoremediation. Plant and Soil, 2000, 227(1/2): 301-306.
- [30] van Slycken S, Witters N, Meiresonne L, Meers E, Ruttens A, van Peteghem P, Weyens N, Tack F M G, Vangronsveld J. Field evaluation of willow under short rotation coppice for phytomanagement of metal-polluted agricultural soils. International Journal of Phytoremediation, 2013, 15(7): 677-689.
- [31] State Environmental Protection Administration. GB/T 15618—1995 Environmental Quality Standard for Soils. Beijing: China standard Press, 1995.
- [32] Li J H, Sun Y Y, Yin Y, Ji R, Wu J C, Wang X R, Guo H Y. Ethyl lactate-EDTA composite system enhances the remediation of the cadmium-contaminated soil by Autochthonous Willow (*Salix × aureo-pendula* CL ‘J1011’) in the lower reaches of the Yangtze River. Journal of Hazardous Materials, 2010, 181: 673-678.

参考文献:

- [2] 张亚玉, 孙海, 高明, 孙长伟, 王景宽. 吉林省人参土壤中重金属污染水平及生物有效性研究. 土壤学报, 2011, 48(6): 1306-1313.
- [3] 方晰, 唐志娟, 田大伦, 项文化, 孙伟军. 长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险. 生态学报, 2012, 32(23): 7595-7606.
- [7] 张呈祥, 陈为峰. 德国鸢尾对 Cd 胁迫的生理生态响应及积累特性. 生态学报, 2013, 33(7): 2165-2172.
- [16] 贾中民, 魏虹, 孙晓灿, 李昌晓, 孟翔飞, 谢小红. 秋华柳和枫杨幼苗对镉的积累和耐受性. 生态学报, 2011, 31(1): 107-114.
- [17] 徐爱春, 陈益泰, 王树凤, 吴天林. 柳树对 Cd 吸收、积累和耐性的初步研究. 环境科学研究, 2006, 19(5): 96-100.
- [18] 孙晓灿, 魏虹, 田晓锋, 贾中民. 镉胁迫对金丝垂柳幼苗生长及叶绿素荧光特性的影响. 广西植物, 2011, 31(4): 490-494.
- [20] 铁梅, 宋琳琳, 惠秀娟, 张朝红, 薛爽, 陈忠林, 王杰, 张莹. 施污土壤重金属有效态分布及生物有效性. 生态学报, 2013, 33(7): 2173-2181.
- [23] 陈涛, 吴燕玉, 孔庆新, 谭方. 张士灌区土壤中镉形态的探讨. 生态学报, 1985, 5(4): 300-305.
- [24] 吴燕玉, 陈涛, 张学询. 沈阳张士灌区镉污染生态的研究. 生态学报, 1989, 9(1): 21-26.
- [25] 李花粉, 郑志宇, 张福锁, 毛达如. 铁对小麦吸收不同形态镉的影响. 生态学报, 1999, 19(2): 170-173.
- [31] 国家环境保护局. GB/T 15618—1995 土壤环境质量标准. 北京: 中国标准出版社, 1995.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.19 Oct. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

- A review of ecosystem services and research perspectives MA Fengjiao, LIU Jintong, A. Egrinya Eneji (5963)
- Sexual interference in non-human primates YANG Bin, WANG Chengliang, JI Weihong, et al (5973)
- Density-dependent effect on reproduction of rodents; a review HAN Qunhua, GUO Cong, ZHANG Meiwen (5981)
- Proximate and ultimate determinants of food chain length WANG Yuyu, XU Jun, LEI Guangchun (5990)
- Mechanism of biological control to plant diseases using arbuscular mycorrhizal fungi
..... LUO Qiaoyu, WANG Xiaojuan, LI Yuanyuan, et al (5997)
- Advances in effects of conservation tillage on soil organic carbon and nitrogen
..... XUE Jianfu, ZHAO Xin, Shadrack Batsile Dikgwatlhe, et al (6006)
- Habitat selection of the pre-released giant panda in Wolong Nature Reserve
..... ZHANG Mingchun, HUANG Yan, LI Desheng, et al (6014)
- Activity rhythm and behavioral time budgets of wild Reeves's Pheasant (*Syrmaticus reevesii*) using infrared camera
..... ZHAO Yuze, WANG Zhichen, XU Jiliang, et al (6021)
- The energy budget of tree sparrows *Passer montanus* in wind different speed and duration
..... YANG Zhihong, WU Qingming, DONG Haiyan, et al (6028)
- Nest site characteristics of *Petaurista caniceps* in Baima Snow Mountain Nature Reserve
..... LI Yanhong, GUAN Jinke, LI Dayong, HU Jie (6035)
- Effects of habitat fragmentation on the genetic diversity of *Pachycondyla luteipes* on islands in the Thousand Island Lake, East
China LUO Yuanyuan, LIU Jinliang, HUANG Jieliang, et al (6041)
- The molecular genetic relationship between the pollinators of *Ficus pumila* var. *pumila* and *Ficus pumila* var. *aukeotsang*
..... WU Wenshan, CHEN Youling, SUN Lingli, et al (6049)
- The genetic evolutionary relationships of two *Eupristina* species on *Ficus altissima*
..... CHEN Youling, SUN Lingli, WU Leilei, et al (6058)
- Metal uptake and root morphological changes for two varieties of *Salix integra* under cadmium stress
..... WANG Shufeng, SHI Xiang, SUN Haijing, et al (6065)
- Effects of phthalic acid on seed germination, membrane lipid peroxidation and osmoregulation substance of radish seedlings
..... YANG Yanjie, WANG Xiaowei, ZHAO Kang, et al (6074)
- The morphological and physiological responses of *Tamarix ramosissima* seedling to different irrigation methods in the extremely
arid area MA Xiaodong, WANG Minghui, LI Weihong, et al (6081)
- Response characteristics of photosynthetic and physiological parameters in *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* seedling leaves to soil
water in sand habitat formed from seashells WANG Rongrong, XIA Jiangbao, YANG Jihua, et al (6088)
- Effects of ceramsite mulching on soil water content, photosynthetic physiological characteristics and growth of plants
..... TAN Xuehong, GUO Xiaoping, ZHAO Tingning (6097)
- Dynamics of tannin concentration and nutrient resorption for branchlets of *Casuarina equisetifolia* plantations at different ages
..... YE Gongfu, ZHANG Shangju, ZHANG Lihua, et al (6107)
- Sulfur contents in leaves and branches of dominant species among the three forest types in the Pearl River Delta
..... PEI Nancai, CHEN Bufeng, ZOU Zhijin, et al (6114)
- Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus on growth dynamics of *Bauhinia faberi* seedlings
..... SONG Chengjun, QU Laiye, MA Keming, et al (6121)
- Characteristics of ion accumulation and seed germination for seeds from plants cultured at different concentrations of nitrate
nitrogen and salinity ZHOU Jiachao, FU Tingting, ZHAO Weiwei, et al (6129)
- Physio-ecological effects of endophyte infection on the host grass with elevated CO₂
..... SHI Zhibing, ZHOU Yong, LI Xia, et al (6135)
- Effects of pretreatment on germination of *Typha domingensis* and *Phragmites australis*
..... MENG Huan, WANG Xuehong, TONG Shouzheng, et al (6142)
- Transfer characteristics of cadmium from soil to *Salix × aureo-pendula* ZHANG Wen, WEI Hong, SUN Xiaocan, et al (6147)
- Effect of Close-to-Nature management on the natural regeneration and species diversity in a masson pine plantation
..... LUO Yinghua, SUN Dongjing, LIN Jianyong, et al (6154)
- Population dynamics and seed banks of the threatened seagrass *Halophila beccarii* in Pearl Bay, Guangxi
..... QIU Guanglong, FAN Hangqing, LI Zongshan, et al (6163)
- Effects of biological crusts on dew deposition and evaporation in the Southern Edge of the Mu Us Sandy Land, Northern China
..... YIN Ruiping, WU Yongsheng, ZHANG Xin, et al (6173)
- Life history characteristics and spatial distribution of *Populus pruinosa* population at the upper reaches of Tarim River
..... HAN Lu, XI Linqiao, WANG Jiaqiang, et al (6181)
- Interactive effects of short-term nitrogen enrichment and simulated grazing on ecosystem respiration in an alpine meadow on the
Tibetan Plateau ZONG Ning, SHI Peili, JIANG Jing, et al (6191)

- The correlation between soil water salinity and plant community distribution under micro-topography in Songnen Plain YANG Fan, WANG Zhichun, WANG Yunhe, et al (6202)
- Comparison of TSP, PM_{2.5} and their water-soluble ions from both inside and outside of Dafushan forest park in Guangzhou during rainy season XIAO Yihua, LI Jiong, KUANG Yuanwen, et al (6209)
- Fish community ecology in rocky reef habitat of Ma'an Archipelago II. Spatio-temporal patterns of community structure WANG Zhenhua, ZHAO Jing, WANG Kai, et al (6218)
- Interannual variation in the population dynamics of snailfish *Liparis tanakae* in the Yellow Sea CHEN Yunlong, SHAN Xiujuan, ZHOU Zhipeng, et al (6227)
- Spatial and temporal variation of soil macro-fauna community structure in three temperate forests LI Na, ZHANG Xueping, ZHANG Limin (6236)
- Community structure and species biodiversity of fig wasps in syconia of *Ficus superba* Miq. var. *japonica* Miq. in Fuzhou CHEN Youling, CHEN Xiaoqian, WU Wenshan, et al (6246)
- Marine ecological capital: valuation methods of marine ecosystem services CHEN Shang, REN Dachuan, XIA Tao, et al (6254)
- Geomorphologic regionalization of China aimed at construction of nature reserve system GUO Ziliang, CUI Guofa (6264)
- Impact of ecological vegetation construction on the landscape pattern of a Loess Plateau Watershed YI Yang, XIN Zhongbao, QIN Yunbin, et al (6277)
- Spatial heterogeneity of soil moisture across a cropland-grassland mosaic: a case study for agro-pastoral transition in north of China WANG Hongmei, WANG Zhongliang, WANG Kun, et al (6287)
- The regional diversity of changes in growing duration of spring wheat and its correlation with climatic adaptation in Northern China E Youhao, HUO Zhiguo, MA Yuping, et al (6295)
- Response of soil physical-chemical properties to rocky desertification succession in South China Karst SHENG Maoyin, LIU Yang, XIONG Kangning (6303)
- Prediction of the effects of climate change on the potential distribution of mire in Northeastern China HE Wei, BU Rencang, LIU Hongjuan, et al (6314)
- Soil nitrogen mineralization and associated temperature sensitivity of different Inner Mongolian grasslands ZHU Jianxing, WANG Qiufeng, HE Nianpeng, et al (6320)
- Effects of land use on soil nutrient in oasis-desert ecotone in the middle reach of the Heihe River MA Zhimin, LÜ Yihe, SUN Feixiang, et al (6328)
- Assessment on heavy metal pollution status in paddy soils in the northern Chengdu Plain and their potential ecological risk QIN Yusheng, YU Hua, FENG Wenqiang, et al (6335)
- Relationship between the temporal-spatial distribution of longline fishing grounds of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and the thermocline characteristics in the Central Atlantic Ocean YANG Shenglong, MA Junjie, ZHANG Yu, et al (6345)
- Biological nitrogen fixation in the upper water column in the south Taiwan Strait during summer 2011 LIN Feng, CHEN Min, YANG Weifeng, et al (6354)
- Storage and drivers of forests carbon on the Beichangshan Island of Miaodao Archipelago SHI Honghua, WANG Xiaoli, WANG Ai, et al (6363)
- Impact of changes in vegetation types on soil C mineralization and associated temperature sensitivity in the Changbai Mountain forests of China WANG Dan, LÜ Yuliang, XU Li, et al (6373)
- Analysis of relationship between genetic structure of Chinese Pine and mountain barriers MENG Xiangxiang, DI Xiaoyan, WANG Mengben, et al (6382)
- Soil organic carbon interpolation based on auxiliary environmental covariates: a case study at small watershed scale in Loess Hilly region WEN Wen, ZHOU Baotong, WANG Yafeng, et al (6389)
- Eco-management benefit analysis of industrial resources from life cycle perspective: a case study of a virtual symbiosis network SHI Xiaoqing, LI Xiaonuo, YANG Jianxin (6398)
- The game analysis between poverty and environment in ecologically fragile zones QI Xinhua, YE Shilin, CHENG Yu, et al (6411)
- The coupling development of economy and environment under the background of World Expo in Shanghai NI Yao, YUE Wenzhe, ZHANG Yuntang, et al (6418)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 陈利顶 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 33 卷 第 19 期 (2013 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 19 (October, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元