

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

中国生态学会 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 *Eupristina* 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)
- CO₂ 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, 蔺 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, 王秋凤, 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)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 464 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 55 * 2013-10



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/stxb201306091521

王树凤,施翔,孙海菁,陈益泰,杨肖娥. 镉胁迫下杞柳对金属元素的吸收及其根系形态构型特征. 生态学报, 2013, 33(19): 6065-6073.

Wang S F, Shi X, Sun H J, Chen Y T, Yang Xiao'e. Metal uptake and root morphological changes for two varieties of *Salix integra* under cadmium stress. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6065-6073.

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^{1,2}, 施翔², 孙海菁², 陈益泰², 杨肖娥^{1,*}

(1. 浙江大学紫金港校区, 环境与资源学院, 杭州 310028; 2. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 富阳 311400)

摘要: 采用水培方法, 研究了杞柳(*Salix integra*) 2 个品种在 0—90 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理下不同组织对 Cd 的吸收和积累规律, 探讨了镉胁迫下杞柳根系形态学功能响应特征以及对矿质离子吸收的影响。结果发现, 镉在杞柳 2 个品种不同组织的含量均表现为根>韧皮部>木质部>叶。2 个品种地上部组织对镉的吸收和积累规律相似: 在 0—70 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理浓度范围内, 随着溶液 Cd 浓度的增加, 叶、木质部、韧皮部中镉的含量逐渐增加, 到 50 $\mu\text{mol/L}$ 时, 镉在根地上部组织的含量达到最高, 当 Cd 处理浓度达 90 $\mu\text{mol/L}$ 时, 地上部各组织中 Cd 含量出现下降趋势。而 2 个品种根系对 Cd 的吸收则不同, “微山湖”品种在溶液 Cd 达 70 $\mu\text{mol/L}$ 时, 根系镉的积累量最大, 在 90 $\mu\text{mol/L}$ 时, 根系 Cd 的积累量明显下降; “一枝笔”品种根系在 0—90 $\mu\text{mol/L}$ 范围内, 根系 Cd 的积累量均为增加趋势。通过分析 2 个品种根系形态学参数变化发现, Cd 胁迫抑制了杞柳 2 个品种根的伸长, 促进了“微山湖”品种根的径向生长, 导致根系平均直径增加; 进一步对叶片矿质营养状态分析发现, Ca、Mn 的吸收受镉胁迫的影响较大, 在高浓度镉胁迫下(50—70 $\mu\text{mol/L}$) “微山湖”和“一枝笔”对 Ca 和 Mn 的吸收明显下降; Cd 胁迫对 Fe 在叶片的含量影响不明显; 同时发现, 在 50 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理下, Cu^{2+} 在叶片的积累明显增加。由此可见, 杞柳 2 个品种间对镉的吸收和积累差异主要体现在根系, 地上部对镉毒害的响应差异不大。

关键词: 杞柳; 镉胁迫; 吸收和积累; 根系形态学

Metal uptake and root morphological changes for two varieties of *Salix integra* under cadmium stress

WANG Shufeng^{1,2}, SHI Xiang², SUN Haijing², CHEN Yitai², YANG Xiao'e^{1,*}

1 College of Environment and Resource, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China

2 Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, China

Abstract: Willows (*Salix* spp.) are suitable for heavy metal phytoextraction due to their high element accumulation, high metal transport from roots to the shoots and high biomass production. Many species and hybrids of *Salix* spp. are known to colonise contaminated soils. For example, *S. alba*, *S. viminalis*, *S. cinerea* and *S. caprea* naturally invade polluted dredged sediment disposal sites. Therefore, there is an opportunity for genotype selection by checking survival, regeneration, and potentially also by testing metals accumulating in tissues which could then be harvested with remediating contaminated soils. Willow species and clones have different tolerance to particular metals, and significant differences were found for the uptake and accumulation of metals among willow varieties and clones. Soil contamination by cadmium due to human and natural activities is one of the most serious environmental problems in the world. The aim of this study is to investigate the cadmium uptake potential of two cultivated varieties ('Weishanhu' and 'Yizhibi') of *Salix integra*, of which the variety 'Yizhibi' has stronger tolerance to cadmium stress than 'Weishanhu' according to previous studies, and to discuss the possible mechanisms which involved in root adaptation under hydroponically cadmium treatment.

基金项目: 浙江省科学技术厅社会公益项目(2011C23036)

收稿日期: 2013-06-09; 修订日期: 2013-07-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xyang@zju.edu.cn

The results showed the highest content of cadmium was observed in root tissues for both varieties of *S. integra*, and the cadmium content in phloem tissues was lower than that in roots. The cadmium content in leaves showed the lowest level among roots, phloem and xylem. The cadmium content in the aboveground (including phloem, xylem and leaf) tissues of two varieties of *S. integra* increased significantly compared to the control with the increase of cadmium treatment in the range of 10—70 $\mu\text{mol/L}$, and it came to the highest cadmium accumulation at the concentration of 70 $\mu\text{mol/L}$ cadmium, while when exposed to 90 $\mu\text{mol/L}$ cadmium solution, the cadmium content declined in the aboveground parts. The same accumulation patterns were found in roots for two varieties of *S. integra* in the range of 10—70 $\mu\text{mol/L}$ cadmium treatment. However, when the roots were exposed to 90 $\mu\text{mol/L}$ cadmium treatment, the cadmium content in ‘Weishanhu’ declined sharply, but still rose for that in ‘Yizhibi’. This suggests the roots of ‘Yizhibi’ have greater potential in uptake of cadmium than the variety ‘Weishanhu’ when exposed to higher concentration of cadmium.

The higher uptake and accumulate potential of ‘Yizhibi’ depends on the relatively unchangeable root morphology and fractal dimension under cadmium stress. Comparing to the root images of ‘Weishanhu’ and ‘Yizhibi’ under cadmium treatment, we found the total length, total surface area and volume of roots of ‘Yizhibi’ changed a little compared to the control, while that of ‘Weishanhu’ decreased under cadmium treatment. The fractal dimension of two varieties of *S. integra* had minor decline, which may suggest both ‘Weishanhu’ and ‘Yizhibi’ prefer to simple root configuration under cadmium treatment. We also found the nutrient uptake in leaves of two varieties of *S. integra* changed in different cadmium concentration. The Ca and Mn content in leaves decreased significantly in the concentration of 50 and 70 $\mu\text{mol/L}$ cadmium, and no obvious change was observed for Fe content in leaves. It is interesting that the Cu content in leaves of ‘Weishanhu’ increased significantly in the concentration of 50 $\mu\text{mol/L}$ cadmium.

Key Words: *Salix integra*; cadmium stress; uptake and accumulation; root morphology

镉(Cd)是生物毒性最强的重金属元素之一,土壤中过量的Cd不仅对农作物造成危害,影响作物产量,而且严重威胁人类的健康,例如长期食用Cd污染(大于1 mg/kg)的“镉米”会患骨痛症,引起高血压,并影响机体酶系统和生育力^[1]。柳树(*Salix* spp.)被认为是Cd高积累型植物^[2],欧美等很多国家通过柳树短轮伐矮林栽培模式用于修复土壤和水体中的Cd等重金属污染,通过定期收获地上部生物量而进行镉的植物提取,生物质用作生物能源,把可再生能源生产和植物修复结合起来,取得显著的生态效益与经济效益^[3-6]。用于污染修复的植物材料首先必须能够耐受较高浓度重金属并能在金属型土壤中生存与繁殖^[7],这是进行植物修复首要的和必要的条件。植物在适应土壤非生物胁迫的过程中,根系是最先感知逆境胁迫的器官,一般表现为根生物量的减少和根系形态的变化^[8-9],而根系形态的变化直接影响根的生理功能,从而对植物生长产生重大影响,因此,研究根系对重金属胁迫的响应对于揭示植物抵抗重金属胁迫的机理和提高植物修复效率具有重要意义。目前国内外对柳树根系重金属耐性机制的研究很多^[10-13],但大多研究集中在根系解剖结构^[10]、重金属微区分布^[13]等方面,对根系形态构型特别是根系分形变化方面的研究还不多见。本文以2个对镉耐性不同的杞柳(*Salix integra*)品种为材料,研究不同耐性品种间重金属的吸收和积累规律差异以及根系功能响应特征,为进一步研究杞柳不同耐性品种间对镉的响应机制提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

2个杞柳品种为微山湖(*S. integra* ‘Weishanhu’)和一支笔(*S. integra* ‘Yizhibi’),其中“微山湖”品种对镉的耐性较低(忍耐系数0.61—0.82),“一支笔”品种对镉具有较高的耐性(忍耐系数0.92—0.93)^[14],材料均引自山东省,为当地主栽品种,种质资源现保存于中国林科院亚热带林业研究所苗圃。

1.2 试验设计与方法

试验在塑料大棚内开展,剪取杞柳当年生枝条,扦插于10 L塑料盆中的泡沫板上,插条8—10 cm,采用Watson等^[15]改进的营养液,培育无性系材料。营养液配方为:大量元素 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 KNO_3 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、Fe-EDTA分别为1、1.25、0.5、0.5、0.025 $\mu\text{mol/L}$,微量元素 H_3BO_4 、 ZnCl_2 、 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 分别为1.43、0.055、0.03、0.905、0.015 mg/L, pH值5.5,连续不断充气,自然光照,温度为15—27 $^{\circ}\text{C}$,预培养30 d后,选取生长一致的扦插苗进行Cd($\text{NO}_3)_2$ 处理。试验共设6个处理,Cd($\text{NO}_3)_2$ 浓度分别为0,10,30,50,70,90 $\mu\text{mol/L}$,每个处理3盆,每盆20株苗木,每周更换营养液2次,培养48 d后收获植株,先以自来水冲洗根部,再以20 mmol/L EDTA清洗,最后以去离子水冲洗3次。

1.2.1 根系形态学参数分析

根系冲洗干净后,用吸水纸擦干,通过扫描仪(Epson V700)将完整的根系图像扫描存入计算机,采用WinRHIZO PRO 2007

根系分析系统软件(Regent Instruments Inc8,Canada)分析根长、表面积、体积以及不同径级根长和分形维数等,分形维数以盒维数表示。

1.2.2 叶片镉、钙、镁、铁、铜、锰含量测定

收获的植株分成根、木质部、韧皮部、叶 4 部分,在 80 ℃干燥至恒重,粉碎,过 60 目尼龙筛。准确称取 0.2 g 样品,用 HNO₃-HClO₄(4:1)混合液消解,Ca、Mg、Mn、Fe、Cu 含量采用原子吸收光度计法测定,Cd 含量采用石墨炉原子吸收分光光度计法(Thermo Fisher Solaar M6)测定。

1.2.3 数据分析

所有数据采用 Origin 7.5 和 DPS 软件作图和方差分析,LSD 方法进行差异性比较。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫下杞柳不同组织镉的积累特点

由表 1 可以看出,杞柳 2 个品种根系 Cd 含量远远高于其他组织,不同组织中 Cd 的含量从大到小依次为:根>韧皮部>木质部>叶,说明杞柳 2 个品种根系对高浓度镉均具有很强的耐受性。镉是植物生长过程中的一种非必需元素,但由于其具有很强的移动性,因此很容易被植物吸收,在一定的浓度范围内,植物组织 Cd 含量随介质中 Cd 浓度的升高而增加^[16]。本文研究也发现,在 0—70 μmol/L Cd(NO₃)₂处理范围内,“微山湖”和“一枝笔”不同组织中 Cd 的含量随着 Cd 浓度的增加而增加,而当溶液 Cd 浓度达 90 μmol/L 时,“微山湖”品种根系对 Cd 的吸收明显下降;而“一枝笔”品种根部 Cd 的积累依然呈增加趋势。

表 1 Cd 在杞柳不同组织中的含量
Table 1 Cd content in different tissues of *S. integra*

品种/Varieties	Cd(NO ₃) ₂ 浓度 Cd(NO ₃) ₂ concentration /(μmol/L)	Cd 含量 Cd content/(mg/kg 干重)			
		叶 Leaf	韧皮部 Phloem	木质部 Xylem	根 Root
微山湖 <i>S. integra</i> 'Weishanhu'	0	9.50 ± 3.32	15.40±3.00	17.30±2.50	36.61±10.07
	10	108.2 ± 15.3	122.60±25.77	110.57±10.93	280.57±61.84
	30	245.5 ± 37.5	320.83±59.73	251.73±23.28	680.33±64.58
	50	246.3 ± 99.0	399.00±62.55	391.90±36.62	1535.17±411.58
	70	278.0 ± 96.1	560.07±18.48	423.40±28.30	3926.17±363.22
一枝笔 <i>S. integra</i> 'Yizhibi'	90	157.7 ± 20.6	490.17±12.38	306.13±52.06	928.83±127.66
	0	3.68 ± 1.68	19.57±1.96	14.87±3.51	32.77±2.71
	10	90.9 ± 36.2	103.13±11.47	78.77±13.52	331.83±56.08
	30	174.8 ± 78.6	322.73±22.84	223.97±24.47	668.00±113.71
	50	278.7 ± 86.5	546.70±43.79	411.50±48.76	1725.83±510.79
	70	288.7 ± 23.7	564.50±59.97	449.43±63.14	3411.83±447.13
	90	194.3 ± 28.4	476.27±85.87	334.30±46.4	4373.50±544.36

本研究还发现,在未添加 Cd(NO₃)₂的营养液中生长的杞柳组织中依然能检测 3.68—36.61 mg/Kg. DW Cd,与杨卫东等^[14]相同培养条件下相同试验材料中检测到的含量类似。这一方面可能是因为扦插取材的母树生长环境中含有 Cd,使得母树本身就积累了一定的 Cd,导致插条在生长过程中产生了 Cd 的再分配,这种情况往往在一些镉耐性或超级累植物中产生。张圆圆等^[17]在研究氮素对超级累植物——东南景天(*Sedum alfredii*)镉、锌的积累影响中发现,东南景天无镉处理条件下,植株体内原有的镉发生了再转运;而不同柳树品种对重金属的吸收特点也可能会产生这种现象,Waston 等^[15]研究中发现,一种杂交柳品种(*S. triandra viminalis* 'Q83')在无重金属处理下,体内含有的 Zn、Cd、Pb 等重金属远远高于 *S. burjatica* 'Germany'。除了试验材料本身的特性以外,在水培试验过程中,配制营养液的某些试剂被污染或本身含量不纯、混有重金属元素等原因也可能导致对照组重金属元素含量的检出。

通过对杞柳不同组织镉积累量和镉处理浓度的一元非线性拟合(表 2),在 0—70 μmol/L Cd 处理浓度范围内,2 个品种镉积累量与处理浓度之间具有相同的规律(图 1),其中叶中镉的积累规律用 Michaelis-Menten 模型达到较好的拟合,而韧皮部、木质部和根部具有相同的镉积累量-浓度相关关系,均符合 Logistic 模型。2 个品种之间唯一不同的是:“一枝笔”品种根部镉积累量和浓度之间的拟合方程在 0—90 μmol/L Cd 处理范围内均适用,而“微山湖”品种根部镉积累模型仅适用于 0—70 μmol/L Cd 处理浓度范围(图 1)。

2.2 镉胁迫下杞柳根系形态构型变化

如图 2 所示,镉胁迫下,2 个品种的根系形态学参数均受到不同程度影响。2 个品种根系总长、表面积和根系总体积均有不

表 2 一元非线性拟合杞柳不同组织 Cd 浓度-积累量之间的关系

Table 2 Nonlinear fitting for relationship between Cd concentration and Cd accumulation in different tissues of <i>S. integra</i>					
品种 Varieties	组织 Tissues	模型 Model	方程表达式 Equation expression	R^2	P
微山湖	叶	Michaelis-Menten 模型	$Y=356.7921 \times X / (X+18.9441)$	0.9772	0.0015
	韧皮部	Logistic 模型	$Y=570.1638 / (1+\exp(2.0826-0.068246X))$	0.9608	0.0392
	木质部	Logistic 模型	$Y=433.2901 / (1+\exp(2.2324-0.087602X))$	0.9906	0.0094
	根	Logistic 模型	$Y=13175546.6183 / (1+\exp(11.2968-0.045372X))$	0.9994	0.0237
一枝笔	叶	Michaelis-Menten 模型	$Y=512.7621 \times X / (X+50.1572)$	0.9840	0.0009
	韧皮部	Logistic 模型	$Y=581.9489 / (1+\exp(2.7822-0.102473X))$	0.9961	0.0039
	木质部	Logistic 模型	$Y=465.8781 / (1+\exp(2.7808-0.092549X))$	0.9961	0.0039
	根	Logistic 模型	$Y=4968.2367 / (1+\exp(3.8397-0.065319X))$	0.9980	0.0001

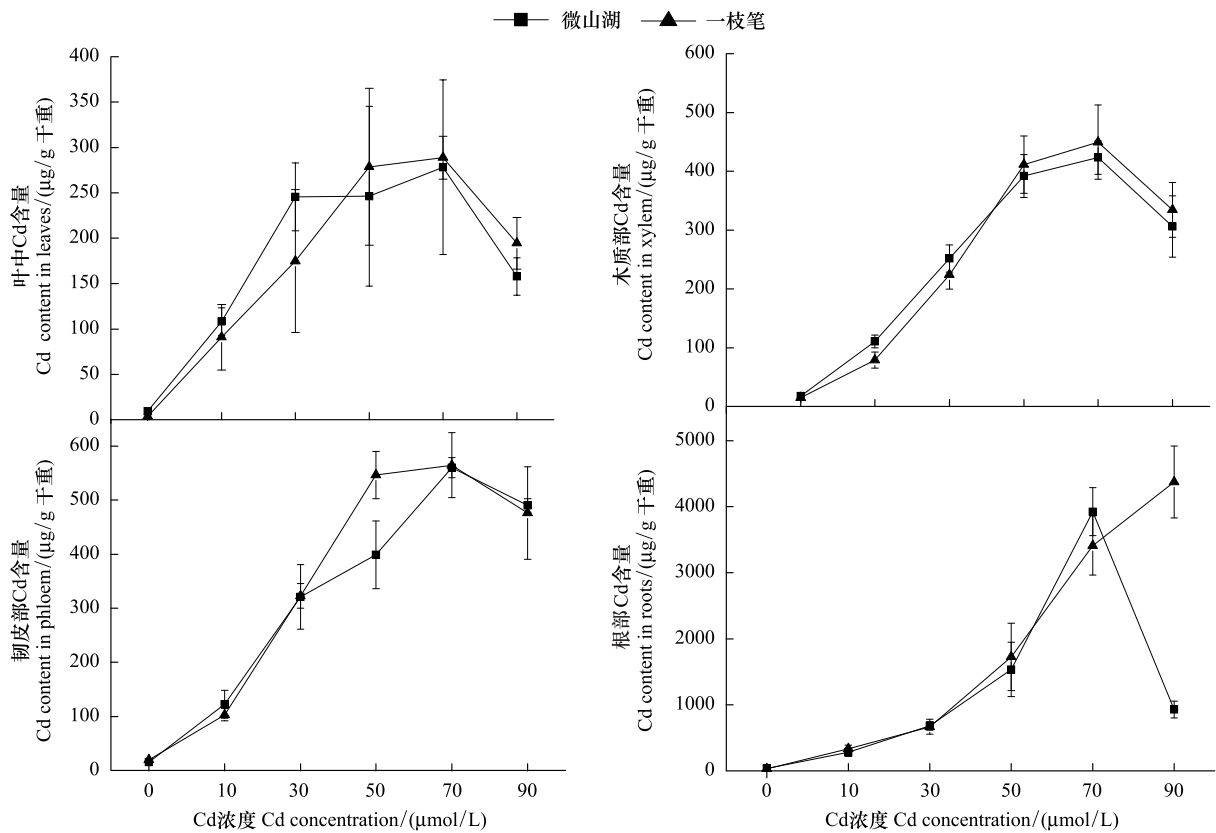


图 1 杞柳不同组织中 Cd 的积累特点
Fig.1 Accumulation of cadmium in different tissues of *S. integra*

同程度下降,所不同的是,“微山湖”品种在镉胁迫下根系总长、表面积和根系总体积下降程度明显,而耐性较强的“一枝笔”品种则下降程度不明显(图 2)。而根系平均直径在镉胁迫下的变化与其他指标不同,与对照相比,“微山湖”品种根系平均直径在 10 μmol/L Cd 处理时下降,而在 30—70 μmol/L 范围内均有不同程度的增加;而“一枝笔”品种的根系平均直径在镉胁迫下有所下降,然而,2 个品种根系直径增加或减少的趋势均不明显。

通过对不同径级根系总长的分析发现(表 3),镉胁迫主要是明显降低了“微山湖”品种 $D \leq 0.5$ mm 的细小根系的总长度($P < 0.01$),对 1—2 mm 根系的总长影响不大;“一枝笔”品种 $D \leq 0.5$ mm 的细小根系在 0—70 μmol/L 范围内变化不大,而 $0.5 \text{ mm} < D \leq 1.0 \text{ mm}$ 的根系总长在镉胁迫下明显下降($P < 0.05$),但不同浓度之间差异不明显。不同浓度镉胁迫有可能抑制了杞柳根系向周围空间的扩张,特别是用于吸收功能的细小根系的伸长;但耐性较强的品种在镉胁迫下根系形态参数变化相对不明显,这有利于维持根系正常的生理功能,有助于提高植物对逆境的适应能力。

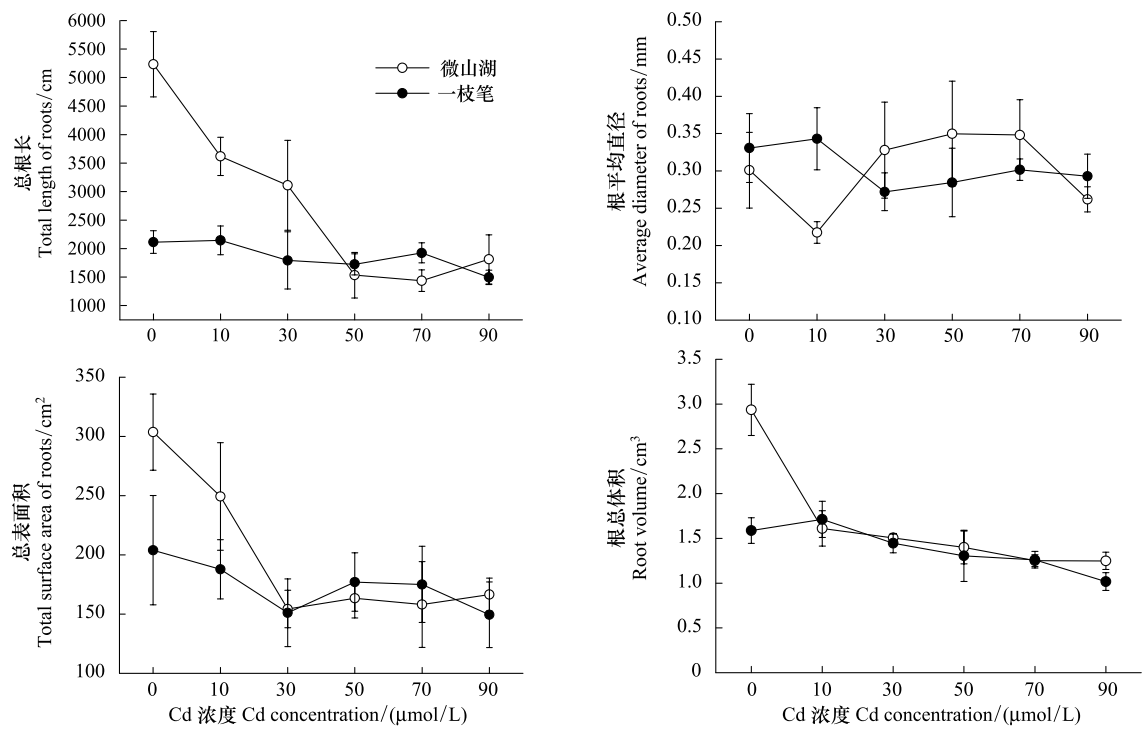


图2 镉胁迫下杞柳根系形态学参数变化

Fig.2 Changes of root morphological parameters of *S. integra* under cadmium treatment

表3 镉胁迫下杞柳2个品种不同径级根系总长

Table 3 Total root length with different diameter of two varieties of <i>S. integra</i> under cadmium treatment		总根长 Total root length/cm		
品种 Varieties	Cd(NO ₃) ₂ 浓度 Cd(NO ₃) ₂ concentration /(μmol/L)	0.0 mm<D≤0.5 mm	0.5 mm<D≤1.0 mm	1 mm<D≤2 mm
微山湖	0	4249.39±164.19a	155.98±8.00a	21.35±6.3a
	10	3375.67±686.71ab	151.17±±3.7a	14.19±4.27ab
	30	2527.04±719.59bc	110.8±9.53b	18.9±7.4a
	50	1256.19±705cd	100.18±28.98b	12.2±±7.04b
	70	1225.66±410.54cd	113.3±12.52b	21.56±9.08a
	90	1240.65±145.58d	86.73±8.7b	7.16±4.13b
	P	0.0005	0.0008	0.0143
一枝笔	0	1875.47±225.23a	212.7±39.49a	20.85±4.44ab
	10	1889.21±442.63a	159.7±9.5ab	23.2±9.84ab
	30	1637.68±335.75a	114.78±8.54b	11.38±8.05b
	50	1600.83±164.13a	112.82±±6.37b	3.08±0.9b
	70	1538.36±364.26ab	106.35±12.95b	37.43±31.37a
	90	982.72±93.48b	147.71±±62.66b	14.3±3.64ab
	P	0.0391	0.0207	0.0819

形态学参数的变化影响了根系的空间构型,根系形态的分形维数可从整体上反映出根系空间结构,直接反映根系在不同环境影响下发育程度的差异,分形维数越高,根系越发达,分支多,相对小的分形维数反映出根系的分生能力相对较弱,分枝越简单^[18-19]。研究发现,杞柳2个品种在镉胁迫下根系的分形维数虽有所下降(图3),但与对照相比差异不明显,说明镉胁迫使根系空间结构及其分枝趋向简单化,随着镉胁迫浓度的增加,根系能够维持相对稳定的分形维数,这对维持根系营养物质的吸收具有重要意义。

2.3 镉胁迫对杞柳叶片营养元素吸收的影响

叶片营养状态在一定程度上反映根系的吸收功能,研究发现,根系对Ca、Mn的吸收受镉胁迫的影响较大,在较高浓度镉胁迫

胁迫(50 和 70 $\mu\text{mol/L}$),“微山湖”和“一枝笔”对 Ca 和 Mn 的吸收明显下降(图 4);镉胁迫对 Fe 在叶片的含量影响不明显(图 4);同时发现,在 50 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理下,Cu 在叶片的积累明显增加(图 4),这可能与离子的协同运输有关,Mg 在叶片的含量也有类似的趋势(图 4)。

3 讨论

3.1 杞柳在重金属污染植物修复实践中的潜力

研究发现,柳树(*Salix*)对土壤重金属 Cd 具有很高的吸收量,Cd 在柳树茎中的含量可达 0.4—3.9 mg/kg,远远高于农作物中的含量^[3]。由于柳树生长快,生物量大,通过定期收获柳树地上部生物量,可以达到对重金属进行植物提取的目的。Nicholas 等^[5]研究发现,通过短轮伐柳树矮林吸收的 Cd 远远大于其他重金属元素,表明柳树可以有效的对土壤中的 Cd 进行植物提取。通过对柳树对 Cd 的移除效率研究发现,柳树可以移除环境中约 30% 的 Cd 及其他重金属^[6]。因此,柳树在欧美等发达国家被广泛用于植物修复工程^[3]。全世界柳树有 526 种,其中产于中国的就有 257 种,122 个变种,33 个变型^[20],其中蒿柳(*S. viminalis* L.)、白柳(*S. alba*)、灰柳(*S. cinerea*)、山羊柳(*S. caprea*)等^[21-23]已经应用于废水处理,清除有机化合物和重金属污染。利用水培方法^[15]能够快速筛选具有植物修复潜力的柳树品种,但由于不同试验重金属的起始浓度和试验周期不同,不同文献报道的 Cd 在柳树体内的积累量差异很大。Utmazian 等^[24]报道 Cd 在柳树叶片中的含量最高可达 230—315 mg/kg 干重,本研究发现,Cd 在杞柳叶片中的含量可达 90—288 mg/kg 干重,与报道的最高含量相当,又加上杞柳属灌木柳,在我国适应性广,栽培面积大,可进行短周期轮伐,因此,杞柳在 Cd 的植物提取方面具有很大潜力。

杨卫东等^[14]初步探索了杞柳 3 个品种对低浓度和高浓度镉的吸收和积累差异,发现杞柳 3 个品种在溶液浓度 10 $\mu\text{mol/L}$ 和 50 $\mu\text{mol/L}$ CdCl₂ 处理下,对镉的吸收及积累在品种间没有显著差异,但对镉的耐性存在明显差异。因此,基于前期的研究,本研究采用了多个处理浓度,意在明确杞柳不同耐性品种对重金属镉的吸收特征和耐受剂量。研究表明,耐性不同的品种差异主要体现在根系对镉的积累量,耐性强的品种(一枝笔)根系对镉的积累量与处理浓度之间的关系符合非饱和曲线,而耐性较弱的品种(微山湖)根系对镉的积累量在达到最大值后便下降。在研究植物重金属吸收的浓度动力学过程中,国内外大多数研究采用的是短期(0—72 h)吸收试验,采用 Michaelis-Menten 方程对吸收曲线进行模拟^[25],然而,植物修复周期较长,影响植物修复效率的关键因子之一是重金属在植物体内的积累量,Ling 等^[26]采用线性方程对旱柳(*S. matsudana*)、白柳(*S. alba*)等柳树不同组织 Cd 的积累量和处理浓度之间的关系进行模拟,其 R² 均在 0.9 以下,说明柳树镉的积累量与处理浓度之间的线性相关性不高,因此本研究采用一元非线性方程对杞柳在镉胁迫培养 48 d 后的积累量和浓度关系进行模拟,发现杞柳除叶片以外,其他组织镉的积累量和浓度关系符合 Logistic 模型,而叶片镉积累量符合 Michaelis-Menten 模型,这说明,叶片是以不同于其他组织的方式吸收和积累重金属。然而,本文由于数据有限,仅仅是进行了曲线的模拟,对模型的适应范围还有待于进一步的探索。

杨卫东等^[14]初步探索了杞柳 3 个品种对低浓度和高浓度镉的吸收和积累差异,发现杞柳 3 个品种在溶液浓度 10 $\mu\text{mol/L}$ 和 50 $\mu\text{mol/L}$ CdCl₂ 处理下,对镉的吸收及积累在品种间没有显著差异,但对镉的耐性存在明显差异。因此,基于前期的研究,本研究采用了多个处理浓度,意在明确杞柳不同耐性品种对重金属镉的吸收特征和耐受剂量。研究表明,耐性不同的品种差异主要体现在根系对镉的积累量,耐性强的品种(一枝笔)根系对镉的积累量与处理浓度之间的关系符合非饱和曲线,而耐性较弱的品种(微山湖)根系对镉的积累量在达到最大值后便下降。在研究植物重金属吸收的浓度动力学过程中,国内外大多数研究采用的是短期(0—72 h)吸收试验,采用 Michaelis-Menten 方程对吸收曲线进行模拟^[25],然而,植物修复周期较长,影响植物修复效率的关键因子之一是重金属在植物体内的积累量,Ling 等^[26]采用线性方程对旱柳(*S. matsudana*)、白柳(*S. alba*)等柳树不同组织 Cd 的积累量和处理浓度之间的关系进行模拟,其 R² 均在 0.9 以下,说明柳树镉的积累量与处理浓度之间的线性相关性不高,因此本研究采用一元非线性方程对杞柳在镉胁迫培养 48 d 后的积累量和浓度关系进行模拟,发现杞柳除叶片以外,其他组织镉的积累量和浓度关系符合 Logistic 模型,而叶片镉积累量符合 Michaelis-Menten 模型,这说明,叶片是以不同于其他组织的方式吸收和积累重金属。然而,本文由于数据有限,仅仅是进行了曲线的模拟,对模型的适应范围还有待于进一步的探索。

3.2 杞柳根系对镉胁迫的响应

植物在适应土壤非生物胁迫的过程中,根系是植物最先感受逆境胁迫的器官,植物通过改变根系形态、分布以及调节根系生理生化反应等过程以适应环境胁迫。研究表明,重金属胁迫下根系形态变化是植物根系对重金属适应的重要方式,植物体内 Cd 的积累量与根系形态、大小密切相关。已有研究表明,镉主要通过抑制细胞分裂、养分吸收等抑制根系生长,但不同耐性植物品种间对镉的响应差异很大,耐性强的品种一般表现为根系生物量大和根较长^[27-28]。李继光等^[29]研究了氮对 Cd 胁迫下超积累植物——东南景天(*Sedum alfredii* (Crassulaceae))根系形态及 Cd 积累的影响,发现适当提高营养液氮素用量有利于提高东南景天的各项根系形态指标,从而提高 Cd 的积累量。He 等^[8]研究发现 Cd 敏感型水稻突变体的根长、根数及根系表面积会随溶液 Cd 浓度的增加而增加,导致根系对 Cd 的吸收量比野生型明显增加。Manciulea 等^[12]通过对 Cd 胁迫下印度芥菜(*Brassica juncea* L.)和莴苣(*Lactuca sativa*)对 Cd 吸收的差异研究发现,印度芥菜茎部 Cd 的含量远远大于莴苣,主要原因可能是印度芥菜具有庞大的根系系统。研究发现,在无镉处理条件下,“微山湖”品种根系总长、表面积、体积明显高于“一枝笔”品种,然而在镉处理下,2 个品种的根系总长、表面积、体积趋向于相同,表明“微山湖”品种在镉胁迫下根系生长更容易受到抑制,而耐性较强的“一枝笔”根系则倾向于保持相对稳定的形态特征,以尽可能减少镉对根系吸收功能的抑制。

柳树之所以对镉具有较强的耐受性,并能够在地上部积累大量的 Cd,除了与其发达的根系形态功能有关外,其根系不同组分对镉的屏障与吸附作用也具有重要意义。Luxa 等^[10]通过分析镉胁迫下柳树不同无性系不定根解剖结构的变化,发现根部非原生质体障碍、内皮层、外皮层、表皮等组织比例的增加对保护根细胞免受 Cd 毒害具有重要意义。Chen 等^[30]研究发现,苏柳

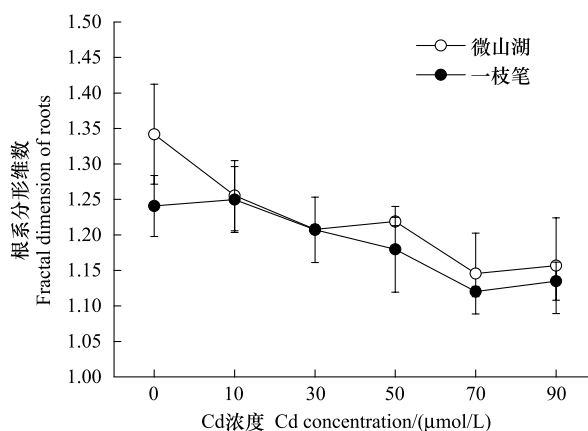


图3 镉胁迫下杞柳根系的分形维数

Fig. 3 Fractal dimension of roots in *S. integra* under cadmium treatment

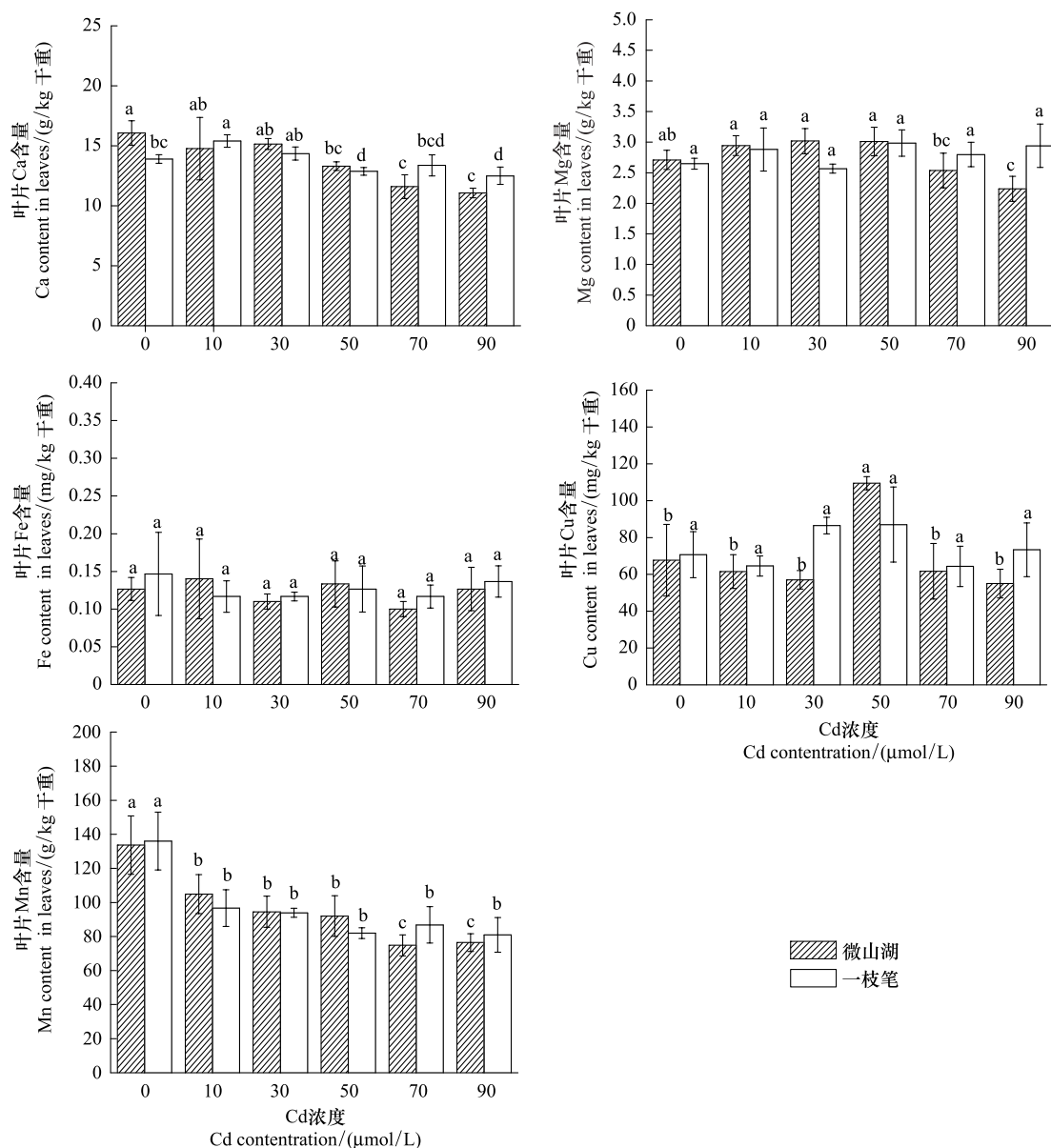


图 4 镉胁迫下杞柳叶片微量元素含量

Fig.4 Micronutrients content in leaves of *S.integra* under Cd stress

J-172 (*S. jiangsuensis* CL J-172) 根细胞壁的不同组分对镉的吸附具有重要作用。因此,有关镉在杞柳根系不同组分的含量以及微区定位情况还需要进一步的深入研究。

4 结论

杞柳“微山湖”和“一枝笔”2个品种地上部对镉的吸收和积累极限均为 70 $\mu\text{mol/L}$,而根系对镉的吸收和积累极限则不同,“微山湖”品种根系对镉的吸收和积累在镉浓度 70 $\mu\text{mol/L}$ 达到极限,而“一枝笔”品种根系对镉的吸收和积累在镉浓度达 90 $\mu\text{mol/L}$ 时依然呈上升趋势,推测其吸收极限可达 90 $\mu\text{mol/L}$ 或高于 90 $\mu\text{mol/L}$ 。2个品种对镉都具有较高的耐受性和积累量,加上杞柳生长速度快,可以进行短周期培育,因此,具有对土壤镉污染进行植物提取的潜力,而“一枝笔”品种由于根系对高浓度镉具有极强的耐性和积累能力,在镉的植物固定化修复中也具有一定的潜力。

致谢:感谢中国林业科学研究院亚热带林业研究所张建锋研究员对本文写作的帮助。

References:

- [1] Huang C Y. Soil Science. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000.
- [2] Vysloužilová M, Tlustoš P, Száková J. Cadmium and zinc phytoextraction potential of seven clones of *Salix* spp. planted on heavy metal

- contaminated soils. *Plant Soil Environment*, 2003, 49(12): 542-547.
- [3] Eriksson J, Ledin S. Changes in phytoavailability and concentration of cadmium in soil following long term *Salix* cropping. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1999, 114(1/2): 171-184.
- [4] Greger M, Landberg T. Use of willow in phytoextraction. *International Journal of Phytoremediation*, 1999, 1(2): 115-123.
- [5] Nicholas M, Dickinsona, Pulford I D. Cadmium phytoextraction using short-rotation coppice *Salix*: the evidence trail. *Environment International*, 2005, 31(4): 609-613.
- [6] Tlustoš P, Száková J, Vysloužilová M, Pavlíková D, Weger J, Javorská H. Variation in the uptake of Arsenic, Cadmium, Lead, and Zinc by different species of willows *Salix spp.* grown in contaminated soils. *Central European Journal of Biology*, 2007, 2(2): 254-275.
- [7] Marques A P G C, Rangel A O S S, Castro P M L. Remediation of heavy metal contaminated soils: Phytoremediation as a potentially promising clean-up technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2009, 39(8): 622-654.
- [8] He J Y, Zhu C, Ren Y F, Jiang D A, Sun Z X. Root morphology and cadmium uptake kinetics of the cadmium-sensitive rice mutant. *Biologia Plantarum*, 2007, 51(4): 791-794.
- [9] Yan X L, Liao H, Ge Z Y, Luo X W. Root architectural characteristic and phosphorus acquisition efficiency in plants. *Chinese Bulletin of Botany*, 2000, 17(6): 511-519.
- [10] Luxa A, Šottníková A, Opatrná J, Greger M. Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity. *Physiologia Plantarum*, 2004, 120(4): 537-545.
- [11] Landberg T, Greger M. No phytochelatin (PC2 and PC3) detected in *Salix viminalis*. *Physiologia Plantarum*, 2004, 121(3): 481-487.
- [12] Manciualea A, Ramsey M H. Effect of scale of Cd heterogeneity and timing of exposure on the Cd uptake and shoot biomass, of plants with a contrasting root morphology. *Science of the Total Environment*, 2006, 367(2/3): 958-967.
- [13] Zimmer D, Kruse J, Baum C, Borca C, Laue M, Hause G, Meissner R, Leinweber P. Spatial distribution of arsenic and heavy metals in willow roots from a contaminated floodplain soil measured by X-ray fluorescence spectroscopy. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(19): 4094-4100.
- [14] Yang W D, Chen Y T. Differences in uptake and tolerance to cadmium in varieties of *Salix integra*. *Forest Research*, 2008, 21(6): 857-861.
- [15] Watson C, Pulford I D, Riddell-Black D. Development of a hydroponic screening technique to assess heavy metal resistance in willow (*Salix*). *International Journal of Phytoremediation*, 2003, 5(4): 333-349.
- [16] Shacklette H T. Cadmium in Plant. U. S. Government Printing Office. Washington D. C. 20402. 1972, P. G1-4.
- [17] Zhang Y Y, Dou C Y, Yao F, Ye Z Q. Nitrogen application to enhance zinc and cadmium uptake by the hyperaccumulator *Sedum alfredii*. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2010, 27(6): 831-838.
- [18] Nielsen K L, Lynch J P, Weiss H N. Fractal geometry of bean root systems: correlations between spatial and fractal dimension. *American Journal of Botany*, 1997, 84(1): 26-33.
- [19] Qiao H T, Yang H Q, You W B, Jiang Q Q, You S Z, Zhang L, Ran K. Responses of root morphology and architecture in *Malus hupehensis* var. *pingyiensis* seedlings to cadmium chloride. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(1): 56-60.
- [20] Wang Y L, Wang B S, Shi S Z. Cadmium absorption characters of arbor willows (*Salix* sp.) in solution culture. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences*, 2011, 35(2): 135-138.
- [21] 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 Pollut*, 2009, 197(1/4): 23-34.
- [22] Perttu K L. Environmental and hygienic aspects of willow coppice in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, 1999, 16(4): 291-297.
- [23] Eriksson J, Ledin S. Changes in phytoavailability and concentration of cadmium in soil following long term *Salix* cropping. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1999, 114(1/2): 171-184.
- [24] Utmazian M N D S, Wieshammer, G Vega R, Wenzel W W. Hydroponic screening for metal resistance and accumulation of cadmium and zinc in twenty clones of willows and poplars. *Environmental Pollution*, 2007, 148(1): 155-165.
- [25] Chen C H, Liu Z K, Chen G C, Shan Q H, Zhang J F. Uptake kinetic characteristics of Cu^{2+} by *Salix jiangsuensis* CL J-172 and *Salix babylonica* Linn and the influence of organic acids. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5255-5263.
- [26] Ling T, Jun R, Fangke Y. Effect of cadmium supply levels to cadmium accumulation by *Salix*. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2011, 8(3): 493-500.
- [27] Sanita di Toppi L, Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, 1999, 41(2): 105-130.

- [28] He J Y, Ren Y F, Wang Y Y, Li Z J. Root morphological and physiological responses of rice seedlings with different tolerance to cadmium stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 522-528.
- [29] Li J G, Zhu E, Li T Q, Liu D, Yang X E, Lin G L, Han X R, Zhang Y L. Effects of nitrogen fertilizer on biomass, root morphology and cadmium accumulation of Cd-stressed *Sedum alfredii* Hance species. *Environmental Pollution and Control*, 2007, 29(4): 271-275.
- [30] Chen G C, Liu Y Q, Wang R M, Zhang J F, Owens G. Cadmium adsorption by willow root: the role of cell walls and their subfractions. *Environmental Science and Pollution Research* Published online: 02 March, 2013.

参考文献:

- [1] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [9] 严小龙, 廖红, 戈振杨, 罗锡文. 植物根构型特性与磷吸收效率. *植物学通报*, 2000, 17(6): 511-519.
- [14] 杨卫东, 陈益泰. 不同杞柳品种对镉(Cd)吸收与忍耐的差异. *林业科学研究*, 2008, 21(6): 857-861.
- [17] 张圆圆, 窦春英, 姚芳, 叶正钱. 氮素营养对重金属超积累植物东南景天吸收积累锌和镉的影响. *浙江林学院学报*, 2010, 27(6): 831-838.
- [19] 乔海涛, 杨洪强, 申为宝, 姜倩倩, 由淑贞, 张龙, 冉昆. 平邑甜茶根系形态构型对氯化镉处理的响应. *林业科学*, 2010, 46(1): 56-60.
- [20] 汪有良, 王保松, 施士争. 乔木型柳树无性系镉积累特性研究. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(2): 135-138.
- [25] 陈彩虹, 刘治昆, 陈光才, 单奇华, 张建锋. 苏柳 172 和垂柳对 Cu^{2+} 的吸收特性及有机酸影响. *生态学报*, 2011, 31(18): 5255-5263.
- [28] 何俊瑜, 任艳芳, 王阳阳, 李兆君. 不同耐性水稻幼苗根系对镉胁迫的形态及生理响应. *生态学报*, 2011, 31(2): 522-528.
- [29] 李继光, 朱恩, 李廷强, 柳丹, 杨肖娥, 林国林, 韩晓日, 张玉龙. 氮对镉胁迫下东南景天根系形态及镉积累的影响. *环境污染与防治*, 2007, 29(4): 271-275.

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 (<i>Syrnaticus reevesii</i>) using infrared camera	ZHAO Yuze, WANG Zhichen, XU Jiliang, et al (6021)
The energy budget of tree sparrows <i>Passer montanus</i> in wind different speed and duration	YANG Zhihong, WU Qingming, DONG Haiyan, et al (6028)
Nest site characteristics of <i>Petaurista caniceps</i> in Baima Snow Mountain Nature Reserve	LI Yanhong, GUAN Jinke, LI Dayong, HU Jie (6035)
Effects of habitat fragmentation on the genetic diversity of <i>Pachycondyla luteipes</i> on islands in the Thousand Island Lake, East China	LUO Yuanyuan, LIU Jinliang, HUANG Jiuling, et al (6041)
The molecular genetic relationship between the pollinators of <i>Ficus pumila</i> var. <i>pumila</i> and <i>Ficus pumila</i> var. <i>aukeotsang</i>	WU Wenshan, CHEN Youling, SUN Lingli, et al (6049)
The genetic evolutionary relationships of two <i>Eupristina</i> species on <i>Ficus altissima</i>	CHEN Youling, SUN Lingli, WU Leilei, et al (6058)
Metal uptake and root morphological changes for two varieties of <i>Salix integra</i> 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 <i>Tamarix ramosissima</i> 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 <i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i> 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 <i>Casuarina equisetifolia</i> 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 <i>Bauhinia faberi</i> 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 CO ₂	SHI Zhibing, ZHOU Yong, LI Xia, et al (6135)
Effects of pretreatment on germination of <i>Typha domingensis</i> and <i>Phragmites australis</i>	MENG Huan, WANG Xuehong, TONG Shouzheng, et al (6142)
Transfer characteristics of cadmium from soil to <i>Salix × aureo-pendula</i>	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 <i>Halophila beccarii</i> 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 <i>Populus pruinosa</i> 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

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元