

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第18期 Vol.31 No.18 **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 18 期 2011 年 9 月 (半月刊)

目 次

高寒矮嵩草草甸冬季 CO ₂ 释放特征	吴 琴, 胡启武, 曹广民, 等 (5107)
开垦对绿洲农田碳氮累积及其与作物产量关系的影响	黄彩变, 曾凡江, 雷加强, 等 (5113)
施氮对几种草地植物生物量及其分配的影响	祁 瑜, 黄永梅, 王 艳, 等 (5121)
浙江天台山甜槠种群遗传结构的时空自相关分析	祁彩虹, 金则新, 李钧敏 (5130)
大兴安岭林区不同植被对冻土地温的影响	常晓丽, 金会军, 于少鹏, 等 (5138)
樟子松树轮不同组分的稳定碳同位素分析	商志远, 王 建, 崔明星, 等 (5148)
内蒙古不同类型草地叶面积指数遥感估算	柳艺博, 居为民, 朱高龙, 等 (5159)
杭州西湖北里湖荷叶枯落物分解及其对水环境的影响	史 绮, 焦 锋, 陈 莹, 等 (5171)
火干扰对小兴安岭落叶松-苔草沼泽温室气体排放的影响	于丽丽, 牟长城, 顾 韩, 等 (5180)
黄河中游连伯滩湿地景观格局变化	郭东罡, 上官铁梁, 白中科, 等 (5192)
黄土区次生植被恢复对土壤有机碳官能团的影响	李 婷, 赵世伟, 张 扬, 等 (5199)
我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性	祖元刚, 李 冉, 王文杰, 等 (5207)
黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子	高会议, 郭胜利, 刘文兆 (5217)
宁南山区典型植物根际与非根际土壤微生物功能多样性	安韶山, 李国辉, 陈利顶 (5225)
岩溶山区和石漠化区表土孢粉组合的差异性——以重庆市南川区为例	郝秀东, 欧阳绪红, 谢世友 (5235)
夏蜡梅及其主要伴生种叶的灰分含量和热值	金则新, 李钧敏, 马金娥 (5246)
苏柳 172 和垂柳对 Cu ²⁺ 的吸收特性及有机酸影响	陈彩虹, 刘治昆, 陈光才, 等 (5255)
导入 <i>TaNHX2</i> 基因提高了转基因普那菊苣的耐盐性	张丽君, 程林梅, 杜建中, 等 (5264)
空气湿度与土壤水分胁迫对紫花苜蓿叶表皮蜡质特性的影响	郭彦军, 倪 郁, 郭芸江, 等 (5273)
黄土高原旱塬区土壤贮水量对冬小麦产量的影响	邓振镛, 张 强, 王 强, 等 (5281)
咸阳地区近年苹果林地土壤含水量动态变化	赵景波, 周 旗, 陈宝群, 等 (5291)
苗药大果木姜子挥发油成分变化及其地理分布	张小波, 周 涛, 郭兰萍, 等 (5299)
环境因子对小球藻生长的影响及高产油培养条件的优化	丁彦聪, 高 群, 刘家尧, 等 (5307)
不同基质对北草蜥和中国石龙子运动表现的影响	林植华, 樊晓丽, 雷焕宗, 等 (5316)
安徽沿江浅水湖泊越冬水鸟群落的集团结构	陈锦云, 周立志 (5323)
黑胸散白蚁肠道共生锐滴虫目鞭毛虫的多样性分析与原位杂交鉴定	陈 文, 石 玉, 彭建新, 等 (5332)
基于熵权的珠江三角洲自然保护区综合评价	张林英, 徐颂军 (5341)
专论与综述	
中小尺度生态用地规划方法	荣冰凌, 李 栋, 谢映霞 (5351)
土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展	陈 朝, 吕昌河, 范 兰, 等 (5358)
海洋浮游植物与生物碳汇	孙 军 (5372)
多年冻土退化对湿地甲烷排放的影响研究进展	孙晓新, 宋长春, 王宪伟, 等 (5379)
生源要素有效性及生物因子对湿地土壤碳矿化的影响	张林海, 曾从盛, 仝 川 (5387)
生态网络分析方法研究综述	李中才, 徐俊艳, 吴昌友, 等 (5396)
研究简报	
不同群落中米氏冰草和羊草的年龄结构动态	金晓明, 艾 琳, 刘及东, 等 (5406)
主题分辨率对 NDVI 空间格局的影响	黄彩霞, 李小梅, 沙晋明 (5414)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 314 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-09



封面图说: 在树上嬉戏的大熊猫——大熊猫是中国的国宝, 自然分布狭窄, 数量极少, 世界上仅分布在中国的四川、陕西、甘肃三省的部分地区, 属第四纪冰川孑遗物种, 异常珍贵。被列为中国国家一级重点保护野生动物名录, 濒危野生动植物种国际贸易公约绝对保护的 CITES 附录一物种名录。瞧, 够得上“功夫熊猫”吧。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

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.

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.

苏柳 172 和垂柳对 Cu^{2+} 的吸收特性及有机酸影响

陈彩虹¹, 刘治昆^{1,2}, 陈光才^{2,*}, 单奇华², 张建锋²

(1. 中南林业科技大学, 湖南长沙 410004; 2. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江富阳 311400)

摘要: 采用溶液培养的方法, 研究了苏柳 172 和垂柳对 Cu^{2+} 吸收的动力学特性及低分子量有机酸 (乙酸和苹果酸) 对 Cu^{2+} 吸收的影响。结果表明: 苏柳 172 和垂柳根系对 Cu^{2+} 的吸收量随溶液 Cu^{2+} 浓度的升高及吸收时间的延长而增加。苏柳 172 和垂柳对 Cu^{2+} 吸收的浓度动力学曲线呈线性, 非饱和曲线, 可以用米氏方程很好地拟合。米氏方程拟合的结果说明, 垂柳根系的 Cu^{2+} 吸收能力要稍强于苏柳 172。 Cu^{2+} 浓度为 20 $\mu\text{mol/L}$ 时, 随着乙酸和苹果酸浓度的增加, 对苏柳 172 和垂柳根系吸收 Cu^{2+} 的促进作用呈先上升后下降的趋势, 其中, 乙酸在 10:1 (乙酸 : Cu^{2+})、苹果酸在 5:1 (苹果酸 : Cu^{2+}) 时促进作用最强。 Cu^{2+} 在根尖区的含量远远大于成熟区, 说明根尖区是吸收 Cu^{2+} 最活跃的区域。在 Cu^{2+} 浓度为 20 $\mu\text{mol/L}$ 的吸收液中加入乙酸或苹果酸 (有机酸 : Cu^{2+} = 10:1) 时, 苏柳 172 根尖区的 Cu^{2+} 含量分别增加了 16.5% 和 33.7%, 根成熟区的 Cu^{2+} 含量增加了 23.7% 和 43.0%, 但根尖区和成熟区的 Cu^{2+} 含量比值分别是 1.40 和 1.39, 略小于不加有机酸时的 1.49。乙酸与 Cu^{2+} 的比例为 10:1 时, 当 Cu^{2+} 浓度小于 20 $\mu\text{mol/L}$ 时乙酸促进垂柳根系对 Cu^{2+} 的吸收, 当 Cu^{2+} 浓度大于 20 $\mu\text{mol/L}$ 时, 乙酸抑制垂柳根系对 Cu^{2+} 的吸收, 抑制作用随 Cu^{2+} 浓度的升高而加强, 说明低浓度的乙酸可以促进垂柳根对 Cu^{2+} 的吸收, 而高浓度的乙酸能够抑制垂柳根吸收 Cu^{2+} 。同时, 乙酸抑制了 Cu^{2+} 在垂柳地上部的积累, 抑制作用随着 Cu^{2+} 浓度的增加而加强, 说明乙酸能够抑制 Cu^{2+} 由根向地上部的运输。

关键词: 苏柳 172; 垂柳; Cu^{2+} ; 吸收; 有机酸

Uptake kinetic characteristics of Cu^{2+} by *Salix jiangsuensis* CL J-172 and *Salix babylonica* Linn and the influence of organic acids

CHEN Caihong¹, LIU Zhikun^{1,2}, CHEN Guangcai^{2,*}, SHAN Qihua², ZHANG Jianfeng²

¹ Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

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

Abstract: Willow (*Salix* sp.) has large biomass production and high resistance to environmental stress as an important multipurpose tree species in afforestation, hence has been proved to be effective in the uptake and accumulation of metals from contaminated waters and soils. *Salix jiangsuensis* CL J-172 and *Salix babylonica* Linn were chosen as model plants to investigate their potential for uptake of Cu^{2+} from hydroponics culture solution.

The uptake kinetic characteristics of *Salix jiangsuensis* CL J-172 and *Salix babylonica* Linn to Cu^{2+} and the effect of organic acids including acetic and malic acids to the Cu^{2+} accumulation by both willows species were investigated under hydroponics. The results suggested that the uptake influx of Cu^{2+} by roots of *Salix jiangsuensis* CL J-172 and *Salix babylonica* Linn increased with Cu^{2+} concentration varied from 0 to 200 $\mu\text{mol/L}$ and the time prolonged from 0 to 48 hours. Concentration-dependent Cu^{2+} influx kinetics in *Salix jiangsuensis* CL J-172 and *Salix babylonica* Linn were characterized by smooth, non-saturating curves. The analysis of parameters derived from Michaelis-Menten equation showed that the absorption ability of Cu^{2+} by the root of *Salix babylonica* Linn was better than that of *Salix jiangsuensis* CL J-172. The

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目 (RISF6803); 江苏省科技支撑计划项目 (BE2009603, BE2008636)

收稿日期: 2010-11-21; **修订日期:** 2011-06-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guangcaichen@sohu.com

addition of acetic acid enhanced the uptake of Cu^{2+} in roots and reached the highest values when the ratios of acetic acid to Cu^{2+} is 10:1, which increased the uptake of Cu^{2+} by 43.1% and 22.9% for *Salix jiangsuensis* CL J-172 and *Salix babylonica* Linn, respectively. The addition of malic acid enhanced the uptake of Cu^{2+} in roots and reached the highest values when the ratios of acetic acid to Cu^{2+} is 5:1, which increased the uptake of Cu^{2+} by 61% and 9.2% for *Salix jiangsuensis* CL J-172 and *Salix babylonica* Linn, respectively. The content of Cu^{2+} in root cap was significantly higher than that in root manure zone in *Salix jiangsuensis* CL J-172 which suggest that root cap was more active in uptake of Cu^{2+} from solution. The addition of acetic acid increased the concentration of Cu^{2+} by 16.5% in root tip and by 23.7% in root mature zone, while malic acid increased by 33.7% in root tips and 43% in root mature zone at the ratio of organic acids to Cu^{2+} at 10:1 for *Salix jiangsuensis* CL J-172, while the ratio of Cu^{2+} content in root cap to root mature zone changed slightly compared the value of 1.40 and 1.39 to the value of 1.49 without the addition of organic acid. With the ratio of acetic acid to Cu^{2+} at 10:1, Cu^{2+} uptake by root of *Salix babylonica* Linn were firstly enhanced when Cu^{2+} concentration were lower than 20 $\mu\text{mol/L}$ and then decreased as Cu^{2+} concentration were higher than 20 $\mu\text{mol/L}$. The addition of acetic acid always decreased the content of Cu^{2+} in aboveground part of *Salix babylonica* Linn which implied that acetic acid inhibited the translocation of Cu^{2+} from root to aboveground part of *Salix babylonica* Linn and the inhibiting effect would be more obvious as the concentration of acetic acid increased.

Key Words: *Salix jiangsuensis* CL J-172; *Salix babylonica* Linn; Cu^{2+} ; uptake; organic acid

随着社会经济的快速发展,重金属污染日趋严重,重金属污染的治理逐渐引起人们的重视,并成为近年来生态修复领域的重要研究内容之一。植物修复是一种利用植物清除土壤污染物的原位修复技术。植物修复采用的超富集植物,大多数生长缓慢,生物量低,在一定程度上限制了其规模化应用^[1]。对于一些生物量大、对污染物吸收能力较强,但是还达不到超富集植物标准的耐性植物,例如速生木本植物,人们也开始给予较多的关注和研究。柳树(*Salix* sp.)植株高大,适应性强,具有耐水湿、耐干旱、耐盐碱等抗性,易繁殖,生长快,生物量大,树姿优美等特点,在城乡生态环境建设中得到广泛应用。研究业已表明,柳树对多种重金属具有较强的忍耐和积累能力^[2],是修复重金属污染土壤和水体的潜力树种之一^[3]。

根系养分吸收动力学特性是研究植物吸收、转运矿质元素内在机制的有效方法和手段。Epstein 等^[4]首次将酶促反应动力学方程用于植物对离子吸收的研究, Claassen 等^[5]建立根系养分吸收动力学方程和离子消耗技术,这为阐明养分吸收特性、鉴定和筛选养分吸收高效基因型提供了有利的手段。吸收动力学特性,除了广泛应用在 N、P、K、Ca、Mg 等矿质元素的植物营养过程研究,近来也开始在超积累植物对重金属吸收转运的机理研究中得到应用^[6-7]。目前,针对耐性植物的重金属吸收动力学特性的研究报道甚少。因此,运用动力学的观点和方法研究柳树对重金属的吸收和转运过程,对于阐述柳树吸收、转运重金属的过程和机理具有重要的意义。

有机酸是植物重要的根系分泌物和微生物代谢产物,可以促进土壤中以难溶矿物形式存在的金属溶解,从而增强金属在根区的移动性,进而更容易被植物吸收^[8]。盆栽条件下,有机酸对植物吸收 Cu^{2+} 有促进作用^[9],水培条件下,有机酸增加了黄菖蒲对 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸收,并且提高了其向地上部运输 2 种重金属的能力^[10]。近来,已有研究从柳树对重金属的生理反应、柳树对重金属的抗性以及柳树对污染物的积累等方面^[11-12],展开柳树修复重金属污染修复的研究,但对于柳树吸收、转运和积累重金属的动力学过程及特性研究鲜有涉及。

本文选用我国选育的优良速生杂交柳树苏柳 172 (*Salix jiangsuensis* CL J-172)^[13] 和常用绿化树种垂柳 (*Salix babylonica* Linn) 作为试验材料,采用溶液培养的方法,研究了 2 种柳树根系对 Cu^{2+} 吸收的浓度动力学、时间动力学、低分子量有机酸(乙酸和苹果酸)对 Cu^{2+} 吸收及在根区分布的影响,了解柳树对 Cu^{2+} 的吸收特性,为柳树应用于 Cu^{2+} 污染土壤的植物修复提供一定的试验数据和理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

苏柳 172 插条引自浙江省富阳市新沙岛苗圃,垂柳插条引自中国林业科学研究院亚热带林业研究所苗圃。选择粗细均匀的 1 年生枝条,剪成长约 10 cm 的插条,扦插在泡沫板上并放置于 20 L 的塑料箱内,用改进的 Hoagland 营养液在中国林业科学研究院亚热带林业研究所塑料大棚中培养。改进的 Hoagland 营养液配方为:2.00 mmol/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 0.10 mmol/L KH_2PO_4 , 0.50 mmol/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.10 mmol/L KCl , 0.70 mmol/L K_2SO_4 , 10.00 $\mu\text{mol/L}$ H_3BO_3 , 0.50 $\mu\text{mol/L}$ $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 1.0 $\mu\text{mol/L}$ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.01 $\mu\text{mol/L}$ $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$, 100 $\mu\text{mol/L}$ EDTA-Fe。培养期间采用自然光照,温度为 20—30 $^{\circ}\text{C}$,营养液每周更换 1 次,培养时间为 60 d。

1.2 试验方法

1.2.1 Cu^{2+} 吸收浓度动力学

选取大小一致的柳树苗,依次用自来水和去离子水冲洗干净,用含 2 mmol/L Mes-Tris 和 0.5 mmol/L CaCl_2 的预处理液^[14](用盐酸和氢氧化钠调节 pH 值=5.8)预培养 12 h 后,放入含有不同浓度 Cu^{2+} (以 CuSO_4 的形式加入)的 2 mmol/L Mes-Tris、0.5 mmol/L CaCl_2 (pH 值=5.8)吸收液中培养 4 h, Cu^{2+} 浓度为 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 40, 80, 100, 200 $\mu\text{mol/L}$, 每个处理设置 3 次重复,每次重复 3 棵柳树苗。柳树苗处理 4 h 后取出,依次用自来水和去离子水冲洗根部,放入含有 2 mmol/L Mes-Tris 和 5 mmol/L CaCl_2 (pH 值=5.8)的洗脱液中冰水浴 30 min^[15]。洗脱后的根用去离子水冲洗干净,用吸水纸擦干,分为根部和地上部,置于烘箱在 105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min,然后 75 $^{\circ}\text{C}$ 烘干 72 h,称重,测定根中 Cu^{2+} 含量。

1.2.2 Cu^{2+} 吸收时间动力学

基于预试验的结果,苏柳 172 和垂柳在 Cu^{2+} 浓度为 20 $\mu\text{mol/L}$ 时能够正常生长,选取 Cu^{2+} 浓度为 20 $\mu\text{mol/L}$ 进行时间动力学试验。将柳树苗预培养后,置于 Cu^{2+} 浓度为 20 $\mu\text{mol/L}$ 的吸收液中(含有 2 mmol/L Mes-Tris、0.5 mmol/L CaCl_2 , pH 值=5.8),分别培养 15、30、45、60、90、120 min 为短时间处理;2、4、8、12、16、24、48 h 为长时间处理;试验设置 3 次重复,每次重复 3 棵柳树苗。吸收培养后,洗脱,洗净,擦干,烘干,称重,测定根中 Cu^{2+} 含量。

1.2.3 有机酸对 Cu^{2+} 吸收的影响

试验一:向 Cu^{2+} 浓度为 20 $\mu\text{mol/L}$ 的吸收液中(含有 2 mmol/L Mes-Tris、0.5 mmol/L CaCl_2),以 2:1, 5:1, 10:1, 20:1, 50:1, 100:1(有机酸: Cu^{2+})的比例分别加入乙酸和苹果酸,以未加入有机酸的处理为对照,调节 pH 值至 5.8。将预培养后的柳树苗,放入上述吸收液培养 4 h。洗脱,烘干,称重,测定根中 Cu^{2+} 含量。

试验二:向 Cu^{2+} 浓度设为 5、10、20、40、100、200、300 $\mu\text{mol/L}$ 吸收液(含有 2 mmol/L Mes-Tris、0.5 mmol/L CaCl_2)中加入 10:1(乙酸: Cu^{2+})浓度的乙酸,调节 pH 值至 5.8。将预培养 12 h 的柳树苗放入上述吸收液中培养 48 h,试验设置 3 次重复,每次重复 3 棵柳树苗。培养后的柳树苗,洗净,洗脱,烘干,称重,测定根和地上部中 Cu^{2+} 含量。

1.2.4 Cu^{2+} 在柳树根系的分布

将预培养后的柳树苗在 Cu^{2+} 浓度为 20 $\mu\text{mol/L}$ 和乙酸或苹果酸浓度为 200 $\mu\text{mol/L}$ (10:1)的吸收液(含有 2 mmol/L Mes-Tris、0.5 mmol/L CaCl_2)中培养 4 h。试验设置 3 次重复,每次重复 3 棵柳树苗。洗脱后,取根的根尖区(根顶端 0—2 cm)和成熟区,称量鲜重后,测定 Cu^{2+} 含量。

1.3 Cu^{2+} 的测定

柳树体内 Cu^{2+} 的测定采用火焰原子吸收或石墨炉原子吸收法。将干燥的柳树根或地上部粉碎后过 1 mm 筛,准确称取 0.5 g(精确到 0.0001)于 50 mL 三角瓶中,加混酸($\text{HNO}_3:\text{HClO}_4=4:1$)15 mL,在电炉上加热至冒白烟,用 1% 的稀硝酸定容至 50 mL 容量瓶中,然后用原子吸收法测定 Cu^{2+} 含量。

1.4 数据处理

运用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 进行数据统计分析,并用 Origin Pro 7.5 做图。

2 结果分析

2.1 Cu^{2+} 吸收浓度动力学

苏柳 172 和垂柳的 Cu^{2+} 吸收动力学曲线呈线性、非饱和曲线(图 1)。随着溶液 Cu^{2+} 浓度的增加,苏柳 172 和垂柳根部对 Cu^{2+} 的吸收量显著增加($P < 0.01$)。用修正后的 Michaelis-Menten 方程对吸收曲线进行拟合^[7,16]:

$$V_c = V_{\max} / (K_m + C) + aC$$

其中,饱和部分代表着跨膜的载体运输真正被吸收部分,线性部分看作是细胞壁结合、不能被洗脱除去的部分^[17]。 V_c 是吸收速率($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), C 是溶液中 Cu^{2+} 浓度, $V_{\max}$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) 是最大吸收速率, K_m ($\mu\text{mol/L}$) 是 Michaelis-Menten 速率常数, a 是定义吸收速率线性部分的参数。 K_m 值代表了根系对离子的亲和力, K_m 值越小,亲和力越高。根吸收力 $\alpha = V_{\max}/K_m$,表示根系对离子的实际吸收能力,根吸收力 α 值越大,根系对离子的吸收能力越强^[18]。

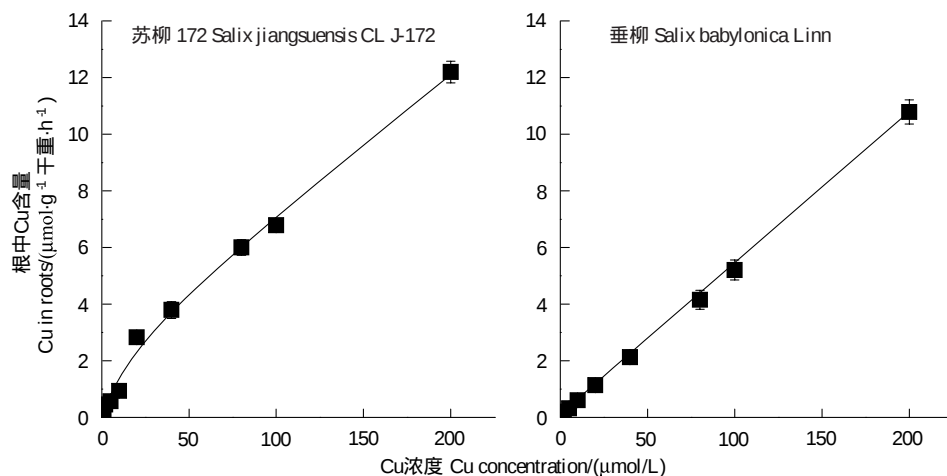


图 1 柳树对 Cu^{2+} 的吸收速率与溶液浓度的关系

Fig. 1 Concentration-dependent Cu^{2+} influx kinetics in root of *Salix*

根据修正后的 Michaelis-Menten 方程拟合结果,相关系数 $R^2 > 0.99$ (表 1),说明 Michaelis-Menten 方程能够很好地拟合吸收曲线。苏柳 172 和垂柳的亲和值 K_m 和最大吸收速率 $V_{\max}$ 都有很大差异,苏柳 172 的 K_m 是 20.147,而垂柳的 K_m 只有 0.454;苏柳 172 的最大吸收速率 $V_{\max}$ 为 2.667,而垂柳的 $V_{\max}$ 只有 0.13。 α 表示离子进入根系的速率,其值越大,离子进入根系的速率越快,可反映根系离子吸收能力。苏柳 172 根系的 α 值 $0.132 \text{ L} \cdot \text{g}^{-1} \text{干重} \cdot \text{h}^{-1}$,垂柳根系的 α 值 $0.296 \text{ L} \cdot \text{g}^{-1} \text{干重} \cdot \text{h}^{-1}$,说明垂柳根系 Cu^{2+} 吸收能力要稍微强于苏柳 172。

表 1 Michaelis-Menten 方程拟合参数

Table 1 Fitting parameters of Michaelis-Menten equation

	最大吸收速率 $V_{\max}$ $/(\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{干重} \cdot \text{h}^{-1})$	米氏常数 K_m $/(\mu\text{mol/L})$	a $/(\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{干重} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	根吸收力 α $/(\text{L} \cdot \text{g}^{-1} \text{干重} \cdot \text{h}^{-1})$	R^2
苏柳 172	2.667	20.147	0.048	0.132	0.99
垂柳	0.13	0.454	0.053	0.286	0.99

2.2 Cu^{2+} 吸收时间动力学

短时间吸收动力学试验中(15—120 min),吸收液中 Cu^{2+} 浓度为 $20 \mu\text{mol/L}$ 时,苏柳 172 和垂柳根系的

Cu^{2+} 积累量都随时间的增加而显著增加 ($P < 0.01$, 图 2)。图 2 显示, 15—60 min 时, 苏柳 172 和垂柳根系 Cu^{2+} 含量快速增加, 呈显著的线性, 苏柳 172 的 Cu^{2+} 含量显著大于垂柳。随着时间的延长, 苏柳 172 根系的 Cu^{2+} 吸收量增加相对缓慢, 而垂柳则有一个急剧增长的阶段, 在 90 min 时, 垂柳根系 Cu^{2+} 含量显著大于苏柳 172。当处理时间到 120 min 时, 垂柳根中的 Cu^{2+} 积累量已是苏柳 172 的 1.43 倍。

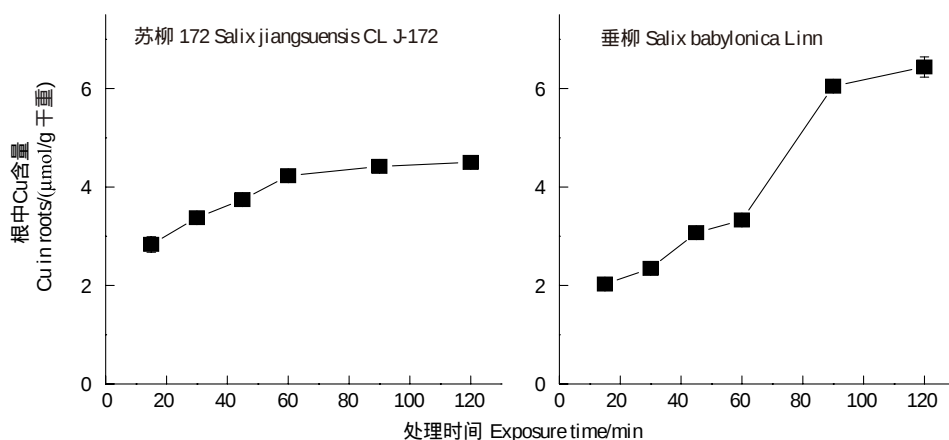


图 2 柳树根系中 Cu^{2+} 积累量在 15—120 min 内随时间的变化

Fig. 2 Time-course of Cu^{2+} accumulation in root of *Salix* in 15—120 min

长时间吸收动力学试验中 (2—48 h), 苏柳 172 和垂柳根系 Cu^{2+} 积累量持续增加 ($P < 0.05$, 图 3)。苏柳 172 根系 Cu^{2+} 积累量, 基本保持平稳增长 (图 3), 而垂柳根系 Cu^{2+} 积累量在 16 h 之前快速增加, 之后增加量相对缓慢 (图 3)。处理 48 h 后, 苏柳 172 和垂柳根中的 Cu^{2+} 积累量分别为 $13.29 \mu\text{mol/g}$ 和 $16.29 \mu\text{mol/g}$, 没有显著差异。

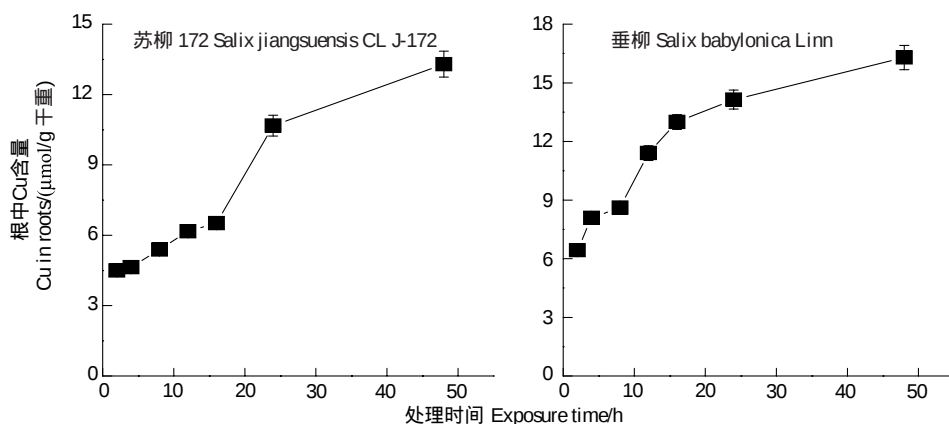


图 3 柳树根系中 Cu^{2+} 积累量在 2—48 h 内随时间的变化

Fig. 3 Time-course of Cu^{2+} accumulation in root of *Salix* in 2—48h

2.3 低分子量有机酸对 Cu^{2+} 吸收的影响

2.3.1 有机酸与 Cu^{2+} 的不同摩尔浓度对比对 Cu^{2+} 吸收的影响

图 4 显示, 苹果酸和乙酸对苏柳 172 和垂柳根系吸收 Cu^{2+} 的影响与有机酸与 Cu^{2+} 的摩尔浓度配比有关。有机酸与 Cu^{2+} 的摩尔浓度配比较低时, 有机酸促进苏柳 172 和垂柳根系对 Cu^{2+} 的吸收; 而当有机酸与 Cu^{2+} 的摩尔浓度配比超过一定数值时, 其促进作用又开始下降, 最终反而抑制苏柳 172 和垂柳根系对 Cu^{2+} 的吸收。苹果酸与 Cu^{2+} 摩尔浓度比例为 5:1 时, 对 Cu^{2+} 吸收的促进作用最强, 使苏柳 172 和垂柳根系中 Cu^{2+} 含量分别增加了 61% 和 9.2%; 乙酸与 Cu^{2+} 摩尔浓度比例为 10:1 时, 对 Cu^{2+} 吸收的促进作用最强, 使苏柳 172 和垂柳

根系中 Cu^{2+} 含量分别增加 43.1% 和 22.9%。

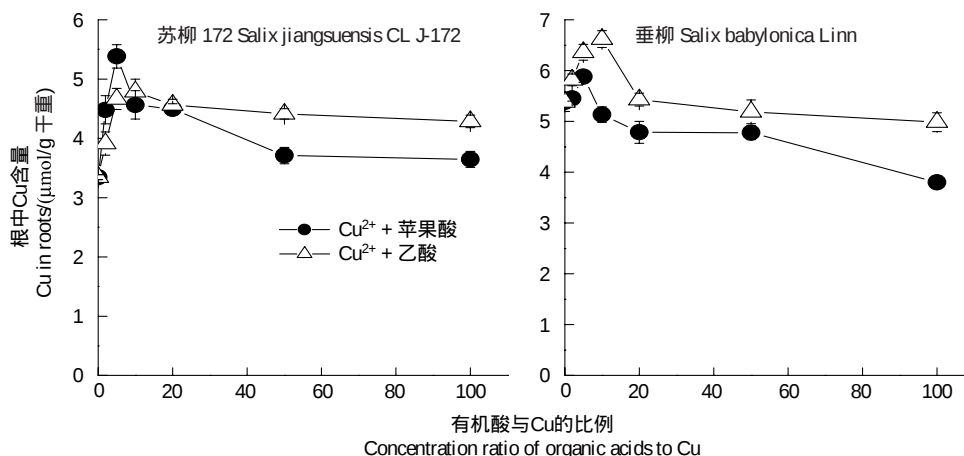


图 4 不同有机酸与 Cu^{2+} 摩尔浓度对比对柳树吸收 Cu^{2+} 的影响

Fig. 4 Effects of concentration ratio of organic acids to Cu^{2+} on Cu^{2+} uptake by *Salix*

2.3.2 低分子量有机酸对 Cu^{2+} 吸收、转运的影响

由于有机酸对垂柳根系吸收 Cu^{2+} 的作用效果明显,且乙酸的作用强于苹果酸,所以本文继续研究了乙酸(乙酸: Cu^{2+} = 10:1)对垂柳吸收、转运 Cu^{2+} 的影响。图 5 显示,在 Cu^{2+} 浓度低于 20 $\mu\text{mol/L}$ 时,乙酸(乙酸: Cu^{2+} = 10:1)能促进垂柳根系对 Cu^{2+} 的吸收(图 5)。当 Cu^{2+} 浓度为 10 $\mu\text{mol/L}$ 时,乙酸对 Cu^{2+} 吸收的促进作用最强,垂柳根系 Cu^{2+} 含量增加了 35.7%。当 Cu^{2+} 浓度大于 20 $\mu\text{mol/L}$ 时,乙酸开始抑制垂柳根系对 Cu^{2+} 的吸收,随着 Cu^{2+} 浓度的升高,这种抑制作用越来越明显,当 Cu^{2+} 浓度达到 300 $\mu\text{mol/L}$ 时,不加有机酸的对照试验中垂柳根系 Cu^{2+} 含量是加入乙酸时的 1.29 倍。乙酸抑制了 Cu^{2+} 在垂柳地上部的积累,随着 Cu^{2+} 浓度的增加,这种抑制作用越明显(图 5)。说明乙酸的存在 能够抑制 Cu^{2+} 由根向地上部的运输,这种抑制作用随着乙酸浓度的增加而加强。

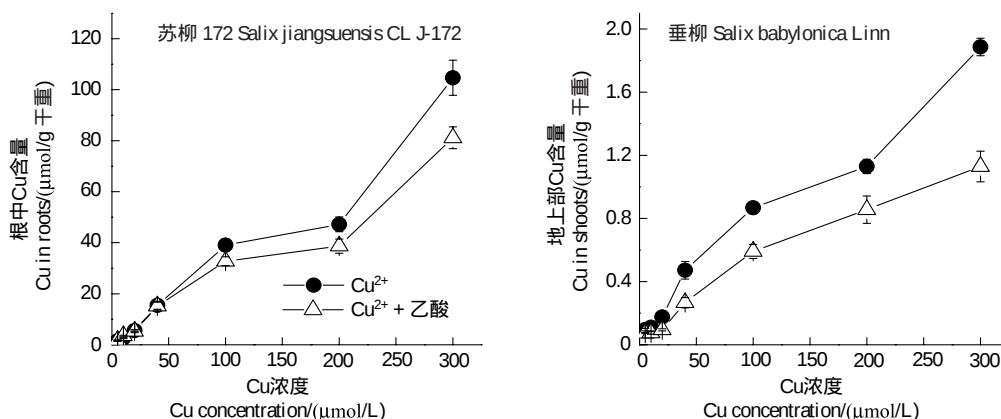


图 5 乙酸在不同 Cu^{2+} 浓度下对垂柳吸收 Cu^{2+} 的影响

Fig. 5 Effect of acetic acid on Cu^{2+} uptake by *Salix babylonica* Linn in different concentration of Cu^{2+}

2.3.3 Cu^{2+} 在柳树根区的分布

对柳树根系的根尖区和成熟区中 Cu^{2+} 含量的测定结果显示,根尖区 Cu^{2+} 的含量远远大于成熟区,说明根尖区是 Cu^{2+} 吸收最活跃的区域。由图 6 可见,无论是否施加有机酸,根尖区都是吸收 Cu^{2+} 最活跃的区域。在 Cu^{2+} 浓度为 20 $\mu\text{mol/L}$ 的吸收液中加入乙酸或苹果酸(有机酸: Cu^{2+} = 10:1)时,乙酸和苹果酸分别使根尖区的 Cu^{2+} 含量增加了 16.5% 和 33.7%;使根成熟区的 Cu^{2+} 含量增加了 23.7% 和 43.0%。 Cu^{2+} 浓度为 20 $\mu\text{mol/L}$ 的吸收液中加入乙酸或苹果酸(有机酸: Cu^{2+} = 10:1)后,根尖区与成熟区的 Cu^{2+} 含量比值分别是 1.40 倍和

1.39 倍, 比不加有机酸时的根尖区与成熟区的 Cu^{2+} 比值 1.49 倍略有降低。

3 讨论

植物根系吸收离子有两条途径, 分别是质外体途径和共质体途径^[19-20]。在吸收实验中, 细胞壁结合部分(质外体途径)会干扰 Cu^{2+} 流进细胞质的量, 原则上, 细胞壁吸附不能被认为是真正的吸收。因此, 为了准确衡量植物对金属离子的吸收, 去除吸附在细胞外表面的 Cu^{2+} 是非常有必要的, 洗脱掉的 Cu^{2+} 可能来源于细胞壁吸附的或者跨细胞质膜流出到外部溶液中的 Cu^{2+} 。5 mmol/L CaCl_2 (2 mmol/L Mes-Tris, pH 值 = 5.8) 的洗脱能够去除细胞壁松散吸附的 Cu^{2+} , 而在冰水浴中洗脱, 一定程度上可以抑制 Cu^{2+} 跨细胞质膜外流到洗脱液中^[21]。由 α 值(表 1)可以看出, 洗脱没有完全去除细胞壁结合的 Cu^{2+} , 垂柳的 α 值大于苏柳 172, 这与垂柳根系的 α 值 $0.296 \text{ L} \cdot \text{g}^{-1} \text{ 干重} \cdot \text{h}^{-1}$) 大于苏柳 172 根系的 α 值 $0.132 \text{ L} \cdot \text{g}^{-1} \text{ 干重} \cdot \text{h}^{-1}$ 是一致的, 说明垂柳根系细胞壁对 Cu^{2+} 的吸附能力较强。

重金属在植物体内的分布有两种情况: 一种是把根系吸收的重金属大部分运输到地上部; 另一种是将大部分重金属积累在根部。重金属在植株内的运输影响着植物对重金属的吸收与耐性, 以及重金属在植物体内的分布^[22]。杨肖娥等人认为超积累植物从根际吸收重金属, 包括根际重金属的活化和跨根细胞质膜运输, 其中金属离子的跨膜运输是一个极其重要的调控机制^[23]。本研究运用水培的方法, 不存在金属的活化过程, 所以控制植物体内金属的积累的首要一步是重金属的跨根细胞膜运输, 即决定于金属跨根细胞膜的内流和外流之间的动态平衡。从苏柳 172 和垂柳对 Cu^{2+} 吸收的动力学结果来看(图 1), 其根系可以积累较大量的 Cu^{2+} , 并且根系 Cu^{2+} 含量随着 Cu^{2+} 浓度的增加而增加, 这是由于 Cu^{2+} 的内流增加引起的。苏柳 172 和垂柳根系 Cu^{2+} 积累量随吸收时间动态变化的结果进一步的表明(图 2—图 3), 在 Cu^{2+} 浓度为 $20 \mu\text{mol/L}$ 时, 随着处理时间的延长, 根系中的 Cu^{2+} 含量也是不断增加的。这与 Hara^[24]、李影^[25]、刘庆^[26]、张连忠^[27] 等的研究结果是一致的。但是苏柳 172 和垂柳根系中 Cu^{2+} 含量随吸收液中 Cu^{2+} 的增加而增加, 是主动运输还是被动运输增加的缘故尚不能确定, 有待进一步研究论证。

有机酸广泛存在于植物体内和根际环境中, 它们可能作为重金属元素的配基, 与其配位结合参与重金属元素吸收、运输、积累等过程^[20,28]。因此, 在重金属污染的植物修复过程中, 通过添加有机酸增加植物对重金属富集量已引起学者们的关注^[29-30]。本研究结果发现, 低浓度的乙酸和苹果酸(乙酸 < 10:1, 苹果酸 < 5:1) 时可以促进苏柳 172 和垂柳根系对 Cu^{2+} 的吸收, 而浓度过高时会抑制其对 Cu^{2+} 的吸收。乙酸与 Cu^{2+} 的比例为 10:1 的情况下, Cu^{2+} 浓度低于 $20 \mu\text{mol/L}$ 时乙酸促进垂柳根系 Cu^{2+} 的吸收; Cu^{2+} 浓度高于 $20 \mu\text{mol/L}$ 后, 乙酸抑制了垂柳根系对 Cu^{2+} 的吸收。以上结果与黄苏珍和王焕华研究的结果一致^[10,15]。但也有报道表明有机酸的存在抑制了植物对重金属的吸收^[31-33]。乙酸和苹果酸促进柳树根系对 Cu^{2+} 的吸收, 使其根系中 Cu^{2+} 含量增加, 推测其原因之一是乙酸和苹果酸减缓了 Cu^{2+} 对柳树的毒害作用, 使其根系活力增强, 从而间接促进了 Cu^{2+} 的吸收; 原因之二可能是乙酸和苹果酸作为 Cu^{2+} 的配基并与其结合, 通过载体或离子通道进入根细胞, 从而导致根系 Cu^{2+} 含量增加。高浓度的有机酸使根系中的 Cu^{2+} 含量降低, 可能是由于有机酸本身对根系活力造成了影响, 这需要进行进一步的研究证实。本研究中, 有机酸使垂柳地上部的 Cu^{2+} 含量降低, 可能是由于有机酸使根系的积累 Cu^{2+} 量增加, 而 Cu^{2+} 首先在根部积累, 而后才向地上部转运^[34], 有机酸增加了根系对 Cu^{2+} 的累积量, 从而使根部向地上部的转移量减少。

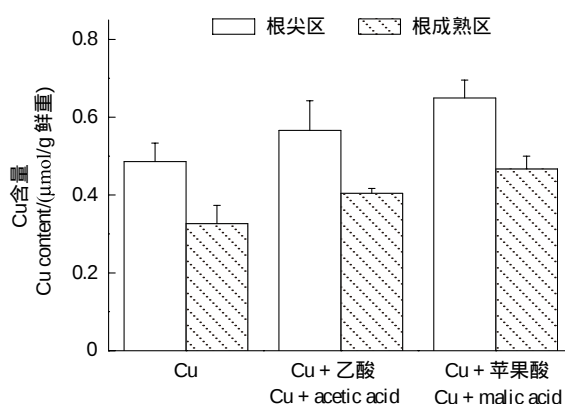


图 6 有机酸对苏柳 172 根不同部位 Cu^{2+} 含量影响

Fig. 6 Effects of organic acids on Cu^{2+} content in different root zone of *Salix jiangsuensis* CL J-172

References:

- [1] Ebbs S D, Lasat M M, Brady D J, Cornish J, Gordon R, Kochian L V. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated site. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26(5): 1424-1430.
- [2] Jensen J K, Holm P E, Nejrup J, Larsen M B, Borggaard O K. The potential of willow for remediation of heavy metal polluted calcareous urban soils. *Environmental Pollution*, 2009, 157(3): 931-937.
- [3] Dimitriou I, Eriksson J, Adler A, Aronsson P, Verwijst T. Fate of heavy metals after application of sewage sludge and wood-ash mixtures to short-rotation willow coppice. *Environmental Pollution*, 2006, 142(1): 160-169.
- [4] Epstein E, Hagen C E. A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots. *Plant Physiology*, 1952, 27(3): 457-474.
- [5] Claassen N, Syring K M, Jungk A. Verification of a mathematical model by simulating potassium uptake from soil. *Plant and Soil*, 1986, 95(2): 209-220.
- [6] Ying R R, Du S J, Hu P J, Zhao Z H, Zhou X Y, Tang Y T, Qiu R L. Kinetic characteristics of Zn uptake by *Potentilla griffithii* Hook. f. var. *velutina* Card. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6): 1349-1354.
- [7] Lu L L, Tian S K, Yang X E, Wang X C, Brown P, Li T Q, He Z L. Enhanced root-to-shoot translocation of cadmium in the hyperaccumulating ecotype of *Sedum alfredii*. *Journal of Experimental Botany*, 2008, 59(11): 3203-3213.
- [8] Sun R L, Zhou Q X. Action and mechanisms of organic acids in higher plants resisting to metals. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(10): 1275-1279.
- [9] Liu J, Sun J J, Wang D Q, Zhang X H, Wei C C, Hu C, Tao J X, Deng S H, Xiao B B. Effect of organic acids on the Cu uptake by *Cr*-hyperaccumulator: *Leersia hexandra* Swartz. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2): 641-645.
- [10] Huang S Z, Yuan H Y, Sun Y D, Han Y L. Effects of applying organic acids on Cd and Cu accumulation and physiological characteristics of *Iris pseudacorus* L.. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(7): 1181-1186.
- [11] Yang W D, Chen Y T. Membrane leakage and antioxidant enzyme activities in roots and leaves of *Salix matsudana* with Cadmium stress. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, 28(11): 2263-2269.
- [12] 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.
- [13] Wang B S, Tu Z Y, Pan M J, Guo Q. The selection of willow excellent clones for pitwoot. *Journal of Jiangsu Forestry Science and Technology*, 1998, 25(3): 1-5.
- [14] Lasat M M, Baker A J M, Kochian L V. Physiological characterization of root Zn^{2+} absorption and translocation to shoots in Zn hyperaccumulator and non-accumulator species of *Thlaspi*. *Plant Physiology*, 1996, 112(4): 1715-1722.
- [15] Wang H H. Effect of Organic Acids on Pb Uptake by Plants and Mutual Effect of Cu and Paraquat on Adsorption onto Chinese Soils. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2007: 42-42.
- [16] Hong C L, Weng H X, Yan A L, Xie L L. Dynamic characterization of iodine uptake in vegetable plants. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1438-1447.
- [17] Cohen C K, Fox T C, Garvin D F, Kochian L V. The role of iron-deficiency stress responses in stimulating heavy-metal transport in plants. *Plant Physiology*, 1998, 116(3): 1063-1072.
- [18] Marschner H. Mineral Nutrition of Higher Plants // Li C J, Wang Z Y, Zhang F S, Translated. 2nd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2001: 13-22.
- [19] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, Sullivan L A, Kochian L V. Characterization of cadmium binding, uptake, and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars. *Plant Physiology*, 1998, 116(4): 1413-1420.
- [20] Zhao F J, Hamon R E, Lombi E, McLaughlin M J, McGrath S P. Characteristics of cadmium uptake in two contrasting ecotypes of the hyper accumulator *Thlaspi caerulescens*. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(368): 535-543.
- [21] Zhao F J, Jiang R F, Dunham S J, McGrath S P. Cadmium uptake, translocation and tolerance in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *New Phytologist*, 2006, 172(4): 646-654.
- [22] Chen T B, Wei C Y, Huang Z C, Huang Q F, Lu Q G, Fan Z L. Arsenic hyperaccumulators *Pteris vittata* L. and its accumulation characteristics. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(3): 207-210.
- [23] Yang X E, Long X X, Ni W Z. Physiological and molecular mechanisms of heavy metal uptake by hyperaccumulating plants. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(1): 8-15.
- [24] Hara T, Sonoda Y, Iwai I. Growth response of cabbage plants to transition elements under water culture conditions. II. Cobalt, nickel, copper, zinc, and molybdenum. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1976, 22(3): 317-325.

- [25] Li Y, Chu L. The uptake and accumulation of Cu in *Hippochaete ramosissimum*. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1565-1572.
- [26] Liu Q, Li W Q, Wang X Y, Ren X E, Chu Z H. The absorption of copper in spinach and rape and its chemical bound forms. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2005, 27(1): 150-153.
- [27] Zhang L Z, Lu K G, Yang H Q. The distribution and accumulation of cuprum and cadmium in young apple tree. Acta Horticulturae Sinica, 2006, 33(1): 111-114.
- [28] Zhang Y X, Chai T Y, Burkard G. Research advances on the mechanisms of heavy metal tolerance in plants. Acta Botanica Sinica, 1999, 41(5): 453-457.
- [29] Luo C L, Shen Z G, Lou L Q, Li X D. EDDS and EDTA-enhanced phytoextraction of metals from artificially contaminated soil and residual effects of chelant compounds. Environmental Pollution, 2006, 144(3): 862-871.
- [30] van Engelen D L, Sharpe-Pedler R C, Moorhead K K. Effect of chelating agents and solubility of cadmium complexes on uptake from soil by *Brassica juncea*. Chemosphere, 2007, 68(3): 401-408.
- [31] Zhang J S, Li H F, Yi C Z. Effect of organic acids on cadmium uptake in rice plant. Agro-Environmental Protection, 1999, 18(6): 278-280.
- [32] Chen Y X, Lin Q, Lu F, He Y F. Study on detoxication of organic acid to raddish under the stress of Pb and Cd. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(4): 467-472.
- [33] Lin Q, Chen Y X, Chen H M, Zheng C R. Effect of organic acids on soil chemical behavior of lead and cadmium and their toxicity to plants. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 619-622.
- [34] Mench M, Martin E. Mobilization of cadmium and other metals from two soils by root exudates of *Zea mays* L., *Nicotiana tabacum* L. and *Nicotiana rustica* L.. Plant and Soil, 1991, 132(2): 187-196.

参考文献:

- [6] 应蓉蓉, 杜锁军, 胡鹏杰, 赵芝灏, 周小勇, 汤叶涛, 仇荣亮. 长柔毛委陵菜对锌的吸收动力学特性. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1349-1354.
- [8] 孙瑞莲, 周启星. 高等植物金属抗性中有机酸的作用及其机理. 生态学杂志, 2006, 25(10): 1275-1279.
- [9] 刘杰, 孙家君, 王敦球, 张学洪, 魏彩春, 胡澄, 陶笈汛, 邓深享, 肖彬彬. 有机酸对铬超富集植物李氏禾吸收 Cu 的影响. 生态环境, 2008, 17(2): 641-645.
- [10] 黄苏珍, 原海燕, 孙延东, 韩玉林. 有机酸对黄菖蒲镉、铜积累及生理特性的影响. 生态学杂志, 2008, 27(7): 1181-1186.
- [11] 杨卫东, 陈益泰. 镉胁迫对旱柳细胞膜透性和抗氧化酶活性的影响. 西北植物学报, 2008, 28(11): 2263-2269.
- [12] 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.
- [13] 王宝松, 涂忠虞, 潘明建, 郭群. 柳树矿柱材优良无性系选育. 江苏林业科技, 1998, 25(3): 1-5.
- [15] 王焕华. 有机酸对植物吸收 Pb 的影响及百草枯和 Cu 在土壤中吸附行为的交互作用研究. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2007: 42-42.
- [16] 洪春来, 翁焕新, 严爱兰, 谢伶俐. 蔬菜吸收不同形态外源碘的动力学特性. 生态学报, 2009, 29(3): 1438-1447.
- [18] Marschner H. 高等植物的矿质营养//李春俭, 王震宇, 张福锁, 译. 第2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2001: 13-22.
- [22] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 黄启飞, 鲁全国, 范稚莲. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征. 科学通报, 2002, 47(3): 207-210.
- [23] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟. 超积累植物吸收重金属的生理及分子机制. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(1): 8-15.
- [25] 李影, 褚磊. 节节草 (*Hippochaete ramosissimum*) 对 Cu 的吸收和积累. 生态学报, 2008, 28(4): 1565-1572.
- [26] 刘庆, 李文庆, 王欣英, 任秀娥, 褚兆辉. 菠菜和油菜对铜的吸收及化学结合形态研究. 江西农业大学学报, 2005, 27(1): 150-153.
- [27] 张连忠, 路克国, 杨洪强. 苹果幼树铜、镉分布特征与累积规律研究. 园艺学报, 2006, 33(1): 111-114.
- [28] 张玉秀, 柴团耀, Burkard G. 植物耐重金属机理研究进展. 植物学报, 1999, 41(5): 453-457.
- [31] 张敬锁, 李花粉, 衣纯真. 有机酸对水稻镉吸收的影响. 农业环境保护, 1999, 18(6): 278-280.
- [32] 陈英旭, 林琦, 陆芳, 何云峰. 有机酸对铅、镉植株危害的解毒作用研究. 环境科学学报, 2000, 20(4): 467-472.
- [33] 林琦, 陈英旭, 陈怀满, 郑春荣. 有机酸对 Pb、Cd 的土壤化学行为和植株效应的影响. 应用生态学报, 2001, 12(4): 619-622.

CONTENTS

CO ₂ emission from an alpine <i>Kobresia humilis</i> meadow in winters	WU Qin, HU Qiwu, CAO Guangmin, et al (5107)
Effect of cultivation on soil organic carbon and total nitrogen accumulation in Cele oasis croplands and their relation to crop yield	HUANG Caibian, ZENG Fanjiang, LEI Jiaqiang, et al (5113)
Biomass and its allocation of four grassland species under different nitrogen levels	QI Yu, HUANG Yongmei, WANG Yan, et al (5121)
Small-scale spatial patterns of genetic structure in <i>Castanopsis eyrei</i> populations based on autocorrelation analysis in the Tiantai Mountain of Zhejiang Province	QI Caihong, JIN Zexin, LI Junmin (5130)
Influence of vegetation on frozen ground temperatures the forested area in the Da Xing'anling Mountains, Northeastern China	CHANG Xiaoli, JIN Huijun, YU Shaopeng, et al (5138)
Analysis of stable carbon isotopes in different components of tree rings of <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	SHANG Zhiyuan, WANG Jian, CUI Mingxing, et al (5148)
Retrieval of leaf area index for different grasslands in Inner Mongolia prairie using remote sensing data	LIU Yibo, JU Weimin, ZHU Gaolong, et al (5159)
Decomposition of lotus leaf litter and its effect on the aquatic environment of the Beili Lake in the Hangzhou West Lake	SHI Qi, JIAO Feng, CHEN Ying, et al (5171)
Effects of fire disturbance on greenhouse gas emission from <i>Larix gmelinii</i> - <i>Carex schmidtii</i> forested wetlands in XiaoXing'an Mountains, Northeast China	YU Lili, MU Changcheng, GU Han, et al (5180)
Wetland landscape transition pattern of Lianbo Beach along the Middle Yellow River	GUO Donggang, SHANGGUAN Tieliang, BAI Zhongke, et al (5192)
Effect of revegetation on functional groups of soil organic carbon on the Loess Plateau	LI Ting, ZHAO Shiwei, ZHANG Yang, et al (5199)
Soil organic and inorganic carbon contents in relation to soil physicochemical properties in northeastern China	ZU Yuangang, LI Ran, WANG Wenjie, et al (5207)
Characteristics of soil respiration in fallow and its influencing factors at arid-highland of Loess Plateau	GAO Huiyi, GUO Shengli, LIU Wenzhao (5217)
Soil microbial functional diversity between rhizosphere and non- rhizosphere of typical plants in the hilly area of southern Nixia	AN Shaoshan, LI Guohui, CHEN Liding (5225)
Differences in the surface palynomorph assemblages on a karst mountain and rocky desertification areas: a case in Nanchuan District, Chongqing	HAO Xiudong, OUYANG Xuhong, XIE Shiyu (5235)
Ash content and caloric value in the leaves of <i>Sinocalycanthus chinensis</i> and its accompanying species	JIN Zexin, LI Junmin, MA Jine (5246)
Uptake kinetic characteristics of Cu ²⁺ by <i>Salix jiangsuensis</i> CL J-172 and <i>Salix babylonica</i> Linn and the influence of organic acids	CHEN Caihong, LIU Zhikun, CHEN Guangcai, et al (5255)
Introduction of <i>TaNHX2</i> gene enhanced salt tolerance of transgenic puna chicory plants	ZHANG Lijun, CHENG Linmei, DU Jianzhong, et al (5264)
Effects of air humidity and soil water deficit on characteristics of leaf cuticular waxes in alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	GUO Yanjun, NI Yu, GUO Yunjiang, et al (5273)
Influence of water storage capacity on yield of winter wheat in dry farming area in the Loess Plateau	DENG Zhenyong, ZHANG Qiang, WANG Qiang, et al (5281)
Research of dynamic variation of moisture in apple orchard soil in the area of Xianyang in recent years	ZHAO Jingbo, ZHOU Qi, CHEN Baoqun, et al (5291)
Volatile oil contents correlate with geographical distribution patterns of the miao ethnic herb <i>Fructus Cinnamomi</i>	ZHANG Xiaobo, ZHOU Tao, GUO Lanping, et al (5299)
Effect of environmental factors on growth of <i>Chlorella</i> sp. and optimization of culture conditions for high oil production	DING Yancong, GAO Qun, LIU Jiayao, et al (5307)
The effects of substrates on locomotor performance of two sympatric lizards, <i>Takydromus septentrionalis</i> and <i>Plestiodon chinensis</i>	LIN Zhihua, FAN Xiaoli, LEI Huanzong, et al (5316)
Guild structure of wintering waterbird assemblages in shallow lakes along Yangtze River in Anhui Province, China	CHEN Jinyun, ZHOU Lizhi (5323)
Phylogenetic diversity analysis and <i>in situ</i> hybridization of symbiotic Oxymonad flagellates in the hindgut of <i>Reticulitermes chinensis</i> Snyder	CHEN Wen, SHI Yu, PENG Jianxin, et al (5332)
An entropy weight approach on the comprehensive evaluation of the Pearl River Delta Nature Reserve	ZHANG Linying, XU Songjun (5341)
Review and Monograph	
On planning method of mesoscale and microscale ecological land	RONG Bingling, LI Dong, XIE Yingxia (5351)
Effects of land use change on soil organic carbon: a review	CHEN Zhao, LÜ Changhe, FAN Lan, et al (5358)
Marine phytoplankton and biological carbon sink	SUN Jun (5372)
Effect of permafrost degradation on methane emission in wetlands: a review	SUN Xiaoxin, SONG Changchun, WANG Xianwei, et al (5379)
A review on the effects of biogenic elements and biological factors on wetland soil carbon mineralization	ZHANG Linhai, ZENG Congsheng, TONG Chuan (5387)
A review of studies using ecological network analysis	LI Zhongcai, Xu Junyan, WU Changyou, et al (5396)
Scientific Note	
Dynamics of age structures on <i>Agropyron michnoi</i> and <i>Leymus chinensis</i> in different communities	JIN Xiaoming, AI Lin, LIU Jidong, et al (5406)
The impact of thematic resolution on NDVI spatial pattern	HUANG Caixia, LI Xiaomei, SHA Jinming (5414)

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 18 期 (2011 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 18 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		



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 70.00 元