

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

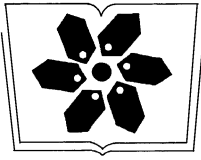
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第23期 Vol.31 No.23 **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 23 期 2011 年 12 月 (半月刊)

目 次

| | |
|--|----------------------|
| 不同海拔高度高寒草甸光能利用效率的遥感模拟····· | 付 刚,周宇庭,沈振西,等 (6989) |
| 天山雪岭云杉大气花粉含量对气温变化的响应····· | 潘燕芳,阎 顺,穆桂金,等 (6999) |
| 春季季风转换期间孟加拉湾的初级生产力····· | 刘华雪,柯志新,宋星宇,等 (7007) |
| 降水量对川西北高寒草甸牦牛粪分解速率的影响····· | 吴新卫,李国勇,孙书存 (7013) |
| 基于 SOFM 网络对黄土高原森林生态系统的养分循环分类研究····· | 陈 凯,刘增文,李 俊,等 (7022) |
| 不同油松种源光合和荧光参数对水分胁迫的响应特征····· | 王 琰,陈建文,狄晓艳 (7031) |
| 盐生境下硅对坪用高羊茅生物学特性的影响····· | 刘慧霞,郭兴华,郭正刚 (7039) |
| 高温胁迫对不同种源希蒙得木叶片生理特性的影响····· | 黄激激,张念念,胡庭兴,等 (7047) |
| 黄土高原水土保持林对土壤水分的影响····· | 张建军,李慧敏,徐佳佳 (7056) |
| 青杨雌雄群体沿海拔梯度的分布特征····· | 王志峰,胥 晓,李霄峰,等 (7067) |
| 大亚湾西北部春季大型底栖动物群落特征····· | 杜飞雁,林 钦,贾晓平,等 (7075) |
| 湛江港湾浮游桡足类群落结构的季节变化和影响因素····· | 张才学,龚玉艳,王学锋,等 (7086) |
| 台湾海峡鲈鱼种群遗传结构····· | 张丽艳,苏永全,王航俊,等 (7097) |
| 洱海入湖河流苴河下游氮磷季节性变化特征及主要影响因素····· | 于 超,储金宇,白晓华,等 (7104) |
| 转基因鱼试验湖泊铜锈环棱螺种群动态及次级生产力····· | 熊 晶,谢志才,蒋小明,等 (7112) |
| 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征····· | 王维奇,徐玲琳,曾从盛,等 (7119) |
| EDTA 对铅锌尾矿改良土壤上玉米生长及铅锌累积特征的影响····· | 王红新,胡 锋,许信旺,等 (7125) |
| 不同包膜控释尿素对农田土壤氮挥发的影响····· | 卢艳艳,宋付朋 (7133) |
| 垄作栽培对高产田夏玉米光合特性及产量的影响····· | 马 丽,李潮海,付 景,等 (7141) |
| DCD 不同施用时间对小麦生长期 N ₂ O 排放的影响····· | 纪 洋,余 佳,马 静,等 (7151) |
| 氮肥、钙肥和盐处理在冬小麦融冻胁迫适应中的生理调控作用····· | 刘建芳,周瑞莲,赵 梅,等 (7161) |
| 东北有机及常规大豆对环境影响的生命周期评价····· | 罗 燕,乔玉辉,吴文良 (7170) |
| 土壤施硒对烤烟生理指标的影响····· | 许自成,邵惠芳,孙曙光,等 (7179) |
| 不同种植方式对花生田间小气候效应和产量的影响····· | 宋 伟,赵长星,王月福,等 (7188) |
| 西花蓟马的快速冷驯化及其生态学代价····· | 李鸿波,史 亮,王建军,等 (7196) |
| 温度对麦长管蚜体色变化的影响····· | 邓明明,高欢欢,李 丹,等 (7203) |
| 不同番茄材料对 B 型烟粉虱个体发育和繁殖能力的影响····· | 高建昌,郭广君,国艳梅,等 (7211) |
| 基于生态系统受扰动程度评价的白洋淀生态需水研究····· | 陈 贺,杨 盈,于世伟,等 (7218) |
| 两种典型养鸡模式的能值分析····· | 胡秋红,张力小,王长波 (7227) |
| 四种十八碳脂肪酸抑藻时-效关系分析的数学模型设计····· | 何宗祥,张庭廷 (7235) |
| 流沙湾海草床重金属富集特征····· | 许战州,朱艾嘉,蔡伟叙,等 (7244) |
| 基于 QuickBird 的城市建筑景观格局梯度分析····· | 张培峰,胡远满,熊在平,等 (7251) |
| 景观空间异质性及城市化关联——以江苏省沿江地区为例····· | 车前进,曹有挥,于 露,等 (7261) |
| 基于 CVM 的太湖湿地生态功能恢复居民支付能力与支付意愿相关研究····· | 于文金,谢 剑,邹欣庆 (7271) |
| 专论与综述 | |
| 北冰洋海域微食物环研究进展····· | 何剑锋,崔世开,张 芳,等 (7279) |
| 城市绿地的生态环境效应研究进展····· | 苏泳娴,黄光庆,陈修治,等 (7287) |
| 城市地表灰尘中重金属的来源、暴露特征及其环境效应····· | 方凤满,林跃胜,王海东,等 (7301) |
| 研究简报 | |
| 三峡库区杉木马尾松混交林土壤 C、N 空间特征····· | 林英华,汪来发,田晓堃,等 (7311) |
| 广州小斑螟发生与环境因子的关系····· | 刘文爱,范航清 (7320) |



封面图说: 黄河的宁夏段属于中国的半荒漠地区,这里气候干燥、降水极少(250mm 以下)、植被缺乏、物理风化强烈、风力作用强劲、其蒸发量超过降水量数十倍。人们从黄河中提水引水灌溉土地,就近形成了荒漠中的绿洲。有水就有生命,有水就有绿色。这种独特的条件形成了人与沙较量的生态关系——不是人逼沙退就是沙逼人退。

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

王红新, 胡锋, 许信旺, 李修强, 井永革. EDTA 对铅锌尾矿改良土壤上玉米生长及铅锌累积特征的影响. 生态学报, 2011, 31(23): 7125-7132.
Wang H X, Hu F, Xu X W, Li X Q, Jing Y P. Effects of EDTA on growth and lead-zinc accumulation in maize seedlings grown in amendment substrates containing lead-zinc tailings and soil. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7125-7132.

EDTA 对铅锌尾矿改良土壤上玉米生长及 铅锌累积特征的影响

王红新^{1,2}, 胡 锋^{1,*}, 许信旺², 李修强¹, 井永革¹

(1. 南京农业大学 资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 池州学院 资源环境与旅游系, 池州 247000)

摘要: 针对铅锌尾矿废弃地的复垦, 选用玉米在 5 种不同尾矿砂与土壤比例的改良基质上进行盆栽试验研究。盆栽培养基质以尾矿与土壤按 0:100、25:75、50:50、75:25、100:0 比例混合而成, 分别标记为: TA00、TA25、TA50、TA75、TA100。研究表明: 抑制玉米生长的主要因素是尾矿基质极端贫瘠, Pb、Zn 含量过高。添加 EDTA 前, 玉米在所有处理中都能正常生长, 植株没有出现明显的毒害症状。添加 EDTA 后玉米生物量显著下降, 并且在改良基质中尾矿所占比例越高, 下降幅度越大。EDTA 可以显著提高玉米对 Pb、Zn 的富集能力, 其中对 Pb 的富集能力大于 Zn。基质比例为 50:50 时, 添加 EDTA 后玉米对 Pb、Zn 的迁移量虽然比基质 100:0 低, 但是玉米的生物量、株高和根系各指标都比基质 100:0 下降幅度小。因此, 尾矿和土壤比例为 50:50 的基质改良方式比较合理, 可用于铅锌尾矿废弃地的复垦。

关键词: EDTA; 玉米; 改良基质; 铅锌尾矿; 植物修复

Effects of EDTA on growth and lead-zinc accumulation in maize seedlings grown in amendment substrates containing lead-zinc tailings and soil

WANG Hongxin^{1,2}, HU Feng^{1,*}, XU Xinwang², LI Xiuqiang¹, JING Yongping¹

1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

2 Chizhou College, Anhui Chizhou 247000, China

Abstract: Growth of plants that absorb heavy metals is a promising approach for reclamation of contaminated soil. The aim of this study was to examine the ability of maize to absorb lead and zinc from soil, and to determine the effects of ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) on this process. Pot experiments were conducted in which maize seedlings were grown in amendment substrates containing Pb-Zn tailings and soil, and the effects of EDTA were determined. The ratios of Pb-Zn tailings to soil in the substrates were 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 and 100:0, designated as TA00, TA25, TA50, TA75 and TA100, respectively. The main factors restricting maize growth were poor nutrition and high concentrations of Pb and Zn in the amendment substrates. Maize grew normally in test substrates without EDTA, and no apparent phytotoxicity was observed. However, biomass of maize clearly decreased with the addition of EDTA, and greater decreases in biomass were observed in maize grown in substrates containing higher proportions of Pb-Zn tailings. The decreases in average plant height with addition of EDTA were in the following order: TA100 > TA75 > TA50 > TA25 > TA00. After addition of EDTA, the decreases were significant for the average plant height in the TA50, TA75 and TA100 substrates ($P < 0.05$). The chlorophyll content-SPAD values of maize leaves decreased with increasing proportions of Pb-Zn tailings in the amendment substrates. The decreases were in the following order: TA100 > TA75 > TA50 > TA25 > TA00. Further decreases were observed upon addition of EDTA ($P < 0.05$). The lowest chlorophyll content-SPAD value was in the TA100

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071337); 安徽省高校省级优秀青年人才基金项目(2009SQRZ143)

收稿日期: 2010-09-29; **修订日期:** 2011-04-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fenghu@njau.edu.cn

treatment, indicating that the 100% Pb-Zn tailings substrate had negative effects on photosynthetic pigments content. This was probably because the Pb-Zn tailings contained high levels of heavy metal ions, which can damage protein synthesis in the chloroplast, leading to chloroplast decomposition. Addition of EDTA decreased the root growth, biomass, and other root indices in maize. The decreases in root length ranged from 18 to 28%, decreases in root surface area ranged from 13 to 30%, and decreases in root volume ranged from 11 to 19%. The decreases after addition of EDTA were significant for all parameters, except for root surface area in TA50 and TA75, and root volume in TA100 ($P < 0.05$). The absorption of Pb and Zn by maize generally increased with greater proportions of tailings in the amendment substrates. In the plants grown in TA25, TA50, TA75, and TA100, the Pb content in shoots was 4.3, 6.5, 6.0 and 5.4 times that in control, respectively, and the Pb content in roots was 2.5, 3.9, 3.6 and 3.6 times that in the control, respectively, after addition of EDTA. The addition of EDTA significantly enhanced the accumulation of Pb and Zn in maize, and more Pb accumulated than Zn. Smaller amounts of Pb and Zn accumulated in maize grown in substrate containing 50% tailings and 50% soil compared with that in maize grown in substrate containing 100% tailings. However, plants grown on substrate containing 50% tailings and 50% soil were healthier; that is, the values for biomass, plant height, and root indices were higher than their respective values in maize grown in substrate containing 100% tailings. Therefore, we propose that the amendment of 50% soil to tailings is reasonable for reclamation of Pb-Zn tailing waste lands.

Key Words: EDTA; maize; amendment substrates; lead-zinc tailings; phytoremediation

采选矿产生的尾矿砂是主要的工业固体废物,不仅占用大量土地,而且还是严重持久的污染源。金属采矿所产生的尾矿砂,由于颗粒较小,植物养分含量低,保水、保肥性能较差,重金属含量又较高,故对其进行植被恢复非常困难^[1]。螯合诱导修复技术已被广泛应用于重金属污染土壤的植物修复或植物采矿中^[2]。螯合剂对金属离子有很强的螯合能力,能增大土壤中重金属的溶解度,促进重金属在植物地上部的积累^[3]。近年来,一些人工合成的螯合剂和泥炭等土壤改良剂对 Pb 在植物体内积累的影响已有不少报道^[4-7],研究最多的螯合剂是 EDTA(乙二胺四乙酸)。EDTA 对土壤中靶金属有很高的螯合效率,其在环境中稳定,对生物的毒性较小,是较为常用的土壤重金属螯合剂,土壤中添加 EDTA 可显著促进 Pb 在植物地上部的积累^[8-9]。吴龙华等人^[10]对 EDTA 研究发现施加 3 mmol/kg EDTA 大幅度提高了土壤溶液中铜、锌、镉和铅的浓度。李玉双、杨晓英、孙健^[11-13]研究认为,EDTA 能提高根际土壤 Pb 的植物有效性,促进 Pb 从根系向地上部的运输,显著提高植物对 Pb 的富集能力。

已有报道玉米对 Pb、Zn 具有较高的富集能力,它生物量大,生长周期短,抗干旱和病虫害能力强,是一种潜在的、很有应用前景的重金属污染土壤修复植物。另外,随着玉米深加工的发展,玉米不仅作为食品、医药、饲料的重要来源,也在纺织、造纸等工业方面有着广泛的用途^[14]。在受污染的土壤上种植玉米,收割后作为工业用途,吸收进玉米体内的重金属就不会进入食物链,因此,具有很大的应用潜力。用土壤与尾矿砂混合覆盖的方法处理尾矿砂,能改良尾矿砂结构,提高持水能力,缩短土壤熟化时间,同时节省大量土地资源,减少复垦费用,是一种经济有效的复垦方法^[15]。因此,本文采用不同比例的对照土壤和铅锌尾矿砂混合作为改良基质进行盆栽试验,研究添加 EDTA 对玉米生长及对 Pb、Zn 提取效率的影响,探讨其修复铅锌尾矿废弃地的可行性,为生产中铅锌尾矿废弃地螯合辅助植物修复提供理论基础和调控依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用玉米品种为南京紫玉糯 1 号,购自南京农业大学神州种业公司。试验用铅锌尾矿砂取自安徽池州市黄山岭铅锌矿尾矿库的新尾矿砂,对照土壤取自池州市升金湖自然保护区,土壤类型为水稻土,取 0—20 cm 土层的土壤。土壤及尾矿基本性质见表 1。

表 1 供试土壤、尾矿基本理化性质

Table 1 Basic properties of the soil and mine tailings used I for pot test

| 土壤类型 Type of soil | pH (H ₂ O) | 有机质 Organic C /(g/kg) | 全 N Total N /(g/kg) | 全 P Total P /(g/kg) | 全 K Total K /(g/kg) | 速效磷 Available P /(mg/kg) | 速效钾 Available K /(mg/kg) | 重金属含量 Content of Heavy Metal /(mg/kg) | |
|----------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---|------------------|
| | | | | | | | | 全 Pb Total Pb | 全 Zn Total Zn |
| 土壤 Soil | 6.10 | 15.26 | 7.31 | 0.77 | 2.87 | 8.10 | 147.80 | 18.70 | 44.10 |
| 尾矿 Tailings | 9.12 | 14.94 | 3.65 | 0.01 | 8.60 | 1.37 | 49.20 | 1771.00 | 5618.00 |

由表 1 可知,尾矿砂和对照土壤中重金属含量顺序均为 Zn > Pb,尾矿砂重金属含量极高,两种重金属含量均为对照土壤的 100 倍左右,都远远超出土壤质量环境标准的三级标准值(Zn 500 mg/kg,Pb 500 mg/kg),存在对植物生长造成危害的可能性。

1.2 实验设计

本试验在南京农业大学资环学院生态学专业温室内完成。供试土壤和尾矿经风干后过 2 mm 筛。将尾矿与土壤以 TA00(100% 土壤)、TA25(25% 尾矿+75% 土壤)、TA50(50% 尾矿+50% 土壤)、TA75(75% 尾矿+25% 土壤)和 TA100(100% 尾矿)方式充分混合,装入直径 10 cm、深 10 cm 的塑料盆钵中,每盆 1.0 kg。每种基质装 6 盆,共 30 盆。施基肥: NH₄Cl 200 mg/kg、KH₂PO₄ 50 mg/kg、K₂SO₄ 150 mg/kg,将肥料加少量水溶解,倒入已经装盆的混合基质中,然后向盆中慢慢加水,一直到盆底有水珠渗出,平衡 1 周。选取籽粒饱满的玉米种子经消毒后播于盆钵中,每盆 5 粒。待种子萌发 1 周后间苗,每盆留 2 株。

幼苗生长第 31 天,同一种改良基质的玉米均以螯合剂为因素设 2 个处理:(1)对照(CK),加 100 mL 去离子水;(2)施 5 mmol/kg 分析纯 EDTA (EDTA-Na₂),EDTA 配成 50 mmol/L 的溶液,一次性缓慢施入 100 mL。每个处理 3 个重复。经螯合处理 7 d 后,分地上部和根系采收,并用去离子水冲洗。根系在 20 mmol/L 乙二胺四乙酸二钠(EDTA-Na₂)溶液中浸泡交换 30 min,以去除根系表面粘附的金属离子。然后在 105 °C 下杀青 15 min,80 °C 烘干至恒重,用万分之一天平称重。

1.3 分析方法

(1)土壤重金属含量测定采用 HCl-HNO₃ 消化,烘干的植物样品研碎后用 HNO₃-HClO₄(体积比为 4:1) 混合液消煮,用 ICP-AES 法测定重金属含量;

(2)叶片叶绿素含量在加入螯合剂的前一天用 SPAD-502 型手持叶绿素仪测定,每株玉米随机选取植株上部叶片 3 片,测定其叶绿素值,取平均值;

(3)植物根系指标包括根系长度、根表面积、根体积和根尖数,用根系分析系统测定(Win RHIZO A1600+,Regent Instruments Inc.)。

1.4 统计方法

用 SPSS 统计软件 LSD 法进行差异显著性分析,并对典型变量之间进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 EDTA 对玉米生长的影响

2.1.1 添加 EDTA 对玉米生物量的影响

不同改良方式的基质中玉米都能正常萌发出苗。在玉米出苗生长到第 30 天时,各处理均没有观察到植株有明显毒害症状。添加 EDTA 第 5 天,TA25、TA50、TA75、TA100 组中玉米出现了不同程度的叶片发黄和萎蔫,其程度为 TA25 < TA50 < TA75 < TA100。玉米地上部和根系干重在不同培养基质中(表 2),EDTA 处理比相应对照降低 21%、32%、25%、25%、45%(地上部),26%、35%、29%、21%、38%(根系),除 TA75、TA100 组的根系外,均达到显著性差异($P < 0.05$)。导致 TA25、TA50、TA75 3 组中 Pb、Zn 含量越高玉米干重下降比例越小的原因,可能是游离态 EDTA 比螯合态 EDTA(与铅螯合)更具有生物毒性,抑制了玉米生长^[5]。

从株高来看,5种不同尾矿砂与土壤比例的基质中,添加 EDTA 的处理相对于对照均有不同程度的下降,分别为:TA00 < TA25 < TA50 < TA75 < TA100,其中 TA50、TA75、TA100 组下降程度达到显著性差异($P < 0.05$)。表明随培养基质中 Pb、Zn 含量的增加,玉米植株的生长受到抑制。由表 2 可知,玉米叶片的 SPAD 值随基质中 Pb、Zn 含量的增加逐渐下降,其下降幅度为:TA00 < TA25 < TA50 < TA75 < TA100,与对照相比,均差异显著($P < 0.05$)。TA100 组中玉米叶片的叶绿素值最低,表明纯尾矿砂的培养基质对玉米叶片光合色素含量有不良影响,原因是尾矿砂中重金属离子过多,使叶绿体内蛋白质合成受到破坏,导致叶绿体分解^[16]。此外,尾矿砂营养物质含量较低,尤其速效磷含量仅为 1.37 mg/kg(表 1),这也是影响叶绿素含量的一个重要因素。

表 2 添加 EDTA 对玉米生物量的影响

Table 2 Effects of EDTA on the biomass of maize

| 处理 Treatments | 基质类型 Substrate type | 地上部干物 质量/(g/盆) Dry biomass of shoots | 根系干物 质量/(g/盆) Dry biomass of roots | 干物质总量 /(g/盆) Dry biomass of roots and shoots | 平均株高/cm Average plant height | SPAD |
|------------------|------------------------|---|---|---|------------------------------------|--------|
| 对照 CK | TA00 | 2.53a | 0.77a | 3.33a | 10.5a | 24.9a |
| | TA25 | 1.30c | 0.54b | 1.84c | 8.9b | 23.2b |
| | TA50 | 1.05d | 0.48bc | 1.53d | 7.9c | 21.7cd |
| | TA75 | 0.93de | 0.38cd | 1.31e | 8.0c | 20.6e |
| | TA100 | 0.66f | 0.26ef | 0.92g | 7.0d | 18.5f |
| EDTA | TA00 | 1.99b | 0.57b | 2.56b | 9.8a | 22.3c |
| | TA25 | 0.89de | 0.35de | 1.24e | 8.3bc | 21.1de |
| | TA50 | 0.79ef | 0.34de | 1.13ef | 7.0d | 18.6f |
| | TA75 | 0.70f | 0.30de | 1.00fg | 6.9d | 19.1f |
| | TA100 | 0.36g | 0.16f | 0.52h | 5.8e | 16.2g |

表内同一列中不同字母表示差异显著($P < 0.05$)

2.1.2 添加 EDTA 对玉米根系性状的影响

通过根系分析仪对根系的各项指标分析表明,添加 EDTA 对根系生长有明显影响。从图 1 可以看出,添加 EDTA 抑制了根系生长,与根系生物量一样,各改良基质中,添加 EDTA 比相应对照的根系各项指标都有不同程度下降,其范围分别为:18%—28%(根长度)、13%—30%(根表面积)、11%—19%(根体积)、20%—22%(根尖数),除 TA50(根表面积)、TA75(根表面积)、TA100(根体积)外,其余下降程度均达到显著性差异($P < 0.05$)。另外,在纯尾矿基质(TA100)上,无论是对照还是添加 EDTA,根系各项指标下降幅度最大。其原因是尾矿砂中生长的幼苗积累了高含量的重金属(表 3),并大多积累于根部,抑制了根系活力。随着根系各指标的下降,根系干物质量也呈下降趋势。根长度、根表面积、根体积、根尖数均与根系干物质量呈中度正相关($0.5 < r < 0.6$)。土壤和尾矿砂混合比例为 50:50 的改良基质中根系各指标下降幅度最小,表明尾矿与土壤按此比例混合,基质结构发生了变化,保水性增加,有利于根系生长。

2.2 添加 EDTA 对玉米体内 Pb、Zn 含量及分布的影响

由表 3 可以看出,在 TA00 组(纯土壤基质)中,无论对照还是添加 EDTA,玉米根系 Pb、Zn 含量均比地上部含量有所增加,但没有达到显著性差异($P > 0.05$)。其中,Pb 含量增幅比 Zn 大。添加 EDTA 后,玉米地上部和根系中两种重金属含量仍然比较低,可能和培养基质中 Pb、Zn 含量较低有关。

除 TA00 组(纯土壤)外,其余 4 组中玉米对 Pb、Zn 的吸收基本表现出随基质中金属含量增加而增大的趋势。在 TA25、TA50、TA75、TA100 4 组中,添加 EDTA 后 Pb 含量分别是其相应对照的 4.3、6.5、6.0、5.4 倍(地上部)和 2.5、3.9、3.6、3.6 倍(根系),并且都在 TA100 组中达到最高。从转运系数来看,添加 EDTA 后玉米对 Pb 的转运系数比相应对照明显增加,表明添加 EDTA 促进了 Pb 从根系向玉米地上部的转移。因此,加入 EDTA 能显著增加基质中 Pb 的有效性,提高玉米地上部 Pb 的含量。这可能是因为 EDTA 螯合了土壤中的铅

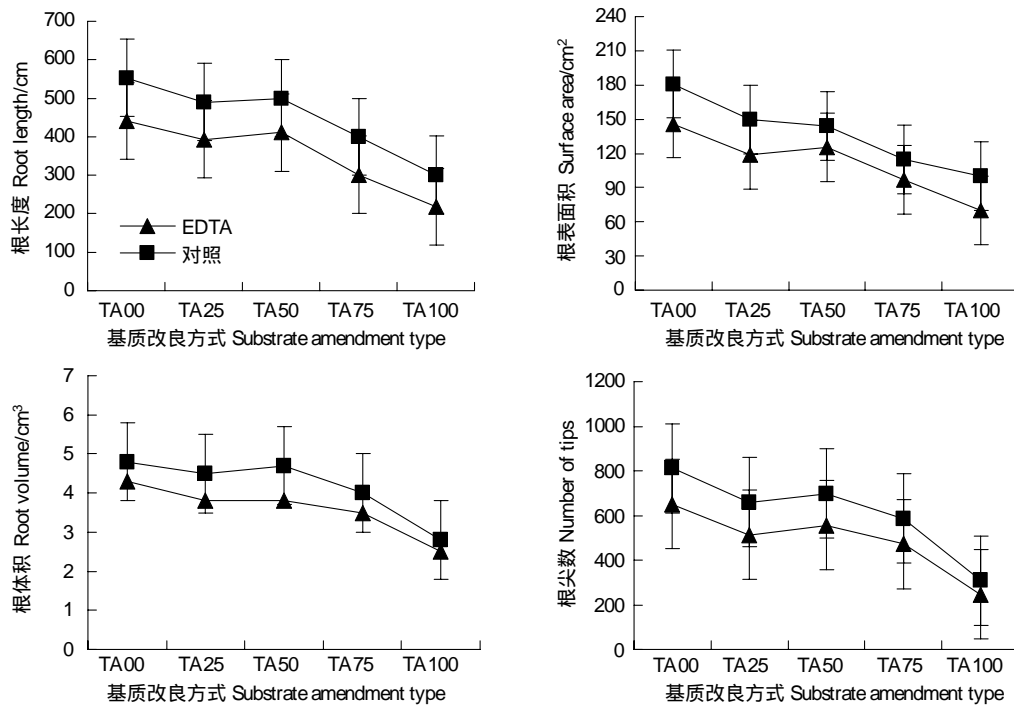


图 1 添加 EDTA 对玉米根系性状的影响
Fig. 1 Effects of EDTA on root's characters of maize

形成可溶性金属螯合物 Pb-EDTA,从而增加土壤溶液中重金属的浓度。有报道认为:植物可以吸收螯合态 Pb,并且通过木质部运输,积累于地上部^[5,13]。因此,进入植物体内的 Pb,很可能是以螯合态形式直接被植物吸收^[17-18]。随着改良基质中 Zn 含量增加,玉米地上部和根系中 Zn 含量也随之增加,但是增加幅度比 Pb 要小。

表 3 添加 EDTA 对玉米体内 Pb、Zn 含量的影响

Table 3 Effects of EDTA on Content of Pb and Zn in the various organs of maize

| 处理 Treatments | 基质类型 Substrate type | 地上部 Pb 含量 /(mg/kg) Shoot Pb content | 根系 Pb 含量 /(mg/kg) Root Pb content | 转运系数 Translocation factor | 地上部 Zn 含量 /(mg/kg) Shoot Pb content | 根系 Zn 含量 /(mg/kg) Root Pb content | 转运系数 Translocation factor |
|------------------|------------------------|--|--|---------------------------------|--|--|---------------------------------|
| 对照 CK | TA00 | 2.7g | 14.8f | 0.18 | 3.4f | 18h | 0.19 |
| | TA25 | 15.0fg | 74.0e | 0.20 | 8.1f | 42g | 0.19 |
| | TA50 | 24.0f | 89.0e | 0.27 | 19.0e | 70e | 0.27 |
| | TA75 | 22.0f | 90.0e | 0.24 | 9.3f | 60ef | 0.16 |
| | TA100 | 95.0d | 315.0c | 0.30 | 81.0b | 369b | 0.22 |
| EDTA | TA00 | 5.5g | 23.0f | 0.24 | 11.0ef | 50fg | 0.22 |
| | TA25 | 64.0e | 188.0d | 0.34 | 29.0d | 94d | 0.31 |
| | TA50 | 156.0b | 346.0b | 0.45 | 50.0c | 145c | 0.34 |
| | TA75 | 131.0c | 323.0bc | 0.41 | 55.0c | 136c | 0.40 |
| | TA100 | 517.0a | 1125.0a | 0.46 | 342.0a | 825a | 0.41 |

2.3 添加 EDTA 对玉米体内 Pb、Zn 迁移量的影响

重金属迁移总量是用以评价植物修复重金属污染土壤潜力的一个重要指标,而植物转运量系数能够较好地反映植物生长量和吸收量在地上和地下器官分布的规律。表 4 显示,TA00(纯土壤)基质中,虽然加入 EDTA 后 Pb、Zn 转运量系数与对照相比并不低,但是由于玉米地上部和根系的 Pb、Zn 含量较少,因此吸收的

Pb、Zn 总量并不高。

表 4 添加 EDTA 对玉米体内 Pb、Zn 迁移量的影响

Table 4 Effects of EDTA on translocation of Pb and Zn in maize

| 处理 Treatment | 基质类型 Substrate type | 地上部 Pb 迁移量 /($\mu\text{g}/\text{盆}$) | 根系 Pb 迁移量 /($\mu\text{g}/\text{盆}$) | 迁移总量 /($\mu\text{g}/\text{盆}$) | 转运量系数 Transformation coefficient | 地上部 Zn 迁移量 /($\mu\text{g}/\text{盆}$) | 根系 Zn 迁移量 /($\mu\text{g}/\text{盆}$) | 迁移总量 /($\mu\text{g}/\text{盆}$) | 转运量系数 Transformation coefficient |
|-----------------|------------------------|--|---|-------------------------------------|--|--|---|-------------------------------------|--|
| | | Pb translocation of shoot | Pb translocation of root | Total translocation | | Zn translocation of shoot | Zn translocation of root | Total translocation | |
| 对照 CK | TA00 | 6.8fg | 11.4h | 18.2h | 0.37 | 8.6e | 13.9g | 22.6e | 0.38 |
| | TA25 | 20.0e | 40.0fg | 60.0fg | 0.33 | 10.5e | 22.7f | 33.2e | 0.32 |
| | TA50 | 25.0e | 43.0f | 67.3f | 0.37 | 20.0de | 33.6e | 53.6d | 0.37 |
| | TA75 | 20.0e | 34.0g | 54.0g | 0.37 | 8.7e | 22.8f | 31.5e | 0.27 |
| | TA100 | 63.0d | 82.0d | 145.0d | 0.43 | 53.5b | 95.9b | 149.4b | 0.36 |
| EDTA | TA00 | 11.0f | 13.1h | 24.0h | 0.46 | 21.9d | 28.5ef | 50.4d | 0.43 |
| | TA25 | 57.0d | 65.8e | 122.8e | 0.46 | 25.8d | 32.9e | 58.7d | 0.44 |
| | TA50 | 123.0b | 118.0b | 241.0b | 0.51 | 39.5c | 49.3c | 88.7c | 0.44 |
| | TA75 | 92.0c | 96.9c | 188.8c | 0.49 | 38.5c | 40.8d | 79.3c | 0.49 |
| | TA100 | 186.0a | 180.0a | 366.0a | 0.51 | 123.0a | 132.0a | 255.0a | 0.48 |

转运量系数 = (地上部植物中元素质量分数 × 地上部生物量) / (根系植物中元素质量分数 × 根系生物量)

施用 5 mmol/kg EDTA 可以明显增加玉米地上部重金属迁移量,其中,EDTA 对 Pb 迁移量的促进作用最为显著。在 TA25、TA50、TA75、TA100 等 4 种基质中,添加 EDTA 的单盆玉米 Pb 的迁移量随基质中 Pb 浓度的增加呈上升趋势,转运量系数分别是 0.46、0.51、0.49、0.51,虽然比超富集植物的转运量系数(地上部 Pb 迁移量/Pb 迁移总量 > 1)要低,但比非富集型植物高出许多。这可能是由于施加 EDTA 后,根际土壤中 Pb 的植物有效性增强,由于 EDTA 与 Pb 的络合,阻碍了 Pb 在根细胞的吸附和沉淀,使 Pb 更有利于随着蒸腾拉力向上运输,从而累积在植物地上部^[11]。因此,玉米对 Pb 具有一定的富集能力,虽未达到超富集植物的标准,但富集 Pb 的能力大于其他普通植物。

3 讨论

高剂量的人工合成螯合剂会对植物、微生物产生毒害作用。植物的毒害症状主要表现为叶片发黄、萎蔫和植株矮小等。在本试验中,添加 EDTA 后玉米也出现了不同程度的叶片发黄和失水萎蔫。原因可能是尾矿砂中重金属离子过多,使叶绿体内蛋白质合成受到破坏,导致叶绿体分解。

螯合剂通过与土壤重金属形成金属螯合物而将与土壤固相结合的重金属溶解进入土壤溶液,从而增加土壤溶液中重金属的浓度。施用 EDTA 可以显著促进土壤重金属特别是 Pb 的溶解和在植物地上部的富集^[4,8-9]。研究表明,与 Zn 相比,EDTA 更能促进对 Pb 的溶解和提高其在玉米地上部富集的能力,这与 EDTA 对 Pb、Zn 的螯合能力大小相一致,EDTA 对 Pb 的螯合常数 $\log K_s$ 为 17.88, Zn 为 16.44^[19]。Vassil 等^[5]通过水培试验发现,经 Pb 和 EDTA 处理的印度芥菜,其地上部分能同时富集 Pb 和 EDTA,且以 Pb-EDTA 的形式向上运输,但 EDTA 诱导 Pb 的富集需要一个最低的 EDTA 处理浓度,大于这一处理浓度时,Pb 在植物地上部的富集才大幅度增加,这可能与 EDTA 破坏植物根系控制离子跨膜运输的生理机制有关。Bell 等^[20]认为金属离子-螯合体可能通过根系内皮层和凯氏带的裂隙处而被吸收。

EDTA 能有效去除污染土壤中 Pb、Zn 的酸提取态和可还原态部分的重金属。虽然也能去除一部分可氧化态和残余态中的重金属,但去除率低^[21]。尾矿重金属和尾矿矿物成分之间通过离子键紧密结合,重金属污染物和土壤组分之间一般通过共价键和范德华力结合,其结合远不如离子键,与土壤相比,尾矿中重金属污染较难去除,并且新鲜尾矿砂中重金属多以硫化物结合态和残留态存在,酸提取态和可还原态所占比例较小,因此 EDTA 对尾矿砂中的 Pb、Zn 活化能力有限^[22]。在本试验中也验证了这一点,从表 3 和表 4 来看,加入

EDTA 后,玉米对 Pb、Zn 的吸收和迁移量都比较低,相比之下,显得对照值偏高。

铅锌尾矿砂成分复杂,本次实验所用尾矿砂中除含有大量 Pb、Zn 元素之外,还含有较高浓度的 Al、Fe、Mn、Cu 等元素。EDTA 是一种非选择性金属螯合剂,加入土壤后,不仅与 Pb、Zn 螯合,也能与其他多种二、三价金属阳离子螯合,如 Al、Fe、Mn 等金属元素,增加其溶解性及生物有效性。本次实验中的部分数据(待发表)表明,玉米体内这些元素的含量均超出了一般作物体内的正常水平。因此玉米在不同基质改良方式之间表现出的长势差异、Pb 和 Zn 的含量差异以及迁移量差异是由于螯合剂的作用还是基质中多种重金属元素的综合作用,还有待于作进一步探讨。例如,EDTA 处理土壤 20 多天后,土壤溶液中 Pb 的含量仍高于对照数十倍^[23]。因此,环境风险也是植物修复中应用 EDTA 诱导技术不容忽视的问题。

References:

- [1] Zhou D M, Wang Y J, Hao X Z, Chen H M. Primary study of distribution of heavy metals in copper mines. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(3): 225-227.
- [2] Brooks R R. Plants that hyperaccumulate heavy metals: their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining. Oxford, UK: CAB International, 1998: 47-49.
- [3] Salt D E, Smith R D, Raskin I. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1998, 49: 643-668.
- [4] Huang J W, Chen J J, Berti W R, Cunningham S D. Phytoremediation of lead-contaminated soil: role of synthetic chelates in lead phytoextraction. *Environmental Science and Technology*, 1997, 31(3): 800-805.
- [5] Vassil A D, Kapulnik Y, Raskin I, Salt D E. The role of EDTA in lead transport and accumulation by *Indian mustard*. *Plant Physiology*, 1998, 117(2): 447-453.
- [6] Luo C L, Shen Z G, Li X D. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS. *Chemosphere*, 2005, 59(1): 1-11.
- [7] Wang Z Q, Meng X M, Wang S Z, Wu L H, Sun L, Lin Y B. Effect of peat protecting root on cole growth of Pb-contaminated soil. *Journal of Agro-environment Science*, 2006, 25(3): 602-605.
- [8] Shen Z G, Li X D, Wang C C, Chen H M, Chua H. Lead phytoextraction from contaminated soil with high-biomass plant species. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(6): 1893-1900.
- [9] Blaylock M J, Salt D E, Dushenkov S, Zakharova O, Gussman C, Kapulnik Y, Ensley B D, Raskin I. Enhanced accumulation of Pb in *Indian Mustard* by soil-applied chelating agents. *Environmental Science and Technology*, 1997, 31(3): 860-865.
- [10] Wu L H, Luo Y M, Zhang H B. The environmental risk of organically enhancing phytoremediation I. Effect of EDTA on soil solution TOC and heavy metal dynamics in mixed metal polluted soil. *Soils*, 2001, 33(4): 189-192.
- [11] Li Y S, Sun L N, Sun T H. Effects of EDTA on lead accumulation in *Tagetes patula* and *Salvia splendens*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(9): 2149-2152.
- [12] Yang X Y, Yang J S, Huang Z, Xu L G. Influence of chelators application on the growth and lead accumulation of maize seedlings in Pb-contaminated soils. *Journal of Agro-environment Science*, 2007, 26(2): 482-486.
- [13] Sun J, Tie B Q, Qin P F, Yang S W, Qin Z, Qing S X. The potential of *juncus effuses* and *eulaliopsis binata* for phytoremediation of lead/zinc mine tailings contaminated soil under the adjustment of EDTA. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(4): 105-110.
- [14] Gu M G, Huang K H. Attach importance to breeding of high starch maize variety for industry utilization. *Journal of Maize Sciences*, 2002, 10(1): 24-25.
- [15] Zhou L B, Dai H W, Wu Y J. Vegetation and crops planting at copper mine tailings ponds. *Nonferrous Metals*, 2003, 55(Supplement): 58-62.
- [16] Zhang C J. Effects of mine tailings in the zinc and lead mine wasteland on seedling ecesis of *Leucaena glauca*, *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(2): 57-59.
- [17] Epstein A L, Gussman C D, Blaylock M J, Yermiyahu U, Huang J W, Kapulnik Y, Orser C S. EDTA and Pb-EDTA accumulation in *Brassica juncea* grown in Pb-amended soil. *Plant and Soil*, 1999, 208(1): 87-94.
- [18] Chen Y H, Li X D, Liu H Y, Shen Z G. The potential of India mustard (*Brassica juncea* L.) for phytoremediation of Pb-contaminated soils with the aid of EDTA addition. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2002, 25(4): 15-18.
- [19] Bucheli-Witschel M, Egli T. Environmentl fate and microbial degradation of aminopolycarboxylic acids. *FEMS Microbiology Reviews*, 2001, 25(1): 69-106.
- [20] Bell P E, Chaney R L, Angle J S. Free metal activity and total metal concentrations as indices of micronutrient availability to barley [*Hordeum vulgare* (L.) 'Klages']. *Plant Soil*, 1991, 130(1/2): 51-62.

- [21] Xu C, Xia B C, Lin Y. Kinetics of heavy metals desorption by EDTA and Citric in contaminated soil and their redistribution of fractions. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(4): 146-151.
- [22] Liu Y Y, Li X, Xiao X, Yang L, Xia W B, Liu Y G. Removal of heavy metals from lead-zinc tailings in tailings columns by applying continuous extraction. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(7): 1439-1444.
- [23] Song J, Zhong J C, Wu L H, Wang G Q, Li C X, Luo Y M, Qin W. Chelate-induced extraction and remediation of *Brassica juncea* on heavy metals mix-polluted soils by EDTA and EDDS. *Soils*, 2006, 38(5): 619-625.

参考文献:

- [1] 周东美, 王玉军, 郝秀珍, 陈怀满. 铜矿区重金属污染分异规律初步研究. *农业环境保护*, 2002, 21(3): 225-227.
- [7] 王忠强, 孟宪民, 王升忠, 吴良欢, 孙丽, 林叶彬. 泥炭保护根系对不同 Pb 浓度土壤油菜生长影响的研究. *农业环境科学学报*, 2006, 25(3): 602-605.
- [10] 吴龙华, 骆永明, 章海波. 有机络合强化植物修复的环境风险研究 I. EDTA 对复合污染土壤中 TOC 和重金属动态变化的影响. *土壤*, 2001, 33(4): 189-192.
- [11] 李玉双, 孙丽娜, 孙铁珩. 乙二胺四乙酸对孔雀草和一串红铅富集的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(9): 2149-2152.
- [12] 杨晓英, 杨劲松, 黄铮, 徐力刚. 螯合剂对铅污染土壤上玉米幼苗生长及铅积累特性的影响. *农业环境科学学报*, 2007, 26(2): 482-486.
- [13] 孙健, 铁柏清, 秦普丰, 杨余维, 钱湛, 青山勋. EDTA 调控下灯心草和龙须草对铅锌尾矿污染土壤的修复潜力. *环境科学研究*, 2006, 19(4): 105-110.
- [14] 谷明光, 黄克虎. 重视工业专用型高淀粉玉米品种的选育. *玉米科学*, 2002, 10(1): 24-25.
- [15] 周连碧, 代宏文, 吴亚君. 铜矿尾矿库无土植被与有土覆盖农作物种植研究. *有色金属*, 2003, 55(增刊): 58-62.
- [16] 张翠君. 铅锌矿废弃地尾矿砂对银合欢幼苗定居的影响. *中国生态农业学报*, 2001, 9(2): 57-59.
- [18] 陈亚华, 李向东, 刘红云, 沈振国. EDTA 辅助下油菜修复铅污染土壤的潜力. *南京农业大学学报*, 2002, 25(4): 15-18.
- [21] 许超, 夏北城, 林颖. EDTA 和柠檬酸对污染土壤中重金属的解吸动力学及其形态的影响. *水土保持学报*, 2009, 23(4): 146-151.
- [22] 刘源源, 李欣, 肖鑫, 杨旅, 夏文斌, 刘云国. 尾砂柱连续萃取法去除铅锌选矿尾砂中重金属. *环境科学学报*, 2010, 30(7): 1439-1444.
- [23] 宋静, 钟继承, 吴龙华, 王国庆, 李晨曦, 骆永明, 钱薇. EDTA 与 EDDS 螯合诱导印度芥菜吸取修复重金属复合污染土壤研究. *土壤*, 2006, 38(5): 619-625.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 23 December, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Satellite-based modelling light use efficiency of alpine meadow along an altitudinal gradient FU Gang, ZHOU Yuting, SHEN Zhenxi, et al (6989)

Changes in the concentrations of airborne *Picea schrenkiana* pollen in response to temperature changes in the Tianshan Mountain area PAN Yanfang, YAN Shun, MU Guijin, et al (6999)

Primary production in the Bay of Bengal during spring intermonsoon period LIU Huaxue, KE Zhixin, SONG Xingyu, et al (7007)

Effect of rainfall regimes on the decomposition rate of yak dung in an alpine meadow of northwest Sichuan Province, China WU Xinwei, LI Guoyong, SUN Shucun (7013)

SOFM-based nutrient cycling classification of forest ecosystems in the Loess Plateau CHEN Kai, LIU Zengwen, LI Jun, et al (7022)

Characterization of the responses of photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters to water stress in seedlings of six provenances of Chinese Pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.) WANG Yan, CHEN Jianwen, et al (7031)

Effect of silicon supply on Tall Fescue (*Festuca arundinacea*) growth under the salinization conditions LIU Huixia, GUO Xinghua, GUO Zhenggang (7039)

Effects of high-temperature stress on physiological characteristics of leaves of *Simmondsia Chinensis* seedlings from different provenances HUANG Weiwei, ZHANG Niannian, HU Tingxing, et al (7047)

Soil moisture dynamics of water and soil conservation forest on the Loess Plateau ZHANG Jianjun, LI Huimin, XU Jiajia (7056)

The distribution of male and female *Populus cathayana* populations along an altitudinal gradient WANG Zhifeng, XU Xiao, LI Xiaofeng, et al (7067)

Analysis on the characteristics of macrobenthic community in the North-west Daya Bay of South China Bay in spring DU Feiyan, LIN Qin, JIA Xiaoping, et al (7075)

The effects of season and environmental factors on community structure of planktonic copepods in Zhanjiang Bay, China ZHANG Caixue, GONG Yuyan, WANG Xuefeng, et al (7086)

Population genetic structure of *Pneumatophorus japonicus* in the Taiwan Strait ZHANG Liyan, SU Yongquan, WANG Hangjun, et al (7097)

Seasonal variation of nitrogen and phosphorus in Miju River and Lake Erhai and influencing factors YU Chao, CHU Jinyu, BAI Xiaohua, et al (7104)

Population dynamics and production of *Bellamyia aeruginosa* (Reeve) (Mollusca: Viviparidae) in artificial lake for transgenic fish, Wuhan XIONG Jing, XIE Zhicai, JIANG Xiaoming, et al (7112)

Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among live plant-litter-soil systems in estuarine wetland WANG Weiqi, XU Linglin, ZENG Congsheng, et al (7119)

Effects of EDTA on growth and lead-zinc accumulation in maize seedlings grown in amendment substrates containing lead-zinc tailings and soil WANG Hongxin, HU Feng, XU Xinwang, et al (7125)

Effects of different coated controlled-release urea on soil ammonia volatilization in farmland LU Yanyan, SONG Fupeng (7133)

Effects of ridge planting on the photosynthetic characteristics and yield of summer maize in high-yield field MA Li, LI Chaohai, FU Jing, et al (7141)

Effect of timing of DCD application on nitrous oxide emission during wheat growing period JI Yang, YU Jia, MA Jing, et al (7151)

The role of the fertilizing with nitrogen, calcium and sodium chloride in winter wheat leaves adaptation to freezing-thaw stress LIU Jianfang, ZHOU Ruilian, ZHAO Mei, et al (7161)

Environment impact assessment of organic and conventional soybean production with LCA method in China Northeast Plain LUO Yan, QIAO Yuhui, WU Wenliang (7170)

Effects of selenium added to soil on physiological indexes in flue-cured tobacco XU Zicheng, SHAO Huifang, SUN Shuguang, et al (7179)

Influence of different planting patterns on field microclimate effect and yield of peanut (*Arachis hypogea* L.) SONG Wei, ZHAO Changxing, WANG Yuefu, et al (7188)

Rapid cold hardening of Western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*, and its ecological cost LI Hongbo, SHI Liang, WANG Jianjun, et al (7196)

- Effects of temperature on body color in *Sitobion avenae* (F.) DENG Mingming, GAO Huanhuan, LI Dan, et al (7203)
- Development and reproduction of *Bemisia tabaci* biotype B on wild and cultivated tomato accessions
 GAO Jianchang, GUO Guangjun, GUO Yanmei, et al (7211)
- Study on ecological water demand based on assessment of ecosystem disturbance degree in the Baiyangdian Wetland
 CHEN He, YANG Ying, YU Shiwei, et al (7218)
- Emergy-based analysis of two chicken farming systems; a perspective of organic production model in China
 HU Qihong, ZHANG Lixiao, WANG Changbo (7227)
- Mathematical model design of time-effect relationship analysis about the inhibition of four eighteen-carbon fatty acids on toxic
Microcystis aeruginosa HE Zongxiang, ZHANG Tingting (7235)
- Enrichment of heavy metals in the seagrass bed of Liusha Bay XU Zhanzhou, ZHU Aijia, CAI Weixu, et al (7244)
- A gradient analysis of urban architecture landscape pattern based on QuickBird imagery
 ZHANG Peifeng, HU Yuanman, XIONG Zaiping, et al (7251)
- Landscape spatial heterogeneity is associated with urbanization; an example from Yangtze River in Jiangsu Province
 CHE Qianjin, CAO Youhui, YU Lu, et al (7261)
- CVM for Taihu Lake based on ecological functions of wetlands restoration, and ability to pay and willingness to pay studies
 YU Wenjin, XIE Jian, ZOU Xinqing (7271)
- Review and Monograph**
- Progress in research on the marine microbial loop in the Arctic Ocean HE Jianfeng, CUI Shikai, ZHANG Fang, et al (7279)
- Research progress in the eco-environmental effects of urban green spaces
 SU Yongxian, HUANG Guangqing, CHEN Xiuzhi, et al (7287)
- Source, exposure characteristics and its environmental effect of heavy metals in urban surface dust
 FANG Fengman, LIN Yuesheng, WANG Haidong, et al (7301)
- Scientific Note**
- Spatial structures of soilcarbon and nitrogen of China fir and Masson pine mixed forest in the Three Gorges Reservoir Areas
 LIN Yinghua, WANG Laifa, TIAN Xiaokun, et al (7311)
- The relationship between *Oligochroa cantonella* Caradja and environmental factors LIU Wenai, FAN Hangqing (7320)

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 23 期 (2011 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 31 No. 23 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
主 管 中国科学技术协会
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

Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
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
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@espg.net

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China
Distributed by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel:(010)64034563
E-mail:journal@espg.net

订 购 全国各地邮局
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

Domestic All Local Post Offices in China
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