

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

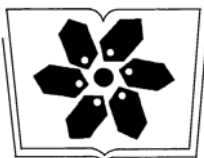
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第11期 Vol.34 No.11 **2014**

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 34 卷 第 11 期 2014 年 6 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

土壤大孔隙流研究现状与发展趋势..... 高朝侠,徐学选,赵娇娜,等 (2801)

能源基地生态修复

我国大型煤炭基地建设的生态恢复技术研究综述..... 吴 钢,魏 东,周政达,等 (2812)

国家大型煤电基地生态环境监测技术体系研究——以内蒙古锡林郭勒盟煤电基地为例.....

..... 魏 东,全 元,王辰星,等 (2821)

基于 DPSIR 模型的国家大型煤电基地生态效应评估指标体系 周政达,王辰星,付 晓,等 (2830)

西部干旱区煤炭开采环境影响研究..... 雷少刚,卞正富 (2837)

露天煤矿区生态风险受体分析——以内蒙古平庄西露天煤矿为例..... 高 雅,陆兆华,魏振宽,等 (2844)

草原区矿产开发对景观格局和初级生产力的影响——以黑岱沟露天煤矿为例.....

..... 康萨如拉,牛建明,张 庆,等 (2855)

三七对土壤中镉、铬、铜、铅的累积特征及健康风险评价 林龙勇,阎秀兰,廖晓勇,等 (2868)

某焦化场地土壤中多环芳烃分布的三维空间插值研究..... 刘 庚,毕如田,权 腾,等 (2876)

个体与基础生态

杉木人工混交林对土壤铝毒害的缓解作用 雷 波,刘 彬,罗承德,等 (2884)

基于 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素分析的人工防护林大型土壤动物营养级研究 张淑花,张雪萍 (2892)

铅镉抗性菌株 JB11 强化植物对污染土壤中铅镉的吸收 金忠民,沙 伟,刘丽杰,等 (2900)

陕北地区石油污染土壤中不动杆菌属的筛选、鉴定及降解性能 王 虎,吴玲玲,周立辉,等 (2907)

祁连山高山植物根际土放线菌生物多样性..... 马爱爱,徐世健,敏玉霞,等 (2916)

新疆沙冬青 AM 和 DSE 真菌的空间分布 姜 桥,贺学礼,陈伟燕,等 (2929)

聚糠茶水剂对不同积温带玉米花后叶片氮同化的影响..... 高 娇,董志强,徐田军,等 (2938)

内蒙古河套灌区玉米与向日葵霜冻的关键温度..... 王海梅,侯 琼,云文丽,等 (2948)

四种类型栓皮栎栲胶含量..... 尹艺凝,张文辉,何景峰,等 (2954)

食物胁迫对翅二型丽斗蟋飞行肌和繁殖发育的影响..... 吴红军,赵吕权,曾 杨,等 (2963)

颜色对梨小食心虫产卵选择性的影响..... 杨小凡,马春森,范 凡,等 (2971)

缓释单萜类挥发物对落叶松毛虫行为及落叶松主要防御蛋白的影响..... 林 健,刘文波,孟昭军,等 (2978)

种群、群落和生态系统

黄土丘陵沟壑区不同植被恢复格局下土壤微生物群落结构 胡婵娟,郭 雷,刘国华 (2986)

刺参池塘底质微生物群落功能多样性的季节变化..... 闫法军,田相利,董双林,等 (2996)

基于 DGGE 技术的茯砖茶发花过程细菌群变化分析 刘石泉,胡治远,赵运林 (3007)

景观、区域和全球生态

中国区域间隐含碳排放转移..... 刘红光,范晓梅 (3016)

西南地区退耕还林工程主要林分 50 年碳汇潜力 姚 平,陈先刚,周永锋,等 (3025)

青海湖流域草地植被动态变化趋势下的物候时空特征..... 李广泳,李小雁,赵国琴,等 (3038)

黑龙江省温带森林火灾碳排放的计量估算..... 魏书精,罗碧珍,孙 龙,等 (3048)

三峡库区森林植被气候生产力模拟..... 潘 磊,肖文发,唐万鹏,等 (3064)

三峡水库支流拟多甲藻水华的形成机制..... 朱爱民,李嗣新,胡 俊,等 (3071)

流域库坝工程开发的生物多样性敏感度分区..... 李亦秋,鲁春霞,邓 欧,等 (3081)

城乡与社会生态

基于集对分析的京津冀区域可持续发展协调能力评价..... 檀菲菲,张 萌,李浩然,等 (3090)

江西省自然保护区发展布局空缺分析 黄志强,陆 林,戴年华,等 (3099)

鄱阳湖生态经济区生态经济指数评价 黄和平,彭小琳 ,孔凡斌,等 (3107)

基于有害干扰的中国省域森林生态安全评价..... 刘心竹,米 锋,张 爽,等 (3115)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 328 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 35 * 2014-06



封面图说：三峡库区森林植被——三峡地区属亚热带区域,山高坡陡、地形复杂、物种丰富,森林是其最重要的自然资源之一,其面积占到库区总面积的 37%左右,库区内现有森林可初步分为 2 个植被型组,8 个植被型,18 个群系组,44 个群系,102 个群丛,主要树种有马尾松、杉树、柏树等,低海拔处多为落叶阔叶林、常绿阔叶林,较高海拔分布有针阔混交林、针叶混交林、灌木林等,人工林主要有经济林、竹林等。对三峡库区森林气候生产力进行模拟,分析库区森林植被的生产力并进行预测,可以为三峡库区的生态建设决策提供科学依据。

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/stxb201302200282

金忠民,沙伟,刘丽杰,潘林,莫继先,郝宇.铅镉抗性菌株 JB11 强化植物对污染土壤中铅镉的吸收.生态学报,2014,34(11):2900-2906.

Jin Z M, Sha W, Liu L J, Pan L, Mo J X, Hao Y. Lead- and cadmium-resistant bacterial strain JB11 enhances lead and cadmium uptake in the phytoremediation of soils. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 2900-2906.

铅镉抗性菌株 JB11 强化植物对污染土壤中 铅镉的吸收

金忠民*, 沙 伟, 刘丽杰, 潘 林, 莫继先, 郝 宇

(齐齐哈尔大学生命科学与农林学院, 齐齐哈尔 161006)

摘要:研究了铅、镉抗性菌株 (JB11) 和生物降解螯合剂乙二胺二琥珀酸 (S,S)-EDDS 提高高羊茅和红三叶草吸收土壤中铅、镉的能力。从土壤样品中筛选出 1 株对 Cd、Pb 具有较强抗性的菌株 JB11, 经鉴定为成团泛菌属 (*Pantoea agglomerans*)。JB11 对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 等多种重金属和卡那霉素、氨苄青霉素、链霉素、四环素等抗生素具有抗性, 在温度 15—35 °C 和 pH 为 5.0—9.0 范围内生长良好, 最适生长温度为 30 °C, 最适 pH 值为 7.0 左右, 在低于 3% 的 NaCl 浓度下生长良好。盆栽试验研究了菌株 JB11、EDDS 及 1/2EDDS+JB11 3 种处理下对生长在 Cd 100 mg/kg、Cd 200 mg/kg、Pb 500 mg/kg 和 Pb 1000 mg/kg 的土壤中的高羊茅和红三叶生长及从土壤富集 Cd、Pb 能力的影响。结果表明, 外加 JB11 能使高羊茅和红三叶的干重分别比对照都有增加。除外加 JB11 后在经 Pb 1000 mg/kg 处理的土壤中高羊茅地上部的 Pb 浓度、经 Cd 200 mg/kg 处理的土壤红三叶地上部的 Cd 浓度以及经 Cd 100 mg/kg 处理的土壤中高羊茅和红三叶根部的 Cd 浓度以外, 外加 JB11 后对其他重金属处理植物中 Pb 和 Cd 的含量都显著增加。外加 EDDS 后除在经 Pb 500 mg/kg 的土壤中高羊茅根部的 Pb 浓度增加差异不显著, 对其余重金属处理都可产生显著的影响 ($P < 0.05$)。1/2EDDS+JB11 的复合处理下植物重金属吸收量多数高于 JB11 和 EDDS 单独处理, JB11 用于植物修复土壤 Pb 和 Cd 污染具有很大的潜力。

关键词: 铅镉抗性菌株; 植物修复; 乙二胺二琥珀酸 (EDDS)

Lead- and cadmium-resistant bacterial strain JB11 enhances lead and cadmium uptake in the phytoremediation of soils

JIN Zhongmin*, SHA Wei, LIU Lijie, PAN Lin, MO Jixian, HAO Yu

(College of Agriculture, Forestry and Life Science, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China)

Abstract: We investigated the abilities of a Pb- and Cd-resistant bacterial strain (JB11) and the biodegradable chelator ethylenediamine dissociate ([S,S]-EDDS) to improve the absorption of Pb and Cd from soil by tall fescue and red clover. JB11 was isolated from contaminated soil samples and analyzed for Pb- and Cd-resistance. JB11 was identified as *Pantoea agglomerans*. Studies of the biological characteristics of JB11 showed that it is generally resistant to heavy metals, including Cd^{2+} , Cr^{6+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , and Zn^{2+} and that it is also resistant to antibiotics, such as ampicillin, kanamycin, streptomycin, and tetracycline. Strain JB11 grows well at temperatures between 15 and 35 °C, pH values of 5.0—9.0, and NaCl concentrations below 3%. The optimum temperature for JB11 is 30 °C and the ideal pH value is approximately 7.0. Tall fescue and red clover were grown in pots with soil containing Cd at 100 mg/kg, Cd at 200 mg/kg, Pb at 500 mg/kg, or Pb at 1000 mg/kg, to which were added JB11, EDDS, a combination of JB11 and EDDS, or water. Pot experiments were performed to study the effects of JB11 and EDDS on the abilities of tall fescue and red clover to take up Cd and Pb

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目 (C201240)

收稿日期: 2013-02-20; 网络出版日期: 2014-03-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yjzm6768@126.com

from the soil and on their growth. The amounts of biomass produced by tall fescue and red clover were significantly higher in the JB11 treatments than in the untreated control plants. The Pb and Cd concentrations were significantly higher ($P<0.05$) in the JB11-treated plants than in the control plants, with the exception of the Pb concentration in the above-ground parts of tall fescue growing in soil containing Pb at 1000 mg/kg, the Cd concentration in the above-ground parts of red clover growing in soil containing Cd at 200 mg/kg, and the Cd concentrations in tall fescue and red clover roots in soil containing Cd at 100 mg/kg. The Pb and Cd concentrations were significantly higher ($P<0.05$) in the EDDS-treated plants than in the control plants, with the exception of the Pb concentrations in the tall fescue roots in soils containing Pb at 500 mg/kg. The Pb and Cd concentrations in the tall fescue and red clover increased in response to the combined EDDS and JB11 treatment. The amounts of Pb and Cd absorbed by the plants were higher in most of the combined (1:1) EDDS- and JB11-treated plants than in the plants treated with only EDDS or only JB11. JB11 is Pb- and Cd-resistant, and its application to the soil improved the net uptake of Pb and Cd from the soil by the experimental plants. There is, therefore, great potential for viable phytoremediation using JB11.

Key Words: lead- and cadmium-resistant bacterial strain; phytoremediation; [S,S]-EDDS (EDDS)

随着人口的快速增长、工业的迅速发展、农药与化肥的大量施用,大量的重金属污染物进入土壤环境,致使世界各国土壤出现不同程度的重金属污染^[1]。重金属污染不仅导致土壤退化、农作物产量和品质降低,影响大气和水环境质量,而且可能通过直接接触、食物链传递等途径危及人类的健康和生命。据统计,我国受 Cd、As、Pb 等重金属污染的耕地面积近 2000 万 hm^2 ,约占总耕地面积的 1/5^[2]。Cd 是对人、动植物毒性大的一种重金属元素,也是一种常见的重金属污染元素^[3],Cd 可在人体内长期积累,对肾、肺、肝、脑、骨骼和血液产生一系列损伤。我国 Cd 污染农田面积已达 1.33 万 hm^2 ,污灌区生产的大米中 Cd 含量严重超标,每年因重金属污染导致的粮食减产超过 1000 万 t,被重金属污染的粮食多达 1200 万 t,合计经济损失至少 200 亿元^[4]。Pb 是一种积累性毒物,逐渐严重的慢性中毒,能够引发视力障碍、耳鸣、头疼等情况。

在我国耕地资源日益紧张的今天,安全有效地修复重金属污染土壤已成为紧迫任务,有关生物修复技术的研究引起众多研究者的关注^[4]。生物修复技术主要包括植物修复和微生物修复技术。重金属污染土壤的植物修复技术是一种新兴的绿色生物技术,已经成为了土壤污染整治的重要手段之一,亦是目前仅见的一种土壤污染治理的环境友好技术^[5]。植物修复会受到植物生长速度和生物量的限制,还会受到污染物浓度、土壤类型、温度、湿度、营养等环境条件制约^[5],限制了它的大规模应用。土壤污染

的微生物修复是利用对有毒重金属离子有抗性的微生物来改变和转化金属离子形态。它的局限性是微生物去除不彻底,修复效果受环境影响较大,可能与土著菌株竞争或难以适应环境,和植物修复一样修复周期也相对较长^[6]。

红三叶 (*Trifolium pratense*) 为豆科多年生草本,对 Zn 有较强的耐性和一定的富集能力,Li 等^[7]研究红三叶可在 Zn 浓度为 1000 mg/kg 的土壤上正常生长,地上部和根部可富集 Zn 1266 和 629 mg/kg。高羊茅 (*Festuca arundinacea*) 为禾本科多年生草本,由于其快速生长且可耐高浓度的 Zn、Pb 可用于修复 Zn、Pb 污染土壤。Begonia 等^[8]研究高羊茅在土壤 Pb 浓度为 1000 mg/kg 并添加醋酸和 EDTA 时,生长未受抑制,地上部和根部 Pb 浓度分别达到 4500 和 1500 mg/kg。

[S,S]-EDDS (简称 EDDS),乙二胺二琥珀酸,是一种低毒且易生物降解的螯合剂^[9],螯合能力较强,能够与过渡金属及放射性核素形成稳固的螯合物^[10],对土壤中的微生物和真菌的影响都比较小。在各种环境介质中完全降解只需 5—8 d^[11]。

本研究从采自齐齐哈尔嫩江葫芦头排污口的土壤中筛选出对重金属 Cd、Pb 具有较强抗性的菌株,研究其活化效能、环境影响因素等,并通过盆栽试验研究菌株、EDDS 和 EDDS/菌株对高羊茅和红三叶从污染土壤中吸收、积累铅镉的影响,比较 3 种处理促进植物富集铅镉的能力,以寻找更加高效经济的修复措施,以期对重金属污染土壤的可持续治理提

供科学借鉴。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 培养基

为低磷有氮培养基:蔗糖 10 g, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1 g, K_2HPO_4 0.5 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g, NaCl 0.1 g, 酵母粉 0.5 g, CaCO_3 0.5 g, 琼脂 20 g, 蒸馏水 1000 mL, pH=7.0, 121 °C 下湿热灭菌 30 min。将 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 配成 10 g/L 的溶液, 单独灭菌, 然后与低磷有氮培养基混合倒平板。

1.1.2 供试土壤和植物

筛选抗性菌株土壤取自齐齐哈尔嫩江葫芦头重金属污染区, 土壤风干后过 100 目筛, 测定理化性质, pH 值 5.87 ± 0.29 , 有机质含量 (15.11 ± 0.72) g/kg, 全氮含量 (0.31 ± 0.01) g/kg, 全磷含量 (1.73 ± 0.08) g/kg, 全钾含量 (8.09 ± 0.39) g/kg, 速效钾含量 (179.2 ± 8.91) g/kg, 电导率 $\text{EC } 1.95 \pm 0.09$, 全铅含量 (37.7 ± 1.53) mg/kg, 全镉含量 (0.28 ± 0.02) mg/kg。

种植植物土壤取自齐齐哈尔大学农园, 测定理化性质, pH 值 6.91 ± 0.41 , 有机质含量 (16.12 ± 0.9) g/kg, 全氮含量 (0.54 ± 0.02) g/kg, 全磷含量 (1.83 ± 0.32) g/kg, 全钾含量 (8.81 ± 0.51) g/kg, 速效钾含量 (19.8 ± 0.78) g/kg, 电导率 $\text{EC } 2.05 \pm 0.21$, 全铅含量 (11.7 ± 1.05) mg/kg, 全镉含量 (0.06 ± 0.01) mg/kg。

高羊茅和红三叶种子购自北京种子公司。

1.2 菌株筛选及培养

取土样 5 g 至装有 45 mL 无菌水并带有玻璃珠的三角瓶中, 放置于 28 °C 摇床内振荡 30 min。然后取样做梯度稀释, 稀释浓度为 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} , 分别吸取不同浓度土壤溶液 100 μL 涂布于含 50 mg/L Cd^{2+} 和 200 mg/L Pb^{2+} 的低磷有氮固体培养基平板上, 置于 30 °C 培养箱中培养 48 h 后, 在平板上挑取分离较好、生长丰满的细菌单菌落, 转入逐步提高 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 浓度的培养基上, 从中筛选出 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的抗性菌株。选取在含 Pb^{2+} 浓度为 1200 mg/L 和 Cd^{2+} 浓度为 300 mg/L 的平板上生长较快、较好的菌株进行纯化培养。

1.3 抗性菌株 16S rDNA 的 PCR 扩增和序列测定

液体培养 16 h, 以 1% 的接种量接入培养基中, 同时设接入 1% 去离子水的液体培养基作为对照。

30 °C 下摇床培养 48 h 后, 培养液在 10000 r/min 条件下离心 10 min, 用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-) 测定重金属浓度。选出一株对不溶性重金属溶解能力最强的菌株作为以下试验的材料。对菌株进行菌落和菌体形态观察、生理生化试验、16S rDNA 序列同源性比对分析, 以确定其分类地位。菌株形态及生理生化特性测定参照东秀珠等^[12]的方法。提取菌株的总 DNA, 利用细菌 16S rDNA 通用引物 F (5'-3'): AGA GTT TGA TCM TGG CTC AG; R (5'-3'): TAC GGY TAC CTT GTT ACG ACT T 进行 PCR 扩增。PCR 反应体系为 50 L, 所用程序: 预变性: 94 °C, 10 min; 变性: 94 °C, 1 min; 退火: 51 °C, 1 min; 延伸: 72 °C, 1 min, 共 30 个循环, 最后 72 °C 延伸 10 min, 4 °C 保存。PCR 产物由哈尔滨奥拓生物技术有限公司测序, 测序结果在 GenBank 中与相关序列进行同源性比对。NCBI 网站上用 Blast 进行核苷酸同源性比较, 初步鉴定其种属。

1.4 菌株的生物学特性

菌株对重金属和抗生素的抗性试验, 将菌株划线接种于含不同浓度重金属 (Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+}) 和不同浓度抗生素 (卡那霉素、氨苄青霉素、链霉素、四环素) 的培养基上, 30 °C 下培养 48 h, 转接 2 次, 观察其能否生长及生长情况。环境条件对菌株 JB11 的影响, 将供试菌株 30 °C 活化 16 h, 以 5% 的接种量接入有氮培养液中, 温度分别设置为 20、30 和 40 °C, pH 值分别设置为 3、5、6、7、8、9 和 10, NaCl 浓度为 1.0%、2.0%、3.0% 和 4.0%, 培养 18 h, 使用 751 分光光度计测定各菌悬液的 OD_{600} nm 值。

1.5 菌株对高羊茅和红三叶富集铅镉的影响

种子在播种前浸种 12 h, 经 2% 次氯酸钠表面消毒后播种。在 500 mL 塑料花盆中分别装入含 Cd 100 mg/kg、Cd 200 mg/kg、Pb 500 mg/kg 和 Pb 1000 mg/kg 的土样 400 g, 每盆分别播入高羊茅和红三叶种子 1—1.5 g, 播种 30 d, 待植株在重金属污染土壤中生长良好后, 在植物根部接入培养至对数生长期的供试菌株, 设以下 4 种处理: 接无菌水的空白对照 (CK)、接无菌水洗的 1×10^6 cfu/g 菌液 (JB11)、加 1.0 mmol/kg EDDS、0.5 mmol/kg EDDS + 5×10^5 cfu/g 菌液 (1/2 EDDS+JB11) 各 20 mL。播种 45 d 后收获, 沿土面剪取植株地上部, 洗出根系, 105 °C 下杀青

烘干 2 h,称地上部和根部的干重。植物经 $3\text{HNO}_3 : 2\text{H}_2\text{O}_2$ 消解后用 ICP-测定测重金属离子浓度。分别采集不同处理的根际土,平板计数法分析土壤中抗性细菌和总细菌的数量。

1.6 数据分析

所有试验均设 3 个重复,所获数据利用 Excel 和 SPSS 13.0 软件进行统计分析差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 菌株筛选与鉴定

对溶液中不溶性 Pb、Cd 的活化实验结果表明,菌株 JB11 在含 Pb 浓度为 400 mg/L 和含 Cd 浓度为 100 mg/L 的培养基中良好生长,而且能活化沉淀态 Pb、Cd,使溶液中 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 浓度增加,使培养液中的 Pb^{2+} 浓度达到 171.4 mg/L, Cd^{2+} 浓度达到 46.9 mg/L,显著高于不接菌对照 (Pb^{2+} 2.08 mg/L 和 Cd^{2+} 1.45 mg/L) ($P < 0.05$)。菌株 JB11 在有氮培养基中呈白色或淡黄色半透明圆形菌落,湿润,菌体杆状,革兰氏染色阴性,甲基红反应阴性,V-P 反应阳性,能氧化葡萄糖产酸,柠檬酸反应阳性,不水解淀粉,明胶液化呈阴性,吡啶反应阴性;利用细菌 16S rDNA 通用引物进行 PCR 扩增,得到长度约为 1500kb 的扩增产物,序列与 *Pantoea agglomerans* 有较高的同源性 (99%)。结合形态学、生理生化特性,初步鉴定菌株 JB11 为成团泛菌 (*Pantoea agglomerans.*), Genbank 登录号为 JX262490。

2.2 菌株 JB11 的生物学特性

菌株 JB11 对重金属和抗生素的抗性较普遍,能在含 Pb^{2+} 1500 mg/L、 Cd^{2+} 200 mg/L、 Cu^{2+} 10 mg/L、 Ni^{2+} 20 mg/L、 Zn^{2+} 300 mg/L 的低磷有氮培养基中良

好生长,对 Cr^{6+} 不具抗性。菌株 JB11 在含卡那霉素 30 mg/L、氨苄青霉素 200 mg/L、四环素 20 mg/L、链霉素 10 mg/L 的有氮培养基中良好生长。

菌株 JB11 在温度 12—38 °C 和 pH 值为 5.0—9.0 范围内生长良好,最适生长温度为 30 °C,最适 pH 值为 7.0 左右,在低于 3% 的 NaCl 浓度下生长良好。

2.3 菌株 JB11、EDDS 及两者复合处理对高羊茅和红三叶富集土壤中铅镉的影响

2.3.1 不同处理对高羊茅和红三叶生物量的影响

由图 1、图 2 可知,接菌 JB11 的盆栽中高羊茅和红三叶生物量均高于其它处理。含 Cd 100 mg/kg、Cd 200 mg/kg、Pb 500 mg/kg 和 Pb 1000 mg/kg 的土壤中接菌 JB11 后高羊茅地上部干重分别比对照高 49.8%、35%、37.3% 和 31.3%,根重分别比对照增加 41.7%、18.6%、11.0% 和 14.5%;红三叶地上部干重分别比对照高 42.2%、27.5%、26.6% 和 16.8%,根重分别比对照增加 18.1%、26.2%、19.4% 和 53.2% (差异显著, $P < 0.05$),可见,菌株 JB11 对高羊茅和红三叶的生长有较明显促进作用,可以缓解重金属对植物的毒害作用。EDDS 处理使 Cd、Pb 污染土壤中供试植物的生物量也有不同程度的增加,但差异不显著 ($P < 0.05$)。EDDS 能够使土壤中重金属的溶解度增加,促进重金属从根部向地上部运转,当部分金属离子穿过细胞壁和细胞膜进入植物细胞后,能和细胞质中的蛋白质等形成复杂的稳定螯合物,它们能使重金属的毒性降低^[13],从而增加植物生物量。1/2 EDDS + JB11 处理的植物干重介于接 JB11 和接 EDDS 的处理之间。

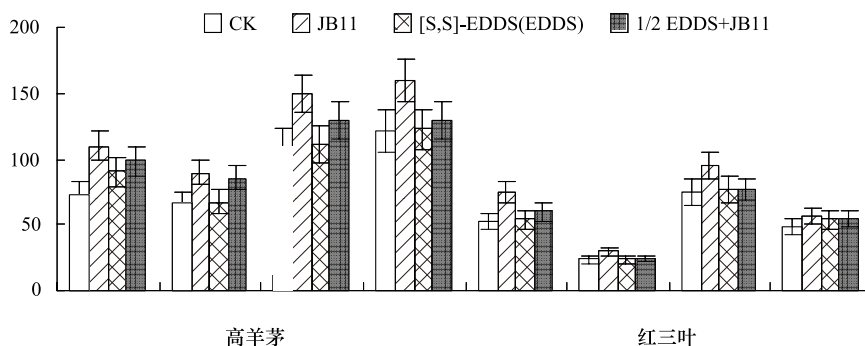


图 1 不同处理对生长在不同浓度 Pb、Cd 中的高羊茅和红三叶地上部干重的影响

Fig.1 Effect of different treatment on shoot (above-ground) dry weight of tall fescue and red clover grown in different concentrations of Cd and Pb

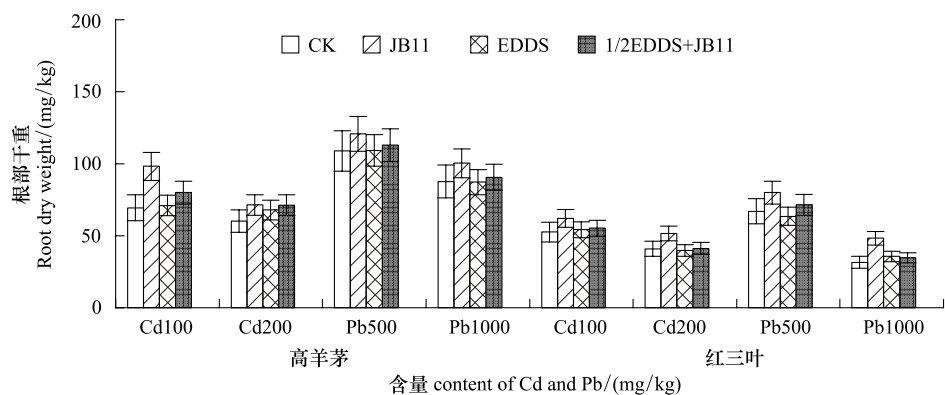


图2 不同处理对生长在不同浓度 Pb、Cd 中的高羊茅和红三叶根部干重的影响

Fig.2 Effect of different treatment on root dry weight of tall fescue and red clover grown in different concentrations of Cd and Pb

2.3.2 不同处理对高羊茅和红三叶富集铅镉的影响

由表 1 可知,外加 JB11 后高羊茅和红三叶在各种污染土壤中地上部和根部积累的 Pb 和 Cd 含量都增加,JB11 可以促进高羊茅和红三叶对 Pb 和 Cd 的积累,增幅较大的是在经 Cd 100 mg/kg 处理的土壤中高羊茅和红三叶地上部 Cd 的含量分别增加 130.4%和 164.3%,在经 Cd 200 mg/kg 处理的土壤中高羊茅地上部和红三叶根部 Cd 的含量分别增加 148.0%和 64.1% ($P<0.05$),土壤中有有效 Cd 的含量分别比对照增加 9.5%和 18.8%。在经 Pb 1000 mg/kg 处理的土壤中高羊茅地上部的 Pb 浓度、经 Cd 200 mg/kg 处理的土壤中高羊茅根部和红三叶地上部的 Cd 浓度增加不显著 ($P<0.05$),可能与重金属浓度较高有关,高浓度 Pb 和 Cd 处理使 JB11 的促高羊茅和红三叶富集重金属的能力有所降低,土壤中有有效重金属含量和对照比增加幅度较小,与菌株活化能力降低有关。植物富集重金属能力降低也可能是高浓度金属离子对根的伤害增大,影响根的活力和吸附能力。外加 EDDS 后在经 Pb 500 mg/kg 和 Cd 200 mg/kg 处理的土壤中高羊茅根部的 Pb 浓度增加差异不显著,其余处理差异显著 ($P<0.05$)。加 EDDS 能使高羊茅和红三叶地上部 Pb、Cd 含量大幅度增加,可能是 EDDS 促进土壤固相中重金属的释放,促进 Pb、Cd 由植物根部向地上部的转运^[9],但 EDDS 对植物根部 Pb、Cd 含量的影响不一,多数处理都高于对照 ($P<0.05$)。多数外加 1/2EDDS+JB11 的土壤植物体内 Pb、Cd 含量介于加 JB11 和 EDDS 的处理之间,有的处理效果优于单独加 JB11 和 EDDS 的效果,这可能是因为细菌分泌物使土壤酸化,与 EDDS 结合可以提高对重金属的吸收效率^[14]。

表 1 不同处理对高羊茅和红三叶植株内 Pb、Cd 含量的影响

Table 1 Effect of different treatment on the concentrations of Cd and Pb in tall fescue and red clover

土壤重金属含量 Heavy Metal concentrations in soils/ (mg/kg)	处理 Treatment	高羊茅 Tall fescue/ (mg/kg)		红三叶 Red clover/ (mg/kg)	
		地上部 Shoot	根 Root	地上部 Shoot	根 Root
Pb500	对照 CK	29.6c	117.4b	26.4c	111.1c
	菌株 JB11	42.3b	155.1a	43.4b	149.3b
	乙二胺二琥珀酸 EDDS	39.1b	122.2b	69.1a	159.1b
	1/2EDDS+JB11	58.1a	158.9a	71.3a	183.6a
Pb1000	CK	100.1b	269.9c	91.3c	229.5c
	JB11	121.8b	300.3b	112.6b	287.7b
	EDDS	147.4a	318.1b	193.8a	298.5b
	1/2EDDS+JB11	161.5a	379.1a	186.3a	312.1a
Cd 100	CK	16.1c	189.5b	11.2c	39.2b
	JB11	37.1b	201.6b	29.6b	43.6b
	EDDS	78.9a	300.6a	68.4a	53.5a
	1/2EDDS+JB11	42.3b	291.7a	62.2b	55.3a
Cd 200	CK	35.2c	330.0a	17.1b	66.6b
	JB11	87.3b	348.2a	23.5b	109.3a
	EDDS	126.8a	312.1a	45.4a	99.9a
	1/2EDDS+JB11	93.6b	338.7a	47.3a	101.1a

同列中不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)

综合 1/2EDDS+JB11 处理的富集效果更好,更经济。高羊茅和红三叶地上部和根部含 Pb、Cd 量随着土壤含 Pb、Cd 浓度提高而增加,根部的含量远大于地上部。这可能是因为植物根通过离子交换、质流运移和根毛表面接触等多种方式从土壤溶液中摄取重金属,但根系内胚层对重金属元素的通透性较低,当它们从根部向中柱迁移时就会受到内皮层凯氏带的阻拦,导致植物吸收的重金属主要累积在根部^[15]。两种重金属在高羊茅和红三叶体内的主要以根积累为

主,可以在重金属污染土壤中种植高羊茅和红三叶,使受污染土壤不继续被侵蚀,并减少土壤渗漏而防止重金属污染的迁移,又可使其在根部积累和沉淀^[16]。

3 结论与讨论

微生物-植物修复联合修复充分发挥植物与微生物修复的各自优势,利用植物和微生物的共存体系提高植物修复效率;螯合剂-植物修复耗费低,具有进行大范围修复污染土壤的潜能;植物修复重金属污染物的过程分两个阶段:一是植物根系吸收重金属并运输到地上部,二是超富集植物对重金属离子的螯合和贮存。Bradley 等研究发现接种过菌根的植物对吸收富集重金属污染物的能力增加,重金属抗性菌株不同,对植物富集重金属及生长发育的影响也不同,植物根际重金属被某些抗性菌株活化后,会显著提高植物吸收重金属的能力,对植物生长有明显促进作用,促使重金属向植株地上部转移^[17]。向土壤中添加移动剂来增加土壤中活化态重金属浓度,进而促进植物对金属的吸收和富集^[18]。EDDS 能激活土壤中重金属离子,由不溶态转化为可溶态,促进植物的吸收,Cao 等^[19]采用了螯合剂 EDDS 和 MGDA,来促进植物紫茉莉对 Pb 和 Zn 吸收。

本试验研究了高羊茅和红三叶对 Cd、Pb 的富集特征,利用 Pb、Cd 抗性菌株 JB11 与螯合剂 EDDS 对 Cd、Pb 污染土壤进行组合修复,本条件下研究结果表明,菌株 JB11 能使高羊茅和红三叶生物量显著增加,也使植株内的 Pb、Cd 总含量均显著增加 ($P < 0.05$)。菌株 JB11 对高羊茅的 Cd、Pb 积累的增加量大于对红三叶。同时表明本研究采用的高羊茅和红三叶对 Pb、Cd 的富集量有限,可能是由培养条件和植物种类决定的,为了大幅度提高微生物强化植物修复的效率,应加强 Pb、Cd 超积累植物与菌株的相互作用方面的研究。并且使用半量 EDDS 和菌液处理后,高羊茅和红三叶 Pb、Cd 积累量多数高于 JB11 和 EDDS 单独处理。

References:

- [1] Qu R, Meng W, Li J S, Ding A Z, Jin Y B. Research progress on phytoremediation of heavy metal contaminated soil. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(4): 626-631.
- [2] Liu W T, Zhou Q X. Selection and breeding of heavy metal pollution-safe cultivars. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 26(6): 1452-1458.
- [3] Shao J H, Yao X W, He S J. Isolating Cd resistant bacteria from ramie rhizosphere and their effects on the growth and Cd absorptional characters of ramie. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(3): 487-491.
- [4] Ding Z Z. Farmland soil heavy metal pollution in our country and plant repair research. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(3): 19-20.
- [5] McGrath S P. Phytoextraction for soil remediation // Brooks R R, ed. Plants that Hyperaccumulate Heavy Metal. Wallingford, UK: CAB International, 1998: 267-287.
- [6] Niu Z X, Sun L N, Sun T H. Plant-microorganism combined remediation of heavy metals-contaminated soils: Its research progress. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28 (11): 2366-2373.
- [7] Li X L, Christie P. Changes in soil solution Zn and pH and uptake of Zn by arbuscular mycorrhizal red clover in Zn-contaminated soil. Chemosphere, 2001, 42(2): 201-207.
- [8] Begonia M T, Begonia G B, Ighoavodha M, Gilliard D. Lead accumulation by tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) grown on a lead-contaminated soil. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2005, 2(2): 228-230.
- [9] Alkorta I, Hernández-Allica J, Becerril J M, Amezaña I, Albizu I, Onaindia M, Garbisu C. Chelate-enhanced phytoremediation of soils polluted with heavy metals. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2004, 3(1): 55-70.
- [10] Grčman H, Vodnik D, Velikonja-Bolta S, Lestan D. Ethylenediaminedisuccinate as a new chelate for environmentally safe enhanced lead phytoextraction. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(2): 500-506.
- [11] Schowanek D, Feijtel T C J, Perkins C M, Hartman F A, Federle T W, Larson R J. Biodegradation of [S, S], [R, R] and mixed stereoisomers of ethylene diamine disuccinic acid (EDDS) a transition metal chelator. Chemosphere, 1997, 34 (11): 2375-2391.
- [12] Dong X Z, Cai M Y. Manual of systematic determination general bacteriology. Beijing: Science Press, 2001: 353-387.
- [13] Wu J, Meng X X, Li K. Phytoremediation of soils contaminated by lead. Soils, 2005, 37(3): 258-264.
- [14] Cheng G L, Xu J Z, Ma Z F, Wang Q H. Application of chelation-induced phytoremediation in heavy metal polluted soils. Soils, 2008, 40(1): 16-20.
- [15] Liu D H, Jiang W S, Liu C J, Xin C D, Hou W Q. Uptake and accumulation of lead by roots, hypocotyls and shoots of Indian mustard (*Brassica juncea*). Bioresource Technology, 2000, 71 (3): 273-277.
- [16] Dong M, Zhao Y L, Lei C X, Tuo R R, Peng X Y. Accumulation

characteristics to heavy metals and edible safety of South Dongting Lake dominant plants *Arenaria selengensis* Turcz. Journal of Hunan City University(Natural Science), 2008, 17(4): 44-48.

- [17] Zheng Q, Cui J T. Study on phyto-microbial remediation of heavy metals contaminated soil. Science & Technology Information, 2012, 9(3): 51-52.
- [18] Komárek M, Tlustoaš P, Száková J, Chrastný V, Ettler V. The use of maize and poplar in chelant-enhanced phytoextraction of lead from contaminated agricultural soils. Chemosphere, 2007, 67(4): 640-651.
- [19] Cao A, Carucci A, Lai T, La Colla P, Tamburini E. Effect of biodegradable chelating agents on heavy metals phytoextraction with *Mirabilis jalapa* and on its associated bacteria. European Journal of Soil Biology, 2007, 43(4): 200-206.

参考文献:

- [1] 屈冉, 孟伟, 李俊生, 丁爱中, 金亚波. 土壤重金属污染的植物修复. 生态学杂志, 2008, 27(4): 626-631.
- [2] 刘维涛, 周启星. 重金属污染预防品种的筛选与培育. 生态环境学报, 2010, 26(6): 1452-1458.
- [3] 邵继海, 姚习文, 何绍江. 苕麻根际抗 Cd 细菌筛选及对苕麻生长和吸收 Cd 能力的影响. 农业环境科学学报, 2010, 29(3): 487-491.
- [4] 丁真真. 中国农田土壤重金属污染与其植物修复研究. 水土保持研究, 2007, 14(3): 19-20.
- [6] 牛之欣, 孙丽娜, 孙铁珩. 重金属污染土壤的植物-微生物联合修复研究进展. 生态学杂志, 2009, 28(11): 2366-2373.
- [12] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册. 北京: 科学出版社, 2001: 353-387.
- [13] 伍钧, 孟晓霞, 李昆. 铅污染土壤的植物修复研究进展. 土壤, 2005, 37(3): 258-264.
- [14] 程国玲, 胥家桢, 马志飞, 汪群慧. 螯合诱导植物修复技术在重金属污染土壤中的应用. 土壤, 2008, 40(1): 16-20.
- [16] 董萌, 赵运林, 雷存喜, 戴枚斌, 易合成. 南洞庭湖优势植物菱蒿的重金属富集特征及其食用安全性. 湖南城市学院学报: 自然科学版, 2008, 17(4): 44-48.
- [17] 郑强, 崔俊涛. 植物-微生物修复重金属污染土壤的研究. 科技信息, 2012, 9(3): 51-52.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.11 June, 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

Review on macropore flow in soil GAO Zhaoxia, XU Xuexuan, ZHAO Jiaona, et al (2801)

Ecological Restoration

A summary of study on ecological restoration technology of large coal bases construction in China
..... WU Gang, WEI Dong, ZHOU Zhengda, et al (2812)

The ecology and environment monitoring technical systems in national large-scale coal-fired power base: a case study in Xilingol
League, Inner Mongolia WEI Dong, QUAN Yuan, WANG Chenxing, et al (2821)

Evaluation index system on ecological effect of national large-scale coal-fired power base based on the dpsir conceptual model
..... ZHOU Zhengda, WANG Chenxing, FU Xiao, et al (2830)

Research progress on the environment impacts from underground coal mining in arid western area of China
..... LEI Shaogang, BIAN Zhengfu (2837)

Ecological risk receptors analysis of pingzhuang western open-cut coal mining area in inner mongolia
..... GAO Ya, LU Zhaohua, WEI Zhenkuan, et al (2844)

Impacts of mining on landscape pattern and primary productivity in the grassland of Inner Mongolia: a case study of Heidaigou
open pit coal mining KANG Sarula, NIU Jianming, ZHANG Qing, et al (2855)

Accumulation of soil Cd, Cr, Cu, Pb by *Panax notoginseng* and its associated health risk
..... LIN Longyong, YAN Xiulan, LIAO Xiaoyong, et al (2868)

3D interpolation of soil PAHs distribution in a coking contaminated site of China ... LIU Geng, BI Rutian, QUAN Teng, et al (2876)

Autecology & Fundamentals

Catabatic effect from artificial mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* on soil aluminum toxicity
..... LEI Bo, LIU Bin, LUO Chengde, et al (2884)

Study on the trophic levels of soil macrofauna in artificial protection forests by means of stable nitrogen isotopes
..... ZHANG Shuhua, ZHANG Xueping (2892)

Lead- and cadmium-resistant bacterial strain JB11 enhances lead and cadmium uptake in the phytoremediation of soils
..... JIN Zhongmin, SHA Wei, LIU Lijie, et al (2900)

Identification and oil-degrading performance of *Acinetobacter* sp. isolated from North Shaanxi oil-contaminated soil
..... WANG Hu, WU Lingling, ZHOU Lihui, et al (2907)

Phylogenetic and physiological diversity of actinomycetes isolated from plant rhizosphere soils in the Qilian Mountains
..... MA Aiai, XU Shijian, MIN Yuxia, et al (2916)

Spatial distribution of AM and DSE fungi in the rhizosphere of *Ammopiptanthus nanus*
..... JIANG Qiao, HE Xueli, CHEN Weiyan, et al (2929)

Effects of PASP-KT-NAA on maize leaf nitrogen assimilation after florescence over different temperature gradients
..... GAO Jiao, DONG Zhiqiang, XU Tianjun, et al (2938)

Key temperatures of corn and sunflower during cooling process in Hetao irrigation district, Inner Mongolia
..... WANG Haimei, HOU Qiong, YUN Wenli, et al (2948)

The content of tannin extract in four types of *Quercus variabilis* YIN Yining, ZHANG Wenhui, HE Jingfeng, et al (2954)

Effect of food stress on flight muscle and reproduction development in a wing dimorphic cricket, *Velarifictorus ornatus*
..... WU Hongjun, ZHAO Lüquan, ZENG Yang, et al (2963)

- Effect of colours on oviposition preference of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* Busck YANG Xiaofan, MA Chunsen, FAN Fan, et al (2971)
- Monoterpene volatiles affecting host selection behavior of *Dendrolimus superans* and the activities of defense protein in larch needles LIN Jian, LIU Wenbo, MENG Zhaojun, et al (2978)
- Population, Community and Ecosystem**
- Soil microbial community structure under different vegetation restoration patterns in the loess hilly area HU Chanjuan, GUO Lei, LIU Guohua (2986)
- Seasonal variation of functional diversity of microbial communities in sediment and shelter of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) cultural ponds YAN Fajun, TIAN Xiangli, DONG Shuanglin, et al (2996)
- Analysis of bacterial flora during the fahua-fermentation process of fuzhuan brick tea production based on DGGE technology LIU Shiquan, HU Zhiyuan, ZHAO Yunlin (3007)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- CO₂ emissions transfer embedded in inter-regional trade in China LIU Hongguang, FAN Xiaomei (3016)
- Carbon sequestration potential of the major stands under the Grain for Green Program in Southwest China in the next 50 years YAO Ping, CHEN Xiangang, ZHOU Yongfeng, et al (3025)
- Characteristics of spatial and temporal phenology under the dynamic variation of grassland in the Qinghai Lake watershed LI Guangyong, LI Xiaoyan, ZHAO Guoqin, et al (3038)
- Estimates of carbon emissions caused by forest fires in the temperate climate of Heilongjiang Province, China, from 1953 to 2012 ... WEI Shujing, LUO Bizhen, SUN Long, et al (3048)
- Simulation of the climatic productivity of forest vegetation in Three Gorges Reservoir area PAN Lei, XIAO Wenfa, TANG Wanpeng, et al (3064)
- The mechanism for occurrence of *Peridiniopsis* blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir ZHU Aimin, LI Sixin, HU Jun, et al (3071)
- Biodiversity sensitivity zoning of river dam and reservoir engineering development ... LI Yiqiu, LU Chunxia, DENG Ou, et al (3081)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Assessment on coordinative ability of sustainable development of Beijing-Tianjin-Hebei Region based on set pair analysis TAN Feifei, ZHANG Meng, LI Haoran, et al (3090)
- Vacancy analysis on the development of nature reserves in Jiangxi Province HUANG Zhiqiang, LU Lin, DAI Nianhua, et al (3099)
- Evaluation of ecological economy index in the poyang lake ecological economic zone HUANG Heping, PENG Xiaolin, KONG Fanbin, et al (3107)
- Research on China's provincial forest ecological security appraisal based on the detrimental interferences LIU Xinzhu, MI Feng, ZHANG Shuang, et al (3115)

《生态学报》2014 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,280 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

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 34 卷 第 11 期 (2014 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 34 No. 11 (June, 2014)

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