中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 3 期
Vol.31 No.3
2011

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 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3期　　2011年2月　（半月刊）

目　　次

景观生态学原理在城市土地利用分类中的应用…………………………… 李伟峰,欧阳志云,肖　燚 (593)
中国特有濒危植物夏蜡梅的交配系统 ………………………………… 赵宏波,周莉花,郝日明,等 (602)
昆仑山北坡不同海拔塔里木沙拐枣的光合生理生态特性 …………………… 朱军涛,李向义,张希明,等 (611)
天山云杉天然林不同林层的空间格局和空间关联性……………………………… 李明辉,何风华,潘存德 (620)
大气 CO_2浓度升高对B型烟粉虱大小、酶活及其寄主的选择性影响 ………… 王学霞,王国红,戈　峰 (629)
桃小食心虫越冬幼虫过冷却能力及体内生化物质动态 ……………………… 王　鹏,凌　飞,于　毅,等 (638)
象山港不同养殖类型海域大型底栖动物群落比较研究 ……………………… 廖一波,寿　鹿,曾江宁,等 (646)
北部湾宝刀鱼的摄食生态 ……………………………………………… 颜云榕,杨厚超,卢伙胜,等 (654)
黄河三角洲自然保护区东方白鹳的巢址利用 ………………………………… 段玉宝,田秀华,朱书玉,等 (666)
贺兰山野化牦牛冬春季食性 …………………………………………… 姚志诚,刘振生,王兆锭,等 (673)
杉木生长及土壤特性对土壤呼吸速率的影响 ………………………………… 王　丹,王　兵,戴　伟,等 (680)
中国干旱半干旱区潜在植被演替 ……………………………………… 李　飞,赵　军,赵传燕,等 (689)
夜间增温和施肥对川西亚高山针叶林两种树苗根际效应的影响………… 卫云燕,尹华军, 刘　庆,等 (698)
洱海流域44种湿地植物的氮磷含量特征………………………………… 鲁　静,周虹霞,田广宇,等 (709)
杜柳幼苗对不同强度干旱胁迫的生长与生理响应……………………………… 安玉艳,梁宗锁,郝文芳 (716)
柠条细根的空间分布特征及其季节动态 ………………………………… 史建伟,王孟本,陈建文,等 (726)
NaCl和 Na_2SO_4 胁迫下两种刺槐叶肉细胞叶绿体超微结构 ……………… 孟凡娟,庞洪影,王建中,等 (734)
设施番茄果实生长与环境因子的关系 ………………………………… 程智慧,陈学进,赖琳玲,等 (742)
嫁接茄子根系分泌物变化及其对黄萎菌的影响 ……………………………… 周宝利,刘　娜,叶雪凌,等 (749)
华北地区冬小麦干旱风险区划 ……………………………………… 吴东丽,王春乙,薛红喜,等 (760)
干旱胁迫条件下冷型小麦灌浆结实期的农田热量平衡……………………………… 严菊芳,张嵩午,刘党校 (770)
秸秆不同还田量对宁南旱区土壤水分、玉米生长及光合特性的影响……… 高　飞,贾志宽,路文涛,等 (777)
盐胁迫下不同基因型冬小麦渗透及离子的毒害效应 ……………………… 徐　猛,马巧荣,张继涛,等 (784)
阿魏酸、对羟基苯甲酸及其混合液对土壤氮及相关微生物的影响………… 母　容,潘开文,王进闯,等 (793)
岷江上游油松与云杉人工林土壤微生物生物量及其影响因素…………………… 江元明,庞学勇,包维楷 (801)
荒漠沙蒿根围AM真菌和DSE的空间分布 ………………………………… 贺学礼,王银银,赵丽莉,等 (812)
百菌清对落叶松人工防护林土壤微生物群落的影响 ……………………… 邵元元,王志英,邹　莉,等 (819)
居住区植物绿量与其气温调控效应的关系 ……………………………… 李英汉,王俊坚,李贵才,等 (830)
近33年白洋淀景观动态变化…………………………………………… 庄长伟,欧阳志云,徐卫华,等 (839)
舟山群岛旅游交通生态足迹评估 ……………………………………… 肖建红,于庆东,刘　康,等 (849)
^{15}N 交叉标记有机与无机肥料氮的转化与残留 ……………………… 彭佩钦,仇少君,侯红波,等 (858)
沉积物老化过程中DOC含量变化对菲吸附-解吸的影响 ………………… 焦立新,孟　伟,郑丙辉,等 (866)
湖南石门、冷水江、浏阳3个矿区的苎麻重金属含量及累积特征 ………… 佘　玮,揭雨成,邢虎成,等 (874)

问题讨论

近55a来河西走廊荒漠绿洲区季节变化特征及其对胡杨年生长期的影响 …………… 刘普幸,张克新 (882)
利用HYSPLIT模型分析麦蚜远距离迁飞前向轨迹 ……………………… 郁振兴,武予清,蒋月丽,等 (889)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 302 * zh * P * ￥70.00 * 1510 * 35 * 2011-02

生 态 学 报 2011,31(3):0874—0881
Acta Ecologica Sinica

湖南石门、冷水江、浏阳3个矿区的苎麻重金属含量及累积特征

佘 玮,揭雨成*,邢虎成,鲁雁伟,康万利,王 栋
(湖南农业大学苎麻研究所,湖南省作物种质创新与资源利用重点实验室,湖南 长沙 410128)

摘要:对湖南省石门、冷水江、浏阳3个矿区土壤和苎麻体内重金属进行测定和分析。结果表明,石门雄黄矿区As污染严重,伴随Cd、Sb污染和轻微的Pb污染;冷水江锑矿区Sb为主要污染物,伴随Cd、As、Pb污染;浏阳七宝山矿区Cd污染严重,伴随Pb、Zn、Cu污染。15个采样点的苎麻群落生长繁茂,Sb和As在苎麻不同部位间的分布次序为叶片中含量最高,根茎中次之,其余重金属在部位间分布没有规律。所有采样点苎麻地上部的Cd含量比一般植物的Cd含量大2—10倍,As含量大9.9—147.5倍,Sb含量大1.2—338.4倍;Cd富集系数和转移系数最高值为2.07和3;As富集系数和转移系数最高值为1.04和12.42,Sb富集系数和转移系数最高值为1.91和9.04。3个矿区苎麻地上部生物量分别为3.47、14.3、15.7 t/hm^2,地上部Cd、Pb、As、Sb、Zn和Cu的累积量分别高达0.11、1.17、0.72、7.97、6.71、1.69 kg/hm^2,兼具一定的经济价值和观赏性,适合用作矿区重金属污染土壤的环境治理和修复。

关键词:矿区;重金属;苎麻;植物修复

Heavy metal concentrations and bioaccumulation of ramie(*Boehmeria nivea*) growing on 3 mining areas in Shimen,Lengshuijiang and Liuyang of Hunan Province

SHE Wei, JIE Yucheng*, XING Hucheng, LU Yanwei, KANG Wanli, WANG Dong
Ramie Research Institute, Hunan Agriculture University, Hunan Provincial Key Laboratory of Crop Germplasm Innovation and Utilization, Changsha 410128, *China*

Abstract: Metal mining and smelting have caused severe heavy metal pollution to the environment and have become a major threat to some local ecosystems in China. The eco-restoration is the first step for the seriously contaminated region. The plant species with high tolerance to heavy metals could be qualified for the eco-restoration. For the less contaminated land, culturing the economic crops is a candidate measure for safely reuse of the land, since economic crop could minimizes the potential hazard of bringing toxic metals into food chains, and with less uptake of contaminants safely utilization of the less contaminated region is the last step, and safely utilization of contaminated land. The application of these methods with the special species is a kind of phytoremediation techquies. The plant species with great biomass, high tolerance to heavy metal, and less uptake of contamninants have been explored as alternatives of phytoremediation in recent years. Ramie (*Boehmeria nivea*) is a promising plant species for the ecorestoration of mining land because it naturely distributed around many mine region in south China. Ramie has been cultivated for over 5 thousand years by Chinese people and thus also named "China grass". This species distributes from N19 to N39 in China.

The aim of this study is to assess the potential of ramie for the phyto-remediating technique in the heavy metal polluted areas. Heavy metal concentrations in soil and ramie in 3 metal-contaminated sites of Hunan Provice(Shimen, Lengshuijiang and Liuyang) were measured. The results revealed that soil samples from realgar mine area (Shimen) were severely

基金项目:国家863计划重点项目(2007AA061001);湖南农业大学人才引进科技资助项目(07YT03)
收稿日期:2009-12-17; **修订日期**:2010-06-09
*通讯作者 Corresponding author. E-mail: ibfcjyc@vip.sina.com

contaminated by As, accompanied with Cd, Sb and mild Pb contamination. Soil samples from antimony mine area (Lengshuijiang) were mainly contaminated by Sb, accompanied with Cd, As and Pb contamination. Soil samples from Qibao mountain area(Liuyang) were severely contaminated by Cd, acompanied with Pb, Zn and Cu contamination. The ramie communities are prosperous in the investigated areas. In these 3 sites, Cd, As, Sb concentration in ramie shoot were 2－10, 9.9－147.5, 1.2－338 times higher than that in other plant species respectively, while Pb, Zn and Cu concentrations in ramie shoot were not higher than those in other plant species because of lower concentrations in soil. And Sb, As concentrations in ramie leaves were higher than that in roots and stems. The distribution of other heavy metal elements among different parts of the plant did not show any regularity. Among these samples, the highest bioaccumulation factor(BF) and transfer factor(TF) of Cd were 2.07 and 3, those of Pb were 0.56 and 6.01, those of As were 1.04 and 12.42, those of Sb were 1.91 and 9.04, those of Zn were 0.19 and 1.40, and those of Cu were 0.06 and 0.98 respectively. The biomasses of ramie shoot from 3 metal-contaminated sites (Shimen, Lengshuijiang and Liuyang) reached 3.47, 14.3 and 15.7 t/hm^2 respectively. The total accumulations of Cd, Pb, As, Sb, Zn and Cu in ramie shoot were up to 0.11, 1.17, 0.72, 7.97, 6.71 and 1.69 kg/hm^{-2} respectively. Besides the above mentioned advantages, the ramie plant also has economic and aesthetic values and thus can be considered as a good candidate for phytoremediation of mining areas contaminated by multi heavy metals.

Key Words: mining area; heavy metal; ramie; phytoremediation

湖南省矿产资源丰富、矿种较多,享有“有色金属之乡”之称。根据《全国中低产田类型划分与改良技术规范》的划分标准和第 2 次土壤普查(1978—1986 年)结果统计,湖南省共有矿毒污染型稻田 $6.7\times10^3 hm^2$。随着采矿业的发展和洪水携带传播,矿毒污染面积不断扩大,1998 年全省矿毒田面积增加到 $1.13\times10^4 hm^2$,占全省水田面积的 0.45%[1]。我国矿区污染土地逐年递增,湖南省因有色金属矿山开采被 Pb、Cd、Hg、As 等重金属污染的土地面积达 $2.8\times10^4 km^2$,占全省总面积的 13%[2]。矿山废石和尾矿需要占据大量场地,因此引起的粉尘污染、水土流失及土地沙化,导致矿区土地生态系统的严重破坏。国内外学者在矿区的植被恢复和土地复垦备方面做了大量的研究,取得了一些成果[3-9],但尚无采用苎麻进行矿区土地复垦的报道。苎麻为中国特有纤维经济作物,产区分布在北纬 21—39°之间[10],野生种遍布黄河以南各地,迄今为止我国已拥有 2000 多份种质资源,其中的栽培资源已广泛为育种和生产所利用[11]。苎麻耐重金属能力较强,在极度污染土壤中能旺盛生长、定居并成为矿区的优势植物,无任何中毒症状[4]。为研究苎麻对不同重金属的耐性和富集能力,对湖南石门、浏阳、冷水江 3 个矿区的苎麻生长情况和苎麻体内重金属含量及其与相关土壤重金属含量的关系作了调查研究,从而为矿区重金属污染土壤的环境治理和修复提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　调查区概况

石门雄黄矿位于湖南省石门县白云乡鹤山村, 距石门县西北 42 km,与慈利县交界。该矿以蕴含丰富的雄黄(As_4S_4), 为亚洲最大的雄黄矿, 已有 1500 多年开采历史,其周围农田土壤 As 达 287 mg/kg[12-13],蔬菜和大米 As 含量部分超过了我国食品卫生标准(GB2715-81)所规定的 0.7 mg/kg[14]。

冷水江锑矿区有 “世界锑都” 之称,锑储量达 200 多万 t,经过 110a 开采仍拥有保有储量 40 万 t[15]。资料表明, 该矿区的土壤受到严重的 As 和 Sb 污染[16],20 世纪 90 年代末该矿区内曾经发生过 As 急性中毒的事故,流经矿区的涟溪河的整个流域也受到污染的影响,给当地居民的生产生活带来严重危害[17]。

浏阳七宝山矿位于湖南省浏阳市东部,距浏阳城区 42km,是一个以黄铁矿、铜、铅、锌、铁、银、金为主的多金属岩溶充水矿山,由于缺乏长远的科学开发规划,很多矿山企业实行掠夺式、粗放型开采,资源利用率极低,缺乏相应的“三废”治理措施,导致严重的环境污染,尤其是近矿区 4 km 左右范围内的稻土 Cu、Zn、Pb、Cd 等全面超标[18]。

1.2 样品采集

2008 年 10 月—2009 年 8 月在石门雄黄矿区(A1—A2)、冷水江锑矿区(B1—B9)和浏阳七宝山矿区(C1—C4)共选取 15 个采样点,采样点地理位置分别为石门雄黄矿区(东经 111°1′54″—111°1′55″,北纬 29°38′50″—29°38′51″,海拔 202m—215m)、冷水江锑矿区(东经 111°28′38″—111°29′25″,北纬 27°45′19″—27°46′45″,海拔 384—651m)和浏阳七宝山矿区(东经 113°55′4″—113°56′36″,北纬 28°16′35″—28°16′53″,海拔 123—147m)。GPS 仪型号为 eTrex lengend。每个采样点选取 1 块苎麻为优势植物的样地,在此范围内随机收获 $1m^2$ 内苎麻植株(包括根),样地采用 5 点取样法,用内径为 2.5cm 的土钻取 0—20 cm 表层土壤,将采集的同一样地的样品混匀,装袋封口并作好标签带回实验室。

1.3 样品处理与分析

土壤样品自然风干后碾碎、过 100 目筛。植物样品洗净后,分为地上部(茎、叶)和地下部,先 105℃ 杀青 30min,然后在 65℃ 烘干至恒重,研磨、过筛。土壤样品用王水-高氯酸法消化,植物样品用硝酸-高氯酸法消化[19]。SOLAAR M6 型原子吸收光谱仪分别测定重金属 Sb、Cd、As、Pb、Zn、Cu 含量。植株地上部重金属含量=(茎干重×茎中重金属含量+叶干重×叶中重金属含量)/(茎干重+叶干重);富集系数=地上部重金属含量/土壤中重金属含量;转移系数=地上部重金属含量/地下部重金属含量;植株地上部重金属累积量=植株地上部重金属含量×植株地上部生物量。所获得数据用 Excel2007 和 DPS 软件进行平均值和标准差的计算。

2 结果与分析

2.1 矿区土壤植被分布和重金属含量

3 个矿区由于矿产的开采和冶炼,空气和土壤污染以及植被破坏较严重,尤其是冷水江锑矿区的植被破坏最为严重。矿区的自然定居植物约 20 余种,植被分布以草本植物为主。3 个矿区共同分布的一些草本植物主要有芒草(*Miscanthus sinensis*)、蜈蚣草(*Pteris vittata*)、苎麻(*Boehmeria nivea*)等多年生草本植物和狗尾草(*Setaria viridis*)等 1 年生草本植物。

石门雄黄矿区和浏阳七宝山矿区土壤类型主要为黄红色酸性土,冷水江锑矿区土壤类型主要为黄红色石灰性土。由表 1 可知,3 个矿区均存在严重的重金属污染问题,但主要的污染源不同。石门雄黄矿区 As 为主要污染源,As 含量超过土壤环境质量标准(GB15618-1995)的Ⅲ级标准 97.46—127.33 倍,伴随有严重的 Cd、Sb 污染和轻微的 Pb 污染;冷水江锑矿区的 Sb 污染最为严重,其次为 Cd、As、Pb 污染;浏阳七宝山矿区 Cd 污染十分严重,伴生有 Pb、Zn 和 Cu 污染。Crommentuijn 等[20]强调土壤中锑的最大允许浓度为 3.5 mg/kg,而本调查中石门雄黄矿区和冷水江锑矿区 Sb 含量远远超过了这一值,其中冷水江锑矿区 B7 采样点超 2 000 多倍,严重影响了周边植被物种的多样性。

2.2 苎麻体内重金属含量

矿区采集的苎麻为栽培种野生状态,生长旺盛。对 3 个矿区苎麻体内的重金属元素的含量分析结果表明(图 1),苎麻不同部位对土壤重金属的吸收差异比较显著。石门雄黄矿区苎麻体内重金属分布规律为叶>根>茎,其余矿区苎麻根、茎、叶中重金属分布次序不一,但大部分苎麻叶片中重金属含量最高,其中 Sb、As 在苎麻叶片中含量始终高于根和茎。苎麻叶片中 Cd、Pb、As、Sb、Zn 和 Cu 的平均含量分别为 2.72、27.16、55.55、295.13、170.21、55.80 mg/kg。一般土壤污染越严重,根部重金属含量越高,而 C3 采样点土壤重金属污染程度居中,该处苎麻根部的 Cd、Pb、Zn 含量却最高。

苎麻地上部重金属含量(图 2)与一般植物的正常含量相比(Cd 0.2—0.8 mg/kg,Pb 0.1—41.7 mg/kg,Sb 0.02—2.2 mg/kg,Zn 1—160 mg/kg,Cu 0.4—45.8 mg/kg,As<1 mg/kg)[21-23],Cd 含量比一般植物的 Cd 含量大 2—10 倍,As 含量大 9.9—147.5 倍,Sb 含量大 1.2—338.4 倍。由于采样点土壤 Pb、Zn 和 Cu 污染程度较低,因此苎麻体内这 3 种金属的含量在正常范围内。B7 和 B8 采样点苎麻叶中的 Sb 含量较高,达到 1103 mg/kg 和 1035 mg/kg,与藿香(*Achillea ageratum*)、车前草(*Plantago lanceolata*)和狗筋麦瓶草(*Silene vulgaris*)

表 1　矿区土壤基本理化性质

Table 1　Properties of soil samples from contaminated sites in mining area

编号 No.	pH	Cd /(mg/kg)	Pb /(mg/kg)	As /(mg/kg)	Sb /(mg/kg)
A1	6.24	4.92 ±0.58	52.72 ±3.15	3898.5 ±238.6	292.01 ±26.45
A2	6.58	5.48 ±0.39	160.72 ±18.49	5093.23 ±384.52	217.51 ±17.50
B1	7.63	2.23 ±0.16	45.40 ±9.52	21.42 ±1.41	83.92 ±5.68
B2	7.95	8.81 ±0.77	72.10 ±10.43	18.30 ±1.81	123.45 ±15.44
B3	8.22	1.69 ±0.23	32.17 ±5.91	10.72 ±1.12	43.11 ±4.43
B4	8.25	3.29 ±0.14	43.10 ±7.06	22.90 ±2.65	157.78 ±14.90
B5	8.09	2.67 ±0.32	45.31 ±9.81	23.03 ±2.34	227.14 ±17.86
B6	7.88	8.51 ±0.69	72.29 ±10.90	132.50 ±13.71	250.21 ±28.50
B7	8.04	2.99 ±0.13	66.73 ±6.39	310.02 ±20.55	12308.33 ±1647.34
B8	7.74	0.87 ±0.10	44.40 ±4.86	29.01 ±2.68	485.42 ±43.71
B9	7.82	86.69 ±5.45	219.92 ±25.61	176.02 ±10.08	2750.03 ±288.01
湖南土壤背景值 Soil background value in Hunan		0.079	27.0	14.0	1.1
全国土壤背景值 Soil background value in China		0.074	23.6	9.2	1.07
土壤环境质量标准(Ⅲ级) Soil environmental quality standard		1.0	500	40	/

编号 No.	pH	Cd /(mg/kg)	Pb /(mg/kg)	Zn /(mg/kg)	Cu /(mg/kg)
C1	5.40	18.76 ±3.68	2699.40 ±204.92	1027.19 ±100.30	1082.72 ±124.35
C2	5.12	7.24 ±0.64	3942.92 ±298.07	1015.31 ±107.51	832.48 ±70.64
C3	5.61	17.40 ±1.82	1860.82 ±155.01	1074.04 ±103.42	1079.72 ±100.57
C4	5.08	6.12 ±0.90	2314.52 ±148.31	1146.16 ±115.30	1167.70 ±156.02
湖南土壤背景值 Soil background value in Hunan		0.079	27.0	95.0	26.0
全国土壤背景值 Soil background value in China		0.074	23.6	67.7	20.0
土壤环境质量标准(Ⅲ级) Soil environmental quality standard		1.0	500	500	400

等锑的指示植物[24]的含量相当。

2.3　苎麻对重金属的富集系数和转移系数

富集系数是反映植物吸收重金属能力大小的重要评价指标,转移系数是反映植物由地下部向地上部转移重金属能力大小的重要评价指标,系数越大说明能力越强。通过计算发现(表 2),冷水江锑矿区 B3 采样点苎麻对 As、Sb 富集系数大于 1,B8 采样点苎麻对 Cd、Sb 的富集系数大于 1,其余采样点苎麻对重金属富集系数小于 1。石门雄黄矿区 2 个采样点苎麻对 Cd、Pb 的转移系数均大于 1;冷水江锑矿区 9 个采样点苎麻对重金属的转移能力均较强,Pb、Cd、As 和 Sb 的转移系数均值分别为 3.01、1.45、7.68 和 4.51,对 As 的转移系数最高值达 12.42;浏阳七宝山矿区 C2 采样点苎麻对 Cd、Zn 和 Cu 的转移系数也都大于 1。15 个样品中,B3 采样点苎麻 As、Sb 的富集系数和转移系数大于 1,B8 采样点苎麻 Cd、Sb 的富集系数和转移系数大于 1,其对重金属的富集能力有待进一步研究。

2.4　苎麻地上部对重金属的累积量

植物修复的效率不仅取决于植物对某种重金属的超富集程度,而且取决于植物本身生物量的大小[25]。石门雄黄矿区苎麻株高约 60cm 左右,冷水江锑矿区和浏阳七宝山矿区苎麻株高 1—2m。3 个矿区株高差异较大,地上部生物量相应地相差显著。从图 3 和图 4 中可以发现,石门雄黄矿区 2 个采样点苎麻地上部干重平均值为 3.47 t/hm^2,地上部对 As 的累积量最高达 0.72 kg/hm^2。冷水江锑矿区 9 个采样点苎麻地上部干重平均值为 14.3 t/hm^2,生长于 Cd、Sb 污染最严重的 B9、B7 采样点的苎麻地上部 Cd、Sb 的累积量分别为

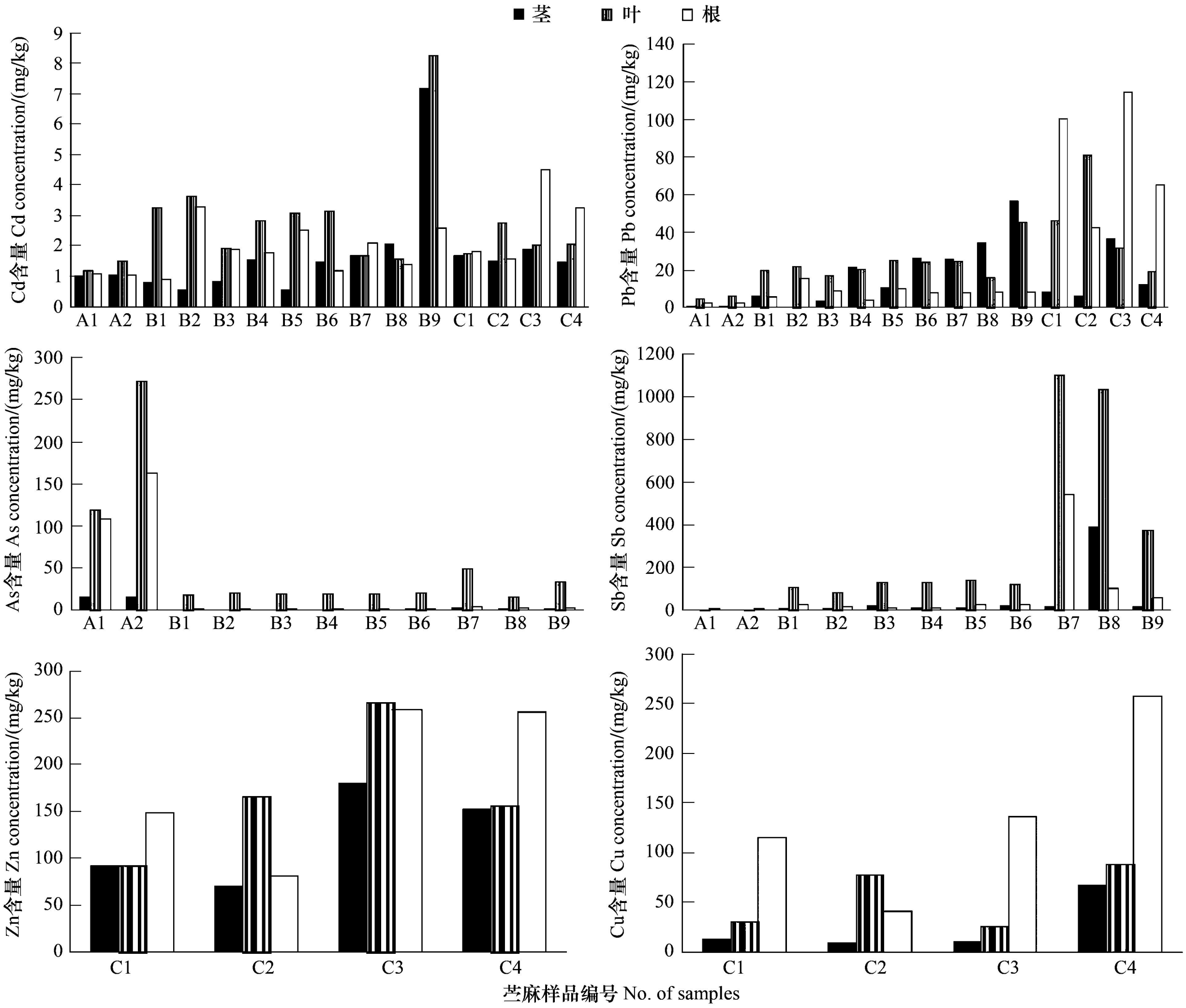

图1 苎麻茎、叶和根重金属含量

Fig. 1 The Cd, Pb, As, Sb, Zn and Cu concentrations in stem, leaf and root of ramie

表2 苎麻对重金属的富集系数和转移系数

Table 2 The bioaccumulation factor and the transfer factor of heavy metals in ramie

编号	Cd		Pb		As		Sb	
No.	富集系数	转移系数	富集系数	转移系数	富集系数	转移系数	富集系数	转移系数
A1	0.23	1.03	0.06	1.20	0.02	0.64	0.01	0.40
A2	0.24	1.26	0.02	1.65	0.03	0.91	0.01	0.58
B1	0.97	2.41	0.31	2.36	0.50	7.43	0.77	2.77
B2	0.26	0.69	0.17	0.80	0.64	7.19	0.42	3.37
B3	0.85	0.77	0.35	1.29	1.04	12.42	1.91	9.04
B4	0.68	1.28	0.48	5.35	0.50	6.59	0.50	6.33
B5	0.73	0.77	0.42	1.89	0.51	9.68	0.37	3.66
B6	0.28	2.06	0.35	3.18	0.09	6.99	0.31	3.11
B7	0.56	0.81	0.38	3.32	0.09	8.24	0.05	1.14
B8	2.07	1.3	0.56	2.89	0.34	3.09	1.53	7.47
B9	0.09	3.00	0.23	6.01	0.11	7.54	0.08	3.70

编号	Cd		Pb		As		Sb	
No.	富集系数	转移系数	富集系数	转移系数	富集系数	转移系数	富集系数	转移系数
C1	0.09	0.96	0.01	0.29	0.09	0.62	0.02	0.19
C2	0.29	1.34	0.01	0.96	0.11	1.40	0.05	0.98
C3	0.11	0.43	0.02	0.31	0.19	0.79	0.01	0.11
C4	0.27	0.51	0.01	0.22	0.13	0.60	0.06	0.28

0.11、6.64 kg/hm^2。浏阳七宝山矿区 4 个采样点苎麻地上部干重平均值为 15.7t/hm^2,C3 采样点苎麻地上部干重最高,为 33.0 t/hm^2,地上部 Zn、Pb 的累积量高达 6.70 kg/hm^2 和 1.17 kg/hm^2;Cu 污染最严重的 C4 采样点,苎麻地上部 Cu 累积量为 1.69 kg/hm^2。结合表 1 和图 2 还发现,浏阳七宝山矿区 4 个采样点土壤的 Pb 污染程度高于 Zn 1.7—3.9 倍,苎麻体内 Pb 含量却低于 Zn,且地上部 Zn 累积量超过 Pb 2.8—10.8 倍,说明七宝山矿区采样点土壤中 Zn 具有较强的移动性。

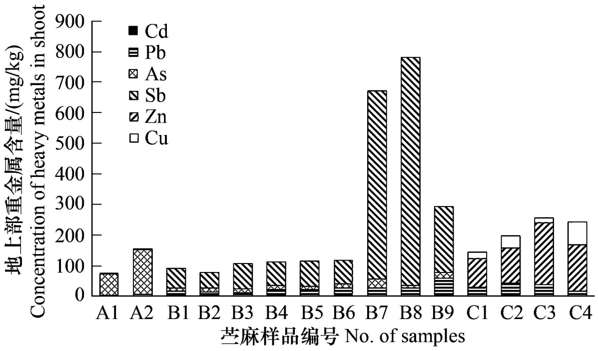

图 2　苎麻地上部重金属含量

Fig. 2　The Cd, Pb, As, Sb, Zn and Cu concentrations in ramie shoots

3　讨论

根据植物表型和根部特征,推测 C3 采样点苎麻的麻龄可能最大。C3 采样点土壤的重金属污染程度居中,C3 采样点苎麻根部的 Cd、Pb、Zn 含量却最高,其余样品地下部的重金属含量随着麻龄大小也基本呈现由高到低的趋势,因此推测苎麻地下部重金属含量可能与麻龄直接相关。B9 采样点土壤中的 Sb 含量比 B8 高 2 364.6 mg/kg,而 B9 采样点苎麻的地上部和地下部的 Sb 含量却显著低于 B8,除土壤中金属有效态含量不同这个因素外,也可能存在麻龄的影响。

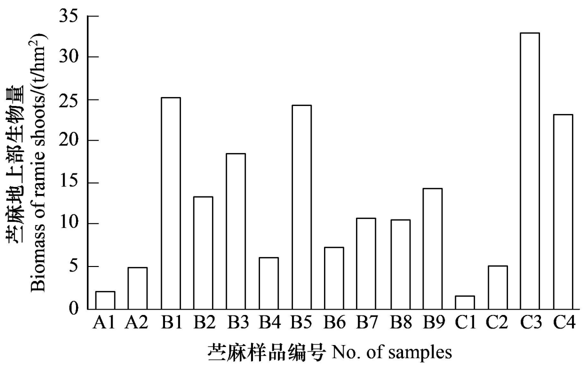

图 3　苎麻地上部生物量

Fig. 3　The biomass of ramie shoots

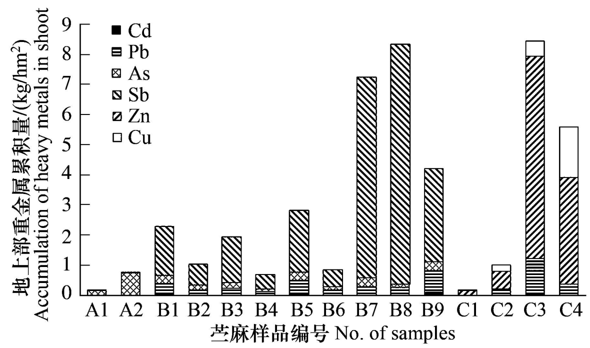

图 4　苎麻地上部重金属累积量

Fig. 4　The heavy metals accumulation in ramie shoots

如果植物地上部分对重金属富集量大于根部,则可用于植物提取修复,如果植物吸收的重金属大部分富集在根部,则可用于植物固定修复,如果植物吸收重金属少而又在污染基质中生长旺盛、生物量大,则可用于植被重建[26]。本研究中大部分采样点苎麻对 Cd、Pb、As、Sb 的转移系数大于 1,说明苎麻可以提取修复这几种重金属污染的土壤,能同时较好的转移 2—4 种重金属;采样点苎麻对 Cu、Zn 的转移系数小于 1,说明苎麻地下部吸收的 Zn、Cu 较多,适宜对 Zn、Cu 污染土壤进行固定修复。

虽然苎麻体内重金属含量不高,但可观的生物量使苎麻对多种重金属表现出一定的积累能力。不同采样点苎麻地上部对 Cd、Pb、As、Sb、Zn 和 Cu 的累积量分别高达 0.11、1.17、0.72、7.97、6.71、1.69 kg/hm^2。野生状态苎麻本身丰富的变异、麻龄和生长土壤重金属含量的不同都会影响其对重金属的耐性和吸收能力,还需进一步引种培育和综合试验研究苎麻对重金属的吸收和富集规律。

在矿区污染土壤上种植苎麻,不仅可以用来修复土壤重金属,发达的根系还能够保持地表长期稳定,同时又具有一定的经济和观赏价值,可以用作矿区废弃地的生态恢复。

4　结论

矿区苎麻对重金属 Cd、Pb、As、Sb、Zn 和 Cu 复合污染土壤具有较强耐性。

冷水江锑矿区 B3 采样点苎麻对 As 和 Sb, B8 采样点苎麻对 Cd 和 Sb 具有较强的富集能力。

苎麻对重金属的转移能力较强,石门雄黄矿区采样点苎麻对 Cd、Pb 的转移系数大于 1;冷水江锑矿区采样点苎麻 Pb、Cd、As 和 Sb 的转移系数均值大于 1,最高值达 12.42。

浏阳七宝山矿区 C2 采样点苎麻对 Cd、Zn 和 Cu 的转移系数大于 1。

石门雄黄矿区、冷水江锑矿区和浏阳七宝山矿区采样点苎麻地上部干重平均值分别为 3.47、14.3 和 15.7t/hm^2。苎麻地上部对 Cd、Pb、As、Sb、Zn 和 Cu 的累积量分别高达 0.11、1.17、0.72、7.97、6.71 和 1.69 kg/hm^2。

致谢:中国科学院地理资源研究所雷梅副研究员对本文写作给予帮助。

References:

[1] Chen Y. The present condition and remediation of soil pollution in Hunan. Hunan Agricultural Science, 2002, 6:31-33.

[2] Guo Z H, Zhu Y G. Contamination and available contents of heavy metals in soils in the typical mining and smelting circumjacent district. Ecology and Environment, 2004,13(4):553-555.

[3] Rodrcguez F G M, Shumilin E, ScLnchez R I. Heavy metal pollution monitoring using the brown seaweed Padina durvillaei in the coastal zone of the Santa Rosalca mining region, Baja California Peninsula, Mexico. Journal of Applied Phycology, 2009, 21(1):19-26.

[4] Lei M, Yue Q L, Chen T B, Huang Z C, Liao X Y, Liu Y R, Zheng G D, Chang Q R. Heavy metal concentrations in soils and plants around Shizhuyuan mining area of Hunan Province. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(5):1146-1151.

[5] Cao D J, Wang G Y, Wang Y, Xiang J, Si Y B. Accumulation of heavy metals in dominant plants growing on mineral areas in Anhui Tongling. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(6):1079-1082.

[6] Wang Y H, Chen X J, Zhao Y L, Qi S H. Heavy metal pollution in soils and plant accumulation in a restored Lead-Zinc mineland in Guangxi, South China. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36(4):487-493.

[7] Zhao N, Li Y, Zu Y Q. Study on pioneer plant and vegetation restoration of mined wasteland. Journal of Yunnan Agricultural University, 2008,5(23):392-395.

[8] Liu Y L, Wu J, Tang Y, Yang G, Zhu L. An investigation of heavy-metal concentration in cominant plant species in a zinc-lead mining area in Ganluo County of Sichuan Provice. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4):2020-2026.

[9] Wei M, Liu X, Chen Z Q, Yu X P, Peng X L. The concentration of heavy metals in soil and dominant plants growing on spoiled heap from steel refinery. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(6):2931-2936.

[10] Li Z D, Hu J Q. Bast Fiber Crops Morphologic. Beijing: Science Press, 1989:46-47.

[11] Jie Y C, Leng J. Development and research of ramie(*Boehmeria nivea*) germplasm in China. China's Fibre Crops, 2000, 22(3):13-15.

[12] Wei C Y, Chen T B. The ecological and chemical characteristics of plants in the areas of high arsenic levels. Acta Phytoecologica Sinica, 2002,26(6):695-700.

[13] Bai J F, Lin X G, Yin R, Zhang H Y, Wang J H, Chen X M, Luo Y M. The influence of arbuscular mycorrhizal fungi on As and P uptake by Maize(*Zea mays*) from As-contaminated soils. Applied Soil Ecology, 2008, 38(2):137-145.

[14] Wang Z G, He H Y, Yan Y L, Yang Y, Gao X Y, Wu C Y. Epidemiological characters of chronic arsenic poisoning among areas near realger mine in Shimen County. Journal of Environment and Health, 1999, 16(1):4-6.

[15] Tong F P, Xu Y P, Long Y Z, Yi J X, Song Q A, Yi A Q, Shi W F, Li G, Dong X H. Appraisal for environmental quality of forestry soil polluted by heavy metals in antimony mine of Lengshuijiang City. Chinese Agriculture Science Bulletin, 2008, 24(12):179-183.

[16] He M C, Wan H Y. Distribution, speciation, toxicity and bioavailability of antimony in the environment. Progress in Chemistry, 2004, 16(1): 131-135.

[17] Zeng M, Liao B H, Zeng Q R, Zhang Y, Luo Q J, Ouyang B. Investigation of arsenic pollution of 3 mining areas in Chenzhou, Shimen, and Lengshuijiang, 3 Cities in Hunan. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(2):418-421.

[18] Dai T G, Liu X H, Tong Q M. Comparison of environmental pollution at different period of time in Qibaoshan mine area, Liuyang, Hunan. Mining and Metallurgical Engineering, 2005, 25(6):9-13.

[19] Lu R K. Agriculture Chemical Analysis of Soil. Beijing:Chinese Agriculture Technology Press, 2000: 79-84.

[20] Crommentuijn T, Polder M D, van de Plasche E J. Maximum Permissible Concentrations and Negligible Concentrations of Metals, Taking Background Concentrations into Account. National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven, The Netherlands, RIVM Report No. 601501001, 1997.

[21] Woolson E A. Emisions, cycling and effects of arsenicn soil ecosystems // Fowler B A ed. Biological and Environmental Effects of Arsenic. Amsterdam, New York and Oxford: Elsevier Science Publisher B V, 1983:51-140.

[22] Cao J L. City econogical corridor[Access date:2005-06-23]. http://sd.thnet.gov.cn/star/3-shengtai/2-03.htm

[23] Hammel W, Debus R, Steubing L. Mobility of antimony in soil and its availability to plants. Chemosphere, 2000, 41(11):1791-1798.

[24] Baroni F, Boscagli A, Protano G, Riccobono F. Antimony accumulation in *Achillea ageratum*, *Plantago lanceolata* and *Silene vulgaris* growing in an old Sb-mining area. Environmental Pollution, 2000, 109(2):347-352.

[25] Koller C E, Patrick J W, Rose R J, Offler C E, MacFarlane G R. Arsenic and heavy metal accumulation by *Pteris vittata* L. and *P. umbrosa* R. Br. Bulletin of Enviroment Contamination and Toxicology, 2008, 80(2):128-133.

[26] Padmavathiamma P K, Li L Y. Phytoremediation technology: hyper-accumulation metals in plants. Water, Air and Soil Pollution, 2007, 184(1/4):105-126.

参考文献：

[1] 陈艳. 湖南省土壤污染现状与修复. 湖南农业科学, 2002, 6:31-33.

[2] 郭朝晖, 朱永. 典型矿冶周边地区土壤重金属污染及有效性含量. 生态环境, 2004, 13 (4):553-555.

[4] 雷梅, 岳庆玲, 陈同斌, 黄泽春, 廖晓勇, 刘颖茹, 郑国砥, 常庆瑞. 湖南柿竹园土壤重金属含量及植物吸收特征. 生态学报, 2005, 25(5): 1146-1151.

[5] 曹德菊, 王光宇, 汪琰, 项剑, 司友斌. 安徽铜陵矿区优势植物的重金属富集特性研究. 农业环境科学学报, 2005, 24(6):1079-1082.

[6] 王英辉, 陈学军, 赵艳林, 祁士华. 铅锌矿区土壤重金属污染与优势植物累积特征. 中国矿业大学学报, 2007, 36(4):487-493.

[7] 赵娜, 李元, 祖艳群. 金属矿区先锋植物与废弃地的植被恢复. 云南农业大学学报, 2008, 5(23):392-395.

[8] 刘月莉, 伍钧, 唐亚, 杨刚, 祝亮. 四川甘洛铅锌矿区优势植物的重金属含量. 生态学报, 2009, 29(4):2020-2026.

[9] 魏敏, 刘新, 陈朝琼, 余小平, 彭晓莉. 攀钢冶炼渣堆土壤与优势植物的重金属含量, 生态学报, 2008, 28(6):2931-2936.

[10] 李宗道, 胡久清. 麻类形态学. 北京: 科学出版社, 1989: 46-47.

[11] 揭雨成, 冷鹃. 中国苎麻种质资源研究的现状和展望. 中国麻作, 2000, 22(3):13-15.

[12] 韦朝阳, 陈同斌. 高砷区植物的生态与化学特征. 植物生态学报, 2002, 26 (6):695-700.

[14] 王振刚, 何海燕, 严于伦, 杨云, 高雪英, 吴传业. 石门雄黄矿附近地区慢性 As 中毒流行病学特征. 环境与健康杂志, 1999, 16(1): 4-6.

[15] 童方平, 徐艳平, 龙应忠, 易建新, 宋庆安, 易霭琴, 石文峰, 李贵, 董晓辉. 冷水江锑矿区重金属污染林地土壤环境质量评价. 中国农学通报, 2008, 24(12):179-183.

[16] 何孟常, 万红艳. 环境中锑的分布、存在形态及毒性和生物效应. 化学进展, 2004, 16(1): 131-135.

[17] 曾敏, 廖柏寒, 曾清如, 张永, 骆其金, 欧阳彬. 湖南郴州、石门、冷水江 3 个矿区 As 污染状况的初步调查. 农业环境科学学报, 2006, 25(2):418-421.

[18] 戴塔根, 刘星辉, 童潜明. 湖南浏阳七宝山矿区宝山河不同时期环境污染对比研究. 矿业工程, 2005, 25(6):9-13.

[19] 鲁如坤. 土壤农化分析法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 79-84.

[22] 曹鉴燎. 都市生态走廊[访问日期 2005-06-23]. http://sd.thnet.gov.cn/star/3-shengtai/2-03.htm.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 3 February, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Applying landscape ecological concepts in urban land use classification …………… LI Weifeng, OUYANG Zhiyun, XIAO Yi (593)
Mating system of *Sinocalycanthus chinensis* (Cheng et S. Y. Chang) Cheng et S. Y. Chang, an endangered, indigenous species in China …………………………………………………………………… ZHAO Hongbo, ZHOU Lihua, HAO Riming, et al (602)
Photosynthetically and ecophysiological characteristics of *Calligonum roborowasikii* in different altitudes on the northern slope of Kunlun Mountain ……………………………………………………………… ZHU Juntao, LI Xiangyi, ZHANG Ximing, et al (611)
Spatial distribution pattern of different strata and spatial assocations of different strata in the Schrenk Spruce Forest, northwest China ………………………………………………………………………………… LI Minghui, HE Fenghua, PAN Cunde (620)
Effect of elevated CO_2 on the body size, enzyme activity and host selection behavior of *Bemisia tabaci* biotype B …………………………………………………………………………………………… WANG Xuexia, WANG Guohong, GE Feng (629)
The dynamics of super-cooling ability and biochemical substances in the overwintering *Carposina niponensi* Walsingham (Lepidoptera: Carposinidae) larvae ……………………………………………………… WANG Peng, LING Fei, YU Yi, et al (638)
A comparative study of macrobenthic community under different mariculture types in Xiangshan Bay, China …………………………………………………………………………………………… LIAO Yibo, SHOU Lu, ZENG Jiangning, et al (646)
Feeding ecology of dorab wolf-herring, *Chirocentrus dorab* from the Beibu Gulf …………………………………………………………………………………………… YAN Yunrong, YANG Houchao, LU Huosheng, et al (654)
Make use of nest-site of oriental white stork in the Yellow River Estuary Nature Reserve …………………………………………………………………………………………… DUAN Yubao, TIAN Xiuhua, ZHU Shuyu, et al (666)
Winter and spring diet composition of feral yak in Helan Mountains, China …………………………………………………………………………………………… YAO Zhicheng, LIU Zhensheng, WANG Zhaoding, et al (673)
Effects of tree growth and soil properties on soil respiration rate in Chinese fir plantations …………………………………………………………………………………………… WANG Dan, WANG Bing, DAI Wei, et al (680)
Succession of potential vegetation in arid and semi-arid area of China …………………………………………………………………………………………… LI Fei, ZHAO Jun, ZHAO Chuanyan, ZHANG Xiaoqiang (689)
Responses on rhizosphere effect of two subalpine coniferous species to night-time warming and nitrogen fertilization in western Sichuan, China ……………………………………………………………… WEI Yunyan, YIN Huajun, LIU Qing, et al (698)
Nitrogen and phosphorus contents in 44 wetland species from the Lake Erhai Basin …………………………………………………………………………………………… LU Jing, ZHOU Hongxia, TIAN Guangyu, et al (709)
Growth and physiological responses of the *Periploca sepium* Bunge seedlings to drought stress …………………………………………………………………………………………… AN Yuyan, LIANG Zongsuo, HAO Wenfang (716)
The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a mature *Caragana korshinskii* plantation …………………………………………………………………………………………… SHI Jianwei, WANG Mengben, CHEN Jianwen, et al (726)
The ultrastructure of chloroplast in mesophyll cell on two robinias under NaCl and Na_2SO_4 stress …………………………………………………………………………………………… MENG Fanjuan, PANG Hongying, WANG Jianzhong, et al (734)
Relationship between tomato fruit growth and environmental factors under protected facility cultivation …………………………………………………………………………………………… CHENG Zhihui, CHEN Xuejin, LAI Linling, et al (742)
Effect of grafting eggplant on root exudates and disease resistance under *Verticillium dahliae* stress …………………………………………………………………………………………… ZHOU Baoli, LIU Na, YE Xueling, et al (749)
The drought risk zoning of winter wheat in North China ……………………… WU Dongli, WANG Chunyi, XUE Hongxi, et al (760)
Heat balance of cold type wheat field at grain-filling stage under drought stress condition …………………………………………………………………………………………… YAN Jufang, ZHANG Songwu, LIU Dangxiao (770)
Effects of different straw returning treatments on soil water, maize growth and photosynthetic characteristics in the semi-arid area of Southern Ningxia ……………………………………………………………… GAO Fei, JIA Zhikuan, LU Wentao, et al (777)
Osmotic and ionic stress effects of high NaCl concentration on seedlings of four wheat (*Tritium aestivum* L.) genotypes …………………………………………………………………………………………… XU Meng, MA Qiaorong, ZHANG Jitao, et al (784)
Effects of ferulic acid, p-hydroxybenzoic acid and their mixture on mineral nitrogen and relative microbial function groups in forest soils ……………………………………………………………… MU Rong, PAN Kaiwen, WANG Jinchuang, et al (793)
Soil microbial biomass and the influencing factors under *Pinus tabulaeformis* and *Picea asperata* plantations in the upper Minjiang River ……………………………………………………………… JIANG Yuanming, PANG Xueyong, BAO Weikai (801)
Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi and dark septate endophytes in the rhizosphere of *Artemisia sphaerocephala* from Inner Mongolia desert ……………………………………………… HE Xueli, WANG Yinyin, ZHAO Lili, et al (812)
Effect of chlorothalonil on soil microbial communities of *Larix* artificial shelter-forest …………………………………………………………………………………………… SHAO Yuanyuan, WANG Zhiying, ZOU Li, et al (819)
Research of the vegetation's cooling effect in city's residential quarter ………… LI Yinghan, WANG Junjian, LI Guicai, et al (830)
Landscape dynamics of Baiyangdian Lake from 1974 to 2007 …… ZHUANG Changwei, OUYANG Zhiyun, XU Weihua, et al (839)
Evaluation of tourism transport ecological footprint in Zhoushan islands …… XIAO Jianhong, YU Qingdong, LIU Kang, et al (849)
Nitrogen transformation and its residue in pot experiments amended with organic and inorganic ^{15}N cross labeled fertilizers …………………………………………………………………………………………… PENG Peiqin, QIU Shaojun, HOU Hongbo, et al (858)
Effects of dissolve organic carbon (DOC) contents on sorption and desorption of phenanthrene on sediments during ageing …………………………………………………………………………………………… JIAO Lixin, MENG Wei, ZHENG Binghui, et al (866)
Heavy metal concentrations and bioaccumulation of ramie (*Boehmeria nivea*) growing on 3 mining areas in Shimen, Lengshuijiang and Liuyang of Hunan Province ……………………………………………… SHE Wei, JIE Yucheng, XING Hucheng, et al (874)

Discussion

Climate characteristic of seasonal variation and its influence on annual growth period of *populus euphratica Oliv* in Hexi Corridor in recent 55 years ……………………………………………………………………………… LIU Puxing, ZHANG Kexin (882)
Forward trajectory analysis of wheat aphids during long-distance migration using HYSPLIT model …………………………………………………………………………………………… YU Zhenxing, WU Yuqing, JIANG Yueli, et al (889)

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 3 期　（2011 年 2 月）

ACTA ECOLOGICA SINICA
（Semimonthly，Started in 1981）
Vol. 31　No. 3　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
主　编　冯宗炜
主　管　中国科学技术协会
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
出　版　科　学　出　版　社
地址：北京东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717
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@ cspg. 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
广告经营许可证　京海工商广字第 8013 号

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
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
Published by Science Press
Add：16 Donghuangchenggen North Street，Beijing　100717，China
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@ cspg. net
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
Add：P. O. Box 399 Beijing 100044，China

ISSN 1000-0933

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