

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第7期 Vol.31 No.7 **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 7 期

2011 年 4 月 (半月刊)

目 次

川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤氮库与微生物的季节变化·····	龚 伟,胡庭兴,王景燕,等 (1763)
IBIS 模拟东北东部森林 <i>NPP</i> 主要影响因子的敏感性·····	刘 曦,国庆喜,刘经纬 (1772)
不同坡位沙棘光合日变化及其主要环境因子·····	靳甜甜,傅伯杰,刘国华,等 (1783)
氮、硫互作对克隆植物互花米草繁殖和生物量累积与分配的影响·····	甘 琳,赵 晖,清 华,等 (1794)
海岛棉和陆地棉叶片光合能力的差异及限制因素·····	张亚黎,姚贺盛,罗 毅,等 (1803)
遮荫对连翘光合特性和叶绿素荧光参数的影响·····	王建华,任士福,史宝胜,等 (1811)
3 种木本植物在铅锌和铜矿砂中的生长及对重金属的吸收·····	施 翔,陈益泰,王树凤,等 (1818)
施氮水平对小麦籽粒谷蛋白大聚合体粒径分布的调控效应·····	王广昌,王振林,崔志青,等 (1827)
强光下高温与干旱胁迫对花生光系统的伤害机制·····	秦立琴,张悦丽,郭 峰,等 (1835)
环境因子和干扰强度对高寒草甸植物多样性空间分异的影响·····	温 璐,董世魁,朱 磊,等 (1844)
利用 CASA 模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力·····	董 丹,倪 健 (1855)
北京市绿化树种紫玉兰的蒸腾特征及其影响因素·····	王 华,欧阳志云,任玉芬,等 (1867)
平衡施肥对缺磷红壤性水稻土的生态效应·····	陈建国,张杨珠,曾希柏,等 (1877)
冬小麦种植模式对水分利用效率的影响·····	齐 林,陈雨海,周勋波,等 (1888)
黄土高原冬小麦地 N_2O 排放·····	庞军柱,王效科,牟玉静,等 (1896)
花前渍水预处理对花后渍水逆境下扬麦 9 号籽粒产量和品质的影响·····	李诚永,蔡 剑,姜 东,等 (1904)
低硫氮比酸雨对亚热带典型树种气体交换和质膜的影响·····	冯丽丽,姚芳芳,王希华,等 (1911)
夹竹桃皂甙对福寿螺的毒杀效果及其对水稻幼苗的影响·····	戴灵鹏,罗蔚华,王万贤 (1918)
海河流域景观空间梯度格局及其与环境因子的关系·····	赵志轩,张 彪,金 鑫,等 (1925)
中国灌木林-经济林-竹林的生态系统服务功能评估·····	王 兵,魏江生,胡 文 (1936)
城郊过渡带湖泊湿地生态服务功能价值评估——以武汉市严东湖为例·····	王凤珍,周志翔,郑忠明 (1946)
黄河三角洲植物生态位和生态幅对物种分布-多度关系的解释·····	袁 秀,马克明,王 德 (1955)
基于景观可达性的广州市林地边界动态分析·····	朱耀军,王 成,贾宝全,等 (1962)
红脂大小蠹传入中国危害特性的变化·····	潘 杰,王 涛,温俊宝,等 (1970)
基于线粒体 <i>Cyt b</i> 基因的西藏马鹿种群遗传多样性研究·····	刘艳华,张明海 (1976)
不同干扰下荒漠啮齿动物群落多样性的多尺度分析·····	袁 帅,武晓东,付和平,等 (1982)
秦岭鼯鼠的洞穴选择与危害防控·····	鲁庆彬,张 阳,周材权 (1993)
京杭运河堤坝区域狗獾的栖息地特征·····	殷宝法,刘宇庆,刘国兴,等 (2002)
专论与综述	
微生物胞外呼吸电子传递机制研究进展·····	马 晨,周顺桂,庄 莉,等 (2008)
厌氧氨氧化菌脱氮机理及其在污水处理中的应用·····	王 惠,刘研萍,陶 莹,等 (2019)
问题讨论	
海河流域森林生态系统服务功能评估·····	白 杨,欧阳志云,郑 华,等 (2029)
研究简报	
体重和盐度对中国蛤蚧耗氧率和排氨率的影响·····	赵 文,王雅倩,魏 杰,等 (2040)
虾塘养殖中后期微型浮游动物的摄食压力·····	张立通,孙 耀,赵从明,等 (2046)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 290 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 33 * 2011-04	



封面图说:日斜茅荆坝·河北茅荆坝——地处蒙古高原向华北平原过渡地带的暖温带落叶阔叶林,色彩斑斓,正沐浴着晚秋温暖的阳光。

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

3 种木本植物在铅锌和铜矿砂中的生长 及对重金属的吸收

施翔¹, 陈益泰^{1,*}, 王树凤¹, 张晓磊^{1,2}, 袁媛³

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 富阳 311400; 2. 山东农业大学林学院, 泰安 271018;
3. 上海泽泉科技有限公司, 上海 200333)

摘要:通过盆栽试验评价 3 种木本植物紫穗槐、桉木和黄连木修复铅锌矿和铜矿尾矿的潜力。结果表明, 150d 后 3 种植物在矿砂中都能生长, 其中黄连木在铅锌矿砂中生长受到明显抑制, 桉木的叶绿素含量显著降低。3 种植物的根系发育在 2 种矿砂中没有受到显著抑制。重金属在 3 种植物组织中的含量为 17.66—55.36 mg/kg (铜)、2.67—196.00 mg/kg (铅)、58.93—333.67 (锌, 铅锌矿砂) 和 49.20—199.33 (锌, 铜矿砂)。3 种植物的生物富集系数 (BCF) 和转移系数 (TF) 值都小于 1。60d 后, 桉木和黄连木叶片的叶绿素荧光参数与对照相比没有显著变化, PS II 的最大量子产量有下降的趋势。重金属胁迫后显著增加 Mg、Fe、Cu 在功能叶的含量, 显著地降低 Mn 的含量。因此可利用固氮植物紫穗槐在尾矿区造林和修复。

关键词:木本植物; 尾矿; 耐性; 叶绿素荧光参数; 根系

Growth and metal uptake of three woody species in lead/zinc and copper mine tailing

SHI Xiang¹, CHEN Yitai^{1,*}, WANG Shufeng¹, ZHANG Xiaolei^{1,2}, YUAN Yuan³

1 The Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, China

2 College of Forestry, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

3 Shanghai Zealquest Scientific Limited Corporation, Shanghai 200333, China

Abstract: Mine tailings are known to have environmental perniciousness due to their high concentrations of heavy metals. Phytoremediation can provide a cost-effective, long-lasting and aesthetic solution for the reclamation of mine tailings. However, revegetation on mine tailing areas is a difficult practice because of toxicity of heavy metals and low nutrient levels. As a result, most tailings disposal sites are devoid of vegetation. Hence, plant species with barren tolerance and excess metal tolerance are required. To date, most of studies focused on the potential utilization of grasses in revegetation. Few studies have evaluated the potential of fast growing woody species for revegetation and remediation of mine tailing areas. The objectives of this study were to reveal the adaptation of the selected woody plants to mine tailings and the potential use of woody species for the revegetation of mine tailings areas in China. A greenhouse pot experiment was conducted to evaluate the potential of woody plants for revegetation in copper (Cu) and lead/zinc (Pb/Zn) mine tailings. Three woody plants species (*Amorpha fruticosa* Linn, *Alnus cremastogyne* and *Pistacia chinensis*) were tested to assess their growth, chlorophyll content, chlorophyll fluorescence parameters, root morphology, metal accumulation and translocation in plants. Pb/Zn tailings and Cu tailings contained elevated concentrations of total Pb, Zn and Cu, which imposed stress to species planted. All three species can grow in both Cu tailings and Pb/Zn tailings and show different tolerance to stress of tailings. The N fixing shrub *A. fruticosa* is the most tolerant species to both tailing areas. *P. chinensis* was significantly stressed in term of plant growth in Pb/Zn tailing. Heavy metals significantly decreased chlorophyll content of *A. cremastogyne*. The root

基金项目:国家林业局 948 项目 (2006-4-06); 浙江省科技厅重大项目 (2006C12065); 浙江省自然科学基金资助项目 (Y3080506)

收稿日期:2010-03-13; **修订日期:**2010-07-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ytc.yalin@yahoo.com.cn

morphology parameters of all plants grown in tailings showed no difference from that grown in soil. Despite the high concentrations of heavy metals in the mine tailing, there was a slight transfer of these elements to the aboveground biomass. The accumulated metal contents in the plants varied among species from 58.93 to 333.67 (for Zn which grown in Pb/Zn tailing area), 49.20 to 199.33 (for Zn which grown in Cu tailing area), 2.67 to 196.00 (Pb) and 17.66 to 55.36 mg/kg (Cu). All plant species have low bioconcentration factor (BCF) and translocation factor (TF) except TF value of Zn (TF=0.84 in Cu tailing areas) of *P. chinensis*. At day 60, the chlorophyll fluorescence parameters of *A. cremastogyne* and *P. chinensis* in two tailings showed no difference compared with control, but the quantum yield of PS II photochemist showed the downward trend. The contents of iron (Fe), magnesium (Mg) and copper (Cu) in leaves increased while manganese (Mn) decreased in *A. cremastogyne* and *P. chinensis* grown in tailings than that in control soil. The N-fixing species, *A. fruticosa* which have the highest tolerance and biomass production, respectively, have great potential application in revegetation in tailings of southern China.

Key Words: woody plants; mine tailing; tolerance; chlorophyll fluorescence parameters; root

金属尾矿因其较高的重金属含量而被认为对环境有严重的影响^[1-2],大部分尾矿处置地区严重缺乏植被^[3]。在中国有大量的金属矿进行开采,产生大量废弃物,这些废弃物包括尾矿导致了严重的环境污染问题^[4-5]。

植物修复被认为是减少尾矿环境危害的最有前途的方法^[6]。然而,重金属对植物的毒害且尾矿砂中缺乏营养元素,使得植物修复较难在尾矿地区实践^[7]。因此,耐瘠薄和耐重金属的植物是较好的选择。研究报道,草本植物如 *Isocoma veneta* (Kunth) Greene, *Teloxys graveolens* (Willd.)^[8], *Bidens humilis*^[9], *Atriplex lentiformis* (Torr.)^[10], *Lygeum spartum* 和 *Piptatherum miliaceum*^[11]等种植在铅锌矿和铜矿尾矿上能够正常生长。但是利用有潜力的速生木本植物来进行植物修复的报道较少^[12-14]。与草本植物相比,木本植物是森林和灌木丛的重要组成部分,有发达的根系。此外,木本植物通过根系减少重金属的生物有效性和毒性且不参与食物链,因此能够潜在地避免给人类生存带来危害。

有研究表明紫穗槐(*Amorpha fruticosa* Linn)、桤木(*Alnus cremastogyne*)和黄连木(*Pistacia chinensis*)对重金属有一定的吸收作用^[14-16],但是较少研究其受胁迫后生长和生理指标的变化。本试验通过研究对3种植物在矿砂中的生长、叶绿素相对含量、叶绿素荧光参数、根系形态的变化以及其对重金属的吸收,以期评价以上3种植物对尾矿修复的潜力。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验供试材料为桤木(*A. cremastogyne*)、黄连木(*P. chinensis*)和紫穗槐(*A. fruticosa*)。桤木和黄连木1年生苗采集自浙江富阳中国林科院亚热带林研究所苗圃。紫穗槐种子采集于浙江富阳。紫穗槐和桤木均为固氮植物,其中紫穗槐长期被作为农业和开矿地区的恢复的主要植物^[14]。黄连木是一种优良的绿化、用材、观赏、药用和油料树种,也是一种可以带动多种产业发展的高效树种^[15]。

供试铜矿砂和铅锌矿砂分别采集自浙江省绍兴市(29°89'N, 120°62'E)和富阳市(30°12'E, 119°47'E)。红壤作为对照土壤采集自富阳市(30°05'E, 119°56'E),没有被重金属污染且粘重。矿砂和土壤样品均采集自土层表层(0—30 cm),其物理化学性质由表1所示。根据国家标准 GB 15618-1995^[17],矿砂中的重金属含量显著高于标准值。

1.2 试验方法

试验在中国林业科学研究院亚热带林业研究所温室大棚进行。研究所位于富阳市,海拔90 m,亚热带气候,年平均气温16.2℃,年降水量1452 mm。

试验前将土壤和矿砂风干和混匀,每个圆形的塑料盆(直径15cm×高15cm)装3000g土壤或矿砂。试验

选择生长基本一致的桉木和黄连木,每个塑料盆移栽 2 株扦插苗。紫穗槐种子经低温处理和消毒后直接播种至各介质中,然后在介质上覆盖一层红黄壤(1—1.5 cm)。发芽后,选择 6 株幼苗进行试验。试验采用随机区组设计,设 3 个重复,每个重复每个处理包括 3 盆,共 108 盆。每 2h 自动喷水,使植物正常生长。试验于 2009 年 6—11 月(共 150d)进行。试验过程中,白天温度 25—35℃,晚上 15—20℃。于试验的第 60 天测定其叶绿素荧光参数(紫穗槐由于叶片小,故没测定)和叶绿素相对含量,并检测与叶绿素荧光有关的矿质元素。试验结束后,收获所有植物,检测生物量,根系形态,植物组织中的重金属(铅、锌和铜)。

表 1 红壤和矿砂的物理化学性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of control soil and two mixed metals spoil types

项目 Item	速效磷 Available phosphor /(mg/kg)	速效氮 Available nitrogen /(mg/kg)	速效钾 Available potassium /(mg/kg)	铜 Copper /(mg/kg)	锌 Zinc /(mg/kg)	铅 Lead /(mg/kg)	有机质 Organic matter /%	pH
红壤 Red soil	16.0	86.6	80.85	24.6	90.8	28.5	0.54	5.52
铅锌矿砂 Lead/Zinc tailing	1.0	15.9	40.9	117.0	2495.0	2380.0	5.89	7.84
铜矿砂 Copper tailing	4.5	36.2	143.5	587.5	1270.0	227.5	3.68	8.45

1.3 样品分析

植物收获后,将其分为地上部和根系 2 部分。根系用去离子水洗净,并用 5 mmol/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 浸泡。植物样品经 105℃ 杀青 30min, 75℃ 烘干 3d 后称其生物量。

植物样品烘干粉碎后,称取 0.2 g,用 4 mL HNO_3 和 1 mL HClO_4 混合液消解,重金属(Pb、Cu 和 Zn)和矿质元素含量用电感耦合等离子原子发射光谱 ICP-OES 测定(IRIS Intrepid II XSP, Thermo)。

土壤和矿砂经风干过筛后测定重金属含量、营养元素、有机质和 pH。土壤有机质($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加加热法)、速效氮的测定(碱解扩散法)、土壤速效磷用钼蓝比色法测定^[18]。土壤样品经 5 mL 65% HNO_3 和 70% HClO_4 混合液(4:1 体积分数)消解,用 ICP-OES 测定重金属含量^[19]。pH 值用酸度计 PHS 测定(PHS-3C, 上海精密科学仪器有限公司;1:2.5 土壤或矿砂/水)。

叶片叶绿素含量用 CCM200 型手持叶绿素仪测定(CID Inc),每株植物随机选取植株上部叶片 10 片,测定其叶绿素值,取平均值。

叶绿素荧光参数测定采用便携式脉冲调制叶绿素荧光仪(PAM-2500, Walz)。每株选取 4 片成熟叶进行测定,荧光参数通过 PAM-WIN 软件获得(Walz)。测定前暗适应 30min。测定程序为:先照射检测光($<0.1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),测定暗适应后的叶片最小荧光(minimal fluorescence, F_0)、最大荧光(maximal fluorescence, F_m)。再测定光化光光强为 $160 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 下的最大荧光 F_m' 和实时荧光(actual fluorescence, F_s)等指标,测定时调整叶片使其受光量尽量一致,以减少误差。通过以上数据计算光适应下的最小荧光(F_0'), $F_0' = 1 / (1/F_0 - 1/F_m + 1/F_m')$; (2) PS II 最大光化学量子产量(F_v/F_m), $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$; (3) 光化学淬灭, $qP = (F_m' - F)/(F_m' - F_0')$; (4) 非光化学淬灭, $qN = 1 - (F_m' - F_0')/(F_m - F_0)$, (5) PS II 有效光化学量子产量, $\Phi_{\text{PSII}} = \text{Yield} = (F_m' - F)/F_m'$ 。

植物根系去离子水洗净后,用双光源扫描仪扫描。根系形态参数(根长、根面积、根体积、根平均直径以及不同径级的根系长度、根系颜色)通过图片用根分析软件 WinRHIZO Pro 2005b 分析(Regent Instruments Inc)。

1.4 数据分析

实验数据采用统计软件 SPSS V13.0 进行方差分析(ANOVA)和最小差异显著法(LSD),对 3 种植物在铅锌矿砂和铜矿砂中的反应数据进行差异性比较。

2 结果

2.1 植物生物量

桉木、黄连木、紫穗槐在 3 种介质中生长的生物量由图 1 所示。桉木在 3 种介质中生物量没有显著差异,单株生物量在 8.70—8.94 g 之间,与对照相比,铅锌矿砂和铜矿砂中地上部的生物量有 0.4 g 的减少,根系则分别增加 0.3 g 和 0.2 g。黄连木地上部的生长在铅锌矿砂中受到显著抑制,生物量与对照相比减少 37%。黄连木在铜矿砂中地上部和根系的生物量相对对照有 17.1% 和 19.8% 的增加。紫穗槐在污染介质中有较好的生长,在铅锌矿砂中根系的生物量与对照相比增加了 27.4%。

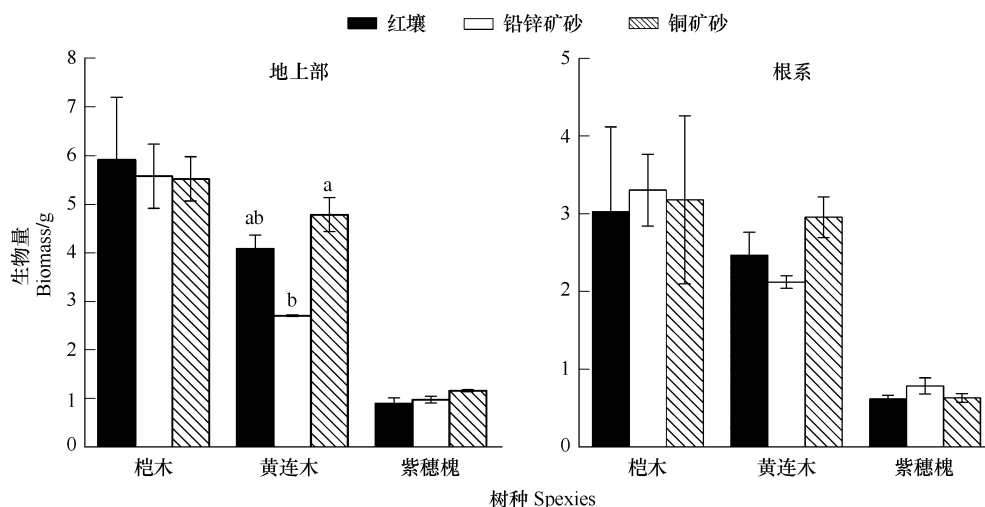


图 1 3 种介质环境下 3 种植物的单株干重生物量

Fig. 1 Seedling biomass after growing in three types of medium

2.2 叶绿素相对含量

3 种植物叶绿素含量由图 2 所示。在铅锌矿砂和铜矿砂中,黄连木和紫穗槐植株叶片的平均叶绿素含量与对照相比没有显著差异,没有出现明显的黄化现象(少量叶片在叶缘出现黄化现象)。桉木植株叶片平均叶绿素含量与对照相比有显著差异,分别下降了 22.7% (铅锌矿砂)和 25.2% (铜矿砂),叶缘有黄化现象。

2.3 叶绿素荧光参数

在铅锌矿砂和铜矿砂中,桉木的 F_0 较对照有增加,黄连木则有下降。黄连木 F_m 和 F_t 在两种污染介质中均降低。桉木在两种污染介质中的最大荧光降低而实际荧光有所增加。桉木和黄连木的最大光化学量子产率 (F_v/F_m) 在两种污染介质中降低,其中桉木的 F_v/F_m 值均从 0.787 下降到 0.75 (图 3)。 F_v/F_m 值的减少表明植物开始受到重金属的毒害。方差分析可知,上述 4 个参数在 3 种介质中没有显著差异。

2.4 根系形态

植物根系在不同矿砂中的形态发育有显著差异(图 4),与生物量的表现基本一致。桉木根系在铅锌矿砂和铜矿砂中的生长没有受到显著的抑制,其中根长较对照有一定的增加。根表面积、根平均直径和根体积等

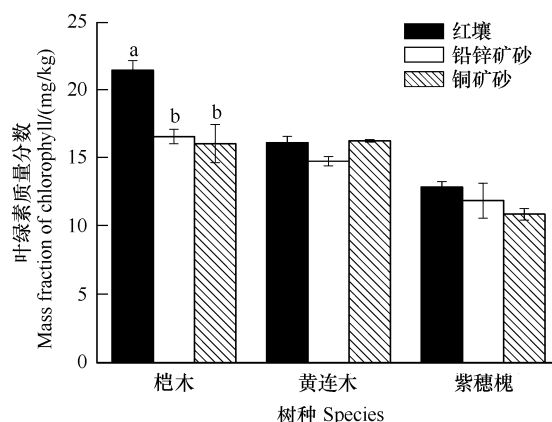


图 2 3 种介质环境下 3 种植物的叶片叶绿素质量分数

Fig. 2 The chlorophyll content of three species in three types of medium

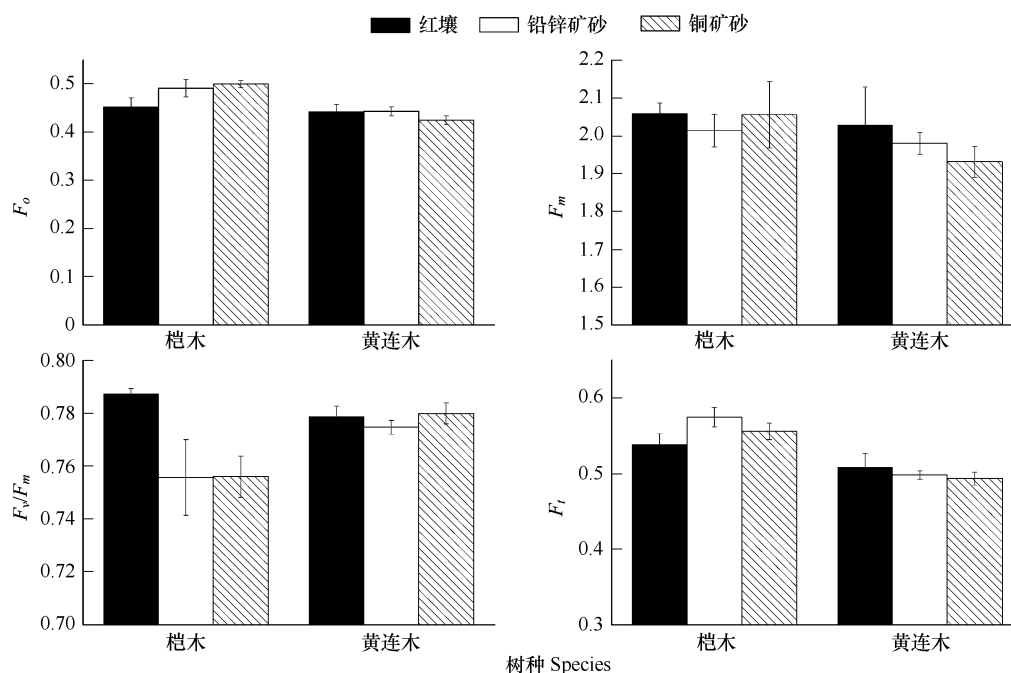


图3 3种介质环境下3种植物的叶绿素荧光参数

Fig. 3 The chlorophyll fluorescence parameters of three species in three types of medium

参数有不同程度的下降(根平均直径在铅锌矿砂中除外)。在铜矿砂中,根平均直径与对照相比有显著下降,从2.14 mm下降到1.60 mm。黄连木的根系发育受重金属铅和锌的影响较大,与对照相比根长和根表面积分别减少了32.3%和19.8%。在铜矿砂中,黄连木根系发育较好,根表面积、根平均直径和根体积较对照有一定程度的增加。方差分析可知,紫穗槐根形形态参数在3种介质中没有显著差异。除根长外,根表面积、根平均直径和根体积等参数较对照都有一定程度的减少。

3种植物在3种介质环境中不同径级的根系长度由表2所示。根系长度主要集中在(0—0.5和0.5—1)两个径级,1—2和>2两个径级根系长度所占比例很小,特别是>2径级(表2)。桉木0—0.5径级的比例显著低于其他2个树种,特别是在铅锌矿区,细根比例为60%,低于对照的67.9%和铜矿砂的71.2%。桉木0.5—1和1—2这两个径级的比例则显著高于其他树种。紫穗槐细根(0—0.5)的比例较高,其中在铅锌矿砂和铜矿砂的比例高达88%,对照比例为82.2%。黄连木的情况与紫穗槐相反,细根比例(0—0.5)是对照较高,为87.3%;铜矿砂中最低,为81.9%。

表2 3种介质环境下3种植物不同径级根系长度/cm

Table 2 The length of roots in different diameter classes of three woody species in three types of medium

树种 Species	介质 Media	0—0.5	0.5—1	1—2	>2
桉木 <i>Alnus cremastogyne</i>	红土	909.02±385	288.24±103 b	106.68±45 b	34.73±18
	铅锌矿砂	1013.56±248	448.03±115 a	185.36±56 a	42.08±7
	铜矿砂	1096.61±396	317.91±118 b	96.47±47 b	28.17±6
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	红土	1279.26±241 a	118.04±18	44.11±16	22.81±13
	铅锌矿砂	836.86±290 b	90.51±41	37.07±9	26.15±8
	铜矿砂	1028.50±344 ab	148.11±38	46.56±14	32.18±7
紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	红土	490.45±205	62.09±25	26.04±9	18.03±6
	铅锌矿砂	516.74±226	43.26±20	15.49±5	6.95±2
	铜矿砂	600.08±326.29	49.89±13	16.41±6	10.73±3

表中同一列不同字母表示不同处理下一树种根系形态参数差异显著($P<0.05$)

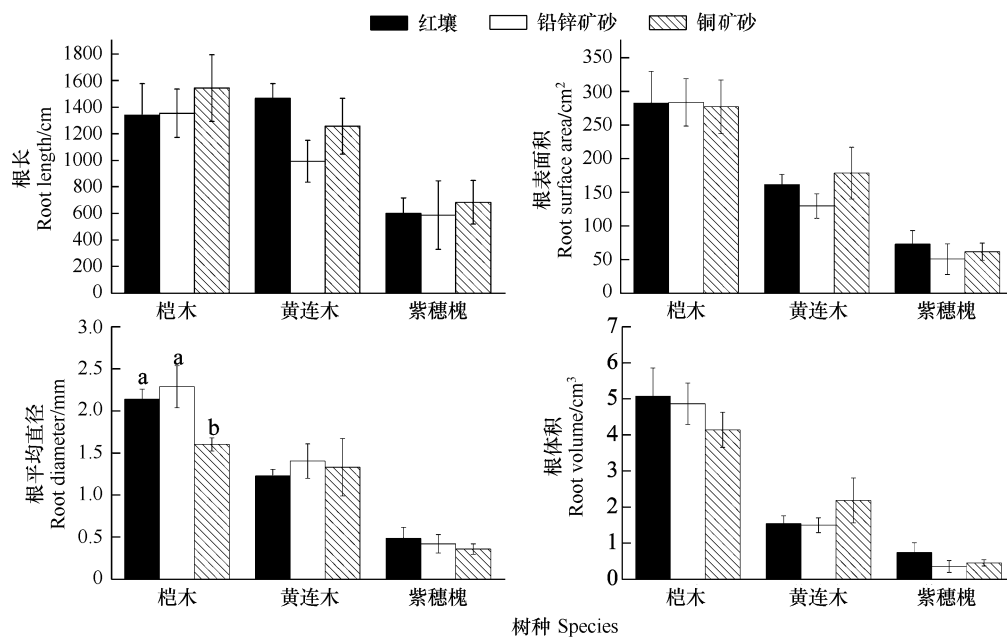


图 4 3 种介质环境下 3 种植物根系形态参数

Fig. 4 The parameters of root of three species in three types of medium

根系颜色能初步反映出植物在逆境胁迫下的表现。黄连木根系颜色主要是深褐色和浅黄色,其中深褐色的比例在 50% 以上(体积除外)。褐色和棕黄色所占比例小(体积除外)。方差分析显示,各指标在 3 种介质中没有显著差异。紫穗槐根系颜色与黄连木相似,其中褐色的比例在 50% 以上(体积除外)。桤木根系颜色主要是深褐色和浅黄色,其中以浅黄色为主。各指标对照根系浅黄色的比例要高于污染介质。

2.5 植物对重金属元素的吸收

各树种根系和地上部组织中铅、锌和铜的含量由表 3 所示。重金属主要积累在植物的根部。铜在各树种组织中含量的变化范围为 17.66—55.36 mg/kg。铜矿砂中,紫穗槐和桤木地上部铜的含量为 25.26mg/kg, 24.66 mg/kg,高于黄连木树种。桤木根系铜的含量为 53.88mg/kg,高于黄连木和紫穗槐。与对照相比,植物体内铜的含量没有显著的提高。铅在植物组织中的含量变化范围为 2.67—196.00 mg/kg。桤木根系中铅的含量要显著高于其他 2 个树种,为 196.00 mg/kg。紫穗槐根系铅含量最低,为 80.00 mg/kg,但其地上部含量较高,为 13.67 mg/kg。植物生长在铅锌矿砂中,其体内重金属锌的含量要高于铜矿砂中的植物。桤木根系中锌的含量为 333.67mg/kg(铅锌矿砂)和 199.33mg/kg(铜矿砂),为最高。紫穗槐(铅锌矿砂)和黄连木

表 3 150d 后 3 种植物在不同介质中各组织重金属含量(干重)

Table 3 Heavy metal concentrations in three woody species shoot and root tissues following different types of substrate after 150 days

树种 Species	处理 Treatment	锌 Zinc/(mg/kg)		铅 Lead/(mg/kg)		铜 Copper/(mg/kg)	
		地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root
桤木 <i>Alnus cremastogyne</i>	红壤	78.90±6.12 ab	186.67±22.01 b	5.00±1.00 c	15.33±3.78 c	18.26±0.64 b	47.56±1.62 ab
	铅锌矿砂	80.03±2.35 ab	333.67±138.27 a	9.33±0.57 b	196.00±3.60 a	nd	nd
	铜矿砂	77.66±22.80 ab	199.33±58.62 b	nd	nd	24.66±6.40 a	53.88±16.29 a
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	红壤	47.97±4.07 d	68.93±2.70 c	4.67±0.58 c	31.67±2.08 c	17.66±1.16 b	55.36±1.77 a
	铅锌矿砂	58.93±2.58 cd	185.67±3.78 b	15.00±1.00 a	143.67±5.51 a	nd	nd
	铜矿砂	49.20±5.92 d	60.13±9.52 c	nd	nd	19.60±0.34 ab	41.46±3.21 b
紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	红壤	70.70±1.75 bc	96.26±3.34 bc	3.00±0 c	10.67±0.57 c	21.33±0.51 ab	53.4±4.59 a
	铅锌矿砂	92.53±4.33 a	135.00±3.46 bc	13.67±2.51 a	80.00±3.60 b	nd	nd
	铜矿砂	61.20±7.97 cd	90.03±3.21 bc	nd	nd	25.26±4.01 a	47.26±2.15 ab

表中同一列不同字母表示不同处理下各树种组织内重金属含量差异显著($P<0.05$);nd 表示未检测

(铜矿砂)根系中锌的含量较低,分别为 135.00 和 60.13 mg/kg。与根系相似,桉木地上部锌的含量较高,而黄连木组织中含量最低。紫穗槐地上部锌含量最高,为 92.53 mg/kg。

桉木、黄连木和紫穗槐在铅锌矿砂和铜矿砂介质中的生物富集系数 BCF 值由表 4 所示。铜的 BCF 值在 0.03—0.04 之间,表明各树种对铜的积累有限。铅的 BCF 值在 0.003—0.006 之间,说明所试植物几乎不积累铅。锌的 BCF 值在铜矿砂中高于在铅锌矿砂中。方差分析表明,BCF 值在树种和介质中没有显著差异。

表 4 表示各树种在铅锌矿砂和铜矿砂介质中的转移系数 TF 值。紫穗槐对重金属的转移能力高于其他树种,TF 值分别为 0.17(铅锌矿砂,铅)、0.68(铅锌矿砂,锌)、0.53(铜矿砂,铜)和 0.689(铜矿砂,锌)。黄连木在铜矿砂中有较高的 TF 值,为 0.84。桉木对重金属的转移能力较弱。

表 4 3 种植物在不同矿砂中的根系富集系数(BCF)和转移系数(TF)

Table 4 Bioconcentration factor (BCF) and Translocation factor (TF) of Pb, Cu and Zn in three woody species

树种 Species	BCF				TF			
	铅锌矿砂 Lead/Zinc tailing		铜矿砂 Copper tailing		铅锌矿砂 Lead/Zinc tailing		铜矿砂 Copper tailing	
	铅 Lead	锌 Zinc	铜 Copper	锌 Zinc	铅 Lead	锌 Zinc	铜 Copper	锌 Zinc
桉木 <i>Alnus cremastogyne</i>	0.004±0.0002	0.03±0	0.04±0.01	0.06±0.018	0.06±0.02c	0.28±0.15 b	0.46±0.02	0.41±0.14b
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	0.006±0.0004	0.02±0.001	0.03±0	0.04±0.004	0.10±0.003b	0.32±0.01b	0.47±0.04	0.84±0.25a
紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	0.006±0.0011	0.04±0.002	0.04±0.006	0.05±0.006	0.17±0.03a	0.68±0.02a	0.53±0.06	0.68±0.07ab

表中同一列不同字母表示同一处理下各树种 BCF 和 TF 值差异显著 ($P<0.05$)

3 讨论

植物对重金属的耐性是植物修复重金属污染土壤的前提。3 种植物在 2 种矿砂中都能生长,但受害程度不同,反映出不同植物对重金属耐性程度的不同,可能是因为矿砂中过量的重金属元素。铅和锌是植物正常生长和发育所必需的元素,但土壤中过量的铅、锌和铜会抑制植物的生长。Kabata-Pendias 和 Pendias^[20]报道土壤中 100—400 mg/kg 铅、70—400 mg/kg 锌和 60—125 mg/kg 铜会对植物产生毒害作用,而本试验供试矿砂中铅、锌和铜的含量显著高于这个界限。Levy 等^[21]报道植物中重金属正常和毒性浓度范围 0.5—10 mg/kg (Pb) 和 30—300 mg/kg (Pb)、3—30 mg/kg (Cu) 和 20—100 mg/kg (Cu) 以及 10—150 mg/kg (Zn) 和 >100 mg/kg (Zn)。本研究中植物组织中重金属含量要高于以上界限,可能是导致植物在不同矿砂中有不同耐性的原因。图 1 表明紫穗槐能正常生长,说明其对铅、锌和铜有较好的耐性。营养元素对植物生长有着重要的作用。矿砂中营养元素的缺失可能是造成植物不能正常生长的另外一个原因^[22]。固氮植物能从空气中固定氮从而提高其氮水平,因此固氮植物是尾矿植物修复的较好树种。从本试验结果可知,固氮植物紫穗槐在矿砂中有较好的生长,能适合矿区的植物修复。根系在植物生长发育过程中有非常重要的作用。研究表明植物根系在矿砂中并没有受到很大的毒害,且某些根系形态参数比对照高,可能是因为试验供试植物本身的差异造成的。据观察,植物新生根系颜色以浅色为主,试验的结果表明,3 种植物的新根比例较低,可能是金属毒性对其发育起到了抑制作用。由于对照红壤较粘重,因此可能影响了植物根系的发育。

试验表明在矿砂中植物有叶黄化的症状。本试验测定的 Ca、Mg、Fe、Cu 和 Mn 等 5 种矿质元素中(数据未给出),矿砂介质中植物叶片 Ca、Mg、Fe、Cu 的含量的与对照相比有增加(Ca 在铅锌矿砂中减少),特别是 Mg 的含量增加显著;Mn 的含量下降明显。由于 Mn 与植物的光合、呼吸、叶绿素和蛋白质的合成等重要代谢过程密切相关,缺 Mn 时叶绿素和 PS II 放氧复合体的合成将受到抑制^[23]。因此推测本实验中 Mn 的亏缺是桉木黄化症的主要原因之一,这与镉处理后,杨树出现黄化症的机理一致^[23]。

PS II 的最大量子产量作为光抑制和 PS II 复合体受伤的指标^[24],反映了植物潜在的最大光合能力。当植物受到胁迫时, F_v/F_m 会显著下降。试验结果表明,60d 后黄连木和桉木的 F_v/F_m 值在 3 种介质中没有差异,桉木的 F_v/F_m 值有一定程度的下降,说明在重金属胁迫下,桉木叶片发生了光抑制或者 PS II 复合体受损害。黄连木在 60d 时 F_v/F_m 值与对照相比无变化,表明黄连木受到重金属胁迫后有一定的耐性,但在试验后期,黄连木在铅锌矿中表现出一定的受害症状,其受害机理将进一步研究。 F_v/F_m 下降可能是 F_0 的上升或 F_m 的下

降。本试验中桉木 F_0 有少量的升高,表明被叶绿素吸收的能量转化成电能(电子传递)的比例下降。 F_m 有下降的趋势,可能是叶绿素分子减少所致。黄连木的 F_0 值没有变化,但在铜矿砂中有轻微降低,可能是因为 PS II 天线的热耗散增加的缘故。光化学淬灭(qP)反映 PS II 原初电子受体 Q_A 的氧化还原状态,较低的 qP ,反映 PS II 中开放的反应中心比例和参与 CO_2 固定的电子减少^[25]。以往的研究表明,重金属胁迫导致植物 qP 下降^[23-25],本试验中,桉木和黄连木(铅锌矿砂)的 qP 呈现上升的趋势,但不显著(数据未给出),反映 Q_A 氧化状态的增加,可能是因为在重金属胁迫下放氧复合体或捕光色素复合体受到伤害, Q_A 接受电子能力减弱,致使 Q_A 的还原程度和还原速率也随之下降^[23]。黄连木在铜矿砂中的 qP 有下降的趋势,表明黄连木幼苗利用光能的效率下降,PS II 的电子传递有受阻的趋势。非光化学淬灭(qN)反映了 PS II 反应中心对天线色素吸收过量光能后的热耗散能力,同时也能反映光合系统的损伤程度^[26]。黄连木(铜矿砂)的 qN 有增加的趋势,表明光保护机制起到了一定的作用,这也与生物量的结果相一致。

Seo 等^[14]报道在没有营养处理下,紫穗槐根、茎和叶中的重金属含量分别为 358.6 mg/kg (Zn)、67.3 mg/kg (Zn)和 644.3 mg/kg (Zn);47.5 mg/kg (Pb)、51.2 mg/kg (Pb)和 323.0 mg/kg (Pb);18.2 mg/kg (Cu)、5.1 mg/kg (Cu)和 215.7 mg/kg (Cu)。而本试验表明植物对重金属的吸收相对较少,可能是试验时间较短(Seo 的试验周期为 18 个月),此外试验供试植物属于幼苗期,对重金属的毒性耐性较低。土壤 pH 是影响重金属生物有效性的一个重要原因^[27]。当土壤为碱性时,会限制重金属在土壤中的生物有效性^[28],而试验供试矿砂 pH 分别为 7.84(铅锌矿砂)和 8.45(铜矿砂),这可能是植物不能有效吸收重金属的一个原因。表 4 表明 3 种植物都能较好的吸收锌而较难吸收和转移铜和铅,可能是因为铅和铜的毒性导致了植物不能有效的将其从根系转移至地上部^[29]。

试验中植物的 BCF 值和 TF 值都小于 1,表明其对重金属的吸收转移能力较弱,因此收获的植物很难有效的去除矿砂中的重金属。Mendez 等^[4]认为植物的 BCF 值和 TF 值都小于 1,可作为植物固定的参考植物。植物不同组织对重金属的吸收不一样,研究结果显示根系组织能积累更多的重金属,表明重金属进入高等植物后,其迁移能力被有效的限制^[30],根据毒理学的观点,植物积累较少的重金属,可以避免其进入食物链,有效减少环境危害^[5]。

4 结论

本研究的目的是评价速生木本植物在尾矿修复中的潜力,通过试验得出以下结论:

(1)紫穗槐、桉木和黄连木能在铅锌矿砂和铜矿砂中生长,紫穗槐在 3 种介质中的生长没有显著差异;桉木在污染介质中出现黄化症状,黄连木的生物量在铅锌矿中显著减少。

(2)重金属主要积累在植物根部,只有很少一部分重金属通过植物转移到地上部组织中。所有植物的 BCF 值和 TF 值都小于 1。

(3)固氮植物紫穗槐有较好的耐性和较高的生物量,是修复铅锌矿和铜矿尾矿区的潜力树种。

References:

- [1] Conesa H M, Faz Á, Arnaldos R. Initial studies for the phytostabilization of a mine tailing from the Cartagena-La Union Mining District (SE Spain). *Chemosphere*, 2007, 66(1): 38-44.
- [2] Wang S L, Liao W B, Yu F Q, Liao B, Shu W S. Hyperaccumulation of lead, zinc, and cadmium in plants growing on a lead/ zinc outcrop in Yunnan Province, China. *Environmental Geology*, 2009, 58(3): 471-476.
- [3] Mendez M O, Maier R M. Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2008, 7(1): 47-59.
- [4] Wong M H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, 2003, 50 (6): 775-780.
- [5] Deng H, Ye Z H, Wong M H. Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China. *Environmental Pollution*, 2004, 132(1): 29-40.
- [6] Bradshaw A D, Johnson M. *Revegetation of Metalliferous Mine Wastes: The Range of Practical Techniques Used in Western Europe*. Manchester: Elsevier, 1992.
- [7] Ye Z H, Shu W S, Zhang Z Q, Lan C Y, Wong M H. Evaluation of major constraints to revegetation of lead/zinc mine tailings using bioassay

- techniques. *Chmosphere*, 2002, 47(10): 1103-1111.
- [8] González R C, González-Chávez M C A. Metal accumulation in wild plants surrounding mining wastes: soil and sediment remediation (SSR). *Environmental Pollution*, 2006, 144(1): 84-92.
- [9] Bech J, Poschenrieder C, Barcelo J, Lansac A. Plants from mine spoils in the South American area as potential sources of germplasm for phytoremediation technologies. *Acta Biotechnology*, 2002, 22(1/2): 5-11.
- [10] Mendez M O, Glenn E P, Maier R M. Phytostabilization potential of quailbush for mine tailings: growth, metal accumulation, and microbial community changes. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(1): 245-253.
- [11] Conesa H M, Faz Á, Arnaldos R. Heavy metal accumulation and tolerance in plants from mine tailings of the semiarid Cartagena-La Unión mining district (Se Spain). *Science of the Total Environment*, 2006, 366(1): 1-11.
- [12] Mertens J, Vervaeke P, Schrijver A D, Luyssaert S. Metal uptake by young trees from dredged brackish sediment: limitations and possibilities for phytoextraction and phytostabilisation. *Science of the Total Environment*, 2004, 326(1/3): 209-215.
- [13] Domínguez M T, Marañón T, Murillo J M, Schulin R, Robinson B H. Trace element accumulation in woody plants of the Guadamar Valley, SW Spain: a large-scale phytomanagement case study. *Environmental Pollution*, 2008, 152(1): 50-59.
- [14] Seo K W, Son Y, Rhoades C C, Noh N J, Koo J W, Kim J G. Seedling growth and heavy metal accumulation of candidate woody species for revegetating Korean mine spoils. *Restoration Ecology*, 2008, 16(4): 702-712.
- [15] Nie J H, Liu X M, Wang Q R. Effect of nutrient elements on the lead uptake by hyperaccumulation. *Ecology and Environment*, 2004, 13(3): 306-309.
- [16] Sui Y J, Li Z, Chen L. Study on the effects of simulated acid rain and Hg^{2+} on the physiological indices of *Pistacia chinensis* Bunge. *Journal of South west China Normal University (Natural Science Edition)*, 2009, 34(3): 195-198.
- [17] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB 15618—1995 Environmental Quality Standard for Soils. Beijing: China Environmental Science Press, 1995.
- [18] Bao S D. Routine Methods for Soil and Agrochemistry Analyses. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [19] Shu W S, Ye Z H, Lan C Y, Zhang Z Q, Wong M H. Acidification of lead/zinc mine tailings and its effect on heavy metal mobility. *Environmental International*, 2001, 26(5/6): 389-394.
- [20] Kabata-Pendias A, Pendias H. Trace Elements in Soils and Plants. Florida: CRC Press, 1984.
- [21] Levy D B, Redente E F, Uphoff G D. Evaluating the phytotoxicity of Pb-Zn tailings to big bluestem (*Andropogon gerardii* Vitman) and switchgrass (*Panicum virgatum* L.). *Soil Science*, 1999, 164(6): 363-375.
- [22] Mendez M O, Maier R M. Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments—an emerging remediation technology. *Environmental Health Perspectives*, 2008, 116(3): 278-283.
- [23] Wan X Q, Zhang F, Xia X L, Yin W L. Effects of Cadmium on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of solution-cultured poplar plants. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(6): 73-78.
- [24] Liang W B, Xue S G, Shen J H, Wang P. Effects of manganese stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of *Phytolacca Americana*. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(3): 619-625.
- [25] Hu Z B, Chen Y H, Wang G P, Shen Z G. Effects of copper stress on growth, chlorophyll fluorescence parameters and antioxidant enzyme activities of *Zea mays* seedlings. *Chinese Bulletin of Botany*, 2006, 23(2): 129-137.
- [26] Badger M R, von Caemmerer S, Ruuska S, Nakano H. Electron flow to oxygen in higher plants and algae: rates and control of direct photoreduction (Mehler reaction) and rubisco oxygenase. *Biological Science*, 2000, 355(1402): 1433-1455.
- [27] Clemente R, Walker D J, Roig A, Bernal M P. Heavy metal bioavailability in a soil affected by mineral sulphides contamination following the mine spillage at Aznalcóllar (Spain). *Biodegradation*, 2003, 14(3): 199-205.
- [28] Rosselli W, Keller C, Boschi K. Phytoextraction capacity of trees growing on metal contaminated soil. *Plant and Soil*, 2003, 256(2): 265-272.
- [29] Yoon J, Cao X D, Zhou Q X, Ma L Q. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the Total Environment*, 2006, 368(2/3): 456-464.
- [30] Fitzgerald E J, Carey J M, Nesaratnam S T, McLoughlin P. Copper and lead concentrations in salt marsh plants on the Suir Estuary, Ireland. *Environmental Pollution*, 2003, 123(1): 67-74.

参考文献:

- [15] 聂俊华, 刘秀梅, 王庆仁. Pb 超富集植物对营养元素 N、P、K 的响应. *生态环境*, 2004, 13(3): 306-309.
- [16] 隋岩洁, 李政, 陈凌. 酸雨胁迫和 Hg^{2+} 胁迫对黄连木生理影响的研究. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 34(3): 195-198.
- [17] 中华人民共和国环境保护部. GB 15618—1995 土壤环境质量标准. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 农业出版社, 2000.
- [23] 万雪琴, 张帆, 夏新莉, 尹伟伦. 镉处理对杨树光合作用及叶绿素荧光参数的影响. *林业科学*, 2008, 44(6): 73-78.
- [24] 梁文斌, 薛生国, 沈吉红, 王萍. 锰胁迫对垂序商陆光合特性及叶绿素荧光参数的影响. *生态学报*, 2010, 30(3): 619-625.
- [25] 胡筑兵, 陈亚华, 王桂萍, 沈振国. 铜胁迫对玉米幼苗生长、叶绿素荧光参数和抗氧化酶活性的影响. *植物学通报*, 2006, 23(2): 129-137.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 7 April, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Seasonal variation of soil nitrogen pools and microbes under natural evergreen broadleaved forest and its artificial regeneration forests in Southern Sichuan Province, China	GONG Wei, HU Tingxing, WANG Jingyan, et al (1763)
Sensitivity analysis for main factors influencing <i>NPP</i> of forests simulated by IBIS in the eastern area of Northeast China	LIU Xi, GUO Qingxi, LIU Jingwei (1772)
Diurnal changes of photosynthetic characteristics of <i>Hippophae rhamnoides</i> and the relevant environment factors at different slope locations	JIN Tiantian, FU Bojie, LIU Guohua, et al (1783)
Interactive effects of nitrogen and sulfur on the reproduction, biomass accumulation and allocation of the clonal plant <i>Spartina alterniflora</i>	GAN Lin, ZHAO Hui, QING Hua, et al (1794)
Difference in leaf photosynthetic capacity between pima cotton (<i>Gossypium barbadense</i>) and upland cotton (<i>G. hirsutum</i>) and analysis of potential constraints	ZHANG Yali, YAO Hesheng, LUO Yi, et al (1803)
Effects of shades on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of <i>Forsythia suspensa</i>	WANG Jianhua, REN Shifu, SHI Baosheng, et al (1811)
Growth and metal uptake of three woody species in lead/zinc and copper mine tailing	SHI Xiang, CHEN Yitai, WANG Shufeng, et al (1818)
GMP particles size distribution in grains of wheat in relation to application of nitrogen fertilizer	WANG Guangchang, WANG Zhenlin, CUI Zhiqing, et al (1827)
Damaging mechanisms of peanut (<i>Arachis hypogaea</i> L.) photosystems caused by high-temperature and drought under high irradiance	QIN Liqin, ZHANG Yueli, GUO Feng, et al (1835)
The effect of natural factors and disturbance intensity on spacial heterogeneity of plant diversity in alpine meadow	WEN Lu, DONG Shikui, ZHU Lei, et al (1844)
Modeling changes of net primary productivity of karst vegetation in southwestern China using the CASA model	DONG Dan, NI Jian (1855)
The characteristics of <i>Magnolia liliflora</i> transpiration and its impacting factors in Beijing City	WANG Hua, OUYANG Zhiyun, REN Yufen, et al (1867)
Ecological effects of balanced fertilization on red earth paddy soil with P-deficiency	CHEN Jianguo, ZHANG Yangzhu, ZENG Xibai, et al (1877)
Effects of planting patterns on water use efficiency in winter wheat	QI Lin, CHEN Yuhai, ZHOU Xunbo, et al (1888)
Nitrous oxide emissions from winter wheat field in the Loess Plateau	PANG Junzhu, WANG Xiaoke, MU Yujing, et al (1896)
Effects of hardening by pre-anthesis waterlogging on grain yield and quality of post-anthesis waterlogged wheat (<i>Triticum aestivum</i> L. cv Yangmai 9)	LI Chengyong, CAI Jian, JIANG Dong, et al (1904)
Effects of simulated acid rain with lower S/N ratio on gas exchange and membrane of three dominant species in subtropical forests	FENG Lili, YAO Fangfang, WANG Xihua, et al (1911)
Molluscicidal efficacy of <i>Nerium indicum</i> cardiac glycosides on <i>Pomacea canaliculata</i> and its effects on rice seedling	DAI Lingpeng, LUO Weihua, WANG Wanxian (1918)
Spatial gradients pattern of landscapes and their relations with environmental factors in Haihe River basin	ZHAO Zhixuan, ZHANG Biao, JIN Xin, et al (1925)
The assessment of forest ecosystem services evaluation for shrubbery-economic forest-bamboo forest in China	WANG Bing, WEI Jiangsheng, HU Wen (1936)
Evaluation on service value of ecosystem of Peri-urban transition zone lake; a case study of Yandong Lake in Wuhan City	WANG Fengzhen, ZHOU Zhixiang, ZHENG Zhongming (1946)
Explaining the abundance-distribution relationship of plant species with niche breadth and position in the Yellow River Delta	YUAN Xiu, MA Keming, WANG De (1955)
Forestland boundary dynamics based on an landscape accessibility analysis in Guangzhou, China	ZHU Yaojun, WANG Cheng, JIA Baoquan, et al (1962)
Changes in invasion characteristics of <i>Dendroctonus valens</i> after introduction into China	PAN Jie, WANG Tao, WEN Junbao, et al (1970)
Population genetic diversity in Tibet red deer (<i>Cervus elaphus wallichi</i>) revealed by mitochondrial <i>Cyt b</i> gene analysis	LIU Yanhua, ZHANG Minghai (1976)
Multi-scales analysis on diversity of desert rodent communities under different disturbances	YUAN Shuai, WU Xiaodong, FU Heping, et al (1982)
Cave-site selection of Qinling zokors with their prevention and control	LU Qingbin, ZHANG Yang, ZHOU Caiquan (1993)
The habitat characteristics of Eurasian badger in Beijing-Hangzhou Grand Canal embankment	YIN Baofa, LIU Yuqing, LIU Guoxing, et al (2002)
Review and Monograph	
Electron transfer mechanism of extracellular respiration: a review	MA Chen, ZHOU Shungui, ZHUANG Li, et al (2008)
The biochemical mechanism and application of anammox in the wastewater treatment process	WANG Hui, LIU Yanping, TAO Ying, et al (2019)
Discussion	
Evaluation of the forest ecosystem services in Haihe River Basin, China	BAI Yang, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (2029)
Scientific Note	
Effects of body size and salinity on oxygen consumption rate and ammonia excretion rate of <i>Macra chinensis</i> Philippi	ZHAO Wen, WANG Yaqian, WEI Jie, et al (2040)
Study on microzooplankton grazing in shrimp pond among middle and late shrimp culture period	ZHANG Litong, SUN Yao, ZHAO Congming, et al (2046)

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 7 期 (2011 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 7 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