

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第21期 Vol.31 No.21 **2011**

中国生态学会
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 21 期

2011 年 11 月 (半月刊)

目 次

基于景观格局理论和理想风水模式的藏族乡土聚落景观空间解析——以甘肃省迭部县扎尕那村落为例·····	史利莎,严力蛟,黄璐,等 (6305)
武夷山风景名胜区景观生态安全度时空分异规律·····	游巍斌,何东进,巫丽芸,等 (6317)
旅游地道路生态持续性评价——以云南省玉龙县为例·····	蒋依依 (6328)
城市空间形态紧凑度模型构建方法研究·····	赵景柱,宋瑜,石龙宇,等 (6338)
丹顶鹤多尺度生境选择机制——以黄河三角洲自然保护区为例·····	曹铭昌,刘高焕,徐海根 (6344)
西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征·····	凡非得,王克林,熊鹰,等 (6353)
流域尺度海量生态环境数据建库关键技术——以塔里木河流域为例·····	高凡,闫正龙,黄强 (6363)
雌雄异株植物鼠李的生殖分配·····	王娟,张春雨,赵秀海,等 (6371)
长白山北坡不同年龄红松年表及其对气候的响应·····	王晓明,赵秀海,高露双,等 (6378)
不同高寒退化草地阿尔泰针茅种群的小尺度点格局·····	赵成章,任珩,盛亚萍,等 (6388)
残存银杏群落的结构及种群更新特征·····	杨永川,穆建平, TANG Cindy Q, 等 (6396)
濒危植物安徽羽叶报春两种花型的繁育特性及其适应进化·····	邵剑文,张文娟,张小平 (6410)
神农架海拔梯度上 4 种典型森林的乔木叶片功能性状特征·····	罗璐,申国珍,谢宗强,等 (6420)
不同植被恢复模式下煤矸石山复垦土壤性质及煤矸石风化物的变化特征·····	王丽艳,韩有志,张成梁,等 (6429)
火烧对黔中喀斯特山地马尾松林分的影响·····	张喜,崔迎春,朱军,等 (6442)
内蒙古高原锦鸡儿属植物的形态和生理生态适应性·····	马成仓,高玉葆,李清芳,等 (6451)
古尔班通古特沙漠西部梭梭种群退化原因的对比分析·····	司朗明,刘彤,刘斌,等 (6460)
白石砬子国家级自然保护区天然林的自然稀疏·····	周永斌,殷有,殷鸣放,等 (6469)
黑龙江省东完达山地区东北虎猎物种群现状及动态趋势·····	张常智,张明海 (6481)
基于 GIS 的马铃薯甲虫扩散与河流关系研究——以新疆沙湾县为例·····	李超,张智,郭文超,等 (6488)
2010 年广西兴安地区稻纵卷叶螟发生动态及迁飞轨迹分析·····	蒋春先,齐会会,孙明阳,等 (6495)
B 型烟粉虱对寄主转换的适应性·····	周福才,李传明,顾爱祥,等 (6505)
利用 PCR-DGGE 方法分析不同鸡群的盲肠微生物菌群结构变化·····	李永洙, Yongquan Cui (6513)
鸡粪改良铜尾矿对 3 种豆科植物生长及基质微生物量和酶活性的影响·····	张宏,沈章军,阳贵德,等 (6522)
铜绿微囊藻对紫外辐射的生理代谢响应·····	汪燕,李珊珊,李建宏,等 (6532)
10 种常见甲藻细胞体积与细胞碳、氮含量的关系·····	王燕,李瑞香,董双林,等 (6540)
冬季太湖表层底泥产毒蓝藻群落结构和种群丰度·····	李大命,孔繁翔,于洋,等 (6551)
城市机动车道颗粒物扩散对绿化隔离带空间结构的响应·····	蔺银鼎,武小刚,郝兴宇,等 (6561)
新疆城镇化与土地资源产出效益的空间分异及其协调性·····	杨宇,刘毅,董雯,等 (6568)
山东潍坊地下水硝酸盐污染现状及 $\delta^{15}\text{N}$ 溯源·····	徐春英,李玉中,李巧珍,等 (6579)
增温对宁夏引黄灌区春小麦生产的影响·····	肖国举,张强,张峰举,等 (6588)
一种估测小麦冠层氮含量的新高光谱指数·····	梁亮,杨敏华,邓凯东,等 (6594)
黄河上游灌区稻田 N_2O 排放特征·····	张惠,杨正礼,罗良国,等 (6606)
专论与综述	
植物源挥发性有机物对氮沉降响应研究展望·····	黄娟,莫江明,孔国辉,等 (6616)
植物种群更新限制——从种子生产到幼树建成·····	李宁,白冰,鲁长虎 (6624)
研究简报	
遮荫对两个基因型玉米叶片解剖结构及光合特性的影响·····	杜成凤,李潮海,刘天学,等 (6633)
学术信息与动态	
科学、系统与可持续性——第六届工业生态学国际大会述评·····	石海佳,梁赛,王震,等 (6641)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 340 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 37 * 2011-11	



封面图说: 鹤立——丹顶鹤是世界 15 种鹤数量极小的一种,主要栖息在沼泽、浅滩、芦苇塘等湿地,以捕食小鱼虾、昆虫、蛙蚺、软体动物为主,也吃植物的根茎、种子、嫩芽。善于奔驰飞翔,喜欢结群生活。丹顶鹤属迁徙鸟类,主要在我国的黑龙江、吉林、俄罗斯西伯利亚东部、朝鲜北部以及日本等地繁殖。在长江下游一带越冬。在中国文化中有“仙鹤”之说。被列为中国国家一级重点保护野生动物名录,濒危野生动植物种国际贸易公约绝对保护的 CITES 附录一物种名录。

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

张宏,沈章军,阳贵德,安宗胜,孙庆业. 鸡粪改良铜尾矿对 3 种豆科植物生长及基质微生物量和酶活性的影响. 生态学报, 2011, 31 (21): 6522-6531.

Zhang H, Shen Z J, Yang G D, An Z S, Sun Q Y. Effect of chicken manure-amended copper mine tailings on growth of three leguminous species, soil microbial biomass and enzyme activities. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (21): 6522-6531.

鸡粪改良铜尾矿对 3 种豆科植物生长 及基质微生物量和酶活性的影响

张 宏^{1,2}, 沈章军^{1,3}, 阳贵德¹, 安宗胜¹, 孙庆业^{1,*}

(1. 安徽大学生命科学学院 安徽省生态工程与生物技术重点实验室, 合肥 230039;

2. 江苏电大昆山学院, 苏州 215300; 3. 合肥师范学院生命科学系, 合肥 230061)

摘要: 基质改良和耐性植物种选择是重金属矿业废弃地人工生态恢复的关键。通过室内盆栽试验研究不同比例腐熟鸡粪改良铜尾矿后对 3 种豆科植物决明 (*Cassia tora*)、田菁 (*Sesbania cannabina*)、菥蓂 (*Crotalaria juncea*) 生长和尾矿基质中土壤微生物量 C、N 及过氧化氢酶、碱性磷酸酶、脲酶和脱氢酶活性的影响。结果表明: 添加鸡粪改良处理后 3 种植物茎叶生物量、根系生物量和体内总磷含量均有提高, 植物体内总氮含量则只有菥蓂明显增加。添加鸡粪可提高尾矿基质中微生物量 C 以及脲酶和脱氢酶活性, 其中菥蓂生长的尾矿基质中微生物量 C 含量增加最显著。尾矿基质中微生物量 C 与基质中总氮、有效磷呈显著正相关, 菥蓂生长的尾矿基质中微生物量 C 与基质中有效态 Cu、Zn 呈显著负相关。田菁、菥蓂生长的尾矿基质中脲酶、脱氢酶与基质中总氮、有效磷呈显著正相关, 决明、菥蓂生长的尾矿基质中脱氢酶与基质中微生物量 C 呈显著正相关, 决明生长的尾矿基质中脲酶、脱氢酶与基质中有效态 Zn 呈显著负相关。综合分析表明, 铜尾矿: 鸡粪 = 250:1 的处理方式可作为鸡粪改良铜尾矿基质较好的一种比例模式, 该处理方式下菥蓂可作为铜尾矿生态修复优选植物种。

关键词: 铜尾矿; 基质改良; 豆科植物; 生态修复

Effect of chicken manure-amended copper mine tailings on growth of three leguminous species, soil microbial biomass and enzyme activities

ZHANG Hong^{1,2}, SHEN Zhangjun^{1,3}, YANG Guide¹, AN Zongsheng¹, SUN Qingye^{1,*}

1 Anhui Key Laboratory of Ecological Engineering and Biotechnology, School of Life Sciences, Anhui University, Hefei 230039, China

2 Kunshan Academy, Jiangsu Radio and Television University, Suzhou 215300, China

3 School of Life Sciences, Hefei Normal University, Hefei 230061, China

Abstract: Substrate amendment and tolerant species choice are key factors for successful restoration of mining wastelands containing heavy metals. Pot experiments were conducted in order to study the effects of different proportions of composted chicken manure-amended copper mine tailings on growth of three legumes (*Cassia tora*, *Sesbania cannabina* and *Crotalaria juncea*), soil microbial biomass, and activities of catalase, alkaline phosphatase, urease and dehydrogenase. A quantity of composted chicken manure (0, 8, 16, or 32 g) was incorporated with 4 kg mine tailings as the plants' potting substrate for the MA0 (CK), MA8, MA16, and MA32 treatments, respectively. Soil microbes are important components for maintenance of soil biological activity and affect the soil nutrient dynamics, energy conversion, and animal and plant community structure. The activity of soil enzymes is an important index of soil fertility and is often used to indicate remediation effects on polluted soils. In this study, with increasing proportion of chicken manure in the substrate, the shoot

基金项目: 环保公益性行业科研专项 (201009041-02); 国家高技术研究发展计划 (863) 资助项目 (2006AA06Z359)

收稿日期: 2010-11-25; **修订日期:** 2011-05-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunqingye@ahu.edu.cn

biomass and root biomass of the three plant species increased. In the same chicken manure treatment, the relative shoot biomass of the three species was *C. juncea* > *C. tora* > *S. cannabina*, but the root biomass did not differ significantly among the species. With increasing proportion of chicken manure, the total phosphorus content of the three plant species increased, and the total nitrogen content of *C. juncea* increased. The relative total nitrogen content in both the roots and shoots of the three plant species was *C. juncea* > *S. cannabina* > *C. tora* in the MA16 and MA32 treatments, the relative total phosphorus content in the roots was *S. cannabina* > *C. juncea* > *C. tora* in the MA8 and MA32 treatments, and the relative total phosphorus content in the shoots was *S. cannabina* > *C. tora* > *C. juncea* in the MA8 and MA32 treatments. The soil microbial biomass carbon for the three plant species was boosted by amendment with chicken manure. Among the species, the soil microbial biomass carbon of *C. juncea* was significantly improved compared to the control (chicken manure absent; CK) ($P < 0.05$). In the MA32 treatment, the soil microbial biomass carbon for *C. juncea* was 177.56 mg/kg, and the soil microbial biomass nitrogen of *C. juncea* was 9.08 mg/kg. The soil urease and dehydrogenase activities for the three legumes were boosted by amendment with chicken manure and were highest in the MA32 treatment. Of the three species, the soil urease activity of *C. juncea* reached $1.52 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, and the soil dehydrogenase activity of *C. tora* reached $0.26 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. Significant positive correlations existed between soil microbial biomass carbon and substrate total nitrogen and available phosphorus. Significant negative correlations existed between soil microbial biomass carbon and substrate available copper and zinc for *C. juncea*. Significant positive correlations existed between soil urease and dehydrogenase activities and substrate total nitrogen and available phosphorus with growth of *S. cannabina* and *C. juncea*, and between soil dehydrogenase activities and soil microbial biomass carbon with growth of *C. tora* and *C. juncea*. Significant negative correlations existed between soil urease and dehydrogenase activities and substrate available zinc with growth of *C. tora*. These findings indicate that the MA16 treatment (an amendment rate of 250 parts tailings to 1 part chicken manure) is a suitable method for chicken manure amendment of copper mine tailings, and *Crotalaria juncea* might be a preferred plant for ecological restoration of copper mine tailings using such treatment.

Key Words: copper tailings; chicken manure amendment; leguminous plants; ecological restoration

铜尾矿废弃地一般具有非常严酷的基质条件,如物理性质不良(极端的水湿条件和温度变化等)、贫瘠(有机质、N 含量极低或无)、极端的 pH 值,土壤微生物含量和多样性极低,土壤酶活性极低,有些矿业废弃地还含有较高的盐分或高浓度的有害物质(如重金属等),不利于植物生长和定居^[1-2]。

土壤微生物是维持土壤生物活性的重要组分,影响土壤中养分动态、能量转化以及动植物群落结构,微生物活性和群落结构变化能敏感地反映土壤质量^[3]。土壤酶参与土壤中一切生物化学过程,土壤酶活性易受环境中物理、化学和生物的影响,是评价土壤健康状况的一个重要指标^[4]。

目前,国内外关于铜尾矿废弃地植物生长对土壤微生物量和土壤酶活性影响方面已进行大量研究工作,取得了一定的研究成果^[5-7]。这些研究表明耐受性植物的生长能增加土壤微生物活性,改变土壤微生物群落结构和功能多样性,提高土壤酶活性,改善土壤质量。但关于铜尾矿废弃地基质改良后植物生长对土壤微生物量和土壤酶活性的影响以及它们之间内在关系的研究报道不多。

铜陵是我国六大铜业基地之一,区内堆存了大量矿业废弃物,这些矿业废弃物对当地的生态环境造成严重影响。尾矿废弃地植被重建主要依赖基质的改良与耐性植物的选择^[8]。豆科植物具有固氮作用强、生物量大、经济价值高等优点,是金属尾矿废弃地生态修复的优选物种^[9]。在尾矿中添加富含有机质材料(如污泥、堆肥、禽粪等),改良成本较低、改良效果好^[10-11]。本研究以腐熟鸡粪作为尾矿基质的改良材料,通过室内盆栽本土豆科植物,研究人工添加有机质状态下植物生长状况及其对铜尾矿基质中土壤微生物量和酶活性的影响,以便为铜尾矿废弃地的人工生态修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 盆栽试验

1.1.1 试验材料

铜尾矿取自铜陵杨山冲尾矿库内,该尾矿库于 1991 年闭库,至今已停用近 20 a。弃置后的尾矿裸地表面首先形成以藻类、藓类占优势的隐花植物结皮,而后草本维管植物定居并逐渐形成以白茅群落 (*Imperata cylindrica*)、中华结缕草群落 (*Zoysia sinica*) 及木贼群落 (*Hippochaete ramosissimum*) 为主的自然植物群落,植物覆盖度达到 70% 以上。

尾矿基质基本性质为:pH 值 7.61,氨氮 0.003 g/kg,硝氮 0.091 g/kg,总氮 0.233 g/kg,有效磷 12.70 mg/kg,总磷 5.23 g/kg,有效态铜 35.88 mg/kg,有效态锌 4.49 mg/kg,微生物 C 24.57 mg/kg,微生物 N 20.08 mg/kg,过氧化氢酶 $0.050 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,碱性磷酸酶 $6.382 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,脲酶 $1.318 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,脱氢酶 $0.071 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

鸡粪取自合肥郊区一养鸡场。豆科植物选择决明 (*Cassia tora*)、田菁 (*Sesbania cannabina*)、菽麻 (*Crotalaria juncea*),这 3 种植物在安徽广泛分布或栽培。植物种子来自野外采集。

1.1.2 盆栽方法

尾矿和鸡粪自然风干,均过 2 mm 筛。以 4 kg 尾矿为植物盆栽基质,分别加入腐熟鸡粪 0、8、16、32 g 混匀,记作 MA0(CK)、MA8、MA16、MA32 处理方式,装入直径为 20 cm,深为 30 cm 的塑料花盆中,放置 1 周备用。

将 3 种植物种子用自来水冲洗数次后再用蒸馏水冲洗 3 次,挑去有虫蚀、裂口或成熟度低的种子。播种于盆中,深 0.5—1.0 cm,每盆 30 粒种子,种子萌发后每盆保留 5 株健壮植株,定期浇水。每种处理方式设置 4 个重复,3 种植物共栽植 48 盆。

1.2 样品处理和分析方法

1.2.1 植物样品处理

自播种后生长至第 70 天时,小心将植株与栽培基质分离开,用自来水清洗植株根系 3 次,再用蒸馏水冲洗。80 °C 的烘箱中烘至恒重,称量茎叶生物量和根系生物量,然后将植物体磨碎供测定植物养分使用。

1.2.2 尾矿基质样品的处理

栽培结束后的尾矿基质分为两部分,新鲜土样用于土壤微生物量的测定,风干土样用于基质基本理化性质和土壤酶活性的测定。

1.2.3 分析方法

植物茎叶和根系总氮采用硫酸-高氯酸消解、凯氏定氮法测定,茎叶和根系总磷采用 1,2,4-氨基萘酚磺酸比色法测定^[12]。

尾矿基质基本性质测定:pH 值用 pH 计测定(尾矿_w:水_v=1g:5mL);含水量用烘干法测定;总氮、有效磷分别采用高氯酸-硫酸消化凯氏定氮法、碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法测定^[12],有效态重金属 Cu、Zn 的测定采用醋酸铵提取,ICP-AES 测定^[13]。

尾矿基质土壤微生物量 C、N 采用氯仿熏蒸,0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提,浸提液中的有机 C 采用重铬酸钾氧化-硫酸亚铁滴定法,全 N 采用凯氏定氮法测定^[14];微生物量 C、N 的计算按照 Turner 等的方法^[15]。

基质土壤酶活性的测定^[16]:过氧化氢酶的测定采用高锰酸钾滴定法,活性以 $0.1 \text{ mol/L KMnO}_4 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 表示;碱性磷酸酶的测定采用对硝基苯磷酸钠比色法,活性以 $p\text{-nitrophenol } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 表示;脲酶的测定采用靛酚蓝比色法,活性以 $\text{NH}_4^+\text{-N } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 表示;脱氢酶的测定采用 TTC 比色法,活性以 triphenylformazan (TPF) $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 表示。

1.3 数据的处理和分析

数据用 SPSS13.0 软件处理,其中 One-way ANOVA (Duncan's multiple range test) 被用于方差分析与多重

比较;Pearson 相关系数用于表示双变量相关性。

2 结果与分析

2.1 鸡粪改良处理对豆科植物生物量的影响

鸡粪改良尾矿基质对 3 种豆科植物茎叶生物量、根系生物量的影响见图 1。添加鸡粪改良处理后,决明、田菁和菽麻茎叶生物量分别是未添加鸡粪处理的 2.53—5.11 倍、6.20—13.99 倍和 3.71—4.89 倍;根系生物量分别是未添加鸡粪处理的 1.95—4.71 倍、4.50—10.28 倍和 2.44—2.69 倍。统计分析表明,除了 MA8 处理时决明茎叶生物量、根系生物量与未添加鸡粪处理组(CK)无显著差异($P>0.05$)外,其余各鸡粪处理组茎叶生物量、根系生物量均与未添加鸡粪处理组(CK)有显著差异($P<0.05$)(图 1)。

在同一鸡粪比例处理方式中,茎叶生物量均表现为菽麻>决明>田菁,但 3 种植物根系生物量的差异性并不明显。其中,随着鸡粪比例增加菽麻茎叶生物量变化最为明显。

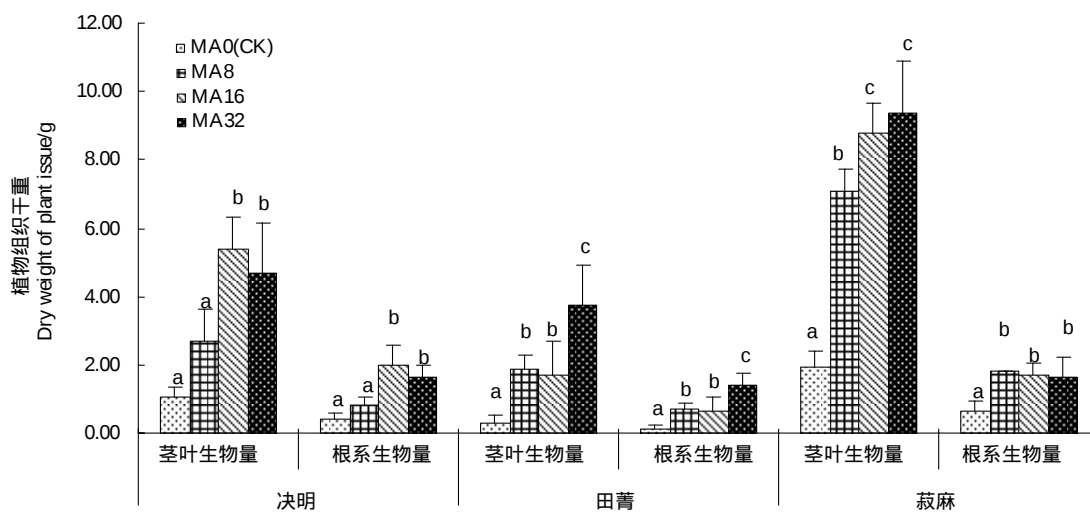


图 1 3 种豆科植物干重

Fig. 1 Dry matter of 3 leguminous species

图中不同小写字母表示差异达 0.05 显著水平; MA0(CK) 4 kg 尾矿:0 g 鸡粪, MA8 4 kg 尾矿:8 g 鸡粪, MA16 4 kg 尾矿:16 g 鸡粪, MA32 4 kg 尾矿:32 g 鸡粪

2.2 鸡粪改良处理对豆科植物体内氮、磷含量的影响

从表 1 可以看出,添加鸡粪改良处理后,菽麻根系总氮、茎叶总氮含量分别是未添加鸡粪处理的 0.98—1.43 倍和 1.34—1.68 倍。统计分析表明,除了 MA8 处理时菽麻根系总氮与未添加鸡粪处理组(CK)无显著差异($P>0.05$)外,其余各鸡粪处理组菽麻根系总氮、茎叶总氮均与未添加鸡粪处理组(CK)有显著差异($P<0.05$)。但决明和田菁各鸡粪处理组根系总氮、茎叶总氮均与未添加鸡粪处理组(CK)无显著差异($P>0.05$)。

添加鸡粪改良处理后,植物根系总磷、茎叶总磷含量分别表现为:决明是未添加鸡粪处理的 2.13—3.10 倍和 1.50—3.11 倍;田菁是未添加鸡粪处理的 2.51—3.98 倍和 3.22—3.92 倍;菽麻是未添加鸡粪处理的 2.22—3.39 倍和 2.07—3.55 倍。统计分析表明,除了 MA8 处理时决明根系总磷与未添加鸡粪处理组(CK)无显著差异($P>0.05$)和 MA16 处理时决明茎叶总磷与未添加鸡粪处理组(CK)无显著差异($P>0.05$)外,其余各鸡粪处理组根系总磷、茎叶总磷均与未添加鸡粪处理组(CK)有显著差异($P<0.05$)。

从表 1 还可看出,在同一鸡粪比例处理方式中,3 种植物根系总氮和茎叶总氮含量,除 MA8 处理时田菁茎叶总氮含量小于决明外,其余均表现为菽麻>田菁>决明;根系总磷含量,除 MA16 处理时菽麻小于决明外,其余均表现为田菁>菽麻>决明;茎叶总磷含量,除 MA16 处理时决明小于菽麻外,其余均表现为田菁>决明>菽麻。

2.3 鸡粪改良处理栽种豆科植物后对尾矿基质微生物量 C、N 影响

表 2 表明,添加鸡粪改良处理栽种 3 种豆科植物能提高尾矿基质中微生物量 C 含量。添加鸡粪改良处理后,栽培决明的尾矿基质中微生物量 C 是未添加鸡粪处理的 1.45—2.36 倍;栽培田菁的尾矿基质中微生物量 C 是未添加鸡粪处理的 1.11—1.81 倍,微生物量 N 是未添加鸡粪处理的 1.39—2.65 倍;栽培菽麻的尾矿基质中微生物量 C 是未添加鸡粪处理的 2.32—3.62 倍,微生物量 N 是未添加鸡粪处理的 0.97—3.44 倍。统计分析表明,决明 MA16、MA32 处理组尾矿基质中微生物量 C 含量与未添加鸡粪处理组(CK)有显著差异($P<0.05$),菽麻 3 种鸡粪处理组尾矿基质中微生物量 C 含量均与未添加鸡粪处理组(CK)有显著差异($P<0.05$),菽麻 MA8、MA32 处理组尾矿基质中微生物量 N 含量与未添加鸡粪处理组(CK)有显著差异($P<0.05$)。其余各鸡粪处理组尾矿基质中微生物量 C、N 含量均与未添加鸡粪处理组(CK)无显著差异($P>0.05$)。

表 1 3 种豆科植物体内总氮、总磷含量

Table 1 Total nitrogen and total phosphorus of three legume species (mean $\pm$ SD, $n=4$)

植物 Plants	处理 Treatments	根系总氮 Total nitrogen in root /(g/kg)	茎叶总氮 Total nitrogen in shoot /(g/kg)	根系总磷 Total phosphorus in root /(g/kg)	茎叶总磷 Total phosphorus in shoot /(g/kg)
决明 <i>C. tora</i>	MA0(CK)	11.78 $\pm$ 3.22aA	13.57 $\pm$ 1.81aA	2.10 $\pm$ 0.59aA	1.48 $\pm$ 0.33aA
	MA8	6.70 $\pm$ 1.03aA	13.57 $\pm$ 2.45aA	4.47 $\pm$ 0.44abA	2.90 $\pm$ 0.51bA
	MA16	7.05 $\pm$ 0.35aA	13.93 $\pm$ 4.18aA	6.42 $\pm$ 2.95bA	2.22 $\pm$ 0.29abA
	MA32	11.16 $\pm$ 3.80abA	14.57 $\pm$ 1.95aA	6.52 $\pm$ 2.66bA	4.61 $\pm$ 1.30cAB
田菁 <i>S. cannabina</i>	MA0(CK)	11.36 $\pm$ 4.23aA	16.26 $\pm$ 6.13aA	2.72 $\pm$ 0.14aA	1.60 $\pm$ 0.41aA
	MA8	9.76 $\pm$ 2.33aB	9.44 $\pm$ 2.94aB	8.71 $\pm$ 2.83bB	5.45 $\pm$ 0.88bB
	MA16	8.91 $\pm$ 3.22aA	14.92 $\pm$ 6.14aA	6.84 $\pm$ 2.39bA	5.15 $\pm$ 1.54bB
	MA32	12.82 $\pm$ 2.01aAB	17.37 $\pm$ 8.48aAB	10.83 $\pm$ 2.33bB	6.27 $\pm$ 2.00bB
菽麻 <i>C. juncea</i>	MA0(CK)	11.98 $\pm$ 3.03aA	14.75 $\pm$ 2.20aA	2.39 $\pm$ 0.72aA	1.07 $\pm$ 0.23aA
	MA8	11.77 $\pm$ 2.03aB	19.82 $\pm$ 2.15bC	5.30 $\pm$ 0.82bA	2.21 $\pm$ 0.30bA
	MA16	16.80 $\pm$ 2.08bB	26.03 $\pm$ 2.91cB	6.00 $\pm$ 1.32bA	3.19 $\pm$ 0.83bcA
	MA32	17.11 $\pm$ 1.93bB	24.77 $\pm$ 4.91bcB	8.10 $\pm$ 1.10cAB	3.80 $\pm$ 0.89cA

表中同列内不同小写字母表示同一植物各处理间的差异达 0.05 显著水平,同列内不同大写字母表示同一处理各植物间的差异达 0.05 显著水平

从表 2 还可看出,MA32 处理时,菽麻尾矿基质中微生物量 C 达到 177.56 mg/kg,与决明和田菁尾矿基质中微生物量 C 间的差异性显著($P<0.05$),分别是决明、田菁尾矿基质中微生物量 C 的 1.48、1.51 倍;菽麻尾矿基质中微生物 N 量相对也最高,达到 9.08 mg/kg,分别是决明、田菁尾矿基质中微生物 N 的 2.38、1.35 倍。

表 2 不同改良方式下尾矿基质微生物量 C、N 变化

Table 2 Changes of substrate microbial biomass C and N under different amendments (mean $\pm$ SD, $n=4$)

植物 Plants	处理 Treatments	微生物量 C Microbial biomass C /(mg/kg)	微生物量 N Microbial biomass N /(mg/kg)
决明 <i>C. tora</i>	MA0(CK)	54.60 $\pm$ 23.62aA	6.03 $\pm$ 3.10aA
	MA8	79.19 $\pm$ 11.92aAB	4.08 $\pm$ 1.78aA
	MA16	128.82 $\pm$ 22.62bA	5.75 $\pm$ 1.68aA
	MA32	120.09 $\pm$ 24.61bA	3.81 $\pm$ 3.72aA
田菁 <i>S. cannabina</i>	MA0(CK)	64.65 $\pm$ 29.43aA	2.54 $\pm$ 2.30aA
	MA8	71.77 $\pm$ 10.42aA	3.52 $\pm$ 1.04aA
	MA16	97.82 $\pm$ 51.81aA	5.67 $\pm$ 6.39aA
	MA32	117.29 $\pm$ 42.91aA	6.74 $\pm$ 3.83aA
菽麻 <i>C. juncea</i>	MA0(CK)	49.05 $\pm$ 13.15aA	3.19 $\pm$ 2.38aA
	MA8	114.03 $\pm$ 35.19bB	10.98 $\pm$ 2.99bB
	MA16	122.69 $\pm$ 6.49bA	3.08 $\pm$ 0.46aA
	MA32	177.56 $\pm$ 29.14cB	9.08 $\pm$ 2.73bA

表 3 为栽培结束后尾矿基质基本化学性质。相关分析表明,决明($r=0.902, P<0.01$)、田菁($r=0.707, P<0.01$)、菽麻($r=0.780, P<0.01$)尾矿基质中微生物量 C 与尾矿基质中总氮均呈极显著正相关,且田菁尾矿基质中微生物量 N 与尾矿基质中总氮呈显著正相关($r=0.515, P<0.05$);决明($r=0.727, P<0.01$)、田菁($r=0.541, P<0.05$)、菽麻($r=0.740, P<0.01$)尾矿基质中微生物量 C 与尾矿基质中有效磷呈显著或极显著正相关。

菽麻尾矿基质中微生物量 C 与尾矿基质中有效态 Cu($r=-0.649, P<0.01$)、有效态 Zn($r=-0.621, P<0.05$)呈显著或极显著负相关。

表 3 不同改良方式下尾矿基质的基本化学性质

Table 3 The effects of different amendments on substrate chemical properties (mean $\pm$ SD, $n=4$)

植物 Plants	基质性质 Substrate properties	MA0(CK)	MA8	MA16	MA32
决明 <i>C. tora</i>	pH 值	8.31 $\pm$ 0.13	7.83 $\pm$ 0.27	7.72 $\pm$ 0.13	7.85 $\pm$ 0.19
	总氮/(g/kg)	0.27 $\pm$ 0.09	0.36 $\pm$ 0.02	0.50 $\pm$ 0.08	0.46 $\pm$ 0.11
	有效磷/(mg/kg)	5.82 $\pm$ 4.36	25.93 $\pm$ 7.99	51.50 $\pm$ 8.01	118.51 $\pm$ 26.99
	有效态铜/(mg/kg)	21.84 $\pm$ 2.30	22.22 $\pm$ 1.00	20.17 $\pm$ 2.38	24.69 $\pm$ 2.28
	有效态锌/(mg/kg)	8.90 $\pm$ 1.23	9.30 $\pm$ 0.44	6.61 $\pm$ 2.90	3.86 $\pm$ 0.38
田菁 <i>S. cannabina</i>	pH 值	8.13 $\pm$ 0.15	8.27 $\pm$ 0.32	7.73 $\pm$ 0.17	8.30 $\pm$ 0.12
	总氮/(g/kg)	0.29 $\pm$ 0.07	0.26 $\pm$ 0.08	0.47 $\pm$ 0.08	0.52 $\pm$ 0.09
	有效磷/(mg/kg)	7.41 $\pm$ 6.35	26.98 $\pm$ 8.87	43.38 $\pm$ 11.66	85.18 $\pm$ 20.33
	有效态铜/(mg/kg)	16.09 $\pm$ 4.05	17.40 $\pm$ 2.02	16.81 $\pm$ 1.84	15.50 $\pm$ 2.15
	有效态锌/(mg/kg)	7.90 $\pm$ 1.97	8.44 $\pm$ 0.94	7.90 $\pm$ 0.88	6.67 $\pm$ 1.09
菽麻 <i>C. juncea</i>	pH 值	7.71 $\pm$ 0.15	7.80 $\pm$ 0.12	8.07 $\pm$ 0.20	8.18 $\pm$ 0.22
	总氮/(g/kg)	0.27 $\pm$ 0.05	0.34 $\pm$ 0.05	0.49 $\pm$ 0.13	0.76 $\pm$ 0.22
	有效磷/(mg/kg)	5.29 $\pm$ 2.73	22.75 $\pm$ 10.42	53.97 $\pm$ 14.41	134.91 $\pm$ 42.90
	有效态铜/(mg/kg)	32.11 $\pm$ 4.73	30.32 $\pm$ 2.34	22.42 $\pm$ 0.44	24.36 $\pm$ 2.64
	有效态锌/(mg/kg)	4.53 $\pm$ 0.55	4.39 $\pm$ 0.19	3.31 $\pm$ 0.12	3.61 $\pm$ 0.43

2.4 鸡粪改良处理栽种豆科植物后对尾矿基质酶活性影响

表 4 表明,添加鸡粪改良处理后,栽培决明的尾矿基质中脲酶、脱氢酶活性分别是未添加鸡粪处理的 0.95—2.04 倍和 1.00—2.36 倍;栽培田菁的尾矿基质中脲酶、脱氢酶活性分别是未添加鸡粪处理的 1.17—2.06 倍和 1.25—2.00 倍;栽培菽麻的尾矿基质中脲酶、脱氢酶活性分别是未添加鸡粪处理的 1.01—2.11 倍和 1.10—1.90 倍。统计分析表明,仅 MA32 处理组 3 种植物尾矿基质中脲酶、脱氢酶活性与未添加鸡粪处理组(CK)有显著差异($P<0.05$)。另外,决明 MA16 处理组尾矿基质中过氧化氢酶活性与未添加鸡粪处理组(CK)有显著差异($P<0.05$),其余各鸡粪处理组尾矿基质中过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性均与未添加鸡粪处理组(CK)无显著差异($P>0.05$)。

从表 4 还可以看出,MA32 处理时 3 种豆科植物尾矿基质中脲酶、脱氢酶活性均达到最大值。其中菽麻尾矿基质中脲酶活性相对最大,为 1.52 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,分别是决明、田菁的 1.01、1.39 倍。脱氢酶活性则是决明尾矿基质中最大,为 0.26 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,分别是菽麻、田菁的 1.37、1.63 倍。

相关分析表明,决明尾矿基质中过氧化氢酶($r=0.546, P<0.05$)、脲酶($r=0.550, P<0.05$),田菁尾矿基质中脲酶($r=0.533, P<0.05$)、脱氢酶($r=0.621, P<0.05$),菽麻尾矿基质中脲酶($r=0.498, P<0.05$)、脱氢酶($r=0.854, P<0.01$)均与尾矿基质中总氮呈显著或极显著相关。决明尾矿基质中脲酶($r=0.668, P<0.01$)、脱氢酶($r=0.852, P<0.01$),田菁尾矿基质中脲酶($r=0.705, P<0.01$)、脱氢酶($r=0.498, P<0.05$),菽麻尾矿基质中脲酶($r=0.900, P<0.01$)、脱氢酶($r=0.671, P<0.01$)均与尾矿基质中有效磷呈显著或极显著相关。

决明尾矿基质中过氧化氢酶($r=0.558, P<0.05$)、脱氢酶($r=0.538, P<0.05$)与尾矿基质中微生物量 C

均呈显著相关,菽麻尾矿基质中脱氢酶与尾矿基质中微生物量 $C(r=0.644, P<0.01)$ 呈极显著相关。

决明尾矿基质中脲酶($r=-0.544, P<0.05$)、脱氢酶($r=-0.644, P<0.01$)与尾矿基质中有效态 Zn 呈显著或极显著负相关。

表 4 不同改良方式下尾矿基质酶活性变化
Table 4 Changes of substrate enzyme activities under different amendments (mean±SD, n=4)

植物 Plants	处理 Treatments	过氧化氢酶 Catalase /(ml·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase /(μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	脲酶 Urease /(μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	脱氢酶 Dehydrogenase /(μg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)
决明 <i>C. tora</i>	MA0(CK)	0.03±0.01aA	7.62±0.58aA	0.74±0.18aB	0.11±0.02aA
	MA8	0.04±0.01abA	8.02±2.37aA	0.70±0.16aA	0.11±0.04aA
	MA16	0.05±0.02bA	7.36±2.13aA	0.99±0.47aA	0.11±0.01aA
	MA32	0.04±0.01abA	8.56±1.35aA	1.51±0.37bA	0.26±0.11bA
田菁 <i>S. cannabina</i>	MA0(CK)	0.05±0.01aB	8.56±1.28aA	0.53±0.07aA	0.08±0.05aA
	MA8	0.04±0.00aA	8.07±1.15aA	0.62±0.11aA	0.10±0.05abA
	MA16	0.04±0.01aA	8.66±2.58aA	0.72±0.11aA	0.12±0.03abA
	MA32	0.04±0.01aA	7.92±0.63aA	1.09±0.42bA	0.16±0.05bA
菽麻 <i>C. juncea</i>	MA0(CK)	0.04±0.01abB	8.58±1.32aA	0.72±0.09aAB	0.10±0.04aA
	MA8	0.04±0.01abA	10.43±3.64aA	0.74±0.09aA	0.11±0.01aA
	MA16	0.04±0.01aA	7.63±0.27aA	0.73±0.09aA	0.14±0.01abA
	MA32	0.05±0.00bA	8.92±0.74aA	1.52±0.53bA	0.19±0.06bA

3 讨论

铜尾矿基质中除了 Cu 等重金属会对植物的生长产生严重毒害外,N、P、K 等养分的缺乏也对植物的生长产生不利影响^[5]。正常情况下,只有少数耐性较强的植物才能在其上成活定居。Sebastiani 等^[17]研究证明,以工业有机废弃物作为改良措施,能促进植物生长,显著提升植物茎叶生物量和根系生物量。在本研究中,鸡粪改良铜尾矿基质后,决明、田菁、菽麻 3 种豆科植物均能够在铜尾矿基质上萌发、生长,且茎叶生物量和根系生物量均有提高(图 1),其中菽麻生物量随基质改良变化远较决明、田菁明显。生物量越大,植物体的盖度越大,返回土壤中的有机质越多,基质理化性质改善越明显,复垦的效果就越理想^[18]。所以从 3 种植物的生物量来看,菽麻可作为铜尾矿复垦优先选择的物种。

在本研究中,鸡粪改良尾矿基质后,植物体内总氮含量只有菽麻明显增加(表 1)。豆科植物本身具有很好的固氮能力,但基质中过量的铜元素对植物的固氮作用及植物体内不同形态氮的含量产生影响^[19],这可能与过量铜元素损害了植物的根系,影响根瘤的数量与形态及其固氮能力等,从而干扰了其正常固氮过程有关^[20]。本次栽培试验发现,决明和田菁根部无显著根瘤,但菽麻根系上的根瘤数量和体积则随着鸡粪添加量的增加而明显增加,这可能是鸡粪改良能显著增加菽麻体内氮含量的主要原因。

土壤微生物种群大小、活性与土壤有机质以及养分含量具有直接的相关性^[21]。本研究中鸡粪改良尾矿基质栽种 3 种豆科植物能提高尾矿基质中微生物量 C(表 2),且尾矿基质中微生物量 C 与尾矿基质中总氮、有效磷呈显著正相关。这可能有两方面原因:一是鸡粪中富含 N、P 等营养元素,添加鸡粪能提升尾矿基质中总氮、有效磷和其它养分供给,可为土壤微生物提供大量的能源和碳源,促进土壤微生物增殖,提高土壤微生物活性^[22-23];二是随着植物生长,根系分泌物改变了尾矿基质的养分环境,从而影响土壤微生物的生长和多样性^[24]。本试验所采用的 3 种豆科植物中,鸡粪改良后菽麻尾矿基质中总氮、有效磷含量增加最显著(表 3),尾矿基质中微生物量 C、N 随鸡粪改良变化远较决明、田菁明显,也进一步说明菽麻可作为铜尾矿复垦首选物种。同时研究发现,菽麻尾矿基质中微生物量 C 与尾矿基质中有效态 Cu、Zn 呈显著负相关,一方面可能是因为 Cu、Zn 等重金属污染影响微生物的细胞代谢及微生物的功能,使微生物种群大小发生改变,微生物量下降^[25];另一方面可能是因为铜等重金属毒性使植物根系生长受到抑制,从而对根际微生物生长产生

影响^[26-27]。

土壤酶主要是来自土壤微生物、土壤动物和植物根系的生物活性物质^[28],土壤酶活性高低不仅和土壤养分状况有关,而且和土壤微生物活动状况有关^[29]。本研究发现鸡粪改良尾矿基质裁种植物后尾矿中脲酶、脱氢酶活性增加(表 4),且田菁、菽麻尾矿基质中脲酶、脱氢酶活性与尾矿基质中总氮、有效磷相关性显著,决明、菽麻尾矿基质中脱氢酶活性与尾矿基质中微生物量 C 相关性显著,表明土壤养分水平越高,微生物量越大,脲酶活性、脱氢酶活性也越大,这与陈政等^[30]研究结果相一致。脲酶活性强度与土壤 N 素供应水平密切相关,脱氢酶活性则与微生物活动强度密切相关^[31],脲酶、脱氢酶可以作为检测土壤环境质量的一种较好指标。王蔚等^[32]对铜尾矿废弃地研究发现,不同植物群落对尾矿中土壤酶活性影响有很大差异,但在本研究中,同一鸡粪比例改良处理方式下,3 种豆科植物尾矿基质中酶活性变化差异性不显著,这可能与本研究所采用的 3 种植物均为豆科植物有关。本研究还发现,决明尾矿基质中脲酶、脱氢酶活性与尾矿基质中有效态 Zn 呈显著负相关。刘登义等^[33]、滕应等^[34]对铜尾矿区研究也表明,土壤酶活性与重金属污染程度呈显著负相关,其中脲酶和脱氢酶活性负相关最显著。其作用机理可能因酶分子中的活性部位—巯基和含咪唑的配位结合,形成较稳定的络合物,产生了与底物的竞争性抑制作用^[35]。也可能是由于重金属抑制了土壤微生物的生长和繁殖,减少了微生物体内酶的合成和分泌,最后导致土壤酶活性下降^[36]。

综上所述,鸡粪改良铜尾矿基质能促进 3 种豆科植物生长,提高基质中微生物量 C 及脲酶和脱氢酶活性。相对于 MA32 处理,MA16 处理(铜尾矿:鸡粪=250:1)既有改良效果,又能降低实践中的工作量,可作为鸡粪改良铜尾矿基质较好的一种比例模式,该处理方式下菽麻可作为铜尾矿生态修复优先选择植物种。

References:

- [1] Chen Y Q, Ren G J, An S Q, Sun Q Y, Liu C H, Shuang J L. Changes of bacterial community structure in copper mine tailings after colonization of reed (*Phragmites communis*). *Pedosphere*, 2008, 18(6): 731-740.
- [2] Conesa H M, Robinson B H, Schulin R, Nowack B. Growth of *Lygeum spartum* in acid mine tailings: response of plants developed from seedlings, rhizomes and at field conditions. *Environmental Pollution*, 2007, 145(3): 700-707.
- [3] Shang W Q, Zhu L P, Sun Q Y, Yang L Z. The changes of soil microbes of tailings wastelands in processes of restoration of natural ecology. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2): 713-717.
- [4] Dussault M, Bécaert V, François M, Sauvé S, Deschênes L. Effect of copper on soil functional stability measured by relative soil stability index (RSSI) based on two enzyme activities. *Chemosphere*, 2008, 72(5): 755-762.
- [5] Teng Y, Luo Y M, Huang C Y, Long J, Li Z G, Christie P. Tolerance of grasses to heavy metals and microbial functional diversity in soils contaminated with copper mine tailings. *Pedosphere*, 2008, 18(3): 363-370.
- [6] Boojar M M A, Goodarzi F. The copper tolerance strategies and the role of antioxidative enzymes in three plants species grown on copper mine. *Chemosphere*, 2007, 67(11): 2138-2147.
- [7] Liu J, Xiong Z T, Li T Y, Huang H. Bioaccumulation and ecophysiological responses to copper stress in two populations of *Rumex dentatus* L. from Cu contaminated and non-contaminated sites. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 52(1): 43-51.
- [8] Tordoff G M, Baker A J M, Willis A J. Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. *Chemosphere*, 2000, 41(1/2): 219-228.
- [9] Ye Z H, Yang Z Y, Chan G Y S, Wong M H. Growth response of *Sesbania rostrata* and *S. cannabina* to sludge-amended lead/zinc mine tailings: a greenhouse study. *Environment International*, 2001, 26(5/6): 449-455.
- [10] Kumar G P, Yadav S K, Thawale P R, Singh S K, Juwarkar A A. Growth of *Jatropha curcas* on heavy metal contaminated soil amended with industrial wastes and *Azotobacter-A* greenhouse study. *Bioresource Technology*, 2008, 99(6): 2078-2082.
- [11] Walker D J, Clemente R, Bernal M P. Contrasting effects of manure and compost on soil pH, heavy metal availability and growth of *Chenopodium album* L. in a soil contaminated by pyritic mine waste. *Chemosphere*, 2004, 57(3): 215-224.
- [12] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Analysis of Soil Physical and Chemical Properties. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1978: 63-67, 136-140, 146-157.
- [13] Lu R K. Soil Agricultural Chemical Analysis Method. Beijing: China's Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [14] Bao S D. Soil Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

- [15] Turner B L, Bristow A W, Haygarth P M. Rapid estimation of microbial biomass in grassland soils by ultra-violet absorbance. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(7/8): 913-919.
- [16] Guan S M. *Soil Enzyme and Research Methods*. Beijing: Agricultural Press, 1986: 274-340.
- [17] Sebastiani L, Scebbia F, Tognetti R. Heavy metal accumulation and growth responses in poplar clones Eridano (*Populus deltoides* × *maximowiczii*) and I-214 (*P. × euramericana*) exposed to industrial waste. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 52(1): 79-88.
- [18] Tian S N, Liu D Y, Peng S L, Sun Q Y, Xia H P. Studies on the adaptation of five legumes species to copper tailings. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2004, 25(3): 138-143.
- [19] Xiong Z T, Liu C, Geng B. Phytotoxic effects of copper on nitrogen metabolism and plant growth in *Brassica pekinensis* Rupr. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, 64(3): 273-280.
- [20] Hang X M, Cao C Y, Yao J D, Gao F F. Effects of copper and cadmium on leguminous plant growth and nutrient uptake. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(11): 2250-2256.
- [21] Leiros M C, Trasar-Cepeda C, Seoane S, Gil-Sotres F. Biochemical properties of acid soils under climax vegetation (Atlantic oakwood) in an area of the European temperate-humid zone (Galicia, NW Spain): general parameters. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(6): 733-745.
- [22] Lu X D, Wang C. An analysis of nutrition constituents of stoved chicken dung. *Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University*, 2003, 15(2): 36-37.
- [23] Wang S P, Zhou G S, Jiang Y, Liu X Y. Effect of incorporating corn residues into soil on nitrogen transformation in soil-plant ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 449-452.
- [24] Long J, Huang C Y, Teng Y, Yao H Y. Resistance to heavy metals by several forage grass and its microbial effects from copper mine tailings. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(1): 159-164.
- [25] Wang X L, XU J M, Yao H Y, Xie Z M. Effects of Cu, Zn, Cd and Pb compound contamination on soil microbial community. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(1): 22-27.
- [26] Wisniewski L, Dickinson N M. Toxicity of copper to *Quercus rober* (English Oak) seedlings from a copper-rich soil. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 50(1): 99-107.
- [27] Kumpiene J, Guerri G, Landi L, Pietramellara G, Nannipieri P, Renella G. Microbial biomass, respiration and enzyme activities after in situ aided phytostabilization of a Pb- and Cu-contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(1): 115-119.
- [28] Aon M A, Colaneri A C. Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physico-chemical properties in an agricultural soil. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18(3): 255-270.
- [29] Reng G J, Sun Q Y, An S Q, Li Y, Li X. Nutrient status and enzyme activities of acidified tailings under different plant communities. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(4): 379-382.
- [30] Chen Z, Yang G D, Sun Q Y. Effects of plant communities on soil microbial biomass and enzyme activities in copper mine tailings dumps. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2189-2193.
- [31] Fu L J, Liu Z R, Yang L. Ecotoxicological effect of Cd-Cu-Pb compound pollution on loquat soil microbe. *Asian Journal of Ecotoxicolog*, 2009, 4(6): 881-888.
- [32] Wang W, Sun Q Y. Changes of soil enzyme activities in the copper mine tailings during natural succession. *Journal of Biology*, 2009, 26(2): 27-30, 47-47.
- [33] Liu D Y, Shen Z J, Yan M, Wang Y B, Li J. Enzyme activities in *Paeonia ostii* rhizosphere and non-rhizosphere soil of Tongling copper mining. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7): 1315-1320.
- [34] Teng Y, Huang C Y, Long J, Yao H Y, Liu F. Enzyme activities in soils contaminated by abandoned copper tailings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1976-1980.
- [35] Sun Q Y, Lan C Y, Yang L Z. Chemical properties of lead-zinc tailings at disposal ground. *Rural Eco-Environment*, 2000, 16(4): 36-39, 44-44.
- [36] He W X, Zhu M E, Zhang Y P. Recent advance in relationship between soil enzymes and heavy metals. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(2): 139-142.

参考文献:

- [3] 尚文勤, 朱利平, 孙庆业, 杨林章. 自然生态恢复过程中尾矿废弃地土壤微生物变化. *生态环境*, 2008, 17(2): 713-717.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 63-67, 136-140, 146-157.

- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986: 274-340.
- [18] 田胜尼, 刘登义, 彭少麟, 孙庆业, 夏汉平. 5 种豆科植物对铜尾矿的适应性研究. 环境科学, 2004, 25(3): 138-143.
- [20] 韩晓姝, 曹成有, 姚金冬, 高菲菲. 铜、镉对三种豆科植物生长及氮磷钾含量的影响. 生态学杂志, 2009, 28(11): 2250-2256.
- [22] 吕绪东, 王纯. 烘干鸡粪营养成分的分析. 黑龙江八一农垦大学学报, 2003, 15(2): 36-37.
- [23] 王淑平, 周广胜, 姜岩, 刘孝义. 添加玉米残体对土壤-植物系统中氮素转化的影响. 应用生态学报, 2004, 15(3): 449-452.
- [24] 龙健, 黄昌勇, 滕应, 姚槐应. 几种牧草对铜尾矿重金属的抗性及其微生物效应. 环境科学学报, 2004, 24(1): 159-164.
- [25] 王秀丽, 徐建民, 姚槐应, 谢正苗. 重金属铜、锌、镉、铅复合污染对土壤环境微生物群落的影响. 环境科学学报, 2003, 23(1): 22-27.
- [29] 任冠举, 孙庆业, 安树青, 李远, 李旭. 不同植物群落下酸化尾矿养分状况及土壤酶活性. 生态学杂志, 2006, 25(4): 379-382.
- [30] 陈政, 阳贵德, 孙庆业. 植物群落对铜尾矿废弃地土壤微生物量和酶活性的影响. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2189-2193.
- [31] 傅丽君, 刘智任, 杨磊. 镉、铜、铅复合污染对枇杷园土壤微生物的生态毒理效应. 生态毒理学报, 2009, 4(6): 881-888.
- [32] 王蔚, 孙庆业. 自然演替过程中铜尾矿土壤酶活性的变化. 生物学杂志. 2009, 26(2): 27-30, 47-47.
- [33] 刘登义, 沈章军, 严密, 王友保, 李晶. 铜陵铜矿区凤丹根际和非根际土壤酶活性. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1315-1320.
- [34] 滕应, 黄昌勇, 龙健, 姚槐应, 刘方. 铜尾矿污染区土壤酶活性研究. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1976-1980.
- [35] 孙庆业, 蓝崇钰, 杨林章. 铅锌尾矿废弃地的化学性质研究. 农村生态环境, 2000, 16(4): 36-39, 44-44.
- [36] 和文祥, 朱铭菽, 张一平. 土壤酶与重金属关系的研究现状. 土壤与环境, 2000, 9(2): 139-142.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 21 November, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Landscape spatial analysis of a traditional tibetan settlement based on landscape pattern theory and feng-shui theory; the case of Zhagana, Diebu, Gansu Province	SHI Lisha, YAN Lijiao, HUANG Lu, et al (6305)
Temporal-spatial differentiation and its change in the landscape ecological security of Wuyishan Scenery District	YOU Weibin, HE Dongjin, WU Liyun, et al (6317)
Evaluation of eco-sustainability of roads in a tourism area; a case study within Yulong County	JIANG Yiyi (6328)
Study on the compactness assessment model of urban spatial form	ZHAO Jingzhu, SONG Yu, SHI Longyu, et al (6338)
A multi-scale analysis of red-crowned crane's habitat selection at the Yellow River Delta Nature Reserve, Shandong, China	CAO Mingchang, LIU Gaohuan, XU Haigen (6344)
Assessment and spatial distribution of water and soil loss in karst regions, southwest China	FAN Feide, WANG Kelin, XIONG Ying, et al (6353)
Construction of an eco-environmental database for watershed-scale data; an example from the Tarim River Basin	GAO Fan, YAN Zhenglong, HUANG Qiang (6363)
Reproductive allocation in dioecious shrub, <i>Rhamnus davurica</i>	WANG Juan, ZHANG Chunyu, ZHAO Xiuhai, et al (6371)
Age-dependent growth responses of <i>Pinus koraiensis</i> to climate in the north slope of Changbai Mountain, North-Eastern China	WANG Xiaoming, ZHAO Xiuhai, GAO Lushuang, et al (6378)
Fine-scale spatial point patterns of <i>Stipa krylovii</i> population in different alpine degraded grasslands	ZHAO Chengzhang, REN Heng, SHENG Yaping, et al (6388)
Community structure and population regeneration in remnant <i>Ginkgo biloba</i> stands	YANG Yongchuan, MU Jianping, TANG Cindy Q., et al (6396)
Reproductive characteristics and adaptive evolution of pin and thrum flowers in endangered species, <i>Primula merrilliana</i>	SHAO Jianwen, ZHANG Wenjuan, ZHANG Xiaoping (6410)
Leaf functional traits of four typical forests along the altitudinal gradients in Mt. Shennongjia	LUO Lu, SHEN Guozhen, XIE Zongqiang, et al (6420)
Reclaimed soil properties and weathered gangue change characteristics under various vegetation types on gangue pile	WANG Liyan, HAN Youzhi, ZHANG Chengliang, et al (6429)
Influence of fire on stands of <i>Pinus massoniana</i> in a karst mountain area of central Guizhou province	ZHANG Xi, CHUI Yingchun, ZHU Jun, et al (6442)
Morphological and physiological adaptation of <i>Caragana</i> species in the Inner Mongolia Plateau	MA Chengcang, GAO Yubao, LI Qingfang, et al (6451)
A comparative study on reasons of degenerated of <i>Haloxylon ammodendron</i> population in the western part of Gurbantunggut desert	SI Langming, LIU Tong, LIU Bin, et al (6460)
Self-thinning of natural broadleaved forests in Baishilazi Nature Reserve ...	ZHOU Yongbin, YIN You, YIN Mingfang, et al (6469)
Population status and dynamic trends of Amur tiger's prey in Eastern Wandashan Mountain, Heilongjiang Province	ZHANG Changzhi, ZHANG Minghai (6481)
The relationship between the occurrence of Colorado Potato Beetle, <i>Leptinotarsa decemlineata</i> , and rivers based on GIS: a case study of Shawan Country	LI Chao, ZHANG Zhi, GUO Wenchao, et al (6488)
Occurrence dynamics and trajectory analysis of <i>Cnaphalocrocis medinalis</i> Guenée in Xing'an Guangxi Municipality in 2010	JIANG Chunxian, QI Huihui, SUN Mingyang, et al (6495)
Adaptability of B-biotype <i>Bemisia tabaci</i> (Gennadius) to Host Shift	ZHOU Fucui, LI Chuanming, GU Aixiang, et al (6505)
Structural change analysis of cecal bacterial flora in different poultry breeds using PCR-DGGE ...	LI Yongzhu, Yongquan Cui (6513)
Effect of chicken manure-amended copper mine tailings on growth of three leguminous species, soil microbial biomass and enzyme activities	ZHANG Hong, SHEN Zhangjun, YANG Guide, et al (6522)
Physiological response of <i>Microcystis</i> to solar UV radiation	WANG Yan, LI Shanshan, LI Jianhong, et al (6532)
Relationship between cell volume and cell carbon and cell nitrogen for ten common dinoflagellates	WANG Yan, LI Ruixiang, DONG Shuanglin, et al (6540)
The community structure and abundance of microcystin-producing cyanobacteria in surface sediment of Lake Taihu in winter	LI Daming, KONG Fanxiang, YU Yang, et al (6551)
Influence of green belt structure on the dispersion of particle pollutants in street canyons	LIN Yinding, WU Xiaogang, HAO Xingyu, et al (6561)
Spatio-temporal variation analysis of urbanization and land use benefit of oasis urban areas in Xinjiang	YANG Yu, LIU Yi, DONG Wen, et al (6568)
Nitrate contamination and source tracing from NO_3^- - $\delta^{15}\text{N}$ in groundwater in Weifang, Shandong Province	XU Chunying, LI Yuzhong, LI Qiaozhen, et al (6579)
The impact of rising temperature on spring wheat production in the Yellow River irrigation region of Ningxia	XIAO Guoju, ZHANG Qiang, ZHANG Fengju, et al (6588)
A new hyperspectral index for the estimation of nitrogen contents of wheat canopy	LIANG Liang, YANG Minhua, DENG Kaidong, et al (6594)
The feature of N_2O emission from a paddy field in irrigation area of the Yellow River	ZHANG Hui, YANG Zhengli, LUO Liangguo, et al (6606)
Review and Monograph	
Research perspective for the effects of nitrogen deposition on biogenic volatile organic compounds	HUANG Juan, MO Jiangming, KONG Guohui, et al (6616)
Recruitment limitation of plant population: from seed production to sapling establishment	LI Ning, BAI Bing, LU Changhu (6624)
Scientific Note	
Response of anatomical structure and photosynthetic characteristics to low light stress in leaves of different maize genotypes	DU Chengfeng, LI Chaohai, LIU Tianxue, et al (6633)

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 21 期 (2011 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 21 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@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.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