

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

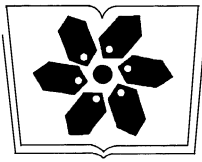
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第18期 Vol.32 No.18 **2012**

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 32 卷 第 18 期

2012 年 9 月 (半月刊)

目 次

亚热带典型树种对模拟酸雨胁迫的高光谱响应.....	时启龙,江 洪,陈 健,等 (5621)
珠江三角洲地面风场的特征及其城市群风道的构建.....	孙 武,王义明,王越雷,等 (5630)
粤北山地常绿阔叶林自然干扰后冠层结构与林下光照动态.....	区余端,苏志尧 (5637)
四种猎物对南方小花蝽生长发育和繁殖的影响.....	张昌容,鄧军锐,莫利锋 (5646)
普洱季风常绿阔叶林次生演替中木本植物幼苗更新特征.....	李帅锋,刘万德,苏建荣,等 (5653)
喀斯特常绿落叶阔叶混交林物种多度与丰富度空间分布的尺度效应.....	张忠华,胡 刚,祝介东,等 (5663)
格氏栲天然林土壤养分空间异质性.....	苏松锦,刘金福,何中声,等 (5673)
种植香根草对铜尾矿废弃地基质化学和生物学性质的影响.....	徐德聪,詹 婧,陈 政,等 (5683)
灌溉对三种荒漠植物蒸腾耗水特性的影响.....	单立山,李 毅,张希明,等 (5692)
真盐生植物盐角草对不同氮形态的响应.....	聂玲玲,冯娟娟,吕素莲,等 (5703)
鹿泉沟自然保护区寒温性针叶林演替优势种格局动态分析.....	张钦弟,毕润成,张金屯,等 (5713)
不同水肥条件下 AM 真菌对丹参幼苗生长和营养成分的影响.....	贺学礼,马 丽,孟静静,等 (5721)
垄沟覆膜栽培冬小麦田的土壤呼吸.....	上官宇先,师日鹏,韩 坤,等 (5729)
不同方式处理牛粪对大豆生长和品质的影响.....	郭立月,刘雪梅,战丽杰,等 (5738)
基于大气沉降与径流的乌鲁木齐河源区氮素收支模拟.....	王圣杰,张明军,王飞腾,等 (5747)
基于能值理论的循环复合农业生态系统发展评价——以福建省福清星源循环农业产业示范基地为例.....	钟珍梅,翁伯琦,黄勤楼,等 (5755)
低温暴露和恢复对棘胸蛙雌性亚成体生存力及能量物质消耗的影响.....	凌 云,邵 晨,颜志刚,等 (5763)
暗期干扰对棉铃虫两个不同地理种群滞育抑制作用的比较.....	陈元生,涂小云,陈 超,等 (5770)
水土流失治理措施对小流域土壤有机碳和全氮的影响.....	张彦军,郭胜利,南雅芳,等 (5777)
不同管理主体对泸沽湖流域生态系统影响的比较分析.....	董仁才,苟亚青,李思远,等 (5786)
连江鱼类群落多样性及其与环境因子的关系.....	李 捷,李新辉,贾晓平,等 (5795)
溶氧水平对鲫鱼代谢模式的影响.....	张 伟,曹振东,付世建 (5806)
象山港人工鱼礁区的网采浮游植物群落组成及其与环境因子的关系.....	江志兵,陈全震,寿 鹿,等 (5813)
填海造地导致海湾生态系统服务损失的能值评估——以套子湾为例.....	李睿倩,孟范平 (5825)
城市滨水景观的视觉环境质量评价——以合肥市为例.....	姚玉敏,朱晓东,徐迎碧,等 (5836)
专论与综述	
生态基因组学研究进展.....	施永彬,李钧敏,金则新 (5846)
海洋酸化生态学研究进展.....	汪思茹,殷克东,蔡卫君,等 (5859)
纺锤水蚤摄食生态学研究进展.....	胡思敏,刘 胜,李 涛,等 (5870)
河口生态系统氨氧化菌生态学研究进展.....	张秋芳,徐继荣,苏建强,等 (5878)
嗜中性微好氧铁氧化菌研究进展.....	林超峰,龚 骏 (5889)
典型低纬度海区(南海、孟加拉湾)初级生产力比较.....	刘华雪,宋星宇,黄洪辉,等 (5900)
植物叶片最大羧化速率及其对环境因子响应的研究进展.....	张彦敏,周广胜 (5907)
中国大陆鸟类栖息地选择研究十年.....	蒋爱伍,周 放,覃 玥,等 (5918)
研究简报	
孵化温度对赤链蛇胚胎代谢和幼体行为的影响.....	孙文佳,俞 霄,曹梦洁,等 (5924)
不同培肥茶园土壤微生物量碳氮及相关参数的变化与敏感性分析.....	王利民,邱珊莲,林新坚,等 (5930)
施肥对两种莧菜吸收积累镉的影响.....	李凝玉,李志安,庄 萍,等 (5937)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 322 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-09



封面图说: 冬天低空飞翔的丹顶鹤——丹顶鹤是鹤类中的一种,因头顶有“红肉冠”而得名。是东亚地区特有的鸟种,因体态优雅、颜色分明,在这一地区的文化中具有吉祥、忠贞、长寿的象征,是传说中的仙鹤,国家一级保护动物。丹顶鹤具备鹤类的特征,即三长——嘴长、颈长、腿长。成鸟除颈部和飞羽后端为黑色外,全身洁白,头顶皮肤裸露,呈鲜红色。丹顶鹤每年要在繁殖地和越冬地之间进行迁徙,只有在日本北海道等地是留鸟,不进行迁徙,这可能与冬季当地人有组织地投喂食物,食物来源充足有关。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201108011124

徐德聪,詹婧,陈政,高毅,谢贤政,孙庆业,豆长明. 种植香根草对铜尾矿废弃地基质化学和生物学性质的影响. 生态学报, 2012, 32(18): 5683-5691.

Xu D C, Zhan J, Chen Z, Gao Y, Xie X Z, Sun Q Y, Dou C M. Effects of *Vetiveria zizanioides* L. growth on chemical and biological properties of copper mine tailing wastelands. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(18): 5683-5691.

种植香根草对铜尾矿废弃地基质化学和生物学性质的影响

徐德聪^{1,2}, 詹 婧¹, 陈 政¹, 高 毅¹, 谢贤政³, 孙庆业^{1,*}, 豆长明³

(1. 安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230601; 2. 宿州学院化学与生命科学系, 宿州 234000;

3. 安徽省环境科学研究院, 合肥 230061)

摘要:通过实地调查取样和室内分析,研究铜陵水木冲铜尾矿废弃地不同时期种植香根草(*Vetiveria zizanioides* L.) 群落(近期种植香根草群落(*V. zizanioides* communities were established in the recent stage, JX), 中期种植香根草群落(*V. zizanioides* communities were established in the middle stage, ZX) 和早期种植香根草群落(*V. zizanioides* communities were established in the early stage, OX)) 对尾矿基质化学性质、微生物量和土壤酶活性的影响,探讨人工植被恢复对铜尾矿废弃地基质系统的修复作用。结果表明:香根草的定植能延缓铜尾矿的酸化过程,且随着香根草定植时间的延长,0—5 cm 和 5—20 cm 层尾矿基质中总氮和速效磷含量提高(其中,0—5 cm 层总氮积累更加显著),OX 下 0—5 cm 表层基质总氮和速效磷的平均值分别是 JX 下的 4.64 倍和 22.44 倍。基质微生物量 C、N 含量和脱氢酶、过氧化氢酶、脲酶活性也随香根草种植时间的延长而有不同程度的升高,且基质化学性质对微生物量和酶活性有影响,其中基质微生物量 C、N 含量、脱氢酶和过氧化氢酶活性均与电导率呈显著或极显著负相关性;而基质微生物量 N 和 4 种酶活性均与总氮含量呈显著或极显著正相关性,表明总氮含量是影响基质微生物量 N 和酶活性的主要因子;基质微生物量 N、脱氢酶和过氧化氢酶活性还与速效磷含量呈极显著正相关性。基质中 Cu、Pb 含量对脱氢酶、过氧化氢酶活性和微生物量均有显著抑制作用,而 Zn 对基质微生物活性有一定的激活作用。生长在尾矿废弃地上的香根草不仅显著地改善了铜尾矿废弃地的基质化学性质,且有利于基质微生物量和酶活性的增加,是一种良好的矿业废弃地生态修复物种。

关键词: 香根草;铜尾矿废弃地;化学性质;微生物量;酶活性

Effects of *Vetiveria zizanioides* L. growth on chemical and biological properties of copper mine tailing wastelands

XU Decong^{1,2}, ZHAN Jing¹, CHEN Zheng¹, GAO Yi¹, XIE Xianzheng³, SUN Qingye^{1,*}, DOU Changming³

1 School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China

2 School of Chemical and Life Science, Suzhou University, Suzhou 234000, China

3 Anhui Institute of Environmental Science, Hefei 230061, China

Abstract: *Vetiveria zizanioides* L. is a Gramineae herbaceous perennial with rapid growth and is highly adaptable to its environment. It is often found in wasteland and lead/zinc mining abandoned soil. *V. zizanioides* is also strongly adaptable to copper mine tailings. The criteria for determining successful phytoremediation focus on both aboveground vegetation and substrate characterization. To understand the effects of artificial revegetation on the remediation of wastelands associated with the Tongling copper mine tailings in Anhui Province, we studied the dynamic changes in chemical properties,

基金项目: 环保公益性行业科研专项(201009041-02);安徽省高校优秀青年人才基金项目(2010SQRL191)

收稿日期: 2011-08-01; **修订日期:** 2012-02-22

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

microbial biomass, enzyme activity in the tailings, and the relationships between these factors. The tailings were collected under *V. zizanioides* communities constructed on copper mine tailing wastelands at different times: JX (*V. zizanioides* communities were established in the recent stage); ZX (*V. zizanioides* communities were established in the middle stage); and OX (*V. zizanioides* communities were established in the early stage). The results showed that the tailings under the ZX and OX communities, had higher pH values and lower electrical conductivity and available Cu and Pb concentrations than the tailings under the JX community, indicating that the process of tailings acidification slowed down after the establishment of the *V. zizanioides* community. As the *V. zizanioides* community developed over time, the total N and available P in the tailings at 0—5 cm and 5—20 cm depths increased; with the total N and available P in the tailings at 0—5 cm under the OX 4.64 and 22.44 times higher, respectively than at the same depth under the JX. The total N accumulation at 0—5 cm was significantly higher than at the 5—20 cm depth, indicating the effect of the phytoremediation on improving the substrate chemical properties. With increased plantation time, the dehydrogenase, catalase and urease enzyme activities and the microbial biomass C and N contents also gradually increased at the 0—5 cm and 5—20 cm depths, but the alkaline phosphatase activity did not increase. The dehydrogenase and catalase activities and the microbial biomass C and N contents were all either extremely significantly or significantly negatively correlated with the electric conductivity. However, the microbial biomass N contents and all soil enzyme activities were significantly positively correlated to the total N content, indicating that total N was a dominant influence on soil enzyme activities. The microbial biomass and most soil enzyme activities decreased with increasing Cu and Pb contents, and the dehydrogenase and catalase activities were most sensitive to Cu, but less sensitive to Zn. The *V. zizanioides* has shown a significant ability to improve the chemical properties of tailings, and also to increase microbial biomass and soil enzyme activities. It is an adaptive plant species, and is recommended for the ecological rehabilitation of copper mine tailing wastelands.

Key Words: *Vetiveria zizanioides* L.; copper mine tailings; chemical properties; microbial biomass; enzyme activities

铜尾矿废弃地是铜矿开采后形成的大量尾矿堆放形成的,具有养分贫乏、重金属含量高、对周围水体和土壤污染严重等特点。因此,实施铜尾矿废弃地生态修复,控制其对周围地区的污染已成为目前研究的热点之一。基质改良和耐性植物选择是矿业废弃地生态修复的关键,国内外对适合重金属矿业废弃地生态修复的植物进行了大量的研究,如田胜尼等^[1]探讨了5种豆科植物对铜尾矿的适应性,简曙光等^[2]研究了多花黑麦草在酸化铅锌尾矿上的萌发、生长和重金属积累情况,Barrutia等^[3]和 Conesa等^[4]分别利用不同栽培方式研究了酸模(*Rumex acetosa* L.)和灰绿针草(*Lygeum spartum*)对铅锌尾矿土的修复潜力。香根草(*Vetiveria zizanioides* L.)为禾本科多年生大型草本植物,能够在生境恶劣、寸草不生的铅、锌尾矿地正常生长^[5]。诸多学者在香根草对重金属污染土壤的修复潜力方面进行了深入的探讨,如 Aibibu等^[6]研究了Cd积累对香根草生长、生理和生化特性的影响。Shu等^[7]通过田间实验研究了香根草等几种矿区优势植物对Pb/Zn矿的适应性,结果表明香根草是Pb/Zn尾矿植被恢复的最佳物种。Pang等^[8]研究了香根草对Cu、Pb和Zn胁迫的生理响应。在澳大利亚,香根草已被成功地用于固定盐碱化的煤矿地和酸化的金矿地^[6]。笔者对铜陵铜尾矿废弃地的调查也表明,人工种植在铜尾矿废弃地上的香根草生长发育良好。

铜陵是我国六大铜业基地之一,区内堆存着大量不同时期排放的铜尾矿,形成大量的铜尾矿废弃地。目前关于铜陵铜尾矿废弃地生态修复研究主要集中于自然生态恢复过程中尾矿废弃地中养分的形成与积累^[9-10]、土壤酶活性的变化^[11]以及基质微生物多样性等方面^[12],而关于人工生态修复过程中植物群落发展与基质化学性质、微生物量及其酶活性之间相互关系的研究鲜见报道。

本研究以人工种植香根草的铜陵水木冲铜尾矿废弃地为对象,研究不同时期种植香根草对铜尾矿废弃地基质化学性质、微生物量及酶活性的影响,阐述矿业废弃地生态系统修复过程中植物-基质系统的相互关系及其作用机制,为重金属矿业废弃地生态系统的修复提供理论参考和实例支持。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

水木冲尾矿废弃地(30°55'N, 117°50'E)位于安徽铜陵市郊,属亚热带湿润季风气候,年平均气温 17.4℃,无霜期 230 d,年降水量 1370 mm,雨量充沛,年平均日照时数 2050 h,年平均湿度为 75%—81%,常年主导风向为东北风,海拔为 60—100 m。为山谷型尾矿废弃地,周围山坡植被多主要为人工马尾松林(*Pinus massoniana* Lamb.)和灌木-高草群落。于 2004 年被弃置不用,人工恢复尾矿废弃地坡面从坝底至坝顶分 3 个台阶,第一台阶为初期坝(石头堆筑),第二、三台阶为堆积坝(尾矿堆筑)。本研究以第二、三台阶为研究对象,区域面积约为 4.5 万 m²。于 2006 至 2008 年分 3 阶段种植香根草,其中近期种植香根草群落(*V. zizanioides* communities were established in the recent stage, JX)和中期种植香根草群落(*V. zizanioides* communities were established in the middle stage, ZX)分布在第三台阶,早期种植香根草群落(*V. zizanioides* communities were established in the early stage, OX)分布在第二台阶。

1.2 样品的采集与处理

2009 年 5 月,分别采集 JX、ZX 和 OX 下 0—5 cm 和 5—20 cm 尾矿样品。每个时期香根草群落下均采集 5 个重复样品,每重复由 6 个采样点的小样品混合而成,分别装入无菌塑料袋中、混匀,共采集样品 30 个。将取回的新鲜样品分成 2 份,1 份立即过筛、保存于 4℃ 冰箱,用于基质微生物量和酶活性的测定,另 1 份样品经自然风干、研磨、过筛之后用于化学性质分析。

1.3 测定方法

1.3.1 尾矿化学性质的测定

pH 值和电导率分别用 pH 计和电导率仪测定(尾矿_w:水_v = 1 g:2.5 mL);总氮采用凯氏定氮法测定;速效磷含量采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定^[13]。

总 Cu、Pb 和 Zn 用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 消化、ICP 测定;有效态 Cu、Pb 和 Zn 用 DTPA 浸提,原子吸收分光光度计测定^[14]。

1.3.2 微生物量的测定

基质微生物量 C、N 采用熏蒸-浸提法,浸提液中的有机 C 采用重铬酸钾氧化-硫酸亚铁滴定法, N 采用凯氏定氮法测定^[13],微生物量 C、N 的计算按照 Turner 等^[15]的方法。

1.3.3 酶活性的测定^[16]

脱氢酶的测定采用 TTC 比色法,活性以 triphenylformazan (TPF) mg·kg⁻¹·d⁻¹ 表示;过氧化氢酶的测定采用高锰酸钾滴定法,活性以 0.02 mol/L KMnO₄ mL·g⁻¹·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-nitrophenol μg·g⁻¹·h⁻¹ 表示;脲酶的测定采用靛酚蓝比色法,活性以 NH₄⁺-N mg·g⁻¹·h⁻¹ 表示。

1.4 数据处理

数据分析用 SPSS16.0 进行,One-Way ANOVA (LSD 检验)用于多重比较($P < 0.05$);独立样本 *t*-检验用于分析来自同一采样区域上下两层样本之间的数据比较;双变量相关分析采用 Pearson 相关系数。

2 结果与分析

2.1 香根草下铜尾矿基质化学性质的变化

表 1 表明,基质 pH 值表现为中性至微碱性,且 0—5 cm 和 5—20 cm 层 pH 值均表现为 JX < ZX < OX,而电导率均表现为 JX > ZX > OX, JX 下两层基质 pH 值和电导率均与 ZX、OX 差异显著($P < 0.05$)。野外调查发现,位于第三台阶的表层尾矿出现氧化变酸现象,这可能是导致该处上下层 pH 值较低和电导率较高的主要原因。总氮和速效磷均表现为 OX > ZX > JX, JX 下 0—5 cm 表层总氮与 OX 下出现显著差异($P < 0.05$), OX 下 0—5 cm 表层基质总氮和速效磷的平均值分别是 JX 下的 4.64 倍和 22.44 倍,这表明随着香根草在铜尾矿上定植时间的延长,基质中总氮和速效磷含量均显著提高。

栽培香根草的水木冲尾矿废弃地中总的重金属含量表现为 Cu > Zn > Pb;在 2 层尾矿基质中, JX 处的总 Cu

含量明显高于 ZX 和 OX,而总 Zn 则表现为 $JX < ZX < OX$,整个研究区域尾矿基质中总 Pb 含量虽有变化,但与总 Cu 和总 Zn 相比差异较小;来自同一种植时期的上下层尾矿基质中 Cu、Zn 和 Pb 总量无显著差异 ($P > 0.05$),表明研究区域 3 种重金属总量的这种变化主要由不同时期堆存尾矿自身性质所决定。

与总的重金属含量变化一样,研究区域有效态重金属含量也表现为 $Cu > Zn > Pb$;2 层尾矿中有效态 Cu 和 Pb 含量均表现为 $JX > ZX$ 和 OX,而有效态 Zn 含量则表现为 $JX < ZX < OX$,不同时期栽培的香根草群落下,上层尾矿(0—5 cm)中的有效态 Cu 差异不及下层(5—20 cm)显著,而不同时期种植的香根草群落下 2 层尾矿中的有效态 Zn 均表现出显著差异。JX 有效态 Cu、ZX 有效态 Pb 和 Zn,在上下层尾矿中均有显著差异 ($P < 0.05$ 或 0.01),但各时期上下层尾矿中有效态重金属占总量重金属的比例非常稳定。以上结果表明尾矿中有效态重金属含量与其总量的高低有关,但比重金属总量更易受外界环境条件的影响。

表 1 铜尾矿基质化学性质

Table 1 Chemical properties of copper mine tailings (Mean $\pm$ SD, $n=5$)

项目 Item	采样深度 Sampling depth/cm					
	0—5			5—20		
	JX	ZX	OX	JX	ZX	OX
pH	7.32 $\pm$ 0.11a	7.76 $\pm$ 0.53b	7.82 $\pm$ 0.08b	7.41 $\pm$ 0.08A	7.67 $\pm$ 0.22B	7.86 $\pm$ 0.20B
电导率 Electric conductivity/(μ S/cm)	1438.8 $\pm$ 157.1b	509.0 $\pm$ 292.7a	344.2 $\pm$ 67.3a	1589.6 $\pm$ 26.6B	783.0 $\pm$ 380.4A	427.8 $\pm$ 265.7A
总氮 Total nitrogen/(mg/kg)	47.9 $\pm$ 6.8a	138.9 $\pm$ 55.2ab	222.2 $\pm$ 104.5b	33.1 $\pm$ 6.7A	39.9 $\pm$ 9.4A	41.6 $\pm$ 17.1A
速效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	0.09 $\pm$ 0.07a	1.32 $\pm$ 0.97b	2.02 $\pm$ 0.81b	0.03 $\pm$ 0.03A	0.47 $\pm$ 0.34B	0.71 $\pm$ 0.36B
有效态 Cu Available Cu/(mg/kg)	62.41 $\pm$ 11.37a	51.47 $\pm$ 11.19a	49.24 $\pm$ 5.99a	78.25 $\pm$ 8.5B	38.94 $\pm$ 2.68A	49.67 $\pm$ 10.5A
有效态 Pb Available Pb/(mg/kg)	2.81 $\pm$ 0.52b	1.77 $\pm$ 0.21a	2.17 $\pm$ 0.78ab	3.46 $\pm$ 0.68B	2.22 $\pm$ 0.18A	2.51 $\pm$ 1.02AB
有效态 Zn Available Zn/(mg/kg)	10.67 $\pm$ 1.8a	28.5 $\pm$ 1.72b	34.82 $\pm$ 4.58c	12.16 $\pm$ 2.71A	21.61 $\pm$ 2.51B	34.42 $\pm$ 3.28C
总 Cu Total Cu/(mg/kg)	3059 $\pm$ 475c	1943 $\pm$ 341b	1387 $\pm$ 246a	2804 $\pm$ 442C	2126 $\pm$ 419B	1487 $\pm$ 266A
总 Pb Total Pb/(mg/kg)	31.7 $\pm$ 10.7b	21.2 $\pm$ 4.1a	23.8 $\pm$ 5.2ab	30.6 $\pm$ 6.5A	23.2 $\pm$ 4.7A	26.8 $\pm$ 10.6A
总 Zn Total Zn/(mg/kg)	410 $\pm$ 70a	450 $\pm$ 40ab	520 $\pm$ 70b	420 $\pm$ 70A	470 $\pm$ 50AB	520 $\pm$ 90B

JX:近期种植香根草群落 *V. zizanioides* communities were established in the recent stage; ZX:中期种植香根草群落 *V. zizanioides* communities were established in the middle stage; OX:早期种植香根草群落 *V. zizanioides* communities were established in the early stage. LSD 检验:同一采样深度不同字母表示同一行中数据间有显著性差异 ($P < 0.05$)

2.2 香根草下铜尾矿基质微生物量的变化

图 1 表明,香根草生长时间的长短对尾矿基质中微生物量 C、N 具有显著影响。香根草种植时间较早的 ZX 与种植时间较短的 JX 微生物量 C 具有显著差异(前者是后者的 3.06 倍),尽管最先种植的香根草(OX)下表层 0—5 cm 尾矿中微生物量 C 与刚刚种植的香根草(JX)下表层 0—5 cm 尾矿中微生物量 C 无显著差异,但前者为后者的 1.52 倍。香根草种植时间对下层(5—20 cm)微生物量 C 的影响也很明显,种植时间较长的 OX 微生物量 C 明显高于种植时间较短的 JX。除 ZX 外,上下 2 层尾矿基质中微生物量 C 含量无显著差异 ($P > 0.05$)。

上下 2 层尾矿基质中,微生物量 N 均表现为 $OX > ZX > JX$,OX 的微生物量 N 显著高于 JX。从图 1 可以看出,3 个种植时期下尾矿基质中微生物量 N 含量均表现为 0—5 cm 层高于 5—20 cm 层。统计分析表明,JX 上层(0—5 cm)与下层(5—20 cm)尾矿基质中微生物量 N 含量出现显著差异 ($P < 0.05$),但 ZX 和 OX 上层与下层之间尾矿基质中微生物量 N 无显著差异 ($P > 0.05$)。

上下层微生物量 C、N 变化的分析结果表明,植物对表层 20 cm 尾矿基质中微生物量的影响随着香根草生长时间的延长逐渐均一,即植被恢复初期植物地上部分对基质微生物的影响大于地下部分。

2.3 香根草下铜尾矿基质酶活性的变化

不同时期种植的香根草群落下铜尾矿废弃地基质酶活性测定结果表明(图 2),基质中 4 种酶活性随种植时间变化趋势有所不同。0—5 cm 及 5—20 cm 层基质中脱氢酶活性均表现为 $OX > ZX > JX$,过氧化氢酶活性均表现为 $ZX > OX > JX$,碱性磷酸酶活性均表现为 $JX > OX > ZX$,脲酶活性均表现为 $OX > JX > ZX$ 。

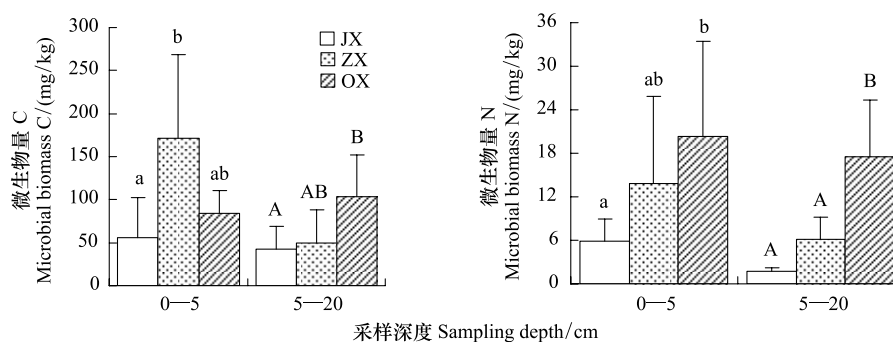


图1 铜尾矿基质微生物量 C、N 变化

Fig. 1 Changes of microbial biomass C and N in copper mine tailings

LSD 检验: 同一采样深度不同字母表示数据间有显著性差异 ($P < 0.05$); JX: *V. zizanioides* communities were established in the recent stage; ZX: *V. zizanioides* communities were established in the middle stage; OX: *V. zizanioides* communities were established in the early stage

从图2可以看出,香根草生长时间较长的 OX 和 ZX 0—5 cm 层的尾矿基质中脱氢酶和过氧化氢酶活性显著高于新近种植香根草的同层尾矿。与脱氢酶和过氧化氢酶相比,碱性磷酸酶和脲酶活性随植物种植时间变化相对较小。且 JX 上层(0—5 cm 层)尾矿中脱氢酶和过氧化氢酶活性与下层(5—20 cm 层)尾矿之间无显著差异 ($P > 0.05$),但 ZX 和 OX 上层尾矿中脱氢酶和过氧化氢酶活性均显著高于下层尾矿 ($P < 0.05$ 或 0.01);除 JX 碱性磷酸酶外,3 个时期种植的香根草群落下,碱性磷酸酶和脲酶活性在上下层之间的差异并不显著 ($P > 0.05$)。

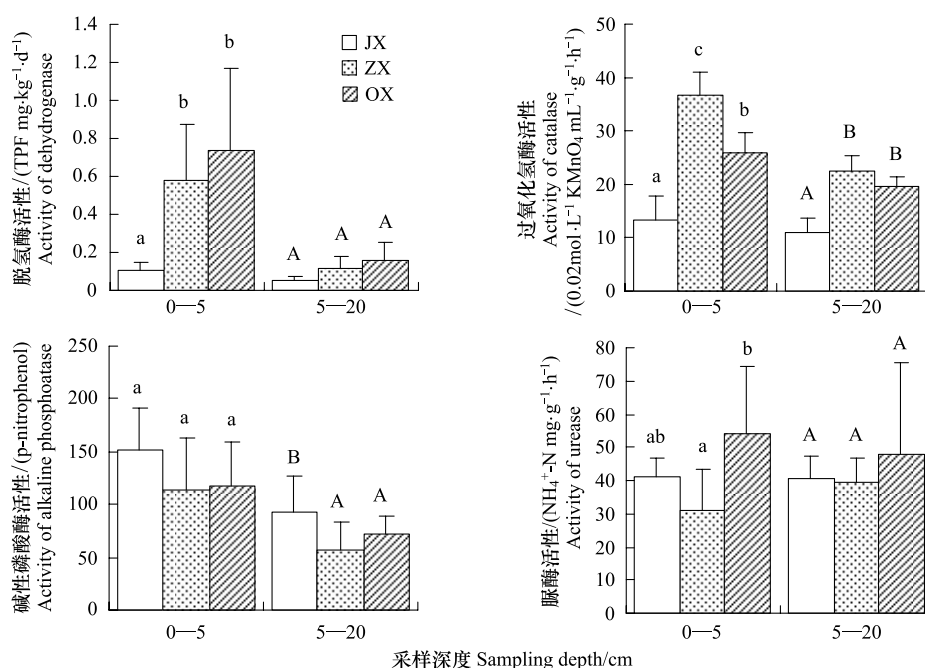


图2 铜尾矿基质酶活性变化

Fig. 2 Changes of enzymatic activities in copper mine tailings

不同字母表示差异显著

2.4 香根草下铜尾矿基质化学性质与微生物活性的关系

从表2可以看出,基质酶活性与化学性质有着密切的关系,但不同种类酶表现出的相关性存在差异。脱氢酶和过氧化氢酶活性均与基质总氮和速效磷含量呈极显著正相关,而与电导率均呈极显著负相关;碱性磷酸酶和脲酶活性均与总氮含量呈显著正相关,与速效磷含量和电导率的相关性较差;基质 pH 值仅与碱性磷

酸酶活性呈极显著负相关。此外,脱氢酶和过氧化氢酶活性与总 Cu、总 Pb 和有效态 Pb 含量呈显著或极显著负相关,而与有效 Zn 态含量均呈极显著正相关,且过氧化氢酶活性还与有效态 Cu 含量呈显著负相关;除脲酶活性与总 Zn 含量呈显著的正相关外,碱性磷酸酶和脲酶活性与其它总量和有效态重金属含量的相关性均不显著。

微生物量 C、N 含量与基质化学性质之间也存在着密切的关系。微生物量 C、N 均与电导率呈显著或极显著负相关,且微生物量 C 与 pH 值呈显著正相关,微生物量 N 与总氮和速效磷含量均呈极显著正相关。此外,基质微生物量 C、N 均与总 Cu 和有效态 Pb 含量呈显著或极显著负相关,而与有效态 Zn 含量呈显著或极显著正相关,微生物量 N 还与有效态 Cu 含量呈显著负相关。

表 2 铜尾矿化学性质与微生物活性的相关关系

Table 2 Correlations between microbiological and chemical properties of tailings

项目 Item	脱氢酶 dehydrogenase	过氧化氢酶 catalase	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	脲酶 urease	微生物量 C microbial biomass C	微生物量 N microbial biomass N
pH	0.223	0.346	-0.491 **	-0.106	0.446 *	0.315
电导率 Electric conductivity	-0.522 **	-0.657 **	0.262	0.012	-0.414 *	-0.579 **
总氮 Total nitrogen	0.748 **	0.565 **	0.361 *	0.370 *	0.164	0.704 **
速效磷 Available phosphorus	0.894 **	0.639 **	0.197	0.083	0.254	0.787 **
总 Cu Total Cu	-0.432 *	-0.514 **	0.190	-0.080	-0.414 *	-0.528 **
总 Pb Total Pb	-0.362 *	-0.407 *	0.209	0.044	-0.357	-0.246
总 Zn Total Zn	0.234	0.204	-0.335	0.385 *	0.005	0.347
有效态 Cu Available Cu	-0.246	-0.458 *	0.355	0.057	-0.367 *	-0.304
有效态 Pb Available Pb	-0.440 *	-0.621 **	-0.041	0.158	-0.445 *	-0.370 *
有效态 Zn Available Zn	0.516 **	0.588 **	-0.237	0.259	0.375 *	0.603 **

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

3 讨论

本研究的结果表明,在新弃置铜尾矿废弃地上种植香根草后,随着香根草定植时间的延长,香根草群落下不同层基质化学性质、微生物量和酶活性均有着不同程度的变化。

3.1 香根草对铜尾矿废弃地基质化学性质的影响

新弃置铜尾矿废弃地基质 pH 值一般大于 8.0^[17],由于尾矿中含有大量金属硫化物,暴露于空气中的金属硫化物(特别是 FeS₂) 在氧和水的作用下易发生酸化作用,生成 H⁺、SO₄²⁻ 和大量盐类,导致尾矿废弃地基质 pH 值下降和电导率升高^[9]。在本研究中,OX 和 ZX 下尾矿 pH 值显著高于新近种植的香根草群落(JX)下,而电导率则表现出相反的趋势,表明香根草的种植能够有效延缓尾矿废弃物中金属硫化物的氧化,这与 Lei 等^[18]和任冠举等^[9]关于自然植物群落下尾矿 pH 值和电导率变化的研究结论相一致。此外,不同时期排放的尾矿中金属硫化物含量及组成的差异也可能是导致 OX、ZX 和 JX 差异的原因之一。

同时,随香根草定植时间的延长,基质总氮含量显著提高,这与 Zhang 等^[19]研究结果一致。其中表层(0—5 cm)总氮的积累更加显著,Li and Daniels^[20]在自然植被恢复区同样发现尾矿基质氮积累主要发生在表层(0—5 cm),且总氮与恢复年限显著相关。除总氮含量显著增加外,尾矿基质中速效磷含量也随着香根草定植时间的延长而增加,Singh 等^[21]也发现在矿区废弃地恢复早期阶段基质速效磷含量随植被恢复年限增加而逐渐升高。尾矿本身仅含有极少量养分,香根草生长提高基质养分含量主要与植物凋落物形成、分解及根系分泌物向基质释放有机物质有关,来自植物的有机质作为基质的 C 和 N 来源,能够有效提高基质中有机质和氮素含量、促进矿物态磷释放,改善基质性质^[22]。Sun 等也认为植物群落的凋落物和土壤微生物活性是影响尾矿中有机质和氮素含量的主要因素^[23]。

植物群落下土壤中重金属含量变化可能因植物对重金属的吸收、植物和微生物活动^[24]、基质内溶液运移

或土壤 pH 值变化而引起^[25]。本研究中,不同时期种植的香根草群落下的尾矿基质中有效态重金属含量发生变化。这一方面可能与香根草对重金属的吸收有关,因为近期种植的香根草地下部分 Cu 含量显著高于中期和早期种植的($P<0.05$),Pb 和 Zn 含量无显著差异;另一方面可能与因尾矿氧化导致的 pH 值降低及重金属的形态转化有关。相关分析表明,基质中有效态 Cu 与 pH 值呈极显著负相关($r=-0.516$, $P<0.01$),而有效态 Zn 含量与 pH 值呈极显著正相关($r=0.609$, $P<0.01$),有效态 Pb 与 pH 值相关性不显著。这表明 3 个种植时期的香根草体内重金属含量和群落下基质中有效态重金属含量的变化都可能与基质酸化有关,Conesa 等^[4]研究也表明,在酸化尾矿中添加石灰显著降低了灰绿针草体内的 Cu 含量。

3.2 香根草对铜尾矿基质中微生物量的影响

基质微生物量常被作为植物所需营养元素的转化因子和资源库,是表明基质发育状况和生化强度的一项主要指标。本研究中,随着香根草在铜尾矿废弃地上定植时间的延长,两层基质中微生物量 N 显著增加,而表层尾矿中微生物量 C 表现为先增加后下降的趋势,说明微生物量 C 并不是随植物定居时间延长而持续增加,与 Singh 等^[21]微生物量随植被恢复年限的增加而连续增加的结论有所不同。Roy 等^[26]和 Jia 等^[27]也认为微生物量的积累主要发生在植被恢复的早期阶段,而 Wardle^[28]则认为恢复的中期阶段微生物量最优。相关分析表明,微生物量 N 与基质中总氮和速效磷含量均呈极显著正相关(表 2),表明微生物量 N 的增加有利于总氮和速效磷含量的提高。对于铜尾矿废弃地来说,从矿物释放的养料十分有限,因此,微生物量对基质养分的有效性及其循环的影响作用就更大,这与 Singh 等^[21]研究结果相一致。微生物量 C 则与 pH 值呈显著正相关,表明在一定范围内 pH 值的升高有利于基质微生物量 C 的增加,这与 Anderson 等^[29]的结果相同。基质微生物量 C、N 与电导率呈显著和极显著负相关,表明尾矿电导率上升不利于基质微生物量的增加。正如前所述,由于金属硫化物氧化释放出的 H^+ 、 SO_4^{2-} 和大量盐类导致了尾矿废弃地 pH 值下降和电导率升高,尾矿废弃地微生物量 C、N 与电导率之间的负相关性可能主要与重金属离子对微生物的毒害作用有关。总体而言,本研究中微生物量 N 与基质化学性质的相关性要优于微生物量 C,显示了微生物量 C、N 与化学性质的相关性是有差异的^[19,30]。

重金属会不同程度的降低土壤微生物量^[31-32]。本研究中,重金属含量对基质微生物量 C、N 含量的抑制或促进与重金属种类有关。总量和有效态 Cu、Pb 含量与基质中微生物量 C、N 含量呈负相关,这可能与 Pb 和 Cu 对微生物群落有剧烈的毒性有关,因为 Lombi 等^[31]Shi 等^[32]的研究也证实了 Pb 和 Cu 污染比其它重金属引起土壤微生物量和活性下降程度更大。有文献^[33]指出 Zn 也是抑制微生物生长和活性的重要因素,但本文的研究结果表明有效态 Zn 与微生物量 C、N 含量呈显著或极显著正相关,说明 Zn 没有抑制微生物生长和活性。这一方面可能与微生物群落构成变化有关,即微生物长期在受重金属污染的土壤中会向耐 Zn 物种转变^[33];另一方面可能反映了微生物群落结构的生物复杂性,因其不同微生物类群对环境污染的扰动表现出不同的响应^[34]。尽管微生物特性与土壤中重金属含量的关系很复杂,但至少说明不同种类重金属对微生物的毒性不同。

3.3 香根草对铜尾矿基质酶活性的影响

土壤酶在土壤养分循环及植物生长所需养分的供给过程中扮演着重要角色,酶活性的高低不仅表明土壤的养分状况,而且能在一定程度上反映土壤微生物的活动状况,自然植物定居和植物修复可改善受污染土壤,也可调节土壤酶活性^[11,35-36]。本研究表明,新弃置铜尾矿废弃地 0—5 cm 和 5—20 cm 层中基质脱氢酶、过氧化氢酶、脲酶活性随人工种植香根草生长时间的延长均有不同程度的增强,表明其基质环境正在朝着有利方向发展,基质质量正逐步提高。在各种植时期香根草群落下,脱氢酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性均表现出随剖面深度增加而降低,这是因为尾矿表层是植物残体和微生物密集层,也是基质养分分布较多的层次,酶的作用底物多,酶活性也就强。相关分析表明,4 种酶活性均与基质总氮呈显著或极显著的正相关,表明基质总氮含量是影响酶活性的主要因子,随着人工植被修复时间的延长,基质总氮含量的增加,酶活性也增强,植被对基质的生物改造作用逐渐增强。

重金属污染对土壤酶活性的影响多表现为抑制作用^[37-38]。本研究中,铜尾矿废弃地基质中 Cu、Pb 含量对脱氢酶和过氧化氢酶活性具有强烈抑制作用,而 Zn 对这两种酶又有一定的激活作用,说明脱氢酶和过氧化氢酶活性对重金属污染较敏感。Chen 等^[38]指出,重金属污染对脱氢酶和脲酶活性有最明显的抑制作用,孙庆业等^[39]研究发现,土壤中 Cu 对脲酶具有抑制作用,而对其他土壤酶活性影响较小;Yang 等^[40]研究表明, Zn 抑制脲酶和过氧化氢酶活性,而 Pb 对碱性磷酸酶、脲酶和过氧化氢酶甚至有促进作用。出现以上不同的结论,说明在自然状态下土壤重金属复合污染对土壤酶活性的影响较复杂。

4 结论

(1)在铜尾矿废弃地上人工种植香根草能有效延缓铜尾矿的酸化过程,增加尾矿中氮、磷养分含量。

(2)随香根草定植时间的延长,尾矿中微生物量 C、N 含量,脱氢酶、过氧化氢酶和脲酶活性均有不同程度的提高。

(3)3 个种植时期的香根草群落下尾矿废弃地剖面中微生物量 N 含量、脱氢酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性均随采样深度的增加而递减。

(4)尾矿废弃地的基质化学性质与微生物量及酶活性之间有显著或极显著的相关性。

References:

- [1] 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.
- [2] Jian S G, Yang Z Y, Jian W J. Establishment and growth of *Lolium multiflorum* for phyto-remediation of Pb/Zn tailings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(2): 255-260.
- [3] Barrutia O, Epelde L, García-Plazaola J I, Garbisu C, Becerril J M. Phytoextraction potential of two *Rumex acetosa* L. accessions collected from metalliferous and non-metalliferous sites: effect of fertilization. *Chemosphere*, 2009, 74(2): 259-264.
- [4] 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.
- [5] Truong P N V. Vetiver grass technology for mine tailings rehabilitation // International Erosion Control Association, eds. *Proceedings of the First Asia Pacific Conference on Ground and Water Bio-Engineering for Erosion Control and Slope Stabilization*. Manila: The Philippines, 1999: 315-325.
- [6] Aibibu N, Liu Y G, Zeng G M, Wang X, Chen B B, Song H X, Xu L. Cadmium accumulation in *vetiveria zizanioides* and its effects on growth, physiological and biochemical characters. *Bioresource Technology*, 2010, 101(16): 6297-6303.
- [7] Shu W S, Xia H P, Zhang Z Q, Lan C Y, Wong M H. Use of vetiver and three other grasses for revegetation of Pb/Zn mine tailings: field experiment. *International Journal of Phytoremediation*, 2002, 4(1): 47-57.
- [8] Pang J, Chan G S Y, Zhang J, Liang J, Wong M H. Physiological aspects of vetiver grass for rehabilitation in abandoned metalliferous mine wastes. *Chemosphere*, 2003, 52(9): 1559-1570.
- [9] Ren 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.
- [10] An Z S, Zhan J, Sun Q Y. Changes of nitrogen components in wastelands of copper mine tailings with the formation of natural plant communities. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(21): 5958-5966.
- [11] Sun Q Y, Ren G J, Yang L Z, An S Q. Effect of natural plant communities on soil enzyme activities in deserted copper mine tailings dumps. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1): 37-43.
- [12] Zhan J, Sun Q Y. Diversity of free-living nitrogen-fixing microorganisms in wastelands of copper mine tailings during the process of natural ecological restoration. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(3): 476-487.
- [13] Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 257-282.
- [14] Boojar M M A, Goodarzi F. The copper tolerance strategies and the role of antioxidative enzymes in three plant species grown on copper mine. *Chemosphere*, 2007, 67(11): 2138-2147.
- [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] Dick W A, Tabatabai M A. Significance and potential uses of soil enzymes // Metting F B Jr, ed. *Soil Microbial Ecology: Application in Agricultural and Environmental Management*. New York: Marcel Dekker, 1992: 95-127.
- [17] Sun Q Y, Liu F C. Study on the effects of physical and chemical property changes of copper mine tailings on vegetation rehabilitation in Tongling copper mine. *Rural Eco-Environment*, 1998, 14(1): 21-23, 60-60.
- [18] Lei D M, Duan C Q. Restoration potential of pioneer plants growing on lead-zinc mine tailings in Lanping, southwest China. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(10): 1202-1209.

- [19] Zhang C B, Huang L N, Wong M H, Zhang J T, Zhai C J, Lan C Y. Characterization of soil physico-chemical and microbial parameters after revegetation near Shaoguan Pb/Zn smelter, Guangdong, P. R. China. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2006, 177(1/4): 81-101.
- [20] Li R S, Daniels W L. Nitrogen accumulation and form over time in young mine soils. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(1): 166-172.
- [21] Singh A N, Raghubanshi A S, Singh J S. Comparative performance and restoration potential of two *Albizia* species planted on mine spoil in a dry tropical region, India. *Ecological Engineering*, 2004, 22(2): 123-140.
- [22] Rutigliano F A, D'Ascoli R, de Santo A V. Soil microbial metabolism and nutrient status in a Mediterranean area as affected by plant cover. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(11): 1719-1729.
- [23] Sun Q Y, An S Q, Yang L Z, Wang Z S. Chemical properties of the upper tailings beneath biotic crusts. *Ecological Engineering*, 2004, 23(1): 47-53.
- [24] Khan A G, Kuek C, Chaudhry T M, Khoo C S, Hayes W J. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation. *Chemosphere*, 2000, 41(1/2): 197-207.
- [25] Otero X L, Huerta-Díaz M A, Macías F. Heavy metal geochemistry of saltmarsh soils from the Ría of Ortigueira (mafic and ultramafic areas, NW Iberian Peninsula). *Environmental Pollution*, 2000, 110(2): 285-296.
- [26] Roy A, Singh K P. Dynamics of microbial biomass and nitrogen supply during primary succession on blastfurnace slag dumps in dry tropics. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(3): 365-372.
- [27] Jia G M, Cao J, Wang C Y, Wang G. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziulin, northwest China. *Forest Ecology and Management*, 2005, 217(1): 117-125.
- [28] Wardle D A, Walker L R, Bardgett R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences. *Science*, 2004, 305(5683): 509-513.
- [29] Anderson T H, Joergensen R G. Relationship between SIR and FE estimates of microbial biomass C in deciduous forest soils at different pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(7): 1033-1042.
- [30] Sparling G P. Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling as indicators of soil health//Pankhurst C E, Doube B M, Gupta V V S R, eds. *Biological Indicators of Soil Health*. CAB International: Wallingford, 1997: 97-119.
- [31] Lombi E, Zhao F J, Wieshammer G, Zhang G Y, McGrath S P. In situ fixation of metals in soils using bauxite residue; Biological effects. *Environmental Pollution*, 2002, 118(3): 445-452.
- [32] Shi W, Bischoff M, Turco R, Konopka A. Long-term effects of chromium and lead upon the activity of soil microbial communities. *Applied Soil Ecology*, 2002, 21(2): 169-177.
- [33] Simona C, Angela R F, de Santo Amalia V. Suitability of soil microbial parameters as indicators of heavy metal pollution. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, 158(1): 21-35.
- [34] Anand M, Ma K M, Okonski A, Levin S, McCreath D. Characterising biocomplexity and soil microbial dynamics along a smelter-damaged landscape gradient. *Science of the Total Environment*, 2003, 311(1/3): 247-259.
- [35] Yang R Y, Tang J J, Chen X, Hu S J. Effects of coexisting plant species on soil microbes and soil enzymes in metal lead contaminated soils. *Applied soil Ecology*, 2007, 37(3): 240-246.
- [36] Gao Y, Zhou P, Mao L, Zhi Y E, Zhang C H, Shi W J. Effects of plant species coexistence on soil enzyme activities and soil microbial community structure under Cd and Pb combined pollution. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(7): 1040-1048.
- [37] Wang Y P, Shi J Y, Wang H, Lin Q, Chen X C, Chen Y X. The influence of soil heavy metals pollution on soil microbial biomass, enzyme activity, and community composition near a copper smelter. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, 67(1): 75-81.
- [38] Chen C L, Liao M, Huang C Y. Effect of combined pollution by heavy metals on soil enzymatic activities in areas polluted by tailings from Pb-Zn-Ag mine. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17(4): 637-640.
- [39] Sun Q Y, Tian S N. Tailings pollution and the activities of some soil enzymes. *Soils*, 2000, 32(1): 54-56.
- [40] Yang Z X, Liu S Q, Zheng D W, Feng S D. Effects of cadmium, zinc and lead on soil enzyme activities. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(6): 1135-1141.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 简曙光, 杨中艺, 简伟军. 多花黑麦草在酸化铅锌尾矿上的定植和生长. *应用生态学报*, 2004, 15(2): 255-260.
- [9] 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.
- [10] 安宗胜, 詹婧, 孙庆业. 自然植物群落形成过程中铜尾矿废弃地氮素组分的变化. *生态学报*, 2010, 30(21): 5958-5966.
- [11] 孙庆业, 任冠举, 杨林章, 安树青. 自然植物群落对铜尾矿废弃地土壤酶活性的影响. *土壤学报*, 2005, 42(1): 37-43.
- [13] 鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 2000: 257-282.
- [17] 孙庆业, 刘付程. 铜陵铜尾矿理化性质的变化对植被重建的影响. *农村生态环境*, 1998, 14(1): 21-23, 60-60.
- [39] 孙庆业, 田胜尼. 尾矿污染与几种土壤酶活性. *土壤*, 2000, 32(1): 54-56.

CONTENTS

Hyperspectral characteristics of typical subtropical trees at different levels of simulated acid rain	SHI Qilong, JIANG Hong, CHEN Jian, et al (5621)
Wind fields and the development of wind corridors in the urban metropolis of the Pearl River Delta	SUN Wu, WANG Yiming, WANG Yuelei, et al (5630)
Dynamics of canopy structure and understory light in montane evergreen broadleaved forest following a natural disturbance in North Guangdong	OU Yudian, SU Zhiyao (5637)
The influence of 4 species of preys on the development and fecundity of <i>Orius similis</i> Zheng	ZHANG Changrong, ZHI Junrui, MO Lifeng (5646)
Woody seedling regeneration in secondary succession of monsoon broad-leaved evergreen forest in Puer, Yunnan, Southwest China	LI Shuaifeng, LIU Wande, SU Jianrong, et al (5653)
Scale-dependent spatial variation of species abundance and richness in two mixed evergreen-deciduous broad-leaved karst forests, Southwest China	ZHANG Zhonghua, HU Gang, ZHU Jiedong, et al (5663)
The spatial heterogeneity of soil nutrients in a mid-subtropical <i>Castanopsis kawakamii</i> natural forest	SU Songjin, LIU Jinfu, HE Zhongsheng, et al (5673)
Effects of <i>Vetiveria zizanioides</i> L. growth on chemical and biological properties of copper mine tailing wastelands	XU Decong, ZHAN Jing, CHEN Zheng, et al (5683)
Effects of different irrigation regimes on characteristics of transpiring water-consumption of three desert species	SHAN Lishan, LI Yi, ZHANG Ximing, et al (5692)
The response of euhalophyte <i>Salicornia europaea</i> L. to different nitrogen forms	NIE Lingling, FENG Juanjuan, LÜ Sulian, et al (5703)
Dynamic analysis on spatial pattern of dominant tree species of cold-temperate coniferous forest in the succession process in the Pangquangou Nature Reserve	ZHANG Qindi, BI Runcheng, ZHANG Jintun, et al (5713)
Effects of AM fungi on the growth and nutrients of <i>Salvia miltiorrhiza</i> Bge. under different soil water and fertilizer conditions	HE Xueli, MA Li, MENG Jingjing, et al (5721)
The dynamics of soil respiration in a winter wheat field with plastic mulched-ridges and unmulched furrows	SHANGGUAN Yuxian, SHI Ripeng, HAN Kun, et al (5729)
Cattle dung composted by different methods had different effects on the growth and quality of soybean	GUO Liyue, LIU XueMei, ZHAN Lijie, et al (5738)
Nitrogen budget modelling at the headwaters of Urumqi River Based on the atmospheric deposition and runoff	WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, WANG Feiteng, et al (5747)
Evaluating the ecosystem sustainability of circular agriculture based on the energy theory: a case study of the Xingyuan circular agriculture demonstration site in Fuqing City, Fujian	ZHONG Zhenmei, WENG Boqi, HUANG Qinlou, et al (5755)
Effects of cold exposure and recovery on viability and energy consumption in the sub-adult female giant spiny frogs (<i>Paa spinosa</i>)	LING Yun, SHAO Chen, XIE Zhigang, et al (5763)
A comparison of night-interruption on diapause-averting among two populations of the cotton bollworm, <i>Helicoverpa armigera</i>	CHEN Yuansheng, TU Xiaoyun, CHEN Chao, et al (5770)
Effects of soil erosion control measures on soil organic carbon and total nitrogen in a small watershed	ZHANG Yanjun, GUO Shengli, NAN Yafang, et al (5777)
Comparative analysis of Lugu Lake watershed ecosystem function under different management authorities	DONG Rencai, GOU Yaqing, LI Siyuan, et al (5786)
Relationship between fish community diversity and environmental factors in the Lianjiang River, Guangdong, China	LI Jie, LI Xinhui, JIA Xiaoping, et al (5795)
Effect of dissolved oxygen level on metabolic mode in juvenile crucian carp	ZHANG Wei, CAO Zhendong, FU Shijian (5806)
Community composition of net-phytoplankton and its relationship with the environmental factors at artificial reef area in Xiangshan Bay	JIANG Zhibing, CHEN Quanzhen, SHOU Lu, et al (5813)
Emergency appraisal on the loss of ecosystem service caused by marine reclamation: a case study in the Taozi Bay	LI Ruiqian, MENG Fanping (5825)
Assessing the visual quality of urban waterfront landscapes: the case of Hefei, China	YAO Yumin, ZHU Xiaodong, XU Yingbi, et al (5836)
Review and Monograph	
Advances in ecological genomics	SHI Yongbin, LI Junmin, JIN Zexin (5846)
Advances in studies of ecological effects of ocean acidification	WANG Siru, YIN Kedong, CAI Weijun, et al (5859)
Advances in feeding ecology of <i>Acartia</i>	HU Simin, LIU Sheng, LI Tao, et al (5870)
Research progress on ammonia-oxidizing microorganisms in estuarine ecosystem	ZHANG Qiufang, XU Jirong, SU Jianqiang, et al (5878)
Recent progress in research on neutrophilic, microaerophilic iron(II)-oxidizing bacteria	LIN Chaofeng, GONG Jun (5889)
A comparison study on primary production in typical low-latitude seas (South China Sea and Bay of Bengal)	LIU Huaxue, SONG Xingyu, HUANG Honghui, et al (5900)
Advances in leaf maximum carboxylation rate and its response to environmental factors	ZHANG Yanmin, ZHOU Guangsheng (5907)
10-years of bird habitat selection studies in mainland China: a review	JIANG Aiwu, ZHOU Fang, QIN Yue, et al (5918)
Scientific Note	
The effects of incubation temperature on embryonic metabolism and hatchling behavior in the Red-banded Snake, <i>Dinodon rufonotatum</i>	SUN Wenjia, YU Xiao, CAO Mengjie, et al (5924)
Sensitivity analysis and dynamics of soil microbial biomass carbon, nitrogen and related parameters in red-yellow soil of tea garden with different fertilization practices	WANG Limin, QIU Shanlian, LIN Xinxian, et al (5930)
Effect of fertilizers on Cd uptake of two edible amaranthus herbs	LI Ningyu, LI Zhian, ZHUANG Ping, et al (5937)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 18 期 (2012 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 18 (September, 2012)

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:1000717	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