

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

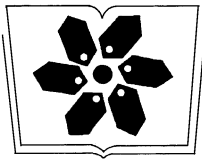
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第7期 Vol.33 No.7 **2013**

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 33 卷 第 7 期 2013 年 4 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 线虫转型发育和寄主识别的化学通讯研究进展..... 张 宾,胡春祥,石 进,等 (2003)
- 生物物种资源监测原则与指标及抽样设计方法..... 徐海根,丁 晖,吴 军,等 (2013)

个体与基础生态

- 呼伦贝尔草原人为火空间分布格局..... 张正祥,张洪岩,李冬雪,等 (2023)
- 青藏高原草地地下生物量与环境因子的关系..... 杨秀静,黄 玫,王军邦,等 (2032)
- 1961—2010 年桂林气温和地温的变化特征 陈 超,周广胜 (2043)
- 黄泥河自然保护区狗冬季卧息地选择..... 朱洪强,葛志勇,刘 庚,等 (2054)
- 青藏高原草地植物叶解剖特征..... 李全发,王宝娟,安丽华,等 (2062)
- 青藏高原高寒草甸夏季植被特征及对模拟增温的短期响应..... 徐满厚,薛 娴 (2071)
- 高温影响番茄小孢子发育的细胞学研究..... 彭 真,程 琳,何艳军,等 (2084)
- 黄土丘陵半干旱区柠条林株高生长过程新模型..... 赵 龙,王振凤,郭忠升,等 (2093)
- 柝属 7 种植物种子的发芽抑制物质研究..... 李庆梅,刘 艳,刘广全,等 (2104)
- 水分胁迫和杀真菌剂对黄顶菊生长和抗旱性的影响..... 陈冬青,皇甫超河,刘红梅,等 (2113)
- 铜尾矿废弃地与相邻生境土壤种子库特征的比较..... 沈章军,欧祖兰,田胜尼,等 (2121)
- 云雾山典型草原火烧不同恢复年限土壤化学性质变化..... 李 媛,程积民,魏 琳,等 (2131)
- 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄果实硝酸盐含量的影响..... 周振江,牛晓丽,李 瑞,等 (2139)
- 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响..... 李 娟,廖洪凯,龙 健,等 (2147)
- 自生固氮菌活化土壤无机磷研究..... 张 亮,杨宇虹,李 倩,等 (2157)
- 德国鳶尾对 Cd 胁迫的生理生态响应及积累特性 张呈祥,陈为峰 (2165)
- 施污土壤重金属有效态分布及生物有效性..... 铁 梅,宋琳琳,惠秀娟,等 (2173)
- 基于叶面积指数改进的直角双曲线模型在玉米农田生态系统中的应用..... 孙敬松,周广胜 (2182)
- 中稻田三种飞虱的捕食性天敌优势种及农药对天敌的影响..... 林 源,周夏芝,毕守东,等 (2189)

种群、群落和生态系统

- 珠江口超微型浮游植物时空分布及其与环境因子的关系..... 张 霞,黄小平,施 震,等 (2200)
- 输水前后塔里木河下游物种多样性与水因子的关系..... 陈永金,刘加珍,陈亚宁,等 (2212)
- 南海西北部陆架区鱼类的种类组成与群落格局..... 王雪辉,林昭进,杜飞雁,等 (2225)
- 滇西北高原碧塔湖滨沼泽植物群落分布与演替 韩大勇,杨永兴,杨 杨 (2236)
- 石羊河下游白刺灌丛演替过程中群落结构及数量特征..... 靳虎甲,马全林,何明珠,等 (2248)

资源与产业生态

- 土壤深松和补灌对小麦干物质生产及水分利用率的影响..... 郑成岩,于振文,张永丽,等 (2260)

豆科绿肥及施氮量对旱地麦田土壤主要肥力性状的影响..... 张达斌,姚鹏伟,李 婧,等 (2272)

沟壑全覆盖种植方式对旱地玉米生长及水分利用效率的影响..... 李 荣,侯贤清,贾志宽,等 (2282)

城乡与社会生态

北京北护城河河岸带的温湿度调节效应 吴芳芳,张 娜,陈晓燕 (2292)

西安太阳总辐射时空变化特征及对城市发展的响应..... 张宏利,张纳伟锐,刘敏茹,等 (2304)

研究简报

安徽琅琊山大型真菌区系多样性..... 柴新义,许雪峰,汪美英,等 (2314)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿通知 (2320)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 318 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-04



封面图说: 金灿灿的小麦熟了——小麦是世界上最早栽培的农作物之一,是一种在世界各地广泛种植的禾本科植物,起源于中东地区。全世界大概有 43 个国家,近 35%—40% 的人口以小麦为主要粮食。小麦是禾谷类作物中抗寒能力较强的越冬作物,具有一定的耐旱和耐盐碱能力。中国的小麦分布于全国各地,主要集中于东北平原、华北平原和长江中下游一带。小麦秋季播种、冬季生长、春季开花、夏季结实。子粒含有丰富的淀粉、较多的蛋白质、少量的脂肪,还有多种矿物质元素和维生素 B,是一种营养丰富、经济价值较高的粮食。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201201050020

沈章军, 欧祖兰, 田胜尼, 汤伟. 铜尾矿废弃地与相邻生境土壤种子库特征的比较. 生态学报, 2013, 33(7): 2121-2130.

Shen Z J, Ou Z L, Tian S N, Tang W. Characters of soil seed bank in copper tailings and its adjacent habitat. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2121-2130.

铜尾矿废弃地与相邻生境土壤种子库特征的比较

沈章军^{1,2,*}, 欧祖兰¹, 田胜尼³, 汤 伟¹

(1. 合肥师范学院生命科学系, 合肥 230061; 2. 安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230039;

3. 安徽农业大学生命科学院, 合肥 230036)

摘要: 土壤种子库是植被群落的重要组成部分, 其特征决定了群落的演替方向。对铜陵杨山冲尾矿库 6 个植被群落及相邻两处生境的土壤种子库进行了研究。结果表明, 尾矿内各植被群落种子库的种子密度间存在较大差异, 变化范围为 57—593 粒/m², 平均种子密度为 370 粒/m², 尾矿坝体和周围山体种子库种子密度分别为 999 和 121 粒/m², 各样地土壤中种子均主要集中在 0—5 cm 范围内。尾矿种子库与坝体种子库间的相似性指数大于其与周围山体种子库的相似性指数, 但尾矿内各植被群落种子库间的相似性较差, 相似性指数的变化范围为 0.308—0.636。可见, 群落微生境对土壤种子库的种子密度和物种组成产生了较大的影响。尾矿种子库种类与地上植被的平均相似指数为 0.355, 低于坝体种子库种类与地上植被相似性系数。3 处样地土壤种子库的物种多样性、丰富度和均匀度指数均表现为坝体>尾矿>山体。尾矿种子库在农田土壤中萌发并正常生长的幼苗为 16 科 44 属 53 种, 而在尾矿基质中仅为 9 科 36 属 45 种, 均以禾本科、菊科和豆科植物萌发和生长状况较好, 这 3 科构成了尾矿地上植被的主要类型。尾矿种子库在尾矿基质中萌发成活率为 62.2%—91.2%, 约为坝体和山体土壤种子库在尾矿基质中萌发成活率的 2 倍。说明, 组成尾矿种子库的种子大部分已经适应了尾矿的极端恶劣环境或者其本身就是耐性极强的植物类型。

关键词: 铜尾矿; 微生境; 种子密度; 土壤种子库; 相似性指数

Characters of soil seed bank in copper tailings and its adjacent habitat

SHEN Zhangjun^{1,2,*}, OU Zulan¹, TIAN Shengni², TANG Wei¹

1 Department of Life Science, Hefei normal University, Hefei 230061, China

2 School of Resources and Environment Engineering, Anhui University, Hefei 230039, China

3 School of Life Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

Abstract: Soil seed bank is an important part of plant community, which dominates the development of community succession. Soil seed bank characteristics of copper tailings and its adjacent habitat were investigated. The results showed that the seed density of the seed bank between different community microhabitats in the copper tailings were different, the range of which was 57—593 grains/m². The average seed density of the seed bank in the tailings was 370 grains/m², and that in the tailings dam and the mountains was 999 and 121 grains/m², respectively. The difference of the sorenson's coefficients on species between the seed banks in the tailings was greater, the range of which was 0.308—0.636. These showed that the effects of microhabitat on seed density and species of soil seed bank was huge. The seeds of the soil seed banks in all the plots concentrated in 0—5 cm layer. The sorenson's coefficient of species between the tailings seed bank and the vegetation was 0.355, and lower than the coefficient of species between the tailings dam and the vegetation. The species diversity, abundance and evenness index of the soil seed banks all displayed the followed trend: the tailings dam >

基金项目: 安徽省高校省级优秀青年人才基金项目(2010SQRL150); 安徽省高校自然科学研究项目(KJ2010B438); 国家大科学工程(WGB-1005)资助

收稿日期: 2012-01-05; **修订日期:** 2012-05-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shenzhangjun@163.com

the tailings > the mountains. The seedling of 16 families 44 genera 53 species from the tailings seed bank were germinated and survived in the farmland soil substrates, and only 9 families 36 genera 45 species in the tailings substrates survived. The plants germinated and grow well all belonged to Gramineae, Composite and Leguminosae, and the three families were also constituted the main vegetation types of the tailings. The seedling germination and survival rate of the tailings seed bank in the tailings substrates was 62.2%—91.2%, which was about 2 times of the dam soil seed bank and the mountains soil seed bank. This indicated that the seeds of the tailings seed bank already adapted to the extreme environment of the tailing, or they were tolerant plants. The study suggested that the microhabitat affected the seed density and the species composition of the copper tailings seed bank, through human activities changing microhabitat conditions could improve seed density and species diversity of soil seed bank, thus would speed up the process of succession and recovery of the tailings vegetation.

Key Words: copper tailings; microhabitat; seed density; soil seed bank; sorensen's coefficient

铜尾矿废弃地是一种人为原生裸地,其自然生态恢复过程表现为典型的生态系统原生演替过程,其植被的自然恢复是十分缓慢的过程。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自然植物群落^[1]。土壤种子库指土壤及其表面凋落物中所有具生命活力种子的总和^[2]。土壤种子库是植物群落的重要组成部分,为植被的天然更新提供了重要的物质基础^[3],其对于退化生态系统的植被恢复与重建具有重要的理论和实践意义^[4-5]。土壤种子库含有许多在植被演替中起重要作用的乡土植物先锋种类,它们对于恶劣环境具有特别的耐性和适应力,而相邻生境往往是种子库中这些乡土植物的种子来源。

目前土壤种子库已成为国际恢复生态学的研究热点,国内外在这一领域开展了大量研究^[5-6]。国内学者相继开展了森林和典型草原的土壤种子库研究^[7-17],以及荒漠区植被群落种子库等的研究^[18-19]。关于矿区土壤种子库的研究国内多集中在露天煤矿排土场土壤种子库与不同植被恢复措施下土壤种子库构成特征的静态监测方面^[20-21]以及重金属矿区人为引入土壤种子库的植被恢复实验研究^[22-24],对于铜尾矿此类矿业废弃地自然植被恢复过程中土壤种子库的研究报道甚少。

安徽铜陵是我国重要的产铜地区之一,冶铜历史悠久,尤其是解放后大规模开采过程中形成的大量尾矿占用了大面积土地,其中大型尾矿库有五公里尾矿库、黑沙河尾矿库、铜官山尾矿库、凤凰山尾矿库、杨山冲尾矿库五处,其总面积约 280 万 m²^[25]。其中杨山冲尾矿库自 1991 年停用废弃以来一直处于植被自然恢复阶段。

地表植被和土壤性状是影响土壤种子库特征的两大控制因素^[26],然而诸如水分、温度、氧气、光照、土壤酸碱、土壤盐分和埋深等生态条件却影响了种子萌发和幼苗的正常生长^[27],微生境间这些生态因子的差异往往是造成同区域土壤种子库特征发生巨大变化的原因。本文试图对铜尾矿废弃地内不同植被生境及其相邻生境土壤种子库的特征进行研究,分析相邻生境土壤种子库间存在的相互关系,并以农田土和尾矿为基质进行对照萌发实验,探讨自然演替过程中影响尾矿种子库变化的因素及尾矿对其种子萌发的影响,为提高土壤种子库在矿业废弃地修复中作用效率、加快植被恢复的进程提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本实验取材于铜陵杨山冲铜尾矿场,位于安徽省南部,长江中下游南岸,地处 30°56'42"N, 117°43'28"E,属亚热带湿润气候区,季节特征分明,春季较短,气候温和、雨量充沛;夏季多雨炎热,伏热干旱,年均气温 16.2℃,夏季平均气温 27.4℃,年平均太阳辐射总量 114.8 kJ/cm²,无霜期平均为 230 d,年均降水 1390 mm,全年平均湿度在 75%—80%之间;地面主导风向为东北(冬)、西南(夏)。杨山冲尾矿场海拔较高,三面环山,一面筑坝,由尾矿排放堆积而成(图 1)。该尾矿场坝高约 100 m,面积达 20 hm²,停止排放时间约为 20 a,且该库人为干涉较少,风蚀、水蚀较严重。

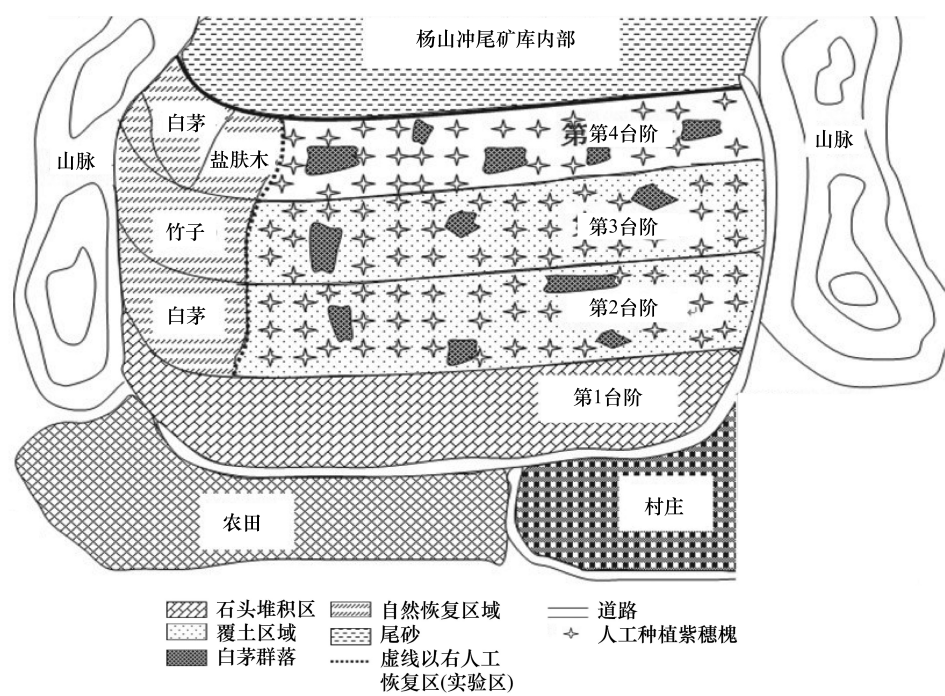


图1 杨山冲尾矿废弃地人工恢复坝体坡面水平方位图

Fig.1 Level location maps of artificial restoration area in the copper tailings dam

1.2 地上植被调查

植被调查在2010年8月中旬进行。杨山冲尾矿库内植被主要为草本，植物的调查采用不同植被类型(表1)按样地随机取样点，每个群落样地设置4个1 m×1 m的样方，详细记录每个样方内的植被盖度、种类组成及每种植物的个体数量(表示地上植被密度)。尾矿坝体和周围山体分别设4个5 m×5 m样方，进行乔灌木调查，且每个灌木样方中央设置2个1 m×1 m的草本样方，调查地表现存植被种类和生长情况。标记所调查样方。

表1 铜尾矿库的植物群落类型及特征

Table 1 The types and characters of plant community in the copper tailing			
群落类型 Community	种数 Number of species	盖度/% Coverage	优势植物 Dominant species
A	12	75—85	白茅 <i>Imperata cylindrica</i> , 狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i> , 天蓝苜蓿 <i>Medicago lupulina</i> , 中华结缕草 <i>Zoysia sinica</i>
B	21	60—75	白车轴草 <i>Trifolium repens</i> , 野艾蒿 <i>Artemisia lavandulaefolia</i> , 一年蓬 <i>Erigeron annuus</i> , 白茅 <i>Imperata cylindrica</i>
C	7	30—40	月见草 <i>Oenothera erythrosepala</i> Borb., 白茅 <i>Imperata cylindrica</i>
D	9	70—85	中华结缕草 <i>Zoysia sinica</i> , 剪刀股 <i>Lxeris debilis</i> , 狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>
E	7	70—85	节节草 <i>Hippochaete ramosissimuen</i> , 中华结缕草 <i>Zoysia sinica</i> , 金鸡菊 <i>Coreopsis basalis</i>
F	5	30—60	五节芒 <i>Miscanthus floridulu</i> , 白茅 <i>Imperata cylindrica</i>

A 表示白茅+狗牙根群落 *Imperata cylindrica*+ *Cynodon dactylon* community, B 表示白车轴草+野艾蒿+一年蓬 *Trifolium repens*+ *Artemisia lavandulaefolia*+ *Erigeron annuus* community, C 表示月见草群落 *Oenothera erythrosepala* community, D 表示中华结缕草+剪刀股群落 *Zoysia sinica*+ *Lxeris debilis* community, E 表示节节草群落 *Hippochaete ramosissimuen* community, F 表示五节芒群落 *Miscanthus floridulu* community

调查发现杨山冲尾矿库内自然定居植物共42种，隶属于13科36属，主要包括禾本科10种，豆科6种，菊科6种，十字花科5种。全部植物中，1—2年生草本植物21种，多年生草本植物20种，形成6种相对稳定的演替群落和单种斑块。其中白茅(*Imperata cylindrica*)、五节芒(*Miscanthus floridulu*)、狗牙根(*Cynodon*

dactylon)、白车轴草(*Trifolium repens*)和蕨类植物节节草(*Hippochaete ramosissima*)已被证实在尾矿场成功定居。在该废弃地的东北角 2008 年建人工植被恢复实验区,约有 2000 m²,内主要栽种有天南苜蓿(*Medicago lupulina*)、决明子(*Cassia tora*)、金鸡菊(*Coreopsis basalis*)、苕麻(*Boehmeria*)、芦苇(*Phragmites australis*)和香蒲(*Typha angustifolia*)等,自然生长有一年蓬(*Erigeron annuus*)、白茅、节节草。实验区内植被盖度达 85%—100%。

杨山冲尾矿废弃地坝体人工恢复坡面主要包括 9 种优势植物种群,分别为:中华结缕草、白茅、五节芒、矛叶荩草(*Arthraxon prionodes*)、野菊花(*Flos Chrysanthemi*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、黄荆(*Vitex negundo*)和野花椒(*Zanthoxylum simullans*)。总盖度达到 98%—100%。

杨山冲尾矿库 3 面山体主要为人工栽种马尾松(*Pinus massoniana*)林,林边伴生有毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)、野菊花、紫穗槐、黄荆、野花椒和野蔷薇(*Rosa multiflora*)。盖度达到 100%。

1.3 土壤种子库取样

为了研究尾矿基质对土壤种子库储存的影响,于 2011 年 3 月,取经冬没萌发土壤种子库。根据植被调查所标记尾矿植物群落、坝体和周围山体的样方,在每个样方的中央取 20 cm × 20 cm × 10 cm 土柱,分 0—5 cm 和 5—10 cm 两层取样,共取 80 份土样。将土样装入塑料袋带回。

1.4 实验方法

充分混合同一样地同层重复土样^[28-29],根据重量分成 2 份,分别以杨山冲尾矿库内的尾矿和农田土壤为基质,用幼苗萌发法进行物种鉴定^[12-13,28-31]。在萌发前对土样进行筛洗,除去其中的植物残余器官及其它杂物,以缩短萌发周期。选 50 cm × 25 cm × 25 cm 塑料盘为萌发床,填充 15 cm 基质,基质中种子库均通过高温灭活(用烘箱经过 120 °C 高温烘烤 12 h),将土样分别平铺于基质表面,厚度约为 1.5 cm,置于温室内进行发芽试验。每天早晚各浇水 1 次,以保持土壤湿润,光照为 12 h,温室温度范围为 20—27 °C。每 10 d 记录 1 次发芽数量,并定期记录其生长情况;当萌发数量较少时翻动土壤,保证其继续萌发,直至连续 2 周无种子萌发为止。幼苗继续生长 30 d,鉴别植物种类。

尾矿基质 pH 值为 6.85—8.43,总氮含量约为 900 mg/kg,有效磷含量约为 1.40 mg/kg,全钾含量为 220 mg/kg,重金属主要表现为 Cu、Cd、Zn、Pb 含量较高,其总量分别达到 950、3.20、170 和 70 mg/kg。

1.5 数据处理和分析

采用 Sorensen's coefficient 指数^[13,32]计算土壤种子库与地上植被(或其它种子库)的相似性。

$$CC = 2c / (s_1 + s_2)$$

式中,CC 是 Sorensen 指数的值;c 是在地上植被与土壤种子库中都出现的物种数目;s₁ 和 s₂ 分别是地上植被和土壤种子库中出现的物种数目。

根据各样地种子库中的种子数量及其种类,计算大多土壤种子库研究^[11, 17, 19]采用的 Margalef 丰富度指数(1)、Shannon-Wiener 多样性指数(2)以及在此基础上进行 Pielou 均匀度指数(3):

$$R = (S - 1) / \ln N \quad (1)$$

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$E = H / \ln S \quad (3)$$

式中,S 为各样地种子库中物种总数,N 为各样地种子库中所有种的种子总数,P_i为各样地第 i 种植物的种子数占该样地种子库中总种子数比例。

采用 Excel 和 SPSS11.5 统计软件进行数据统计分析,折算出每个样地土壤种子库萌发的种子数量。

2 结果与分析

2.1 土壤种子库种子密度及主要物种科类

尾矿内各样地种子库萌发结果(表 2)表明,尾矿库自然植被群落土壤种子库 80.9%—100% 的萌发种子

集中在 0—5cm 表层尾矿中,月见草群落、五节芒群落和节节草群落 5—10cm 尾矿层种子库中未见有种子萌发。

尾矿库中不同植物群落种子库间种子密度差异较大,表现为白车轴草+野艾蒿+一年蓬群落(593 粒/m²) > 节节草群落(537 粒/m²) > 白茅+狗牙根群落(533 粒/m²) > 中华结缕草+剪刀股群落(409 粒/m²) > 月见草群落(78 粒/m²) > 五节芒群落(57 粒/m²)。尾矿坝体土壤库种子密度达到 999 粒/m²,是尾矿内种子库平均密度(370 粒/m²)的 2 倍多。尾矿三面山体土壤种子库种子密度相对最低,约为尾矿内种子库平均密度的 1/3。可见,人工覆土改变微生境有利于土壤种子库密度的增加,演替成熟的山体乔灌木群落土壤种子库密度相对较低。

表 2 不同样地土壤种子库的种子密度及其与植被的相似性

Table 2 Seed density and sorenson's coefficient in seed bank of different plots

样地 Plots	种数 Number of species	种子密度 Seed density/(粒/m ²)		合计 Total	0—5 cm/% Percentage	种子库与植被相似度 Sorensen's coefficient
		0—5 cm	5—10 cm			
A	21	431	102	533	80.9	0.456
B	31	504	89	593	85.0	0.491
C	11	78	0	78	100	0.144
D	14	375	34	409	91.7	0.375
E	12	537	0	537	100	0.279
F	11	57	0	57	100	0.384
G	28	775	224	999	77.6	0.503
H	11	89	32	121	73.6	0.247

A: 白茅+狗牙根群落 *Imperata cylindrica*+*Cynodon dactylon* community, B: 白车轴草+野艾蒿+一年蓬 *Trifolium repens*+*Artemisia lavandulaefolia*+*Erigeron annuus* community, C: 月见草群落 *Oenothera erythrosepala* community, D: 中华结缕草+剪刀股群落 *Zoysia sinica*+*Lxeris debilis* community, E: 节节草群落 *Hippochaete ramosissimun* community, F: 五节芒群落 *Miscanthus floridulu* community, G: 尾矿坝体 Tailings dam, H: 尾矿三面山体 Mountains around the tailings

铜尾矿种子库在正常土壤中可萌发种子为 16 科 44 属 53 种,其中禾本科、菊科和豆科占绝对优势(表 3),这与尾矿地上优势植被类型相一致。但与地上植被物种比较发现,尾矿种子库中出现的漆树科、松科、蔷薇科和芸香科植物并没有在尾矿中生长,苦木科也仅在白茅+狗牙根群落中发现一棵臭椿。可见,该尾矿演替现阶段的基质条件并未达到上述科类植物种子萌发和正常生长的要求。

表 3 不同样地土壤种子库的主要植物类群及其比例(%)

Table 3 Species and percentage in seed bank of different plots

科 Families	A	B	C	D	E	F	G	H
禾本科 Gramineae	63.09	28.50	39.75	44.74	42.64	70.18	33.93	17.36
菊科 Composite family	8.63	36.76	26.92	33.01	22.16	15.79	27.43	22.31
豆科 Leguminosae	18.76	21.25	6.41	8.80	21.56	7.02	18.02	8.26
香蒲科 Typhaceae	6.00	2.02	2.56	0	8.01	0	0	0
漆树科 Anacardiaceae	1.13	0	0	1.71	2.42	0	3.90	3.31
松科 Pinaceae	1.69	0	3.84	0	0	0	0	48.76
柳叶菜科 Onagraceae	1.83	0	16.67	0	0	5.26	0	0
车前草科 Plantaginaceae	0	1.52	0	5.13	0	0	2.80	0
蓼科 Polygonaceae	0	0.84	0	3.91	3.17	0	0	0
蔷薇科 Rosaceae	0	1.35	0	2.69	0	0	2.00	0
苦木科 Simarubaceae	0.56	0.51	0	0	0	0	0.80	0
莎草科 Cyperaceae	0	4.22	3.85	0	0	0	0	0
石竹科 Caryophyllaceae	0	1.01	0	0	0	0	1.40	0
马鞭草科 Verbenaceae	0	2.02	0	0	0	0	3.20	0
芸香科 Rutaceae	0	0	0	0	0	1.75	4.20	0
伞形花科 Umbelliferae	0	1.18	0	0	0	0	2.31	0

2.2 土壤种子库与地上植被及各种子库间的相似性

表2表明,尾矿内各群落样地土壤种子库与地上植被的相似性为0.144—0.491。总体表现为,尾矿坝体土壤种子库与地上植被的相似性最高,三面山体最低。

尾矿内不同群落土壤种子库间的相似性存在较大差异性(表4),变化范围为0.308—0.636,其中五节芒群落与月见草群落种子库间相似性最高,中华结缕草+剪刀股群落与节节草群落种子库间相似性最低,可见不同的地上植被类型及微地形环境可有效影响土壤种子库的种子组成。尾矿坝体种子库与尾矿内种子库间的相似性较三面山体种子库与尾矿内种子库间相似性高,但月见草群落和节节草群落的土壤种子库与坝体种子库间相似性偏低(表4)。

表4 不同样地土壤种子库之间的相似度

Table 4 Sorensen's coefficient among seed banks of different plots

样地 Plots	A	B	C	D	E	F	G	H
A								
B	0.549							
C	0.438	0.488						
D	0.457	0.545	0.320					
E	0.424	0.333	0.348	0.308				
F	0.438	0.341	0.636	0.320	0.435			
G	0.653	0.552	0.359	0.476	0.250	0.462		
H	0.353	0.296	0.293	0.357	0.402	0.314	0.410	

2.3 各样地土壤种子库多样性特征

从表5可以得出,尾矿内土壤种子库平均丰富度为2.74,低于坝体土壤种子库的丰富度,但较山体土壤种子库高。与丰富度的趋势相同,尾矿内土壤种子库的多样性指数平均值为2.424,均匀度指数的平均值为0.4359,同样低于坝体土壤种子库而较山体土壤种子库高。可见,虽然尾矿与坝体植被的演替时间相同,但由于人工对基质和植被类型的干扰,坝体植被的多样性指数高,导致坝体土壤种子库的物种多样性高于尾矿。山体为人工栽种植被,物种单一,加上植被密闭度高,降低了土壤种子库的物种多样性。

表5 不同样地土壤种子库的物种多样性

Table 5 Species diversity of soil seed bank at different plots

样地 Plots	Margalef 丰富度数 R	Shannon-Wiener 多样性指数 H	Pielou 均匀度指数 E
A	3.19	2.785	0.4348
B	4.54	3.068	0.4805
C	2.30	2.288	0.5018
D	2.16	2.480	0.4124
E	1.75	2.084	0.3315
F	2.47	1.837	0.4544
G	3.91	3.155	0.4568
H	2.09	1.680	0.3503

2.4 铜尾矿对土壤种子库萌发的影响

由图2可以看出,各样地土壤种子库在尾矿基质中萌发并成活的幼苗株数明显少于在农田土壤中萌发成活的幼苗个数。农田土壤基质中成活的幼苗数量随着萌发时间的延长有显著增加的趋势,但尾矿基质中萌发成活的幼苗数在30 d之前表现为增加,30—50 d之间变化不大,坝体和山体土壤种子库中成活的幼苗数甚至表现出减少的趋势,观察发现其幼苗出现枯黄死亡根部发霉烂死的现象。

尾矿基质恶劣的理化性质直接导致土壤种子库部分植物种子不能萌发或幼苗死亡。尾矿种子库能萌发生长的植物为9科36属45种,漆树科、松科、蔷薇科、芸香科、苦木科、石竹科和伞形科植物在室内尾矿基质

中没能萌发正常生长。

3 讨论

铜陵杨山冲铜尾矿表层(0—5 cm 层)种子库的种类和种子密度均大于深层尾矿,达到总种子密度的80%以上,表明铜尾矿种子库存在垂直分布差异规律,这与其它区域的研究结果相同^[33-35]。该尾矿主要为35 μm 的细粉砂粒组成,植被包括隐花植物结皮和草本维管植物群落,处在自然演替的初期,表面缺少腐殖质层,暴雨季节,水蚀严重,地表容易形成板结,导致植物种子难以进入尾矿深层,这可能是尾矿内种子存在不同层次分布差异的主要原因。坝体和山体坡面深层土壤中的种子密度占22%以上,高于尾矿深层土壤的种子库所占比例,是由于这两处生境基质被人工改良或是演替时间较长,地表结构疏松,通风和透水性能较好,种子容易进入深层作为种子库保存。

对于尾矿内6处不同植被自然演替群落,土壤种子库的种子密度存在较大差异。其中月见草群落和五节芒群落土壤种子库的种子密度最低,约为尾矿种子库平均种子密度的1/6。这两种植被下种子库的种子密度较低,一方面受其所在位置、种子库的来源等因素的影响,同时也受其基质极度酸化的影响。这两处样地 pH 值为4.37—6.49,酸化较为严重。极性酸碱度都是使土壤种子库种子失活的原因^[27]。

地上植被是土壤种子库中种子的主要来源,与种子库中植物种类组成有着密切关系。土壤种子库中的种子能够直接参与地上植被的更新和演替,研究尾矿库种子库的种类和数量,对于尾矿废弃地的植被恢复和群落的演替有着重要意义。在本研究中,铜尾矿种子库与地上植被有着密切的关系,平均相似性系数值为0.355,大于周围山体土壤种子库与地上植被的相似度,说明地上植被已经成为尾矿种子库种子雨的主要来源之一,在尾矿废弃地的生态演替过程中为植被的恢复提供充足的恢复物质源。Zhao 等^[14]在科尔沁沙质草地放牧和围封条件下的土壤种子库研究中,认为地上植被是影响土壤种子库密度原因之一,这与本研究结论相同。但 Li 等^[36]在对桂林岩溶石山阴香群落土壤种子库研究中发现土壤种子库与植被之间没有必然联系。Zhao 等^[11]对科尔沁沙地和 Liu 等^[37]对湖南茶陵湖里沼泽的研究结果表明土壤种子库和地上植被组成上的相似性程度较高,分别为0.630和0.596。而在本实验中,尾矿种子库与地上植被间的相似性系数仅为0.144—0.491。尾矿种子库与地上植被的不相似性可能是由于地上一些物种对土壤种子库形成的贡献较小及其物种特性造成的,如中华结缕草和节节草等通过营养体繁殖,对土壤种子库的组成不起作用。另外,周围生境中丰富种子源也降低了尾矿种子库与地上植被的相似性。Bai 等^[38]在对黄土丘陵沟壑区退耕地的研究中发现土壤种子库与地上植被间的不相似性也较高。这些研究结果之间的差异可能主要是由于所在生境和演替阶段的不同造成的,本研究为尾矿废弃地植被自然演替初期阶段环境条件下的结果。

演替阶段的差异也影响了土壤种子库的种类和数量。在本研究,尾矿坝体群落演替时间虽然与尾矿相同,但由于人工的干扰作用,演替速度加快,进入较高级的演替阶段,群落多样性较尾矿高,其土壤种子库的种子密度及种类也高于尾矿。尾矿库周围山体为成熟的马尾松群落,物种多样性低,植被郁闭度高,土壤种子库的种子密度相对最低。Dessaint 等^[39]对可耕地的研究发现,随着演替的进行,土壤种子库的密度增加,但这种增加并不是无限的,顶极群落的土壤种子库密度往往较小。一般情况下,不同植被或群落类型土

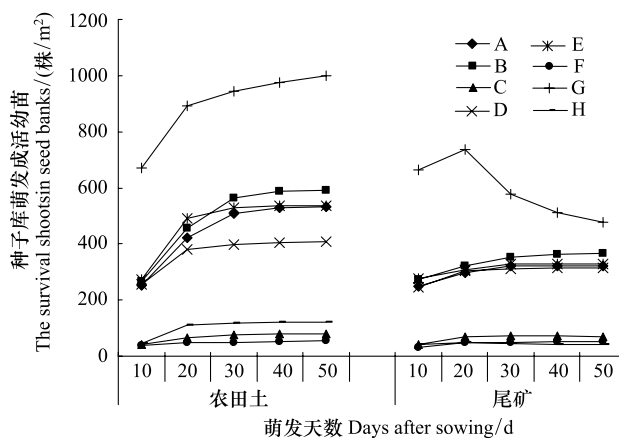


图2 各样地土壤种子库在两种基质中萌发成活的幼苗数

Fig.2 The survival shoots of soil seed banks at different plots

A: 白茅+狗牙根群落 *Imperata cylindrica* + *Cynodon dactylon* community, B: 白车轴草+野艾蒿+一年蓬 *Trifolium repens* + *Artemisia lavandulaefolia* + *Erigeron annuus* community, C: 月见草群落 *Oenothera erythrosepala* community, D: 中华结缕草+剪刀股群落 *Zoysia sinica* + *Lxeris debilis* community, E: 节节草群落 *Hippochaete ramosissimn* community, F: 五节芒群落 *Miscanthus floridulu* community, G: 尾矿坝体 Tailings dam, H: 尾矿三面山体 Mountains around the tailings

壤种子库的种子密度具有较大的差异,草地大于森林^[40]。本研究结果与以上两种结论基本相似。

相邻生境由于有相同的气候条件,加上相近的种子雨来源,土壤种子库特征的差异性更多体现在基质条件和微生境环境变化对种子库组成的影响,微生境能影响土壤种子库的水平分布^[41]。本实验中,铜尾矿内各群落下种子库间的相似性差异较大(表4),盖度较高的白茅+狗牙根群落和白车轴草+野艾蒿+一年蓬群落下种子库的物种丰富度明显高于低盖度的五节芒群落和月见草群落,但盖度相对较高的中华结缕草+剪刀股群落和节节草群落种子库的种子种类又低于相同盖度的其它群落。研究发现,中华结缕草+剪刀股群落植被高度相对较低,裸露地多为地衣、藻类和苔藓形成的结皮,种子不易附着沉库。节节草群落位于山坳低洼处,雨季容易积水,造成部分植物种子失活,这或许是其种子库种子类型较少的原因。可见,在尾矿中不同的群落植被类型和基质理化性质影响了尾矿种子库的种子组成。

铜陵铜尾矿与相邻两处生境土壤种子库间的物种多样性指数、丰富度和均匀度具有相同的变化趋势,均表现为坝体>尾矿>山体。Bao等^[42]研究了不同放牧方式对草原种子库的影响,认为自然状态下土壤种子库物种多样性越高物种丰富程度越大,物种对生境的分割程度越高,因而物种均匀度降低。但在本研究中,尾矿坝体为人工间距栽种低矮灌木和高草植物,周围山体以用材为目的栽种单一的马尾松,造成地上植被物种均匀度的变化,也影响了土壤种子库物种的均匀度。

在本研究中,尾矿基质对种子的萌发和幼苗的正常生长造成了抑制作用。尾矿种子库在农田土壤基质中萌发并正常生长的幼苗为16科44属53种,而在尾矿基质中仅为9科36属45种,其中禾本科、菊科和豆科植物萌发和生长状况较好,这3科构成了尾矿内地上植被的主要类型。研究还发现,尾矿坝体和周围山体土壤种子库在尾矿基质中的萌发效率低于尾矿种子库。以50 d成活幼苗数为例,尾矿种子库在尾矿中的萌发成活率为62.2%—91.2%,而其它两处样地土壤种子库在尾矿中的萌发成活率分别为47.8%和33.9%,约为尾矿种子库成活率的一半。可见,组成尾矿种子库的植物种类大部分已经适应了尾矿的极端恶劣环境或者其本身就是耐性极强的植物类型,尾矿种子库中的这些植物种类对于尾矿的恢复和地上植被类型的更替具有重要的意义。

综上所述,尾矿内微生境的差异影响了种子库的种子密度及种类,人为改变基质因子或植被类型可明显改变土壤种子库的特征。在尾矿基质中尾矿种子库萌发成活率要明显大于相邻生境中的土壤种子库,这为尾矿植被群落的演替提供物种基础。

References:

- [1] Sun Q Y, Yang L Z, An S Q, Chen Z, Deng Z G. Tailings of natural ecological restoration. The Second National Symposium on Complex Ecological and Recycling Economy, 2005.
- [2] Thompson K, Grime J P. Seasonal variation in the seed banks of herbaceous species in ten contrasting habitats. *Journal of Ecology*, 1979, 67(3): 893-921.
- [3] Moles A T, Drake D R. Potential contributions of the seed rain and seed bank to regeneration of native forest under plantation pine in New Zealand. *New Zealand Journal of Botany*, 1999, 37(1): 83-93.
- [4] Bai W J, Jiao J Y. A review on the research methods of soil seed bank. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(6): 195-198, 203.
- [5] Wang J, Bai Y. The hot topics and perspectives of soil seed bank research. *Ecology and Environment*, 2006, 15(6): 1372-1379.
- [6] Zhang W, Mo B T, Zhang J L. Research progress and prospects of soil seed bank. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2011, (10): 188-190.
- [7] Xiong L M, Zhong Z C, Li X G, Wang L. A preliminary study on the soil seed banks of different successional stages of subtropical evergreen broadleaved forests. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1992, 16(3): 249-257.
- [8] An S Q, Lin X Y, Hong B G. A preliminary study on the soil seed banks of the dominant vegetation forms on Baohua Mountain. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(1): 41-50.
- [9] Huang Z L, Kong G H, Wei P, Wang J H, Huang Y J, Zhang Y C. A study on the soil seed banks at the different succession stages of south subtropical forests. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 1996, 4(4): 42-49.
- [10] Zhou X Y, Li M G, Wang B S, Zan Q J. Soil seed banks in a series of successional secondary forest communities Heishiding Nature Reserve, Guangdong Province. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(2): 222-230.
- [11] Zhao L Y, Li F R, Wang X Z. Characteristics of soil seed bank and standing vegetation change in sandy grasslands along a desertification gradient.

- Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(9): 1745-1756.
- [12] Zhao L Y, Li F R, Zhang H, Wang X Z. Characteristics of the soil seed bank at the fenced sandy meadow in Horqin Sandy Land. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(2): 45-49.
- [13] Zhao L Y, Li Z H, Li F R, Zhao H L. Soil seed bank of plant communities along restoring succession gradients in Horqin sandy land. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3204-3211.
- [14] Zhao L Y, Li Z H, Zhao J H, Zhao H L, Zhao X Y. Comparison on the difference in soil seed bank between grazed and enclosed grasslands in Horqin sandy land. Acta Phytocologica Sinica, 2006, 30(4): 617-623.
- [15] Shi J H, Huang Z L, Ouyang X J, Zhang C, Li L, Zhou X Y. Composition of vegetation and soil seed bank in low subtropical forests and their relation-ship. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(4): 22-27.
- [16] Long C L, Yu S X. Space variation of seed rain and seed bank in gaps of Karst forest in Maolan Nature Reserve, Guizhou Province. Acta Botanica Yunnanica, 2007, 29(3): 327-332.
- [17] Zang R G, Ding Y, Zhang W Y. Seed dynamics in relation to gaps in a tropicalmontane rainforest of Hainan Island, South China II seed bank. Journal of Integrative Plant Biology, 2008, 50(5): 513-521.
- [18] Wang G, Liang X G. The dynamics of seed bank on shapotou artificially stabilized dunes. Acta Botanica Sinica, 1995, 37(3): 231-237.
- [19] Zeng Y J, Wang Y R, Nan Z B, Wei D, Chen S K, Li B E. Soil seed banks of different grassland types of Alashan arid desert region, Inner Mongolia. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(9): 1457-1463.
- [20] Wang G L, Bai Z K, Hao M D. Features of soil seed bank at dump of Antaibao Opencast Mine. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(6): 178-180.
- [21] Han L J, Bai Z K, Li J C, Cui Y, Yue J Y. Soil seed bank of Antaibo Opencast Coal Mine Dump. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(6): 817-821.
- [22] Zhang Z Q, Shu W S, Lan C J, Huang M H. The revegetation of a lead/zinc mine tailings site with an introduced soil seed bank. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24(5): 601-607.
- [23] Zhang Z Q, Shu W S, Lan C J, Huang M H. Uptake and translocation of heavy metals in dominant plants of soil seed banks introduced to a lead/zinc mine tailings pond. Acta Phytocologica Sinica, 2001, 25(3): 306-311.
- [24] Shu W S, Ye Z H, Zhang Z Q, Huang M H, Lan C J. Restoration of lead and zinc mine tailings in South China. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(8): 1629-1639.
- [25] 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.
- [26] Chang Q, Zhao D W, Li X, Peng J, Guan A N, Liu X S. Soil seed bank research of China mining areas: Necessity and challenges. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(5): 1343-1350.
- [27] Yan Q C. Seed Science. Beijing: China Agricultural Press, 2001.
- [28] Wang X L, Zhou J, Li W, Liu G H, Zhang X J. Seasonal dynamics of soil seed bank in Honghu wetland withdrawn from long-term rice culture, Acta Phytocologica Sinica, 2003, 27(3): 352-359.
- [29] Wang X R, Cheng R M, Xiao W F, Guo Q S, Feng X H, Wang R L. Relationship between standing vegetation and soil seed bank in Water-level-fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir at the beginning after charging water. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(21): 5821-5831.
- [30] Hanley M E, Fenner M, Edwards P J. An experimental field study of the effects of mollusc grazing on seedling recruitment and survival in grassland. Journal of Ecology, 1995, 83(4): 621-627.
- [31] Deng Z F, Xie X L, Wang Q J, Zhou X M. Dynamic analysis on seed rain and seed bank of Kobresia pygmaea Meadow. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2003, 9(1): 7-10.
- [32] Peco B, Ortega M, Levassor C. Similarity between seed bank and vegetation in Mediterranean grassland: a predictive model. Journal of Vegetation Science, 1998, 9(6): 815-828.
- [33] Xing F, Wang Y, Xu K, Yu L L, Lu X G. Characteristics of Soil Seed Banks of Community Successional Series in Marshes in the Sanjiang Plain. Wetland Science, 2008, 6(3): 351-358.
- [34] Tong C, Feng X, Zhang Y M, Zhong Y K. Soil seed banks in different grazing exclusion restoring succession stages in the Xiligole degraded steppe. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 1991-2002.
- [35] Li S, Yao X H, Ren H D, Zhang S G. Different land-used soil seed banks in Karst Rocky desertification area of middle Guizhou Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4602-4608.
- [36] Li F, Liang S C, Wang L J, Zhang Z H, Hu G. Soil seed bank of *Cinnamomum burmannii* community on karst hills in Guilin. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(10): 1511-1515.
- [37] Liu G H, Li W, Wang X L, Zhang X J. Relationship between seed banks and standing vegetation in Huli marsh, Chaling, Hu'nan Province. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(3): 450-456.
- [38] Bai W J, Jiao J Y, Zhang Z G. Relationship between soil seed bank and aboveground vegetation in abandoned croplands on the Gullied-Hill Loess. Acta Prataculturae Sinica, 2007, 6(16): 30-38.
- [39] Dessaint F, Chadoeuf R, Barralis G. Nine years' soil seed bank and weed vegetation relationships in an arable field without weed control. Journal

of Applied Ecology, 1977, 34(1): 123-130.

- [40] Zhang Z Q. Soil seed bank. Chinese Journal of Ecology, 1996, 15(6): 36-42.
- [41] Izhaki I, Ne'eman G. Soil seed bank in Mediterranean pine forest // Ne'eman G, Trabaud L, eds. Ecology, Biogeography and Management of *Pinus halepensis* and *P. brutica* Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin. Leiden: Backhuys Publishers, 2000: 167-181.
- [42] Bao X X, Yi J, Liu S R, Jimuse, Jigejidesuren. Effects of different grazing system on soil seed bank in typical Steppe of Mongolian Plateau. Chinese Journal of Grassland, 2010, 32(5): 66-72.

参考文献:

- [1] 孙庆业, 杨林章, 安树青, 陈众, 邓志国. 尾矿废弃地的自然恢复——以铜陵铜尾矿废弃地为例 // 第二届全国复合生态与循环经济学术讨论会. 合肥: 中国生态学会、安徽生态省建设领导小组办公室, 2005.
- [4] 白文娟, 焦菊英. 土壤种子库的研究方法综述. 干旱地区农业研究, 2006, 24(6): 195-198, 203.
- [5] 王俊, 白瑜. 土壤种子库研究的几个热点问题. 生态环境, 2006, 15(6): 1372-1379.
- [6] 张文, 莫本田, 张建利. 现代农业科技. 林业科学, 2011, (10): 188-190.
- [7] 熊利民, 钟章成, 李旭光, 汪莉. 亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤种子库的初步研究. 植物生态学报, 1992, 16(3): 249-257.
- [8] 安树青, 林向阳, 洪必恭. 宝华山主要植被类型土壤种子库初探. 植物生态学报, 1996, 20(1): 41-50.
- [9] 黄忠良, 孔国辉, 魏平, 王俊浩, 黄玉佳, 张佑昌. 南亚热带森林不同演替阶段土壤种子库的初步研究. 热带亚热带植物学报, 1996, 4(4): 42-49.
- [10] 周先叶, 李鸣光, 王伯荪, 咎启杰. 广东黑石顶自然保护区森林次生演替不同阶段土壤种子库的研究. 植物生态学报, 2000, 24(2): 222-230.
- [11] 赵丽娅, 李锋瑞, 王先之. 草地沙漠化过程地上植被与土壤种子库的变化特征. 生态学报, 2003, 23(9): 1745-1756.
- [12] 赵丽娅, 李锋瑞, 张华, 王先之. 科尔沁沙地围封沙质草甸土壤种子库特征的研究. 生态学杂志, 2004, 23(2): 45-49.
- [13] 赵丽娅, 李兆华, 李锋瑞, 赵哈林. 科尔沁沙地植被恢复演替进程中群落土壤种子库研究. 生态学报, 2005, 25(12): 3204-3211.
- [14] 赵丽娅, 李兆华, 赵锦慧, 赵哈林, 赵学勇. 科尔沁沙质草地放牧和围封条件下的土壤种子库. 植物生态学报, 2006, 30(4): 617-623.
- [15] 史军辉, 黄忠良, 欧阳学军, 张池, 李林, 周小勇. 南亚热带森林土壤种子库与地上植被的组成特征及其关系. 北京林业大学学报, 2006, 28(4): 22-27.
- [16] 龙翠玲, 余世孝. 茂兰喀斯特森林林隙种子雨、种子库空间变异. 云南植物研究, 2007, 29(3): 327-332.
- [19] 曾彦军, 王彦荣, 南志标, 卫东, 陈善科, 李保尔. 阿拉善干旱荒漠区不同植被类型土壤种子库研究. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1457-1463.
- [20] 王改玲, 白中科, 郝明德. 平朔安太堡露天矿排土场土壤种子库研究. 水土保持学报, 2003, 17(6): 178-180.
- [21] 韩丽君, 白中科, 李晋川, 崔艳, 岳建英. 安太堡露天煤矿排土场土壤种子库. 生态学杂志, 2007, 26(6): 817-821.
- [22] 张志权, 束文圣, 蓝崇珏, 黄铭洪. 引入土壤种子库对铅锌尾矿废弃地植被恢复的作用. 植物生态学报, 2000, 24(5): 601-607.
- [23] 张志权, 束文圣, 蓝崇珏, 黄铭洪. 土壤种子库与矿业废弃地植被恢复研究: 定居植物对重金属的吸收和再分配. 植物生态学报, 2001, 25(3): 306-311.
- [24] 束文圣, 叶志鸿, 张志权, 黄铭洪, 蓝崇珏. 华南铅锌尾矿生态恢复的理论与实践. 生态学报, 2003, 23(8): 1629-1639.
- [25] 孙庆业, 刘付程. 铜陵铜矿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.
- [26] 常青, 张大维, 李雪, 彭建, 关爱农, 刘晓斯. 中国矿区土壤种子库研究的必要性与挑战. 应用生态学报, 2011, 22(5): 1343-1350.
- [27] 颜启传. 种子学. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [28] 王相磊, 周进, 李伟, 刘贵华, 张学江. 洪湖湿地退耕初期种子库的季节动态. 植物生态学报, 2003, 27(3): 352-359.
- [29] 王晓荣, 程瑞梅, 肖文发, 郭泉水, 封晓辉, 王瑞丽. 三峡库区消落带水淹初期地上植被与土壤种子库的关系. 生态学报, 2010, 30(21): 5821-5831.
- [31] 邓自发, 谢晓玲, 王启基, 周兴民. 高寒小嵩草草甸种子库和种子雨动态分析. 应用与环境生物学报, 2003, 9(1): 7-10.
- [33] 邢福, 王莹, 许坤, 于丽丽, 吕宪国. 三江平原沼泽湿地群落演替系列的土壤种子库特征. 湿地科学, 2008, 6(3): 351-358.
- [34] 仝川, 冯秀, 张远鸣, 仲延凯. 锡林郭勒退化草原不同禁牧恢复演替阶段土壤种子库比较. 生态学报, 2008, 28(5): 1991-2002.
- [35] 李生, 姚小华, 任华东, 张守攻. 黔中石漠化地区不同土地利用类型土壤种子库特征. 生态学报, 2008, 28(9): 4602-4608.
- [36] 李峰, 梁士楚, 王丽君, 张忠华, 胡刚. 桂林岩溶石山阴生群落土壤种子库. 生态学杂志, 2007, 26(10): 1511-1515.
- [37] 刘贵华, 李伟, 王相磊, 张学江. 湖南茶陵湖里沼泽种子库与地表植被的关系. 生态学报, 2004, 24(3): 450-456.
- [40] 张志权. 土壤种子库. 生态学杂志, 1996, 15(6): 36-42.
- [42] 包秀霞, 易津, 刘书润, 吉木色, 吉格吉德苏仁. 不同放牧方式对蒙古高原典型草原土壤种子库的影响. 中国草地学报, 2010, 32(5): 66-72.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 7 April, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research progress on chemical communication of development and host-finding of nematodes ZHANG Bin, HU Chunxiang, SHI Jin, et al (2003)
- Principles, indicators and sampling methods for species monitoring XU Haigen, DING Hui, WU Jun, et al (2013)

Autecology & Fundamentals

- Spatial distribution pattern of human-caused fires in Hulunbeir grassland ZHANG Zhengxiang, ZHANG Hongyan, LI Dongxue, et al (2023)
- Belowground biomass in Tibetan grasslands and its environmental control factors YANG Xiuqing, HUANG Mei, WANG Junbang, et al (2032)
- Analysis on variation characteristics of air temperature and ground temperature in Guilin from 1961 to 2010 CHEN Chao, ZHOU Guangsheng (2043)
- Winter bed-site selection by roe deer (*Capreolus capreolus*) in Huangnihe Nature Reserve ZHU Hongqiang, GE Zhiyong, LIU Geng, et al (2054)
- Leaf anatomical characteristics of the plants of grasslands in the Tibetan Plateau LI Quanfa, WANG Baojuan, AN Lihua, et al (2062)
- A research on summer vegetation characteristics & short-time responses to experimental warming of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau XU Manhou, XUE Xian (2071)
- Cytological study on microsporogenesis of *Solanum lycopersicum* var. Micro-Tom under high temperature stress PENG Zhen, CHENG Lin, HE Yanjun, et al (2084)
- A new plant height growth process model of *Caragana* forest in semi-arid loess hilly region ZHAO Long, WANG Zhenfeng, GUO Zhongsheng, et al (2093)
- Germination inhibitory substances extracted from the seed of seven species of *Quercus* LI Qingmei, LIU Yan, LIU Guangquan, et al (2104)
- Effects of water stress and fungicide on the growth and drought resistance of *Flaveria bidentis* CHEN Dongqing, HUANGFU Chaohe, LIU Hongmei, et al (2113)
- Characters of soil seed bank in copper tailings and its adjacent habitat ... SHEN Zhangjun, OU Zulan, TIAN Shengni, et al (2121)
- Changes of soil chemical properties after different burning years in typical steppe of Yunwun Mountains LI Yuan, CHENG Jimin, WEI Lin, et al (2131)
- Effects of water and fertilizers on nitrate content in tomato fruits under alternate partial root-zone irrigation ZHOU Zhenjiang, NIU Xiaoli, LI Rui, et al (2139)
- Effect of land use on the characteristics of organic carbon and labile organic carbon in soil aggregates in Karst mountain areas LI Juan, LIAO Hongkai, LONG Jian, et al (2147)
- Mobilization of inorganic phosphorus from soils by five azotobacters ZHANG Liang, YANG Yuhong, LI Qian, et al (2157)
- Physiological-ecological responses of *Iris germanica* L. to Cd stress and its accumulation of Cd ZHANG Chengxiang, CHEN Weifeng (2165)
- The available forms and bioavailability of heavy metals in soil amended with sewage sludge TIE Mei, SONG Linlin, HUI Xiujuan, et al (2173)
- LAI-based photosynthetic light response model and its application in a rainfed maize ecosystem SUN Jingsong, ZHOU Guangsheng (2182)
- The dominant species of predatory natural enemies of three kinds of planthoppers and impact of pesticides on natural enemies in paddy field LIN Yuan, ZHOU Xiazhi, BI Shoudong, et al (2189)

Population, Community and Ecosystem

- Spatial and temporal variation of picophytoplankton in the Pearl River Estuary ZHANG Xia, HUANG Xiaoping, SHI Zhen, et al (2200)

Analysis of the relationship between species diversity and hydrologic factors during an interval of intermittent water delivery at the Lower Reaches of Tarim River, China	CHEN Yongjin, LIU Jiazhen, CHEN Yaning, et al (2212)
Fish species composition and community pattern in the continental shelf of northwestern South China Sea	WANG Xuehui, LIN Zhaojin, DU Feiyan, et al (2225)
Distribution and succession of plant communities in Lake Bita coastal swamp on the plateau region, northwestern Yunnan	HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang (2236)
Analysis on community structure and quantitative characteristics of <i>Nitraria tangutorum</i> nebkhas at different succession stage in lower reaches of Shiyang River	JIN Hujia, MA Quanlin, HE Mingzhu, et al (2248)
Resource and Industrial Ecology	
Effects of subsoiling and supplemental irrigation on dry matter production and water use efficiency in wheat	ZHENG Chengyan, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al (2260)
Effects of two years' incorporation of leguminous green manure on soil properties of a wheat field in dryland conditions	ZHANG Dabin, YAO Pengwei, LI Jing, et al (2272)
Effects of planting with ridge and furrow mulching on maize growth, yield and water use efficiency in dryland farming	LI Rong, HOU Xianqing, JIA Zhikuan, et al (2282)
Urban, Rural and Social Ecology	
Effects of riparian buffers of North Mort of Beijing on air temperature and relative humidity	WU Fangfang, ZHANG Na, CHEN Xiaoyan (2292)
Characteristics of spatial and temporal variations of global solar radiation in Xi'an and relevant response in urban development	ZHANG Hongli, ZHANG Naweirui, LIU Minru, et al (2304)
Research Notes	
A analysis of macrofungal flora diversity in Langyashan Nature Reserve, Anhui Province, China	CHAI Xinyi, XU Xuefeng, WANG Meiyong, et al (2314)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,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

本期责任副主编 陈利顶

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 33 卷 第 7 期 (2013 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 7 (April, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元