

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第5期 Vol.33 No.5 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 (SHENTAI XUEBAO)

第33卷 第5期 2013年3月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制 王晶苑, 张心昱, 温学发, 等 (1337)
工业大麻对重金属污染土壤的治理研究进展 梁淑敏, 许艳萍, 陈 裕, 等 (1347)
最佳管理措施评估方法研究进展 孟凡德, 耿润哲, 欧 洋, 等 (1357)
灌木年轮学研究进展 芦晓明, 梁尔源 (1367)

个体与基础生态

- 华北落叶松夜间树干液流特征及生长季补水格局 王艳兵, 德永军, 熊 伟, 等 (1375)
土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响 裴 斌, 张光灿, 张淑勇, 等 (1386)
湖北石首麋鹿昼间活动时间分配 杨道德, 李竹云, 李鹏飞, 等 (1397)
三种杀虫剂亚致死浓度对川硬皮肿腿蜂繁殖和搜寻行为的影响 杨 桦, 杨 伟, 杨春平, 等 (1405)

种群、群落和生态系统

- 三沙湾浮游动物生态类群演替特征 徐佳奕, 徐兆礼 (1413)
滇西北高原纳帕海湿地湖滨带优势植物生物量及其凋落物分解 郭绪虎, 肖德荣, 田 昆, 等 (1425)
安徽新安江干流滩涂湿地草本植物区系及物种多样性 杨文斌, 刘 坤, 周守标 (1433)
湿地芦苇根结合好气细菌群落时空分布及其与水质因子的关系 熊 薇, 郭逍宇, 赵 霖 (1443)
三种温带树种叶片呼吸的时间动态及其影响因子 王兆国, 王传宽 (1456)
不同土壤水分条件下杨树人工林水分利用效率对环境因子的响应 周 洁, 张志强, 孙 阁, 等 (1465)
不同生态区域沙地建群种油蒿的钙组分特征 薛苹苹, 高玉葆, 何兴东 (1475)
藏北高寒草甸植物群落对土壤线虫群落功能结构的影响 薛会英, 胡 锋, 罗大庆 (1482)
铜尾矿废弃地土壤动物多样性特征 朱永恒, 沈 非, 余 健, 等 (1495)
环丙沙星对土壤微生物量碳和土壤微生物群落碳代谢多样性的影响 马 驿, 彭金菊, 王 芸, 等 (1506)
基于生态水位约束的下辽河平原地下水生态需水量估算 孙才志, 高 翳, 朱正如 (1513)

景观、区域和全球生态

- 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案 苏泳娴, 张虹鸥, 陈修治, 等 (1524)
不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响 李建兴, 何丙辉, 谌 芸 (1535)
京沪穗三地近十年夜间热力景观格局演变对比研究 孟 舟, 王明玉, 李小娟, 等 (1545)
窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素 雷泳南, 张晓萍, 张建军, 等 (1559)
模拟氮沉降条件下木荷幼苗光合特性、生物量与 C、N、P 分配格局 李明月, 王 健, 王振兴, 等 (1569)
铁炉渣施加对稻田甲烷产生、氧化与排放的影响 王维奇, 李鹏飞, 曾从盛, 等 (1578)

资源与产业生态

- 食用黑粉菌侵染对茭白植株抗氧化系统和叶绿素荧光的影响 闫 宁, 王晓清, 王志丹, 等 (1584)

- 佛手低温胁迫相关基因的差异表达 陈文荣,叶杰君,李永强,等 (1594)
美洲棘薺马对不同蔬菜寄主的偏好性 朱亮,石宝才,官亚军,等 (1607)
茉莉酸对棉花单宁含量和抗虫相关酶活性的诱导效应 杨世勇,王蒙蒙,谢建春 (1615)
造纸废水灌溉对毛白杨苗木生长及养分状况的影响 王烨,席本野,崔向东,等 (1626)
基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率 赵晨,王远,谷学明,等 (1636)

研究简报

- 太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征 周彬,韩海荣,康峰峰,等 (1645)
基于 TM 卫星影像数据的北京市植被变化及其原因分析 贾宝全 (1654)
薇甘菊萎焉病毒感染对薇甘菊光合特性和 4 种酶活性的影响 王瑞龙,潘婉文,杨娇瑜,等 (1667)
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 * 338 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 34 * 2013-03



封面图说:美丽的油松松枝——油松又称红皮松、短叶松。树高可达 30m,胸径达 1m。其树皮下部灰褐色,裂成不规则鳞块;针叶 2 针一束,暗绿色,较粗硬;球果卵形或卵圆形,长 4—7cm,有短柄,与枝几乎成直角。油松适应性强,根系发达,树姿雄伟,枝叶繁茂,有良好的保持水土和美化环境的功能,是中国北方广大地区最主要的造林树种之一,在华北地区无论是山区或平原到处可见,人工林很多,一般情况下在山区生长最好。在山区生长的油松,多在阴坡、半阴坡,土壤湿润和较肥沃的地方。

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/stxb201112161925

朱永恒,沈非,余健,张小会,陆林.铜尾矿废弃地土壤动物多样性特征.生态学报,2013,33(5):1495-1505.
Zhu Y H, Shen F, Yu J, Zhang X H, Lu L. Soil fauna diversity of abandoned land in a copper mine tailing area. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1495-1505.

铜尾矿废弃地土壤动物多样性特征

朱永恒^{1,2,*}, 沈 非^{1,2}, 余 健^{1,2}, 张小会^{1,2}, 陆 林¹

(1. 安徽师范大学,国土资源与旅游学院,芜湖 241003; 2. 安徽自然灾害过程与防控研究省级实验室,芜湖 241003)

摘要:土壤动物的恢复、群落演替及其多样性对于铜尾矿废弃地的生态重建具有重要意义。为了解铜尾矿废弃地土壤动物群落多样性特征,在铜陵市铜尾矿区设置4个样地23采样点,共捕获土壤动物4622只个体,隶属5门10纲18目29类。结果表明,铜尾矿自然废弃地与其对照组土壤动物多样性差异明显,自然废弃地土壤动物丰富度指数d、大型土壤动物密度、中小型土壤动物密度、多样性指数H'和D·G指数均小于其对照组且存在显著差异。而复垦废弃地中小型土壤动物密度和D·G指数小于其对照组且存在显著差异,多样性指数H'大于其对照组且差异极显著,其他土壤动物群落指标与其对照组均无显著差异。相似系数q表明,外围林地间土壤动物群落相似性最大,其次是复垦废弃地与外围林地间,自然废弃地与其它3个样地间相似性最小。从垂直分层来看,复垦废弃地土壤动物表聚性强于自然废弃地,尾矿废弃地表聚性强于外围林地。灰色关联分析表明,铜尾矿区土壤理化性质与土壤动物群落结构指标关系密切,其中最重要的因素是土壤含水量和总钾含量,重金属全镉含量也不容忽视,植被因素和土壤全铜含量对土壤动物的影响相对较小。由此可见,土壤含水量、土壤基质的优劣、土壤有机质与营养元素的含量等因素限制了铜尾矿废弃地土壤动物的恢复与重建,而这些因素的改善主要归功于尾矿废弃地的土地复垦和作物种植。所以,尾矿废弃地的复垦与利用有利于土壤动物的恢复与重建。

关键词:土壤动物;多样性;铜尾矿;自然废弃地;复垦废弃地;铜陵市

Soil fauna diversity of abandoned land in a copper mine tailing area

ZHU Yongheng^{1,2,*}, SHEN Fei^{1,2}, YU Jian^{1,2}, ZHANG Xiaohui^{1,2}, LU Lin¹

1 College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China

2 Anhui Key Laboratory of Natural Disasters Process and Prevention, Wuhu 241003, China

Abstract: Community succession and soil fauna diversity are very important factors in the ecological reconstruction of land abandoned after copper mine tailing. To understand its soil faunal community diversity features, 23 sample points in four plots (natural abandoned land and a control and reclaimed abandoned land and a control) were selected from a copper mine tailing area in the city of Tongling. A total of 4622 individuals of soil fauna were collected which belonged to 29 genera, 5 phyla, 10 classes and 18 orders. The results show that Acarina, Collembola and Nematodes were the dominant groups, Oligochaeta, Formicidae, Diptera larvae, Coleoptera larvae, Diplura, Araneae and Harpacticoida were the frequent groups and the other groups were rare. There were significant differences in soil faunal diversity between natural abandoned land and its control group. The richness index (*d*), density of soil macrofauna, mesofauna and microfauna, Shannon-Wiener (*H'*) diversity index and density groups (*D·G*) diversity index of soil fauna from natural abandoned land was significantly less than that of its control group. However, the density of soil macrofauna and the *D·G* diversity index of soil fauna from reclaimed abandoned land were significantly less than that of its control group. The *H'* diversity index from reclaimed abandoned land was more than that of its control group with very significant differences, but the other indices of soil faunal

基金项目:国家自然科学基金项目(41001031)

收稿日期:2011-12-16; 修订日期:2012-06-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yhzhu876@mail.ahnu.edu.cn

diversity were not different to those of the control group. The Jaccard similarity coefficient (q) indicated that the most similar values were between the soil fauna communities of the two control groups, and second, between that of reclaimed abandoned land and the two control groups, and with the least similarity between that of natural abandoned land and the three other sampling sites. The surface aggregation of soil fauna in reclaimed abandoned land was more obvious than that in natural abandoned land and the surface aggregation of soil fauna at the two abandoned lands sites were more obvious than that of the control groups. Grey relevant analysis revealed that there was a close relationship between the soil physicochemical properties in the copper mine tailing area and the structure indices of soil fauna. The most important factors included soil water content and total potassium. Cadmium content should also be considered. The soil fauna appeared to be relatively unaffected by the vegetation characteristics and the total copper content of the soil. It appears that the soil water content, the quality of the soil matrix, soil organic matter quality and content and the soil nutrient content are the restraining factors for the recovery and rebuilding of soil fauna in land abandoned after copper mine tailing. The improvement of these factors is mainly owing to the reclamation of the land for cropping. Therefore, the reclamation of the abandoned lands for cropping and planting is beneficial for the recovery and rebuilding of the soil fauna. The recovery and rebuilding of soil fauna in the natural reclamation of abandoned copper mine tailing land largely from natural invasion was discussed in comparison with reclamation with man-made soil covering.

Key Words: soil fauna; diversity; copper mine tailing; natural abandoned land; reclaimed abandoned land; Tongling

土壤动物作为陆地生态系统中重要的分解者,是维持陆地生态系统正常结构和功能不可缺少的组成部分^[1],对地表植物群落的结构、功能和演替起着重要调控作用^[2],尤其对土壤生态系统的物质循环与能量流动^[3-5]以及退化土壤的恢复具有特殊功能和作用^[6],是土壤生态系统不可或缺的生态资源^[7]。随着全球对生物多样性及其保护的关注,土壤动物多样性研究已经成为土壤生态学研究的热点和前沿^[8-10]。

尾矿废弃地是指通过采矿、冶炼或堆放尾矿等生产活动造成的废弃土地,是一种人为的裸地和特殊的退化生态系统,包括自然废弃地和复垦废弃地,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^[11-12]。我国持续增加的尾矿废弃地和极其紧张的土地资源形成一对尖锐的矛盾,急需对闲置的尾矿废弃地进行生态恢复与利用。目前关于尾矿废弃地生态研究的重点集中在土壤、植被和微生物等方面,而土壤动物研究报导极少^[13-16],尤其针对不同类型铜尾矿废弃地与外围自然生态系统土壤动物多样性的对比研究还没有报道。基于此,本文拟对铜陵市杨山冲尾矿自然废弃地与林冲尾矿复垦废弃地土壤动物多样性进行系统的对比研究,以期为尾矿废弃地生态系统演替与生态恢复提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 自然概况

铜陵市地处 $30^{\circ}56'42''N, 117^{\circ}43'28''E$,位于安徽省中南部,面积 $1113 km^2$,是长江中下游南岸一座重要的工矿和工贸港口城市。属亚热带湿润季风气候,多年平均气温 $16.2 ^{\circ}C$,降水量 $1390 mm$,平均湿度 $75\%-80\%$ 。地带性植被为亚热带常绿阔叶林和落叶阔叶混交林,土壤为黄棕壤。境内断续分布较多低山丘陵和岗地,海拔一般为 100 — $200 m$,少数山峰可达 $600 m$ 左右。

1.2 样地概况

作为全国的铜都,铜陵市有五公里、黑沙河、铜官山、凤凰山、狮子山等大型铜尾矿废弃地^[8]。2011年3月底,在铜陵市铜尾矿区选择四类样地,各样地基本情况见表1。

(1)杨山冲铜尾矿自然废弃地(Natural Abandoned Land of Copper-mine-tailing,简称 NALC):三面环山,一面修建粘土坝(长 $700 m$,高 $25 m$),海拔 $27 m$,面积 $20万 m^3$,总库容 $819万 m^3$,汇水面积 $0.54 km^2$,使用期为1966年7月—1990年11月,其后处于停用状态,尾矿自然堆放并历经20多年的自然演替,人为干扰极少,大面积具有匍匐茎和地下根状茎的多年生植物的定居,使尾矿表层更加稳定,从而使植被覆盖度增加。在无植

被覆盖处,风蚀、水蚀、风扬现象均较严重。植被类型为白茅群落(Com. *Imperata cylindrica*),混有芒(*Miscanthus sinensis*)、萝藦(*Metaplexis japonica*)和野菊(*Dendranthema indicum*)等。

(2)杨山冲铜尾矿自然废弃地外围林地(Suburbs Forest Land,因与第1样地对照,故简称NALC-SFL-CK₁):海拔30 m,植被类型为火炬松群落(Com. *Pinus taeda*),混有棟树(*Melia azedarach*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、柘树(*Cudrania tricuspidata*)、黃荆(*Vitex negundo*)、商陆(*Pokeberry root*)和千金藤(*Stephania japonica*)等。

(3)林冲铜尾矿复垦废弃地(Reclaimed Abandoned Land of Copper-mine-tailing,简称RALC):三面环山,一面修建石坝(长200 m,高40 m),海拔105 m,面积31万m³,总库容120万m³,汇水面积0.95 km²,使用期为1970年12月—1979年12月,停用后当地农民客土(来源于凤凰山街道篮球场等处)种植药用植物丹皮,并辅种大豆等豆科植物;2009年铲除丹皮,成为复垦废弃地,现人为干扰少,生长茂密的杂草,植被类型为荩草群落(Com. *Arthraxon lanceolatus*),混有少量芒(*Miscanthus sinensis*)、狗尾草(*Setaria viridis*)和小飞蓬(*Conyza Canadensis*)等。

(4)林冲铜尾矿复垦废弃地外围林地(Suburbs Forest Land,因与第3样地对照,故简称RALC-SFL-CK₂):海拔108 m,植被类型为苦木群落(Com. *Picrasma quassoides*),以落叶树种为主,混有楤木(*Aralia chinensis*)、华瓜木(*Alangium chinense*)、毛泡桐(*Paolownia tomentosa*)、山鸡椒(*Litsea cubeba*)、大青(*Clerodendrum cuthophyllum*)、马棘(*Indigofera pseudotinctoria*)和山槐(*Albizzia kalkora*)等。

表1 铜尾矿区各样地自然环境条件

Table 1 Natural conditions of the sites in the copper mine tailing area

样地 Sites	自然废弃地	自然废弃地	复垦废弃地	复垦废弃地	F
	NALC	NALC-SFL-CK ₁	RALC	RALC-SFL-CK ₂	
样点数 Number of plots	7	3	9	4	—
pH	6.28b	5.76c	6.21b	6.76a	17.82
有机质 Soil organic matter/%	1.50b	6.46a	2.22 b	3.02 b	9.97
总氮 Total N/(g/kg)	0.52c	2.04a	0.60 c	1.40 b	121.11
总钾 Total K/(g/kg)	0.64d	4.36b	3.12 c	5.19 a	359.22
全铜 Total Cu/(mg/kg)	1128.34a	210.21b	943.66 a	55.63 b	17.36
全镉 Total Cd/(mg/kg)	1.95b	1.59c	3.23 a	1.96 b	53.24
土壤含水量 Soil moisture/%	8.03c	13.17b	16.51 b	20.53 a	22.53
土壤容重 Bulk density of soils/(g/cm ³)	1.47a	1.25c	1.22 c	1.35 b	16.28
植被高度 Vegetation height/cm	17.14c	300.00a	4.56 c	135.00 b	59.22
植被覆盖率 Vegetation coverage/%	86.57a	90.00a	38.00 c	69.00 b	59.61

同行内不同小写字母表示样地间差异显著($P < 0.05$),NALC: Natural Abandoned Land of Copper-mine-tailing, NALC-SFL-CK₁: Natural Abandoned Land of Copper-mine-tailing-Suburbs Forest Land, RALC: Reclaimed Abandoned Land of Copper-mine-tailing, RALC-SFL-CK₂: Reclaimed Abandoned Land of Copper-mine-tailing-Suburbs Forest Land

1.3 采样方法、土壤动物分离与鉴定

每个尾矿废弃地自尾矿库中心向外围林地布点取样(图1)。林冲复垦废弃地自中心向外围设置4条取样带,共设13个取样点,其中废弃地中设9个重复样,外围林地设4个重复样(对照组);杨山冲自然废弃地(不规则)自中心向外围只设置3条取样带,共设10个取样点,其中废弃地中设7个重复样,外围林地设3个重复样(对照组)。土壤动物采样方法如下^[10]:

在样地中设置30 cm×30 cm的大型土壤动物取样样方,按土壤剖面分四层采样(0—5 cm,5—10 cm,10—15 cm,15—20 cm),如有枯枝落叶层,则需单独取样且把调查结果并入第一层。大型土壤动物样方共计93个,其中有1个NALC-SFL-CK₁的枯枝落叶层样方。在野外就地分离大型土壤动物,用酒精固定后带回室内鉴定。

在距大型土壤动物样方 50 cm 左右设置 30 cm×30 cm 的中小型土壤动物样方,去除枯枝落叶层,分四层(0—5 cm, 5—10 cm, 10—15 cm, 15—20 cm)对中小型土壤动物进行取样,每层取 3 个 100 cm³ 土壤容重器土样作为干生土壤动物样方,取 1 个 100 cm³ 土壤容重器土样的 1/4 作为湿生土壤动物样方,其余 3/4 土样作土壤理化性质分析用。中小型土壤动物样方共计 184 个,带回实验室,分别用 Tullgren 法与 Baermann 法分离提取干生和湿生土壤动物。

土壤动物的鉴定主要参照《中国亚热带土壤动物》^[17] 和《中国土壤动物检索图鉴》^[18] 进行。

1.4 数据处理与统计分析

根据研究目的,本文选用了 Margalef 丰富度指数 $d^{[19]}$ 、Shannon-Wiener 多样性指数 H' 、Pielou 均匀性指数 E 、Simpson 优势度指数 $C^{[20]}$ 和密度-类群指数 $D \cdot G^{[21]}$ 来描述铜尾矿区土壤动物群落特征。土壤动物群落相似性选用 Jaccard 指数 $q^{[22]}$ 和 Gower 系数 $Sg^{[23]}$ 来衡量。

各类群数量等级划分:个体数量占全部捕获量 10% 以上为优势类群,介于 1%—10% 的为常见类群,1% 以下的为稀有类群。

土壤化学性质检测由安徽师范大学分析测试中心完成,pH 值采用酸度计法(pHS-3C),有机质含量采用重铬酸钾容量法,重金属与营养元素采用 PRODIGY 全谱直读 ICP 光谱仪法。土壤含水量与土壤容重采用烘干法和环刀法,野外实测或估计植被高度与覆盖度。

土壤、植被环境因素对土壤动物群落结构的影响,采用灰色关联的方法分析^[24]。方差分析和 t 检验在 SPSS13.0 软件上进行。

2 结果与分析

2.1 铜尾矿区土壤动物群落的组成

2011 年春季对铜陵市铜尾矿区 4 样地进行调查,共捕获土壤动物 29 类 4622 只个体,隶属 5 门、10 纲、18 目、4 科(表 2),另外还捕获了 24 只虫卵。其中,蜱螨目(Acarina)、弹尾目(Collembola)和线虫纲(Nematoda)为优势类群,占总捕获量的 75.51%,蜱螨目和弹尾目数量远大于线虫纲,优势度较为显著。寡毛纲(Oligochaeta)、蚁科(Formicidae)、双翅目幼虫(Diptera larvae)、鞘翅目幼虫(Coleoptera larvae)、双尾目(Diplura)、蜘蛛目(Araneae)和猛水蚤目(Harpacticoida)为常见类群,占总捕获量的 18.91%。优势类群和常见类群捕获量占总捕获量的 94.42%,为铜尾矿区土壤动物群落的主体,广泛分布于铜尾矿废弃地及其外围林地。其余为稀有类群,其中,鞘翅目成虫(Coleoptera adult)、隐翅虫科(Staphylinidae)、综合纲(Symphyla)和腹足纲(Gastropoda)个体数较多,稀有类群仅仅分布在少数样地中,尤其集中在外围林地,而缺失在尾矿废弃地中。

2.2 铜尾矿废弃地与外围林地土壤动物类群对比分析

由表 2 可知,个体数量较丰富的蜱螨目($F=10.79, P<0.01$)、弹尾目($F=9.79, P<0.01$)、线虫纲($F=3.62, P<0.01$)和寡毛纲($F=6.25, P<0.01$)在铜尾矿废弃地与外围林地间均存在极显著差异,其中,蜱螨目、线虫纲和寡毛纲密度在各样地变化顺序是 NALC-SFL-CK₁>RALC-SFL-CK₂>RALC>NALC,而弹尾目变化顺序是 RALC-SFL-CK₂>NALC-SFL-CK₁>RALC>NALC。

个体数量中等丰富的类群(蚁科、双翅目幼虫、鞘翅目幼虫、双尾目、蜘蛛目、猛水蚤目、鞘翅目成虫、隐翅虫科、综合纲和腹足纲等)在各样地中的分布较复杂。从 NALC 样地及其对照组 NALC-SFL-CK₁ 的比较来看,规律性较明显,NALC-SFL-CK₁ 样地所有上述类群的平均密度皆大于 NALC 样地,其中蚁科、猛水蚤目、鞘翅

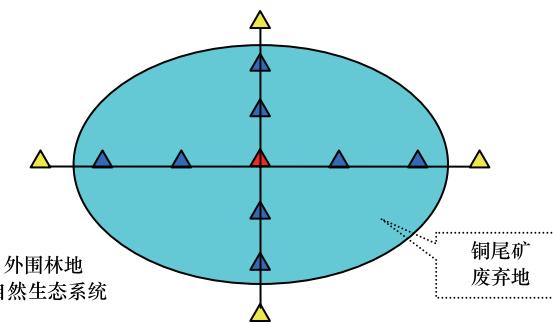


图 1 铜尾矿区土壤动物取样点分布示意图

Fig. 1 Sampling plots distribution chart of soil fauna in the copper mine tailing area

目成虫、隐翅虫科和综合纲存在显著差异($P<0.05$) ;从 RALC 样地及其对照组 RALC-SFL-CK₂ 的比较来看,两样地上述类群平均密度差异性较不明显,而且绝大部分上述类群在 RALC 样地中的平均密度略大于对照组 RALC-SFL-CK₂ 样地,其中鞘翅目幼虫、蜘蛛目、鞘翅目成虫和腹足纲存在显著差异($P<0.05$)。

表 2 铜尾矿区土壤动物群落组成

Table 2 Abundance and groups of soil fauna communities in the copper mine tailing area

类群 Groups	自然废弃地 NALC 土壤动物密度 /(个/m ²)	自然废弃地 外围林地 NALC-SFL-CK ₁ 土壤动物密度 /(个/m ²)	复垦废弃地 RALC 土壤动物密度 /(个/m ²)	复垦废弃地 外围林地 RALC-SFL-CK ₂ 土壤动物密度 /(个/m ²)	个体总数 /个	频度 /%
蜱螨目 Acarina	2505.49B	20256.41A	7606.84B	19423.08A	1459	31.59
弹尾目 Collembola	2175.82CD	12051.28B	6581.20BC	27961.54A	1446	31.30
线虫纲 Nematoda	1692.31B	8564.10A	3316.24AB	5576.92AB	583	12.62
寡毛纲 Oligochaeta	1.59B	274.07A	90.12B	163.89AB	207	4.48
蚁科 Formicidae	17.46b	200.00a	156.79ab	27.78ab	202	4.37
双翅目幼虫 Diptera larvae	1384.62a	1641.03a	735.04b	884.62b	161	3.49
鞘翅目幼虫 Coleoptera larvae	373.63b	512.82b	1504.27a	807.69b	136	2.94
双尾目 Diplura	3.17b	22.22ab	49.38a	25.00ab	57	1.23
蜘蛛目 Araneae	17.46b	18.52b	45.68a	11.11b	57	1.23
猛水蚤目 Harpacticoida	219.78b	358.97a	427.35a	461.54a	54	1.17
鞘翅目成虫 Coleoptera adult	9.52b	22.22a	33.33a	13.89b	44	0.95
隐翅虫科 Staphylinidae	4.76b	33.33a	25.93ab	5.56b	35	0.75
综合纲 Symphyla	0.00c	307.69a	170.94b	269.23a	23	0.50
腹足纲 Gastropoda	3.17b	11.11ab	18.52a	2.78b	21	0.45
线蚓科 Enchytraeidae	0.00b	871.79a	0.00b	38.46b	18	0.39
石蜈蚣目 Lithobiomorpha	0.00b	14.81a	7.41ab	8.33ab	13	0.28
地蜈蚣目 Geophilomorpha	0.00b	7.41ab	0.00b	27.78a	12	0.26
原尾目 Protura	0.00b	51.28b	34.19b	307.69a	11	0.24
倍足纲 Diplopoda	0.00b	14.81a	4.94ab	8.33ab	11	0.24
伪蝎目 Pseudoscorpionida	3.17b	3.70b	1.23b	16.67a	10	0.22
盲蛛目 Odiliones	0.00b	0.00b	9.88a	0.00b	8	0.17
鳞翅目幼虫 Lepidoptera larvae	43.96a	51.28a	51.28a	38.46a	7	0.15
等足目 Isopoda	0.00b	0.00b	0.00b	11.11a	4	0.08
半翅目 Hemiptera	0.00a	3.70a	1.23a	5.56a	4	0.08
蜚蠊目 Blattodea	0.00a	7.41a	0.00a	5.56a	4	0.08
涡虫纲 Turbellaria	0.00a	51.28a	17.09a	0.00a	2	0.04
直翅目 Orthoptera	0.00a	0.00a	1.23a	2.78a	2	0.04
等翅目 Isoptera	0.00a	3.70a	1.23a	0.00a	2	0.04
蜂科 Apoidea	0.00a	3.70a	0.00a	2.78a	2	0.04
双翅目成虫 Diptera adult	0.00a	3.70a	0.00a	2.78a	2	0.04
缨尾目 Thysanura	0.00a	0.00a	0.00a	2.78a	1	0.02
虫卵 Egg	1.59a	3.70a	25.93a	2.78a	24	0.52
总计 Total/个	421	1047	1579	1575	4622	100.00

同行内不同小写字母表示样地间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示样地间差异极显著($P<0.01$),土壤动物密度: Density of soil fauna, 个体总数: Number of individual, 频度: Frequency

个体数量较少的类群(共 17 类,个体数<20 个)主要分布在外围林地的样地中,NALC-SFL-CK1 和 RALC-SFL-CK2 样地中分别有 13 和 14 类,而在铜尾矿废弃地 NALC 和 RALC 样地中分别只有 2 和 10 类。

2.3 铜尾矿废弃地与外围林地土壤动物群落结构

采用多种群落结构测度方法,对比铜尾矿废弃地与外围林地土壤动物的群落结构(表3)。从类群数和个体总数来看,各样地变化顺序是 RALC-SFL-CK₂(18类394个)>NALC-SFL-CK₁(17类348个)>RALC(15类175个)>NALC(8类60个),差异极显著($F_{\text{gro.}}=24.88, F_{\text{ind.}}=23.47, P<0.01$),尤其是 NALC 样地与其对照组 NALC-SFL-CK₁ 的差异量更大($P<0.05$)。结合类群数和个体总数,由丰富度指数 d 可知, NALC 与其对照组 NALC-SFL-CK₁ 存在极显著差异($F=12.97, P<0.01$), RALC 样地与其对照组 RALC-SFL-CK₂ 之间并无显著差异。

从大型土壤动物密度来看, NALC 样地(192个/ m^2)远小于其对照组 NALC-SFL-CK₁(870个/ m^2)且存在极显著差异($F=9.13, P<0.01$),但 RALC 样地与其对照组 RALC-SFL-CK₂ 差异性不明显。与大型土壤动物密度不同的是,中小型土壤动物密度在各样地变化顺序是 RALC-SFL-CK₂(5.40万个/ m^2)>NALC-SFL-CK₁(4.16万个/ m^2)>RALC(1.82万个/ m^2)>NALC(0.66万个/ m^2),两组对照均存在极显著差异($F=27.72, P<0.01$),这是由于外围林地土壤动物优势类群个体数量显著增多造成的。

从 Shannon-Wiener 多样性指数 H' 来看, NALC 样地(0.6027)小于其对照组 NALC-SFL-CK₁(0.7516)且差异显著($P<0.05$),而 RALC 样地(0.8420)大于其对照组 RALC-SFL-CK₂(0.5952)且差异极显著($P<0.01$),这与相关研究有所不同^[25-28],可能由于林冲尾矿库经过 30a 的废弃,自然演替已趋于稳定,再加上人为覆土带来的土壤动物,导致复垦废弃地土壤动物群落演替已渐趋稳定,无论是个体数或类群数都相当可观,但自然环境条件没有外围林地优越,食物资源也较匮乏,因此,每一类群个体数有限,但类群数与外围林地相差无几,所以多样性指数 H' 较外围林地大,与均匀性呈正相关,与优势度呈负相关(表3)。从密度-类群 $D \cdot G$ 指数来看,铜尾矿废弃地均小于其对照组,其中 RALC 样地(1.2997)与其对照组 RALC-SFL-CK₂(2.0313)差异显著($P<0.05$), NALC(0.2674)与其对照组 NALC-SFL-CK₁(2.3812)差异达到极显著($P<0.01$),这与外围林地土壤动物个体总数和类群数较多有关。

表3 铜尾矿区土壤动物群落结构

Table 3 Community structure of soil fauna in the copper mine tailing area

指标 Indexes	自然废弃地 NALC	自然废弃地 外围林地 NALC-SFL-CK ₁	复垦废弃地 RALC	复垦废弃地 外围林地 RALC-SFL-CK ₂	F
类群数 Number of groups	8B,c	17A,ab	15A,b	18A,a	24.88
个体总数 Number of individual	60B,c	348A,a	175B,b	394A,a	23.47
丰富度指数 d index	3.7735B,b	6.5582A,a	6.2718A,a	6.7087A,a	12.97
大型土壤动物密度/(个/ m^2)	192B,c	870A,a	638A,ab	475AB,bc	9.13
中小型土壤动物密度/(万个/ m^2)	0.66B,c	4.16A,b	1.82B,c	5.40A,a	27.72
多样性指数 H' index	0.6027B,b	0.7516AB,a	0.8420A,a	0.5952B,b	11.31
均匀性指数 E index	0.6900A,ab	0.6092A,b	0.7197A,a	0.4714B,c	14.37
优势性指数 C index	0.3436AB,ab	0.2541B,bc	0.2049B,c	0.4081A,a	8.14
密度-类群指数 $D \cdot G$ index	0.2674 B,c	2.3812 A,a	1.2997 A,b	2.0313 A,a	14.84

同行内不同小写字母表示样地间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示样地间差异极显著($P<0.01$),大型土壤动物密度:Density of soil macrofauna,中小型土壤动物密度: Density of soil Meso and micro fauna

2.4 铜尾矿区土壤动物群落相似性

由表4可知,4个样地之间土壤动物群落的相似性,若仅只考虑群落组成的类群数, q 相似系数在 0.5517—0.8387 范围内,表明各样地间土壤动物群落中等相似或极相似。外围林地间(NALC-SFL-CK₁ 与 RALC-SFL-CK₂) q 相似系数最大(0.8387),说明外围林地自然环境相似,土壤动物群落演替至稳定阶段,群落极为相似。复垦废弃地(RALC)与外围林地间(NALC-SFL-CK₁, RALC-SFL-CK₂)也有较大的相似性(0.7667, 0.6875),说明人为覆土对林冲尾矿复垦废弃地的影响有改良土壤性质和带来大量外围土壤动物,从而使得

复垦废弃地土壤动物群落类似于外围林地。自然废弃地(NALC)与其它样地间(NALC-SFL-CK₁, RALC, RALC-SFL-CK₂)相似性较小(0.5714, 0.6400, 0.5517),这是由于杨山冲尾矿废弃地弃置时间较短(22a),自然环境演替速度缓慢,再加上无人为覆土,土壤基质差、结构不稳定、肥力低(表1),土壤动物最为贫乏。值得注意的是,自然废弃地(NALC)与 RALC-SFL-CK₂ 相似系数最低,这可能与空间距离和自然环境差异性最大有关;但2个废弃地间相似系数较大,这归因于铜尾矿废弃地具有相似的土壤性质,如土壤pH值、有机质、总氮和全铜等无显著差异(表1)。若考虑个体数量因素,以Gower系数Sg表示,各样地间的相似值距离加大,相似程度减小,最小值(0.2495)出现在2个废弃地之间(NALC, RALC),这是因为铜尾矿废弃地类群数相似程度已经较小($q=0.6400$),但各类群个体数量使得差异程度更趋显著,成为极不相似。

表4 土壤动物群落的 q (Sg)相似系数

Table 4 Similarity of soil fauna in the copper mine tailing area

	自然废弃地 NALC	自然废弃地外围林地 NALC-SFL-CK ₁	复垦废弃地 RALC
自然废弃地外围林地 NALC-SFL-CK ₁	0.5714(0.3583)		
复垦废弃地 RALC	0.6400(0.2495)	0.7667(0.5104)	
复垦废弃地外围林地 RALC-SFL-CK ₂	0.5517(0.3471)	0.8387(0.5946)	0.6875(0.3663)

括号外为 q 相似系数,括号内为 Sg 相似系数

2.5 铜尾矿区土壤动物群落垂直分层

在4个样地中,土壤动物类群数和个体总数在土壤不同垂直层次的分布存在显著或极显著差异(表5),均呈明显的表聚现象,但尾矿废弃地比外围林地土壤动物的表聚现象更明显,尤其体现在废弃地第一层与其它层次间的极显著差异上($P<0.01$),而外围林地四个层次土壤动物递减的突变性不够,特别是第一层与第二层之间没有显著性差异(NALC-SFL-CK₁样地个体总数除外),这与重金属对土壤动物垂直分层的相关研究具有相似的结论^[26-27,29]。另外,比较4个样地土壤动物个体总数和类群数垂直分层的方差检验 F 值,可以发现,复垦废弃地(17.80, 33.33)土壤动物表聚性强于自然废弃地(14.06, 11.29),尾矿废弃地表聚性强于外围林地(6.24与4.27, 3.44与6.86)。

表5 铜尾矿区土壤动物垂直分层

Table 5 The vertical distribution of soil fauna in the copper mine tailing area

土层/cm Soil layers	NALC		NALC-SFL-CK ₁		RALC		RALC-SFL-CK ₂	
	个体数	类群数	个体数	类群数	个体数	类群数	个体数	类群数
0—5	44.14 A,a	6.14 A,a	159.33 A,a	13.33 A,a	117.78 A,a	12.00 A,a	172.00 A,a	12.50 A,a
5—10	7.57 B,b	2.71 B,b	78.33 AB,b	8.67 A,ab	46.00 B,b	7.78 B,b	93.00AB,ab	9.25AB,ab
10—15	5.29 B,b	1.57 B,b	62.00 AB,b	7.67 A,b	27.22 B,b	5.78 BC,c	51.75 AB,b	7.00 B,bc
15—20cm	3.14 B,b	1.43 B,b	48.67 B,b	6.67 A,b	23.33 B,b	3.78 C,d	26.75 B,b	5.25 B,c
F	14.06	11.29	6.24	3.44	17.80	33.33	4.27	6.86

同列内不同小写字母表示土壤层次间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示土壤层次间差异极显著($P<0.01$),个体数: Number of individuals,类群数: Number of groups

2.6 铜尾矿区土壤动物群落结构与环境因素的灰色关联度分析

土壤动物群落特征主要由样地土壤、植被、小气候以及相关环境因子所决定,也受到调查和采样方法以及人为干扰程度的影响^[28]。由于本文研究区范围较小,植被和土壤是影响土壤动物群落特征的关键因素。

为区别尾矿废弃地和外围林地土壤动物群落结构与环境因素之间的关系,利用灰色关联分析方法,选择土壤动物优势类群蜱螨目(y_1)、弹尾目(y_2)、线虫纲(y_3),常见类群中的寡毛纲(y_4)、蚁科(y_5),稀有类群个体数(y_6),个体总数(y_7),类群总数(y_8),多样性指数 $H'(y_9)$ 和密度-类群指数 $D \cdot G(y_{10})$ 作为母数列(y)。对土壤和植被环境因素做单因素方差分析,舍弃差异不明显($P>0.05$)的总磷和铬、铅、汞等重金属含量(表

1),选择差异显著的 $pH(x_1)$ 、有机质(x_2)、总氮(x_3)、总钾(x_4)、全铜(x_5)、全镉(x_6)、土壤含水量(x_7)、土壤容重(x_8)、植被高度(x_9)和植被覆盖率(x_{10})作为子数列(x)。对原始数据初值化变换,计算灰色关联系数(r_{ij})(表6)。

表6 铜尾矿区土壤动物与主要影响因素间的灰色关联系数

Table 6 The grey relational degree among major factors affecting soil fauna in the copper mine tailing area

因素 Factors	pH x_1	有机质 x_2	总氮 x_3	总钾 x_4	全铜 x_5	全镉 x_6	土壤含水量 x_7	土壤容重 x_8	植被高度 x_9	植被覆盖率 x_{10}
蜱螨目 Acarina y_1	0.8806	0.8900	0.8348	0.9165	0.7177	0.8963	0.9074	0.8723	0.8000	0.7633
弹尾目 Collembola y_2	0.8452	0.8383	0.7778	0.8693	0.7090	0.8574	0.8672	0.8373	0.8015	0.7219
线虫纲 Nematoda y_3	0.8906	0.8858	0.8148	0.8906	0.7446	0.8913	0.9025	0.8779	0.7988	0.7351
寡毛纲 Oligochaeta y_4	0.7563	0.7613	0.7720	0.8035	0.6670	0.7657	0.7899	0.7461	0.7989	0.6742
蚁科 Formicidae y_5	0.8423	0.8425	0.7572	0.8450	0.7871	0.8360	0.8670	0.8314	0.7989	0.6810
稀有类群个体数 y_6	0.8986	0.8816	0.7839	0.9270	0.7578	0.8994	0.9296	0.8912	0.7990	0.7281
个体总数 y_7	0.9019	0.8808	0.8206	0.9393	0.7306	0.9238	0.9331	0.8950	0.7993	0.7545
类群数 y_8	0.9481	0.9153	0.8275	0.9323	0.7697	0.9513	0.9681	0.9399	0.8004	0.7559
多样性指数 y_9	0.9541	0.9207	0.8112	0.8947	0.7939	0.9444	0.9593	0.9438	0.8001	0.7415
密度-类群指数 y_{10}	0.8925	0.8996	0.8429	0.9437	0.7405	0.9068	0.9233	0.8815	0.8002	0.7820
灰色关联度	0.8810	0.8716	0.8043	0.8962	0.7418	0.8872	0.9047	0.8716	0.7997	0.7338

有机质: Soil organic matter, 总氮: Total N, 总钾: Total K, 全铜: Total Cu, 全镉: Total Cd, 土壤含水量: Soil moisture, 土壤容重: Bulk density of soils, 植被高度: Vegetation height, 植被覆盖率: Vegetation coverage, 稀有类群个体数: Number of rare groups, 个体总数: Number of individual, 类群数: Number of groups, 多样性指数: H' index, 密度-类群指数: $D \cdot G$ index, 灰色关联度: Gray relational degree

在所有的关联系数中, $r_{8,7}=r(y_8, x_7)=r(y_{10}, x_8)=0.9681$ 最大, 表明土壤含水量对土壤动物类群数影响最大; $r_{4,5}=0.6670$ 最小, 表明土壤全铜含量对寡毛纲的影响最小。

在单项关联系数 [$r_{1j}=r(y_1, x_j), r_{2j}, r_{3j}, r_{4j}, r_{5j}, r_{6j}, r_{7j}, r_{8j}, r_{9j}, r_{10j}$] 中, 蜱螨目、弹尾目、寡毛纲、个体总数和密度-类群指数 $D \cdot G$ 均受总钾(0.9165、0.8693、0.8035、0.9393、0.9437)影响最大, 同时均受全铜影响最小(0.7177、0.7090、0.6670、0.7306、0.7405)。线虫纲、蚁科、稀有类群个体数、类群数和多样性指数均受土壤含水量影响最大(0.9025、0.8670、0.9296、0.9681、0.9593), 同时均受植被覆盖度影响最小(0.7351、0.6810、0.7281、0.7559、0.7415)。

铜尾矿区环境因素灰色关联度均值大小顺序为土壤含水量(0.9047)、总钾(0.8962)、全镉(0.8872)、pH(0.8810)、土壤容重和有机质(0.8716)、总氮(0.8043)、植被高度(0.7997)、全铜(0.7418)、植被覆盖率(0.7338)。灰色关联度越大, 说明子数列对母数列的影响越大^[24], 由关联度大小顺序可以看出, 土壤理化性质与土壤动物的关系密切, 其中最重要的因素是土壤含水量和总钾含量, 重金属全镉含量也不能忽视; 对土壤动物影响最小的因素是植被和土壤全铜含量, 由此可见, 尾矿铜含量的高低并不是直接限制土壤动物重建的因素^[10]。

3 结论与讨论

3.1 铜尾矿区土壤动物群落结构与环境因素关系

铜陵市铜尾矿废弃地主要包括自然废弃地和复垦废弃地两大类, 本文遴选典型的杨山冲自然废弃地和林冲复垦废弃地作为案例地, 其中, 前者弃置时间短, 人为干扰少, 植被覆盖度高, 但基本上都是矮小的草本植被, 尤其是土壤基质差, 沙粒含量高, 偏干, 土壤容重高, 有机质和营养元素含量低; 后者弃置时间较长, 人为干扰大, 弃置后一直种植丹皮, 近两年才遗弃不种, 草本植被覆盖度较低, 但土壤基质较好, 粘粒含量高, 偏湿, 土壤容重较低, 有机质和营养元素含量较高。

对比2类铜尾矿废弃地土壤动物群落结构指标, 可以发现, 自然废弃地无论是个体数、类群数和丰富度指数, 还是大型土壤动物密度和密度-类群指数 $D \cdot G$ 等, 都比复垦废弃地土壤动物群落各类指标低, 且差异显

著(表3)。由此可见,虽然2类尾矿废弃地铜含量已达到污染水平,但并不是直接限制土壤动物群落重建的因子,主要起限制作用的是土壤含水量、土壤基质的优劣、土壤有机质与营养元素的含量,这些因素的改善主要归功于尾矿废弃地的土地复垦和作物种植。所以,尾矿废弃地的复垦与利用有利于土壤动物的恢复与重建。

3.2 铜尾矿废弃地土壤动物的来源

铜矿石经过加工冶炼提炼铜元素,其他废料和废渣排放进入尾矿库,土壤动物很可能全部死亡,受精卵也所剩无几。当尾矿库排满停用,经过自然演替逐渐形成尾矿废弃地。虽然尾矿废弃地土壤动物的类群数和个体总数没有外围林地多,但经过长期的闲置或覆土等过程,土壤动物多样性已经有了一定的增加(表3),这主要归因于尾矿废弃地土壤基质的形成与趋于稳定,自然植被的演替和栽培作物的引入等,也即食物来源的增多和生境的改善^[30-31]。

尾矿废弃地土壤动物有两条途径:(1)自然原因:迁移。土壤动物的侵入与定居是矿区废弃地群落结构形成的重要途径^[32],随着尾矿废弃地弃置时间的增加,土壤生态环境发生变化,土壤动物类群数和个体总数不断改变,导致土壤动物群落演替按不同的方式而展开。按照 De Goede 和 Chauvat 的试验原理^[33-34],本文中的蜱螨目、弹尾目、线虫纲、鞘翅目幼虫和双翅目幼虫等可能是尾矿废弃地绝对优势的机会主义定植者。自然废弃地与其对照组和复垦废弃地与其对照组的 q 相似系数分别达到0.5714和0.6875,可以说明外围林地土壤动物通过水流、气流或附着其他生物入侵到尾矿废弃地的可能性。(2)人为原因:覆土。覆土层含有大量微小动物类群^[35],若人工进行土壤覆盖,对土壤动物的恢复重建将有很大促进作用^[10]。林冲尾矿复垦废弃地覆土40cm左右,土层中势必伴有大量土壤动物,它们有可能抵御铜、镉等重金属的胁迫而存活下来^[36],成为现有土壤动物的重要组成部分。关于铜尾矿废弃地土壤动物的侵入、定居、集聚及其机理,有待进一步研究。

3.3 主要结论

(1)在铜陵市铜尾矿区设置4个样地23采样点,共捕获土壤动物4622只个体,隶属5门10纲18目29类。优势类群为蜱螨目、弹尾目和线虫纲,常见类群为寡毛纲、蚁科、双翅目幼虫、鞘翅目幼虫、双尾目、蜘蛛目和猛水蚤目,其余为稀有类群。

(2)丰富度指数d表明,自然废弃地与其对照组间土壤动物存在极显著差异($F=12.97, P<0.01$),而复垦废弃地与其对照组间并无显著差异。

(3)自然废弃地大型土壤动物密度远小于其对照组且存在极显著差异($F=9.13, P<0.01$),而复垦废弃地与其对照组间差异性不明显;无论自然还是复垦废弃地的中小型土壤动物密度均小于其对照组且差异极显著($F=27.72, P<0.01$)。

(4)自然废弃地Shannon-Wiener多样性指数 H' 小于其对照组且差异显著($P<0.05$),而复垦废弃地大于其对照组且差异极显著($P<0.01$);两类尾矿废弃地密度-类群 $D \cdot G$ 指数均小于其对照组。

(5)相似系数 q 表明,外围林地间土壤动物群落相似性最大,其次是复垦废弃地与外围林地间,自然废弃地与其它3个样地间相似性最小。

(6)从垂直分层来看,复垦废弃地土壤动物表聚性强于自然废弃地,尾矿废弃地表聚性强于外围林地。

(7)灰色关联分析表明,铜尾矿区土壤理化性质与土壤动物的关系密切,其中最重要的因素是土壤含水量和总钾含量,重金属全镉含量也不容忽视,植被因素和土壤全铜含量对土壤动物的影响相对较小。

致谢:安徽师范大学自然地理学2009级研究生章芹,地理科学专业2007级丁明强、张传田、陶征恺同学,2008级汪文翔、陆仁义、伍阳蕾同学参加了野外调查,特此致谢。

References:

- [1] Noble J C, Whitford W G, Kaliszewski M. Soil and litter microarthropod populations from two contrasting ecosystems in semi-arid eastern Australia. Journal of Arid Environments, 1996, 32(3): 329-346.

- [2] Wang S J, Ruan H H. Feedback mechanisms of soil biota to aboveground biology interrestrial ecosystems. *Biodiversity Science*, 2008, 16(4) : 407-416.
- [3] Reichle D E. The role of soil invertebrates in nutrient cycling//Persson L U T, ed. *Soil Organisms as Components of Ecosystems*. Stockholm: Ecological Bulletins, 1997, 25 : 145-156.
- [4] Coleman D C, Crossley D A, Jr. *Fundamentals of Soil Ecology*. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2004.
- [5] Jouquet P, Dauber J, Lagerlöf J, Lavelle P, Lepage M. Soil invertebrates as ecosystem engineers: intended and accidental effects on soil and feedback loops. *Applied Soil Ecology*, 2006, 32(2) : 153-164.
- [6] Yin W Y. A brief review and prospect on soil zoology. *Bulletin of Biology*, 2001, 36(8) : 1-3.
- [7] Tang B A, Tang G, Tang M, Li C E. Study on the ecological characteristic of soil animal resources in Yunshan National Forest Park. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(4) : 499-504.
- [8] Ekschmitt K, Griffiths B S. Soil biodiversity and its implications for ecosystem functioning in a heterogeneous and variable environment. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10(3) : 201-215.
- [9] Wolters V. Biodiversity of soil animals and its function. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37(4) : 221-227.
- [10] Yin X Q, Song B, Dong W H, Xin W D. A review on the eco-geography of soil fauna in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1) : 91-102.
- [11] Yang S Y, Xie J C, Liu D Y. Reclamation and plant colonization in copper mine tailings in Tongling, Anhui province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(5) : 488-493.
- [12] 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.
- [13] Wang Z Y, Sun Q Y, Lu Y C. Rehabilitation of biotic community of copper mine tailings in Tongling copper mine. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(3) : 7-11.
- [14] Ge F, Liu X H, Pan W D, Gao L, Zeng Y P, Jiang B Z. The role of earthworm in the ecological restoration of mining wasteland of Dexing copper mine in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11) : 1790-1795.
- [15] Zha S P, Ding Y G, Wang Z Y, Wang Q F, Sun Q Y. Study on soil animal community in copper mine tailings in Tongling city. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2) : 167-169.
- [16] Zhu Y H, Zhao C Y, Zhang P J, Lu L. Soil animals in abandoned mine land: a review. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(9) : 2088-2092.
- [17] Yin W Y. *Subtropical Soil Animals of China*. Beijing: Science Press, 1992.
- [18] Yin W Y, Hu S H, Shen Y F. *Pictorial Keys to Soil Animals of China*. Beijing: Science Press, 1998.
- [19] Margalef R. Information theory in ecology. *General System*, 1957, 3 : 37-71.
- [20] Ma K P, Liu C R, Liu Y M. Measurement of biotic community diversity. II. measurement of β diversity. *Chinese Biodiversity*, 1995, 3(1) : 38-43.
- [21] Liao C H, Li J X, Huang H T. Soil animal community diversity in the forest of the Southern subtropical region, China. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5) : 549-545.
- [22] Wang Z Y, Lu Y C, Wang H F. The ecological distribution of soil mites in Jiuhua Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(1) : 58-64.
- [23] Wang S J, Ruan H H, Wang J S, Xu Z K, Wu Y Y. Composition structure of soil fauna community under the typical vegetations in the Wuyi Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(19) : 5174-5184.
- [24] Liu S F, Dang Y G, Fang Z G. *The Grey System and Its Application*. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2004.
- [25] Wang Z Z, Zhang Y M, Xia W S, Yan H M, Guo Y C, Lai Q. Effects of organophosphorus pesticide on community structure of soil animals. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(4) : 357-366.
- [26] Li Z W, Wang Z Z, Zhang Y M, Xin X J. Effect of Cadmium on soil animal community structure. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(6) : 931-934.
- [27] Li T, Li C Y, Yu D A, Zhang J Y, Zheng R Q. Effects of heavy metals from road traffic on the community structure and spatial distribution of cropland soil animals. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(18) : 5001-5011.
- [28] Lin Y H, Zhang F D, Zhang J Q, Ouyang X J, Mo D S, Zhou G Y. Preliminary investigation on temporal and spatial variation of structure of soil fauna community in different natural vegetations of Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10) : 2616-2622.
- [29] Wang Z Z, Hu J L, Zhang Y M, Zheng Y Y, Wu Z F, Chen C F, Deng J F, Guo Y C, Yan H M, Lai Q. Influence of heavy metal pollution on soil animal community ecology in Qingshuitang area in Hunan. *Scientia Geographica Sinica*, 1994, 14(1) : 64-72.
- [30] Petersen H, Luxton M. A comparative analysis of soil faunal populations and their role in decomposition processes. *Oikos*, 1982, 39 (3) : 288-388.
- [31] Háněl L. Succession of soil nematodes in pine forests on coal-mining sands near Cottbus, Germany. *Applied Soil Ecology*, 2001, 16(1) : 23-34.

- [32] Topp W, Simon M, Kautz G, Dworschak U, Nicolini F, Prückner S. Soil fauna of a reclaimed lignite open-cast mine of the Rhineland: improvement of soil quality by surface pattern. *Ecological Engineering*, 2001, 17(2/3): 307-322.
- [33] de Goede R G M, van Dijk T S. Establishment of carabid beetle and nematode populations in a nature restoration project after the abandonment of arable land. *Applied Soil Ecology*, 1998, 9(1/3): 355-360.
- [34] Chauvat M, Ponge J F. Colonization of heavy metal-polluted soils by collembola: preliminary experiments in compartmented boxes. *Applied Soil Ecology*, 2002, 21(2): 91-106.
- [35] Xia H P, Cai X A. Ecological restoration technologies for mined lands: a review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11): 1471-1477.
- [36] Li F L, Zhang J E. Review on the ecological influences of environmental stresses on soil animals. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(6): 542-546.

参考文献:

- [2] 王邵军, 阮宏华. 土壤生物对地上生物的反馈作用及其机制. *生物多样性*, 2008, 16(4): 407-416.
- [6] 尹文英. 土壤动物学研究的回顾与展望. *生物学通报*, 2001, 36(8): 1-3.
- [7] 唐本安, 唐果, 唐敏, 李翠娥. 云山国家森林公园土壤动物资源生态特征. *自然资源学报*, 2003, 18(4): 499-504.
- [10] 殷秀琴, 宋博, 董炜华, 辛未冬. 我国土壤动物生态地理研究进展. *地理学报*, 2010, 65(1): 91-102.
- [11] 杨世勇, 谢建春, 刘登义. 铜陵铜尾矿复垦现状及植物在铜尾矿上的定居. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(5): 488-493.
- [12] 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.
- [13] 王宗英, 孙庆业, 路有成. 铜陵市铜尾矿生物群落的恢复与重建. *生态学杂志*, 2000, 19(3): 7-11.
- [14] 戈峰, 刘向辉, 潘卫东, 高林, 曾以平, 江炳真. 蚯蚓在德兴铜矿废弃地生态恢复中的作用. *生态学报*, 2001, 21(11): 1790-1795.
- [15] 查书平, 丁裕国, 王宗英, 汪权方, 孙庆业. 铜陵市铜尾矿土壤动物群落生态研究. *生态环境*, 2004, 13(2): 167-169.
- [16] 朱永恒, 赵春雨, 张平究, 陆林. 矿区废弃地土壤动物研究进展. *生态学杂志*, 2011, 30(9): 2088-2092.
- [17] 尹文英. 中国亚热带土壤动物. 北京: 科学出版社, 1992.
- [18] 尹文英, 胡圣豪, 沈韫芬. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [20] 马克平, 刘灿然, 刘玉明. 生物群落多样性测度方法 II. β 多样性的测度方法. *生物多样性*, 1995, 3(1): 38-43.
- [21] 廖崇惠, 李健雄, 黄海涛. 南亚热带森林土壤动物群落多样性研究. *生态学报*, 1997, 17(5): 549-545.
- [22] 王宗英, 路有成, 王慧美. 九华山土壤螨类的生态分布. *生态学报*, 1996, 16(1): 58-64.
- [23] 王邵军, 阮宏华, 汪家社, 徐自坤, 吴焰玉. 武夷山典型植被类型土壤动物群落的结构特征. *生态学报*, 2010, 30(19): 5174-5184.
- [24] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用(第三版). 北京: 科学出版社, 2004.
- [25] 王振中, 张友梅, 夏卫生, 颜亨梅, 郭永灿, 赖勤. 有机磷农药对土壤动物群落结构的影响研究. *生态学报*, 1996, 16(4): 357-366.
- [26] 李忠武, 王振中, 张友梅, 邢协加. Cd 对土壤动物群落结构的影响. *应用生态学报*, 2000, 11(6): 931-934.
- [27] 李涛, 李灿阳, 俞丹娜, 张加勇, 郑荣泉. 交通要道重金属污染对农田土壤动物群落结构及空间分布的影响. *生态学报*, 2010, 30(18): 5001-5011.
- [28] 林英华, 张夫道, 张俊清, 欧阳学军, 莫定生, 周国逸. 鼎湖山不同自然植被土壤动物群落结构时空变化. *生态学报*, 2005, 25(10): 2616-2622.
- [29] 王振中, 胡觉莲, 张友梅, 郑云有, 吴志峰, 陈彩芳, 邓继福, 郭永灿, 颜亨梅, 赖勤. 湖南省清水塘工业区重金属污染对土壤动物群落生态影响的研究. *地理科学*, 1994, 14(1): 64-72.
- [35] 夏汉平, 蔡锡安. 采矿地的生态恢复技术. *应用生态学报*, 2002, 13(11): 1471-1477.
- [36] 栗方亮, 章家恩. 环境胁迫对土壤动物生态学影响研究进展. *中国农学通报*, 2007, 23(6): 542-546.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 5 March, 2013 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The effect of nitrogen deposition on forest soil organic matter and litter decomposition and the microbial mechanism WANG Jingyuan, ZHANG Xinyu, WEN Xuefa, et al (1337)
Advances and the effects of industrial hemp for the cleanup of heavy metal pollution LIANG Shumin, XU Yanping, CHEN Yu, et al (1347)
A review for evaluating the effectiveness of BMPs to mitigate non-point source pollution from agriculture MENG Fande, GENG Runzhe, OU Yang, et al (1357)
Progresses in dendrochronology of shrubs LU Xiaoming, LIANG Eryuan (1367)

Autecology & Fundamentals

- The characteristics of nocturnal sap flow and stem water recharge pattern in growing season for a *Larix principis-rupprechtii* plantation WANG Yanbing, DE Yongjun, XIONG Wei, et al (1375)
Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings PEI Bin, ZHANG Guangcan, ZHANG Shuyong, et al (1386)
Diurnal activity time budget of Père David's deer in Hubei Shishou Milu National Nature Reserve, China YANG Daode, LI Zhuyun, LI Pengfei, et al (1397)
Sublethal effects of three insecticides on the reproduction and host searching behaviors of *Sclerodermus sichuanensis* Xiao (Hymenoptera: Bethyidae) YANG Hua, YANG Wei, YANG Chunping, et al (1405)

Population, Community and Ecosystem

- Seasonal succession of zooplankton in Sansha Bay, Fujian XU Jiayi, XU Zhaoli (1413)
Biomass production and litter decomposition of lakeshore plants in Napahai wetland, Northwestern Yunnan Plateau, China GUO Xuhu, XIAO Derong, TIAN Kun, et al (1425)
The flora and species diversity of herbaceous seed plants in wetlands along the Xin'anjiang River from Anhui YANG Wenbin, LIU Kun, ZHOU Shoubiao (1433)
Spatial-temporal variation of root-associated aerobic bacterial communities of *phragmites australis* and the linkage of water quality factors in constructed wetland XIONG Wei, GUO Xiaoyu, ZHAO Fei (1443)
Temporal dynamics and influencing factors of leaf respiration for three temperate tree species WANG Zhaoguo, WANG Chuankuan (1456)
Environmental controls on water use efficiency of a poplar plantation under different soil water conditions ZHOU Jie, ZHANG Zhiqiang, SUN Ge, et al (1465)
An analysis of calcium components of *Artemisia ordosica* plant on sandy lands in different ecological regions XUE Pingping, GAO Yubao, HE Xingdong (1475)
Effects of alpine meadow plant communities on soil nematode functional structure in Northern Tibet, China XUE Huiying, HU Feng, LUO Daqing (1482)
Soil fauna diversity of abandoned land in a copper mine tailing area ZHU Yongheng, SHEN Fei, YU Jian, et al (1495)
Effects of ciprofloxacin on microbial biomass carbon and carbon metabolism diversity of soil microbial communities MA Yi, PENG Jinju, WANG Yun, et al (1506)
Estimation of ecological water demands based on ecological water table limitations in the lower reaches of the Liaohe River Plain, China SUN Caizhi, GAO Ying, ZHU Zhengru (1513)

Landscape, Regional and Global Ecology

- The ecological security patterns and construction land expansion simulation in Gaoming SU Yongxian, ZHANG Hong'ou, CHEN Xiuzhi, et al (1524)
Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration LI Jianxing, HE Binghui, CHEN Yun (1535)

- The dynamic change of the thermal environment landscape patterns in Beijing, Shanghai and Guangzhou in the recent past decade MENG Dan, WANG Mingyu, LI Xiaojuan, et al (1545)

Change trends and driving factors of base flow in Kuye River Catchment LEI Yongnan, ZHANG Xiaoping, ZHANG Jianjun, et al (1559)

Photosynthetic characteristics, biomass allocation, C, N and P distribution of *Schima superba* seedlings in response to simulated nitrogen deposition LI Mingyue, WANG Jian, WANG Zhenxing, et al (1569)

Effect of iron slag adding on methane production, oxidation and emission in paddy fields WANG Weiqi, LI Pengfei, ZENG Congsheng, et al (1578)

Resource and Industrial Ecology

Antioxidative system and chlorophyll fluorescence of *Zizania latifolia* Turez. plants are affected by *Ustilago esculenta* infection YAN Ning, WANG Xiaoqing, WANG Zhidan, et al (1584)

Analysis of cold-regulated gene expression of the Fingered Citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* Swingle) CHEN Wenrong, YE Jiejun, LI Yongqiang, et al (1594)

Hosts preference of *Echinothrips americanus* Morgan for different vegetables ZHU Liang, SHI Baocai, GONG Yajun, et al (1607)

Induction effects of jasmonic acid on tannin content and defense-related enzyme activities in conventional cotton plants YANG Shiyong, WANG Mengmeng, XIE Jianchun (1615)

Effects of irrigation with paper mill effluent on growth and nutrient status of *Populus tomentosa* seedlings WANG Ye, XI Benye, CUI Xiangdong, et al (1626)

Water use efficiency of Jiangsu Province based on the data envelopment analysis approach ZHAO Chen, WANG Yuan, GU Xueming, et al (1636)

Research Notes

Characteristics of precipitation distribution in *Pinus tabulaeformis* plantations under different canopy coverage in Taiyue Mountain ZHOU Bin, HAN Hairong, KANG Fengfeng, et al (1645)

Driving factor analysis on the vegetation changes derived from the Landsat TM images in Beijing JIA Baoqun (1654)

Effects of *Mikania micrantha* wilt virus infection on photosynthesis and the activities of four enzymes in *Mikania micrantha* H. B. K. WANG Ruilong, PAN Wanwen, YANG Jiaoyu, et al (1667)

《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研工作者,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研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

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生态学报

(SHENTAI XUEBAO)

(半月刊 1981年3月创刊)

第33卷 第5期 (2013年3月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 5 (March, 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
主 编	王如松
主 管	中国科学技术协会
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路18号 邮政编码:100085
出 版	科学出版社 地址:北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717
印 刷	北京北林印刷厂
发 行	科学出版社 地址:东黄城根北街16号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局
国 外 发 行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京399信箱 邮政编码:100044
广 告 经 营	京海工商广字第8013号
许 可 证	

Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
Editor-in-chief	WANG Rusong
Supervised by	China Association for Science and Technology
Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
Domestic	All Local Post Offices in China
Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
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