

# 铜尾矿复垦地土壤动物群落的恢复

朱永恒 李克中 余健 陆林

安徽师范大学国土资源与旅游学院 芜湖 241003

**摘要:**土壤动物在退化生态系统的恢复与重建中发挥着重要作用。为了解铜尾矿复垦地区土壤动物群落特征的变化规律,采用样带法和陷阱法对安徽铜陵市林冲铜尾矿复垦地及其外围林灌地土壤动物群落进行调查。样带法共获得土壤动物 3 154 只,隶属 5 门 10 纲,共计 27 个类群,优势类群为线虫纲、弹尾目和蛴螬目,常见类群为猛水蚤目和鞘翅目幼虫;陷阱法共获得土壤动物 2 160 只,主要有弹尾目、膜翅目、双尾目、蜘蛛目、倍足纲和寡毛纲等 12 类群。自铜尾矿复垦地中心到外围林灌地,土壤动物密度和丰度呈递增趋势;与外围林灌地相比,铜尾矿复垦地土壤动物群落多样性 *DG* 指数较低而 Shannon-Wiener 指数较高;与外围林灌地距离越大,与外围林灌地群落相似性系数越小;表聚性越明显。地表土壤动物从外围林灌地迁入铜尾矿复垦地的多度和丰富度随间隔距离的增加而不断减少,随调查时间的延长而增加,随外围林灌类型的变化而变化。上述结果表明,铜尾矿复垦地及其外围林灌地土壤动物群落之间具有明显的时空差异性和渐变性,这为外围林灌地土壤动物迁入铜尾矿复垦地定居提供了证据。

**关键词:**尾矿废弃地;铜污染;土壤动物;迁居与恢复;铜陵市

**中图分类号:**Q958.1, S154.5 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3263(2013)03-417-11

## Rehabilitation of Soil Fauna in Reclaimed Abandoned Land of Copper-mine-tailings

ZHU Yong-Heng LI Ke-Zhong YU Jian LU Lin

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

**Abstract:** Soil fauna played an important role in the process of the degraded ecosystem rehabilitation and rebuild. To understand the variation characteristics of soil fauna community in reclaimed land that have been occupied by copper-mine-tailings, belt transect method and pitfall trapping test at Linchong reclaimed abandoned land of copper-mine-tailings (RALC) and suburbs forest and shrub land (SFSL) were used to investigated soil fauna communities in the city of Tongling, Anhui Province. A total of 3 154 individuals of soil fauna were collected which belonged to 27 genera, 5 phyla, 10 classes using belt transect method. Nematodes, Collembola and Acarina were the dominant groups, Harpacticoida and Coleoptera larvae were the frequent groups. A total of 2 160 individuals of soil fauna were collected which belonged to 12 genera mainly including the Collembola, Hymenoptera, Diplura, Araneae, Diplopoda and Oligochaeta using pitfall trapping test. The density and richness of soil fauna have the trend of constantly increasing from treatments of central RALC to that of SFSL. At treatments of RALC there was a low *DG* diversity index and a high Shannon-Wiener diversity index in comparison with that of SFSL. The greater the distance from treatments of RALC to that of SFSL, the smaller was the jaccard similarity coefficient (*q*) of treatments of RALC with that of SFSL and the more obvious was the

**基金项目** 国家自然科学基金项目 (No. 41001031, 41101529); ;

**第一作者介绍** 朱永恒,男,博士;研究方向:土壤动物群落生态学;E-mail: yhzhu876@mail.ahnu.edu.cn。

**收稿日期:**2012-12-14, **修回日期:**2013-04-18

surface aggregation of soil fauna in soil profile at treatments of RALC. The abundance and richness of ground-dwelling soil fauna immigrated from SFSL to RALC were constantly reducing by the increase of spacing distance, and were constantly increasing by the extending of investigation time, and were changing by the types of suburbs forest and shrub. The above results indicated that there were a very significant spatiotemporal differences and gradual changes of soil fauna community between RALC and SFSL which provided evidence for the immigration and colonization of soil fauna from SFSL to RALC.

**Key words:** Abandoned land of mine tailings; Copper pollution; Soil fauna; Immigration and rehabilitation; Tongling

尾矿废弃地是指堆放煤炭、有色金属(铜、铅、锌)、黑色金属(铁、锰)、化工(磷、硫、钾)等尾矿造成的废弃土地,因其土壤理化性质恶劣,重金属含量高,植被稀少,生物贫乏(Ye et al. 2000),是一种特殊的退化生态系统。尾矿废弃地自然生态恢复过程表现为典型的生态系统原生演替过程。土壤动物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(Noble et al. 1996),对地表植物群落的结构、功能和演替起着重要调控作用(王邵军等 2008),尤其在矿区退化生态系统功能重建中发挥着至关重要的作用,如改善土壤通气性与结构、促进营养循环等(Cristescu et al. 2012)。土壤动物恢复是矿区废弃地生态恢复成功的关键,可提高矿区废弃地生态恢复的成功率和可持续性(Ma et al. 2006, Frouz et al. 2007, Wong et al. 2008, Carrillo et al. 2011)。

研究显示,矿区废弃地植被恢复、土壤基质(包括重金属毒性和土壤养分含量)与土壤动物恢复存在一定的相关关系(王宗英等 2000, 冯伟松等 2004, Shao et al. 2008, 朱永恒等 2013),而且矿区废弃地土壤动物群落及其主要类群具有一定的演替规律及其与植被、微生物之间的相互作用(Frouz et al. 2008, Courtney et al. 2010, Mudrák et al. 2012),所以土壤动物可以作为矿区废弃地生态恢复的生物指示物(Lee et al. 2001, Dunger et al. 2005)。但上述研究仅局限于矿区废弃地本身,而没有与邻近自然生态系统关联起来。实际上,矿区废弃地与邻近自然生态系统土壤动物群落之间存在一定的相互关系(朱永恒等 2012, 2013),可为矿区废弃地土壤动物的迁居与恢复提供证据。基

于此,本文以铜陵市铜尾矿复垦废弃地为例,基于尾矿复垦地与外围自然生态系统之间的天然联系,提出“铜尾矿废弃地土壤动物可利用资源(包括食物资源和庇护场所)从外围自然生态系统到废弃地中心具有不断递减的趋势,从而导致土壤动物群落指标也具有不断递减的趋势”的假设,采用两种野外土壤动物空间水平分布调查方法,探讨铜尾矿复垦地土壤动物群落与外围自然生态系统之间的关系,以期为矿区废弃地乃至退化生态系统土壤动物恢复提供思路。

## 1 研究区概况与研究方法

**1.1 自然概况** 研究区域位于铜尾矿生态学研究的典型区域——安徽中南部铜陵凤凰山林冲铜尾矿(杨世勇等 2004),位于  $30^{\circ}56'42''\text{N}$ 、 $117^{\circ}43'28''\text{E}$ ,气候属亚热带湿润季风气候,平均气温  $16.2^{\circ}\text{C}$ ,降水量  $1\,390\text{ mm}$ ,平均湿度  $75\% \sim 80\%$ 。

研究样地为林冲铜尾矿复垦地及其外围林灌地:(1)林冲铜尾矿复垦地(reclaimed abandoned land of copper-mine-tailings, RALC):三面环山,一面修建石坝(长  $200\text{ m}$ ,高  $40\text{ m}$ ),海拔  $105\text{ m}$ ,面积  $31\text{ hm}^2$ ,总库容  $120\text{ 万 m}^3$ ,1979 年停止使用后当地农民覆土种植药用植物丹皮(*Paeonia suffruticosa*),并辅种大豆(*Glycine max*)等豆科植物,2009 年铲除丹皮,自然生长茂密杂草,优势种为荩草(*Arthraxon hispidus*),混有少量芒(*Miscanthus sinensis*)、狗尾草(*Setaria viridis*)和小飞蓬(*Conyza canadensis*)等。(2)林冲铜尾矿外围林灌地(suburbs forest and shrub land, SFSL):以落叶树

种为主,优势种为苦木(*Picrasma quassioides*),混有槲木(*Aralia chinensis*)、华瓜木(*Alangium chinense*)、毛泡桐(*Paolownia tomentosa*)、山鸡椒(*Litsea cubeba*)、大青(*Clerodendrum cwtophyllum*)、马棘(*Indigofera pseudotinctoria*)和山槐(*Albizia kalkora*)等。

**1.2 研究方法** 采用样带法调查铜尾矿复垦地土壤动物迁居的空间分布格局。2011 年 3 月底,在凤凰山林冲铜尾矿复垦区中心向外围林灌地方向设置 4 条放射状土壤动物调查样带(汇聚于尾矿复垦地中心点),每样带均匀布设 4 个样点(间距 50 m 左右),其中 3 个样点位于铜尾矿复垦地,1 个样点位于外围林灌地,共 13 个样点(图 1)。按样点与外围林灌地距离设置 4 种处理:处理 1(RALC<sub>0</sub>),位于尾矿复垦地中心,距离外围林灌地大约 150 m,只有 1 重复(0);处理 2(RALC<sub>1</sub>),距离外围林灌地大约 100 m,4 重复(10、11、12、13);处理 3(RALC<sub>2</sub>),距离外围林灌地大约 50 m,4 重复(20、21、22、23);处理 4(SFSL<sub>3</sub>),位于外围林灌

地,4 重复(30、31、32、33)。其土壤理化性质见表 1。

在每个样点设置 2 个样方(30 cm × 30 cm),分 4 层(0 ~ 5 cm、5 ~ 10 cm、10 ~ 15 cm、15 ~ 20 cm)采集大型与中小型土壤动物,其中大型土壤动物采用铁锹按土壤剖面分 4 层取样,采用手拣方法分离;中小型土壤动物距大型土壤动物样方 50 cm,由于铜尾矿复垦地及其外围林灌地几乎没有凋落物,为了使土壤动物数据具有可比性,剔除了少量样点内的稀疏凋落物,每层沿 4 角取 4 个 100 cm<sup>3</sup> 土壤环刀取样,其中 3 个均匀混合成干生土壤动物土样,另 1 个的 1/4 作为湿生土壤动物土样,其余 3/4 土样作土壤理化性质分析用。中小型土壤动物土样共计 104 个,带回实验室,分别用 Tullgren 法与 Baermann 法(土壤动物研究方法手册编写组 1998)分离提取干生和湿生土壤动物。

同时采用陷阱法调查铜尾矿复垦地土壤动物迁居的时间动态。在样区内设置 2 组陷阱,

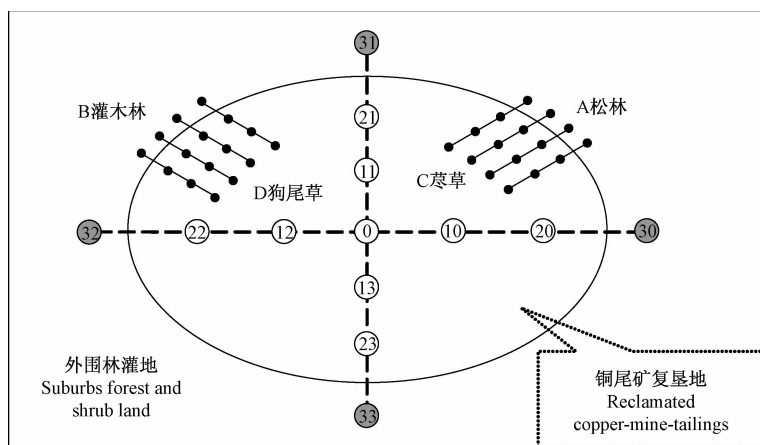


图 1 铜尾矿区土壤动物调查示意图

Fig. 1 Investigation of soil fauna diagram in the copper mine tailing area

虚线代表土壤动物调查样带,带圈的数字编号为铜尾矿复垦地土壤动物调查样点,灰底的数字编号为外围林灌地土壤动物调查样点;实线代表地表动物陷阱法收集带,黑点为陷阱;A、B 为外围林灌地植被类型,C、D 为铜尾矿复垦地植被类型。

The dotted lines represent the belt transect to survey soil fauna, and the encircled numbers represent soil fauna sampling points in reclaimed abandoned land of copper-mine-tailings, and the ash bottom numbers represent soil fauna sampling points in suburbs forest and shrub land. The solid lines represent the pitfall trapping belt surface to collect soil fauna, and the blackspots represent the pitfalls. The capital letter of A and B represent the vegetation types in suburbs forest and shrub land, and C and D represent the vegetation types in reclaimed abandoned land of copper-mine-tailings.

表 1 铜尾矿复垦地及其外围林灌地各样地自然环境条件

Table 1 Natural conditions of the sites in RALC and SFSL treatments

处理 Treatment	RALC <sub>0</sub>	RALC <sub>1</sub>	RALC <sub>2</sub>	RALC <sub>3</sub>	F 值 F value
样点 Sampling point	RALC <sub>0</sub>	RALC <sub>10</sub> , RALC <sub>11</sub> , RALC <sub>12</sub> , RALC <sub>13</sub>	RALC <sub>20</sub> , RALC <sub>21</sub> , RALC <sub>22</sub> , RALC <sub>23</sub>	SFSL <sub>30</sub> , SFSL <sub>31</sub> , SFSL <sub>32</sub> , SFSL <sub>33</sub>	
土壤 pH 值 Soil pH value (pH)	7.32	7.40 ± 0.38	7.38 ± 0.19 **	6.76 ± 0.08	10.36
土壤有机质 Soil organic matter (SOM) (%)	1.62	1.86 ± 0.30	2.19 ± 0.75	3.02 ± 0.80 **	4.62
全磷 Total Phosphorus (TP) (%)	0.07	0.06 ± 0.01	0.05 ± 0.00	0.74 ± 0.07 **	7.50
全氮 Total nitrogen (TN) (%)	0.57	0.56 ± 0.15	0.46 ± 0.13	1.40 ± 0.18 **	36.79
全钾 Total kalium (TK) (%)	3.21	2.08 ± 0.34	2.20 ± 0.08	5.19 ± 0.33 **	140.87
全铜 Total copper (Cu) (mg/kg)	401.12	1 028.40 ± 177.04 **	973.61 ± 169.79	55.63 ± 16.86	34.69
土壤含水量 Soil moisture (SM) (%)	16.85	16.47 ± 2.80	16.46 ± 0.68	20.53 ± 4.40	2.20
土壤容重 Bulk density of soils (BDS) (g/cm <sup>3</sup> )	1.26	1.22 ± 0.02	1.22 ± 0.06	1.35 ± 0.06 *	7.29
植被类型 Vegetation type	荩草 <i>Arthraxon hispidus</i>	荩草 <i>A. hispidus</i>	荩草 <i>A. hispidus</i>	苦木 <i>Picrasma quassioides</i> , 火炬松 <i>Pinus taeda</i> , 楸木 <i>Aralia chinensis</i>	

\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ ; 同行中一个星号代表独立变量间差异显著, 两个星号代表独立变量间极显著; RALC: 铜尾矿复垦地, SFSL: 外围林灌地。

\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$  Different superscripts in the same column show the significant difference at  $P = 0.05$  and  $0.01$ ; RALC: Reclaimed abandoned land of copper-mine-tailings, SFSL: Suburbs forest and shrub land.

距离样带法样点大约 20 ~ 30 m, 第 1 组由外围松林(A)地到荩草复垦地(C), 第 2 组由外围灌木林地(B)到狗尾草复垦地(D)。每组布设 4 条平行样线(间距 5 m), 每条样线等距离布设 4 个陷阱收集器(间距 2 m), 其中外围林灌地 1 个陷阱, 复垦地 3 个陷阱(与外围林灌地陷阱的距离分别为 2 m、4 m 和 6 m), 共计 32 个陷阱。具体方法是, 将置有浓度为 3% 的福尔马林溶液直径 6.5 cm、高 10 cm 矿泉水瓶埋在地下, 口与地面齐平。分 2 次调查(10 d 后、30 d 后), 每次分别调查 2 组中的 2 条样线, 收集落入陷阱收集器中的土壤动物。

土壤动物的鉴定主要参照《中国亚热带土壤动物》(尹文英 1992) 和《中国土壤动物检索图鉴》(尹文英 1998) 进行。

**1.3 土壤主要性质分析** 土壤 pH 值测定采用水土比为 2.5:1 酸度计法, 土壤有机质采用重铬酸钾容量法, 全磷采用酸溶-钼锑抗比色法, 全氮采用开氏消煮法, 全钾采用氢氧化钠熔融法/火焰光度计法, 全铜采用氢氟酸-硝酸-高氯酸消煮 ICP 法, 土壤含水量与土壤容重采用烘干法和环刀法。

**1.4 数据分析** 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% 之间的为常见类群, 介于 0.1% ~ 1% 为稀有类群、0.1% 以下的为极稀有类群。

群落多样性指数采用 Shannon-Wiener 多样性指数( $H$ )、Pielou 均匀度指数( $E$ )、Simpson 优势度指数( $C$ ) (马克平等 1994) 和密度-类群指数( $DG$ ) (廖崇惠等 1997) 分析土壤动物群落结构, 采用 Jaccard 相似性系数( $S$ ) 分析群落相似性(王宗英等 1996)。各指数计算公式如下:

$$H = - \sum p_i \ln p_i$$
, 式中  $p_i = n_i / N$ ,  $n_i$  为每一类群的个体数,  $N$  为群落个体数。

$$E = H / H_{\max}$$
, 式中  $H_{\max} = \ln S$  为最大多样性指数,  $S$  为类群数。

$$C = \sum (n_i / N)^2$$
, 式中  $n_i$  为每一类群的个体数,  $N$  为群落个体数。

$$DG = (g / G) \sum (D_i C_i / D_{\max} C)$$
, 式中  $D_i$  为第  $i$  个类群个体数,  $D_{\max}$  为  $C$  个群落中第  $i$  个类群的最大值,  $C_i$  为第  $i$  个类群在  $C$  个群落中出现的次数,  $g$  为要测度的某群落实有类群数,  $G$  为  $C$  个群落中出现的类群数。

$S = c / (a + b - c)$ , 式中  $c$  为两群落的共有类群数,  $a$ 、 $b$  分别为两个群落的类群数。

铜尾矿复垦地及其外围林灌地不同处理对土壤动物密度、丰富度和群落指标的影响采用 One-way-ANOVA 方差分析方法, 按 4 处理(间隔距离)4 重复统计分析, 其中  $RALC_0$  只有 1 重复; 陷阱法试验对土壤动物多度、丰富度的影响采用巢式方差分析, 按 2 组(外围林灌类型)4 处理(间隔距离)2 时段(调查时间)2 重复统计分析。所有统计分析都在 Excel 2003 和 SPSS 13.0 上完成。利用软件 Canoco for Windows 4.5 中的 RDA(redundancy analysis)分析方法对不同样点土壤动物与环境因子进行排序, 揭示铜尾矿区土壤动物的分布格局。

## 2 结 果

**2.1 铜尾矿复垦地及其外围林灌地土壤动物群落的组成** 2011 年春季对林冲铜尾矿复垦地及其外围林灌地进行土壤动物取样调查, 共捕获土壤动物 3 154 只, 隶属 5 门 10 纲, 共计 27 个类群(表 2)。其中, 线虫纲(Nematoda)、弹尾目(Collembola)和蜱螨目(Acarina)为优势类群(占总密度  $\geq 10\%$ ), 占 27 类土壤动物总密度的 90.191%, 线虫纲平均密度远大于弹尾目和蜱螨目, 优势度极为显著。猛水蚤目(Harpacticoida)和鞘翅目幼虫(Coleoptera larvae)为常见类群(占总密度的 1% ~ 10%), 占土壤动物总密度的 8.137%。其余 22 类土壤动物为稀有类群(占总密度  $< 1\%$ ), 其中双翅目幼虫(Diptera larvae)平均密度相对较大, 而伪蝎目(Pseudoscorpionida)、等足目(Isopoda)、半翅目(Hemiptera)、直翅目(Orthoptera)、蜚蠊目(Blattodea)、涡虫纲(Turbellaria)、等翅目(Isoptera)、双翅目(Diptera)和缨尾目(Thysanura)等仅在 1 ~ 2 种处理中出现。

**2.2 铜尾矿复垦地及其外围林灌地土壤动物群落结构的关联**

**2.2.1 土壤动物水平分布** 总体来看(表 2、3), 土壤动物多度在不同处理间的变化顺序为

$SFSL_3 (393.50) > RALC_0 (216.00) > RALC_2 (169.75) > RALC_1 (165.75)$ , 土壤动物总密度为  $SFSL_3 (132.41 \times 10^3) > RALC_0 (88.48 \times 10^3) > RALC_1 (75.66 \times 10^3) > RALC_2 (54.50 \times 10^3)$ , 土壤动物丰富度为  $SFSL_3 (18.25) > RALC_1 (16.00) > RALC_0 (15.00) > RALC_2 (14.00)$ 。结果表明, 外围林灌地土壤动物多度、总密度与丰富度皆最大, 铜尾矿复垦地土壤动物多度和密度随着与外围林灌地距离的增加而增大, 丰富度变化不明显。

从主要土壤动物类群来看(表 2), 铜尾矿复垦地处理中线虫纲( $F = 2.94, P < 0.05$ )、弹尾目( $F = 4.81, P < 0.01$ )和蜱螨目( $F = 3.24, P < 0.05$ )密度显著小于外围林灌地处理, 但鞘翅目幼虫密度( $F = 14.61, P < 0.01$ )在铜尾矿复垦地处理中显著提高, 猛水蚤目和双翅目幼虫密度在 2 类处理中无显著差异。在铜尾矿复垦地 3 处理中, 各主要土壤动物类群的密度与外围林灌地距离的处理效应不明显。

另外, 根据收集地表土壤动物的调查结果, 10 d 后调查 4 条样线 16 陷阱收集器里的土壤动物, 共计 832 只, 30 d 后再次调查另 4 条样线 16 陷阱收集器里的土壤动物, 共计 1 328 只, 主要有弹尾目、膜翅目、双尾目、蜘蛛目、倍足纲和寡毛纲等 12 类群。巢式方差分析结果显示(表 4), 外围林灌类型、调查时间和间隔距离对土壤动物多度与丰富度皆产生极显著影响, 而外围林灌类型与调查时间、外围林灌类型与间隔距离的交互作用只对土壤动物多度产生极显著影响。结果表明, 土壤动物从外围林灌地迁入铜尾矿复垦地的多度和丰富度随着间隔距离的增加而不断减少, 随着调查时间的延长而增多, 随着外围林灌类型的变化而变化(外围灌木林地多于松林地), 能迁入到铜尾矿复垦地的是那些善爬行的土壤动物如弹尾虫、蚂蚁、双尾虫、蜘蛛、马陆和蚯蚓等。

**2.2.2 土壤动物垂直分层** 在铜尾矿复垦地和外围林灌地 4 处理中, 土壤动物群落密度和丰富度在土层中垂直分布存在显著差异( $P < 0.05$ ), 均呈明显的表聚现象(表 5)。土壤动物

表 2 铜尾矿复垦地及其外围林灌地土壤动物密度( × 10<sup>3</sup> 个/ m<sup>2</sup> )

Table 2 Density of soil fauna in RALC and SFSL treatments ( × 10<sup>3</sup> ind/ m<sup>2</sup> )

类群 Groups	类型 Type	RALC <sub>0</sub>	RALC <sub>1</sub>	RALC <sub>2</sub>	SFSL <sub>3</sub>	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	丰度( % ) Specific gravity
线虫纲 Nematoda	中小型湿生	58. 00	50. 50 ± 5. 73	32. 00 ± 3. 59	72. 50 ± 6. 37 *	2. 94	59. 853
弹尾目 Collembola	中小型干生	7. 83	6. 29 ± 1. 24	7. 79 ± 1. 81	30. 29 ± 2. 61 **	4. 81	16. 361
蜱螨目 Acarina	中小型干生	9. 50	7. 88 ± 1. 87	8. 29 ± 1. 63	21. 04 ± 1. 92 *	3. 24	13. 977
猛水蚤目 Harpacticoida	中小型湿生	0. 00	9. 50 ± 1. 24	3. 00 ± 1. 58	6. 00 ± 0. 74	1. 44	6. 533
鞘翅目幼虫 Coleoptera larvae	中小型湿生	5. 67 **	0. 42 ± 0. 12	1. 83 ± 0. 48	0. 88 ± 0. 06	14. 61	1. 604
双翅目幼虫 Diptera larvae	中小型湿生	0. 83	0. 50 ± 0. 16	1. 08 ± 0. 57	0. 96 ± 0. 08	0. 71	0. 971
原尾目 Protura	中小型干生	0. 17	0. 00	0. 04 ± 0. 01	0. 33 ± 0. 05 *	3. 61	0. 147
膜翅目 Hymenoptera	大型	0. 13	0. 21 ± 0. 09 **	0. 11 ± 0. 05	0. 03 ± 0. 01	4. 32	0. 134
寡毛纲 Oligochaeta	大型	0. 04	0. 11 ± 0. 06	0. 08 ± 0. 06	0. 17 ± 0. 04	1. 03	0. 130
鳞翅目幼虫 Lepidoptera larvae	中小型湿生	0. 00	0. 08 ± 0. 03	0. 04 ± 0. 01	0. 04 ± 0. 01	0. 80	0. 059
鞘翅目 Coleoptera	大型	0. 03	0. 03 ± 0. 01	0. 09 ± 0. 03 **	0. 02 ± 0. 01	13. 72	0. 054
双尾目 Diplura	中小型干生	0. 06	0. 05 ± 0. 02	0. 05 ± 0. 03	0. 03 ± 0. 01	0. 85	0. 048
蜘蛛目 Araneae	大型	0. 10 **	0. 04 ± 0. 02	0. 03 ± 0. 02	0. 01 ± 0. 00	4. 71	0. 040
唇足纲 Chilopoda	大型	0. 03	0. 01 ± 0. 00	0. 00	0. 04 ± 0. 01 **	16. 80	0. 019
综合纲 Symphyla	中小型干生	0. 00	0. 01 ± 0. 00	0. 02 ± 0. 01	0. 02 ± 0. 00	0. 86	0. 017
腹足纲 Gastropoda	大型	0. 03 **	0. 02 ± 0. 01	0. 01 ± 0. 00	0. 00 ± 0. 00	7. 61	0. 016
盲蛛目 Odiliones	大型	0. 03 **	0. 01 ± 0. 00	0. 01 ± 0. 00	0. 00	22. 60	0. 008
倍足纲 Diplopoda	大型	0. 00	0. 001 ± 0. 00	0. 01 ± 0. 01	0. 001 ± 0. 00	0. 82	0. 007
伪蝎目 Pseudoscorpionida	中小型干生	0. 01	0. 00	0. 00	0. 02 ± 0. 01 **	9. 00	0. 007
等足目 Isopoda	大型	0. 00	0. 00	0. 00	0. 01 ± 0. 00 **	2. 00	0. 004
半翅目 Hemiptera	大型	0. 00	0. 001 ± 0. 00	0. 00	0. 01 ± 0. 00	1. 00	0. 003
直翅目 Orthptera	大型	0. 00	0. 00	0. 001 ± 0. 00	0. 003 ± 0. 00	1. 00	0. 002
蜚蠊目 Blattodea	大型	0. 00	0. 00	0. 00	0. 01 ± 0. 00	1. 00	0. 002
涡虫纲 Turbellaria	中小型湿生	0. 00	0. 00	0. 001 ± 0. 00	0. 00	1. 00	0. 001
等翅目 Isoptera	中小型干生	0. 00	0. 001 ± 0. 00	0. 00	0. 00	1. 00	0. 001
双翅目 Diptera	大型	0. 00	0. 00	0. 00	0. 003 ± 0. 00	1. 00	0. 001
缨尾目 Thysanura	中小型干生	0. 00	0. 00	0. 00	0. 003 ± 0. 00	1. 00	0. 001
密度合计 Sum of density		88. 48	75. 66 ± 20. 20	54. 50 ± 24. 64	132. 41 ± 38. 69 *	2. 55	

\*  $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ : 同行中一个星号代表独立变量间差异显著, 两个星号代表独立变量间极显著; RALC: 铜尾矿复垦地, SFSL: 外围林灌地。

\*  $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$  Different superscripts in the same column show the significant difference at  $P = 0.05$  and  $0.01$ ; RALC: Reclaimed abandoned land of copper-mine-tailings, SFSL: Suburbs forest and shrub land.

表 3 铜尾矿复垦地及其外围林灌地土壤动物群落结构指标

Table 3 Community structure index of soil fauna in RALC and SFSL treatments

指标 Indexs	RALC <sub>0</sub>	RALC <sub>1</sub>	RALC <sub>2</sub>	SFSL <sub>3</sub>	<i>F</i> 值 <i>F</i> value
多度 Abundance(ind)	216. 00	165. 75 ± 33. 15	169. 75 ± 43. 80	393. 50 ± 140. 10 **	8. 13
丰富度 Richness(ind)	15. 00	16. 00 ± 2. 58	14. 00 ± 1. 83	18. 25 ± 2. 36 *	3. 40
Shannon-Wiener 多样性指数 <i>H</i> index	0. 900 1 **	0. 849 6 ± 0. 102 3	0. 819 8 ± 0. 070 6	0. 595 2 ± 0. 091 5	12. 19
Pielou 均匀性指数 <i>E</i> index	0. 765 3 **	0. 707 5 ± 0. 066 2	0. 720 5 ± 0. 096 2	0. 471 4 ± 0. 054 1	16. 89
Simpson 优势度指数 <i>C</i> index	0. 166 8	0. 204 1 ± 0. 063 9	0. 215 3 ± 0. 049 1	0. 408 1 ± 0. 084 7 **	13. 74
密度-类群指数 <i>DG</i> index	1. 734 6	1. 580 5 ± 0. 376 4	1. 635 9 ± 0. 266 2	2. 632 1 ± 0. 889 2 *	3. 73

\*  $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ : 同行中一个星号代表独立变量间差异显著, 两个星号代表独立变量间极显著; RALC: 铜尾矿复垦地, SFSL: 外围林灌地。

\*  $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$  Different superscripts in the same column show the significant difference at  $P = 0.05$  and  $0.01$ ; RALC: Reclaimed abandoned land of copper-mine-tailings, SFSL: Suburbs forest and shrub land.

表 4  外围林灌类型、调查时间和间隔距离对土壤动物群落多度和丰富度的影响

Table 4    Effect of type of suburbs forest and shrub, investigation time and spacing distance on abundance and richness of soil fauna communities					
项目 Item	自由度 <i>df</i>	<i>F</i> <sub>0.05</sub>	<i>F</i> <sub>0.01</sub>	多度 <i>F</i> 值 <i>F</i> value of abundance	丰富度 <i>F</i> 值 <i>F</i> value of richness
外围林灌类型 Type of suburbs forest and shrub	1	4. 54	8. 68	173. 56 **	43. 44 **
调查时间 Investigation time	1	4. 54	8. 68	30. 15 **	12. 80 **
间隔距离 Spacing distance	3	3. 29	5. 42	12. 93 **	25. 76 **
外围林灌类型 × 调查时间 Type of suburbs forest and shrub × Investigation time	1	4. 54	8. 68	13. 67 **	4. 29
外围林灌类型 × 间隔距离 Type of suburbs forest and shrub × Spacing distance	3	3. 29	5. 42	15. 62 **	1. 55
调查时间 × 间隔距离 Investigation time × Spacing distance	3	3. 29	5. 42	0. 86	0. 41
外围林灌类型 × 调查时间 × 间隔距离 Type of suburbs forest and shrub × Investigation time × Spacing distance	3	3. 29	5. 42	0. 48	0. 22
误差项 Residual	15				

\*\**P* < 0. 01; 两个星号代表独立变量间差异极显著。 \*\**P* < 0. 01; The superscripts show the difference at *P* = 0. 01.

表 5  铜尾矿复垦地及其外围林灌地土壤动物群落密度与丰富度的垂直分层

Table 5    The vertical distribution of soil fauna communities in RALC and SFSL treatments								
土层 Soil layers	密度 ( ×10 <sup>3</sup> 个/ m <sup>2</sup> ) Density ( ×10 <sup>3</sup> ind/ m <sup>2</sup> )				丰富度 ( 个 ) Richness ( ind )			
	RALC <sub>0</sub>	RALC <sub>1</sub>	RALC <sub>2</sub>	SFSL <sub>3</sub>	RALC <sub>0</sub>	RALC <sub>1</sub>	RALC <sub>2</sub>	SFSL <sub>3</sub>
0 ~ 5 cm	25. 83	38. 80 ± 18. 58 *	30. 73 ± 12. 73 *	51. 04 ± 21. 33 *	13	11. 50 ± 1. 00 *	11. 25 ± 1. 89 *	11. 75 ± 3. 10 *
5 ~ 10 cm	20. 82	18. 05 ± 5. 40	12. 05 ± 5. 58	40. 16 ± 12. 55	10	7. 25 ± 0. 50	7. 00 ± 3. 16	9. 25 ± 2. 22
10 ~ 15 cm	21. 68	12. 09 ± 4. 91	6. 48 ± 2. 28	30. 19 ± 13. 11	8	6. 25 ± 1. 26	4. 75 ± 1. 89	7. 00 ± 2. 16
15 ~ 20 cm	20. 14	6. 71 ± 2. 56	5. 25 ± 2. 55	11. 01 ± 3. 57	5	4. 25 ± 1. 89	3. 00 ± 0. 82	5. 50 ± 2. 65
<i>F</i> 值 <i>F</i> value	—	7. 19	6. 89	2. 51	—	23. 31	11. 40	4. 55

\* *P* < 0. 05; 同列中一个星号代表独立变量间差异显著; RALC: 铜尾矿复垦地, SFSL: 外围林灌地。

\* *P* < 0. 05; The superscripts in the same row show the difference at *P* = 0. 05; RALC: Reclaimed abandoned land of copper-mine-tailings, SFSL: Suburbs forest and shrub land.

群落密度和丰富度垂直分层 One-way-ANOVA 方差 *F* 值大小排序均为 RALC<sub>1</sub> ( 7. 19, 23. 31 ) > RALC<sub>2</sub> ( 6. 89, 22. 40 ) > SFSL<sub>3</sub> ( 2. 51, 4. 55 )。结果表明, 铜尾矿复垦地土壤动物群落密度和丰富度比外围林灌地的表聚性更明显, 且随着与外围林灌地距离的减少, 土壤动物垂直分层的表聚性越来越弱。

**2. 2. 3 土壤动物群落多样性与相似性** 对比铜尾矿复垦地与外围林灌地 4 处理间的土壤动物群落指数 ( 表 3 ), Shannon-Wiener 多样性指数排序为 RALC<sub>0</sub> > RALC<sub>1</sub> > RALC<sub>2</sub> > SFSL<sub>3</sub>, Pielou 均匀性指数排序为 RALC<sub>0</sub> > RALC<sub>2</sub> > RALC<sub>1</sub> > SFSL<sub>3</sub>, Simpson 优势度指数排序为 SFSL<sub>3</sub> > RALC<sub>2</sub> > RALC<sub>1</sub> > RALC<sub>0</sub>, 密度-类群指数排序为 SFSL<sub>3</sub> > RALC<sub>0</sub> > RALC<sub>2</sub> > RALC<sub>1</sub>, 且

铜尾矿复垦地与外围林灌地间各指数差异显著或极显著 (*P* < 0. 05 ), 但铜尾矿复垦地 3 处理间各指数差异不显著 (*P* > 0. 05 )。结果表明, 铜尾矿复垦地土壤动物群落多样性 Shannon-Wiener 指数较高, 密度-类群指数较低, 前者与均匀性指数呈正相关, 与优势度指数呈负相关, 后者与多度和丰富度呈正相关。

由表 6 可知, 铜尾矿复垦地及其外围林灌地 4 处理间相似性系数均处于中等不相似 ( 0. 25 ~ 0. 50 ) 到中等相似 ( 0. 50 ~ 0. 75 ) 之间。其中, 铜尾矿复垦地 3 处理间土壤动物群落相似性系数均大于铜尾矿复垦地与外围林灌地间的相似性系数, 随处理间距离增大而降低。但铜尾矿复垦地与外围林灌地间的相似性系数与处理距离成反比, 随铜尾矿复垦地处理与外围

林灌地处理距离增大而增大。结果表明,土壤动物群落相似性系数的处理效应明显,与处理间距离关系密切。

**2.2.4 土壤动物分布格局** 采用 RDA 对铜尾矿区 13 样点主要土壤动物的空间分布格局进行了排序分析,根据前两轴作出二维排序图(图 2)。结果显示,2 个排序轴的特征值分别为 0.226 和 0.146。第 1 排序轴解释了样点、土壤环境因子和土壤动物类群变异的 33.1%,第 2 排序轴解释了变异的 21.4%,尤其是第 1 排序轴明显地将 13 个样点分成两组,一组是外围林灌地(30、31、32、33),基于土壤动物类群和土壤环境因子的样点总得分 2.501;另一组是尾矿复垦地,其中,RALC<sub>2</sub> 处理(20、21、22、23)基于土壤动物类群和土壤环境因子的样点总得

分为 -0.974,RALC<sub>1</sub> 处理(10、11、12、13)的样点总得分为 -1.488(表 7)。结果表明,随着与外围林灌地距离的增大,样点得分越来越小,土壤环境因子越来越差,土壤动物类群呈递减的趋势。

土壤动物类群与土壤环境因子的排序结果表明,除了蚁科和鞘翅目成虫(包括隐翅虫科)与全铜含量成正相关外,其他土壤动物类群与全铜含量成负相关、与其他土壤环境因子成正相关,尤其是蜚蠊目和唇足纲。土壤环境因子与样点的排序结果表明,铜尾矿复垦地 9 个样点全铜含量较外围林灌地 4 样点高,与之相反,其他土壤环境因子则是外围林灌地高于铜尾矿复垦地。

表 6 铜尾矿复垦地及其外围林灌地土壤动物群落相似性系数(S)

Table 6 Similarity coefficient of soil fauna communities in RALC and SFSL treatments

处理 treatment	RALC <sub>0</sub>	RALC <sub>1</sub>	RALC <sub>2</sub>
RALC <sub>1</sub>	0.633 2 ± 0.029 5		
RALC <sub>2</sub>	0.601 5 ± 0.149 2	0.652 6 ± 0.126 1	
SFSL <sub>3</sub>	0.587 7 ± 0.060 2	0.519 9 ± 0.092 1	0.462 1 ± 0.087 0

RALC: 铜尾矿复垦地,SFSL: 外围林灌地。RALC: Reclaimed abandoned land of copper-mine-tailings, SFSL: Suburbs forest and shrub land.

表 7 环境因子、类群和样点与 RDA 排序轴的相关系数

Table 7 Correlation coefficients of environmental variables, groups and sampling points with the first two axes of RDA

环境因子 Environmental variables	Axis 1	Axis 2	类群 Groups	Axis 1	Axis 2	样点 Sampling points	Axis 1	Axis 2
pH 值 Soil pH value	0.498 6	0.615 4	蚁科 Formicidae	-1.654 7	0.443 3	0	-0.039 3	-0.475 4
土壤有机质 Soil organic matter	0.723 1	0.245 8	寡毛纲 Oligochaeta	0.157 8	1.412 7	10	-0.404 1	-0.074 9
全磷 Total phosphorus	0.595 0	0.618 1	蜘蛛目 Araneae	-1.061 7	-0.984 6	20	0.107 5	-0.667 0
全氮 Total nitrogen	0.578 1	0.581 7	鞘翅目 Coleoptera	-1.025 0	-0.273 1	11	-0.476 1	-0.255 9
全钾 Total kalium	0.556 3	0.537 7	隐翅虫科 Staphylinidae	-1.211 6	0.564 4	21	-0.761 1	-0.142 0
全铜 Total copper	-0.476 1	-0.608 4	唇足纲 Chilopoda	1.414 3	-0.102 4	12	-0.486 6	0.475 3
土壤含水量 Soil moisture	0.650 1	0.276 8	弹尾目 Collembola	1.090 8	1.382 9	22	-0.589 4	0.711 1
土壤容重 Bulk density of soils	0.152 1	0.675 7	蜚蠊目 Acarina	1.625 7	0.261 1	13	-0.121 0	0.036 6
			双尾目 Diplura	-0.619 0	0.331 5	23	0.269 4	-0.235 3
			综合纲 Symphyla	0.107 2	-0.277 6	30	0.622 7	-0.069 7
			线虫纲 Nematoda	0.551 6	1.051 2	31	0.493 8	0.154 1
			鞘翅目幼虫 Coleoptera larvae	0.661 6	-1.675 1	32	0.565 6	0.763 2
			双翅目幼虫 Diptera larvae	0.559 1	-1.030 4	33	0.818 4	-0.220 1
			猛水蚤目 Harpacticoida	0.323 9	-0.769 4			



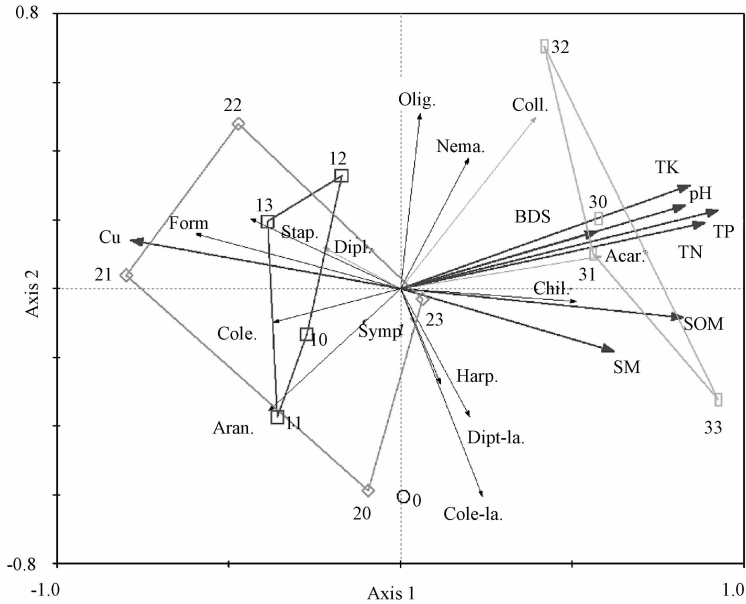


图 2 铜尾矿复垦地及其外围林灌地主要土壤动物与样点和土壤环境变量的 RDA 分析

Fig. 2 Two dimensional ordination diagram based on RDA of major soil fauna and sampling point and soil environmental variables in RALC and SFSL treatments

Form. 蚁科; Olig. 寡毛纲; Aran. 蜘蛛目; Cole. 鞘翅目; Staph. 隐翅虫科; Chil. 唇足纲; Coll. 弹尾目; Acar. 蜱螨目; Dipl. 双尾目; Symp. 综合纲; Nema. 线虫纲; Cole-la. 鞘翅目幼虫; Dipt-la. 双翅目幼虫; Harp. 猛水蚤目; SOM. 土壤有机质; TP. 全磷; TK. 全钾; TN. 全氮; Cu. 全铜; SM. 土壤含水量; BDS. 土壤容重; 0 代表铜尾矿复垦地处理 1 的样点, 10、11、12、13 代表铜尾矿复垦地处理 2 的样点, 20、21、22、23 代表铜尾矿复垦地处理 3 的样点, 30、31、32、33 代表外围林灌地的样点。

Form. Formicidae; Olig. Oligochaeta; Aran. Araneae; Cole. Coleoptera; Staph. Staphylinidae; Chil. Chilopoda; Coll. Collembola; Acar. Acarina; Dipl. Diplura; Symp. Symphyla; Nema. Nematoda; Cole-la. Coleoptera larvae; Dipt-la. Diptera larvae; Harp. Harpacticoida; pH. Soil pH value; SOM. Soil organic matter; TP. Total phosphorus; TK. Total potassium; TN. Total nitrogen; Cu. Total copper; SM. Soil moisture; BDS. Bulk density of soils; The number of 0 represents the sampling point of treatment one, and 10, 11, 12 and 13 represents the sampling points of treatment two, and 20, 21, 22 and 23 represents the sampling points of treatment three in reclaimed abandoned land of copper-mine-tailings, and the number of 30, 31, 32 and 33 represents the sampling points in suburbs forest and shrub land.

### 3 讨论

土壤动物群落结构受到小生境因素的强烈影响(林英华等 2005, 区余端等 2009), 其密度、多度、丰富度等与植被覆盖度、土壤肥力等因素成正相关, 与土壤污染呈负相关(王移等 2010)。铜尾矿复垦地与外围林灌地小生境因素差异主要表现在地表植被和土壤基质。复垦地植被被低矮、稀少, 土壤存在严重 Cu 污染、呈碱性、肥力低, 而外围林灌地植被茂密、林下灌丛发达, 土壤无污染、肥力相对较好(表 1)。复垦地弹尾目、蜱螨目和线虫纲密度较外围林灌地少, 这与复垦地生境条件恶劣分不开, 尤其与

Cu 污染有关, 因为随着重金属污染程度的加重, 其物种丰富度降低(Steiner 1995, Filser et al. 2000, 许杰等 2007, 邵元虎等 2007), 而且蜱螨目运动能力有限, 取食单一, 重金属可破坏其食物网系统, 导致其生存受到威胁(Siepel 1995, van Straalen 2002), 另外在复垦地生长着禾本科先锋植物, 在这些草本植物根际可能分布着大量植食寄生线虫和 c-p 低值自由生活线虫(Shao et al. 2008), 导致线虫密度与外围林灌地差异不显著。相反, 鞘翅目及其幼虫和膜翅目(蚁科)对重金属污染具有耐受性(王振中等 1994, 王宗英等 2000, 刘红等 2002, 祝栋林等 2003), 活动能力强, 复垦地密度较外围林灌

地高。

分析结果表明,铜尾矿复垦地及其外围林灌地土壤动物群落之间具有明显差异性,但随铜尾矿复垦地中心到外围林灌地距离的缩减,土壤动物群落结构表现出一定的渐变性,如土壤动物群落多度、密度和 Shannon-Wiener 多样性指数逐渐降低,与外围林灌地间的相似性系数逐渐提高,垂直分层的表聚性越来越弱等。同时,根据陷阱法试验,10 d 和 30 d 后收集到的土壤动物的多度和丰富度随与外围林灌地距离的增加而减少,随调查时间的延长而增多。这一短期试验证明了土壤动物可以从外围林灌地向铜尾矿复垦地迁居,是矿区废弃地土壤动物群落结构形成的重要途径 (Topp et al. 2001)。可能的原因有:首先,铜尾矿复垦地及其外围林灌地构成一个地理区域相对独立的土壤动物复合种群区,各局域种群通过一定程度的个体迁移成为整体 (Hanski et al. 1997),生物扩散成为复合种群的重要内容 (朱丽等 2010),土壤动物具有从外围林灌地主动向复垦地迁移的可能性。其次,铜尾矿复垦地为土壤动物提供了较为丰富的食物来源和栖居场所,包括藻类及其构成的生物结皮、微生物、植物及其凋落物,其中藻类、微生物和凋落物是土壤动物的主要食物来源,在极端环境下以藻类为主构成的生物结皮为土壤无脊椎动物提供栖息场所 (Belnap et al. 2003)。因为复垦地有了食物来源和栖居场所 (Sun et al. 2004, 宋勇生等 2011),土壤动物具有从外围林灌地迁居到复垦地的可行性。最后,铜尾矿复垦地土壤动物迁居程度随与外围林灌地的距离增大而减小,再加上复垦地生境条件恶劣,土壤动物往往选择 *r*-策略,在非密度制约下土壤动物个体数量得到较为充分的增长,越靠近复垦地中心处,丰富度减少,而多度和密度却增大。de Goede 等 (1998) 的研究证明,鞘翅目可能成为矿区废弃地绝对优势的机会主义定殖者,Chauvat 等 (2002) 研究表明,在合适的生境条件下,弹尾目可以迁居到矿区废弃地中。铜尾矿复垦地在自然演替过程中土壤动物不断从外围林灌地迁

入,如线虫、弹尾和蛱蜉等,但不是所有的土壤动物能适应复垦地恶劣的生境条件,如综合纲、唇足纲和倍足纲等。

## 参 考 文 献

- Belnap J, Lange O L. 2003. Structure and functioning of biological soil crusts: a synthesis // Belnap J, Lange O L. *Biological Soil Crusts: Structure, Function and Management*. Berlin: Springer-Verlag, 471 – 479.
- Carrillo Y, Ball B A, Bradford M A, et al. 2011. Soil fauna alter the effects of litter composition on nitrogen cycling in a mineral soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(7): 1440 – 1449.
- Chauvat M, Ponge J F. 2002. Colonization of heavy metal-polluted soils by collembola: preliminary experiments in compartmented boxes. *Applied Soil Ecology*, 21(2): 91 – 106.
- Courtney R, O' Neill N, Harrington T, et al. 2010. Macroarthropod succession in grassland growing on bauxite residue. *Ecological Engineering*, 36(12): 1666 – 1671.
- Cristescu R H, Frère C, Banks P B. 2012. A review of fauna in mine rehabilitation in Australia: Current state and future directions. *Biological Conservation*, 149(1): 60 – 72.
- de Goede R G M, van Dijk T S. 1998. Establishment of carabid beetle and nematode populations in a nature restoration project after the abandonment of arable land. *Applied Soil Ecology*, 9(1/3): 355 – 360.
- Dunger W, Voigtländer K. 2005. Assessment of biological soil quality in wooded reclaimed mine sites. *Geoderma*, 129(1/2): 32 – 44.
- Filser J, Wittman R, Lang A. 2000. Response types in Collembola towards copper in the microenvironment. *Environmental Pollution*, 107(1): 71 – 78.
- Frouz J, Elhottová D, Pižl V, et al. 2007. The effect of litter quality and soil faunal composition on organic matter dynamics in post-mining soil: A laboratory study. *Applied Soil Ecology*, 37(1/2): 72 – 80.
- Frouz J, Prach K, Pižl V, et al. 2008. Interactions between soil development, vegetation and soil fauna during spontaneous succession in post mining sites. *European Journal of Soil Biology*, 44(1): 109 – 121.
- Hanski I, Simberloff D. 1997. The metapopulation approach, its history, conceptual domain, and application to conservation // Hanski I, Gilpin M E. *Metapopulation Biology: Ecology, Genetics, and Evolution*. San Diego: Academic Press, 5 – 26.
- Lee M R, Correa J A, Castilla J C. 2001. An assessment of the

- potential use of the nematode to copepod ratio in the monitoring of metals pollution, the chañaral case. *Marine Pollution Bulletin*, 42(8): 697–701.
- Ma Y, Dickinson N M, Wong M H. 2006. Beneficial effects of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi on establishment of leguminous trees on Pb/Zn mine tailings. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(6): 1403–1412.
- Mudrák O, Uteseny K, Frouz J. 2012. Earthworms drive succession of both plant and Collembola communities in post-mining sites. *Applied Soil Ecology*, 62: 170–177.
- Noble J C, Whitford W G, Kaliszewski M. 1996. Soil and litter microarthropod populations from two contrasting ecosystems in semi-arid eastern Australia. *Journal of Arid Environments*, 32(3): 329–346.
- Shao Y H, Zhang W X, Shen J C, et al. 2008. Nematodes as indicators of soil recovery in tailings of a lead/zinc mine. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(8): 2040–2046.
- Siepel H. 1995. Are some mites more ecologically exposed to pollution with lead than others? *Experimental and Applied Acarology*, 1(7)9: 391–398.
- Steiner W A. 1995. Influence of air pollution on moss dwelling animals. III. Terrestrial fauna, with emphasis on Oribatida and Collembola. *Acarologia*, 36(2): 149–173.
- Sun Q Y, An S Q, Yang L Z, et al. 2004. Chemical properties of the upper tailings beneath biotic crusts. *Ecological Engineering*, 23(1): 47–53.
- Topp W, Simon M, Kautz G, et al. 2001. Soil fauna of a reclaimed lignite open-cast mine of the Rhineland: Improvement of soil quality by surface pattern. *Ecological Engineering*, 17(2/3): 307–322.
- van Straalen N M. 2002. Assessment of soil contamination—a functional perspective. *Biodegradation*, 13(1): 41–52.
- Wong M H, Ma Y. 2008. Land reclamation using earthworms in metal contaminated soils. *Developments in Soil Science*, 32: 719–734.
- Ye Z H, Wong J W C, Wong M H, et al. 2000. Revegetation of Pb/Zn mine tailings, Guangdong Province, China. *Restoration Ecology*, 8(1): 87–92.
- 冯伟松, 杨军, 叶志鸿, 等. 2004. 凡口铅锌矿湿地处理系统的土壤原生动物. *动物学杂志*, 39(1): 2–11.
- 廖崇惠, 李健雄, 黄海涛. 1997. 南亚热带森林土壤动物群落多样性研究. *生态学报*, 17(5): 549–545.
- 林英华, 张夫道, 张俊清, 等. 2005. 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*, 25(10): 2616–2622.
- 刘红, 袁兴中, 张承德. 2002. 山东曲阜地区蚂蚁群落结构及物种多样性研究. *生物多样性*, 10(3): 298–304.
- 马克平, 刘玉明. 1994. 生物群落多样性的测度方法. I.  $\alpha$ 多样性的测度方法. *生物多样性*, 2(4): 231–239.
- 区余端, 苏志尧, 李镇魁, 等. 2009. 车八岭山地常绿阔叶林冰灾后土壤节肢动物群落的多样性. *生物多样性*, 17(5): 440–447.
- 邵元虎, 傅声雷. 2007. 试论土壤线虫多样性在生态系统中的作用. *生物多样性*, 15(2): 116–123.
- 宋勇生, 龚亚龙, 廖斌, 等. 2011. 铜尾矿生物结皮的生物固氮及其影响因素研究. *土壤学报*, 48(4): 701–707.
- 土壤动物研究方法手册编写组. 1998. 土壤动物研究方法手册. 北京: 中国林业出版社, 24–41.
- 王邵军, 阮宏华. 2008. 土壤生物对地上生物的反馈作用及其机制. *生物多样性*, 16(4): 407–416.
- 王移, 卫伟, 杨兴中, 等. 2010. 我国土壤动物与土壤环境要素相互关系研究进展. *应用生态学报*, 21(9): 2441–2448.
- 王振中, 张友梅, 胡觉莲, 等. 1994. 土壤重金属污染对蚯蚓 (Opisthopora) 影响的研究. *环境科学学报*, 14(2): 236–243.
- 王宗英, 路有成, 王慧英. 1996. 九华山土壤螨类的生态分布. *生态学报*, 16(1): 58–64.
- 王宗英, 孙庆业, 路有成. 2000. 铜陵市铜尾矿生物群落的恢复与重建. *生态学杂志*, 19(3): 7–11.
- 许杰, 柯欣, 宋静, 等. 2007. 弹尾目昆虫在土壤重金属污染生态风险评估中的应用. *土壤学报*, 44(3): 544–549.
- 杨世勇, 谢建春, 刘登义. 2004. 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*, 13(5): 488–493.
- 尹文英. 1992. 中国亚热带土壤动物. 北京: 科学出版社.
- 尹文英. 1998. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社.
- 朱丽, 卢剑波, 余林. 2010. 复合种群中扩散的研究进展. *生态学杂志*, 29(5): 1008–1013.
- 朱永恒, 张小会, 沈非, 等. 2012. 铜尾矿复垦地与外围林地土壤动物群落结构. *生物多样性*, 20(6): 725–734.
- 朱永恒, 沈非, 余健, 等. 2013. 铜尾矿废弃地土壤动物多样性特征. *生态学报*, 33(5): 1495–1505.
- 祝栋林, 李时银, 孙成. 2003. 污染指示生物苔藓和蚂蚁中的重金属污染比较分析. *农业环境科学学报*, 22(2): 154–158.