

DOI: 10.5846/stxb201308312178

李克中, 朱永恒. 中小型土壤动物组成对复垦铜尾地土壤养分的影响. 生态学报, 2015, 35(12): 3979-3987.

Li K Z, Zhu Y H. Influence of meso-and micro-fauna composition on soil nutrient dynamics in reclaimed soil in copper tailings. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 3979-3987.

中小型土壤动物组成对复垦铜尾地土壤养分的影响

李克中^{1,2}, 朱永恒^{1,2,*}

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, 安徽师范大学, 芜湖 241003

摘要:通过盆钵生物试验研究了中小型土壤动物不同类群的组成对复垦铜尾矿废弃地土壤养分的影响。整个培养试验根据需求对不同中小型土壤动物组合设置四个处理措施, 每种措施分为有无凋落物两种水平, 即: (1) 无土壤动物 (Re), 无土壤动物+凋落物 (Re+Li) (2) 跳虫 (Co), 跳虫+凋落物 (Co+Li) (3) 跳虫+蜱螨类 (Co+Ac), 跳虫+蜱螨类+凋落物 (Co+Ac+Li) (4) 中小型土壤动物 (剔除大型土壤动物 Me), 中小型土壤动物+凋落物 (Me+Li)。另设一组对照 (CK) 处理, 并于培养实验开始前完成测定, 作为本底值。分析表明, 土壤 pH 随着中小型土壤动物类群的增加而降低, 最低值出现在 Me 和 Me+Li 处理, 且二者之间无显著性差异; 对照 (CK) 处理下的各养分含量均显著低于其他各处理, 各处理中有机质、有效磷和水解性氮的含量的最大值均出现 Me+Li 处理, 且与其他各处理呈极显著差异 ($P < 0.01$); 土壤全磷含量最大值出现在 Re 和 Me+Li 处理, 最低值出现在 Co+Li 处理且之间呈显著差异 ($P < 0.05$); 土壤全氮含量最大值出现在 Co+Ac 和 Me+Li 处理, 最低值出现在 Co+Ac+Li 处理且彼此间也呈显著差异 ($P < 0.05$)。相关分析表明, 有机质与有效磷以及全氮与水解性氮之间相关性达到极显著正相关关系 ($r = 0.886, r = 0.898$), 有机质与全氮及水解性氮分别呈现显著正相关关系 ($r = 0.735, r = 0.780$), 全氮与有效磷 ($r = 0.782$) 以及有效磷与水解性氮 ($r = 0.755$) 也呈现显著正相关关系。pH 与有机质呈现显著负相关关系 ($r = -0.782$), 全磷与有机质、全氮、有效磷、水解性氮均无相关关系。

关键词: 中型土壤动物; 小型土壤动物; 土壤养分; 凋落物; 复垦铜尾矿

Influence of meso-and micro-fauna composition on soil nutrient dynamics in reclaimed soil in copper tailings

LI Kezhong^{1,2}, ZHU Yongheng^{1,2,*}

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

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

Abstract: Influence of meso-fauna and micro-fauna composition on soil nutrient dynamics in reclaimed soil in copper tailings is studied by pot experiments. The pot experiments in laboratory were constructed consisting of mineral soil and litter; taken from a reclaimed site with naturally developed vegetation (*Imperata cylindrica* (Linn.) Beauv). The litter were inoculated with four different types of decomposer community: 1. Remove soil fauna (Re), Remove soil fauna+Litter (Re+Li), 2. Collembola (Co), Collembola+ Litter (Co+Li), 3. Collembola+ Acarina (Co+Ac), Collembola + Acarina + Litter (Co+Ac+Li), 4. Mesofauna (Remove soil macrofauna Me), Mesofauna + Litter (Me+Li). A group of Control Check (CK) treatment was set up, which will be completed before cultivation experiment, it will be compared with after-cultivating soil nutrients. Under the composition of different meso-fauna and micro-fauna and their interaction with litter, their effects on the soil pH, organic matter, total phosphorus, total nitrogen, available phosphorus and hydrolysable nitrogen were analyzed.

基金项目: 国家自然科学基金 (41001031)

收稿日期: 2013-08-31; **网络出版日期:** 2014-07-02

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

Results indicated: soil pH value will decrease with the increase of meso-fauna and micro-fauna group, the lowest is in Me treatment and Me+Li treatment, there is no significant impact between them. Nutrient content under CK treatment is significantly lower than those in other treatments. The highest content of organic matter, available phosphorus and hydrolysable nitrogen are in Me+Li treatment, and extremely significant difference was appeared between CK treatment and the other treatments $P<0.01$. The highest content of total phosphorus is in Re and Me+Li treatment and the lowest is in Co+Li treatment, and significant difference is appeared between them $P<0.05$. The highest content of total nitrogen is in Co+Ac and Me+Li treatment and the lowest is in Co+Ac+Li treatment, also there appear significant difference $P<0.05$. And correlation analysis indicates that the correlation between organic matter and available phosphorus is closely positively correlated ($r=0.886$); total nitrogen and hydrolysable nitrogen ($r=0.898$) shows significantly positive correlation; organic matter and total nitrogen and hydrolysable nitrogen show a significantly positive correlation ($r=0.735$, $r=0.780$); total nitrogen and available phosphorus ($r=0.782$), available phosphorus and hydrolytic nitrogen ($r=0.755$) also show significant positive correlation. Organic matter and pH have a closely negative correlation ($r=-0.782$), and there was no correlation between total phosphorus and organic matter, total nitrogen, available phosphorus, and hydrolysable nitrogen. Through, analysis of the research, it can further reveal that type of composition of meso-fauna and micro-fauna can make the greatest contribution to the development of soil nutrient. And it can reveal the changes of the largest contribution ability groups under different nutrient indicators. It can provide evidences for the returning of soil nutrients in reclaimed soil in copper tailings and the ecological reconstruction.

Key Words: mesofauna; microfauna; soil nutrient; litter; reclaimed copper tailings

土壤各种养分的积累是土壤肥力形成过程中最重要的部分,尤其以尾矿废弃地表现更为突出。因为在尾矿产生及废弃过程中大量废弃的矿砂主体来自于养分含量极少的矿山底层和中层^[1]这就导致了尾矿废弃地基质的贫瘠性。同时土壤养分的产生、循环和发展是尾矿废弃地生态恢复的一种重要体现方式^[2]。土壤养分影响范围很广,如对土壤的结构、土壤含水量、生物系统等方面,尤其在变化的生态系统各组分相互作用过程中起到基础性的作用^[3]。因此,在尾矿废弃地生态恢复过程中对土壤功能的重建是至关重要的^[4-5]。尾矿废弃地作为一种典型的“退化”生态系统,由于区域环境相对简单,对于演替时序有一个可查的文字记载和适用性的实验操作。为人们认识自然生态系统发展提供了一个“人为窗口”。

中小型土壤动物在土壤养分形成、积累的过程中扮演了非常重要的作用,尤其体现在对养分来源物的物理分解和化学转型上^[1,6],是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^[7],中小型土壤动物对土壤剖面中凋落物破碎及使之与矿质土壤的混合具有显著的影响作用,对土壤养分能够产生积极的影响,很多学者通过凋落物袋及室内模拟实验研究均已证明^[6,8-9]。

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研究的热点和前沿^[9,2],引发了大量的学者对尾矿地土壤动物恢复与重建进行了研究^[4,10-11]。但在土壤动物对土壤质量和不同中小型土壤动物类群对土壤养分的影响上研究的较少,尤其在中小型土壤动物对复杂的土壤养分功能定位的角色上。已有研究表明土壤动物单个类群在矿区土壤结构及土壤上层养分的恢复和发展中起到了重大的作用^[12-13]。因此,本研究以中小型土壤动物不同类群组合为出发点,以凋落物为研究媒介,突出研究单一类群、两个类群和多类群在土壤中以及与凋落物相互作用的过程中对土壤养分的影响。通过研究分析进一步揭示何种形式的中小型土壤动物类群的组合对土壤养分的发展达到最大的能力及其与凋落物共同作用之下最大贡献能力类群的变化,以期铜尾矿地土壤养分的恢复及良性生态系统的构建提供依据。

1 研究区域概况

研究地铜陵市位于安徽省中南部,地处 $30^{\circ}56'42''$ N、 $117^{\circ}43'28''$ E,面积 $1,113\text{ km}^2$,是长江中下游南岸

一座重要的工矿和工贸港口城市。地区气候属亚热带湿润季风气候,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^[4]。

调查区的林冲铜尾矿复垦地(reclamated copper-mine tailings)位于铜陵市东北部凤凰山地区,属于山谷型尾矿库。三面环山,一面修建石坝(长 200 m,高 40 m),海拔 105 m,面积 31 万 m²,总库容 120 万 m³,现存量 110 万 m³,使用期为 1970 年 12 月至 1979 年 12 月,停用后当地农民覆土(来源于凤凰山街道,距离尾矿库约 100 m)种植药用植物牡丹,并辅种大豆等豆科植物;2009 年铲除牡丹,弃置不用,人为干扰少,生长茂密的杂草,优势种为茅草(*Imperata cylindrica*),荇草(*Arthraxon lanceolatus*),芒(*Miscanthus sinensis*)、伴有少量狗尾草(*Setaria viridis*)和小飞蓬(*Conyza canadensis*)等^[14]。

2 材料和方法

2.1 实验的整体设计

本实验中主要通过对不同类群的中小型土壤动物的添加,模拟研究不同类群组成及其与凋落物相互作用对土壤养分含量变化的影响。采用室内盆钵模拟实验,盆钵内培养土壤、中小型土壤动物及所需的凋落物均来自铜尾矿废弃地相同的采集地点。实验由 4 种土壤动物处理组成:无土壤动物(Re)、跳虫(Co)、跳虫+蜚蠊类(Co+Ac)、中小型土壤动物(剔除大型土壤动物 Me)、每种处理均设置两个处理水平:L0,不放凋落物;L1,添加统一的茅草凋落物(Li)。另设一组对照(CK)处理,对照(CK)处理并不参与培养实验,其于培养实验开始前驱除土壤动物并测定养分含量,用于和实验培养期结束的土壤养分含量对比分析,作为实验所需的本底值。

2.2 土壤采样

2013 年 3 月 15 日于铜陵市凤凰山林冲尾矿库采集实验所需的土壤样品,土壤采样点设置在茅草覆盖区(所覆盖面积>60%)的中央(图 1),按照间隔 1 米的同心圆向外展开排列成圆形的网状布置,共设置 8 条土壤采样带。详细步骤即:其中每条样带上分别挖取 3 个直径 15cm,深度 20cm 土层的土柱土样,剔除根系和大的石砾,每一个土柱土样装入一个已标号的袋中。同时在图所示的茅草覆盖区随机为对照(CK)处理设置 3 个采样点,每个采样点采取 3 个重复土柱样品组成一个混合样品(混合均匀),并将各袋带回实验室处理。

2.3 室内模拟实验的构建

2.3.1 土壤动物的处理

为了保证土壤中中小型土壤动物多样性的稳定以及对土壤环境的适宜性,故采用原采集土中的中小型土壤动物作为后期培养所需的物种来源。除 Me 和 Me+Li 处理采用手拣法驱除大型土壤动物外,其他处理采用 Tullgren 法提取中小型土壤动物,Tullgren 法中灯泡采用 25W^[15],分离 48 h,用清水收集掉落的土壤动物。将 Co,Co+Li,Co+Ac,Co+Ac+Li 等处理分离出来的土壤动物置于解剖镜下进行提取,采用的是“反向提取法”,即清除非实验所需要的土壤动物种类,尽量减少对所需土壤动物种类的伤害,且分别标号放置。已驱除土壤动物的土壤放入盆钵之中,且标号便于后期土壤动物的对应添加。

2.3.2 凋落物的处理及添加

实验所需的凋落物均来自于土壤采样区的茅草,通过手拣剔除其中的木棒及大型土壤动物的残体,并使用去离子水淋洗,经过自然风干后均匀混合装袋备用^[1]。在整个实验培养时期内,使用尼龙网袋进行凋落物的添加。尼龙网袋的尺寸为 20cm×20cm,网孔 30 目(只允许中小型土壤动物的进出)^[6]。网袋内置 5g 来源于采样区域的茅草凋落物,所有凋落物都切割成 2—4cm 的片状或圆杆状(风干自然卷曲所致)尽可能保证其均质性^[1]。网袋被放置在盆内,确保与土壤表明均匀接触,通过水份的添加自然与土壤表面相结合。

2.3.3 培养实验的构建

于 2013 年 3 月 20 日进行培养实验的构建,实验使用的是上口径 20cm,下口径 15cm,深度 20cm 的塑料

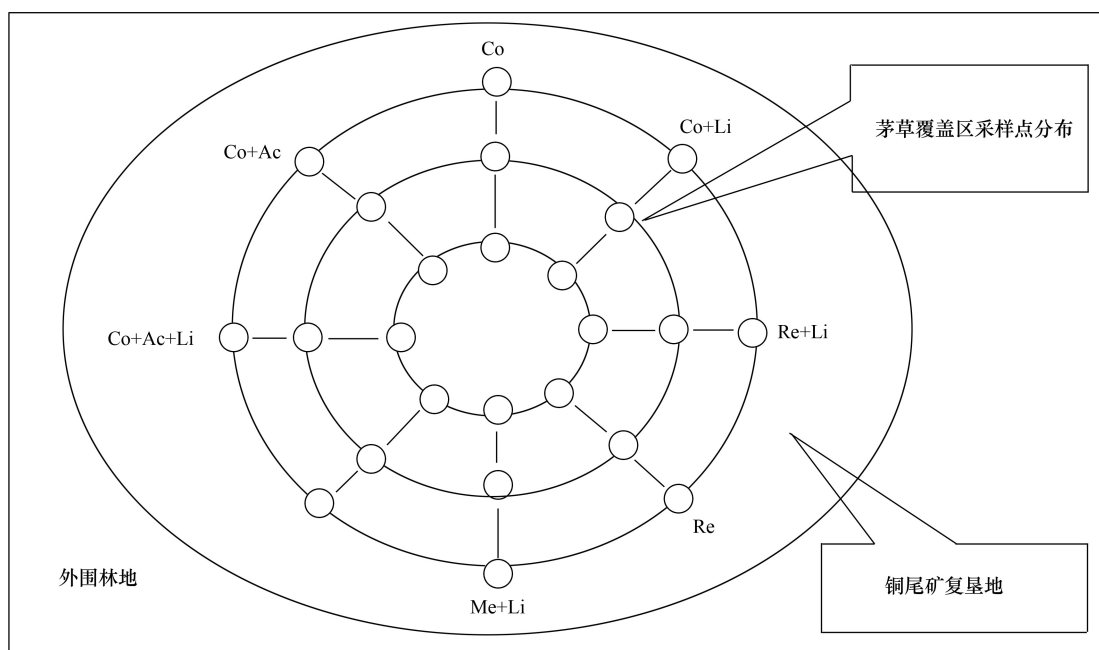


图1 铜尾矿区土壤样方分布示意图

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

盆,盆内填充已清除土壤动物的0—20cm的土壤。盆的底部用260目网铺垫以防土壤动物顺出水口逃离,土壤顶部离盆沿口留5cm的距离防止土壤动物逃离到盆外。盆钵分添加凋落物和不添加凋落物两组处理。此时,把已分离和统计好的土壤动物连同收集皿中的清水一起倒入相应的盆中,用去离子水少量多次轻轻冲洗收集皿。盆口覆盖260目的尼龙网并使用皮筋箍紧,防止外部干扰物的进入。每种处理设置3个重复,在整个实验期间,所有盆钵是处在12h白天和12h黑夜的交替中进行培养,土壤中的水分采用水分速测仪随时掌控。培养期为3个月。

2.4 实验结束处理

于2013年6月20日培养实验结束,凋落物从盆钵中移除,盆钵中的土壤置于Tullgren漏斗上进行分离,分离方法如前所述,驱除其中所添加的中小型土壤动物之目的是尽量使土壤与前期对照(CK)土壤保持无土壤动物的一致性,并用260目(防止外来土壤动物的进入)的尼龙网覆盖^[8],并在自然风干之后对各个处理下的土壤进行养分含量测定。

2.5 测试指标及数据处理

测定指标:土壤pH、有机质、全氮、全磷、有效磷和水解性氮,按《土壤农化分析手册》的方法进行测定^[16]。土壤含水量采用土壤水分速测仪测定(浙江托普仪器公司生产)。试验数据采用Excel及SPSS 13.0进行统计分析和检验。

3 结果分析

3.1 培养结束后土壤养分总体特征

通过对结果的分析表明(表1),土壤养分整体变异系数较小,其中有效磷变异系数最大, C_v 为21%,其次是全磷、有机质和全氮,水解性氮变异系数最小。 C_v 的大小反映了特性参数的空间变异程度,一般认为, $C_v < 0.1$ 为弱变异性, $0.1 \leq C_v \leq 1.0$ 为中等变异性, $C_v > 1.0$ 为强变异性。从表1统计资料来看,水解性氮含量呈弱变异性,其他养分含量均为中等变异程度,整体来看,该培养后的土壤性状相对较均一。

表 1 培养结束后的土壤养分统计特征

Table 1 Statistical characteristics of soil nutrients after cultivating

指标 Item	有机质 Organic matter/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	全 氮 Total nitrogen/ (g/kg)	有效磷 Available phosphorus/ (mg/kg)	水解性氮 Hydrolysable nitrogen /(mg/kg)
最小值 Min	20.21	0.30	0.40	3.03	44.47
最大值 Max	32.44	0.52	0.60	6.78	57.60
平均值 Mean	25.90	0.40	0.51	5.40	51.25
标准差 Standard Deviation	4.15	0.08	0.06	1.13	4.66
变异系数 Coefficient of variation	0.16	0.2	0.12	0.21	0.09

3.2 土壤 pH 及土壤养分的变化

3.2.1 土壤 pH 变化

对土壤 pH 的影响如图 2 所示,在无凋落物参与下,CK,Re,Co 处理下的 pH 之间无显著性差异,但显著高于 Me,Co+Ac 处理($P<0.01$)。凋落物参与下的各处理措施的 pH 之间均呈极显著差异($P<0.01$)但在中小型土壤动物类群最丰富的 Me、Me+Li 环节下,土壤 pH 之间无显著性差异。随着中小型土壤动物类群数量的增加,分解凋落物的能力进一步得到了加强,进而促进了较多的 CO₂和有机酸的产生,降低了土壤 pH^[17]。但是在 Co 以及 Me 处理环节,由于没有凋落物的覆盖,土壤相对更易变得干燥,一些碱性离子(如 Ca 和 Mg 等)吸收了土壤中大量的 CO₂和有机酸,此阶段 pH 有所升高^[5,17-18]。另外有研究表明,中小型土壤动物尤其是螨类和跳虫除了间接的通过粉碎对养分矿化之外,也通过对真菌的捕食活动来实现养分的转化,其过程中产生的大量 Ca²⁺,无疑对土壤 pH 的升高增加了推力^[11]。

3.2.2 土壤有机质变化

有机质的变化具体表现如图 3 所示。在无凋落物参与下,CK,Re,Co,Co+Ac,Me 处理下的有机质含量之间均呈现极显著性差异($P<0.01$),在凋落物参与下的 Re+Li,Co+Li,Co+Ac+Li,Me+Li 各处理措施之间有机质含量也呈现极显著差异($P<0.01$),但 Co 与 Co+Ac+Li 之间和 Co+Li 与 Co+Ac 之间无显著性差异。在中小型土壤动物最丰富的 Me 阶段及与凋落物相互作用的 Me+Li 阶段,土壤有机质含量相比较其他处理措施均达到最大值。Co 处理下的有机质含量显著高于 Co+Li 处理($P<0.01$),主要是由于跳虫易于生活在凋落物层中^[7],对于初期释放及转化土壤中的养分能力减弱。Co+Ac+Li 处理下的有机质含量显著高于 Co+Ac 处理($P<0.01$),主要是由于凋落物分解的过程中,二者相互协作更加密切,对凋落物分解能力、元素的释放能力进一步加强^[7,18-19]。

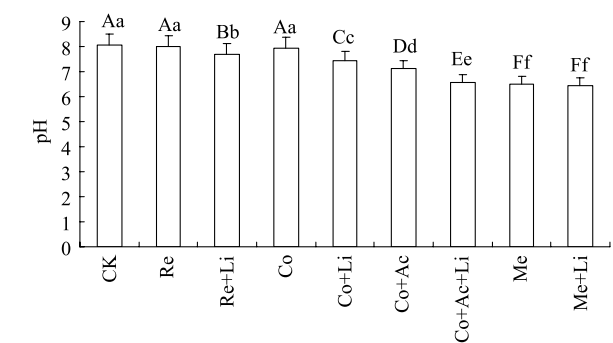


图 2 不同处理措施下土壤 pH 值

Fig.2 Soil pH value of under different treatment measures

不同大写和小写字母分别表示各处理间在 0.01 和 0.05 水平差异显著

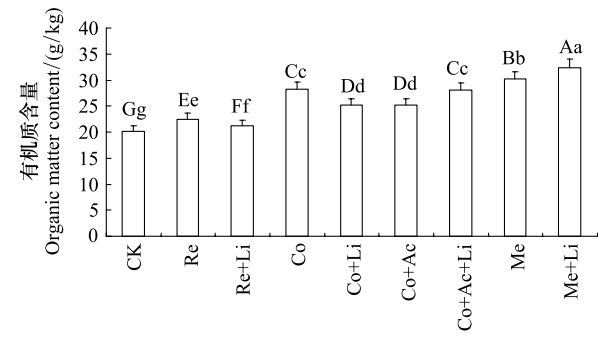


图 3 不同处理措施下土壤有机质含量

Fig.3 Soil organic matter content of under different treatment measures

不同大写和小写字母分别表示各处理间在 0.01 和 0.05 水平差异显著

3.2.3 土壤全磷变化

各处理对土壤全磷的影响如图 4 所示,各处理下的土壤全磷含量在($P<0.01$)水平上不存在显著差异,Me+Li 与 Re,Co+Li 与 CK 以及其他各处理之间均未达到显著水平。但其中 Co+Li 和 CK 处理的全磷含量显著低于其他各处理($P<0.05$)。在无凋落物参与下,Re 与 (Co,Co+Ac,Me,CK) 之间的全磷含量均呈现显著性差异($P<0.05$),在有凋落物参与下,Me+Li 与 (Re+Li,Co+Ac+Li,Co+Li) 之间的全磷含量均呈现显著性差异($P<0.05$)。由分析结果可以看出,在无凋落物参与下的处理中,Re 处理下全磷含量达到最大值;在中小型土壤动物与凋落物共同参与下处理中,Me+Li 处理下全磷含量达到最大值;可见,在铜尾矿废弃地全磷恢复的贡献中,多类群中小型土壤动物作用的发挥需要与凋落物紧密的结合。

3.2.4 土壤全氮变化

由图 5 可见,CK 处理下的全氮含量显著低于其他各处理($P<0.01$),Me+Li 与 Co+Ac 之间和 Me,Re+Li,Co+Li,Co 之间以及 Co+Ac+Li 与 Re 之间均未达到显著水平。从无凋落物参与处理方面来看,Co+Ac 处理下的全氮含量显著高于 Re,Co,Me 处理($P<0.01$),在有凋落物参与处理下,Me+Li 处理下的全氮含量显著高于 Re+Li,Co+Li,Co+Ac+Li 处理($P<0.01$)。从中小型土壤动物参与下的处理角度来看,Co+Ac,Co+Ac+Li 处理下的全氮含量全出现异常增多和减少现象,差异性显著。

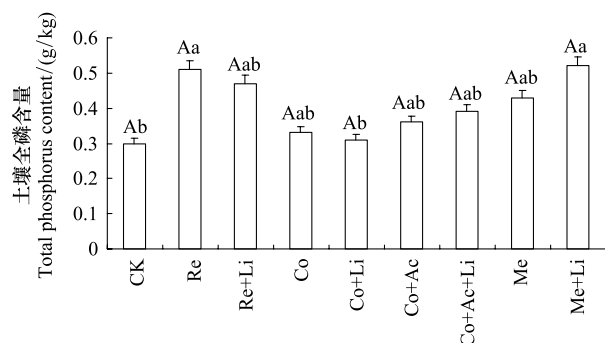


图 4 不同处理措施下土壤全磷含量

Fig.4 Soil total phosphorus content of under different treatment measures

不同大写和小写字母分别表示各处理间在 0.01 和 0.05 水平差异显著

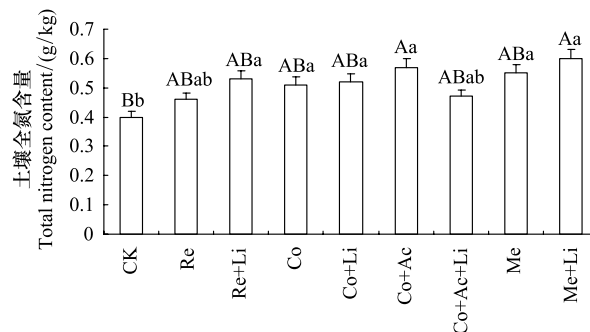


图 5 不同处理措施下土壤全氮含量

Fig.5 Soil total nitrogen content of under different treatment measures

不同大写和小写字母分别表示各处理间在 0.01 和 0.05 水平差异显著

3.2.5 土壤有效磷变化

各处理对土壤有效磷含量的影响如图 6 所示,CK 处理下的土壤有效磷含量显著低于其他各处理($P<0.01$),除了 Re,Co+Ac,Co+Ac+Li 之间无显著性差异之外,其他各处理之间均达到显著差异($P<0.01$, $P<0.05$)。在中小型土壤动物控制下的 Co,Co+Ac,Me 处理中,Me 处理下的有效磷含量显著高于 Co 处理($P<0.05$)且与 Co+Ac 处理成极显著差异($P<0.01$),在有凋落物参与下的处理中,Me+Li 处理下的有效磷含量显著高于 Re+Li,Co+Li,Co+Ac+Li 处理($P<0.01$)。在中小型土壤动物最丰富的 Me 阶段及与凋落物相互作用的 Me+Li 阶段,土壤有效磷的含量相比较其他处理措施均达到最大值,与这两种处理下的有机质含量特征呈现一致的趋势。

3.2.6 土壤水解性氮变化

不同处理对水解性氮的含量影响如图 7 所示,除了 Co+Ac 与 Me 处理之间无显著差异外,其他各处理间均呈现极显著差异($P<0.05$, $P<0.01$)且在 Me+Li 的处理下达到最大值(57.6mg/kg)。在无凋落物参与的处理中 Co+Ac 和 Me 分别与 Co,Re,CK 处理呈现极显著差异($P<0.01$),由此可见,两个及两个以上类群的中小型土壤动物组成的处理对土壤水解性氮含量的影响显著高于单一和无土壤动物的处理。在有凋落物参与的处

理中 Me+Li 处理下的水解性氮的含量显著高于 Co+Li,Re+Li,Co+Ac+Li 处理($P<0.01$)。

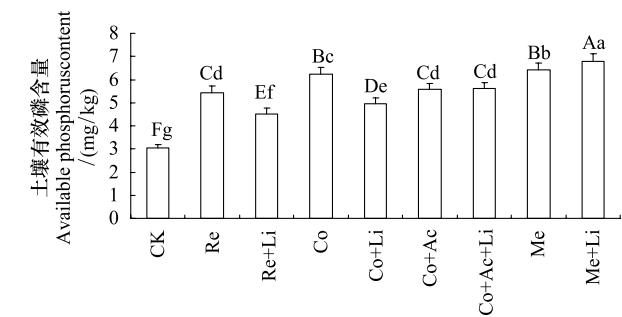


图 6 不同处理措施下土壤有效磷含量

Fig.6 Soil available phosphorus content of under different treatment measures

不同大写和小写字母分别表示各处理间在 0.01 和 0.05 水平差异显著

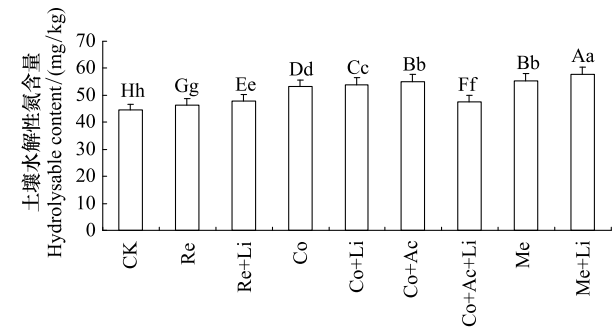


图 7 不同处理措施下土壤水解性氮含量

Fig. 7 Soil hydrolysable nitrogen content of under different treatment measures

不同大写和小写字母分别表示各处理间在 0.01 和 0.05 水平差异显著

3.3 土壤各养分相关性分析

通过对整个土壤养分之间的相关性的分析(表 2), 可以了解它们之间相互作用、相互影响的情况。有机质与有效磷之间相关性达到极显著正相关关系($r=0.886$), 全氮与水解性氮($r=0.898$)呈极显著正相关关系, 有机质与全氮及水解性氮分别呈现显著正相关关系($r=0.735, r=0.780$), 全氮与有效磷($r=0.782$)以及有效磷与水解性氮($r=0.755$)也呈现显著正相关关系。pH 与有机质呈现显著负相关关系($r=-0.782$), 全磷与有机质、全氮、有效磷、水解性氮均无相关关系。

表 2 各测定指标之间的相关性分析 r 值
Table 2 Correlation among different indicators r

项目 Item	pH	有机质 Organic matters	全磷 Total phosphorus	全氮 Total nitrogen	有效磷 Available phosphorus	水解性氮 Hydrolysable nitrogen
pH	1.000					
有机质 Organic matters	-0.782 *	1.000				
全磷 Total phosphorus	-0.311	0.247	1.000			
全氮 Total nitrogen	-0.615	0.735 *	0.386	1.000		
有效磷 Available phosphorus	-0.614	0.886 **	0.458	0.782 *	1.000	
水解性氮 Hydrolysable nitrogen	-0.593	0.780 *	0.101	0.898	0.755 *	1.000

** 表示相关性的显著水平 $P<0.01$, * 表示相关性的显著水平 $P<0.05$

4 结论与讨论

研究中小型土壤动物不同类群的组合及其与凋落物的相互作用对土壤养分的影响,对于揭示中小型土壤动物功能类群对土壤养分的释放能力及与凋落物的分解关系,恢复铜尾矿废弃地生态系统有着重要意义。本项研究显示中小型土壤动物不同类群的组合及其与凋落物的作用不仅能够改善土壤的 pH,而且在土壤养分的循环过程中表现了中间体的作用^[20],一方面中小型土壤动物对土壤养分有需求,另一方面又通过自身的能力以及与凋落物共同作用把养分输送回土壤^[21]。从结果中可以看出,各种处理经过 3 个月的培养实验之后,土壤 pH 值显著低于对照(CK)处理,土壤各养分含量整体都大于对照(CK)处理,可见,中小型土壤动物和土壤养分特征之间有着密切的关系。

(1) 从有无茅草凋落物参与处理的角度来看,在 Re+Li 处理下的土壤 pH、有机质、有效磷含量均极显著低于 Re 处理($P<0.01$),在土壤全磷含量上也显著低于 Re 处理($P<0.05$)。但是在土壤水解性氮含量上 Re+Li 处理极显著高于 Re 处理($P<0.01$),在全氮含量上也显著高于 Re 处理($P<0.05$)。本研究中凋落物覆盖于培养基质之上,由于试验方法的局限,凋落物失去了在自然环境中适宜的分解条件,分解速率可能会受到抑制^[18],导致分解过程中向土壤输入营养物质有限,短期内未能表现出其作用。对于氮素的影响,本研究结果与相关研究也是一致的,在有凋落物参与的处理下,随着培养时间的推移氮素呈现升高的趋势^[22-23]。凋落物是生态系统土壤氮素的重要来源,决定了土壤有机质氮库的大小,氮矿化速率的高低是由土壤中生物活性决定,而高的生物活性主要是由土壤中较高的有机 C 和全 N 含量的驱动^[24]。

(2) 从中小型土壤动物不同类群参与处理的角度来看,中小型土壤动物控制下的 Me 处理 pH 显著低于两个类群(跳虫和螨类)控制的 Co+Ac 处理和单一类群(跳虫)控制下的 Co 处理。有机质和有效磷含量最大值均出现在中小型土壤动物控制下的 Me 处理,其次是 Co 处理,最低值出现在 Co+Ac 处理。Me 和 Co+Ac 处理之间对土壤水解性氮含量的影响无明显差异,但是显著高于 Co 处理($P<0.01$)。可见中小型土壤动物的类群及其功能与土壤养分有密切关系,多类群的中小型土壤动物对部分土壤养分的影响显著高于两个类群和单一类群的处理。主要由于土壤动物通过对微生物捕食以及自身的消化能力常常增加有机质的分解和氮素的矿化^[19,22-23]。在有机质、有效磷以及水解性氮含量影响方面发挥最大作用的类群出现在 Me 处理,此处理下中小型土壤动物类群最丰富,尤其其中的线虫对土壤养分的释放以及氮的矿化都起到了十分重要的作用^[4,14,19,23,25]。对于土壤全氮含量影响最大的是 Co+Ac 处理且显著高于 Me 和 Co 处理($P<0.01$),Me 和 Co 处理之间无明显差异。中小型土壤动物优势类群(弹尾目和蛴螬目)不仅和土壤有机质含量保持很好的相关性,而且通过对微生物的释放以及取食,进一步促进了二者的活性,为其生存和相互作用创造了食源和条件,与土壤全氮含量也有很好的相关性^[7-8,26]。对于土壤全磷含量的影响 Me 和 Co 以及 Co+Ac 处理之间均无明显差异,并未因中小型土壤动物不同类群组合的变化而产生显著性差异。

(3) 从中小型土壤动物不同类群组合与茅草凋落物相互作用的处理角度来看,对于土壤 pH 的影响与仅有不同类群中小型土壤动物参与的处理类似。中小型土壤动物和凋落物的相互作用对土壤基质动态的影响作用已经被研究证明的^[6-7,11]。随着中小型土壤动物类群数量的增加,分解凋落物的能力进一步得到了加强^[6],进而促进了较多的 CO₂ 和有机酸的产生,降低了土壤 pH^[17]。土壤有机质、全磷和有效磷的含量最大值均出现在 Me+Li 处理且与 Co+Ac+Li 处理和 Co+Li 处理呈现极显著差异($P<0.01$)。在 Me+Li 处理中包含大量的中小型土壤动物类群,如优势类群弹尾目、蛴螬目和线虫类及大量的常见类群^[14],其对凋落物的分解能力在很多研究中均有报道,且在凋落物分解的中后期成为主力军^[6-7,18]。土壤全氮和水解性氮含量也呈现一致的变化规律,最大值也均出现在 Me+Li 处理,其次是 Co+Li 处理,最低值出现在 Co+Ac+Li 处理且差异性显著($P<0.05$)。在对氮素的处理方面,跳虫与凋落物的相互作用能力超过跳虫和螨类与凋落物的相互作用能力^[7,27]。跳虫通常被作为中小型土壤动物类群的代表,不仅因为有着丰富的种类和数量,而且其通过刺激微生物活性来提高凋落物的分解和养分的矿化^[7,27]。随着凋落物分解的深入,螨类分解能力下降,跳虫分解能力逐步上升且生态功能日益加强。

不同中小型土壤动物类群组合及其与茅草凋落物的相互作用对土壤养分的影响是显著的,而且不同的功能类群对养分的影响不一致,多类群的中小型土壤动物及与凋落物的相互作用对土壤养分贡献能力最大。但由于试验本身的限制,并不能保证中小型土壤动物对凋落物的分解就一定起主要作用,只能说明它起作用。今后的研究中应加强对土壤动物多样性的保护并对其不同类群在不同条件下功能性展开研究。

参考文献 (References):

- [1] Frouz J, Elhottová D, Pičl V, Tajovský K, Šourková M, Pícek T, Malý S. The effect of litter quality and soil faunal composition on organic matter dynamics in post-mining soil: a laboratory study. *Applied Soil Ecology*, 2007, 37(1/2): 72-80.
- [2] Cristescu R H, Frere C, Banks P B. A review of fauna in mine rehabilitation in Australia: Current state and future directions. *Biological*

- Conservation, 2012, 149(1): 60-72.
- [3] Tripathi G, Deora R, Singh G. The influence of litter quality and micro-habitat on litter decomposition and soil properties in a silvopasture system. *Acta Oecologica*, 2013, 50: 40-50.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 殷秀琴, 仲伟彦, 王海霞, 陈鹏. 小兴安岭森林落叶分解与土壤动物的作用. *地理研究*, 2002, 21(6): 689-699.
- [7] Xiao D Y, Yang Z, Matthew W W, Chen J. Mechanical fragmentation enhances the contribution of Collembola to leaf litter decomposition. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 53: 23-31.
- [8] Camillo Y, Ball B A, Bradford M A, Jordan C F, Molina M. Soil fauna alter the effects of litter composition on nitrogen cycling in a mineral soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(7): 1440-1449.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Andrés P, Mateos E. Soil mesofaunal responses to post-mining restoration treatments. *Applied Soil Ecology*, 2006, 33(1): 67-78.
- [13] Frouz J, Keplin B, Pišl V, Tajovský K, Starč J, Lukešová A, Nováková A, Balík V, Hůněl L, Materna J, Düker C, Chalupský J, Rusek J, Heinkele T. Soil biota and upper soil layer development in two contrasting post-mining chronosequences. *Ecological Engineering*, 2001, 17(2/3): 275-284.
- [14] 朱永恒, 李克中, 余健, 陆林. 铜尾矿复垦地土壤动物群落的恢复. *动物学杂志*, 2012, 47(6): 417-427.
- [15] 殷秀琴, 马祝阳. Tullgren 法对土壤动物的分离效率. *东北师大学报: 自然科学版*, 2002, 34(2): 84-91.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 166-172.
- [17] 程瑞梅, 肖文发, 王晓荣, 封晓辉, 王瑞丽. 三峡库区植被不同演替阶段的土壤养分特征. *林业科学*, 2010, 46(9): 1-6.
- [18] 崔洋, 汪思龙, 于小军, 颜绍疆. 森林土壤动物对凋落物早期分解及养分释放的影响. *生态学杂志*, 2012, 31(11): 2709-2715.
- [19] 殷秀琴, 宋博, 邱丽丽. 红松阔叶混交林凋落物-土壤动物-土壤系统中 N、P、K 的动态特征. *生态学报*, 2007, 27(1): 128-134.
- [20] Ke X, Scheu S. Earthworms, Collembola and residue management change wheat (*Triticum aestivum*) and herbivore pest performance (Aphidina: *Rhopalosiphum padi*). *Oecologia*, 2008, 157(4): 603-617.
- [21] Zamuner E C, Picone L I, Echeverria H E. Comparison of phosphorus fertilization diagnostic methods for wheat under no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 2006, 89(1): 70-77.
- [22] 刘宾, 李辉信, 朱玲, 焦加国, 陈小云, 胡锋. 接种蚯蚓对潮土氮素矿化特征的影响. *土壤学报*, 2007, 44(1): 98-105.
- [23] 李贵才, 韩兴国, 黄建辉, 唐建维. 森林生态系统土壤氮矿化影响因素研究进展. *生态学报*, 2001, 21(7): 1187-1195.
- [24] Sánchez L F, García-Miragaya J, Chacón N. Nitrogen mineralization in soils under grasses and under trees in a protected Venezuelan savanna. *Acta Oecologia*, 1997, 18(1): 27-37.
- [25] Ferris H, Venette R C, van der Meulen H R, Lau S S. Nitrogen mineralization by bacterial-feeding nematodes: verification and measurement. *Plant and Soil*, 1998, 203(2): 159-171.
- [26] 朱强根, 朱安宁, 张佳宝, 张焕朝, 杨淑莉, 王意锟. 保护性耕作下土壤动物群落及其与土壤肥力的关系. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 70-76.
- [27] Filser J. The role of Collembola in carbon and nitrogen cycling in soil: Proceedings of the Xth international Colloquium on Apterygota, České Budějovice 2000; Apterygota at the Beginning of the Third Millennium. *Pedobiologia*, 2002, 46(3/4): 234-245.