

DOI: 10.5846/stxb201306101620

李晓莹, 徐学华, 郭江, 赵顺, 李玉灵. 不同造林树种对铁尾矿基质理化性质和土壤动物的影响. 生态学报, 2014, 34(20): 5746-5757.

作者. Effects of different forestation species on the substrate physicochemical properties and soil fauna in iron tailings. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(20): 5746-5757.

不同造林树种对铁尾矿基质理化性质和土壤动物的影响

李晓莹¹, 徐学华¹, 郭江², 赵顺¹, 李玉灵^{1,*}

(1. 河北农业大学, 保定 071000; 2. 迁安市马兰庄政府, 迁安 064400)

摘要:为了探讨不同造林树种对铁尾矿基质改良及土壤动物的影响,在唐山迁安马兰庄铁尾矿区选择尾矿坡面直接造林成功的沙地柏、紫穗槐、毛白杨 3 种树种,测定林内尾矿理化性质和土壤动物,并与裸尾矿进行对比分析。结果表明:(1)紫穗槐林对铁尾矿土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度和饱和持水量的改善效果最好,沙地柏林对改善毛管孔隙度、田间持水量和毛管持水量的效果最好。(2)3 个树种造林均使尾矿砂 pH 值明显降低。紫穗槐林对尾矿砂有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾含量的积累效果最好,沙地柏林和紫穗槐林均有利于尾矿砂中全钾含量的积累。(3)紫穗槐林下土壤动物数量和多样性最高,沙地柏林次之。铁尾矿土壤动物与环境因素灰色关联度分析表明,全氮、有机质、碱解氮、土壤容重与土壤动物多样性关系密切,植被覆盖率和植被高度对土壤动物多样性影响最小。(4)主成分分析结果表明:紫穗槐林对铁尾矿基质理化性质和土壤动物综合改良效果最好,其次是沙地柏林,杨树林的改良效果不明显。但进行植被恢复后,各样地的立地条件均优于裸尾矿。

关键词:铁尾矿;植被恢复;土壤理化性质;土壤动物;灰色关联度分析;主成分分析

Effects of different forestation species on the substrate physicochemical properties and soil fauna in iron tailings

LI Xiaoying¹, XU Xuehua¹, GUO Jiang², ZHAO Shun¹, LI Yuling^{1,*}

1 Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China

2 Qian'an Malan Town Government, Qian'an 064400, China

Abstract: A large amount of tailings were formed in the process of metal mining, thereby bringing about serious ecological environment problems in the local area. Iron tailings are a kind of tailings, which directly are formed by crushing the iron ore. And their physicochemical properties are obviously different to the conventional cultivation soil. From the point of chemical properties, the iron tailings have not been driven by biological factors to accumulate organic matter and other nutrients so that their fertility is low. From the point of physical properties, the loose structure and rough texture of the iron tailings lead to poor water retention. These poor physicochemical properties which are unfavourable to plant growth bring great difficulty in the ecological restoration for abandoned mine. We can know that biological factors play a crucial role in the formation of soil according to this ecological theory between soil and organisms. Thus we should select the plants which have strong adaptability to iron tailings to construct artificial vegetation. The formation of artificial vegetation will be very effective on improving soil fertility as well as soil properties of iron tailings so that other organisms can enter and settle in the ecological conditions. *Amorpha fruticosa* is a good afforestation species not only for soil erosion but also for desertification of land as one series of mesquite. *Sabina vulgaris* is the creeping evergreen conifer, which is commonly used to conserve

基金项目:国家“十二五”环境领域科技计划(2012BAC09B03);河北省科技计划项目(12236726D)

收稿日期:2013-06-10; **网络出版日期:**2014-03-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liyuling0425@126.com

soil and water, control desertification and green urban landscape in semi-arid area of northern China. *Populus tomentosa* is a fast-growing broadleaf trees and a representative of native species in north China. Based on the advantages of the above three species, we made an investigation on physicochemical properties and fauna of bare tailings soil in different type of vegetation to explore the influence of different afforestation species on properties and fauna. The results showed as follows: (1) *Amorpha fruticosa* has the best restoration effect on soil bulk density, moisture, saturation moisture capacity, total porosity and no capillary porosity, but *Sabina vulgaris* has a significant impact on capillary porosity, field capacity and capillary moisture capacity. (2) All of the forestion species could decrease the pH value of iron tailings obviously. *Amorpha fruticosa* is the most effective way to improve soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen, available phosphorus and potassium. *Sabina vulgaris* and *Amorpha fruticosa* are both conducive to increase soil potassium. (3) The number and diversity of soil fauna under *Amorpha fruticosa* system was significantly greater than *Sabina vulgaris*. This research revealed by Grey relevant analysis (GRA) that soil fauna diversity was closely related to the total nitrogen, organic matter, alkali-hydro nitrogen and soil bulk density. However, the soil fauna appeared to be almost unaffected by the vegetation coverage and height. The result of a principal component analysis (PCA) indicated that the *Amorpha fruticosa* had the best comprehensive improvement of the physicochemical properties and soil fauna, followed by *Sabina vulgaris* and the improvement effect of *Populus tomentosa* was not obvious. In conclusion, *Amorpha fruticosa* is fine species of direct afforestation in iron tailings soil as the mesquite. In the respect of soil physicochemical properties, *Amorpha fruticosa* has the more significant effect on soil improvement than *Sabina vulgaris*, but *Sabina vulgaris* is even better than *Amorpha fruticosa* in the respect of water conservation and deep soil improvement. To adapt to the long-term arid environment, *Sabina vulgaris* as evergreen coniferous shrub formed rich underground root system. This is especially important to the ecological slope protection and winter green landscape improvement which should be developed vigorously in future. *Populus tomentosa* is a local native tree species with the characteristics of fast-growing poplar, which indicates the weakest effect on soil improvement. But there also are obvious water conservation, ecological protection, soil improvement and other ecological benefits compared with the bare tailings.

Key Words: iron tailings; vegetation restoration; soil physicochemical properties; soil fauna; grey relevant analysis (GRA); principal component analysis (PCA)

铁尾矿是土壤元素匮乏、生物生境丧失的特殊立地类型,也是植被恢复的困难立地类型之一^[1-5]。铁尾矿废弃地进行植被恢复的主要限制因子是基质结构松散、养分贫瘠,保肥蓄水能力差,即其不良的理化性质影响植物根系对水分和养分的吸收,进而影响植物的正常生长发育^[6-7]。通过植被恢复加速土壤熟化过程,改良土壤结构,是铁尾矿生态重建的关键之一^[8-9]。所以铁尾矿植被恢复生态效益不仅表现在固持尾矿沙,减少水土流失,更重要的是改良铁尾矿基质,促成土壤形成,这对铁尾矿废弃地的转型开发利用,增加土地面积有重要意义。但目前国内铁尾矿植被恢复多以客土、半客土方式为主,投入治理资金相对较大,工程治理难度较大,只能针对生态重要区位进行治理,不适宜进行大面积推广^[10]。因此从工程操作及成本方面考虑,实施直接植被恢

复是比较理想的方法。直接植被恢复过程需以植物生态学为指导,综合考虑重建地物理条件、营养条件、污染状况,进行适当的物种选择^[11]。

紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)是豆科灌木,也是水土流失、沙漠化土地的优良造林树种;沙地柏(*Sabina vulgaris*)是匍匐常绿针叶灌木,是我国北方半干旱地区防风固沙、水土保持、城市景观绿化常用树种;毛白杨(*Populus tomentosa*)(以下称杨树)是速生阔叶乔木,是我国北方代表性的乡土树种。基于上述3个树种的水土保持、土壤改良的优越性,和在铁尾矿直接造林成功的突出表现,对3个树种林下和裸尾矿的土壤理化性质及土壤动物进行了调查研究,以期揭示不同造林树种对铁尾矿土壤理化性质和土壤动物的影响以及它们之间的相互关系,为铁尾矿直接造林的树种选择提供科学依据,进而为铁

尾矿土壤重构的生物修复提供基础数据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究试验地处燕山南麓,滦河岸边,位于河北省迁安市马兰庄镇,属暖温带大陆性季风气候。年日照时数 26753 h,平均气温 10.1 ℃,最高气温 38.9 ℃,最低气温 -28.2 ℃,有效积温 3854 ℃,无霜期 168 d,年均降水量 722 mm,最少年份只有 284.4 mm。全年大于 6 级以上大风平均 11.3 d (次),大于 4 级以上风平均 67.64 d (次)^[12]。马兰庄镇矿产资

源丰富,镇域铁矿石总贮量达 10 亿 t,有包括首钢在内的多个中大型企业坐落境内。近年来,马兰庄镇与高校、科研部门积极联合,开展了大量铁尾矿生态修复的实践活动,以改善矿区生态环境。

1.2 样地设置

2007 年在唐山迁安马兰庄尾矿砂坡面分别植苗造林紫穗槐 0.67 hm²、沙地柏 0.33 hm²、杨树 0.53 hm²,2012 年 7 月对此 3 个样地及 2012 年形成的裸尾矿进行土壤理化性质和土壤动物取样调查,本次样地调查基本情况见表 1。

表 1 调查样地基本概况

Table 1 General situation of experimental plots

编号 No.	植被类型 Vegetation type	树龄 Age of tree/a	株行距 Planting space/ (cm×cm)	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	植被高度 Vegetation height/m	植被覆盖率 Vegetation Coverage/%
1	沙地柏 <i>Sabina vulgaris</i>	5	50×100	40	西北	0.5	20
2	紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	5	40×100	40	南坡	1.65	80
3	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	5	100×150	30	北坡	2.39	55
4	裸尾矿 Bare tailings	—	—	45	东坡	—	—

1.3 土壤取样

分别在沙地柏林、紫穗槐林、杨树林及裸尾矿内,按随机布点的方法,设置 3 个取样点,在每个取样点上挖土壤剖面,进行分层取样:0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm、40—60 cm。在每一剖面不同土层又重复取土样 3 个,以此 3 个土样平均值表示该土壤剖面对应土层平均值,其他两个剖面计算方法相同。最后再取 3 个剖面对应土层平均值,表示该树种林下土壤对应土层的理化指标,以此分析土壤理化性质。

1.4 土壤理化性质的测定

土壤容重和持水量等物理性质采用环刀法测定。土壤 pH 值采用 pH 计测定。土壤有机质含量的测定采用重铬酸钾容量法-外稀释法;全氮含量的测定采用半微量凯氏定氮法;碱解氮含量的测定采用碱解扩散法;全磷含量的测定采用浓硫酸消煮-钼蓝比色法;速效磷含量的测定采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提-钼蓝比色法;全钾含量的测定采用浓硫酸消煮-火焰光度法;速效钾含量的测定采用 1 mol/L NH₄OAc 浸提-火焰光度法^[13]。

1.5 土壤动物采样方法

采样方法参照《土壤动物研究方法手册》^[14],具

体采样方法如下:大型和中小型动物均设 5 个取样点。大型土壤动物采用面积为 30 cm×30 cm 的取样样方,按土壤剖面分四层取样(0—5、5—10、10—15、15—20 cm),在野外就地分离大型土壤动物,并用 75% 的酒精固定后带回室内鉴定。中小型土壤动物调查采用 300 cm³ 环刀(Φ88 mm×h50 mm)分四层采集土样(0—5、5—10、10—15、15—20 cm),装入塑料自封袋中带回实验室,分别用 Tullgren 法和 Baermann 法分离提取干生和湿生土壤动物,并参考《土壤动物检索图鉴》^[15]对土壤动物进行鉴定统计。对弹尾目和蛴螬目个体一般鉴定到属,其他类群一般鉴定到科。

1.6 数据处理

土壤动物各类群数量等级划分:个体数量占全部捕获数量 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。

根据研究目的,选取以下几个群落多样性指数:

Shannon 指数 $H' = -\sum p_i \ln(p_i)$

Pielou 均匀度指数 $E = H' / \ln S$

Simpson 优势度指数 $C = \sum (p_i)^2$

Margalef 丰富度指数 $D = (S - 1) / \ln N$

式中, S 为类群数, P_i 为第 i 种类群个体数在群落总个体数中所占比例。

采用单样本 K-S 检验方法,检验数据是否符合正态分布。利用双因素方差分析(Two-way ANOVA)检验树种和土壤深度对铁尾矿基质理化性质的总体性影响。用单因素方差分析对不同样地间土壤理化性质和土壤动物多样性进行差异检验,若差异显著则用 LSD 法(方差齐性)或 Tamhane 法(方差不齐)进行多重比较。

土壤、植被因素对土壤动物的影响采用灰色关联法进行分析。

采用主成分分析(PCA)法对土壤理化性质及土壤动物综合指标进行主成分变量提取,通过综合评价模型计算综合评价值。

综合评价模型为:

$$f = \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2) \times f_1 + \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2) \times f_2$$

式中, f 为综合评价值; λ_1 、 λ_2 为特征根值; f_1 、 f_2 为主成分值。

所有数据统计分析均在 Excel 2007 和 SPSS 13.0 软件上完成。

1.7 土壤质量评价采用河北省的地方标准^[16]。

2 结果与分析

2.1 不同造林树种对铁尾矿基质物理性质的影响

铁尾矿基质物理性质受不同造林树种的影响明显,并随土壤深度的增加存在一定的变化(表 3)。双因素方差分析结果(表 2)表明:树种和土壤深度对铁尾矿基质的物理性质有显著影响。

表 2 铁尾矿基质物理性质随树种、土壤深度变化双因素方差分析(F 值)

Table 2 Two-way ANOVA for the effects of tree species and depth on physical properties of iron tailings (F -value)

项目 Item	土壤容重 Bulk/ (g/cm ³)	田间持水量 Field moisyur/%	毛管持水量 Capillary moisyur/%	饱和含水量 Total moisyure/%	总孔隙度 Total capillary/%	毛管孔隙度 Capillary porosity (CP)/%	非毛管孔隙度 No capillary porosity (NCP)/%
树种 Species	17.398 *	10.380 **	0.739 **	52.257 *	2.672 *	2.279 **	4.924 *
土壤深度 Depth	1.727 *	0.220 **	0.535 *	2.442 *	0.318 *	0.206 **	0.342 **
树种×土壤深度 Species×Depth	4.426 *	1.616	1.331	17.138 *	7.765 *	2.813 *	6.041 *

* * $P < 0.001$; * $P < 0.05$

2.1.1 土壤容重

由表 3 可知,与河北省土壤表层容重(1.00—1.50 g/cm³)^[16]相比,裸尾矿土壤容重值偏大。植被恢复后,铁尾矿各土层的容重值均有所降低。说明植物生长可以促使尾矿砂的疏松度、团粒结构得到有效的改善,对尾矿沙土壤形成有进步意义。随着土壤深度的增加,沙地柏林土壤容重值依次减小,紫穗槐林和杨树林则表现出增大的趋势。各样地土壤容重从大到小依次为:裸尾矿>杨树林>沙地柏林>紫穗槐林。沙地柏林和紫穗槐林对铁尾矿土壤容重改善效果明显,杨树林改善效果不显著。

2.1.2 土壤孔隙度

由表 3 可知,与裸尾矿相比,造林地内各土层的总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均有所增大。沙地柏林总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均随土壤深度增大,紫穗槐林和杨树林随土壤深度减小。3 种树种造林均能显著增大铁尾矿土壤总孔隙度。其中,紫穗槐林对铁尾矿土壤总孔隙度的影响

作用最明显,增幅为 31.13%;沙地柏林和杨树林间差异不显著,增幅分别为 27.54%、18.36%。毛管孔隙度的增幅从大到小依次为:沙地柏林(21.02%)>紫穗槐林(13.38%)>杨树林(3.77%)。非毛管孔隙度的增幅从大到小依次为:紫穗槐林(97.33%)>杨树林(72.75%)>沙地柏林(51.83%)。沙地柏林对毛管孔隙度的改善作用最显著,紫穗槐林次之,杨树林的改善作用不明显。对于非毛管孔隙度,紫穗槐林的改善作用最好,沙地柏和杨树林的改善作用无显著差异。各样地土壤非毛管和毛管孔隙度之比均大于裸尾矿。

2.1.3 土壤水分

由表 3 可知,各造林地内土壤水分在垂直方向上的变化趋势与孔隙度一致。沙地柏林对田间持水量和毛管持水量的改善作用最明显,增幅分别为 47%和 40%;其次为紫穗槐林,增幅分别为 16%和 21%;杨树林的改善作用不显著,增幅分别为 10%和 15%。不同造林地内土壤饱和含水量与裸尾矿相比

均显著增加,增幅从大到小依次为:紫穗槐林(36%)>沙地柏林(28%)>杨树林(22%)。其中紫穗槐林对饱和含水量的提升作用最明显,沙地柏和杨树林间无显著差异。

表 3 不同植被类型下铁尾矿基质物理性质 (均值±标准差)
Table 3 Physical properties of iron tailings in different vegetation types (Mean±SD)

植被类型 Vegetation type	土壤深度 Depth /cm	土壤容重 Bulk density /(g/cm ³)	田间持水量 Field moisture/%	毛管持水量 Capillary moisture/%	饱和含水量 Total moisture/%	总孔隙度 Total porosity/%	毛管孔隙度 CP/%	非毛管孔隙度 NCP/%	非毛管与毛管 孔隙度之比 Ratio of NCP and CP
沙地柏	0—10	1.53±0.01	15.46±0.01	20.60±0.80	25.80±0.02	39.40±0.01	31.46±0.95	7.95±0.56	0.25±0.02
<i>Sabina</i>	10—20	1.50±0.03	15.81±0.02	21.40±0.89	28.74±0.25	43.24±0.48	32.19±1.26	11.05±1.74	0.34±0.07
<i>vulgaris</i>	20—40	1.44±0.23	16.15±0.96	22.57±1.93	30.64±0.15	43.99±0.47	32.34±2.96	11.65±1.44	0.36±0.13
	40—60	1.38±0.38	16.34±1.14	23.74±1.30	32.86±0.10	45.07±0.10	32.49±0.83	12.58±0.73	0.39±0.35
	平均值	1.46±0.33bc	15.94±0.19a	22.08±0.67a	29.51±1.50b	42.93±1.23b	32.12±0.23a	10.81±1.00b	0.34±0.03
紫穗槐	0—10	1.32±0.11	14.73±0.29	20.12±0.76	37.34±2.22	48.33±2.78	32.55±1.21	15.78±2.78	0.48±0.19
<i>Amorpha</i>	10—20	1.39±0.17	12.06±1.69	19.86±2.72	32.93±0.65	43.88±1.53	29.94±3.46	13.94±1.56	0.47±0.33
<i>fruticosa</i>	20—40	1.40±0.01	11.78±0.37	18.45±0.57	32.14±0.57	42.35±0.84	29.05±2.45	13.30±1.49	0.46±0.21
	40—60	1.41±0.01	11.51±0.62	18.23±0.43	31.15±0.73	42.00±0.91	28.82±1.07	13.18±1.73	0.46±0.17
	平均值	1.38±0.20c	12.52±0.75b	19.16±0.48b	33.39±1.37a	44.14±1.46a	30.09±0.85b	14.05±0.60a	0.47±0.01
毛白杨	0—10	1.44±0.17	14.05±0.27	20.93± 0.87	30.00±1.25	42.32±0.87	30.07±1.34	12.25±0.66	0.41±0.06
<i>Populus</i>	10—20	1.43±0.24	11.89±0.35	19.61±1.21	28.36±0.99	39.84±0.44	28.05±1.02	11.79±0.29	0.42±0.03
<i>tomentosa</i>	20—40	1.50±0.05	11.23±0.74	17.32±0.56	26.30±1.23	39.01±0.75	26.42±1.11	12.59±0.04	0.48±0.01
	40—60	1.60±0.13	10.50±0.21	15.03±0.89	24.23±1.31	38.17±1.21	25.60±1.72	12.57±0.48	0.49±0.21
	平均值	1.49±0.39ab	11.92±0.77bc	18.22±0.30bc	27.22±1.25b	39.84±0.90b	27.54±0.99c	12.30±0.19b	0.45±0.20
裸尾矿	0—10	1.57±0.36	10.86±1.21	15.83±1.02	20.43±0.13	34.41±1.22	27.12±0.45	6.59±0.98	0.24±0.02
Bare	10—20	1.53±0.08	11.75±1.07	16.50±0.77	19.73±0.83	35.50±1.57	28.45±0.78	6.25±1.01	0.22±0.12
tailings	20—40	1.57±1.49	10.36±0.98	15.94±0.09	21.08±0.21	32.48±0.99	25.54±1.01	6.14±0.08	0.24±0.11
	40—60	1.62±0.19	10.27±0.35	14.93±0.48	24.04±0.65	32.24±1.77	25.05±0.07	5.99±0.96	0.24± 0.02
	平均值	1.57±0.18a	10.81±0.34c	15.80±0.32c	21.32±0.95c	33.66±0.78c	26.54±0.77c	6.24±0.77c	0.24±0.08
<i>F</i>		7.475	15.126	10.792	15.521	17.377	10.807	24.709	—

同一列中,不同字母表示差异显著($P<0.05$)

2.2 不同造林树种对铁尾矿基质化学性质的影响
铁尾矿基质化学性质受不同造林树种的影响明显,并随土壤深度的增加存在一定的变化(图 1—图 4)。双因素方差分析结果(表 4)表明:树种和土壤深度对铁尾矿基质养分含量有显著影响。

表 4 铁尾矿基质化学性质随树种、土壤深度变化双因素方差分析(F 值)
Table 4 Two-way ANOVA for the effects of tree species and depth on chemical properties of iron tailings (F -value)

项目 Item	pH	有机质 Organic matter /(g/kg)	全氮 Total nitrogen /(g/kg)	全磷 Total phosphorus /(g/kg)	全钾 Total potassium /(g/kg)	碱解氮 Available nitrogen /(mg/kg)	速效磷 Available phosphorus /(mg/kg)	速效钾 Available potassium /(mg/kg)
树种 Species	13.158	6.91 **	18.627 **	110.87 *	9.503 **	7.658 **	6.829 **	49.49 **
土壤深度 Depth	4.105 *	3.042 *	6.521 **	4.675 *	5.472 **	4.906 **	7.219 **	17.855 **
树种×土壤深度 Species×Depth	2.589 *	0.219	3.696 **	9.827 *	2.191	2.944 *	2.768 *	10.491 **

** $P<0.001$; * $P<0.05$

2.2.1 铁尾矿基质 pH 值
由图 1 可知,各造林地内尾矿砂均呈弱碱性,pH 值变化范围为 7.37—7.54,裸尾矿 pH 值变化范围为 7.65—7.72。各造林地内铁尾矿基质 pH 值均表现出随土壤深度的增加而增大的趋势。与裸尾矿相比,植被恢复对降低铁尾矿基质 pH 值影响显著,但不同

造林树种间差异不显著。

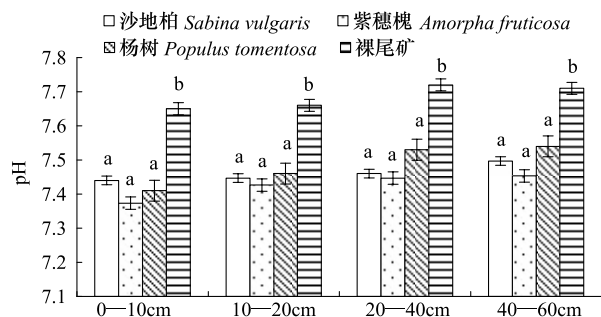


图1 不同样地铁尾矿基质 pH 值(均值±标准差)

Fig.1 The pH of iron tailings in different plots (Mean±SD)

不同字母表示不同树种同一土层之间的差异显著 ($P < 0.05$)

2.2.2 铁尾矿基质有机质含量

如图2所示,与裸尾矿相比,不同树种造林后,铁尾矿基质有机质含量均显著增加。其中紫穗槐林对尾矿砂有机质的积累作用最好,沙地柏林与杨树林间无明显差异。随土壤深度的增加,各造林地内有机质含量呈依次降低趋势。紫穗槐林下各土层有机质含量均明显高于其它样地,沙地柏林和杨树林各土层有机质含量差异不显著,且二者有机质含量都在 0—10 cm 土层与裸尾矿有显著差异 ($P < 0.05$)。

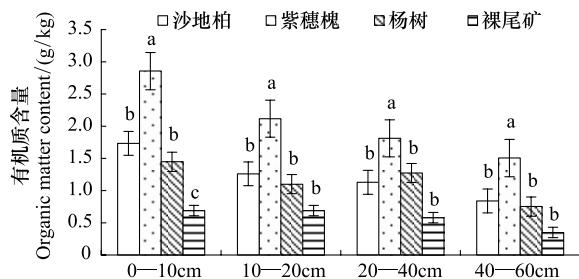


图2 不同样地铁尾矿基质有机质含量(均值±标准差)

Fig.2 The organic matter content of iron tailings in different plots (Mean±SD)

2.2.3 铁尾矿基质全量养分含量

如图3所示,随土壤深度的增加,各造林地内土壤全氮和全钾含量均呈依次降低趋势。紫穗槐林下 0—10 cm 土层全氮和全钾含量明显高于下层土壤,呈现一定的表聚性。植被恢复后,铁尾矿基质全氮含量依次为紫穗槐林 (0.08 g/kg) > 沙地柏林 (0.04 g/kg) > 杨树林 (0.02 g/kg) > 裸尾矿 (0.01 g/kg)。不同树种造林对铁尾矿基质全氮含量的影响存在明显差异。相同土层间全氮含量比较可知,3 个树种林下

各土层全氮含量均有显著差异 ($P < 0.05$)。杨树林与裸尾矿各土层全氮含量基本一致。各样地全钾含量依次为沙地柏林 (0.28 g/kg) > 紫穗槐林 (0.25 g/kg) > 裸尾矿 (0.18 g/kg) > 杨树林 (0.13 g/kg)。杨树林各土层全钾含量最低,且在 10—20 cm 和 20—40 cm 土层与裸尾矿全钾含量差异显著 ($P < 0.05$)。可能是由于植物生长消耗所致。沙地柏林和紫穗槐林各土层全钾含量无显著差异,但均与裸尾矿各土层全钾含量存在明显差异。各造林地内土壤全磷含量与裸尾矿无明显差异,且随土壤深度增加呈波动性变化。主要是由于铁尾矿基质本身全磷含量 (1.43—1.55 g/kg) 较高,明显高于河北省土壤全磷一般含量 (0.2—0.8 g/kg),加之植被恢复年限较短,植物生长对尾矿砂全磷含量影响较小。

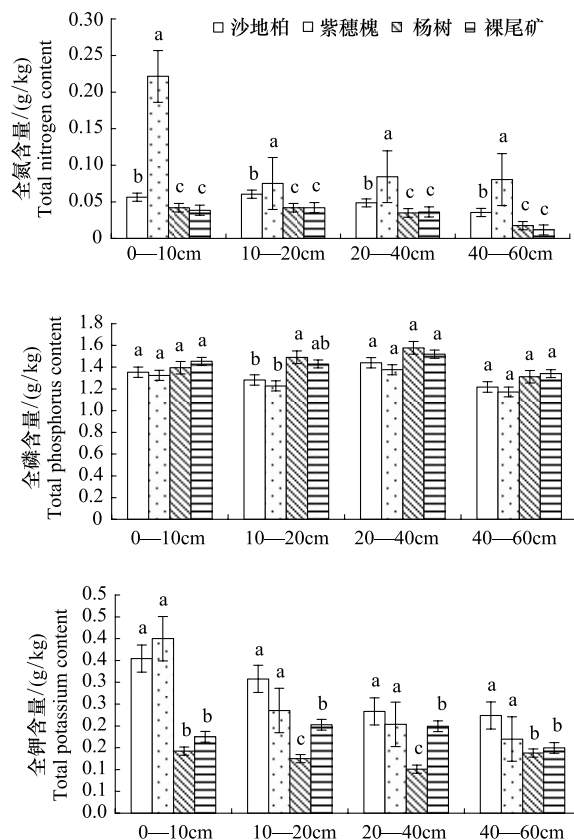


图3 不同样地铁尾矿基质全量养分含量(均值±标准差)

Fig.3 The total nutrient content of iron tailings in different plots (Mean±SD)

2.2.4 铁尾矿基质速效养分含量

各造林地内铁尾矿基质碱解氮、速效磷、速效钾含量均随土壤深度的增加呈降低趋势(图4)。紫穗槐林下 0—10 cm 土层各速效养分含量也呈现一定

的表聚性。各样地碱解氮平均含量依次为紫穗槐林 (8.69 mg/kg) > 沙地柏林 (4.66 mg/kg) > 杨树林 (1.67 mg/kg) > 裸尾矿 (0.81 mg/kg)。紫穗槐林能够显著增加铁尾矿各土层碱解氮含量, 沙地柏林次之, 杨树林对铁尾矿基质碱解氮含量的影响不显著。各样地速效磷平均含量依次为紫穗槐林 (0.15 mg/kg) > 裸尾矿 (0.11 mg/kg) > 沙地柏林 (0.06 mg/kg) > 杨树林 (0.05 mg/kg)。紫穗槐林对尾矿基质速效磷的平均含量改善作用明显, 但只在 0—10 cm 土层有显著效果。沙地柏林和杨树林速效磷含量除在 0—10 cm 土层与裸尾矿无显著差异外, 以下各土层速效

磷含量均显著低于裸尾矿。各样地速效钾平均含量依次为: 紫穗槐林 (23.94 mg/kg) > 沙地柏林 (18.34 mg/kg) > 裸尾矿 (16.95 mg/kg) > 杨树林 (5.90 mg/kg)。紫穗槐林有利于铁尾矿基质速效钾含量的积累, 沙地柏林的积累效果不明显, 杨树林非但没有使速效钾含量增加, 反而明显低于裸尾矿。杨树林各土层速效钾含量均显著低于其它样地。紫穗槐林除在 0—10 cm 土层对速效钾含量的积累优于沙地柏林外, 其它各土层速效钾含量与沙地柏基本一致, 与裸尾矿无显著差异 (图 4)。

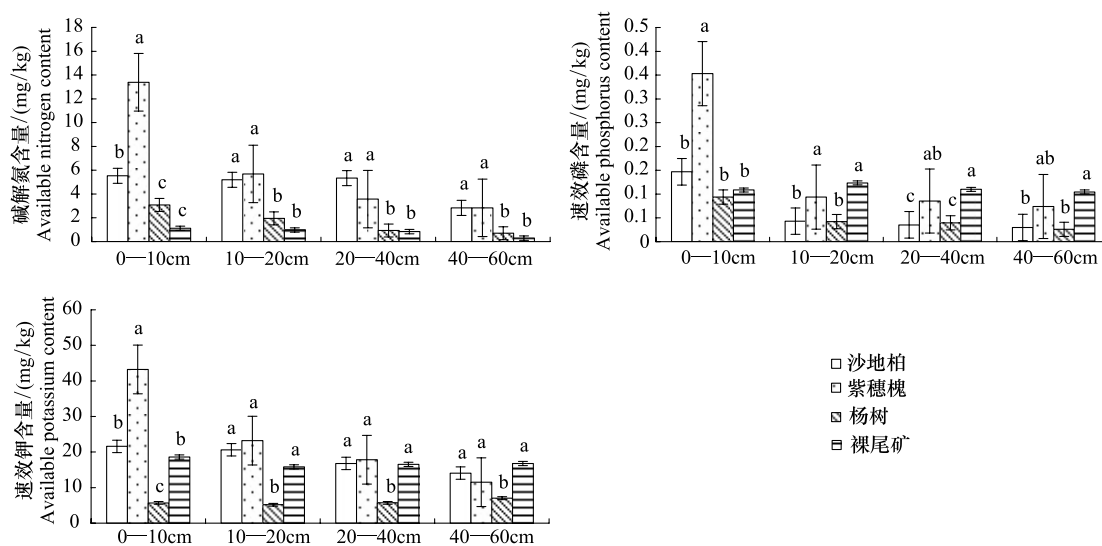


图 4 不同样地铁尾矿基质速效养分含量 (均值±标准差)

Fig. 4 The available nutrient content of iron tailings in different plots (Mean±SD)

2.3 不同造林树种对铁尾土壤动物的影响

2.3.1 土壤动物群落组成及多样性

2012 年 7 月对唐山迁安铁尾矿区 4 个样地进行调查, 共捕获土壤动物 389 只。其中线虫纲占总个体数的 56.8%, 蜱螨目占 17.38%, 双翅目占 12.82%, 为优势类群; 弹尾目占 5.39%, 鞘翅目占 5.28%, 为常见类群; 其它类群为稀有类群, 共占 2.32%。

各样地土壤动物群落多样性如图 5 所示。紫穗槐林和沙地柏林显著增加铁尾矿土壤动物类群数和丰富度指数, 杨树林与裸尾矿基本一致。3 个树种造林后对土壤动物密度和多样性指数均有显著影响。其中, 紫穗槐林的影响作用最大, 沙地柏林次之, 杨树林的影响作用最小。杨树林土壤动物优势度指数最大, 均匀度指数最小, 表明其林下土壤动物分布均匀。

2.3.2 铁尾矿土壤动物与环境因素灰色关联度分析

土壤动物多样性主要由土壤、植被、小气候及其它环境因子所决定^[17]。由于铁尾矿的特殊生境, 植被和土壤是影响土壤动物多样性的关键因素。

为了解铁尾矿土壤动物与环境因素的关系, 采用灰色关联分析法, 选择土壤动物类群数 (y_1)、密度 (y_2)、多样性指数 H' (y_3) 作为母数列 (y)。选择土壤容重 (x_1)、田间持水量 (x_2)、毛管持水量 (x_3)、饱和含水量 (x_4)、总孔隙度 (x_5)、毛管孔隙度 (x_6)、非毛管孔隙度 (x_7)、pH (x_8)、有机质 (x_9)、全氮 (x_{10})、全磷 (x_{11})、全钾 (x_{12})、碱解氮 (x_{13})、速效磷 (x_{14})、速效钾 (x_{15})、植被高度 (x_{16})、植被覆盖度 (x_{17}) 作为子数列 (x)。对原始数据进行初值化转换, 计算灰色关联系数 (r_{ij}) (表 5)。

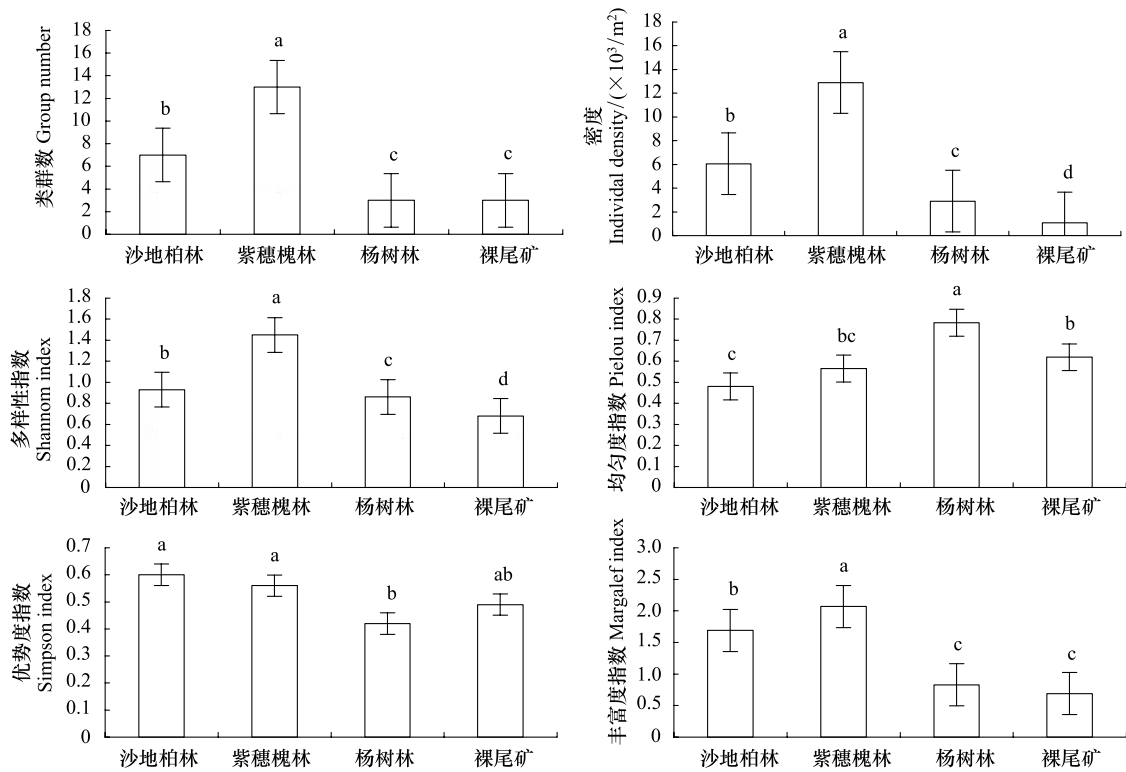


图 5 不同样地土壤动物群落多样性(均值±标准差)

Fig.5 Diversities of soil fauna communities in different plots (Mean±SD)
不同字母表示不同树种之间的差异显著($P<0.05$)

表 5 铁尾矿土壤动物多样性与环境因素间的关联系数

Table 5 The grey relational degree among factors affecting soil fauna in the iron mine tailing

因素 Factors	容重 (x_1)	田间 持水量 (x_2)	毛管 持水量 (x_3)	饱和 含水量 (x_4)	总孔 隙度 (x_5)	毛管 孔隙度 (x_6)	非毛管 孔隙度 (x_7)	pH (x_8)	有机质 (x_9)
类群数	0.679	0.602	0.619	0.668	0.651	0.634	0.658	0.594	0.779
密度	0.755	0.552	0.567	0.621	0.602	0.586	0.597	0.563	0.681
多样性指数	0.702	0.709	0.717	0.804	0.751	0.726	0.823	0.719	0.843
灰色关联度	0.712	0.621	0.635	0.698	0.668	0.649	0.693	0.625	0.768
因素 Factors	全氮 (x_{10})	全磷 (x_{11})	全钾 (x_{12})	碱解氮 (x_{13})	速效磷 (x_{14})	速效钾 (x_{15})	植被高度 (x_{16})	植被覆盖率 (x_{17})	
类群数	0.870	0.573	0.651	0.827	0.653	0.722	0.483	0.612	
密度	0.804	0.543	0.605	0.908	0.615	0.651	0.505	0.628	
多样性指数	0.669	0.704	0.661	0.537	0.633	0.711	0.545	0.478	
灰色关联度	0.781	0.607	0.639	0.757	0.634	0.695	0.511	0.573	

田间持水量: Field moiisyure, 毛管持水量: Capillary moiisyure, 饱和含水量: Total moiisyure, 总孔隙度: Total Capillary, 毛管孔隙度: Capillary porosity, 非毛管孔隙度: No capillary porosity, 有机质: Soil organic matter, 全氮: Total nitrogen, 全磷: Total phosphorus, 全钾: Total potassium, 碱解氮: Available nitrogen, 速效磷: Available phosphorus, 速效钾: Available potassium, 植被高度: Vegetation height, 植被覆盖率: Vegetation coverage, 类群数: Number of groups, 密度: Individual density, 多样性指数: Shannon index, 灰色关联度: Gray relational degree

在单项关联系数 $[r_{1j}=(y_1, x_j), r_{2j}, r_{3j}]$ (表 5)中, 类群数受全氮(0.870)影响最大, 密度受碱解氮(0.908)影响最大, 二者均受植被高度影响最小, 分别为 0.483, 0.505。多样性指数受有机质(0.483)影

响最大, 受植被覆盖率(0.487)影响最小。

铁尾矿环境因素灰色关联度平均从大到小依次为: 全氮(0.781)、有机质(0.768)、碱解氮(0.757)、土壤容重(0.712)、饱和含水量(0.698)、速效钾

(0.695)、非毛管孔隙度(0.693)、总孔隙度(0.668)、毛管孔隙度(0.649)、全钾(0.639)、毛管持水量(0.635)、速效磷(0.634)、pH(0.625)、全磷(0.607)、田间持水量(0.621)、植被覆盖率(0.573)、植被高度(0.571)。灰色关联度值越大,说明子数列对母数列的影响最大^[18]。由关联度大小可以看出,全氮、有机质、碱解氮、土壤容重与土壤动物多样性关系密切,对土壤动物多样性影响最小的是植被覆盖率和植被高度。

2.4 不同样地铁尾矿基质理化性质和土壤动物密度主成分分析

综合上述不同样地尾矿砂的物理指标(土壤容重、田间持水量、毛管持水量、饱和含水量、总孔隙

度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度)、化学指标(pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾)、土壤动物指标(类群数、密度、多样性指数)共 18 项指标,进行主成分分析,提取出两个主成分变量。提取出的 2 个主成分变量,特征根分别为 11.745、4.698,累计贡献率达到 89.745%,表明提取出的前 2 个综合指标能代表 18 个单项指标的绝大部分信息,可以用这 2 个主成分对 3 个树种林下尾矿砂理化性质和土壤动物进行概括分析。

通过综合评价公式,计算出综合评价值,得出 3 种不同树种造林对铁尾矿恢复效果的排名,从而可知铁尾矿植被恢复评价结果(表 6)。

表 6 不同植被类型综合评价值及排序

Table 6 Comprehensive appraise value and sequencing of different vegetation types

植被类型 Vegetation type	各主成分值 Every factor value		综合评价值 <i>f</i> Comprehensive appraise value	排名 Rank
	<i>f</i> ₁	<i>f</i> ₂		
紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	1.54765	-0.86752	0.71	1
沙地柏 <i>Sabina vulgaris</i>	0.38243	1.23875	0.63	2
毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	-0.43151	0.44108	-0.18	3
裸尾矿 Bare tailings	-1.498	-0.8895	-1.32	4

由表 6 可知,不同造林树种造林对铁尾矿理化性质和土壤动物数量改良效果综合评价为:紫穗槐林>沙地柏林>杨树林>裸尾矿。表明紫穗槐林改良效果最好,其次是沙地柏林,杨树林的改良效果不明显,但进行植被恢复后,各样地的立地条件均优于裸尾矿。

3 结论与讨论

退化地植被重建恢复过程中,3 种树种直接造林后均能有效地改良土壤结构,显著改善土壤有机质含量与氮含量,但不同树种造林对土壤结构和土壤养分的影响存在差异^[19]。从改善土壤结构来看,沙地柏林和紫穗槐林均能有效降低铁尾矿土壤容重值。但在土壤垂直方向上,紫穗槐林下土壤容重依次增大,沙地柏则表现出降低趋势。说明紫穗槐对表层土壤容重改善作用好,沙地柏更有利于深层土壤容重的改善。其原因在于土壤容重随土壤孔隙状况而变化,通过土壤孔隙而影响容重的因素包括土壤质地、土壤松紧度和土壤有机质含量等。紫穗槐林下土壤有机质含量较高,且随土壤深度降低,这可

能是影响其林下土壤容重变化的主要因素。而沙地柏林由于其常绿匍匐生长特性,决定其林下枯落物少,有机质含量较低。但其发达的根系纵横交错,形成庞大的根系网,使下层土壤疏松多孔,从而有利于降低下层土壤容重^[20-21]。研究表明:结构性良好、水-气关系协调的土壤,总孔隙度在 40%—50%之间,非毛管孔隙度大于 10%,而非毛管孔隙度与毛管孔隙度比例在 1:2—1:4^[22]。由于裸尾矿基质本身粒径细小,毛管孔隙和无效孔隙在一定程度上占优势,使得非毛管孔隙与毛管孔隙之比小于 1:4。经植被作用后,毛管与非毛管孔隙度均达到合适的比例。其中,沙地柏林对毛管孔隙度的改善作用最显著,紫穗槐林对总孔隙度和非毛管孔隙度的改善作用最好。可见,沙地柏林保水能力好,特别是对深层土壤改善作用明显。紫穗槐林土壤通透性较好,不仅如此,紫穗槐林的总孔隙度数量、毛管和非毛管孔隙的比例结构综合表明紫穗槐林土壤孔隙结构合理,土壤改善效果最为明显。从改善土壤化学性质来看,植被恢复后,尾矿砂 pH 值降低。这是由于随植被恢复进程,有机质分解后形成一定量的腐殖质酸,释放出

大量的 H^+ , 有利于尾矿基质 pH 值的降低^[23]。紫穗槐林对铁尾矿基质有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾含量的改善作用最好, 尤其对氮素的积累有显著效果。Harris 等^[24]认为, 多年生豆科植物的枯枝落叶和 1 年生豆科植物在生长季节之后的整个枯死植株, 为废弃地提供大量的土壤有机物质, 而这类有机物质中的 C/N 较低, 从而在分解后可以有效地增加土壤中氮素的累积, 这和本文的研究结果是一致的。铁尾矿全钾平均含量(0.18 g/kg)远低于河北省土壤全钾平均含量(19.2 g/kg)。这与废弃地土壤绝大部分是由岩石碎块和岩屑组成, 全钾含量较高^[25]不符。其原因可能是钾元素易于淋溶, 选矿过程中由于清洗过于细致, 使钾元素流失。过低的钾元素含量不利于多数植被的生长, 而沙地柏和紫穗槐不仅能够适应还能有效增加尾矿砂中全钾含量;

铁尾矿土壤理化性质与土壤动物群落结构关系密切, 其中影响最显著的是土壤容重、有机质和氮含量。由此可见, 土壤基质的优劣、土壤有机质和营养元素含量等因素限制了铁尾矿土壤动物群落的恢复与重建, 而这些因素的改善主要归功于废弃地的植被恢复^[26]。所以在铁尾矿上造林有利于土壤动物群落的恢复与重建, 但不同的造林树种对土壤动物群落的影响作用存在差异。紫穗槐林对土壤动物类群数和密度的增加作用最显著, 其次是沙地柏林, 杨树林最小。黄秋娴等人的研究表明: 土壤容重小, 则土壤较疏松多孔, 土壤动物的个体数量较多。土壤有机质能改变土壤的物理结构和化学性质, 有利于土壤团粒结构的形成, 从而促进植物的生长和养分的吸收。一般情况下, 土壤有机质含量越高, 土壤动物的个体数越多^[27]。土壤动物分布不仅受地上造林树种的影响, 还受立地条件等因素影响。目前已有研究表明坡向和坡度均能对土壤动物产生影响。Sandrine Salmond 等的研究结果表明: 土壤动物个体数与所接受的太阳辐射能成正比^[28]。坡向不同, 所接受的太阳辐射能必然不同, 因而导致土壤动物个体数存在差异。而坡度则主要通过影响土壤含水量对土壤动物产生影响^[29]。本文所研究造林地尾矿坡度相近, 但植被覆盖率和尾矿坡向不同。灰色关联分析结果表明, 植被覆盖率对土壤动物多样性影响较小, 所以坡向可能也是影响土壤动物分布的因素。位于尾矿南坡的紫穗槐林下土壤动物最多, 这

或许和南坡土壤温度较高, 加之紫穗槐根系对尾矿的改良为更多土壤动物提供了适宜生境有关, 对此还需在完全相同立地条件下进行深入对比分析研究。

综上所述, 紫穗槐作为豆木本科植物, 对铁尾矿基质理化性质和土壤动物的综合改良效果最显著, 是铁尾矿上直接造林的优良树种。沙地柏在土壤物理结构、土壤养分改良方面仅次于紫穗槐, 在土壤保水、深层土壤改良方面作用显著。由于其长期适应干旱环境, 具有发达的地下根系^[30], 又是常绿针叶灌木, 这对尾矿生态护坡、冬季绿色景观改善有特殊意义, 应大力发展; 杨树是当地乡土树种, 其乔木和速生的特征导致杨树对尾矿土壤改良作用最弱, 但与裸尾矿相比, 也有明显的水土保持、生态护坡、土壤改良等生态效益。

References:

- [1] Fu W H, Wang Y, Yu Q Q, Li Y L. Effect of different improvement measures on the reclamation effect of iron tailings. *Northern Horticulture*, 2012, (8): 158-163.
- [2] Yang X, Gao L. A study on re-vegetation in mining wasteland of Dexing Copper Mine, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (11): 1932-1940.
- [3] Mendez M O, Maier R M. Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2008, 7(1): 47-59.
- [4] Ye Z H, Shu W S, Zhang Z Q, Lan C Y, Wong M H. Evaluation of major constraints to revegetation of lead/zinc mine tailings using bioassay techniques. *Chemosphere*, 2002, 47(10): 1103-1111.
- [5] Guo S P, Ban Y D, Su P F, Qi G H, Li B G, Li L H. Studies on the effects of different reclamation measures on iron mine tailings wasteland. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 2011, 26(2): 157-180.
- [6] Ren X X, Cai T J, Wang X F. Effects of vegetation restoration models on soil nutrients in an abandoned quarry. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(4): 151-154.
- [7] Song J L, Wu F Q, Yao J, She D, Bao Y X. Changes of soil physical and chemical properties during vegetation restoration on abandoned cropland. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(3): 168-173.
- [8] Wang L Y, Hang Y Z, Zhang C L, Pei Z Y. Reclaimed soil properties and weathered gangue change characteristics under various vegetation types on gangue pile. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(21): 6249-6441.
- [9] Shen G, Li Q M, Zhao Y. Progress and perspectives in vegetation succession of mine ecological restoration. *Modern Mining*, 2010, 26

- (10): 70-73.
- [10] Gao J. Experimental study on ecological management of vegetation restoration techniques on iron ore tailings pond, in Bengbu. *Modern Landscape Architecture*, 2012, (3): 44-46.
- [11] Liu Z M. Study on the chose species of renew vegetation in Anshan's iron mine. *China Environmental Management*, 2003, 22 (3): 50-51.
- [12] Xu Z Q, Yuan Y X, Li Y L, Xu X H, Guo J, Liu J Z. Impacts of forestation on the nutrient content and biodiversity of iron tailing land. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(12): 151-156.
- [13] Bao S D. *Soil Agriculturalization Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2002: 34-35, 56-58.
- [14] Committee of Handbook of Soil Fauna Research Methods. *Handbook of Soil Fauna Research Methods*. Beijing: Chinese Forestry Press, 1998: 24-34.
- [15] Yin W Y. *Pictorial Keys to Soil Animals of China*. Beijing: Science Press, 1998.
- [16] Lü D Q, Shao M A, Liu C P. Effect of bulk density on soil saturated water movement parameters. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3): 154-157.
- [17] Lin Y H, Zhang D F, Zang J Q, Ou Y X J, Mo D S, Zhao 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.
- [18] Li S F, Dang Y G, Fang Z G. *The Grey System Theory and Application*. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2004.
- [19] Wang Z Y, Zuo C Q, Cao W H, Yang J, Xu Y N, Qing W, Zhang J F. Physical and chemical properties of soils under different vegetation restoration models in red soil hilly region. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(4): 715-724.
- [20] Chen B. The experimental research of tender twig cutting propagation of sandy cypress. *Inner Mongolian Environmental Science*, 2007, 19(2): 62-67.
- [21] Xie Y F. The Study on the Natural Distribution and Habitat of *Sabina Vulgaris* in the Inner Mongolia [D]. Inner Mongolia: Agricultural University, 2005.
- [22] Wang Y, Li Y L, Shi J H, Guo J, Du J Y. Effect of different vegetation restoration measure on the species diversity and soil properties of iron tailings. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(3): 112-117, 183-183.
- [23] Sun Y F, Wei Z Y, Li X F. Effects of different improving measures on the pH value and available nutrients of iron tailings. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35 (26): 8077-8080.
- [24] Harris J A, Brich P, Palmer J P. *Land Restoration and Reclamation: Principles and Practice*. Singapore: Longman, 1996.
- [25] Man X L, Meng Q F, Liu W Y. Vegetation restoration technology of stone pit wasted lands of Jixi Mining Area. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(6): 104-109.
- [26] 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): 1459-1505.
- [27] Hang Q X, Pu Z G, Hou X J, Wang Z G, Su X Y. The relationship between soil animals and soil physical and chemical properties in different greenlands of Baoding. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 2009, 24(2): 195-199.
- [28] Sandrine S, Nadia A, Lorenzo F, Roberto Z. Relationships between soil fauna communities and humus forms: Response to forest dynamics and solar radiation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(7): 1707-1715.
- [29] He X J, Wu P F, Cui L W, Zhang H Z. Effects of slope gradient on the community structures and diversities of soil fauna. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(12): 3701-3713.
- [30] Li Y L, Zhu F, Wang J G, San M Z Z, Ban B G E, Ji C X. Seasonal changes of photosynthetic characteristics and pigment composition of *Sabina Vulgaris* Ant. Under water stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4346-4352.

参考文献:

- [1] 付文昊, 王岩, 于清芹, 李玉灵. 不同土壤改良模式对铁尾矿复垦效果的影响. *北方园艺*, 2012, (8): 158-163.
- [2] 杨修, 高林. 德兴铜矿矿山废弃地植被恢复与重建研究. *生态学报*, 2001, 21(11): 1932-1940.
- [5] 郭素平, 班亚东, 苏鹏飞, 齐国辉, 李保国, 刘丽华. 不同复垦措施对铁尾矿砂废弃地复垦效果的研究. *河北林果研究*, 2011, 26(2): 157-180.
- [6] 任晓旭, 蔡体久, 王笑峰. 不同植被恢复模式对矿区废弃地土壤养分的影响. *北京林业大学学报*, 2010, 32(4): 151-154.
- [7] 宋娟丽, 吴发启, 姚军, 余雕, 包耀贤. 弃耕地植被恢复过程中土壤理化性质演变趋势研究. *干旱地区农业研究*, 2009, 27 (3): 168-173.
- [8] 王丽艳, 韩有志, 张成梁, 裴宗阳. 不同植被恢复模式下煤矸石山复垦土壤性质及煤矸石风化物变化特征. *生态学报*, 2011, 31(21): 6429-6441.
- [9] 沈刚, 李香梅, 赵燕. 矿山植被恢复演替研究进展. *现代矿业*, 2010, 26(10): 70-73.
- [10] 高杰. 蚌埠铁尾矿库生态治理的植被恢复技术试验研究. *生境*, 2012, (3): 44-46.
- [11] 刘忠民. 鞍山铁矿植被恢复中物种选择的探讨. *中国环境管理*, 2003, 22(3): 50-51.
- [12] 许中旗, 袁玉欣, 李玉灵, 徐学华, 郭江, 刘金柱. 造林对铁尾矿地养分含量及物种多样性的影响. *林业科学*, 2008, 44 (12): 151-156.
- [13] 鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 2002: 34-35, 56-58.
- [14] 《土壤动物研究方法手册》编写组. *土壤动物研究方法手册*. 北京: 中国林业出版社, 1998: 24-34.

- [15] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [16] 吕殿青, 邵明安, 刘春平. 容重对土壤饱和和水分运动参数的影响. 水土保持学报, 2006, 20(3): 154-157.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 王昭艳, 左长清, 曹文洪. 红壤丘陵区不同植被恢复模式土壤理化性质相关分析. 土壤学报, 2011, 48(4): 715-724.
- [20] 陈赟. 沙地柏嫩枝扦插繁殖实验研究. 内蒙古环境科学, 2007, 19(2): 62-67.
- [21] 解一帆. 臭柏在内蒙古的天然分布和生境的研究 [D]. 内蒙古: 农业大学, 2005.
- [22] 王岩, 李玉灵, 石娟华, 郭江, 杜建云. 不同植被恢复模式对铁尾矿物种多样性及土壤理化性质的影响. 水土保持学报, 2012, 26(3): 112-117, 183-183.
- [23] 孙羽丰, 魏忠义, 李秀凤. 不同改良措施对铁尾矿 pH 值及速效养分含量的影响. 安徽农业科学, 2007, 35(26): 8077-8080.
- [25] 满秀玲, 孟庆峰, 刘文勇. 鸡西矿区采石废弃地植被恢复技术. 中国水土保持科学, 2009, 7(6): 104-109.
- [26] 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.
- [27] 黄秋嫻, 卜志国, 侯晓杰, 王志刚, 苏筱雨. 保定市不同绿地土壤动物群落与土壤理化性质的关系. 河北林果研究, 2009, 24(2): 195-199.
- [29] 何先进, 吴鹏飞, 崔丽巍, 张洪芝. 坡度对农田土壤动物结构和多样性的影响. 生态学报, 2012, 32(12): 3701-3713.
- [30] 李玉灵, 朱帆, 王俊刚, 三木直子, 坂本圭児, 吉川賢. 水分胁迫下臭柏 (*Sabina vulgaris* Ant.) 光合特性和色素组成的季节变化. 生态学报, 2009, 29(8): 4346-4352.