

半干旱区露天矿生态复垦土壤养分与植物群落相关分析*

刘卫华¹ 赵冰清² 白中科^{3,4} 上官铁梁^{1,2} 段毅豪² 张 婕⁵ 郭东罡^{2**}

(¹山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; ²山西大学环境与资源学院, 太原 030006; ³中国地质大学土地科学技术学院, 北京 100083; ⁴国土资源部土地整治重点实验室, 北京 100035; ⁵山西大学生命科学学院, 太原 030006)

摘 要 以中煤平朔安太堡露天煤矿排土场生态复垦区刺槐+油松配置模式固定监测样地为研究平台, 以样地内的恢复植被和土壤为主要研究对象, 研究了复垦区土壤 pH 值和养分含量特征, 以及各种群平均密度、高度和胸径等种群基本特征与土壤因子的关系。结果表明: 土壤有机质、全氮、速效钾含量均接近或超过原地貌水平, pH 值、碱解氮和速效磷含量远低于原地貌水平; 在同一剖面内, 0~20 cm 土层的土壤养分含量明显高于 20~40 cm 土层; 刺槐和油松平均胸径、平均高度与立木平均密度极显著负相关, 相关关系可用一元线性方程拟合; 刺槐种群平均密度、平均高度和平均胸径与土壤 pH 值、碱解氮和速效磷含量关系密切, 各自可用上述土壤因子线性回归方程拟合。主成分分析结果显示, 3 个土壤因子对刺槐种群的作用大小为碱解氮>pH>速效磷。可根据以上回归模型指导刺槐的复垦栽培。

关键词 土壤因子; 种群; 刺槐; 油松; 煤矿复垦

中图分类号 Q948.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)9-2369-07

Correlation of soil nutrients and plant community in ecological reclamation of opencast coal mine in a semiarid area. LIU Wei-hua¹, ZHAO Bing-qing², BAI Zhong-ke^{3,4}, SHANG-GUAN Tie-liang^{1,2}, DUAN Yi-hao², ZHANG Jie⁵, GUO Dong-gang^{2**} (¹*Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*; ²*College of Environmental and Resource Sciences of Shanxi University, Taiyuan 030006, China*; ³*School of Land Sciences & Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; ⁴*Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China*; ⁵*College of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(9): 2369–2375.

Abstract: A 0.8-hm² plot at the eco-reclamation area in Antaibao Opencast Coal mine of China-Coal Pingshuo Coal Company Limited was established for monitoring the plant community and soil after reforestation of a mixed plantation of locust (*Robinia pseudoacacia*) and pine (*Pinus tabulaeformis*). The relationships among the factors of soil pH, nutrients, vegetation density, tree height and DBH were examined. The results showed that the organic matter, total N and available K were similar to or higher than those of the original landscape, while the pH, available N and P were far lower than those prior to mining activities. In the same profile, the soil nutrients at 0–20 cm depth were significantly higher than at 20–40 cm depth. For both tree species, the tree density was negatively correlated to the mean height and DBH and well fitted through simple linear regressions. The density, height and DBH of *R. pseudoacacia* population were significantly correlated with the soil pH, available N and P. The principal component analysis revealed that the contributions of soil factors to the *R. pseudoacacia* population were in the order of available N > pH > available P. The regression models obtained in the study are expected to be useful in providing guidance to the reforestation of *R. pseudoacacia* population at eco-reclamation areas.

Key words: soil factors; population; locust tree; Chinese pine; coal mine reclamation.

* 国土资源部土地整治重点实验室(20140136)开放基金项目资助。

** 通讯作者 E-mail: gdghjlx@126.com

收稿日期: 2014-03-17 接受日期: 2014-05-04

土壤是植被生长发育的基础,能够为植被不断地提供水分和营养物质,而植被的出现也能够影响土壤形成和发育(Binkley & Giardina, 1998; 黄昌勇, 2000)。长期以来,露天煤矿开采造成了大规模的土地破坏,特别是土壤和植被的破坏最为严重。因此,恢复受损的土壤和植被成为矿区生态恢复的关键。自1991年以来,国家在中煤平朔露天煤矿矿区投入大量的人力和物力进行乔、灌、草不同配置模式的植被恢复。然而,植被恢复的过程实质上是植被-土壤复合生态系统交互作用的过程。目前,植被与复垦土壤之间的交互影响和演变规律尚不清楚。

国外对于矿区植被和复垦土壤演变规律的研究较早,主要集中于矿区植被恢复的限制性因子研究,例如,土壤pH值和土壤肥力过低(Costigan *et al.*, 1981), N、P养分和有机质缺乏(Dancer *et al.*, 1977), 重金属元素含量高(Jiang *et al.*, 1993)以及极端的物理性状(刘飞和陆林, 2009)等。Alday等(2011)研究发现,当覆土厚度增大时,煤矿复垦土地植被演替主要受复垦时间和土壤pH值的影响。我国对于植被与复垦土壤交互关系研究起步较晚。例如,王改玲和白中科(2002)认为,水分缺乏、土体构造不良、土壤容重大以及养分贫乏等是植被恢复的限制因子。郭道宇等(2005, 2007)发现,光照和水分是安太堡矿区植被恢复中起决定作用的限制因子,土壤有机质是决定群落稳定性的主要因子。张桂莲等(2005)认为,安太堡人工植被恢复演替初期,土壤有机质对植物群落发展起决定性作用。王金满等(2013)研究了安太堡复垦土壤和乔木林地植被生物量的动态演变规律,结果发现,对植被生物量影响较大的因子是土壤有机质和全氮。上述研究丰富了复垦土壤与植被关系的研究内容,然而定量分析土壤因子对植被生长影响的研究尚不多见。植被分布和土壤养分含量及分布密切相关(Hall *et al.*, 2004; John *et al.*, 2007)。复垦初期,植被生长主要受限于土壤条件和人为控制,随复垦时间的变化,土壤质量随之改善,植物群落动态过程中各种群的自疏和他疏也发生着动态变化。据此,种群所在群落生境的差异可能是影响种群生长分布的主要原因,其中立木密度和土壤因子可能是两个重要因子(龙文兴等, 2008)。

本研究以中煤平朔安太堡露天煤矿排土场生态复垦区刺槐(*Robinia pseudoacacia*) + 油松(*Pinus tabulaeformis*)混交林0.8 hm²固定监测样地为研究对

象,在植被调查和土壤因子分析的基础上,开展种群平均密度、平均胸径、平均高度等种群特征与立木密度和土壤因子的关系研究,揭示种群基本特征与土壤因子之间的动态规律,为煤矿采矿废弃地植被生态恢复建设提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

安太堡露天煤矿位于山西省北部的朔州市平鲁区(39°23'N—39°37'N, 112°10'E—113°30'E), 海拔1180~1500 m。矿区属典型的温带半干旱大陆性季风气候,平均气温为4.8~7.8℃, ≥10℃的年积温为2200~2500℃,无霜期约115~130 d。年降水量428.2~449.0 mm,年蒸发量1786.6~2598.0 mm。矿区年平均风速为2.5~4.2 m·s⁻¹,最大风速20 m·s⁻¹。矿区地带性土壤为栗钙土与栗褐土的过渡带,地带性植被属于草原类型。露天开采后,所有的土多由人工铺垫至排土场,铺垫的土层主要是黄土类物质及少量红土,有时还混有少量煤矸石和碎石等物质,质地一般为沙壤至壤土(白中科, 2001)。复垦初期(1993年)样地为刺槐油松隔行间种,刺槐为1年生幼苗,平均高度30 cm,油松为5年生幼苗,平均高度1 m,栽植行间距为2 m,刺槐株距为1 m,油松株距为5 m。草本层人工撒种种植有红豆草(*Onobrychis viciifolia*)和无芒雀麦(*Bromus inermis*)。目前,调查到的乔木树种主要有刺槐、油松和榆树(*Ulmus pumila*),平均胸径分别为6.74、7.54和4.33 cm。样地内总胸高断面积8.94 m²·hm⁻²,其中刺槐和油松的胸高断面积分别为7.26和1.09 m²·hm⁻²,二者之和占样地总胸高断面积的93.4%,优势地位明显。草本植物主要有大籽蒿(*Artemisia sieversiana*)、无芒雀麦、戈壁针茅(*Stipa tianschanica* var. *gobica*)。

1.2 野外调查方法

刺槐+油松混交林固定监测样地位于南排土场生态复垦区海拔1340~1380 m的边坡,平均海拔1355 m,平均坡度17.6°。2010年,参照CTFS(Center for Tropical Forest Science, CTFS)的技术规范,用全站仪将0.8 hm²样地划分为80个10 m×10 m的样方,用插值法将样方细分为4个5 m×5 m的小样方。野外调查时以10 m×10 m样方为树种编号单元,以样地一角为坐标原点,顺序排列10 m×10 m样方的行列号。以5 m×5 m为基本测树单元,按照顺

时针方向对样方内胸径 DBH (diameter at breast height) ≥ 1 cm 的个体进行挂牌标记,对于 DBH <1 cm,高度 <1.3 m 的个体测量基径,不挂牌。记录样方内所有木本植物的种名、胸径、高度、枝下高、冠幅及生长状况等信息,并测量所有个体的空间位置坐标。

1.3 土壤的采集和测定

1.3.1 采样方案 参照 CTFS 土壤采样方案,结合监测样地实际情况,采样方案如下:将 0.8 hm²样地分割成 6 个 30 m \times 30 m 的网格,以每个网格结点为采样基点,从每个基点的 8 个方向(正北、东北、正东、东南、正南、西南、正西、西北)中随机选取 1 个方向进行延伸取样(处于样地边界上的基点只从 5 个方向选取,以保证所有的采样点都落在样地内),在选定的方向上距离基本点 2、5 m 或 2、15 m 或 5、15 m 处取样,由此共计采样点 36 个,采样点空间分布如图 1 所示。

1.3.2 采样步骤 按照取样图用罗盘和卷尺将取样点的位置标记出来(用红绳),如果取样点正好碰上大石块或者树根,在以取样点为圆心,在其附近的 50 cm 之内取样。在每个采样点,首先清除表层枯枝落叶,然后在标出的采样点周围 20 cm 处使用直径 5 cm 土钻取 3 个土样,以 3 个土样的混合土样作

为该点的样本,取样深度为 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm,混合后装入自封袋中。同时选择南排土场附近未破坏的原地貌土壤进行对照,植被类型为云杉林。

1.3.3 土壤理化性质分析方法 土样带回实验室后风干,过 2 mm 筛子备用。土壤具体测定方法参照鲁如坤(1999)和鲍士旦(2001),具体测定方法如下:pH 值采用电位法,有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法,全氮采用半微量开氏法,碱解氮采用碱解扩散吸收法,速效磷采用 0.5 mol \cdot L⁻¹ NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法,速效钾采用 1 mol \cdot L⁻¹ NH₄OAc 浸提-火焰光度法。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 13.0 软件对数据进行处理和分析,R2. 11. 1 进行绘图。根据每个土壤采样点所对应的 10 m \times 10 m 样方,若多个土壤采样点落在同一个 10 m \times 10 m 样方内,取其平均值作为该样方的土壤养分含量,将 36 个土壤采样点划分到 21 个样方内,由此计算各种群平均密度、平均胸径和平均高度。用 REGRESSION 过程对各种群平均密度、平均胸径、平均高度与土壤因子关系进行逐步回归分析,并进行 *t* 检验;用主成分分析(PCA)分析回归方程中的土壤因子。

2 结果与分析

2.1 复垦区土壤 pH 和养分含量特征

表层土壤(0 ~ 20 cm)pH 值低于原地貌(表 1),并且随着土层深度的增加而升高。有机质、全氮和速效钾含量均接近或超过原地貌,碱解氮、速效磷含量均远低于原地貌。除速效磷外,其他养分含量均表现为随土层深度的增加而降低。

根据全国土壤养分含量分级标准,安太堡露天煤矿生态复垦区土壤 pH 平均值为 8.26(0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层的平均值,下同),属于碱性土壤;有机质含量中等,三级,平均含量为 20.90 g \cdot kg⁻¹;全

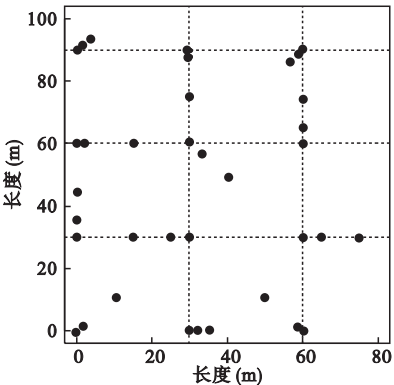


图 1 土壤采样点空间分布示意图
Fig.1 Spatial distribution of the sampling points

表 1 安太堡露天煤矿生态复垦区土壤 pH 和养分含量
Table 1 Distribution characteristics of soil chemical properties of the reclamation area of Antaibao opencast coal mine

土壤深度 (cm)	林型	pH	有机质 (g \cdot kg ⁻¹)	全氮 (g \cdot kg ⁻¹)	碱解氮 (mg \cdot kg ⁻¹)	速效磷 (mg \cdot kg ⁻¹)	速效钾 (mg \cdot kg ⁻¹)
0 ~ 20	刺槐+油松	8.23 \pm 0.02	20.31 \pm 0.74	1.06 \pm 0.07	15.78 \pm 0.33	5.20 \pm 0.05	149.7 \pm 0.6
	原地貌	8.42 \pm 0.02	16.69 \pm 0.39	1.18 \pm 0.03	40.85 \pm 0.47	28.30 \pm 0.12	91.8 \pm 1.3
20 ~ 40	刺槐+油松	8.24 \pm 0.03	20.05 \pm 0.66	1.03 \pm 0.35	7.80 \pm 0.20	9.31 \pm 0.04	136.8 \pm 1.4
	原地貌	8.39 \pm 0.02	9.56 \pm 0.32	0.53 \pm 0.02	12.35 \pm 0.32	17.43 \pm 0.07	44.2 \pm 0.6

氮含量中等,三级,平均含量为 $1.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 碱解氮含量为极缺,六级,平均含量为 $11.70\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 速效磷含量稍缺,四级,平均含量为 $7.27\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 速效钾含量中等,三级,平均含量为 $143.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。总体来看,复垦区土壤养分含量中等偏低。

进一步分析表明,复垦区土壤 pH 和养分含量整体变异系数(CV)不大(表 2),其中碱解氮含量变异系数最大,CV 为 0.22,pH 的变异系数最小,CV 为 0.01。变异系数的大小反映了特性参数的空间变异程度,一般认为,CV>1.0 为强变异性, $0.1\leq\text{CV}<1.0$ 为中等变异,CV<0.1 为弱变异性(常超等,2009)。从表 2 统计结果来看,除碱解氮和速效磷含量为中等变异外,其他养分指标均为弱变异程度,反映了该区土壤养分空间分布不均一的特点。

2.2 土壤因子的相关关系

研究土壤养分之间的相关性,可以了解各养分之间的相互作用和相互影响情况。从表 3 可以看出,在表层土壤中,有机质和全氮、速效钾之间呈极显著正相关关系,速效钾和全氮之间呈极显著正相关关系,碱解氮和 pH 之间呈极显著负相关关系,其他养分指标之间没有相关关系。土壤氮素和有机质之间呈极显著的正相关关系。K 为土壤中易移动的元素,与其他养分的相互作用和影响程度较大。P

表 2 安太堡露天煤矿生态复垦区土壤 pH 和养分含量统计特征

Table 2 Statistical characteristic of soil chemical properties of the reclamation area of Antaibao opencast coal mine

指标	pH	有机质 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解氮 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
最小值	8.21	18.95	0.92	9.96	5.63	136.90
最大值	8.31	22.10	1.16	15.30	8.41	149.70
平均值	8.26	20.90	1.05	11.70	7.27	143.30
标准差	0.05	0.97	0.08	2.57	1.09	5.73
变异系数	0.01	0.05	0.08	0.22	0.15	0.04

表 3 表层土壤各指标之间的相关性分析

Table 3 Correlation analyses for the chemical factors in the surface soil layer

	pH	有机质	全氮	碱解氮	速效磷
有机质	0.025				
全氮	-0.023	0.910**			
碱解氮	-0.574**	0.014	0.185		
速效磷	0.094	-0.069	0.049	-0.063	
速效钾	0.137	0.853**	0.870**	0.116	0.044

* $P<0.05$; ** $P<0.01$ 。

在土壤中相对稳定,为易被土壤固定的元素,在土壤中的迁移能力相对较差,因此与其他养分指标之间的相关性较差。

2.3 各种群基本特征与立木平均密度、土壤 pH 及养分关系

2.3.1 各种群平均密度、平均高度和平均胸径与立木平均密度关系 不同样方各种群基本特征比较见表 4,对立木平均密度进行平方根转换,计算立木平均密度和刺槐平均密度、平均胸径、平均高度的相关系数分别为 $0.688(P=0.001)$ 、 $-0.633(P=0.002)$ 、 $-0.609(P=0.003)$,可见立木平均密度与刺槐平均密度极显著正相关,与刺槐平均胸径和平均高度极显著负相关。拟合二者一元线性回归方程(表 5),从回归模型系数可以看出,方程拟合情况较好,均通过 F 显著性检验。根据回归模型可以用立木平均密度估计刺槐的平均密度、平均胸径和平均高度。

同理,计算立木平均密度和油松平均密度、平均胸径、平均高度的相关系数分别为 $-0.490(P=0.024)$ 、 $-0.472(P=0.031)$ 、 $-0.478(P=0.028)$,说明立木平均密度与油松平均密度、平均胸径、平均高度呈显著负相关,拟合二者一元线性回归方程见表 6。

立木平均密度与榆树平均密度、平均胸径、平均高度的相关系数分别为 $0.110(P=0.634)$ 、 $-0.100(P=0.666)$ 、 $-0.106(P=0.646)$,可见立木平均密度与榆树平均密度、平均胸径和平均高度无相关性。

2.3.2 各种群平均密度、平均高度和平均胸径与土壤因子关系 以各样方表层土壤 pH 值、有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾含量作为自变量,以土壤采样点对应样方中刺槐平均密度、平均胸径和平均高度(表 4)作为因变量进行线性逐步回归(表 7),根据变量参数估计拟合回归方程:

平均高度与土壤因子回归方程:
$$Y_2 = 2.278x_7 - 26.044x_8 + 185.054 \tag{1}$$

平均胸径与土壤因子回归方程:
$$Y_3 = 3.621x_7 - 43.239x_8 + 308.292 \tag{2}$$

平均密度与土壤因子回归方程:
$$Y_4 = 1.383x_9 - 6.856 \tag{3}$$

式中, Y_2 为平均高度, Y_3 为平均胸径, Y_4 为平均密度, x_7 为碱解氮, x_8 为 pH, x_9 为速效磷。碱解氮含量、pH、速效磷含量等变量 t 检验均达到显著性差异($P<0.05$)。

表 4 不同样方各种群平均密度、平均高度、平均胸径及立木平均密度比较
Table 4 Comparison among the mean density, height, and DBH of the populations in different plots

样方号	刺槐			油松			榆树			立木
	平均密度 (株·m ⁻²)	平均胸径 (cm)	平均高度 (m)	平均密度 (株·m ⁻²)	平均胸径 (cm)	平均高度 (m)	平均密度 (株·m ⁻²)	平均胸径 (cm)	平均高度 (m)	平均密度 (株·m ⁻²)
1	0.21	2.19	3.15	—	—	—	0.01	2.10	2.00	0.31
2	0.29	2.26	2.7	—	—	—	0.01	1.84	1.45	1.72
3	0.14	9.39	7.69	0.02	7.70	5.00	—	—	—	0.17
4	0.15	8.58	7.23	0.05	9.79	6.34	0.01	2.90	4.00	0.21
5	0.11	9.87	6.51	0.04	6.70	4.03	0.01	3.68	2.40	0.18
6	0.06	9.38	6.75	—	—	—	—	—	—	0.15
7	0.11	7.14	4.85	—	—	—	—	—	—	0.48
8	0.09	5.25	4.64	—	—	—	0.02	4.55	4.50	0.28
9	0.17	5.68	3.96	—	—	—	0.01	2.20	2.30	0.38
10	0.09	8.69	6.49	0.04	8.93	5.23	—	—	—	0.16
11	0.13	11.12	7.02	0.05	7.64	4.39	—	—	—	0.21
12	0.08	4.19	3.28	—	—	—	0.03	5.28	4.22	0.15
13	0.13	5.24	4.05	—	—	—	0.03	7.79	5.40	0.33
14	0.11	8.77	6.19	0.03	4.65	3.27	—	—	—	0.18
15	0.07	11.57	6.29	0.03	5.78	3.33	0.01	2.10	2.30	0.15
16	0.10	12.08	8.89	0.04	7.56	4.80	0.01	2.56	3.30	0.16
17	0.16	9.98	5.94	0.04	8.99	4.63	0.02	2.88	2.10	0.23
18	0.06	6.92	4.83	—	—	—	0.02	9.95	7.00	0.34
19	0.12	7.12	5.82	0.04	6.88	4.85	0.01	8.15	7.00	0.20
20	0.04	10.35	5.75	0.03	4.72	3.23	0.01	17.15	8.00	0.14
21	0.06	11.02	6.63	0.03	8.92	4.93	0.01	2.34	3.30	0.14

平均密度表示样方内某一物种的个体数与样方面积的比值;立木平均密度表示样方内所有木本植物的个体数与样方面积的比值。

从回归方程(1)、(2)和(3)可以看出,碱解氮、pH 值、速效磷进入方程中,说明这 3 个土壤因子对刺槐种群特征参数影响较大;有机质、全氮和速效钾被剔除,说明它们对刺槐种群特征参数影响较小。由偏回归系数可知,方程(1)和(2)中碱解氮的偏回

归系数比 pH 的偏回归系数大,说明碱解氮对刺槐平均高度和平均胸径的影响比 pH 的影响大。

为说明回归方程中 3 个土壤因子的作用大小,采用 PCA 进行主分量分析,根据第 1 主分量特征值(2.457)大于 1(表 8),所占的比例为 81.9%,累计贡献率达 81.9%,代表了土壤因子的绝大部分信息,因此取第 1 主分量分析。

根据特征向量值和各变量的平均数值得出第 1 主分量的得分公式为:

表 5 刺槐种群基本特征与立木平均密度回归分析
Table 5 Regression analysis of *Robinia pseudoacacia* population fundamental characteristics and standing tree mean density

回归方程	模型 R^2	F 值	P
$Y_1 = 1.747x_1 - 0.075$	0.473	17.061	0.001
$Y_1 = -0.044x_2 + 0.860$	0.401	12.694	0.002
$Y_1 = -0.077x_3 + 0.946$	0.370	11.174	0.003

Y_1 表示立木平均密度; x_1 表示刺槐平均密度; x_2 表示刺槐平均胸径; x_3 表示刺槐平均高度。

表 6 油松种群基本特征与立木平均密度回归分析
Table 6 Regression analysis of *Pinus tabuliformis* population fundamental characteristics and standing tree mean density

回归方程	模型 R^2	F 值	P
$Y_1 = -1.033x_4 + 0.619$	0.240	6.010	0.024
$Y_1 = -0.025x_5 + 0.611$	0.222	5.435	0.031
$Y_1 = -0.041x_6 + 0.614$	0.229	5.634	0.028

Y_1 表示立木平均密度; x_4 表示油松平均密度; x_5 表示油松平均胸径; x_6 表示油松平均高度。

表 7 刺槐种群特征参数与表层土壤因子线性逐步回归分析
Table 7 Characteristic parameters of *Robinia pseudoacacia* and regression analysis of the soil factors in 0–20 cm soil layer

模型	变量	参数估计	偏回归系数	模型 R^2	t 值	P
(1)	截距	185.054			2.609	0.018
	碱解氮	2.278	0.2992	0.6448	4.033	0.001
	pH	-26.044	0.1980	0.5761	-3.278	0.004
(2)	截距	308.292			1.829	0.084
	碱解氮	3.621	0.2294	0.5084	2.697	0.015
	pH	-43.239	0.1656	0.4651	-2.290	0.034
(3)	截距	-6.856			-6.038	0.000
	速效磷	1.383	0.6790	0.6790	6.332	0.000

表 8 土壤因子主成分分析的特征根和贡献率(%)
Table 8 Characteristic roots and contribution rate of principal component analysis

成分	特征根	贡献率	累计贡献率
1	2.457	81.9	81.9
2	0.521	17.4	99.3
3	0.022	0.7	100

$$P_{\text{rinl}}=0.5576\times(\text{pH}-8.27)-0.6340\times(\text{碱解氮}-15.60)+0.5362\times(\text{速效磷}-5.23)$$

由得分公式中各变量的特征向量值可以看出,3个土壤因子对刺槐种群的影响大小顺序为碱解氮>pH>速效磷。

由于油松和榆树种群与所有土壤因子之间没有显著相关性或者回归模型参数估计 *t* 检验不显著,因此未对其进行回归分析。

3 讨 论

3.1 土壤 pH 和养分含量特征

刺槐油松混交林土壤 pH 值低于原地貌,可能是植物种类和密度不同导致凋落物及其本身酸碱度不同,根系分泌物和根系对土壤阴阳离子吸收不平衡造成酸碱差异。有研究表明,针叶树的凋落物中含有大量单宁、树脂和木质素等,这些物质很难分解,分解后又产生酸性物质,导致 pH 值下降(张秉刚和卓慕宁,1985)。刺槐油松混交林土壤 pH 降低可能是以上原因所致。

土壤有机质含量表现为刺槐油松混交林>原地貌,主要原因是样地内刺槐油松混交林郁闭度达 75%,有利于有机质的积累。林下广泛分布有阔叶树种榆树,大量的枯枝落叶进入土壤,加之地被草本植物,其枯死体几乎当年归还土壤,随着根系分泌物和土壤微生物的分解作用,大量养分释放归还土壤,加之刺槐的根部具有固氮根瘤,有利于提高土壤的氮素和增加有机质。表层土壤全氮和有机质的变化趋势一致,这主要是由于全氮和有机质呈显著的正相关关系,这与许多研究结果相似(夏汉平等,1997;常超等,2009)。有机态氮是土壤氮素的主要存在形式,有机质含量越高,全氮含量也越高(杨承栋和张万儒,1986)。总体来看,土壤有机质和全氮含量均接近或者超过原地貌水平,可见随着植被恢复的不断进行,大量的植被枯落物分解和植物根系等作用不断补充土壤养分,植被恢复对土壤起到了培肥作用。

从土壤速效养分来看,碱解氮含量远低于原地貌。土壤中全氮含量的 95% 以上为有机氮,必须经过矿化才能转化为无机氮为植物所吸收。土壤 pH 值决定和影响土壤元素和养分的存在状态、转化和有效性。碱解氮含量与土壤 pH 极显著负相关,刺槐油松混交林中土壤氮素虽然较高,但高的 pH 值不利于有效氮的转化。黄土高原土壤本身缺乏磷,加之磷的有效性较差,易被土壤和微生物固定(夏汉平等,1997),所以含量很低。总体来看,复垦区土壤速效磷含量稍缺,需适度补充磷肥提高土壤肥力。植被在恢复的过程中,通过庞大的根系以及大量的微生物体不断地向植物根系分泌有机酸酚类物质,同时释放出大量的 CO₂ 形成碳酸。微生物在分解枯落物时,形成一系列的酸酚类络合物和螯合物。这些有机酸、酚和无机碳酸促进了土壤母质中含钾矿物的分解风化,从而提高了土壤中速效钾的含量。从土壤钾含量来看,复垦区属钾丰富土壤,植被的生长和发育不会受到土壤钾含量的影响。

3.2 各种群基本特征与立木平均密度、土壤 pH 及养分关系

植物群落中不同种群之间往往为争夺光资源而竞争,某些种群密度的增加可能引起另一种群个体死亡,如上层乔灌木郁闭度过大造成太白红杉不能形成幼苗,最终导致种群衰退(张文辉等,2004)。刺槐是阳性树种,其生长需要适宜的光照和水分。一方面,群落中立木平均密度相对较小(0.2986 ind·m⁻²),郁闭度不高,群落的光照和湿度适合刺槐的生长,立木平均密度与刺槐的平均密度呈极显著正相关。但另一方面,立木与刺槐竞争阳光、水分和养分等资源,且样方间立木平均密度的变异较大(0.3386 ind·m⁻²),一些立木往往因密度过大而自然稀疏死亡出现林窗,刺槐更新个体往往分布在林窗内或林窗边缘,因此立木平均密度与刺槐平均胸径和平均高度呈极显著负相关。立木平均密度越高,导致油松种群种内和种间竞争越激烈,严重抑制了胸径和高度的生长。油松为阳性树种,立木密度过大增大了林内郁闭度,荫蔽的环境不适于油松生长。因此,油松种群平均密度、平均胸径、平均高度与立木平均密度显著负相关。

在植被恢复过程中,土壤养分含量和养分变化对植被的生长、发育以及群落的发生、发育和演替速度具有一定影响。通过对各种群特征参数与土壤因子逐步线性回归分析表明,刺槐种群与土壤 pH、碱

解氮和速效磷含量关系密切,而与有机质、全氮、速效钾含量关系较疏,而土壤 pH、碱解氮和速效磷含量正是复垦地相对缺乏的土壤因子,影响到植物的正常生长。主成分分析结果显示,3 个土壤因子对刺槐种群的影响大小顺序为碱解氮>pH>速效磷。复垦地土壤高的 pH 能引起许多微量元素和养分特别是磷供应的有效性降低(李晋川和白中科,2000)。研究表明,刺槐从土壤中吸收养分以 Ca 最多,N 次之,P、S 最少,土壤养分年吸收系数以 N 最高,K 最低,且随着树龄的增高而增大(刘增文和李雅素,2003),这可能是导致刺槐种群与上述土壤因子密切相关的一个重要原因。刺槐平均高度、平均密度以及平均胸径可用土壤养分因子线性表示,回归模型对于刺槐栽培具有指导意义。由于油松和榆树种群与所有土壤因子之间没有显著相关性或者回归模型参数估计 t 检验不显著,可见,与刺槐种群相比,油松和榆树种群受土壤因子影响较小。除本研究中分析的立木密度和土壤因子外,对土壤通气性、微生物等其他因子进一步研究,可以全面反映环境因子对种群生长的影响。

参考文献

- 白中科. 2001. 工矿区土地复垦与生态重建. 北京: 中国农业科技出版社.
- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社.
- 常超, 谢宗强, 熊高明, 等. 2009. 三峡库区不同植被类型土壤养分特征. 生态学报, **29**(11): 5978–5985.
- 郭道宇, 张金屯, 官辉力, 等. 2007. 安太堡矿区复垦地植被种间关系及土壤因子分析. 生物多样性, **15**(1): 46–52.
- 郭道宇, 张金屯, 官辉力, 等. 2005. 安太堡矿区植被恢复过程主要种生态位梯度变化研究. 西北植物学报, **24**(13): 2329–2334.
- 黄昌勇. 2000. 土壤学. 北京: 中国农业出版社.
- 李晋川, 白中科. 2000. 露天煤矿土地复垦与生态重建: 平朔露天矿的研究与实践. 北京: 科学出版社.
- 刘飞, 陆林. 2009. 采煤塌陷区的生态恢复研究进展. 自然资源学报, **24**(4): 612–620.
- 刘增文, 李雅素. 2003. 刺槐人工林养分利用效率. 生态学报, **23**(3): 444–449.
- 龙文兴, 欧芷阳, 杨小波, 等. 2008. 五指山黑桫欏 (*Alsophila podophylla*) 种群特征与森林立木密度和土壤的关系. 生态学报, **28**(4): 1390–1398.
- 鲁如坤. 1999. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科

技出版社.

- 王改玲, 白中科. 2002. 安太堡露天煤矿排土场植被恢复的主要限制因子及对策. 水土保持研究, **9**(1): 38–40.
- 王金满, 郭凌俐, 白中科, 等. 2013. 黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律. 农业工程学报, **29**(21): 223–232.
- 夏汉平, 余清发, 张德强. 1997. 鼎湖山 3 种不同林型下的土壤酸度和养分含量差异及其季节动态变化特性. 生态学报, **17**(6): 645–653.
- 杨承栋, 张万儒. 1986. 卧龙自然保护区森林土壤有机质的研究. 土壤学报, **23**(1): 30–38.
- 张秉刚, 卓慕宁. 1985. 鼎湖山自然保护区不同林型下土壤的物理性质. 热带亚热带森林生态系统研究, (3): 1–10.
- 张桂莲, 张金屯, 郭道宇. 2005. 安太堡矿区人工植被在恢复过程中的生态关系. 应用生态学报, **16**(1): 151–155.
- 张文辉, 王延平, 康永祥, 等. 2004. 濒危植物太白红杉种群年龄结构及其时间序列预测分析. 生物多样性, **12**(3): 361–369.
- Alday JG, Marrs RH, Martínez Ruiz C. 2011. Vegetation succession on reclaimed coal wastes in Spain: The influence of soil and environmental factors. *Applied Vegetation Science*, **14**: 84–94.
- Binkley DAN, Giardina C. 1998. Why do tree species affect soils? The warp and woof of tree-soil interactions. *Biogeochemistry*, **42**: 89–106.
- Costigan PA, Bradshaw AD, Gemmell R. 1981. The reclamation of acidic colliery spoil waste. I. Acid production potential. *Journal of Applied Ecology*, **18**: 865–878.
- Dancer WS, Handley JF, Bradshaw AD. 1977. Nitrogen accumulation in kaolin mining wastes in Cornwall. I. Natural communities. *Plant and Soil*, **48**: 153–167.
- Hall JS, McKenna JJ, Ashton PMS, et al. 2004. Habitat characterizations underestimate the role of edaphic factors controlling the distribution of *Entandrophragma*. *Ecology*, **85**: 2171–2183.
- Jiang GM, Putwain PD, Bradshaw AD. 1993. An experimental study on the revegetation of colliery spoils of Bold Moss Tip, St. Helens, England. *Acta Botanica Sinica*, **35**: 951–951.
- John R, Dalling JW, Harms KE, et al. 2007. Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **104**: 864–869.

作者简介 刘卫华,男,1979 年生,硕士,主要从事植物生态学研究。E-mail: whliu_mz@126.com
责任编辑 魏中青