

DOI: 10.5846/stxb201501230187

王洪丹,王金满,曹银贵,卢元清,秦倩,王宇.黄土区露天煤矿排土场土壤与地形因子对植被恢复的影响研究.生态学报,2016,36(16): - .
Wang H D, Wang J M, Cao Y G, Lu Y Q, Qin Q, Wang Y. Effect of soil and topography on vegetation restoration in an opencast coal mine dump in a loess area. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): - .

黄土区露天煤矿排土场土壤与地形因子对植被恢复的影响研究

王洪丹¹,王金满^{1,2,*},曹银贵¹,卢元清¹,秦倩¹,王宇¹

1 中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京 100083

2 国土资源部土地整治重点实验室,北京 100035

摘要:在脆弱的生态环境改善和恢复过程中,植被恢复与重建扮演着重要的角色。黄土露天煤矿区生态环境极其脆弱,认识矿区损毁土地植被恢复与地形、土壤因子之间的作用规律对矿区土地复垦与生态恢复改善至关重要。为此,本文选择山西平朔安太堡露天煤矿南排土场对 2 条样带 27 个复垦样地的土壤、地形、植被参数进行了采集与测定,并应用单因素方差分析与 CANOCO 4.5 软件的降趋势对应分析和冗余分析研究了地形与土壤因子对植被恢复的影响。结果表明植被与土壤变量之间呈显著相关,与地形变量之间相关性不明显;坡度主要影响草本覆盖度,坡向与有机质和速效磷之间具有线性相关性;速效钾对植被的变化起着重要的作用;土壤容重与砾石含量对土壤养分含量具有明显的指示作用;有机质与全氮呈显著正相关,各土壤养分指标之间存在明显的相关关系。为了改善和恢复黄土区露天煤矿排土场脆弱的生态系统,应该考虑植被和土壤的联合演替。在当地的生态环境状况下土地复垦与生态恢复的关键是改善土壤状况和增加人工植被,同时加强对排土场人工和自然植被的保护。

关键词:土地复垦;植被恢复;降趋势对应分析;冗余分析;黄土区

Effect of soil and topography on vegetation restoration in an opencast coal mine dump in a loess area

WANG Hongdan¹, WANG Jinman^{1,2,*}, CAO Yingui¹, LU Yuanqing¹, QIN Qian¹, WANG Yu¹

1 College of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2 Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Land Resources, Beijing 100035, China

Abstract: Restoration and reconstruction of vegetation play an important role in improving and restoring the fragile ecological environment in disturbed areas. In opencast coal mine dumps in loess areas, the ecological environment is extremely fragile. Therefore, it is crucial to understand the effects of topography and soil factors on the response of vegetation restoration in order to improve the damaged ecosystems in mining areas. Here, we determined the effects of soil and topography on the response of vegetation to restoration activities at 27 reclamation sample plots (each with two transects) with different site conditions in the Shanxi Pingshuo Antaibao Opencast Coal Mine in a loess area. We conducted one-way analysis of variance (ANOVA) tests and pairwise tests of significance with SPSS 20.0. We performed multivariate techniques, including detrended correspondence analysis (DCA) and redundancy analysis (RDA) using the program CANOCO 4.5.

The ANOVA and pairwise tests indicated that environmental factors significantly effected changes in vegetation.

基金项目:国家自然科学基金(41271528)

收稿日期:2015-01-23; 网络出版日期:2015-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangjinman2002@163.com

Available K (AK) had the most significant impact on vegetation restoration ($P < 0.01$), followed by total N (TN) and bulk density (BD) ($P < 0.05$). However, topography variables did not significantly effect changes in vegetation ($P > 0.05$). Soil nutrients were the main factors affecting the distribution and growth of vegetation during the process of restoration in this opencast coal mine dump in a loess area.

The RDA results indicated that vegetation and soil variables were significantly correlated, whereas the correlation between vegetation and topography variables was not significant. There was a strong correlation between vegetation and environmental factors with species-environment correlations of 0.811 on the first axis and 0.702 on the second axis. The cumulative percentage of variance in the species occurrence data on the first four axes of the RDA was 59.9%. The cumulative percentage of variance for the species-environment relationship on the first axis was 75.3% and on the second axis was 20.1%. Thus, the first axis and second axis explained 95.4% of the variation in the relationship between species and the environment. This indicated that the species and the environment axes were highly correlated with the set of variables. The Monte Carlo permutation test indicated that vegetation restoration was not associated with all the environmental factors ($P > 0.05$). AK played an important role in vegetation change. The soil nutrient content correlated with soil bulk density and rock content. Soil organic matter and total nitrogen showed significantly positive correlation. The slope determined the herbage coverage. There was also a linear relationship between slope direction and soil organic matter; a similar relationship was noted between slope direction and rapidly available phosphorus.

In order to improve and restore the degraded ecosystems in opencast coal mine dumps in loess areas, the co-evolution of vegetation and soil should be understood and natural succession should be considered. Vegetation restoration is not only an ecological, but also an economic and social problem, and some relevant conservation policies, such as the prohibition of grazing and logging, and conservation of natural vegetation are needed to reduce the human disturbance on these lands. A key strategy for ecological restoration in opencast coal mine dumps in loess areas is to improve soil conditions and increase the area of propagated vegetation; protection of propagated and natural vegetation under local environmental conditions should also be strengthened.

Key Words: land reclamation; vegetation restoration; detrended correspondence analysis (DCA); redundancy analysis (RDA); loess area

植被重建是矿区土地复垦与生态恢复的重要工作之一,且植被恢复与土壤、地形等环境因子关系密切^[1]。因此,有越来越多的学者开始关注植被变化与环境因子之间的相互关系,以为矿区的植被恢复以及生态重建提供重要的理论和实践价值。较多学者^[2-9]的研究集中于土壤理化性质对植被变化影响方面,并分别采用主成分分析、单因素方差分析、相关性分析等方法研究了植被恢复与土壤特性之间的关系,发现植被恢复与土壤理化性质之间有较好的交互影响作用;植被恢复与地形因子相互影响关系方面也有研究^[11-12],发现海拔、坡位、坡向、坡度等微地形条件对群落结构及物种分布影响显著;另外部分学者采用不同的多变量分析方法研究了植被与土壤、地形之间的影响规律^[12-15]。已有植被恢复与土壤、地形之间相互影响规律的研究多采用 SPSS 软件进行传统的多变量分析,但当环境变量数目较多并且地形起伏较大时,其分析结果往往带有主观性^[15-18],而 CANOCO 4.5 软件进行数据转换和多变量分析时则可以减少主观性^[19-20]。CANOCO 4.5 软件是一种生态应用软件,能够洞察生物群落结构、植物、动物与它们的环境之间的关系,是目前用于约束与非约束排序的较为流行的工具。它将排序、回归和排列方法学进行了整合,能够得到健全的生态数据统计模型可有效解决生态应用研究方面的问题。

为此,本研究以复垦年限为 23 年的山西省平朔安太堡露天煤矿南排土场为研究对象,基于 CANOCO 4.5 软件采用降趋势对应分析和冗余分析研究土壤与地形因子对植被恢复的影响,以期黄土区植被恢复与重建及生态环境系统恢复提供科学的参考价值。

1 研究区概况

安太堡露天煤矿隶属于山西省朔州市,地跨朔城区与平鲁区,是我国最大的露天煤矿。其地理坐标为:东经 $112^{\circ}11'$ — $113^{\circ}30'$,北纬 $39^{\circ}23'$ — $30^{\circ}27'$,总面积 375.12 km^2 。该区属典型的温带半干旱大陆性季风气候,降雨量在时间上分布极不均匀,平均降雨量为 428.2 — 449 mm ,平均气温 4.8 — $7.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。土壤主要为栗钙土与栗褐土的过渡带,其主要地带性土壤为栗钙土。矿区地带性植被类型属于草原,原地貌植被覆盖率低,属强烈侵蚀的生态脆弱区,对环境改变敏感。随着煤炭的大量开采,植被遭到严重的破坏,生态系统不断退化。作为本文研究区的安太堡露天煤矿南排土场在 1991 年进行了有效的土地复垦与植被重建,其天然灌木林以耐旱性较好的沙棘为主,而人工林主要植被为刺槐、榆树、油松、臭椿等。

2 材料与方法

2.1 样地调查与采样

2014 年 7 月上旬对复垦年限为 23 年的山西省平朔安太堡露天煤矿南排土场复垦区进行了样地调查。选取南排土场 2 条样带 27 个样地进行取样,研究区样带与样地布置如图 1,样带 1 包含 1—16 号样地,样带 2 包含 17—27 号样地。为了使各样地包含不同的地形因子,两条样带分别按西北-东南和东北-西南方向布置。由于地形条件的限制,同时考虑到所选样地应具有相同和相似植被类型,实际采样时部分样地稍微偏离。本样地布置方案能够全方位地分析南排土场植被与土壤、地形因子之间的关系。在每个样地内采用样线法于代表性地段内分别设置一个乔木样方、三个草本样方,乔木样方 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$,草本样方 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 。在乔木样方内,测定乔木种类、株数、郁闭度、草本盖度,并选取 10 株乔木进行检尺,记录树高和胸径;在草本样方内,剪取所有草本根部以上部分,去掉枯枝残叶,装入保鲜袋内带回实验室烘干称重。同时用 GPS 测定样地经纬度和海拔,用罗盘测定坡度、坡位和坡向。样地调查植被情况如表 1。

每个乔木样方中用环刀法随机取表层土(0 — 25 cm)测定土壤含水量、容重和孔隙度等指标,设置 3 次重复;并在每个样方内取表层(0 — 25 cm)混合土样,土样混合均匀并去除植物根系和石块后放入土袋带回实验室供测试使用。

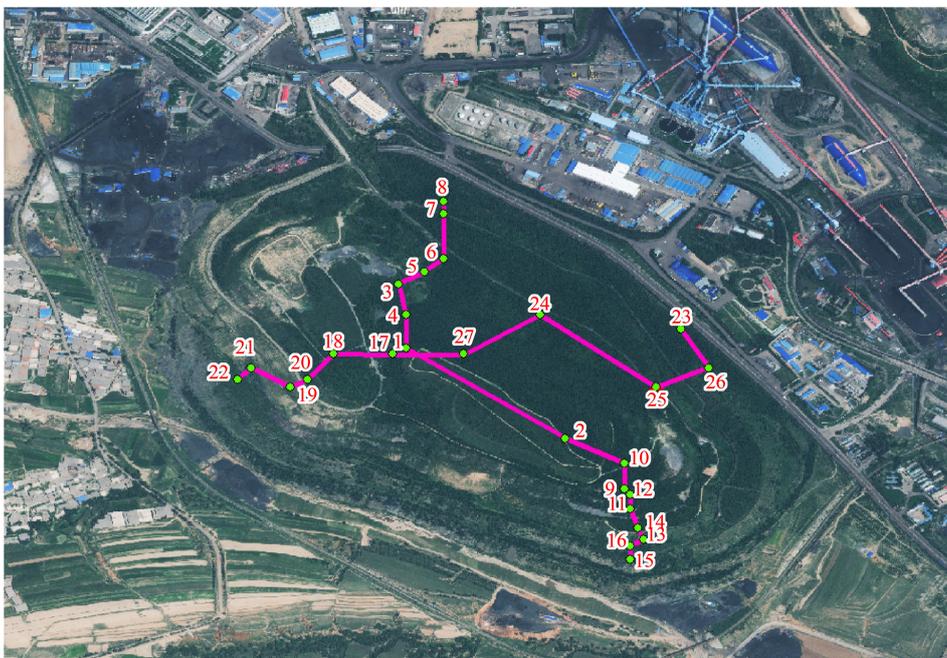


图 1 研究区位置及样点布置图

Fig.1 Location of study area and scheme of sample point setting

表 1 样地调查的基本情况表

Table 1 The basic information of sample-plot survey

样地 Sample plot	物种 Species	海拔/m Altitude	乔木数量/株 Arbor quantity	平均胸径/cm Average DBH	平均树高/m Average height	郁闭度 Canopy density	草本覆 盖度/% Herbage coverage
1	刺槐/榆树	1441.66	15	27	4.42	0.4	25
2	刺槐/榆树	1450.26	30	28.1	5.83	0.55	8
3	刺槐/榆树	1430.54	56	21.7	3.95	0.3	35
4	刺槐	1444.1	27	36.2	8.17	0.6	5
5	刺槐	1402.74	11	26.8	4.6	0.2	25
6	刺槐/榆树	1386.74	19	28.8	5.99	0.55	15
7	刺槐/榆树	1349.45	20	21.6	5.3	0.25	20
8	刺槐/榆树	1329.16	32	25	4.82	0.52	35
9	刺槐	1431.64	75	17.1	6.88	0.4	10
10	刺槐	1438.52	64	23.5	5.5	0.5	30
11	刺槐	1423.4	61	22	4.34	0.4	2
12	刺槐/榆树	1428.8	51	20.8	5	0.78	9
13	刺槐/榆树	1372.61	90	21.8	6.42	0.3	2
14	杏树/油松	1391.25	160	16.9	3.82	0.85	5
15	刺槐/榆树	1343.21	19	25.9	4.06	0.5	9
16	刺槐	1362.8	13	39.9	7.67	0.25	70
17	刺槐/榆树	1450.05	35	35.3	6.01	0.18	10
18	刺槐/榆树	1426.78	35	29.4	6.13	0.45	30
19	刺槐	1434.74	8	19.5	2.53	0.4	35
20	榆树/油松/杨树	1408.68	32	7.8	1.82	0.05	60
21	刺槐/榆树	1391.72	28	13.7	3.4	0.2	15
22	刺槐/榆树	1375.01	19	17.9	3.9	0.15	35
23	刺槐/油松/榆树	1351.54	28	37.6	7.53	0.65	20
24	刺槐/榆树/臭椿	1375.55	28	27.1	7	0.6	20
25	刺槐/榆树/杨树	1359.03	11	19	3.67	0.1	40
26	刺槐/榆树	1344.35	9	24.89	8.49	0.2	40
27	刺槐/榆树/油松	1454.21	35	27.5	5.1	0.6	5

2.2 参数测定

土壤因子的测定指标包括:土壤容重(BD)、土壤含水量(SWC)、土壤总孔隙度(BP)、砾石含量(RC)、全氮(TN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)、土壤有机质(OM)8个指标。土壤含水量测定采用烘干法,土壤容重和土壤总孔隙度采用环刀法测定,土壤砾石含量采用称重法测定。土壤有机质的测定采用高锰酸钾氧化法,土壤全氮采用半微量开氏法测定,土壤速效磷用0.5 mol/L 碳酸氰钠浸提-钼锑抗比色法测定,土壤速效钾采用醋酸铵浸提-原子吸收光谱法测定^[14,21]。

地形数据中的坡向、坡位指标按经验公式建立隶属函数换算成编码^[13,22],坡向中平台0,阳坡0.3、半阳坡0.5、半阴坡0.8,阴坡1。坡位中平台为0,中坡为1。研究区各样地地形数据见表2。

对采集的草本样品放入烘箱于80℃烘干至恒重,重复4次,计算地上生物量。

2.3 统计分析方法

采用SPSS 20.0对土壤数据进行描述性统计分析,并对土壤和地形因子对植被变化的影响进行单因素方差分析及显著性检验,其显著水平设定为 $\alpha=0.05$ 。其次基于CANOCO 4.5软件进行降趋势对应分析(DCA)。DCA是将物种数据进行分析,观察物种数据的整体情况,根据DCA排序结果中第一排序轴的长度来选择合

适的排序分析方法。同时,采用 CANOCO 软件选用的多变量分析方法进行排序和蒙特卡洛检验 (Monte Carlo),通过得到的排序图,分析植被数据与土壤、地形数据之间的相关性。将降趋势对应分析与冗余分析相结合可以保证既不会丢失植被组成变化量的大部分信息,又不会丢掉与所测土壤、地形因子相关的大部分变量信息。

表 2 研究区各样地地形数据

Table 2 Topography data of each sampling point in the study area

海拔 Altitude	坡度 Slope	坡向 Slope aspect	坡位 Slope position	样地 Sample	海拔 Altitude	坡度 Slope	坡向 Slope aspect	坡位 Slope position
1441.66	0	0	0	15	1343.21	45	0.3	1
1450.26	0	0	0	16	1362.8	0	0.3	0
1430.54	0	0.5	0	17	1450.05	40	0.5	1
1444.1	41	0.5	1	18	1426.78	0	0.5	0
1402.74	36	0.5	1	19	1434.74	34	0.5	1
1386.74	0	0.5	0	20	1408.68	0	0.5	0
1349.45	33	0.3	1	21	1391.72	41	0.5	1
1329.16	0	0.3	0	22	1375.01	0	0.5	0
1431.64	31	0.3	1	23	1351.54	12	0.8	1
1438.52	0	0.3	0	24	1375.55	0	1	0
1423.4	33	0.5	1	25	1359.03	42	0.5	1
1428.8	0	0.3	0	26	1344.35	5	1	0
1372.61	23	0.3	1	27	1454.21	19	1	1
1391.25	0	0.3	0					

3 结果与分析

3.1 土壤数据的描述性统计分析

对土壤数据进行描述性统计分析,见表 3。极大值、极小值可以作为土壤特性的变异性的估计值,结果显示除土壤有机质含量的极大值、极小值相差很大外,其他各土壤因子的极大值与极小值相差不大,较符合正态分布。均值和中值是集中趋势的主要估计值,表 3 显示均值和中值大多是相似的,大多数土壤特性的中值小于其均值,表明土壤特性中的异常值对集中趋势的发展没有影响。变异系数也是土壤特性变异性的一个估计值,土壤容重和土壤总空隙度的变异系数较低 (<15%),土壤含水量、速效磷和速效钾的变异系数适中 (15%—35%),有机质、全氮和砾石含量具有较高的变异系数 (>35%)。总的来说,描述性统计显示研究区土壤特性的变化较大。

表 3 土壤数据的描述性统计分析

Table 3 The descriptive statistical analysis of soil data

土壤因子 Soil factors	N	极小值 Minimum	极大值 Maximum	均值 Mean value	中值 Median values	变异系数 CV
土壤容重 Soil bulk density/(g/cm ³)	27	1.01	1.72	1.38	1.37	0.12
土壤总孔隙度 Soil total porosity/%	27	34.42	61.76	47.37	47.38	0.14
土壤含水量 Soil water content/(g/g)	27	3.44	8.33	6.37	6.57	0.22
砾石含量 Rock content/%	27	0	0.75	0.31	0.32	0.78
全氮 TN/%	27	0.03	0.3	0.12	0.10	0.57
有机质 Soil organic matter/%	27	0.46	18.4	4.56	3.35	0.85
速效磷 AP/(mg/kg)	27	2	7	4.13	3.87	0.33
速效钾 AK/(mg/kg)	27	56	274	159.7	152	0.35

3.2 土壤与地形因子对植被变化影响的单因素方差分析

采用 SPSS 20.0 进行单因素方差分析及显著性检验,分析土壤与地形因子对植被变化的影响程度。不同的土壤、地形因子对植被变化的影响具有较大的差异(表 4),土壤因子中的速效钾对植被变化影响最为显著($P=0.01<0.05$),其次是全氮和土壤容重($P<0.05$),而地形因子对植被变化的贡献率并不显著。说明在黄土区露天煤矿排土场植被恢复过程中,土壤养分是影响植被恢复与重建的主要因子。

表 4 土壤与地形因子对植被影响的单因素方差分析与显著性检验表

Table 4 One-Way ANOVA and significance test of effect of soil and topography factors on vegetation

影响因子 Influence factors	单变量 Single variable	F	P
地形因子 Topography factors	海拔 Altitude	0.913	0.474
	坡度 Slope	0.854	0.506
	坡向 Slope aspect	1.301	0.300
	V 坡位 Slope position	1.185	0.345
土壤因子 Soil factors	土壤容重 Soil bulk density	2.743	0.049 *
	土壤总孔隙度 Soil total porosity	1.3	0.301
	土壤含水量 Soil water content	0.287	0.883
	砾石含量 Rock content	1.457	0.249
	全氮 TN	3.501	0.023 *
	有机质 Soil organic matter	2.108	0.114
	速效磷 AP	1.366	0.278
	速效钾 AK	4.288	0.010 **

* 表示显著相关 $P<0.05$, ** 表示极显著相关 $P<0.01$

3.3 DCA 与 RDA 排序分析

DCA 排序分析得出排序轴长度从第一轴到第四轴分别是:0.490、0.440、0.251、0.323。如果第一排序轴的值小于 3.0,则冗余分析(RDA)的分析结果较好;若第一排序轴的值介于 3.0 与 4.0 之间,则 RDA 与典范对应分析(CCA)都可以选用;若第一排序轴的值大于 4.0,则 CCA 的分析效果好于 RDA^[23]。本研究 DCA 分析第一排序轴值小于 3.0,说明该区选择线性模型 RDA 进行分析效果较好。

RDA 能够独立保持各个土壤与地形变量对植被变化的贡献率,并从统计学的角度评价一个变量与多变量数据之间的相关关系,通过探寻新的变量作为最好的预测器来预测植被变量的分布。图 2 为土壤与地形因子影响植被变量的 RDA 排序图。图中土壤因子用带有红色箭头线段表示,地形因子用带绿色箭头的线段表示,而带蓝色箭头的线段表示植被变量。土壤、地形变量与植被变量之间的余弦值代表了它们之间的相关性,余弦值为正,表示呈正相关,相反则呈负相关;土壤、地形变量箭头的方向表示了该环境因子的变化趋势,箭头的长短代表该因子对植被数据的解释量的大小。由图 2 可以得出,在植被恢复过程中,对植被变化的影响土壤因子大于地形因子。地形因子中坡向表现了对植被变化的较高的解释量,土壤因子中速效钾得分最高成为最好的解释变量,而砾石含量、土壤容重和全氮扮演着次要角色,其余因子的解释量相对较小。

RDA 分析结果显示植被数据变化的累积比例的前四轴的值为 59.9%,植被与环境相关关系第一轴和第二轴的累计比例分别为 75.3%和 20.1%,即第一轴和第二轴共解释了 95.4%的植被与土壤及地形之间的关系(表 5)。植被与土壤及地形因子相关系数第一轴和第二轴的值分别是 0.811 和 0.702。由此综合可知,植被与土壤、地形之间具有高度的相关性。蒙特卡罗显著性检验(Monte Carlo)表明,植被恢复并不与所有的土壤、地形因子具有相关性($P=0.086>0.05$)。

3.4 解释变量之间的相关性分析

RDA 排序图显示了植被与土壤、地形因子的概率关系,排序图的第一排序轴代表了地形因子对植被的影响。由图 2 可知,海拔和坡度分别与乔木数量和草本覆盖度呈正相关,坡向与乔木数量呈负相关;地形因子中坡向线段长度最长,所以坡向表现了对植被数据较高的解释量。海拔和坡向与乔木数量之间相关性较大。第

二排序轴则代表土壤因子对植被数据的影响,在所有土壤因子中,速效钾的线段长度最长,所以速效钾对植被数据的解释量最高,对植被变化的影响最为显著。速效钾、全氮与乔木平均高度、乔木平均胸径呈正相关,且相关性较大。土壤容重和砾石含量与乔木数量呈正相关;速效磷与乔木平均胸径和平均高度呈负相关,与地上生物量呈正相关。说明地形因子对黄土区露天煤矿排土场的植被恢复影响不显著,而土壤因子与植被数据之间关系明显。

表 5 黄土区露天煤矿排土场 RDA 排序结果表
Table 5 The ranking result of RDA in opencast coal_mine dump of loess area

RDA 排序轴 RDA Axes	1	2	3	4	总方差 Total variance
特征值 Eigenvalues	0.455	0.122	0.014	0.008	1.000
物种-环境相关系数 Species-environment correlations	0.811	0.702	0.700	0.730	
物种数据变化累积比例% Cumulative percentage variance of species data	45.5	57.6	59.1	59.9	
物种-环境关系变化累积比例/% Cumulative percentage variance of species-environment relation	75.3	95.4	97.7	99.1	
特征值总和 Sum of all eigenvalues					1.000
典范特征值总和 Sum of all canonical eigenvalues					0.604
	Trace	F-ratio	P-value		
显著性检验的标准轴 Test of significance of first canonical axis	0.604	1.782	0.086		

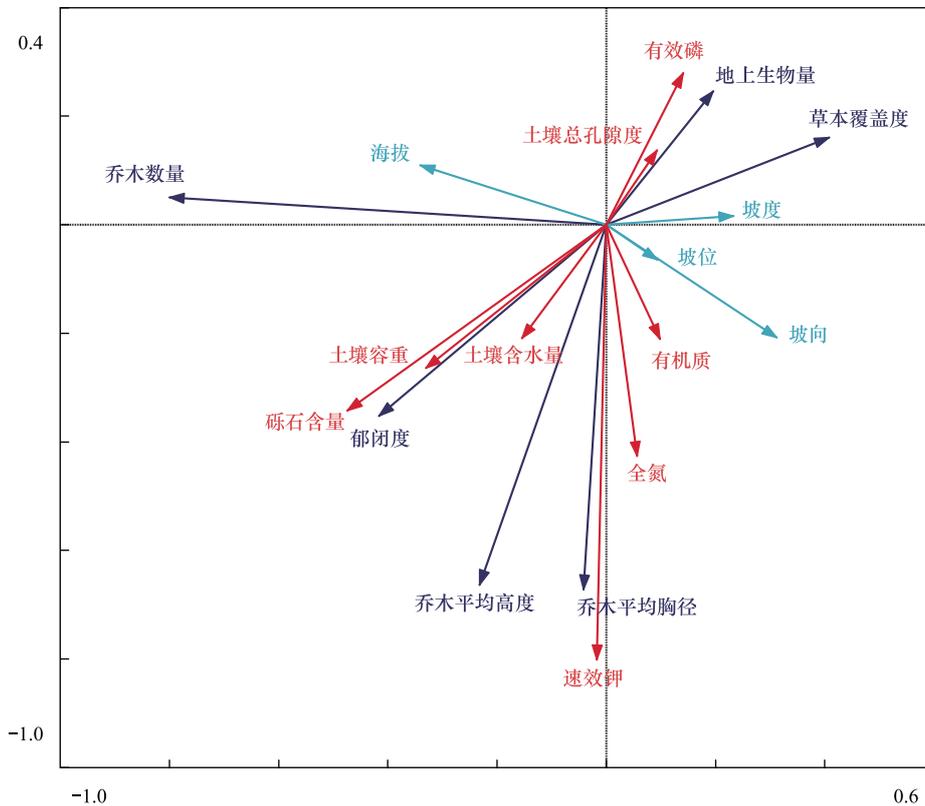


图 2 黄土区露天煤矿排土场植被与土壤、地形变量 RDA 排序图

Fig.2 Ordination diagram of RDA analysis of vegetation and soil, topography variables in opencast coal_mine dump of loess area

表 6 是 RDA 分析得到的土壤因子与地形因子的相关关系结果。地形因子与土壤因子之间速效磷与海拔 (-0.309) 呈负相关,与坡向(0.347)呈正相关;全氮与坡位(0.379)、坡向(0.349)、坡度(0.339)呈正相关;土壤

表 6 黄土高原露天煤矿排土场环境因子相关分析
Table 6 Correlation analysis of influence factors in opencast coal_mine dump of loess area

影响因子 Influence factors	海拔 Altitude	坡度 Slope	坡向 Slope aspect	坡位 Slope position	土壤容重 Soil bulk density	土壤含水量 Soil water content	土壤总 孔隙度 Soil total porosity	砾石含量 Rock content	全氮 TN	有机质 Soil organic matter	速效磷 AP	速效钾 AK
海拔 Altitude	1											
坡度 Slope	0.007	1										
坡向 Slope aspect	-0.169	0.202	1									
坡位 Slope position	0.018	0.927**	0.254	1								
土壤容重 Soil bulk density	0.023	-0.154	-0.342	-0.097	1							
土壤含水量 Soil water content	0.199	-0.227	0.350	-0.169	-0.036	1						
土壤总孔隙度 Soil total porosity	-0.114	0.047	0.302	-0.01	-0.871**	0.195	1					
砾石含量 Rock content	0.041	0.234	-0.167	0.249	0.451*	-0.201	-0.319	1				
全氮 TN	-0.185	0.339	0.349	0.379	-0.215	-0.034	0.296	0.537**	1			
有机质 Soil organic matter	-0.002	0.281	0.045	0.272	-0.306	-0.007	0.367	0.423*	0.860**	1		
速效磷 AP	-0.309	0.170	0.347	0.202	0.022	0.131	0.043	0.073	0.208	0.026	1	
速效钾 AK	-0.169	-0.307	0.097	-0.162	0.281	0.214	-0.147	0.303	0.318	0.128	0.087	1

** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著, * 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著

含水量、土壤总孔隙度与坡向呈正相关,土壤容重与坡向呈负相关,其他因子之间相关性不明显。说明地形因子对土壤因子有一定的影响。

土壤变量之间的相关分析显示:土壤容重与土壤总孔隙度(-0.871)呈显著负相关,这符合以往的研究结果;土壤容重与砾石含量(0.451)呈正相关;砾石含量与全氮(0.537)呈显著正相关,与有机质(0.432)、速效磷(0.303)呈正相关;有机质与全氮(0.860)呈显著正相关;速效磷与全氮、有机质呈正相关。说明在植被恢复过程中,土壤物理性质中的土壤容重与砾石含量对土壤养分含量具有明显的指示作用,各土壤养分指标之间存在明显的相关关系。

4 讨论

植被恢复的模式不同对土壤因子的改善状况是有差别的,植被恢复对土壤养分含量具有指示作用^[1,24],速效磷、全氮等土壤变量又对植被的生长和发展有着显著的影响^[3,7,14,25-26]。本研究表明土壤养分中速效钾是影响物种数据的最好的解释变量,其次是全氮、速效磷。研究区主要植被类型是刺槐和榆树,每年补给土壤较多的枯枝落叶,另外,本研究区最主要的物种刺槐具有较强的固氮作用^[27],所以使得土壤中速效钾和全氮的含量增加。许多研究表明土壤有机质具有明显的表聚作用^[4,12,28],对植被的生长与植被发展有着重大的影响^[15,29],同时齐雁冰^[30]的研究表明不同植被恢复模式也可使土壤有机质有不同程度的增加,这是因为植被恢复后每年都有大量枯枝落叶进入土壤,经微生物腐解后形成较多腐殖质,使土壤有机质增加。而本研究显示土壤有机质对植被发展的影响并不明显,有机质含量的极大值、极小值相差很大,可能的原因是该研究区除了植被影响土壤有机质含量,在植被重构过程中煤矸石的含量在不同样地含量也不相同,煤矸石中本身含有有机质,随着煤矸石的风化,使得土壤中有机质含量增加^[5,31]。

马旭东等^[11]研究表明群落结构及物种分布受海拔、坡位、坡向、坡度等山地微地形条件影响显著。本研究排序结果显示,地形因子中坡向成为影响植被恢复的主要因子,其次是海拔,坡向主要对草本覆盖度和乔木有一定的影响,但这些影响都不显著,地形因子对植被恢复并没有很强的贡献率,这可能是因为在土壤性质缺少的区域,地形因子主要对植被恢复作出解释,而当地形因子与土壤因子同时存在时,土壤因子成为影响植被恢复的主要环境因子^[15,19]。王应刚等^[32]研究龙角山森林区域地形因子对植被生长的影响,发现影响物种多样性空间布局的主要因素是坡向和海拔,但当海拔变化幅度 ≤ 300 m时,海拔对植被发展的影响很小。本文研究的是露天煤矿排土场,其海拔高度从1329.16m-1454.21m,相差125.05m ≤ 300 m,这将不足以引起水/热条件的重大变化^[15],也就不足以对植被恢复造成影响。地形因子对植被恢复有一定的影响,同时地形对土壤因子也有一定的影响。柳云龙等^[33]得出地形变化对土壤的理化性质和水分特性有明显的影响,本研究结果显示速效磷与海拔呈负相关,与坡向呈正相关;全氮与坡位、坡向、坡度呈正相关;土壤含水量、土壤总孔隙度与坡向呈正相关,土壤容重与坡向呈负相关。

土壤因子与植被恢复之间的这种相互联系又相互制约的关系,表明了土壤因素在植被恢复过程中的作用,同时也揭示了植被恢复对土壤性质的恢复和改善作用。所以为了改善和恢复黄土区露天煤矿排土场脆弱的生态系统,应该考虑植被和土壤的联合演替^[15]。当前黄土区露天煤矿排土场生态恢复的关键是在当地的生态环境状况下改善土壤状况和增加人工植被,同时加强对排土场植被的保护。

5 结论

本文利用 CANOCO 4.5 软件分析了黄土区安太堡露天煤矿排土场地形、土壤因子对植被恢复的影响,通过研究得到以下结论:

(1)在黄土区露天煤矿排土场植被恢复过程中土壤因子是影响植被恢复的主要环境因子。其中速效钾为影响植被恢复的最主要解释变量,其次是砾石含量、全氮、土壤容重;地形因子中坡向对植被恢复影响较大。

(2)土壤物理性质中的土壤容重与砾石含量对土壤养分含量具有明显的指示作用,各土壤养分指标之间

存在明显的相关关系。

(3) 在影响植被恢复因子较多的情况下,利用降趋势对应分析和冗余分析可以避免出现较大的误差,减少分析过程中的主观性;将 SPSS 20.0 与 CANOCO 4.5 相结合,能够更科学的分析黄土区露天煤矿排土场土壤、地形因子对植被恢复与的影响。

(4) 为了改善和恢复黄土区露天煤矿排土场脆弱的生态系统,应该考虑植被和土壤的联合演替。在当地的生态环境状况下排土场土地复垦的关键是改善土壤状况和增加人工植被,同时加强对排土场植被的保护。

致谢:感谢我的导师王金满副教授在样品采集、文章写作和文章修改过程中给予的巨大帮助,感谢韩玉国副教授对文章摘要修改给予的巨大帮助,感谢曹银贵老师、王宇师姐、卢元清师兄、秦倩在样品采集、土样测定过程中的帮助。

参考文献 (References):

- [1] 李静鹏,徐明峰,苏志尧,孙余丹,胡砚秋.不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价.生态学报,2014,34(9):2297-2307.
- [2] 张艳,赵廷宁,史常青,吴海龙,李丹雄,孙永康.坡面植被恢复过程中植被与土壤特征评价.农业工程学报,2013,29(3):124-131.
- [3] 巩杰,陈利顶,傅伯杰,虎陈霞,王伟.黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究.水土保持学报,2005,19(1):93-96.
- [4] 钟芳,柴晓虹,王国基,段争虎.植被恢复方式对黄土丘陵区土壤理化性质及微生物特性的影响.中国沙漠,2014,34(4):1064-1072.
- [5] 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的变化特征.生态学报,2011,31(21):6429-6441.
- [6] 樊兰英.煤矿废弃地植被恢复对土壤质量的影响及评价.山西林业科技,2014,43(1):25-27,30-30.
- [7] 钱洲,俞元春,俞小鹏,高捍东,吕荣,张文英.毛乌素沙地飞播造林植被恢复特征及土壤性质变化.中南林业科技大学学报,2014,34(4):102-107.
- [8] 丁文广,魏银丽,牛贺文.西北干旱区植被恢复的土壤养分效应.生态环境学报,2010,19(11):2568-2573.
- [9] Mitchell R J, Marrs R H, Le Duc M G, Auld M H D. A study of the restoration of heathland on successional sites: changes in vegetation and soil chemical properties. Journal of Applied Ecology, 1999, 36(5): 770-783.
- [10] 么旭阳,胡耀升,刘艳红.长白山阔叶红松林典型森林群落功能多样性及其与地形因子的关系.西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(10):95-102.
- [11] 马旭东,张苏峻,苏志尧,区余端,刘刚.车八岭山地常绿阔叶林群落结构特征与微地形条件的关系.生态学报,2010,30(19):5151-5160.
- [12] 许明祥,刘国彬.黄土丘陵区刺槐人工林土壤养分特征及演变.植物营养与肥料学报,2004,10(1):40-46.
- [13] 刘世梁,马克明,傅伯杰,康永祥,张洁瑜,张育新.北京东灵山地区地形土壤因子与植物群落关系研究.植物生态学报,2003,27(4):496-502.
- [14] 张振国,焦菊英,贾燕锋,王宁.黄土丘陵沟壑区不同立地环境因子对植被变化的解释比例分析.中国水土保持科学,2010,8(2):59-67.
- [15] Liu X P, Zhang W J, Yang F, Zhou X, Liu Z J, Qu F, Lian S Q, Wang C L, Tang X G. Changes in vegetation-environment relationships over long-term natural restoration process in Middle Taihang Mountain of North China[J]. Ecological Engineering, 2012, 49: 193-200.
- [16] 安韶山,黄懿梅,李壁成,刘梦云.用典范相关分析研究宁南宽谷丘陵区不同土地利用方式土壤酶活性与肥力因子的关系.植物营养与肥料学,2005,11(5):704-709.
- [17] Zhang J T, Oxley E R B. A comparison of three methods of multivariate analysis of upland grasslands in North Wales. Journal of Vegetation Science, 1994, 5(1): 71-76.
- [18] Fu B J, Chen L D, Ma K M, Zhou H F, Wang J. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shaanxi, China. Catena, 2000, 39(1): 69-78.
- [19] McNab W H, Browning S A, Simon S A, Fouts P E. An unconventional approach to ecosystem unit classification in western North Carolina, USA. Forest Ecology and Management, 1999, 114(2-3): 405-420.
- [20] Ter Braak C J F. CANOCO-an extension of DECORANA to analyze species-environment relationships. Vegetatio, 1988, 75(3): 159-160.
- [21] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析.上海:上海科学技术出版社,1978:34-88.
- [22] 刘创民,李昌哲,史敏华,梁海英.多元统计分析在森林土壤肥力类型分辨中的应用.生态学报,1996,16(4):444-447.

- [23] Lepš J, Šmilauer P. *Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 50-51.
- [24] 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.
- [25] 孙海运, 李新举, 胡振琪, 刘雪冉, 仲伟静. 马家塔露天矿区复垦土壤质量变化. *农业工程学报*, 2008, 24(12): 205-209.
- [26] 王金满, 郭凌俐, 白中科, 杨睿璇, 张萌. 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*, 2013, 29(21): 223-232.
- [27] 胡江波, 杨改河, 张笑培, 冯永忠. 不同植被恢复模式对土壤肥力的影响. *河南农业科学*, 2007, (3): 69-72.
- [28] Belay-Tedla A, Zhou X H, Su B, Wan S Q, Luo Y Q. Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of a tall grass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 41(1): 110-116.
- [29] Zhang J T, Xi Y, Li J. The relationships between environment and plant communities in the middle part of Taihang Mountain Range, North China. *Community Ecology*, 2006, 7(2): 155-163.
- [30] 齐雁冰, 常庆瑞, 田康, 刘梦云, 刘京, 陈涛. 黄土丘陵沟壑区不同植被恢复模式土壤无机磷形态分布特征. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1): 56-62.
- [31] 郑永红, 张治国, 姚多喜, 陈孝杨. 煤矸石充填复垦对土壤特性影响研究. *安徽理工大学学报: 自然科学版*, 2013, 33(4): 7-11.
- [32] 王应刚, 朱宇恩, 张秋华, 张峰. 龙角山林区维管植物物种多样性. *生态学杂志*, 2006, 25(12): 1490-1494.
- [33] 柳云龙, 胡宏涛. 红壤地区地形位置和利用方式对土壤物理性质的影响. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 22-26.