

鸡西煤矿矸石山植被自然恢复规律及其环境解释

王晓春^{1, 3}, 蔡体久^{1, *}, 谷金锋²

(1. 东北林业大学, 哈尔滨 150040; 2. 黑龙江科技学院, 哈尔滨 150027; 3. 中国科学院植物研究所, 北京 100093)

摘要 煤矿矸石山的植被恢复是矿区土地复垦的重要内容,也是退化生态系统与恢复生态学上极为关注的研究领域之一。鸡西是我国重要煤产区,煤矸石山占用和破坏了大量土地资源。因此,开展鸡西煤矿矸石山植被恢复研究意义十分重大。运用传统的植被样方调查方法获取煤矸石山自然恢复植被的基本状况,同时采用烘干法、电位法、凯氏定氮法、钼锑抗比色法、火焰光度法和外加热法等测定矸石山土壤的物理和化学性质,最后运用 TWINSpan、DCA、CCA、DCCA 等植物分类与排序方法分析矸石山植被梯度变化规律及其与环境因子之间的关系。结果表明,排矸 50a 以内的煤矸石山大致可以分为三大类:第Ⅰ类,排矸年龄小于 10a 的煤矸石山;第Ⅱ类,排矸年龄在 12 ~ 30a 的煤矸石山;第Ⅲ类,排矸年龄在 30 ~ 50a 的煤矸石山。DCA 排序与 TWINSpan 结果一致,随对角线因子变化矸石山排矸年龄增加,CCA 和 DCCA 排序图明显反映出排序轴的生态意义,表明煤矸石山植物群落的梯度变化主要受土壤 pH 值、土壤养分和土壤的物理性质控制。因此,在人工加快煤矸石山植被恢复时,应以原始自然恢复植被为首选植物种类,不同煤矸石山阶段采用不同种类,同时辅以土壤的理化性质改良,能达到最佳效果。

关键词 煤矸石山 植被恢复 TWINSpan DCA DCCA

文章编号: 1000-0933 (2007)09-3744-08 中图分类号: Q948.3 X171.4 文献标识码: A

Effects of soil properties on vegetation restoration in coal-gangue pile in Jixi area, China

WANG Xiao-Chun^{1, 3}, CAI Ti-Jiu^{1, *}, GU Jin-Feng²

¹ Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

² Heilongjiang Institute of Science and Technology University, Harbin 150027, China

³ Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (9): 3744 ~ 3751.

Abstract: Vegetation restoration of coal-gangue pile is the most important part of the mine reclamation, and is one of the hotspots in studies of degradation ecosystem and restoration ecology. Jixi is a city of main coal resource in China, and waste coal-gangue piles occupied and destroyed large fields. Consequently, it is significant to restore vegetation of coal-gangue pile in for local environments Jixi. The naturally restored vegetation status of coal-gangue pile was investigated by traditional plot-survey, and soil chemical and physical properties in coal-gangue pile were analyzed by using standard methodology. The natural vegetation patterns along the environmental gradient and their relationships with ecological factors were also analyzed by TWINSpan, DCA, CCA and DCCA. The results showed that the coal-gangue piles can be divided into three groups according to community ordination: I. the coal-gangue pile was discarded less than 10 years; II. the coal-gangue

基金项目 黑龙江省科技攻关资助项目 (GA06B302-8, GA02B601-04), 东北林业大学优秀青年教师创新资助项目

收稿日期 2006-07-31; **修订日期** 2007-07-23

作者简介 王晓春 (1975 ~), 男, 吉林人, 博士, 副教授, 主要从事全球生态学和树木年轮学研究. E-mail: wangxc-cf@nefu.edu.cn

*** 通讯作者** Corresponding author. E-mail: caitj@263.net

Foundation item The project was financially supported by the Key Science and Technology Research Project of Scientific Committee of Heilongjiang (No. GA06B302-8, GA02B601-04) and the Innovative Foundation Project for Outstanding Young Teachers of Northeast Forestry University

Received date 2006-07-31; **Accepted date** 2007-07-23

Biography WANG Xiao-Chun, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in global ecology and dendrochronology. E-mail: wangxc-cf@nefu.edu.cn

discarding was between 12 to 30 years ;Ⅲ. the age of coal-gangue discarding was between 30 to 50 years. The results of DCA and TWINSpan for vegetation plots and soil properties were similar, the age of discarding coal-gangue pile increased with diagonal factors variation. The axes of CCA and DCCA ordination diagram indicated that the variation of vegetation in coal-gangue pile was influenced by soil chemical and physical properties, such as pH, nutrient and bulk density. Therefore, the native plant species should be applied in restoring vegetation in coal-gangue pile, and different species should be selected depending on the discarding age of coal-gangue pile. Finally, we think that the restoration effect in such coal-gangue pile in this area would be effectiveness by using soil chemical and physical properties with different discarding ages.

Key Words : coal-gangue pile ;vegetation restoration ;TWINSpan ;DCA ;DCCA

鸡西市是一座以煤炭为主的资源型城市,煤炭总产量居全国第 2 位,矸石排放量也位居全国前列。这些矸石的存放占用大量的土地,严重污染环境,给当地人民的生活带来了极大危害。然而,目前还没有十分理想的恢复措施,而对这些矸石山自然植被恢复规律的探索与分析就是一个找到答案的最佳解决途径。

矿区废弃地植被恢复是一个复杂的问题,它与生态、土壤、林业、环境保护、地理等多学科有关,但理论基础是恢复生态学。总的来说,其恢复过程可分为两种类型,即:自然恢复和人工恢复^[1]。自然恢复是相对极其缓慢的过程,虽然有些矿地会由于自然演替使得某些耐性物种逐渐侵入而实现植物定居^[1],但总的来说,由于开矿所导致的恶劣生境,以及基质缺少植物繁殖体,仅植被的自然恢复就往往需要 50 ~ 100a 甚至数百年^[1]。对于自然恢复的矿区,不论植被处于哪阶段,和正常土壤上的植被相比,往往都会形成独特的植被,特别是在那些年代久远、植被恢复较好的矿区更是如此^[4, 5]。关于矿区植被的人工恢复与重建,许多学者已经进行不少研究,例如王文英等根据矿区土壤化学性质引种和筛选适宜的矿区植物,论述了安太堡矿区生态恢复和重建过程^[6];张桂莲等通过植被群落数量分析研究了人工植被在安太堡矿区恢复过程中的生态关系^[1];郭逍宇等通过群落调查和实验分析,研究了安太堡矿区复垦地植被恢复过程多样性变化^[1];胡振琪等通过实地观测,对潞安矿务局煤矸石山人工植物群落的生长规律、生产力水平和土壤物理特性的影响及其制约因素进行了研究^[1]。对矿区废弃地的自然植被进行系统群落排序分类的自然恢复规律分析及其环境因素的解,是开展矿区人工生态恢复的重要前提和基础,但是以往研究对于矿区植被自然恢复(尤其是煤矸石山)的结构、动态、分类等基本规律报道较少。本文运用植物群落数量分类方法分析煤矸石山植被自然恢复规律,为鸡西市矸石山植被人工恢复与重建奠定基础,把矸石山的自然恢复过程转变为人辅助措施的加快恢复过程,从而促进矸石山的恢复。通过矸石上自然恢复的植被状况调查和矸石山的土壤理化性质分析,科学地配置各排矸年龄段矸石山的植被恢复种类,合理地改良基质,迅速提高矸石山的植被覆盖率和利用率,减少对周围环境的污染,为当地带来经济和生态效益。

1 研究区域自然概况

本研究在黑龙江省鸡西市滴道区和城子河区的矸石山上进行。鸡西市位于黑龙江省东南部,处在穆陵河的中上游,北纬 44°28' ~ 45°28',东经 130°23' ~ 131°04' 之间,处于完达山和老爷岭的结合部位,北、西、南三面环山,东北部低平,地势由西南向东北倾斜,海拔最低点 180 m,最高点 697 m,属低山丘陵区。气候属寒温带大陆性季风气候,气温、降水、风速等均受地形、纬度、植被的影响,分布很不均匀,西部山地气候冷,降水较多,东部气候暖和,降雨偏少。据鸡西市气象台统计,年平均气温 3.9℃,最高气温 37.1℃,最低气温 -35℃;年平均无霜期 145 d,最深冻层 1.8 m,最大积雪厚 60.7 cm;年平均风速 3.2 m/s,最大风速 28.7 m/s;年平均降雨量 537.7 mm,最多为 776.5 mm,最少为 314.0 mm;四季降水分布差异悬殊,雨量多集中于 6 ~ 8 月份,多年平均降雨量为 330.5 mm,占全年降雨量的 61.47%;多年平均蒸发量 1272.5 mm^[10]。

该地区土壤共分 7 个类型,16 个亚类,21 个土属,27 个土种。其中,以暗棕壤面积最大,占土壤总面积的 74.3%,该土壤呈微酸性;其次是草甸土,占总面积的 9.8%;再次是白浆土,占总面积的 7.6%,其它土种占总面积的 8.3%。

本区原始植被以森林植被为主,仅山间沟谷还有部分草甸植被。森林植被是针阔叶混交林,针叶树种有兴安落叶松 (*Larix gmelinii*)、红松 (*Pinus koraiensis*)、红皮云杉 (*Picea koraiensis* Nakai)、臭冷杉 (*Abies nephrolepis*) ,阔叶树种包括蒙古栎 (*Quercus mongolica*)、山杨 (*Populus davidiana*)、糠椴 (*Vilia mandshurica*)、黑桦 (*Betula davurica*)、白桦 (*Betula platyphylla*)、榛 (*Corylus heterophylla*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*) 等灌木。山间沟谷地草甸植被有小叶章 (*Calamagrostis angustifolia*)、薹草 (*Carex dispalata*)、柴桦 (*Betula fruticosa*)、细叶沼柳 (*Salix rosmarinifolia*)、地榆 (*Sanguisorba officinalis*) 等,森林覆盖率为 61.9%。

鸡西市矿产资源丰富,现已发现 56 个矿种,已开发利用重要矿种 15 种。主要有煤炭、石墨等。煤炭原煤 $80 \times 10^8 \text{ t}$,矿区总面积 2400 km^2 石墨总储量 $7.8 \times 10^8 \text{ t}$,工业储量 $1.5 \times 10^8 \text{ t}$,居亚洲首位 这些矿产资源的开采,虽然拉动地方经济,但也产生了不少负面影响,主要有 矸石山、石墨尾矿、电厂粉煤灰等压占耕地,破坏地表景观和污染环境。鸡西市煤矿开采类型主要是井下开采,有矸石山 112 座,占地 768.3 hm^2 尾矿场 3 个,占地 5.5 hm^2 有采石场 92 处,破坏地表植被面积 178.3 hm^2 [10]。

2 研究方法

2.1 样地调查

在鸡西市滴道区和城子河区选择排矸 7、10、12、15、20、25、30、35、40a 和 50a 的煤矿矸石山作为研究对象。在不同排矸年龄矸石山上,随机设置 3 个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 样地,每个样地内取 3 个样方 ($0 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 和 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$) 进行乔、灌木和草本的调查,共设样地 30 个,样方 90 个。在每个样地内调查并记录以下内容 ①乔木的种类、盖度、高度、胸径和株数 ②灌木的种类、盖度和高度 ③草本植物的种类、盖度、高度以及生物量等 ④群落综合特征和生境特征,包括乔、灌、草总盖度、海拔、坡度、坡向以及地表状况等,对所调查数据带回实验室进行整理分析,以供进一步处理分析。

2.2 土壤因子测定

研究区域内各样地间距离相对较近,因此气候因子的变化不大,植被的分异主要来源于土壤因子。在每个样地中心取 1 处土壤样点,挖土壤剖面并进行土壤常规测定,并取样品在实验室内测定土壤物理性质,包括含水量、容重、孔隙度等,以及土壤化学性质,包括土壤 pH 值、全氮、全磷、速效钾和有机质等。土壤含水量测定使用烘干法;pH 值测定采用电位法 全氮测定采用凯氏定氮法 全磷测定采用酸溶-钼锑抗比色法 速效钾测定采用醋酸铵溶-火焰光度法 有机质测定采用重铬酸钾氧化-外加热法 [11]。

2.3 数据处理

首先对每个样方的植被数据进行预处理,分别计算草本植物的重要值:重要值 = (相对频度 + 相对密度 + 相对盖度 + 相对生物量)/4。土壤数据采用实测值。

DCA、CCA、DCCA、TWINSPAN 等植被群落数量分类与排序能较好地表达植物群落的环境梯度和结构梯度,反映环境与结构的空間特点,不仅能独立完成分类过程,而且能同时结合多个环境因子,而且各排序分类轴具有明确的生态意义,在群落与环境的生态分析中具有较好的应用价值 [12]。本文利用美国 MjM 软件公司开发的生态数据多变量分析软件 PC-ORD (V4.0, B. McCune & J. Mefford 1999) 来完成样方的双向指示种分类 (Two-Way Indicator Species Analysis, TWINSPAN)、去趋势对应分析 (Detrended Correspondence Analysis, DCA)、典范对应分析 (Canonical Correspondence Analysis, CCA) 等分类与排序工作;去趋势典范对应分析 (Detrended Canonical Correspondence Analysis, DCCA) 用 Canoco 数量分析软件完成 (V3.0, Cajo J. F. & Ter Braak 1990)。

3 结果与分析

3.1 TWINSPAN 分类及植被恢复规律

对鸡西市煤矿矸石山 10 个样方进行 TWINSPAN 等级分类,TWINSPAN 将 10 个样方划分为 2 个大类组 6 个小类,根据实际调查情况结合其生态意义,以第 3 级水平 (3) 的划分作为基本分类依据,最终将其划分为 3 类 (图 1、表 1)。

表 1 不同排矸年龄鸡西煤矿矸石山植被状况

Table 1 The vegetation status of different age coal-gangue piles in Jixi

类型 Type	排矸年龄 (a) Age of coal-gangue Mt.	盖度 (%) Coverage	密度 (N/m ²) Density	生物量 (g/m ²) Biomass
I	≤10	10	34	31
II	12 ~ 30	35	84	209
III	35 ~ 50	57	98	585

第 I 类 煤矿矸石山排矸年龄小于 10a, 植被主要是 1, 2 年生草本植物, 种类较少、植被盖度较低。主要草本植物以菊科为主有苦卖菜 (*xeris chinensisi*)、大籽蒿 (*Artemisia sieversiana*) 等。但是在调查中发现, 有些刚排矸的矸石山 (小于 2a) 的植物种类和密度要比排矸 7 年的矸石山上的植物种类和密度要大, 经过分析表明刚开采形成的矸石山由于不断从井下排到地面, 而井下土壤或煤层较潮湿, 排到地面后没有完全蒸干又被倾倒, 这样不断反复就在新矸石山上保持了一定的水分, 为植物种子萌发提供了其中一个必要的条件——水分。另外, 在新矸石往外倾倒的过程中总是或多或少地掺杂少量土壤和碎煤灰, 这就具备了植物生长的另外一种重要条件——土壤。具备了这两个条件, 如果土壤中含有植物种子, 或者通过风、动物等媒介植物种子落到矸石山上, 温度等其它条件适宜植物就可以生长。但是, 为什么 7a 以后的矸石山的植物种类和密度又下降了呢? 其原因是矸石山初期阶段, 矸石风化程度低, 保水性差, 加之原有养分的消耗殆尽, 所以植物种类和密度等也有所减少。

第 II 类 煤矿矸石山排矸年龄在 12a 到 30a 之间, 植被以 1, 2 年生和多年生草本植物为主, 但偶尔有灌木状家榆 (*Ulmus pumila*) 出现, 植物种类和盖度都有所增加。主要草本植物还是以菊科为主, 但是其它科属种类有所增加。主要有鬼针草 (*Bidens pilosa*)、万年蒿 (*Artemisia sacrorum*)、黄蒿 (*Artemisia coparia*)、毛连菜 (*Picris japonica*)。虽然这些植物还是以耐干旱、贫瘠的先锋植物为主, 但是在中生立地条件下生长的植物也不断增多, 表明经过生物、物理、化学及其它风化作用, 矸石山的土壤状况已经有相当程度的改善, 但还是不能完全满足植物生长需要。

第 III 类 煤矿矸石山排矸年龄在 35a 到 50a 之间, 无论是植物种类还是植被密度都有了很大提高。虽然植被还是以 1, 2 年生和多年生草本植物为主, 有些灌木如毛樱桃 (*Prunus romentosa*)、珍珠梅 (*Sorbaria sobifolia*) 等开始出现。一些乔木如家榆 (*Ulmus pumila*)、山杨 (*Populus davidiana*) 等也开始出现, 但这些乔木似乎都有一种灌木状长势。其他各类植物长势较好, 已和当地山区自然土壤上生长的植物相差不多。在这些矸石山上栽植的兴凯赤松 (*Pinus densiflora* var. *ussuriensis*)、樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 和沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 等成活率较高、长势较好。表明这类矸石的土壤条件已经得到充分改善, 基本适应植物生长。

3.2 DCA、CCA、DCCA 排序及其环境解释

DCA 排序是把多维空间的信息, 在尽可能减少信息损失的前提下, 通过降低维数, 把物种与环境的关系在低维空间中进行表达 [3]。从群落样方在二维空间的排序图 (图 2) 来看, 排序效果较好, 基本与 TWINSpan 的分类结果一致, 将 10 个样方共分成 3 大类, 分别是低于 10a 矸石山植被群落、10 ~ 30a 矸石山植被群落和 30 ~ 50a 矸石山植被群落。DCA 排序第一轴从左到右矸石山排矸年龄基本上是增加 (不考虑 7a 的矸石山), DCA 排序第二轴从上到下矸石山的排矸年龄也基本是增加, 因此矸石山植物群落的变化受排序轴对角线环

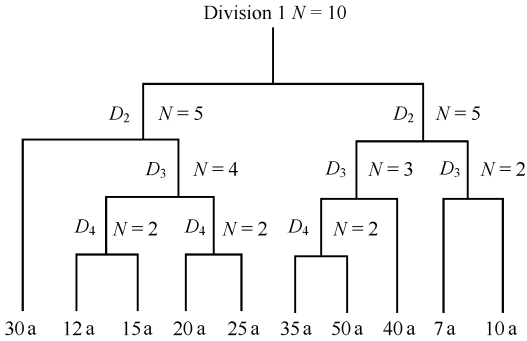


图 1 鸡西煤矿矸石山植被样方的 TWINSpan 分类

Fig. 1 TWINSpan classification of vegetation quadrats at coal - gangue Pile in Jixi

境因子控制。从矸石山植被物种 DCA 排序图来看,矸石山植被物种也大概可以划分成 3 个植物群落,这 3 个植物群落的物种基本都落于 TWINSpan 分类和矸石山植被样方排序的 3 个大类内(图 3)。从 DCA 排序图看出 7a 的矸石山被作为一个单独群落列出,主要是因为其排矸年龄较短,自然植被恢复较少,生物量低被划分为单独群落。

随着排序方法的进展,更多的研究者使用 CCA 排序,CCA 强迫排序轴与环境因子的线性组会,是一种环境约束的排序^[3]。使用 CCA 排序对鸡西煤矿矸石山植被样方进行分析,排序轴(第一轴除外)与环境因子之间的关系系数均有显著提高(表 2)。第二排序轴由 DCA 的 0.144 增加为 0.191,第三排序轴由 DCA 的 0.079 增加到 CCA 的 0.117。种累积变异率也具有相同的效果(表 2)。从表 2 中还可以看出,DCCA 排序轴(第一轴除外)无论是特征值还是种累积变异率都比 DCA 和 CCA 要有所降低,这可能是受去“弓形效应”的影响所致。

植物群落与各环境因子之间的关系也可以用典范系数及环境因子与排序轴间的相关系数表示。表 3 是 CCA 前 3 个排序轴的典范系数和相关系数。从表 3 中可以看出 CCA 第一排序轴与 pH 值(0.723)、全氮(0.631)和速效钾(0.635)相关性较大,CCA 第二排序轴与全磷(0.701)、全氮(0.541)和速效钾(0.521)相关性较大,并且 CCA 第二排序与总孔隙度(0.506)和容重(-0.478)的相关也较大。从上述分析可知,矸石山植物群落梯度主要受矸石土壤养分含量控制,也就是随着矸石山年龄增加,土壤养分也不断增加,植物群落的生物量也不断增加。除了土壤养分含量外,土壤的物理性质对矸石山的植被恢复也有较大影响,比如矸石山土壤的总孔隙度和容重。

表 2 DCA、CCA、DCCA 排序轴的特征值及种的累积变异解释率

Table 2 Eigenvalues and cumulative percentage variance of species data for first three axes of DCA, CCA and DCCA				
项目 Item		第一轴 Axis1	第二轴 Axis2	第三轴 Axis3
特征值 Eigenvalues	DCA	0.386	0.144	0.079
	CCA	0.386	0.191	0.117
	DCCA	0.386	0.120	0.046
种累积变异 (%)	DCA	40.9	54.6	62.8
	CCA	40.9	61.1	73.4
	DCCA	40.9	53.3	60.1

DCCA 是分析植被与环境关系最先进的多元分析技术。DCCA 是限定性排序,即在每一轮样方值—物种

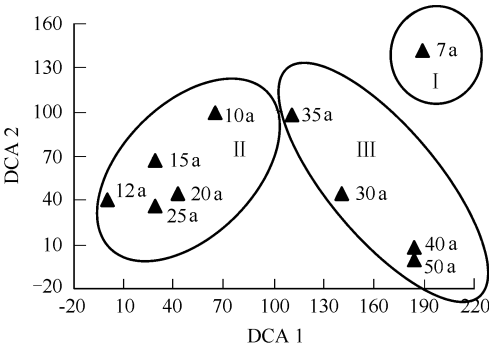


图 2 鸡西矸石山植被样方的 DCA 二维排序

Fig. 2 Two-dimensional DCA ordination of vegetation quadrats at coal-gangue Pile in Jixi

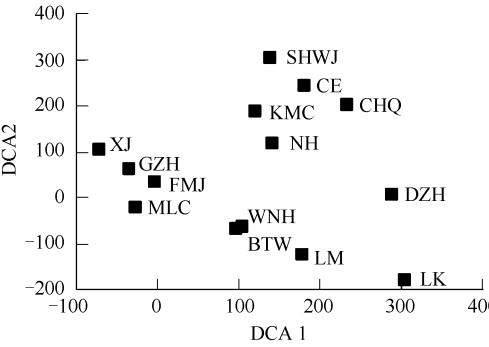


图 3 鸡西矸石山植被物种的 DCA 二维排序

Fig. 3 Two-dimensional DCA ordination of vegetation species at coal-gangue Pile in Jixi

XJ:小蓟 *Cirsium segetum*; KMC:苦苣菜 *Ixeris chinensis*; DZH:大籽蒿 *Artemisia sieversiana*; HH:黄蒿 *Artemisia coparia*; CE:苍耳 *Xanthium sibiricum*; SHWJ:山莴苣 *Lactuca indica*; CHQ:车前 *Plantago asiatica*; GZH:鬼针 *Bidens pilosa*; BTW:白头翁 *Pulsatilla chinensis*; WNH:万年蒿 *Artemisia sacrorum*; MLC:毛连菜 *Picris japonica*; FMJ:凤毛菊 *Saussurea japonica*; LM:萝藦 *Metaplexis japonica*; LK:龙葵 *Solanum nigrum*;下同 the same below

值的加权平均叠代运算后,用环境因子与样方值作一次多元线性回归,这样得出的排序轴代表环境因子的一种线性组合,称为环境约束的对应分析(CCA)然后加入除趋势算法因第一、二排序轴间的相关性而产生的“弓形效应”而成为 DCCA。能同时结合植被数据和环境因子计算排序值,更有利于排序轴生态意义的解释,是目前国际上最新的排序方法^[3, 14]。

表 3 环境因子与 CCA 排序轴的典范系数和相关系数

Table 3 Canonical and correlation coefficients of environmental variables with first three axes of CCA

环境因子 Environmental variables	典范系数 Canonical coefficients			相关系数 Correlation coefficients		
	Axis1	Axis2	Axis3	Axis1	Axis2	Axis3
pH	0.702	-0.390	-0.163	0.723	-0.013	-0.211
全氮 Total nitrogen	1.033	0.471	0.614	0.631	0.541	-0.136
有机质 Organic matter	-0.336	-0.205	-0.189	0.042	0.503	-0.031
全磷 Total phosphorus	0.253	0.243	-0.224	0.358	0.701	-0.598
速效钾 Rapidly available kalium	-0.976	0.189	-0.017	0.635	0.521	-0.250
饱和含水量 Saturation capacity	-0.423	0.156	0.066	0.243	0.403	-0.699
自然含水量 Natural moisture	-0.125	-0.895	-0.682	0.428	0.310	-0.626
总孔隙度 Total porosity	-0.294	0.014	-0.171	0.074	0.506	-0.669
容重 Bulk density	-0.644	-0.457	-0.415	-0.285	-0.478	0.598

这里采用 DCCA 对矸石山植物群落进行了分析,并将其结果与 DCA 和 CCA 进行了比较。图 4 和图 5 为 DCCA 样方的二维排序图,图中箭头表示环境因子,箭头连线的长短表示植物群落的分布与该环境因子关系的大小,箭头连线在排序图中的斜率表示环境因子与排序轴相关性的正负^[8]。从图 4 和图 5 看出,pH 值与 x 轴夹角最小,且呈显著正相关,说明有 pH 值在 DCCA 第一轴上对植被的影响明显大于其它环境因子,pH 值连线较长,说明矸石山植被的自然恢复 pH 值影响较大。DCCA 第二排序轴与有机质和总孔隙度夹角较小,表明第二排序轴主要受有机质和容重控制。排序轴对角线上主要为土壤养分含量(全氮、全磷和速效钾)和土壤物理性质(含水量和容重),从图 4 中可以看出,煤矸石山排矸年龄越长土壤的养分含量越高,土壤的含水量越大,但是土壤的容重与排矸年龄呈负相关。因此,要加快矸石山植被的自然恢复,一方面要调整矸石山土壤的 pH 值,增加土壤养分;另一方面应该改善土壤的物理性状。

4 结论与讨论

(1) 采用 TWINSpan 分类方法将鸡西煤矿矸石山植被样方划分为 3 种类型。植被分类不仅能够根据植被组成反映环境特点和植被动态,而且对评价一个地区植被的生长潜力也是非常有用的。只有认识和掌握不同立地条件的差别和特点,才能正确选择适宜的植物种类,因地制宜地按立地条件进行矸石山废弃地植被恢复与重建的工程技术设计。矸石山废弃地植被立地类型划分是选择合适的植物种类及拟定合理的植被恢复重建措施的关键步骤。

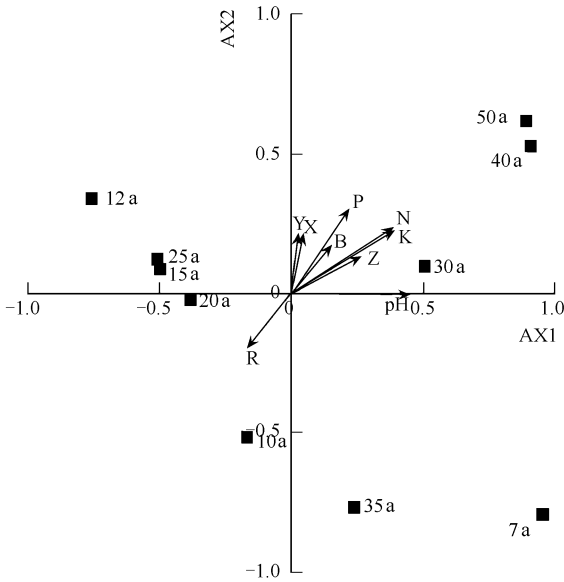


图 4 鸡西矸石山植被样方的 DCCA 二维排序

Fig. 4 Two-dimensional DCCA ordination of vegetation quadrats at coal-gangue Pile in Jixi

N:全氮 Total nitrogen; pH:pH value; Y:有机质 Organic matter; P:全磷 Total phosphorus; K:速效钾 Rapidly available kalium; B:饱和含水量 Saturation capacity; Z:自然含水量 Natural moisture; X:总孔隙度 Total porosity; R:容重 Bulk density

④) DCA 排序结果划分的植被样方类型与 TWINSpan 分类结果基本一致。DCA、CCA、DCCA 排序结果基本一致,排序轴第一轴主要反映土壤的 pH 值变化,排序第二轴反映土壤的有机质和总孔隙度变化,排序轴对角线反映土壤养分(全氮、全磷、速效钾)和土壤容重变化。矸石山排矸年龄与土壤养分状况成正比,与土壤容重成反比。从本次分析结果来看,DCCA 排序轴与环境因子之间的相关关系虽然比 CCA 要弱一些,但是 DCCA 排序的结果更反映一种近真实的结果(剔除了弓形效应)。从排序轴与环境因子的相关关系来看,似乎矸石山的 pH 值更制约植物的生长,另外土壤有机质和总孔隙度也对植被的正常生长有很大影响。虽然是这样,土壤养分和容重也起着非常重要的决定性作用。

⑤) 第 I 类矸石山土壤条件较差,自然恢复植被主要以 1、2 年生草本为主。因此,在矸石山人工植被恢复物种选择时以自然定居植物为主,可选择播种苦苣菜 (*Xeris chinensis*)、大籽蒿 (*Artemisia sieversiana*)、黄蒿 (*Artemisia scoparia*)、狗尾草 (*Setaria viridis*) 等植物,目的是使其迅速覆盖,以减少对大气污染和周围环境、土地的污染,并对土壤有一定的改良效果。第 II 类矸石山土壤条件仍然较差,自然恢复植被以 1、2 年生和多年生植被为主。因此,在人工恢复时,可选择以自然定居草本植物为主,兼用一些灌木的配置方式,草本类型可选择鬼针 (*Bidens pilosa*)、小蓟 (*Cirsium segetum*)、万年蒿 (*Artemisia sacrorum*)、白头翁 (*Pulsatilla chinensis*) 等,灌木可采用沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、紫穗槐 (*Amorpha fruticosa*) 等,目的是加快地表植被覆盖和土壤改良速度。第 III 类矸石山的土壤条件已有很大改善,自然恢复植被以 1、2 年生和多年生草本植被为主。人工植被恢复可采用灌草结合方式,灌木可采样沙棘、紫穗槐、胡枝子等,草本可采用鬼针、万年蒿、小蓟、猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*)、桃叶蓼 (*Polygonum persicaria*) 等,在迅速增加植被覆盖、改良土壤、保护环境的同时可产生少量经济效益^[1]。

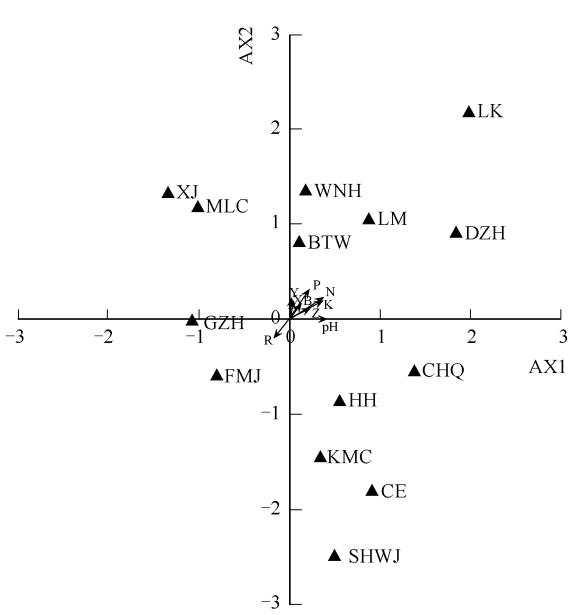


图 5 鸡西矸石山植被物种的 DCCA 二维排序
Fig. 5 Two-dimensional DCCA ordination of vegetation species at coal-gangue Pile in Jixi

References :

[1] Peng S L, Lu H F. Some key points of restoration ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (4) :1249 – 1257.
[2] Shaw J. Heavy metal tolerance in plant :Evolutionary aspects. Boca Raton. Florida :CRC Press, 1989. 65 – 66.
[3] Bradshaw A. Restoration of mined lands-using natural processes. *Ecological Engineering*, 1997, 8 :255 – 269.
[4] Fan Y H, Lu Z H, Cheng J L, *et al.* Major ecological and environmental problems and the ecological reconstruction technologies of the coalmining areas in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (10) :2144 – 2152.
[5] Bao Z Y, Chen B. Study on revegetation during ecological restoration of industrial wasteland. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18 (4) :160 – 163.
[6] Wang W Y, Li J C, Xie H J. Studies on ecological restoration and reconstruction in the mine area. *Henan Science*, 1999, 17 (4) :87 – 91.
[7] Zhang G L, Zhang J T, Guo X Y. Ecological relationships among artificial vegetations during their restoration in Antaibao mining area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 (1) :151 – 155.
[8] Guo X Y, Zhang J T, Gong H L, *et al.* Analysis of changes of the species diversity in the process of vegetation restoration in Antaibao mining field, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (4) , 763 – 770.
[9] Hu Z Q, Zhang G C, Wei Z Y, *et al.* Vegetation growth and its effect on soil physical and chemical properties in coal waste piles. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2003, 32 (4) :491 – 495, 499.

[0] Gu J F, Cai T J, Xiao Y, *et al.* Vegetation restoration of desert land in industrial mining area. *Journal of Northeast Forestry University*, 2004, 32 (1) :19—22.

[1] Gu J F. Vegetation restoration mechanism of coal-gangue Pile in Jixi. Master Dissertation. Harbin :Northeast Forestry University, 2004. 35—36.

[2] Qiu Y, Zhang J T. The ordination axes clustering based on detrended canonical correspondence analysis ordination and its application to the analysis of the ecological gradients of plant communities. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20 (1) :199—206.

[3] Zhang J T. The methods in plant quantitative ecology. Beijing :Chinese Science and Technology Press, 1995. 143—158.

[4] Zhang X P, Wang M B, She B, *et al.* Numerical classification and ordination of forest communities in Pangquangou National Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (6) :754—761.

参考文献：

[1] 彭少麟, 陆宏芳. 恢复生态学焦点问题. *生态学报*, 2003, 23 (1) :1249~1257.

[4] 范英宏, 陆兆华, 程建龙, 等. 中国煤矿区主要生态环境问题及生态重建技术. *生态学报*, 2003, 23 (10) :2144~2152.

[5] 包志毅, 陈波. 工业废弃地生态恢复中的植被重建技术. *水土保持学报*, 2004, 18 (1) :160~163.

[6] 王文英, 李晋川, 谢海军, 等. 矿区生态恢复与重建研究. *河南科学*, 1999, 17 (增刊) :87~91.

[7] 张桂莲, 张金屯, 郭道宇. 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*, 2005, 16 (1) :151~155.

[8] 郭道宇, 张金屯, 宫辉力, 等. 安太堡矿区复垦地植被恢复过程多样性变化. *生态学报*, 2005, 25 (4) :763~770.

[9] 胡振琪, 张光灿, 魏忠义, 等. 煤矸石山的植物种群生长及其对土壤理化特性的影响. *中国矿业大学学报*, 2003, 32 (6) :491~495, 499.

[0] 谷金锋, 蔡体久, 肖洋, 等. 工矿废弃地的植被恢复. *东北林业大学学报*, 2004, 32 (1) :19~22.

[1] 谷金锋. 煤矿矸石山植被恢复机理研究——以鸡西市滴道矿区和城子河矿区为例. 硕士学位论文. 哈尔滨:东北林业大学, 2004, 35~36.

[2] 邱扬, 张金屯. DCCA 排序轴分类及其在关帝山八水沟植物群落生态梯度分析中的应用. *生态学报*, 2000, 20 (1) :199~206.

[3] 张金屯. 植被数量生态学方法. 北京:中国科学技术出版社, 1995.

[4] 张先平, 王孟本, 余波, 等. 庞泉沟自然保护区森林群落的数量分类和排序. *生态学报*, 2006, 26 (6) :754~761.