

不同复垦方式煤矿排土场植物 群落与土壤因子的关系

王同智^{1,2}, 薛焱³, 包玉英^{1*}, 屈永安¹, 齐云龙¹, 王海娟¹, 董明月¹

(1 内蒙古大学 生命科学学院, 呼和浩特 010021; 2 内蒙古煤炭建设生态环境研究院, 呼和浩特 010021; 3 内蒙古科技大学 包头医学院, 内蒙古包头 014060)

摘要: 选取 6 个样地, 采用协同样方法采样, 对内蒙古黑岱沟露天煤矿排土场与原始植被地的植物及土壤因子进行对比研究。结果表明: (1) 通过 TWINSpan 划分法得到 8 个植物群落, 经 DCA 法分析核实, 与 TWINSpan 划分结果一致。 (2) 油松+蒙古冰草复垦模式比新疆杨+紫花苜蓿复垦模式生态适应性差, 紫花苜蓿丧失优势种的地位而被拂子茅取代。 (3) 剔除频度小于 5%, 获得 228×74 的样方-物种原始数据矩阵, 对 11 个环境因子测定, 采取“前向选择”和“Monte Carlo 检验”确定了 7 个代理变量, 形成 228×7 的样方-环境因子数据矩阵, 经 DCCA 分析群落分布、格局及组成主要受土壤有机质(第 1 轴)、土壤密度(第 2 轴)两因子影响; 第 1 轴特征值 0.895, 贡献率 58.7%, 沿着第 1 轴群落依次从类型Ⅷ、Ⅶ、Ⅴ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅱ、Ⅰ土壤有机质逐渐变大; 第 2 轴特征值 0.356, 贡献率 17.4%, 沿着第 2 轴, 群落Ⅰ、Ⅱ、Ⅴ、Ⅶ土壤密度依次变小。 (4) 排土场群落物种组成较原始群落简单, 现有群落既未向复垦设计的方向发展, 也未向原始植被方向演化。

关键词: 土地复垦; 生态恢复; 土壤因子

中图分类号: Q948.1

文献标志码: A

Relationship between Plant Community and Soil Factors in Spoil Bank of Coal Mine under Different Reclamation Modes

WANG Tongzhi^{1,2}, XUE Yan³, BAO Yuying^{1*}, QU Yongan¹,
QI Yunlong¹, WANG Haijuan¹, DONG Mingyue¹

(1 College of Life Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2 Research Institute of Ecology Environment of Inner Mongolia Coal Mine, Hohhot 010021, China; 3 Baotou Medical College, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014060, China)

Abstract: Six sample sites were selected. Samples were taken by quadrat method. There were the comparative study of plant community and soil factors in reclamation spoil bank, no reclamation spoil bank and the original vegetation. According to the effective important value, we obtained the original data matrix of 228×74 sample-species and 228×11 sample-species environmental factors. (1) 8 plant communities were divided by TWINSpan method. By analysis and verification of DCA. These results are consistent with those of TWINSpan. (2) DCCA analysis showed that two factors of soil organic matter and soil density affected the plant community distribution, structure and composition. (3) In the process of community succession, *Populus alba* var. *pyramidalis* Bunge, *Medicago sativa* L. selected for reclamation had not been completely re-

收稿日期: 2013-10-22; 修改稿收到日期: 2014-01-14

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAC10B03-5); 内蒙古科技计划项目(20110514, 20100509)

作者简介: 王同智(1976—), 男, 在读博士研究生, 主要从事菌根及土地复垦研究。E-mail: wtz1976@163.com

* 通信作者: 包玉英, 教授, 博士生导师, 主要从事菌根生态学研究。E-mail: ndbyy@mail.imu.edu.cn

tained. *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth became the dominant species. (4) Compared with the original community, the community species composition of spoil bank was simple. The existing communities are neither the designed patterns nor the original structure of communities.

Key words: land reclamation; ecological restoration; soil factors

内蒙古黑岱沟矿山为年产原煤 2 500 万吨的大型露天煤矿, 每年产生大面积无植被排土场, 成为该地区较大裸地, 生态功能丧失, 矿区生态恢复迫在眉睫^[1]。矿区复垦采取乔木+灌草组合^[2], 经过十几年人工复垦, 现排土场植被有一定恢复, 但对其植物群落恢复的物种组成、空间格局和分布无清晰认识, 本实验选择排土场为研究对象, 以原始植被地(XS)、未复垦排土场(SPB)为双重对照样地, 对现有植物群落进行了研究, 为后续提高生态恢复质量提供参考数据及技术支持。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

黑岱沟露天矿位于内蒙古准格尔旗黑岱沟与龙王沟之间, 矿区面积 55 km², 地理坐标为东经 111°10′~111°25′, 北纬 39°25′~39°59′。黄土丘陵梁峁状地貌, 随梁峁起伏呈千沟万壑。气候属典型的半干旱温带大陆性气候, 年平均气温 6.2℃~7.2℃, 年均降水量 379~420 mm 之间, 蒸发量 1 943.6 mm, 年平均风速 2.2 m/s。地带性土壤为以砒砂岩为母岩的栗褐土, 非地带性土壤为黄绵土, 分布广, 土质疏松, 抗蚀冲性差, 有机质含量少。自然植被主要以本氏针茅(*Stipa bungeana* Trin.)、百里香(*Thy-*

mus mongolicus Ronn.)、锦鸡儿(*Caragana davazamcii* Sancz.)等, 偶有乔木残留。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 排土场台阶高差 10 m, 台阶宽度 50 m, 顶部平台面积 0.66 km², 初期仅人工植被复垦, 3 年管护后无管理措施。选取 1997 年复垦的北排土场样地 2 个代号分别为 14SB1、14SB2, 2003 年复垦的东排土场样地 2 个代号分别为 7SB1、7SB2, 未复垦的南排土场样地 1 个, 代号为 SPB, 选择原始植被地 1 个, 代号为 XS, 所有样地均为位于排土场顶部平台, 无阴阳坡的差别, 原始植被地位于相当海拔的阳坡地带, 详见表 1。

1.2.2 植物群落调查与划分方法 参考方精云的植物群落清查法^[3]于 2010 年每个样地随机选择 100 m×100 m 小区, 对样地内的植物群落进行调查, 主要测度指标: 记录植物名称、数量、盖度、密度、多度、胸径、高度等。群落调查的样方设置: (1) 灌草样方, 采用 15 m×15 m 的网格法, 样点间隔 15 m, 取样点共计 36 个, 每样点草本样方面积 1 m×1 m, 共 36×6=216 个样方。(2) 乔木层样方, 每样地随机选 15 m×15 m 样方 2 个, 共 12 个乔木样方。样方总数 228 个, 样方编号按先灌草, 后乔木顺序编号, 以此类推。

表 1 样地概况

Table 1 Basic information of six sampling sites

样地编号 Site number	复垦方式 Reclamation model	复垦年限 Reclamation year	中心位置 Location	海拔 Altitude /m
14SB1	新疆杨+紫花苜蓿 <i>Populus alba</i> var. <i>pyramidalis</i> Bunge+ <i>Medicago sativa</i> L.	14	39°47′59.05″N, 111°16′38.84″E	1 250
14SB2	油松+蒙古冰草 <i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.+ <i>Agropyron mongolicum</i> Keng	14	39°47′24.15″N, 111°16′50.83″E	1 274
7SB1	新疆杨+紫花苜蓿 <i>Populus alba</i> var. <i>pyramidalis</i> Bunge+ <i>Medicago sativa</i> L.	7	39°47′2.96″N, 111°17′43.00″E	1 238
7SB2	油松+蒙古冰草 <i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.+ <i>Agropyron mongolicum</i> Keng	7	39°46′11.31″N, 111°16′25.52″E	1 192
SPB	位于南排土场上, 未复垦, 2009 年排弃岩土, 仅少量先锋植物 Located in south spoil bank, no reclamation, dumped rock and soil in 2009, only pioneer plant	0	39°47′0.99″N, 111°16′12.12″E	1 182
XS	西梁村, 原始植被为本氏针茅+锦鸡儿+百里香, 偶见油松单树 Located in Xiliang Village; The original vegetation of <i>Stipa bungeana</i> Trin.+ <i>Caragana davazamcii</i> Sancz. + <i>Thymus mongolicus</i> Ronn., occasionally found a single <i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.	第四系沙壤土覆盖	39°45′51.86″N, 111°8′46.12″E	1 201

注: 14SB1、14SB2. 北排土场上的 2 个样地; 7SB1、7SB2. 东排土场上的 2 个样地; SPB. 南排土场样地; XS. 原始植被样地。

Note: 14SB1 and 14SB2. Stand for the code of North spoil bank; 7SB1 and 7SB2. Stand for the code of East spoil bank; SPB. Stand for the code of South spoil bank; XS. Stand for the code of original vegetation.

用双向指示种分析方法(TWINSPAN)对划分植物群落^[4-5]。采用重要值(importance value, IV)作为植物在群落中的优势度指标,表示不同植物在群落中的功能地位,反映其在群落中的分布格局状况,计算公式:

灌木和草本重要值=(相对频度+相对盖度)/200

乔木重要值=(相对密度+相对优势度+相对高度)/300

1.2.3 土样采集与土壤理化性质测定 植物群落调查的同时采用样方对角线混合法采集 0~20 cm 土壤样品。土壤质地测定采用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000, Malvern Instruments Co., UK)测定;土壤密度采用比重瓶法;土壤水分采用称重蒸干法;土壤全氮采用半微量凯氏定氮法;土壤速效氮采用 NaOH-扩散法;土壤全磷含量采用 HClO₄-H₂SO₄ 微波消解法-钼锑抗比色法;土壤速效磷含量采用 NaHCO₃-钼锑抗比色法;土壤全钾采用 NaOH 熔融-火焰光度法;土壤速效钾采用醋酸铵-火焰光度法;土壤有机质采用重铬酸钾-稀释热法;土壤碳酸钙采用中和滴定法^[6]。

1.2.4 群落分布与环境因子关系的研究方法 采用无偏对应分析(DCA)得到各排土场主要植物群落类型,与 TWINSPAN 结果相互验证,如一致,利用前向选择结合 Monte Carlo 检验消除环境冗余变量影响,确定土壤环境因子的代理变量^[7-8],无偏典范对应分析(DCCA)方法可消除“弓形效应”,能结合植被数据和环境的限定性排序方法,其排序轴的生态学意义易被解释,是植物群落分布、格局及组成与环境解释的趋势性方法^[9-10],其方法的数学原理见文献^[11]。

1.2.5 数据处理 228 个样方共鉴定到 80 个物种,根据重要值,剔除频度小于 5%,获得 228×74 的样方-物种原始数据矩阵。对 11 个土壤环境因子测定,采取“前向选择”和“Monte Carlo 检验”确定了 7 个代理变量,得到 228×7 的样方-环境因子原始数据矩阵。2 个矩阵数据通过 CANOCO 4.5 软件进行 DCA、DCCA 排序,得出植物群落与环境因子的关系图。复垦方式和复垦时间是 2 个定性变量因子。(1)复垦方式:新疆杨+紫花苜蓿复垦方式记作 1,油松+蒙古冰草复垦方式记作 2,原始植被地记作 3,未复垦样地记作 4;(2)复垦时间:复垦 14 年记作 1,复垦 7 年记作 2,其他记作 0。

样地间单因素数据差异采用 SPSS 软件 ANOVA 过程进行分析, LSD 比较($P < 0.05$)。所有数

据分析前进行正态分布和方差齐性检验,若不符合,土壤理化参数、植物群落参数进行反对数转换。TWINSPAN 使用 WinTwins 3.2 软件包实现。

2 结果与分析

2.1 植物群落类型划分

依据中国植被的分类原则和系统^[12],对 228 个样方植物组成进行 TWINSPAN 等级分类,将 TWINSPAN 分类结果与实际的生态意义相结合,最终划分为 8 个主要植物群落类型(图 1)。

I 为猪毛菜(*Salsola collina*) + 沙米(*Agriophyllum squarrosum*) + 赖草(*Leymus secalinus*) 群落,包含样方 191~228,主要出现在未复垦排土场,自然恢复 1 年,盖度小于 10%,地表裸地多,伴生植物有油蒿、狗尾草(*Setaria viridis*)。

II 为拂子茅(*Calamagrostis epigeios*) + 新疆杨+油蒿群落,包含样方 1~16、18~27、29、31、34、36、38、40、41、56、58。主要出现在复垦排土场 7SB1 大部分(1~16、18~27、29、31、34、36、38)和 14SB1 局部(40、41、56、58),原复垦方式是新疆杨株行距 4×4 + 紫花苜蓿种子撒播,新疆杨不连续分布于拂子茅群落中,枯木倒地或为防火被管理人员清除排土场,常见伴生植物有驼绒藜(*Ceratoides arborescens* Losinsk.)、艾蒿(*Artemisia giraldii* Pamp.), 植被盖度 40%~45%。

III 为拂子茅+新疆杨+锦鸡儿群落,包含样方 17、28、30、77~104。出现在复垦排土场 7SB1(17、28、30)和 14SB1(77~104),原复垦方式及先乔木分布同群落 II,覆土厚度 50 cm,土壤剖面常见有砾石及第三系红色粘土,常见伴生植物硬质早熟禾(*Poa sphondylodes* Trin. ex Bunge)、短花针茅(*Stipa bevilflora* Griseb.), 植被盖度 43%~46%。

IV 为油松+蒙古冰草+锦鸡儿群落,包含样方为 32、33、35、37、39、42~55、57、59~76,出现在复垦排土场 7SB2,复垦方式是油松株行距 4 m×4 m + 蒙古冰草种子撒播,常见伴生植物有铁杆蒿(*Artemisia sacrarum* Ledeb.)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica* Laxm.), 植被盖度 35%~40%。

V 为油松+硬质早熟禾+糙隐子草[*Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng]群落,包含样方为 106、108~111、113~138。出现在复垦排土场 14SB2,复垦方式同群落 IV,常见伴生植物有米蒿(*Artemisia dalailamae* Krasch)、轮叶委陵菜(*Potentilla verticillaris* Steph ex Willd.), 植被盖度

低,平均 25%。

Ⅵ为油松+锦鸡儿+蒙古冰草群落,包含样方 105、107、112、139~142。出现在复垦排土场 14SB2 局部,复垦方式同群落Ⅳ,常见伴生植物有米蒿、鸦葱(*Scorzonera austriaca* Willd),植被盖度 35%。

Ⅶ为锦鸡儿+百里香+达乌里胡枝子群落,包含样方 143、144、146、148~153、163~170、172~177、179~190,出现在样地 XS,土壤有机含量较高,土壤剖面呈现明显的 A、B、C 层,腐殖质厚度 2~3 cm,地表黄绵土覆盖,常见伴生植物有本氏针茅、短花针茅,植被盖度 55%~60%。

Ⅷ为锦鸡儿+短花针茅+无芒隐子草(*Cleistogenes songorica* Roshev.)群落,包含样方 145、147、154~162、171、178,出现在 XS 局部,土壤性质同群落Ⅶ类似,常见伴生植物有轮叶委陵菜、耧斗叶绣线(*Spiraea aquilegfolia* Pall),植被盖度 55%~60%。

划分结果表明样地 7SB1、14SB1 由原来的“新疆杨+紫花苜蓿”复垦方式演化为群落Ⅱ(拂子茅+新疆杨+油蒿)和群落Ⅲ(拂子茅+新疆杨+锦鸡儿),“紫花苜蓿”丧失了复垦初期优势种地位,逐步由拂子茅代替。而样地 7SB2、14SB2 由原来“油松

+蒙古冰草”复垦方式演化为 3 个植物群落,即群落Ⅳ(油松+蒙古冰草+锦鸡儿)、群落Ⅴ(油松+硬质早熟禾+糙隐子草)、群落Ⅵ(油松+锦鸡儿+蒙古冰草),蒙古冰草未完全丧失优势种地位,随着灌木植物的恢复,蒙古冰草的地位有所下降。

2.2 群落分布与环境因子的关系

剔除频度小于 5%的植物种,先用 228×74 的样地-种类原始矩阵资料进行 DCA 排序。DCA 分析结果中梯度长度的第 1 轴值大于 4.0,选择单峰模型(DCA、DCCA),如果在 3.0~4.0 之间,那么选单峰和线性模型均可,如果小于 3.0,那么线性模型(RDA、PCA)的结果要好于单峰模型。DCA 分析结果中梯度长度的第 1 轴值为 7.881,大于 4.0,故选择单峰模型(DCA、DCCA)。

采用 DCA 对 228 个样方进行分析,4 个排序轴的特征值分别为 0.912、0.421、0.074、0.045,前 2 个排序轴的累积贡献率为 74.2%,大于 70%以上,可以反映事物的基本信息,DCA 排序结果与 TWINS-PAN 分类所得各群落类型基本吻合,根据前 2 个轴作二维排序(图 2),8 个群落的分类结果客观地反映了复垦排土场及对照的植物群落。从排序轴看,群

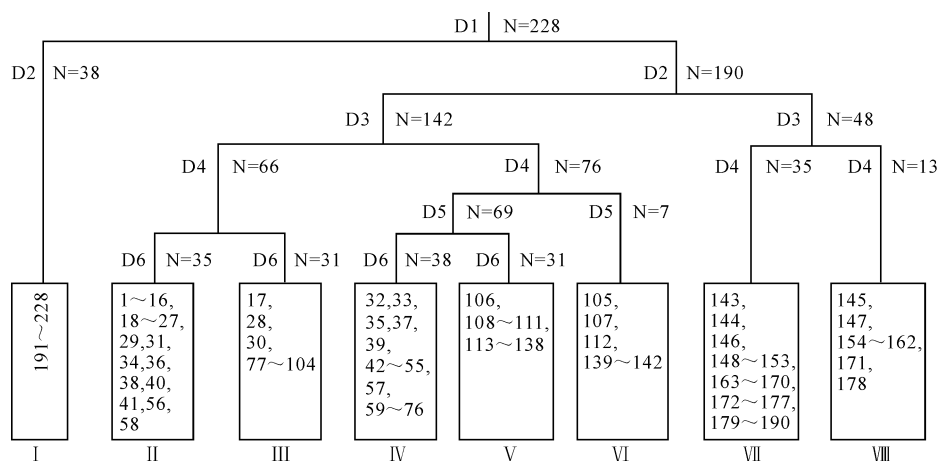


图 1 228 个样方 TWINSpan 分类树状图

D. 分组代号;N. 样方个数;方框内数字表示样方编号;Ⅰ. 猪毛菜+沙米+赖草群落;Ⅱ. 拂子茅+新疆杨+油蒿群落;

Ⅲ. 拂子茅+新疆杨+锦鸡儿群落;Ⅳ. 油松+蒙古冰草+锦鸡儿群落;Ⅴ. 油松+硬质早熟禾+糙隐子草群落;

Ⅵ. 油松+锦鸡儿+蒙古冰草群落;Ⅶ. 锦鸡儿+百里香+达乌里胡枝子群落;Ⅷ. 锦鸡儿+短花针茅+无芒隐子草群落

Fig. 1 The TWINSpan classification dendrogram of 228 plots

D. Group code;N. Quadrat number;Ⅰ. *Salsola collina* Pall. + *Agriophyllum squarrosum* (L.) Moq. +

Leymus secalinus (Georgi.) Tzvel; Ⅱ. *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth + *Populus alba* var. *pyramidalis* Bunge +

Pinus tabulaeformis Carr.; Ⅲ. *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth + *Populus alba* var. *pyramidalis* Bunge +

Caragana davazamcii Sancz.; Ⅳ. *Pinus tabulaeformis* Carr. + *Agropyron mongolicum* Keng + *Caragana davazamcii* Sancz.;

Ⅴ. *Pinus tabulaeformis* Carr. + *Poa sphondylodes* Trin. ex Bunge + *Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng; Ⅵ. *Pinus tabulaeformis* Carr.

+ *Caragana davazamcii* Sancz + *Agropyron mongolicum* Keng; Ⅶ. *Caragana davazamcii* Sancz + *Thymus mongolicus* Ronn +

Lespedeza davurica Laxm.; Ⅷ. *Caragana davazamcii* Sancz + *Stipa bevilflora* Griseb. + *Cleistogenes songorica* Roshev.

落主要沿着第 1 轴有明显的梯度变化,分别对应未复垦排土场稀疏先锋植物群落、复垦排土场新疆杨灌草群落、油松灌草群落和原始植被地灌草等植被类型,结合土壤环境因子数据,第 1 轴代表着不同的土壤有机质,第 2 轴主要反映土壤密度的变化(表 2)。

11 个环境因子变量采取“前向选择”和“Monte Carlo 检验”确定了 7 个代理变量:土壤密度、土壤有机质、土壤肥力、土壤含水量、复垦方式、复垦时间。用 DCCA 排序绘制植物群落与环境关系图。DCCA 排序结果(图 3)显示,第 1 轴特征值 0.895,贡献率

58.7%,第 2 轴特征值 0.356,贡献率 17.4%,累计贡献率 76.1%,大于 70%,说明该排序结果能够包含基本信息。

植物群落与环境关系图 3,环境因子用箭头表示,箭头所处的象限表示环境因子与排序轴间的正负相关性,箭头连线的长度代表着某个环境因子与群落分布或种类分布的相关程度的大小,连线越长,相关性越大,反之越小。箭头连线和排序轴的夹角代表着某个环境因子与排序轴相关性的程度,夹角越小,相关性越高,反之相关性越低。

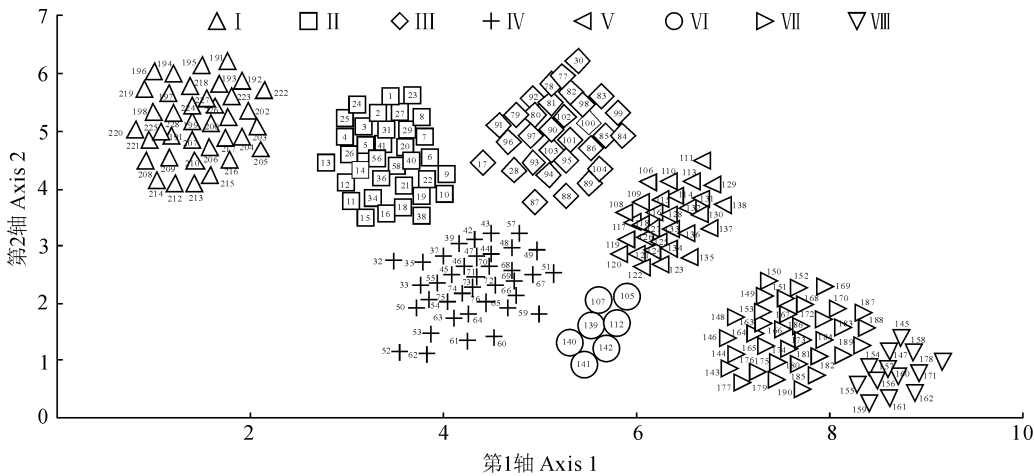


图 2 无偏对应分析二维排序图

I. 猪毛菜+沙米+赖草; II. 拂子茅+新疆杨+油蒿; III. 拂子茅+新疆杨+锦鸡儿; IV. 油松+蒙古冰草+锦鸡儿; V. 油松+硬质早熟禾+糙隐子草; VI. 油松+锦鸡儿+蒙古冰草; VII. 锦鸡儿+百里香+达乌里胡枝子; VIII. 锦鸡儿+短花针茅+无芒隐子草

Fig. 2 Two-dimensional DCA ordination diagram

- I. *Salsola collina* Pall. + *Agriophyllum squarrosum* (L.) Moq. + *Leymus secalinus* (Georgi.) Tzvel;
II. *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth + *Populus alba* var. *pyramidalis* Bunge + *Pinus tabulaeformis* Carr. ;
III. *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth + *Populus alba* var. *pyramidalis* Bunge + *Caragana davazamcii* Sancz. ;
IV. *Pinus tabulaeformis* Carr. + *Agropyron mongolicum* Keng + *Caragana davazamcii* Sancz. ; V. *Pinus tabulaeformis* Carr. + *Poa sphondylodes* Trin. ex Bunge + *Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng; VI. *Pinus tabulaeformis* Carr. + *Caragana davazamcii* Sancz + *Agropyron mongolicum* Keng; VII. *Caragana davazamcii* Sancz + *Thymus mongolicus* Ronn + *Lespedeza davurica* Laxm. ; VIII. *Caragana davazamcii* Sancz + *Stipa bevilflora* Griseb. + *Cleistogenes songorica* Roshev.

表 2 各群落土壤环境代理变量的变化特征

Table 2 Variation characteristics of environmental proxy variables of each association

群落 Community	土壤颗粒 Clay/%	土壤密度 Soil density /(g/cm ³)	土壤有机质 OM /(g/kg)	土壤肥力系数 P	土壤水分 Soil moisture /%	复垦方式 Reclamation model	复垦时间 Reclamation year
I	51.12	2.14	0.050	0.54	7.89	0	0
II	48.43	1.91	0.104	1.06	10.10	1	7
III	48.45	1.90	0.141	1.18	14.20	2	14
IV	43.56	1.89	0.123	1.08	12.15	1	7
V	45.23	1.81	0.159	1.34	15.14	2	14
VI	44.12	1.79	0.138	1.16	13.14	2	14
VII	27.25	1.67	0.389	1.88	15.98	0	0
VIII	26.19	1.59	0.274	1.25	14.54	0	0

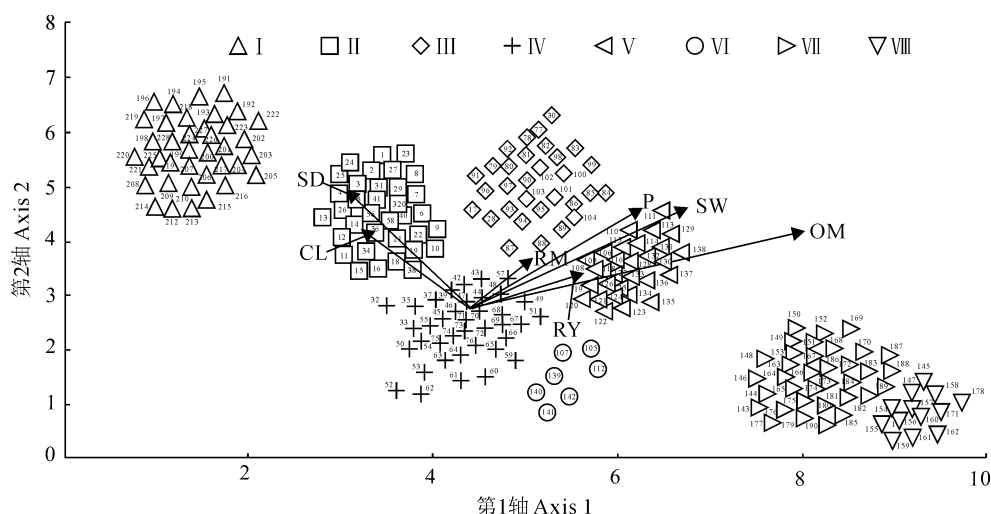


图3 无偏典范对应分析二维排序图

OM. 土壤有机质; P. 土壤肥力系数; SM. 土壤含水量; SD. 土壤密度; CL. 土壤黏土含量; RM. 复垦方式; RY. 复垦时间; I. 猪毛菜 + 沙米 + 赖草; II. 拂子茅 + 新疆杨 + 油蒿; III. 拂子茅 + 新疆杨 + 锦鸡儿; IV. 油松 + 蒙古冰草 + 锦鸡儿; V. 油松 + 硬质早熟禾 + 糙隐子草; VI. 油松 + 锦鸡儿 + 蒙古冰草; VII. 锦鸡儿 + 百里香 + 达乌里胡枝子; VIII. 锦鸡儿 + 短花针茅 + 无芒隐子草

Fig. 3 Two-dimensional DCCA ordination diagram

OM. Soil organic matter; P. Soil fertility factor; SM. Soil moisture; SD. Soil density; CL. Soil clay; RM. Reclamation model; RY. Reclamation year; I. *Salsola collina* Pall. + *Agriophyllum squarrosum* (L.) Moq. + *Leymus secalinus* (Georgi.) Tzvel; II. *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth + *Populus alba* var. *pyramidalis* Bunge + *Pinus tabulaeformis* Carr.; III. *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth + *Populus alba* var. *pyramidalis* Bunge + *Caragana davazamcii* Sancz.; IV. *Pinus tabulaeformis* Carr. + *Agropyron mongolicum* Keng + *Caragana davazamcii* Sancz.; V. *Pinus tabulaeformis* Carr. + *Poa sphondylodes* Trin. ex Bunge + *Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng; VI. *Pinus tabulaeformis* Carr. + *Caragana davazamcii* Sancz + *Agropyron mongolicum* Keng; VII. *Caragana davazamcii* Sancz + *Thymus mongolicus* Ronn + *Lespedeza davorica* Laxm.; VIII. *Caragana davazamcii* Sancz + *Stipa bevilflora* Griseb. + *Cleistogenes songorica* Roshev.

DCCA 排序图第 1 轴,反映了植物群落所在环境土有机质(OM),第 2 轴与土壤密度(SD)有关。不难看出,土壤有机质是所有因子中对植物群落分布起决定性作用的因子。随着有机质的增大,群落分布格局也主要沿着第 1 轴从右到左,群落依次从类型Ⅷ、Ⅶ、Ⅴ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅱ、Ⅰ逐渐演变。

沿着第 2 轴,群落Ⅰ、Ⅱ、Ⅴ、Ⅶ土壤密度依次变小,结合实际可以解释为从群落Ⅰ、Ⅱ、Ⅴ、Ⅶ的土壤受到的人为干扰程度不一样所致。群落Ⅰ位于未复垦排土场(SPB),由于排弃工艺造成的土壤碾压导致群落Ⅰ土壤密度最大,植物非常稀少,裸地大量出现;群落Ⅱ位于 7SB1 样地,植被有所恢复,土壤压实作用经过植物根系作用有所改善,土壤密度相对群落Ⅰ、Ⅴ有所减小,但土壤密度仍处于高位,影响植物群落发展;群落Ⅶ位于原始植被地人为干扰较少,土壤疏松,植被盖度高。

DCCA 和 DCA 排序图总体上具有明显的相似性,但 DCCA 排序图群落的分布格局更加紧凑,而 DCA 排序图 8 个群落分布相对集中且界线明显。

表 2 为各群落环境代理变量的变化状况。

土壤水分、土壤肥力、土壤有机质、复垦方式、复垦年限,它们之间夹角小于 90 度,呈正相关关系,相互影响,共同影响群落物种分布状况。复垦年限对土壤有机质的影响大于复垦方式对有机质的影响。土壤密度、黏土含量与土壤肥力、有机质、水分、复垦方式、复垦时间箭头方向相反,表明它们呈负相关关系,土壤密度越大土壤水分越小,N、P、K 等土壤营养成分循环越慢,土壤肥力越低,符合土壤因子相互作用机制。

2.3 群落空间格局和相似性

通过排序图 3 可知,群落Ⅰ和群落Ⅶ、Ⅷ位于分布图的两端,且距离中心区域较远,说明群落Ⅰ、群落Ⅶ、Ⅷ与群落Ⅲ、Ⅱ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ的群落物种组成、空间位置差异较大,这符合群落位置与样方地理位置的实际。群落Ⅰ为未复垦排土场群落物种与其他样地差异较大,群落Ⅶ、Ⅷ为原始植被样地群落所处地理位置、物种组成与其他群落差异较大,也符合群落调查的实际情况。而群落Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ集中于分

布图中间区域,相互距离较近,说明其物种组成、受到的环境因子影响都非常相似,符合人工复垦对其影响的实际。

3 讨 论

3.1 物种适宜性与植物群落演替

“新疆杨+紫花苜蓿”人工群落并未按照矿山企业所设计期望的方向存在,而是随着时间的推移逐步被“拂子茅+新疆杨+油蒿”和“拂子茅+新疆杨+锦鸡儿”群落所取代。分析其原因,杨建伟等研究杨树叶片蒸腾强度^[13]远大于奚如春文章记载的油松叶片蒸腾强度^[14],而排土场水分缺乏,导致新疆杨对环境适应能力差,存活的新疆杨胸径小于 10 cm,成为“老小树”。按照哈斯巴根等对内蒙古外来植物种的研究,紫花苜蓿原产伊朗,属于有用外来入侵种^[15]。紫花苜蓿为深根^[16-17]、高耗水植物^[18],适宜条件下生长 1 年根长 1~2 m,土壤密度是影响紫花苜蓿根系入土深度第一限制性因素,而排土场土壤密度高达 1.91 g/cm³,排土场植物恢复、发育、生长的限制因子,这导致紫花苜蓿根系很难下扎。加之排土场表层一般覆土厚度 50 cm,其下为排弃的基岩,能够下扎的少量植株触及基岩层后也会因水分缺乏而枯亡。紫花苜蓿在群落演替中被拂子茅取代是受到排土场土壤密度限制所致。导致土壤密度

增大的原因是排土场排弃工艺,为扩大库容,每排弃一层岩土碾压一次。

3.2 植物群落相似性

DCCA 排序结果显示,群落 I、Ⅶ、Ⅷ与群落 II、III、IV、V 相似性很差,在 14 年内,人工群落既没有按照复垦方向发展,也没有向着原始植被群落演替发展。有研究显示,人工群落经过长时间演替最初人工物种逐步消失或减少。徐彩琳等对于旱荒漠区包兰铁路人工植被防护林体系研究表明,40 余年后“锦鸡儿+花棒(*Hedysarum scoparium* Fisch.)”的人工群落灌木演替为以一年生草本植物为优势种的“油蒿+画眉草(*Eragrostis pilosa*) + 雾冰藜(*Bassia dasyphylla* O. Kuntze) + 刺蓬(*Crownoforns euphoriae* Herb.)”群落^[19]。苏永中等对科尔沁沙地不同年代小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam.)人工林植物研究也显示,最初简单的人工植被向复杂的灌草群落演变^[20]。张建彪对矸石山植被自然恢复研究显示,人工植被在群落演替中逐渐丧失优势种地位^[21]。郭志彬在黄土高原植被恢复中引入适宜当地的乡土种类草木樨有效提高了土壤营养含量、地表植被覆盖度和加速植物群落演替进程^[22]。排土场复垦应该按照当地实际选择乡土物种,并采取人为措施,促进群落进展演替,这是值得矿山企业复垦实践中注意的问题。

参考文献:

- [1] LI Y K(李永庚),JIANG G M(蒋高明). Ecological restoration of mining wasteland in both China and abroad an over review[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报),2004,24(1):95—100(in Chinese).
- [2] CHEN H X(陈洪祥),ZHANG SH L(张树礼),MA J J(马建军). Study on soil attributes of different restoration models of coal mine recovered fields[J]. *Inner Mongolian Environmental Sciences* (内蒙古环境科学),2007,19(4):63—67(in Chinese).
- [3] FANG J Y(方精云),WANG X P(王襄平),et al. Methods and protocols for plant community inventory[J]. *Biodiversity Science* (生物多样性),2009,17(6):533—548(in Chinese).
- [4] HILL M O. A FORTRAN program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of the individuals and attributes[M]. Section of Ecology and Systematics,Cornell University,1979.
- [5] ZHANG J D(张金屯). A comparison of fuzzy c-means algorithm clustering and TWINSpan in vegetation classification[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research* (武汉植物学研究),1994,12(1):11—17(in Chinese).
- [6] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978:48—90.
- [7] LEPSŠ L,ŠMILAUER P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO[M]. Cambridge University Press,New York,2003:202—210.
- [8] FRANKLIN J,WISER S K,DRAKE D R,et al. Environment, disturbance history and rain forest composition across the islands of Tonga, Western Polynesia[J]. *Journal of Vegetation Science*,2006,17(2):233—244.
- [9] ZHANG J T,OXLEY E R B. A comparison of three methods of multivariate analysis of upland grasslands in North Wales[J]. *Journal of Vegetation Science*,1994,5(1):71—76.
- [10] SHEN Z H(沈泽昊),ZHANG X SH(张新时),JIN Y X(金义兴). Gradient analysis of the influence of mountain topography on vegetation pattern[J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报),2000,24(4):430—435(in Chinese).

- [11] LIU W Y(刘汪洋), LI S Q(李素清). Quantitative classification and ordination of naturally colonized plant communities on Yongdingzhuang coal gob piles in Datong, Shanxi[J]. *Journal of Shanxi Normal University*(山西师范大学学报), 2011, **25**(1): 84–89(in Chinese).
- [12] 中国植被编辑委员会. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [13] YANG J W(杨建伟), HAN R L(韩蕊莲), LIU SH M(刘淑明), *et al.* Transpiration and drought resistance of poplar under different soil drought[J]. *Journal of Northwest Forestry University*(西北林学院学报), 2004, **19**(3): 7–10, 23(in Chinese).
- [14] XI R CH(奚如春), MA L Y(马履一), FAN M(樊 敏), *et al.* Water capacity of branches and stems of *Pinus tabulaeformis* and its impact on transpiring water consumption[J]. *Journal of Beijing Forestry University*(北京林业大学学报), 2007, **29**(1): 160–165(in Chinese).
- [15] SOYOLT(苏亚拉图), JIN F(金 凤), KHASBAGAN(哈斯巴根). A preliminary study on the invasive plants in Inner Mongolia[J]. *Journal of Inner Mongolia Normal University*(Nat. Sci. Ed.) (内蒙古师范大学学报·自然科学版), 2007, **36**(4): 480–483(in Chinese).
- [16] SUN H R(孙洪仁), WU R X(武瑞鑫), LI P H(李品红), *et al.* Rooting depth of Alfalfa[J]. *Acta Agrestia Sinica*(草地学报), 2008, **16**(3): 307–312(in Chinese).
- [17] LI W R(李文晓), ZHANG S Q(张岁岐), DING SH Y(丁圣彦), *et al.* Root morphological variation and water use in alfalfa under drought stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2010, **30**(19): 5 140–5 150(in Chinese).
- [18] KROGMAN K K, HOBBS E H. Evapotranspiration of irrigated alfalfa as related to season and growth stage[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1965, **45**(4): 310–313.
- [19] XU C L(徐彩琳), LI Z ZH(李自珍). Succession pattern of artificial vegetation community and its ecological mechanism in an arid desert region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2003, **14**(9): 1 451–1 456(in Chinese).
- [20] SU Y ZH(苏永中), ZHAO H L(赵哈林), ZHANG T H(张铜会), *et al.* Characteristics of plant community and soil properties in the plantation chronosequence of *Caragana microphylla* in horqin sandy land[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*(植物生态学报), 2004, **28**(1): 93–100(in Chinese).
- [21] 张建彪. 煤矸石山生态重建中的植被演替及其与土壤因子的相互作用山西大学[D]. 太原: 山西大学, 2011: 67–68.
- [22] GUO ZH B(郭志彬), WANG D ZH(王道中), LIU CH A(刘长安), *et al.* Effect of introducing biennial legume species, *Melilotus officinalis*, on plant community in the early stage of vegetation succession and soil nutrients in the Semiarid Loess Plateau of China[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2012, **32**(4): 787–794(in Chinese).

封面植物介绍——裸茎碎米荠

裸茎碎米荠(*Cardamine scaposa* Franch.) 隶属于十字花科(Brassicaceae)碎米荠属。多年生草本, 高 4~18 cm, 花葶状, 全株无毛。根状茎纤细, 匍匐生长。茎单一直立, 无叶。基生叶单一; 叶柄长 1~12 cm; 叶近于圆形或肾状圆形, 长 0.3~2.0 cm, 宽 0.5~3.0 cm, 基部心形, 边缘波状或全缘。无茎生叶。总状花序顶生, 具 2~10 朵花。果期花梗直立或上升, 长 1~4 cm, 基部的最长。萼片卵圆形或椭圆形, 长 3~4 mm, 宽 1.5~2.2 mm, 边缘膜质, 白色透明。花瓣白色, 倒卵形, 长 8~13 mm, 宽 5~7 mm, 顶端圆或微凹, 基部渐狭呈短爪。中间一对花丝长 4.5~8.0 mm, 基部略扩大; 外侧一对花丝长 2.5~4.5 mm; 花药狭长卵形, 长 1.5~1.8 mm; 花柱长 3.0~7.5 mm。每室具胚珠 8~14 个。长角果长 2.0~3.5 cm, 宽 1.2~1.7 mm; 光滑无毛。种子淡褐色, 长圆形, 长 2~3 mm, 宽 1.0~1.5 mm, 无翅。花期 4~6 月, 果期 6~7 月。

裸茎碎米荠是中国特有一种药用植物, 生长在海拔 1 400~2 900 m 的灌木丛和潮湿地带。分布于河北、内蒙古、陕西、山西和四川。

(图文由西北农林科技大学资环学院朱仁斌提供)