

DOI: 10.5846/stxb202202090317

吴翊平, 周国驰, 杨卓, 冯嘉懿, 江新奇, 付合英, 朱宴南, 佟佳庆, 李文海, 赵亮, 张涵羽, 王志超, 田野. 高寒地区煤矿排土场植被恢复研究——以内蒙古扎哈淖尔煤矿为例. 生态学报, 2022, 42(24): 10088–10097.

Wu Y P, Zhou G C, Yang Z, Feng J Y, Jiang X Q, Fu H Y, Zhu Y N, Tong Q J, Li W H, Zhao L, Zhang H Y, Wang Z C, Tian Y. Plant rehabilitation at dump sites of open-pit mine in alpine region: A case study of Inner Mongolia Zhahanaoer Mine. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 10088–10097.

高寒地区煤矿排土场植被恢复研究 ——以内蒙古扎哈淖尔煤矿为例

吴翊平¹, 周国驰², 杨卓^{2,*}, 冯嘉懿³, 江新奇⁴, 付合英⁴, 朱宴南⁴, 佟佳庆⁴, 李文海⁴,
赵亮⁴, 张涵羽⁴, 王志超⁴, 田野⁵

1 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241

2 中煤科工集团沈阳设计研究院有限公司, 沈阳 110015

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 扎鲁特旗扎哈淖尔煤业有限公司, 通辽 029114

5 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021

摘要: 高寒煤矿排土场植被恢复是制约我国矿区绿色可持续发展亟待解决问题, 内蒙古扎哈淖尔煤矿通过不同的生态措施对排土场进行人工植被恢复的实践。在 2020 年和 2021 年对该高寒煤矿排土场 75 个样地进行野外连续监测, 对不同生态恢复措施影响高寒地区内蒙古扎哈淖尔露天煤矿排土场植物恢复过程中的群落组成、盖度、物种多样性进行分析, 阐明不同恢复措施在高寒地区煤矿排土场植被恢复中的作用。研究结果表明: 从 2020 年到 2021 年排土场的植物群落物种数、植被盖度和群落多样性存在显著的季节变化规律; 周边原生草原的非人工种植植物随恢复时间增加而不断进入排土场, 导致群落物种数显著增加; 植物群落多样性在平面、坡面与田字格地形存在显著差异, 田字格上 Shannon-Wiener 多样性指数最低; 坡度显著影响群落多样性, 同时受到季节变化影响; 喷播加灌木种植方式与其他 4 种播种方式相比显著增加群落香浓维纳多样性指数; 但不同坡向、土壤施肥方式和水分灌溉方式对植物群落多样性没有显著影响。研究结果可为完善草原露天煤矿植被恢复技术提供科学依据。

关键词: 高寒露天煤矿; 排土场; 植物多样性; 植被盖度

Plant rehabilitation at dump sites of open-pit mine in alpine region: A case study of Inner Mongolia Zhahanaoer Mine

WU Yiping¹, ZHOU Guochi², YANG Zhuo^{2,*}, FENG Jiayi³, JIANG Xinqi⁴, FU Heying⁴, ZHU Yannan⁴,
TONG Qingjia⁴, LI Wenhai⁴, ZHAO Liang⁴, ZHANG Hanyu⁴, WANG Zhichao⁴, TIAN Ye⁵

1 School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China

2 China Coal Science and Engineering Group Shenyang Design & Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110015, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Zaharnur Coal Industry Co., Ltd., Tongliao 029114, China

5 Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

Abstract: Plant rehabilitation at dump sites in alpine region is the critical issue for the sustainable development of open pit mine in China. Several artificial restoration measures were applied for plant rehabilitation in Inner Mongolia Zhahanaoer Mine. Field investigations and monitoring were continually carried out at 75 sample plots at dump site of open-pit mine of Zhahanaoer from 2021 to 2022. We analyzed plant community composition, plant cover and biodiversity. Results showed that there are significant seasonal and annual variation pattern for plant growth. The increasing plant species number with

收稿日期: 2022-02-09; 采用日期: 2022-04-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 32525924@qq.com

increasing restoration period may due to the coming non-planting plant species from around grassland. There are significant higher biodiversity in flat and slope topography than that of in “Tianzige”. There was significant effect of slope degree on diversity, which varied with seasonal change. Plant biodiversity by spray seedling plus shrub method was significantly higher than those of other three methods. However, there were no significant differences of plant biodiversity in slope aspect, soil fertilization and irrigation treatments, respectively. Our results could contribute to the scientific evidences for plant rehabilitation of the dump sites of open pit mine in alpine region.

Key Words: alpine open pit mine; dump sites; plant diversity; plant coverage

煤炭资源的开发与利用对我国经济发展都有着举足轻重的作用,其中露天开采因其采掘方式经济、矿层利用率高且安全等特点为各煤矿所广泛采用^[1]。但是,随着露天煤矿的大量开采,矿区土地资源、地下水资源和生态环境均遭到严重破坏^[2-4]。排土场是矿区专设的用来排弃露天开采过程中矿床上部及周围产生的表土和岩石等废弃物的大型场地,这些废弃地已成为目前最为典型、退化最为严重的生态系统。因此排土场,尤其高寒地区排土场植被恢复,如何通过人工生态恢复措施短期恢复到原自然环境的状态?这是制约我国矿区绿色可持续发展亟待解决的热点问题之一。

高寒矿区气候寒冷,年积温低,极端的气候条件导致植物生长受限,生态恢复难度大。扎哈淖尔露天煤矿位于内蒙古自治区通辽市西北部,处于高寒、干旱、沙化严重的草原区。半干旱的气候特征,降水量年度变率较大,风力强劲且持续时间长,大面积分布的机械组成和物理性沙粒为主的风沙土,使该区植被一旦遭到破坏,流沙将迅速生起,造成严重的风蚀与水蚀,该地区极易形成水土流失,环境自我恢复能力差,生态环境具有明显的脆弱性。由于其特殊的地理位置及气候条件,运输客土成本较大,生态恢复倍加困难。一般来说,植被自然演替需要几十年甚至几个世纪的时间^[5],目前采取的人工促进恢复措施,可加速排土场植被短期内恢复,是矿区生态综合治理和环境保护的最佳途径^[6-9]。矿区生态修复需根据地域性、生态演替及生态位原理筛选适宜的先锋植物,营建种群和生态系统,为微生物、植被和动物提供一个适宜生境,使修复后的景观与周边相协调,最大限度保蓄水土,修复后的生态系统能够自我维护、自我维持、功能逐渐增强^[10]。植被的生长变化及恢复状况可以表征矿区土地复垦的程度与质量。植物群落的组成和结构动态变化,对揭示植被恢复过程中的物种共存和生物多样性维持机制具有重要意义^[11-12]。

本研究通过样地野外调查的方法,对内蒙古典型草原扎哈淖尔露天煤矿排土场植被恢复过程不同恢复时间、地形因子以及人工措施下植物群落组成、植被盖度、群落物种多样性进行分析,探讨影响草原矿区排土场生境的植物群落恢复的主要因素,为完善草原露天煤矿生态恢复模式与植被恢复技术提供科学依据。本研究的科学问题是:排土场采取的不同生态措施(不同地形、土壤施肥、灌溉方式、播种方式)是否显著影响植被群落多样性?

1 材料与方法

1.1 研究区概况

扎哈淖尔露天煤矿(45°10′—45°40′N, 119°08′—119°46′E)位于内蒙古自治区通辽市西北部,呈东北西南的狭长形条带状,总面积31.4km²;矿区排土场总占地面积17.5km²,包括南、北、东三个排土场(图1)。矿区海拔870—940m,四周环山,盆地内部地势较为平坦,东北、西南段为丘陵,中间段为开阔平原。矿区多年平均气温0.1℃,年日照时数3237h,气温年较差43.0℃;多年平均降水量为358.98mm,主要集中在5—9月,约占全年降水量的81.7%,多年平均蒸发量为1556.00mm;多年平均风速4.6m/s,易形成风沙。矿区位于草原区,植被属于蒙古草原区系,植被类型为地带性草甸草原,具有向森林草原过渡性质,植被有51科,183属,300多种;矿区主要草原植被群落有贝加尔针茅(*Stipa baicalensis* Roshev.)、线叶菊(*Filifolium sibiricum* (Linn.) Kitam.)、羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.)群落。地带性土壤为黑钙土,非地带性土壤为草甸土和沙土。本研究位于扎哈

淖尔露天煤矿 2019 年起进行生态修复的区域。

1.2 研究方法

在生态修复工程区选择在不同复垦时间 2020 年和 2021 年、以及不同生态恢复措施的 22 个地块,涵盖南、北、东三个排土场。在每个地块中设置地形不同的 1—5 块样地,共设置 75 个样地,包括平面和田字格 44 块,坡面 31 块;坡面的坡度在 2° — 35° 之间,坡向包括阴坡、阳坡和半阳坡 3 个方向;不同人工恢复措施包括播种方式、土壤改良方式以及灌溉方式等。其中播种方式包括条播和撒播。条播播种行距约 15cm,沟深 3—5cm,覆土厚度 2cm 左右;撒播为单位面积均匀播种,然后覆土厚度 2cm 左右。条播和撒播每公顷种子投入量为均为 210kg。灌木栽植株距 2m,行距 2m,每 2 行间隔 10m,栽植后株高不低于 20cm,冠幅不小于 10cm。土壤改良方式主要是土壤肥力的改良,根据排土场土壤采样检测结果,待治理区域氮、磷、钾以及有机质缺乏,因而分别选取鸡粪熟肥、牛羊粪肥、牛羊鸡粪肥、高氮有机肥(总有机质含量 $\geq 50\%$ 、氮含量 $\geq 30\%$ 、磷含量 $\geq 10\%$ 、钾含量 $\geq 10\%$) 等 4 种改良方式提高土壤肥力。肥料的使用量参照下面计算公式:

$$\text{土壤的供肥量} = \text{土壤养分测试值} \times \text{土壤养分利用系数} \times 0.15$$

植物生长季进行样地的植物群落特征调查,调查时间为 2020 年 6—10 月与 2021 年 6—8 月。根据样方内植物类型设置 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的草本样方,或者 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 的灌木样方。在调查的过程中记录样地内植物种类、每种植物的数量,用数码相机拍摄样方,计算植被盖度。

1.3 数据处理

在研究中选择植被盖度表征植物生长状况,计算方式如下:

$$\text{植被盖度} = \text{植物群落地上部分的垂直投影面积} / \text{样方面积} \times 100\%$$

选择常见的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数等指标来描述植物群落的物种多样性,衡量植物群落的恢复效果,计算方法如下:

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数}(H): H = - \sum_{i=1}^S (P_i \times \ln P_i)$$

$$\text{Simpson 优势度指数}(D): D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

式中, S 为样方中的植物物种数, P_i 为第 i 种植物的个体数占样方中总个体数的比例。

数据在 Excel 中进行整理并绘制图表,在 SPSS 中进行数据分析及显著性检验。利用最小显著差异检验(LSD)进行单因素方差分析,比较不同生态恢复措施下植被差异。利用主成分分析(PCA),基于特征值判断主成分,并判断每个主成分中载荷量大的因子。为筛选主要影响因子,降低多因子共线性,使用逐步回归前向选择来筛选模型。

2 结果与分析

2.1 植物物种数

2020 年和 2021 年分别对扎鲁特旗露天煤矿排土场植物生长季的调查发现,排土场植物物种数随着复垦时间增加而不断增多。2020 年,总物种数约为 13 种,其中来自周围原生草原的非人工种植物为 5 种;2021 年

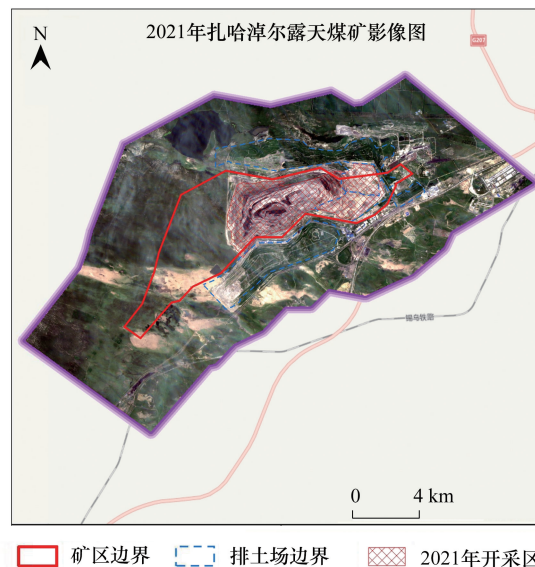


图 1 扎哈淖尔露天煤矿排土场空间分布

Fig.1 The distribution of dump sites of alpine open pit mine in Zhahanaoer

总物种数达到 21 种,非人工种植物为 12 种。2021 年比 2020 年植物物种数显著增加,是由于原生草原非人工种植的物种进入排土场导致调查样地物种总数显著增加($P<0.05$) (图 2)。

进一步比较植物群落中的物种组成。研究发现 2020 年共监测到 44 种植物,2021 年 6 月、7 月到 8 月,分别监测到 53 种、62 种和 71 种,这些植物所属的科也从 2020 年的 13 科,增加到 2021 年 8 月的 24 科(图 3)。

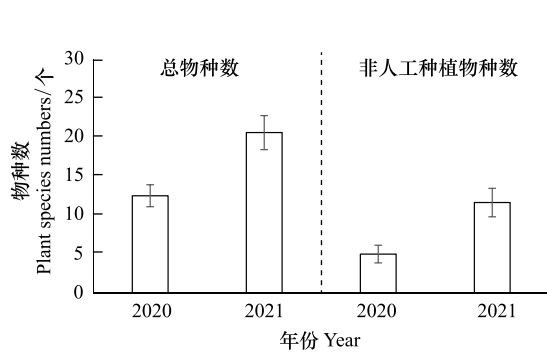


图 2 排土场植物物种总数年际变化

Fig.2 The annual variations of plant species numbers at dump sites

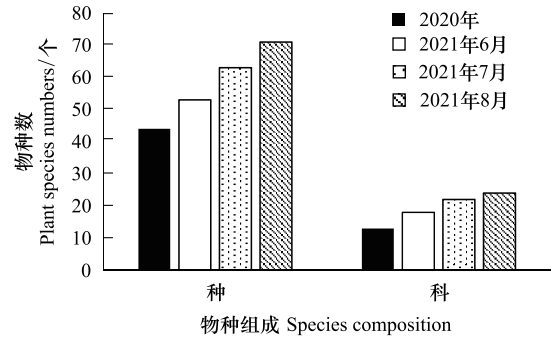


图 3 排土场植物物种组成年际变化

Fig.3 The annual variation of plant community composition at dump sites

分析 2021 年 6—8 月期间植物物种数季节变化(表 1),发现菊科(Compositae)物种数 7 月份比 6 月份增加了 3 种,8 月份比 7 月份增加了 1 种;禾本科(Gramineae)物种数 8 月份比 6 月份增加了 4 种;蔷薇科(Rosaceae)物种数 8 月份比 6 月份增加了 2 种。菊科和禾本科是物种数相对较多的科。此外,7 月份比 6 月份新增加的物种来自香蒲科(Typha)、毛茛科(Delphinium)、白花丹科(Limonium)、百合科(Allium);8 月份比 7 月份新增加了锦葵科(Malvaceae)和桔梗科(Campanulaceae)。这些新增加的植物物种是外围草原进入的非人工种植物种,它们以各种方式逐渐进入矿区排土场复垦区。

表 1 2021 年植物物种数季节变化

Table 1 The seasonal variations of plant species in 2021

序号 No.	科 Family	6 月 June	7 月 July	8 月 August	序号 No.	科 Family	6 月 June	7 月 July	8 月 August
1	菊科 Compositae	13	16	17	14	木贼科 Equisetaceae	1	1	1
2	豆科 Leguminosae	6	6	6	15	苋科 Amaranthaceae	1	2	2
3	禾本科 Gramineae	7	7	10	16	刺戟木科 Didiereaceae	1	1	1
4	藜科 Chenopodiaceae	4	4	4	17	玄参科 Scrophulariaceae	1	1	1
5	蔷薇科 Rosaceae	3	3	5	18	旋花科 Convolvulaceae	1	1	1
6	伞形科 Apiaceae	2	2	2	19	香蒲科 Typha		1	1
7	唇形科 Labiatae	2	2	3	20	毛茛科 Delphinium		1	1
8	十字花科 Brassicaceae	1	2	2	21	白花丹科 Limonium		1	1
9	蓼科 Polygonaceae	3	4	4	22	百合科 Allium		1	1
10	杨柳科 Salicaceae	3	3	3	23	锦葵科 Malvaceae			1
11	牻牛儿苗科 Geraniaceae	1	1	1	24	桔梗科 Campanulaceae			1
12	兰科 Orchidaceae	1	1	1		总物种数 Total species	52	62	71
13	胡颓子科 Elaeagnaceae	1	1	1					

2.2 植被盖度

由图 3 可知,植被盖度在生长季呈现出先增大后减小的趋势变化,最小值在 6 月上旬,盖度为 40%左右,随后植被盖度增加至 9 月下旬,最大值出现在 9 月下旬,盖度为 82%,然后下降至 10 月。其中 6 月上旬到 6 月下旬和 8 月上旬到 8 月下旬的增长速度较快。

在不同的地形条件下,平面和坡面的植被盖度没有显著的差异,但是,平面和坡面的植被盖度均大于田字

格的植被盖度,并且具有显著性($P<0.05$)。其中平面的植被盖度为(69.33 ± 1.90)%,坡面的植被盖度为(69.54 ± 1.72)%,田字格的植被盖度为(63 ± 2.10)%(图4)。

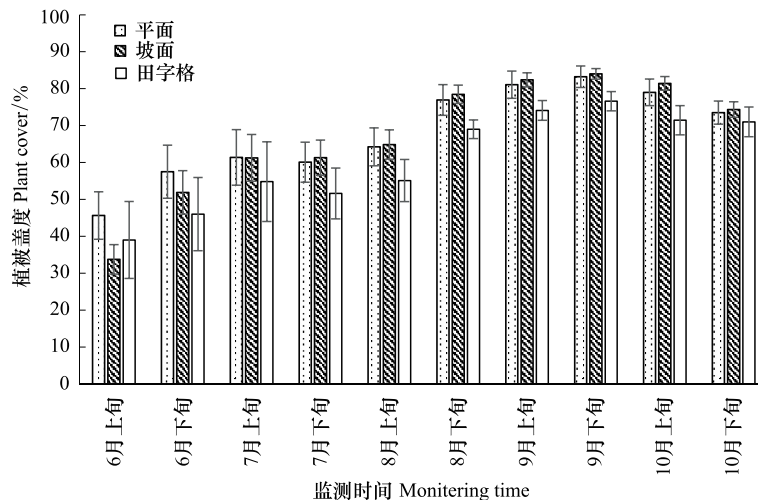


图4 植被盖度在不同地形季节变化

Fig.4 The seasonal variations of plant cover under different terrains

2.3 植物群落多样性

Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数是常见的反映物种多样性的重要指标,Shannon-Wiener 多样性指数越高,表明群落物种不确定性越大,群落多样性越高;Simpson 优势度指数越大,表明植物群落内不同种类生物数量分布越不均匀,优势生物的生态功能越突出。

2.3.1 植物群落多样性季节变化

样地植物群落多样性呈现明显的季节变化规律。生长季不同时期对 Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数的影响均显著($P<0.01$)。Shannon-Wiener 多样性指数的季节变化表现为 6 月<7 月<8 月,在 6 月、7 月、8 月的取值分别为 1.30 ± 0.05 、 1.38 ± 0.04 、 1.68 ± 0.04 ;Simpson 优势度指数的季节变化表现为 6 月>7 月>8 月,在 6 月、7 月、8 月的取值分别为 0.41 ± 0.02 、 0.38 ± 0.01 、 0.29 ± 0.01 (图 5)。

2.3.2 地形对植物群落多样性影响

由图 6 可知,平面、坡面、田字格的 Shannon-Wiener 多样性指数分别为 1.39 ± 0.07 、 1.32 ± 0.06 、 1.04 ± 0.08 ,平面和坡面的 Shannon-Wiener 多样性指数不存在显著差异,但平面和坡面的 Shannon-Wiener 多样性指数均显著大于田字格的 Shannon-Wiener 多样性指数($P<0.05$);平面、坡面、田字格的 Simpson 优势度指数分别为 0.81 ± 0.13 、 0.59 ± 0.08 、 0.78 ± 0.16 ,平面、坡面、田字格的 Simpson 优势度指数不存在显著的差异,可见地形不是影响 Simpson 优势度的主要因素。

当样地为坡面时,分别比较不同坡向与坡度的样地的多样性指数,结果表明坡向对植物多样性的影响不显著,坡度对植物多样性的影响显著。阴坡、阳坡、半阴坡的 Shannon-Wiener 多样性指数分别为 1.52 ± 0.07 、 1.47 ± 0.06 、 1.40 ± 0.08 ;Simpson 优势度指数分别为 0.33 ± 0.02 、 0.34 ± 0.02 、 0.38 ± 0.03 。Shannon-Wiener 多样性指数与 Simpson 优势度指数,阴坡、阳坡、半阴坡的取值均不存在显著差异(图 6)。

坡度对多样性具有显著影响。坡度 $\leq 20^\circ$ 样地的 Shannon-Wiener 多样性指数显著低于坡度 $>20^\circ$ 样地的 Shannon-Wiener 多样性指数($P<0.01$);坡度 $\leq 20^\circ$ 样地的 Simpson 优势度指数显著高于坡度 $>20^\circ$ 样地的 Simpson 优势度指数($P<0.05$) (数据未显示)。同时,不同季节坡度对多样性的影响也有差异(图 6)。6 月份和 7 月份坡度对多样性的影响最显著,8 月份差异不显著,其中 6 月和 7 月的 Shannon-Wiener 多样性指数在 $11^\circ<\text{坡度}\leq 20^\circ$ 显著低于另外的三个梯度,Simpson 优势度指数则正好相反。

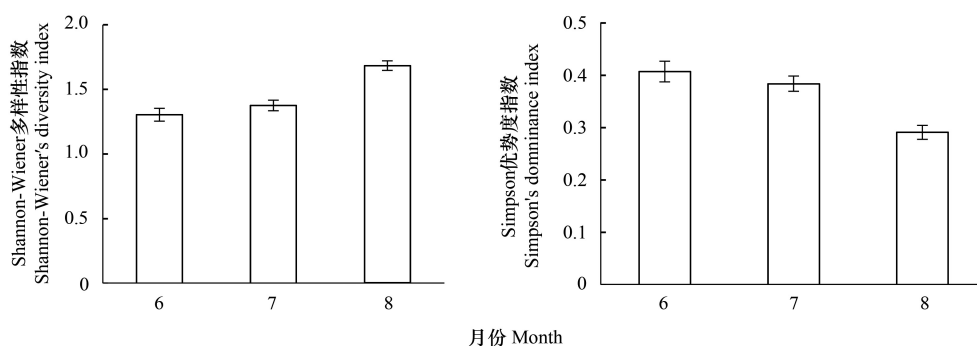


图5 植物群落多样性季节变化

Fig.5 The seasonal variations of plant biodiversity

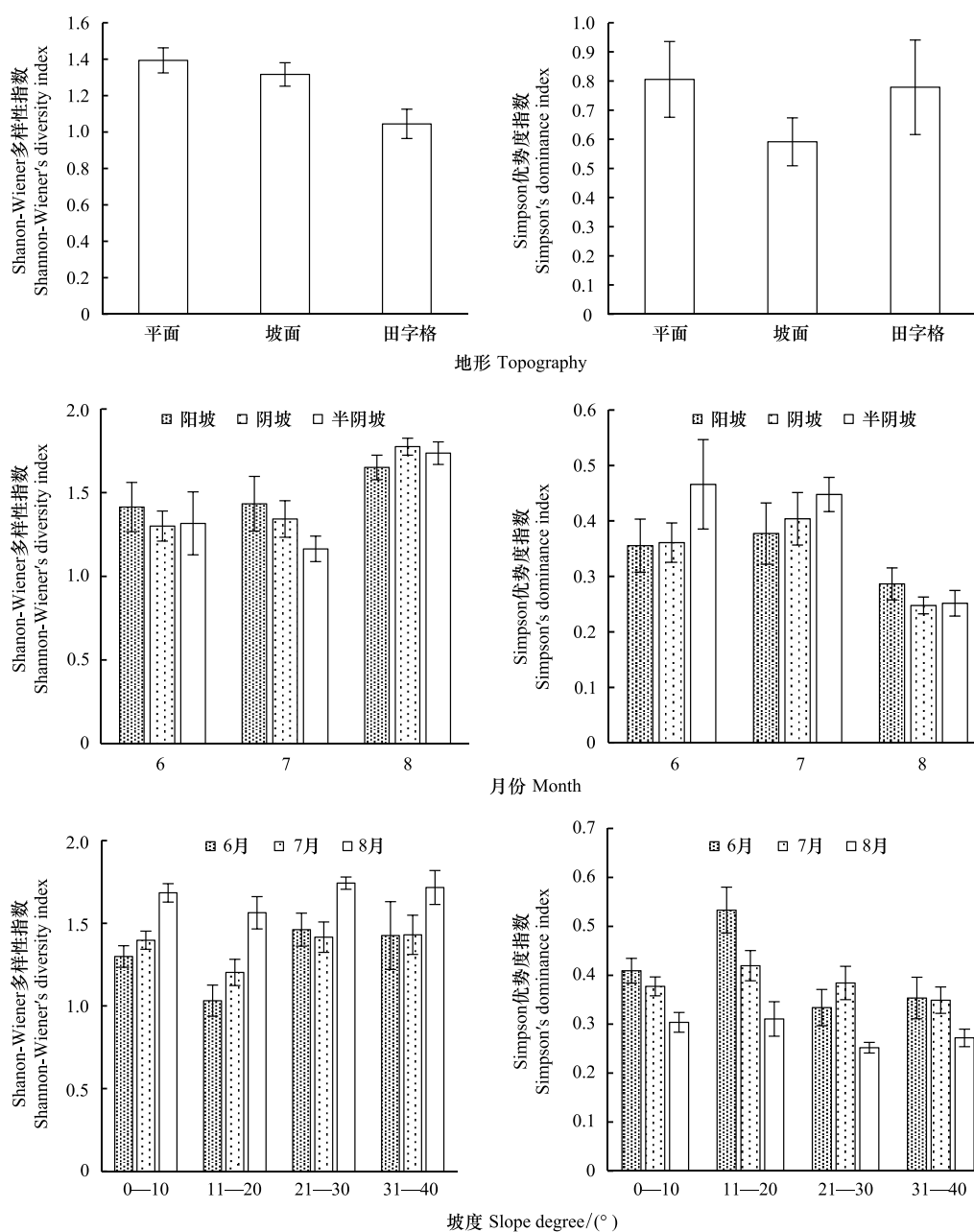


图6 地形因子对植物群落多样性影响

Fig.6 The effects of topographic factors on plant biodiversity

2.3.3 不同播种、施肥和灌溉方式对植物群落多样性影响

在栽植灌木的条件下,比较不同播种方式的样地植物多样性之间的差异(图7)。研究结果表明:喷播加灌木栽植样地的 Shannon-Wiener 多样性指数最高,为 1.67 ± 0.11 ,高于条播加灌木栽植样,以及条播和条播加撒播的播种方式。喷播加灌木栽植样地的 Simpson 优势度指数低于条播加灌木栽植样地的 Simpson 优势度指数,二者分别为 0.29 ± 0.04 与 0.36 ± 0.01 。

不同土壤施肥方式下植物群落多样性没有显著差异,但是复合有机肥的土壤施肥方式下植物群落多样性最高,最均匀(图7)。同样,不同灌溉方式对植物群落多样性的影响差异也不显著(图7)。

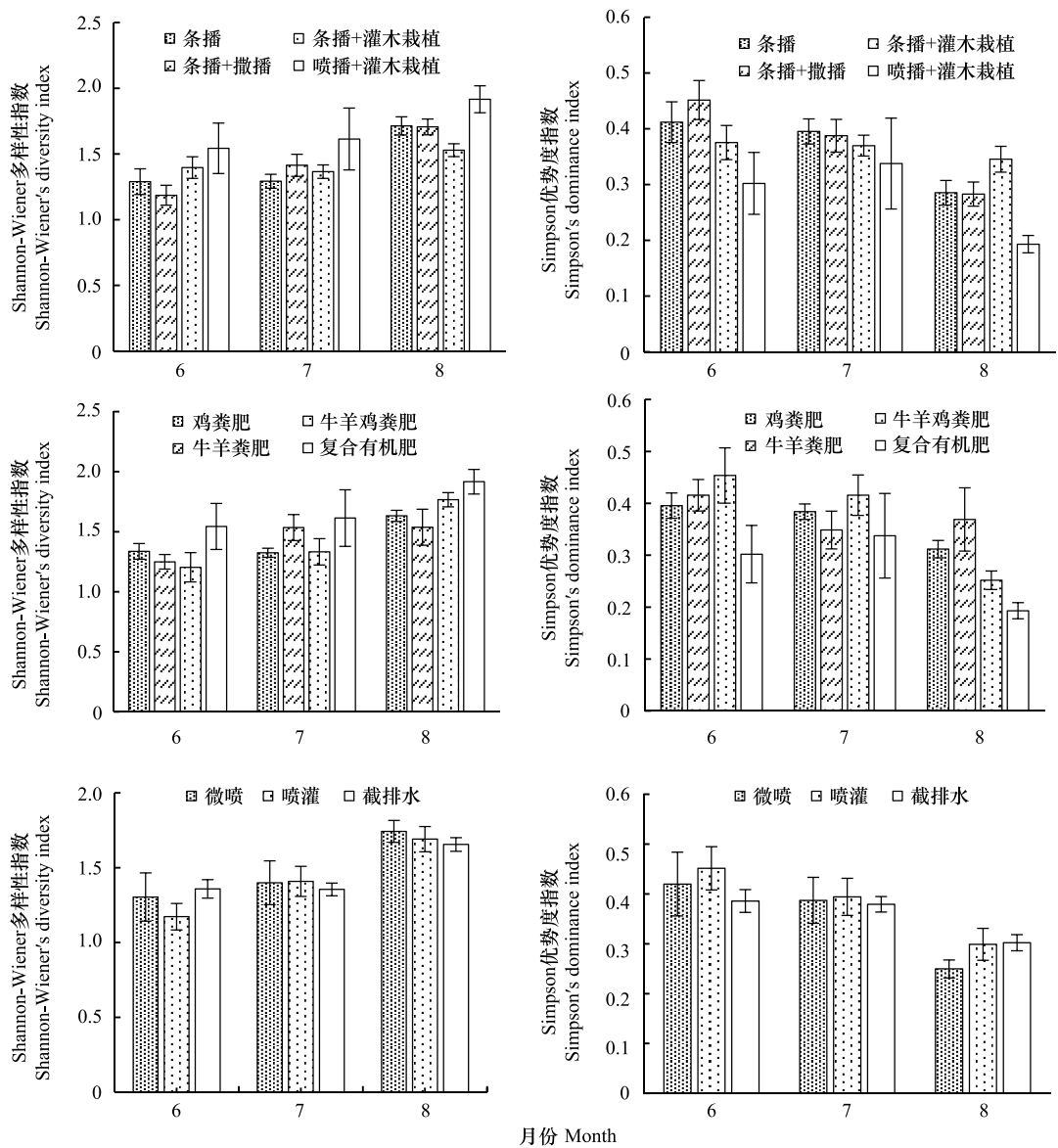


图7 恢复措施对植物群落多样性影响
Fig.7 The effects of planting methods on plant biodiversity

3 讨论

通常情况植物群落组成越丰富,结构越复杂,越稳定。排土场的植物群落物种数、植被盖度和群落多样性随复垦时间增加而显著增加的趋势。其中物种数增加主要是由于非人工种植植物增加导致,总物种数从

2021 年 6 月的 21 种增加到 8 月的 30 种,非人工种植物种数从 6 月的 10 种增加到 8 月的 18 种,分别增长 42.86% 和 80% (data not shown)。排土场植被复垦不仅显著增加了物种的数量,也增加了来自其他不同科属的植物物种。在所有调查的植物群落中,不同季节都是菊科、豆科、禾本科占据优势地位(表 1)。这几个科的植物绝大部分都是先锋物种,特别是豆科植物,本研究中的紫花苜蓿(*Medicago sativa*),沙打旺或红豆草(拉丁名),草木犀(*Melilotus officinalis*),为优势物种,它们能够通过根瘤菌等生物固氮机制,促进植物在土壤贫瘠的地方生存生长,提高生物量。李木楠^[13]对人工植物群落类型、种间关系进行研究发现,豆科植物由于其固氮能力高在矿区恢复中作用突出,人工植物群落的不同配置模式生态效应差异明显。植物生长的生理过程,例如根系分泌不断向土壤中输入有机和无机物质,通过植物凋落物归还,改良土壤的物理、化学和生物性质,进一步促进植物的生长和更新。金立群等^[14]通过对高寒地区矿区植被恢复研究,发现恢复 3 年和 5 年的植被地上生物量显著增加,并且土壤理化性质随恢复时间的增加逐渐改善。郝容等^[15]通过对安太堡矿区多年的植被恢复动态研究表明,人工植被可由单一物种发展为复杂物种组成并逐渐趋于动态平衡。

排土场植被盖度具有季节变化规律,同时受到地形因子的影响。植被盖度是表征植物生长状况的一个重要指标,研究结果表明在田字格种植的植物盖度显著小于平面和坡。田字格是在平地加上“十”字的整地方式,平地种植草本,“十”字上种植灌木。田字格植物群落 Shannon-Wiener 多样性指数显著小于平面和坡面。主要原因可能是田字格虽然有利于截留降雨,但由于排土场土壤在整地过程中反复碾压使土壤坚硬紧实而干燥,入渗差,在夏季短时急降雨事件易导致季节性积水。因此田字格在高寒露天煤矿排土场初期植被恢复是否适合还有待进一步深入研究。坡面的 Simpson 优势度指数小于平面和田字格,但平面、坡面、田字格的 Simpson 优势度指数不存在显著差异,表明这三种整地方式对植物群落不同种类生物数量分布较均匀,优势物种的生态功能不突出。

调查样地中外排土场排弃物料主要为深层地下沙土、砂岩、页岩,物料自然安息角 33—35°,为改善施工条件、提高土壤压实度,扎哈淖尔露天煤矿采用履带推土机将排土场台阶坡面角降缓至 20°左右。目前可以看到削坡工程措施有利于植被恢复,因为 2021 年的调查样地大于 20°坡面显著少于 2020 年样地,这也是 2021 年监测的植物物种数、盖度、群落多样性高于 2020 年主要因素之一。但同时,也可能是我们研究中没有发现坡度显著影响植物群落多样性的原因之一。由此可见,工程措施在植被恢复过程中的作用显著,适当削坡有利于植物生长、盖度增加以及物种多样性提高。另外,本研究中坡向对植物群落多样性的影响不显著,多样性指数没有受到坡向的影响。这可能与施工过程中不同坡向种子种类与播量完全相同有关。一般来说不同坡向水热条件具有一定差异^[16]。金立群等^[17]对青海江仓矿区 4 个坡面(南坡、北坡、东南坡与东坡)研究发现不同坡向植被高度、盖度、地上生物量、生殖枝数量具有显著差异,东南坡与南坡(阳坡)长势较好,因此需要在人工建植初期应加大阴坡的种子播量。这对扎哈淖尔矿区的植被恢复也有一定参考价值。

大量的以植被建设为主的生态恢复研究表明,生物多样性的恢复是区域生态健康和实现可持续发展的重要指征^[18-19]。生物多样性不仅影响着生态系统生产力,同时也关系着生态系统的稳定性^[20]。因此,探讨人工恢复过程中植物物种多样性的变化,有利于正确认识人工植被恢复的生态学规律。不同播种方式也影响植物群落多样性,喷播加灌木种植方式下植物群落多样性指数高于条播加灌木栽植方式,可见选择不同人工种植方式对排土场植被恢复效果具有重要影响。排土场的植被恢复在初期是人工恢复为主,生态修复方案以及人工管理措施决定了植被恢复的程度和效果。植被恢复是一个长期的过程,随着复垦时间的增加,先锋植物通过生长不断改变土壤物理、化学和生物学性质,这些土壤性质的改变反过来又会影响地上植被的生长和群落组成。但是,不同植被类型对土壤物理性质^[21-23]、土壤酶活性^[24-26]、土壤微生物群落组成和多样性^[27-28],都存在显著差异,这种地上生态系统和地下生态系统紧密相关的植物-土壤反馈作用机理仍需要未来长期监测和进一步研究。

主成分分析法可以通过降维的方式将影响植被恢复效果的因子总结归纳。研究结果由表 2 可知,研究区植被恢复的物种数、盖度和多样性指数等变量的 95.93% 的信息可由前 3 个特征值的主成分反映(表 2),即对

前 3 个主成分进行分析已经能够反映数据的大部分信息。根据绝对值最大化原则进行元素归类,主成分 I 的方差贡献率为 57.3%,其中灌溉方式、施肥方式和年际变化具有较高的正载荷,反映了生态恢复的具体人工措施(表 3);主成分 II 的方差贡献率为 24.52%,坡向和坡度在该主成分中具有较高的正载荷,反映了生态恢复样地的地形条件;主成分 III 的方差贡献率为 14.11%,季节变化在该主成分中具有较高的正载荷,反映了实地调查生态恢复效果的时间因素(表 3)。

表 2 影响因素主成分分析的特征值和贡献率

Table 2 Total variance and contribution rate of principle component analysis

主成分 Principal component	总方差解释变量 Total variance explained	各主因子的方差贡献率 Variance contribution rate of principle factor /%	累积贡献率 Total cumulative rate/%
1	4.01	57.30	57.30
2	1.72	24.52	81.82
3	0.99	14.11	95.93

表 3 影响因素主成分分析的因子载荷值

Table 3 Load values of factors of principle component analysis

影响因素 Factor	主成分 I Principal component I	主成分 II Principal component II	主成分 III Principal component III
灌溉方式 Irrigation method	0.992	0.089	-0.034
施肥方式 Fertilization method	0.991	0.098	-0.035
年际变化 Interannual variation	0.985	0.058	-0.028
坡向 Slope aspect	-0.149	0.925	-0.022
坡度 Slope	-0.215	0.911	-0.02
季节变化 Seasonal variation	0.121	0.05	0.991
播种方式 Sowing method	-0.996	-0.086	0.032

经过长期自然恢复的植物群落,物种丰富,群落具有较高稳定性。已有研究表明人工恢复虽然短时间内能改善矿区环境,但从长远来看人工恢复植物种类少,抵抗外界干扰能力差,长期的人工恢复也可能会造成植被退化^[29—30]。但是排土场如果仅依赖自然恢复会需要很长的时间恢复为稳定的群落,因此需要人工促进的措施加快植被恢复进程。本研究发现原生草本植被群落的物种正逐渐进入人工恢复为主的排土场,增加了植物群落多样性和稳定性。由此可见,排土场的植物群落在人工措施的基础上沿着正向演替的方向发展。但是矿区环境恶劣,植被自然恢复效果差,恢复需要更长的时间^[31]。通过逐步回归分析,季节变化显著($P<0.05$)影响植被恢复,其他因素没有达到显著性水平。不同恢复时间,即年际变化,显著影响群落物种数,而季节变化(月变化)是影响植被恢复的主要因素。地形显著影响植被盖度,与坡向相比,坡度对植被恢复的影响更大,矿区的削坡整地措施非常有效。另外喷播加灌木栽植的播种方式有利于提高植物群落多样性。因此,扎哈淖尔高寒露天煤矿的排土场植被恢复初期,不同生态恢复措施的选择具有重要的意义。首先应遵循植物生长规律和物候变化,坡度不宜超过 20°,多采用喷播和灌木相结合的播种方式进行人工植被恢复。还要考虑如何人工与自然恢复相结合,近期与远期恢复目标相结合,探索更适宜的恢复措施,加速矿区生态恢复。

参考文献 (References):

[1] 田会, 郑友毅. 我国露天开采工艺发展初探. 煤炭工程, 2004, 36(4): 4-9.
[2] 卞正富. 我国煤矿区土地复垦与生态重建研究. 资源·产业, 2005, 7(2): 18-24.
[3] 梁洪有, 陈俊杰. 煤矿开采对土地资源的破坏及对策研究. 煤炭技术, 2006, 25(6): 1-3.
[4] 吴玉生, 赵亚平, 杨亚静. 煤矿开采对地下水资源的影响. 能源环境保护, 2004, 18(6): 1-3.
[5] 邹厚远, 程积民, 周麟. 黄土高原草原植被的自然恢复演替及调节. 水土保持研究, 1998, 5(1): 126-138.
[6] 王改玲, 白中科. 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, 2002, 9(1): 38-40.

- [7] 李娟, 赵竞英, 陈伟强. 矿区废弃地复垦与生态环境重建. 国土与自然资源研究, 2004(1): 27-28.
- [8] 牛星, 蒙仲举, 高永, 蓝登明. 伊敏露天煤矿排土场自然恢复植被群落特征研究. 水土保持通报, 2011, 31(1): 215-221.
- [9] 韩煜, 赵伟, 张淇翔, 王琦, 史娜娜, 肖能文, 全占军. 不同植被恢复模式下矿山废弃地的恢复效果研究. 水土保持研究, 2018, 25(1): 120-125.
- [10] 杨勤学, 赵冰清, 郭东罡. 中国北方露天煤矿区植被恢复研究进展. 生态学杂志, 2015, 34(4): 1152-1157.
- [11] 赵冰清. 半干旱黄土区大型露天煤矿植被演替规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [12] 珊丹, 邢恩德, 荣浩, 刘艳萍, 梁占岐. 草原矿区排土场不同植被配置类型生态恢复. 生态学杂志, 2019, 38(2): 336-342.
- [13] 李木楠. 阳泉矿区煤矸石山人工植物群落生态效应研究[D]. 太原: 山西大学, 2017.
- [14] 金立群, 李希来, 孙华方, 杨鑫光, 张静. 不同恢复年限对高寒露天煤矿区渣山植被和土壤特性的影响. 生态学杂志, 2019, 38(1): 121-128.
- [15] 郝蓉, 白中科, 赵景逵, 彭少麟, 宋艳敏. 黄土区大型露天煤矿废弃地植被恢复过程中的植被动态. 生态学报, 2003, 23(8): 1470-1476.
- [16] Pan J, Bai Z K, Cao Y G, Zhou W, Wang J M. Influence of soil physical properties and vegetation coverage at different slope aspects in a reclaimed dump. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(30): 23953-23965.
- [17] 金立群, 李希来, 孙华方, 张静, 周伟. 高寒矿区排土场不同坡向植被和土壤特征研究. 土壤, 2020, 52(4): 831-839.
- [18] 李新荣, 肖洪浪, 刘立超, 张景光, 王新平. 腾格里沙漠沙坡头地区固沙植被对生物多样性恢复的长期影响. 中国沙漠, 2005, 25(2): 173-181.
- [19] 赵洋, 吴攀, 胡宜刚, 张志山. 河套灌区九排域农田排水沟植物物种多样性. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2797-2802.
- [20] Li X R, Xiao H L, Zhang J G, Wang X P. Long-term ecosystem effects of sand-binding vegetation in the tengger desert, Northern China. Restoration Ecology, 2004, 12(3): 376-390.
- [21] 李玉婷, 曹银贵, 王舒菲, 罗古拜, 王金满, 周伟, 白中科. 黄土露天矿区排土场重构土壤典型物理性质空间差异分析. 生态环境学报, 2020, 29(3): 615-623.
- [22] 肖礼, 赵俊峰, 黄懿梅, 马任甜, 方瑛, 安韶山. 永利露天煤矿排土场不同植被类型下土壤理化性质和酶活性研究. 水土保持研究, 2016, 23(4): 89-93.
- [23] 唐骏, 党廷辉, 薛江, 文月荣, 徐娜, 吴得峰. 植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响. 生态学报, 2016, 36(16): 5067-5077.
- [24] Asemaninejad A, Munford K, Watmough S, Campbell D, Glasauer S, Basiliko N, Mykytczuk N. Structure of microbial communities in amended and unamended acid-generating mine wastes along gradients of soil amelioration and revegetation. Applied Soil Ecology, 2020, 155: 103645.
- [25] 张鹏, 赵洋, 黄磊, 胡宜刚, 韩旭. 植被重建对露天煤矿排土场土壤酶活性的影响. 生态学报, 2016, 36(9): 2715-2723.
- [26] 贾瑞龙, 米俊珍, 周永利, 刘景辉. 植被复垦对露天煤矿排土场土壤理化性质和土壤酶活性的影响. 环境保护与循环经济, 2019, 39(3): 53-57, 62.
- [27] 张燕燕, 曲来叶, 陈利顶, 卫伟. 黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤微生物特性. 应用生态学报, 2010, 21(1): 165-173.
- [28] 张鹏飞. 平朔矿区不同植被恢复方式下的土壤微生物群落结构差异研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [29] 胡婵娟, 郭雷. 植被恢复的生态效应研究进展. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1640-1646.
- [30] 陈皓. 抚顺西露天矿区植物群落与土壤特征研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [31] 唐骏. 黄土区露天煤矿排土场植被恢复的土壤环境效应[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2015.