

# 乌海矿区矸石山边坡植被重建初期物种多样性及群落稳定性

刘莹<sup>1,2</sup>, 许丽<sup>1,2</sup>, 丰菲<sup>1,2</sup>, 杨宇平<sup>1,2</sup>, 张丽娜<sup>1,2</sup>

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 荒漠生态系统保护与修复国家林业局重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018)

**摘要:** [目的] 针对西北干旱区煤矸石山边坡植被重建初期, 探究不同建植年限群落特征的变化规律, 为乌海市矿区生态重建的中、后期工作提供依据。[方法] 以乌海市矿区美方煤矸石山为研究对象, 采用野外样方调查取样的方法, 对比分析了矸石山植被重建初期的植物生长状况与群落稳定性。[结果] ①研究区植被重建过程中, 物种数量明显增加。自然侵入植物种在重建 2 a 时仅有 4 种, 建植 3 a 增加至 6 种, 建植 4 a 已增加至 7 种。不同植被重建年限群落中白茎盐生草 (*Halogeton arachnoideus*) 均处于优势地位, 表明群落正在进行正向演替过程。②随重建年限从 2 a 增加至 4 a, 植被平均盖度、地上生物量、群落丰富度指数均增加了 1.5 倍左右, 表明群落结构逐步稳定。③煤矸石山, 在植被重建 2~4 a 时, 群落正处于演替初期, 群落相似性系数逐年降低, 群落结构趋于复杂化, 但仍处于不稳定状态。[结论] 在矸石山后续的恢复中, 在种植矿区典型复垦植物种, 例如豆科、禾本科、菊科等植物时, 应适当促进适应当地条件的本地物种自然定植, 并且通过种植演替后期的本土植物种类在煤矸石山保留当地基因库。

**关键词:** 煤矸石山; 植物种多样性; 群落稳定性; 乌海矿区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)01-0190-07

中图分类号: X171.4

**文献参数:** 刘莹, 许丽, 丰菲, 等. 乌海矿区矸石山边坡植被重建初期物种多样性及群落稳定性[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 190-196. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.01.027; Liu Ying, Xu Li, Feng Fei, et al. Species diversity and community stability at early stage of vegetation reclamation in gangue hill slope of Wuhai mining area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 190-196.

## Species Diversity and Community Stability at Early Stage of Vegetation Reclamation in Gangue Hill Slope of Wuhai Mining Area

Liu Ying<sup>1,2</sup>, Xu Li<sup>1,2</sup>, Feng Fei<sup>1,2</sup>, Yang Yuping<sup>1,2</sup>, Zhang Lina<sup>1,2</sup>

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Key Laboratory of Desert Ecosystem

Conservation and Restoration, State Forest Administration of China, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

**Abstract:** [Objective] The variation laws of community characteristics with different planting years were studied in accordance with the initial stage of vegetation restoration of the slope of a coal gangue heap in the arid area of Northwest China to provide the basis for ecological restoration in Wuhai mining area. [Methods] The Meifang coal gangue heap in Wuhai mining area was taken as the research object, and the growth status of vegetation and community stability in the initial stage of vegetation restoration were compared and analyzed by using the method of sampling and surveying the field samples. [Results] ① The number of species increased significantly during the vegetation restoration. There were only four species of natural invasive plants in the second year of restoration; then, the number increased to six in the third year. In the fourth year, the number of species increased to seven, and the dominant species were *Halogeton arachnoideus*. The number of natural invasive plant species increased gradually, indicating that the community was undergoing a

收稿日期: 2020-07-27

修回日期: 2020-11-02

资助项目: 国家重点研发计划项目“西北干旱荒漠区煤炭基地生态安全保障技术”(2017YFC0504400), “采煤迹地植被重建与保育技术研究”(2017YFC0504402)

第一作者: 刘莹(1996—), 女(汉族), 内蒙古自治区乌海市人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。Email: 1624849040@qq.com.

通讯作者: 许丽(1965—), 女(汉族), 内蒙古自治区巴彦淖尔市人, 教授, 博士, 主要从事矿区生态修复研究。Email: xuli@163.com.

positive succession process. ② The average vegetation coverage, superterrane biomass, and richness index increased by 1.5 times, with an increase in the restoration years from two to four, indicating that the community structure was gradually becoming stable. ③ The community of the coal gangue hill was in the initial stage of succession when the vegetation was reconstructed for two to four years. The similarity coefficient of community decreased year by year, and the community structure tended to be complicated, but it was still in an unstable state. [Conclusion] In the following vegetation restoration of coal gangue hill, naturally permanent planting of local species that are adaptive for local conditions should be properly promoted when planting typical reclamation plant species, such as Leguminosae, Gramineae, and Compositae. In addition, the local gene bank should be preserved in the coal gangue hill by planting native plant species belonging to the climax stage of succession.

**Keywords:** coal gangue hill; species diversity; community stability; Wuhai mining area

乌海矿区位于内蒙古自治区西南部,辖海勃湾、乌达、海南 3 个区,煤炭资源相对丰富,是全国二十个焦煤基地之一<sup>[1]</sup>。截至 2012 年底,乌海市洗煤行业规模已突破年入洗原煤  $1.00 \times 10^8$  t。由于煤质原因,乌海洗选出的矸石量约占入洗原煤量的 30%,目前乌海的煤矸石除少部分用于矸石电厂发电和制砖,部分分层覆土压实填埋,大部分露天堆存,对当地生态环境造成了不可逆的影响<sup>[2]</sup>。近 5 a 来,乌海市海勃湾区煤炭局开展了矿区环境的综合治理项目,项目实施后对于改善矿区周围生态环境有积极作用。

植物物种多样性特征能从多尺度、多层次的方向出发反映研究区的植物组成变化及生长情况,对于生物多样性的保护和矿区生态系统的恢复具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。群落稳定性能够定量的描述植物群落对外界环境压力与人为扰动的抵抗能力的强弱<sup>[5]</sup>,煤矸石山植被重建初期植物种类稀少、群落结构单一,且矸石山在植被重建初期受极端的非生物条件(例如,缺水,低营养物质,高温,高盐度)的影响最为严重<sup>[6]</sup>,其土体几乎不含有来自植物的有机碳,土体中氮和磷的含量也很低,这些都限制了植物群落的稳定<sup>[7]</sup>。

戴泉玉等<sup>[8]</sup>人在黄土高原地区公路边坡对植物群落演替初期的研究中发现,随着时间的推移,坡面生境条件变得利于本地物种的侵入,群落的自然演替正式开始。该阶段各项群落指标开始上升,生态效果和防护功能开始恢复。当坡面形成一个相对稳定的群落时,便是初期演替阶段的结束,而具体时间长度的确定还需要进一步的持续观测。吕春娟等<sup>[9]</sup>在对山西省平朔矿区的研究结果显示,在植被恢复的初期阶段,植物群落结构和物种组成单一,随着演替的进行,当地原生物种大量入侵,土壤种子库逐渐形成,群落的物种丰富度、多样性和均匀度指数呈增加趋势。郝婧等<sup>[10]</sup>对煤矸石场草本植物自然恢复初期生态绩效评价的结果表明,相较于 1 a 恢复期,煤矸石场植被恢复初期植物群落基本特征等在 5 a 恢复期时均

达到“优”级水平。

目前,已有许多学者对煤矿废弃地植被恢复过程中植物群落结构特征做过大量研究,但由于多数矿区在修复前期缺乏系统的监测数据,一些生态修复经验缺乏科学的数据支撑。为了科学记录不同恢复阶段的生态修复效果,从矿区生态修复初期开展生物多样性与群落稳定性研究,对于客观评价矿区生态修复的短期、中期和长期效应具有重要意义<sup>[11]</sup>。因此,本研究基于西北干旱区煤矸石山植被重建初期,探究不同建植年限的物种多样性与其群落稳定性等特征的变化规律,旨在为乌海矿区的生态恢复提供依据。

## 1 研究区概况

研究对象选择在内蒙古自治区乌海市海勃湾区美方矸石山,地理坐标为  $39^{\circ}2'10''-39^{\circ}54'13''N$ ,  $106^{\circ}35'12''-107^{\circ}10'34''E$ ,海拔为 1 284 m,矸石山由鼎盛洗煤厂排出的矸石形成,排弃已 7 a,现为乌海市矿区环境综合治理区。

研究区属于半沙漠干旱高原大陆性气候区,极端最高气温  $40.2^{\circ}C$ ,极端最低气温  $-36.6^{\circ}C$ ,年降雨量 166.9 mm,年蒸发量 3 500 mm,地区土壤类型主要为沙壤土、棕钙土、灰漠土等;地带性植被以荒漠植被型、干旱草原植被型、沙生植被型、草原化荒漠植被型等植被类型为主<sup>[12]</sup>。原生植被主要有四合木(*Tetraena mongolica*)、霸王(*Sarcozygium xanthoxylon*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、甘蒙锦鸡儿(*Caragana opulens*)、红砂(*Reaumuria songarica*)等灌木树种,芨芨草(*Achnatherum splendens*)、蓼子朴(*Inula salsoloides*)、白茎盐生草(*Halogeton arachnoideus*)、蝎虎驼蹄瓣(*Zygophyllum mucronatum*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、蒙古韭(*Allium mongolicum*)等草本<sup>[13]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 样地设置

调查取样于 2019 年 8 月进行,美方煤矸石山人工植被已重建 4 a。有两级边坡进行了植被重建。人工整坡,坡度约 33°,每级边坡坡长约 20 m。台阶上马道排水渠与坡面之间、山体坡脚处都铺设由一层土工袋构筑有的柔性坡脚固土措施。边坡覆土土壤均来自矿区周边的沙质土壤,厚 30—50 cm,材料配比为沙土:洗选矸石渣=8:2,人工植被配置模式为沙打旺(*Astragalus adsurgens*)45%+紫花苜蓿(*Medicago sativa*)45%+大狗尾草(*Setaria faberii*)10%,种植方式为撒播。边坡布设有微喷灌系统。在已进行植被重建的边坡上选取矸石山植被重建 2,3,4 a 的区域。在两级边坡坡面上、中、下部位分别设置 5 m×5 m 的样地,再对各样地内存在的草本层以五点取样法,设置 5 个 1 m×1 m 的样方重复,土壤性质如表 1 所示。

表 1 美方煤矸石山表层土壤基质理化性质特征

容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	砾石含量 >2 mm/%	田间持 水量/%	有机质含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	pH 值
1.52	0.63	9.93	8.99	7.79

### 2.2 群落组成调查与室内试验

群落组成调查包括群落盖度、植物种类、物种数量与高度,并将样方内植被地上部分全部收获称重,带回实验室 85℃下烘干至恒重,测干重率。以样方的平均值推算植被生物量。通过植物标本采集、鉴定、统计,建立数据库。以数理统计方法对所得原始数据资料进行处理、归类。

### 2.3 群落特征计算

(1) 重要值。根据所调查群落的特征数据,计算其重要值,以重要值确定群落主要成分,并以优势植物来区分群落,分析其动态变化。计算公式如下:

$$\text{草本层重要值} = \frac{\text{相对密度} + \text{相对盖度} + \text{相对高度} + \text{相地生物量}}{4} \quad (1)$$

式中:相对密度=某一植物种的个体数/全部植物种的个体数×100%;相对盖度=某一植物种的盖度/群落中所有种分盖度之和×100%;相对高度=某一植物种的高度/全部种的高度之和×100%;相对生物量=某一植物种的生物量/全部种的生物量之和×100%。

(2) 多样性指数。选择以下指标来衡量群落物种多样性<sup>[1]</sup>:

Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ ):

$$H' = -\sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

Simpson 多样性指数( $D$ ):

$$D = 1 - \sum (P_i)^2 \quad (3)$$

Pielou 均匀度指数( $J_p$ ):

$$J_p = -(\sum P_i \ln P_i) / \ln S \quad (4)$$

Alatalo 均匀度指数( $E_a$ ):

$$E_a = [(\sum p^i)^{-1} - 1] / [\exp(-\sum P_i \ln P_i)^{-1}] \quad (5)$$

Margalef 丰富度指数( $M_a$ ):

$$M_a = (S^{-1}) / \ln N \quad (6)$$

Patrick 丰富度指数( $P_a$ ):

$$P_a = S \quad (7)$$

式中: $S$ 表示物种数目; $N$ 表示所有物种个体总数; $P_i$ 表示在本研究中用综合特征量的重要值与样地总的重要值的比值代替。

(3) 群落相似性。群落相似性采用 Whittaker's 相似性系数<sup>[14]</sup>,计算公式如下:

$$PS = 1 - 0.5 \sum |a_i - b_i| \quad (8)$$

式中: $S$ 为植物群落 A 和群落 B 中所记录的物种总数; $a_i$ 为种  $i$  在群落 A 全部个体中的比例; $b_i$ 为种  $i$  在群落 B 全部个体中的比例。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同建植年限植物群落组成特征

(1) 群落科属特征。由表 2 可知,在乌海市美方矿区所有调查样地共出现植物 11 种,分属 4 科 11 属,其中藜科、豆科植物约占到了植物总数的 70%。对于植被重建 2 a 的矸石山,物种组成简单,为 4 科 7 种,对于植被重建 3 a 的矸石山,物种明显增加,为 4 科 9 种,集中于菊科与禾本科。对于植被重建 4 a 的矸石山,物种进一步丰富,为 4 科 10 种,菊科植物退化一种,藜科植物比重增大。

(2) 群落物种组成及其重要值。不同样地植物群落物种组成及其重要值见表 3。在所调查的样地中,除人工种植植被沙打旺、紫花苜蓿和大狗尾草外另有 4 至 7 自然植物种侵入。建植 2 a 的矸石山边坡共有 7 种植物,自然侵入植物 4 种,其中一年生植物种 3 种,占 75%。自然侵入的植物种重要值共占 40.27%,有白茎盐生草和雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)重要值共占 24.73%,以及少数地肤(*Kochia scoparia*)、阿尔泰狗娃花(*H. altaicus*)。建植 3 a 的矸石山边坡共出现植物 9 种,自然侵入植物 6 种,重要值共占 53.08%,有白茎盐生草、地肤及狗尾草(*S. viridis*),重要值共占 38.08%,还有少数阿尔泰狗娃花、雾冰藜和大籽蒿(*Artemisia sieversiana*),自然侵

入的一年生植物种有 5 种,占 83%。建植 4 a 的矽石山边坡出现了 10 种植物,自然侵入植物 7 种,其中一年生植物种有 5 种,占 71%。自然侵入的植物种重要值共占 46.42%,白茎盐生草与地肤处于优势地位,重要值共占 22.17%,大狗尾草、雾冰藜、狗尾草、阿尔泰狗娃花、沙生冰草(*Agropyron desertorum*)、藜(*Chenopodium album*)占少数。

表 2 研究区不同重建年限样地植物群落种类组成科属特点

植物科名	不同重建年限样地		
	2 a	3 a	4 a
藜科(Chenopodiaceae)	3	3	4
豆科(Leguminosae)	2	2	2
菊科(Compllsitae)	1	2	1
禾本科(Gramineae)	1	2	3
合计	7	9	10

表 3 研究区不同样地植物群落物种组成及其重要值

植物种	生活型	不同重建年限群落重要值		
		2 a	3 a	4 a
沙打旺( <i>Astragalus adsurgens</i> )	多年生草本	27.78 <sup>a</sup>	22.14 <sup>c</sup>	26.61 <sup>b</sup>
紫花苜蓿( <i>Medicago sativa</i> )	多年生草本	17.34 <sup>b</sup>	17.18 <sup>b</sup>	18.74 <sup>a</sup>
大狗尾草( <i>Setaria faberii</i> )	一年生草本	14.59 <sup>b</sup>	7.59 <sup>c</sup>	8.24 <sup>c</sup>
白茎盐生草( <i>Halogeton arachnoideus</i> )	一年生草本	13.29 <sup>b</sup>	13.96 <sup>b</sup>	11.21 <sup>c</sup>
雾冰藜( <i>Bassia dasyphylla</i> )	一年生草本	11.44 <sup>a</sup>	3.72 <sup>b</sup>	3.13 <sup>b</sup>
地肤( <i>Kochia scoparia</i> )	一年生草本	9.55 <sup>c</sup>	12.31 <sup>b</sup>	10.96 <sup>bc</sup>
阿尔泰狗娃花( <i>Heteropappus altaicus</i> )	多年生草本	5.99 <sup>a</sup>	8.28 <sup>a</sup>	6.73 <sup>a</sup>
狗尾草( <i>Setaria viridis</i> )	一年生草本		11.81 <sup>a</sup>	5.52 <sup>b</sup>
大籽蒿( <i>Artemisia sieversiana</i> )	一年生草本		3.01 <sup>a</sup>	
沙生冰草( <i>Agropyron mongolicum</i> )	多年生草本			5.36 <sup>a</sup>
藜( <i>Chenopodium album</i> )	一年生草本			3.51 <sup>a</sup>

注:同行不同小写字母表示差异显著( $p < 0.5$ )。

### 3.2 不同建植年限植物群落多样性特征

由图 1 可以看出不同样地植物群落生长指标变化。植被盖度与地上生物量都以植被重建 4 a 的矽石山最高,平均盖度较之建植 2,3 a 矽石山增加了 40.0%和 86.6%,而地上生物量仅高于重建 2 a。植被密度与高度以植被重建 3 a 的矽石山最高,较于重建 2 a 和重建 4 a 的边坡,增加了 30.1%和 28.1%,高度则仅高于重建 2 a。

不同样地群落物种多样性指数见图 2。由图 2 可知,Simpson 多样性指数与 Pielou 均匀度指数在不同建植年限矽石山之间均不显著。Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数与 Patrick 丰富度指数均呈上升趋势,在重建 4 a 时的矽石山边坡上均表现为高于重建 2 a 与重建 3 a 的边坡,这两个样地较之  $CJ_4$  分别减少了 15.26%,44.44%和 40.0%。Alatalo 均匀度指数表现为重建 3 a 的矽石山边坡高于其他两个样地,较之  $CJ_2$  增加了 15.32%。

Simpson 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Patrick 丰富度指数、地上生物量与平均盖度均为建植 4 a 最大,说明矽石山建植 4 a 植被生长状况最好。

### 3.3 不同建植年限植物群落相似性

不同样地植物群落的相似性系数见表 4。不同重建年限矽石山之间植物群落的相似性系数变化幅度

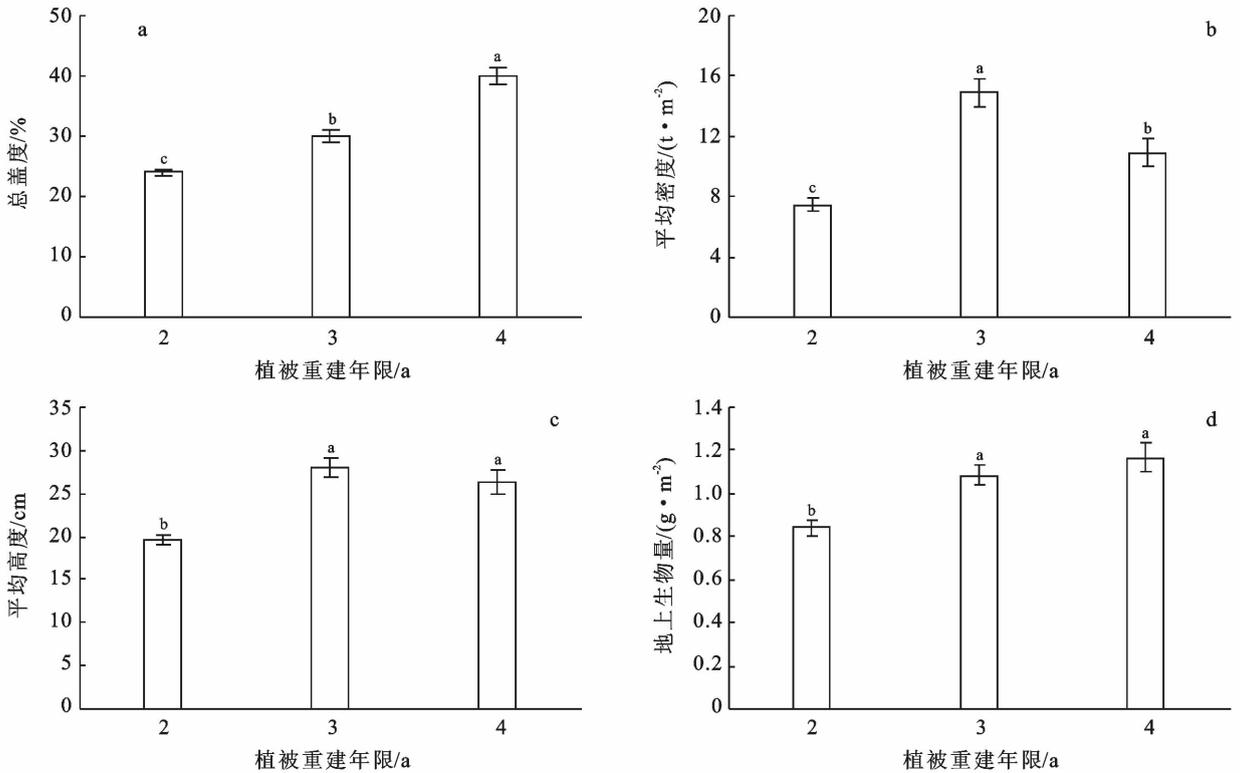
不大,但在逐年降低。在 0.096 9 至 0.026 7 之间,植被重建 2 a 和重建 3 a 群落的相似性系数为 0.747 5,重建 3 a 和重建 4 a 的群落的相似性系数为 0.685 8。可知煤矽石山在植被重建的初期,物种个体数量增减变化不明显,恢复初期群落间变异性较大,群落不稳定。且随植被重建年限增加,群落的结构趋于复杂化。

表 4 研究区不同重建年限样地植物群落的相似性系数

不同重建年限	2 a	3 a	4 a
2 a	1.000 0		
3 a	0.782 7	1.000 0	
4 a	0.756 0	0.685 8	1.000 0

### 3.4 不同建植年限植物群落稳定性

群落稳定性的计算在 Origin 2018 中进行,方法采用郑元润<sup>[15]</sup>改进后的 M. Godron 稳定性测定方法,将植物群落中所有物种的盖度降序排列,计算其累积相对盖度与植物种类倒数累积,对应画散点图并拟合为平滑曲线,以直线方程在图上绘制一条直线,求与曲线交点(图 3)。其中,20/80 为群落的稳定点,植物种类倒数累积百分数和累积相对盖度的比值越接近 20/80,群落就越稳定,反之就越不稳定。散点图拟合平滑曲线模型为  $y = ax^2 + bx + c$ ,直线方程为  $y = 100 - x$ 。



注:不同小写字母表示差异显著,  $p < 0.05$ 。下同。

图 1 研究区不同样地植物群落生长指标变化

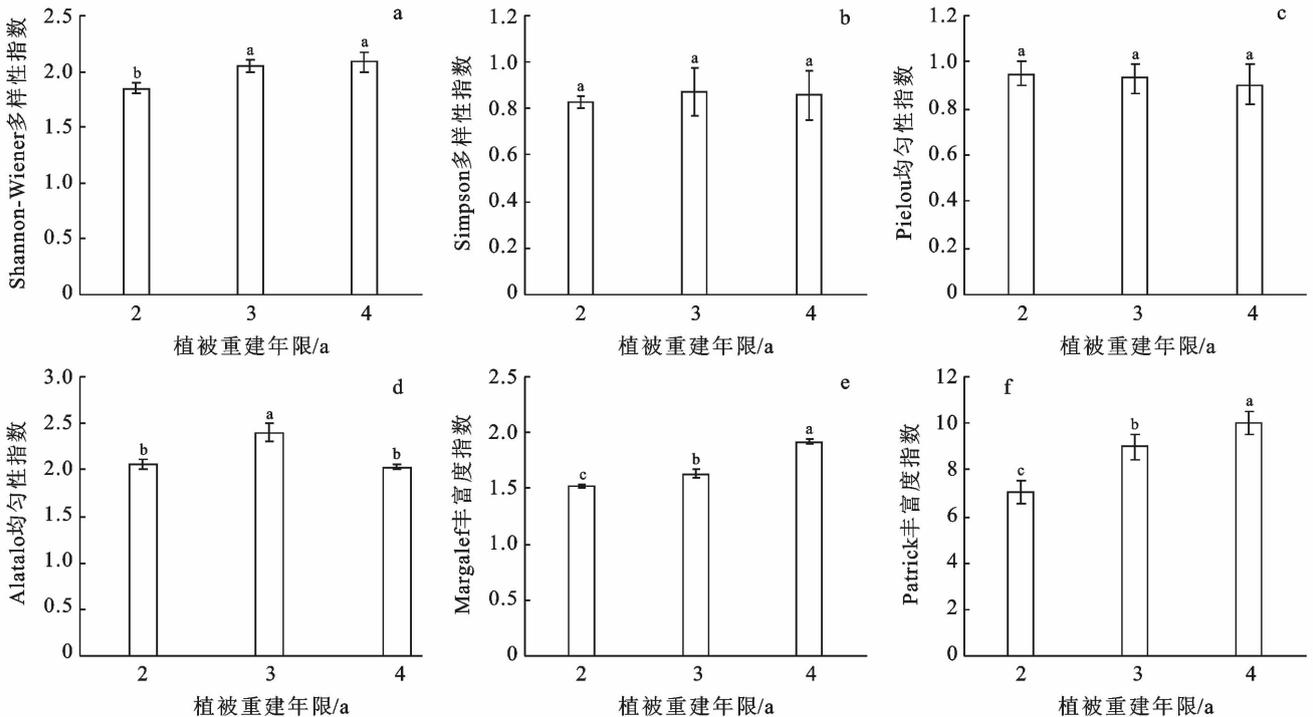


图 2 研究区不同样地群落物种多样性指数

由表 5 与图 3 可知,煤矸石山植被重建的初期群落都处于不稳定状态,但与建植年限仍有关联。不同建植年限矸石山边坡植物群落稳定性曲线方程的相关系数都大于 0.9,表明其拟合较好。拟合曲线与直线的交点坐标范围  $x$  值介于 34.586 5~39.480 5 之

间, $y$  值介于 60.424 6~65.451 5 之间,群落稳定点与交点的欧氏距离为:煤矸石山重建 2 a>重建 3 a>重建 4 a,其中人工建植 4 a 的矸石山交点坐标为 (34.586 5,65.451 5),欧氏距离为 20.601 6,表明人工建植 4 a 的群落较之重建 2 a 和 3 a 的更加稳定。

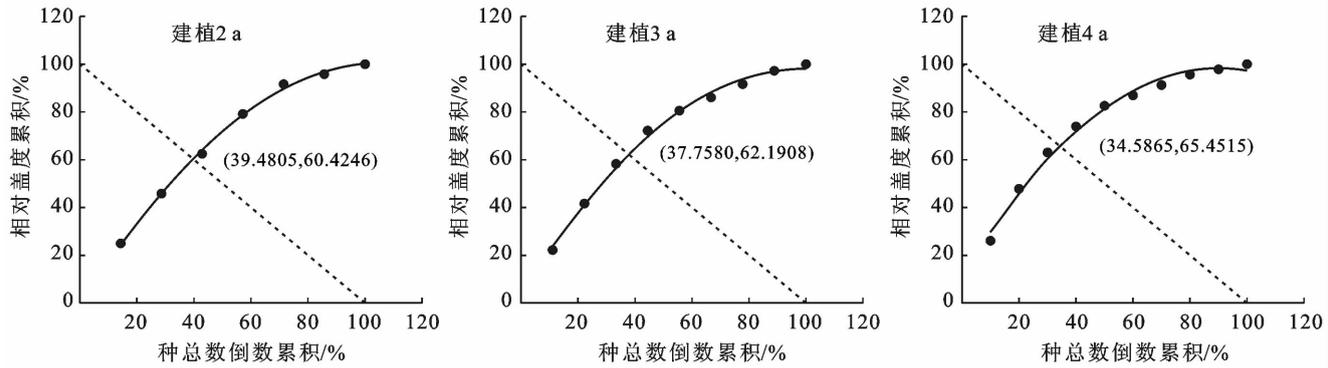


图 3 研究区不同样地植物群落稳定性变化

表 5 研究区不同样地植物群落稳定性分析

建植年限	曲线方程	相关系数	交点坐标	距离 20/80 的欧氏距离
2 a	$y = -0.009 0x^2 + 1.913 6x - 1.202 9$	0.997 1	(39.480 5, 60.424 6)	27.616 8
3 a	$y = -0.009 7x^2 + 1.9170x + 3.706 9$	0.994 5	(37.758 0, 62.190 8)	25.149 9
4 a	$y = -0.010 8x^2 + 1.934 8x + 11.635 0$	0.986 3	(34.586 5, 65.451 5)	20.601 6

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

退化生态系统中的植被恢复是植物与环境间相互作用及影响的过程<sup>[16]</sup>。煤矸石山作为一个半人工、半自然的退化生态系统人工植被恢复措施已经成为必然的选择<sup>[17]</sup>。人工植被配置模式及植被重建年限会直接影响矸石山的生态系统及土壤等环境因子,从而影响其植被生长状况,而物种多样性又是植被群落构成的基础。因此植被重建初期相同植被配置模式下的物种多样性与群落稳定性显得尤为重要。

珊丹等<sup>[18]</sup>的研究表明,在排土场边坡植被恢复的最初阶段,植物群落组成中 1,2 a 生植物种类较多,说明除人工种植的草本植物以外,传播能力强且耐旱的 1,2 a 生物种是主要的先锋植物。排土场边坡种植的紫花苜蓿、沙打旺均为豆科植物,在条件相对恶劣的环境下生长状况良好,适应能力较强。与此相似的是,本研究显示,植被重建样地中有白茎盐生草、雾冰藜和地肤等 1 a 生先锋植物种侵入,占比均在 70% 以上。随着建植年限增加,豆科植物重要值占比逐渐增加。

石占飞等<sup>[19]</sup>对植物群落  $\alpha$  多样性研究内容表明,矸石山初期植被重建的多样性指数与丰富度指数变化较小,随建植年限增加群落的 Margalef 均匀度指数与 Patrick 均匀度指数呈上升趋势,这与本研究结果相似。王琼等<sup>[20]</sup>的研究也表明,在恢复初期,物种种类较少、群落多样性与均匀度较低。

影响植物群落稳定性的因素是种群之间的竞争、外界环境的压力和人为的干扰活动等,群落稳定性在

即使优势种相同的情况下也会出现较大差异<sup>[21]</sup>。本研究中矸石山处于植被重建初期,群落也处于演替初期,稳定性表现为重建 4 a > 重建 3 a > 重建 2 a。有研究表明<sup>[22]</sup>,恢复 10 a 间,稳定性指数逐渐增加,但目前仍处于不稳定状态,说明坡面植被演替的最终结果是逐渐趋向于原始植被类型和结构。

在矸石山后续的恢复中,如果可以在考虑种植矿区典型复垦植物种,例如豆科、禾本科、菊科等植物时适当促进适应当地条件的本地物种自然定植。并且通过种植演替后期的本土植物种类,在该地煤矸石山保留当地基因库,就可以有效地应用于未来矿区恢复的实践中,改善矿区物种单一,生态系统脆弱的现状,为矿区生态环境恢复做出贡献。

### 4.2 结论

本研究科学记录了乌海市矿区美方矸石山重建初期植被群落数据,为中、长期生态重建提供了科学的数据支撑。关于群落在重建几年能达到稳定状态的问题并未解决。研究结果表明:

(1) 乌海矿区美方煤矸石山植被重建过程中。随矸石山建植年限增加,物种数由 4 科 7 种增加至 4 科 10 种,其中藜科、豆科植物约占到了植物总数的 70%,自然侵入植物种数量逐渐增加,表明群落正在进行正向演替过程。

(2) 随重建年限从 2 a 增加至 4 a,植被平均盖度、地上生物量均增加 1.5 倍左右。煤矸石山植被重建初期,植物群落多样性指数与均匀度指数变化较小,丰富度指数变化较为显著,表明随建植年限增加,群落结构逐步稳定。

(3) 不同重建年限矸石山之间植物群落的相似

性系数,表现为逐年降低,群落的结构趋于复杂化,在植被重建 2 至 4 a 时,群落为演替初期,仍处于不稳定状态。

### [参 考 文 献]

- [1] 郝威铎. 煤矸石堆放对土壤、水体和植物的环境影响:案例研究[D]. 北京:中国矿业大学,2015.
- [2] 杜刚. 煤炭洗选项目环保问题及防治对策研究[D]. 内蒙古呼和浩特:内蒙古大学,2013.
- [3] 张金屯. 数量生态学[M]. 2 版. 北京:科学出版社,2011.
- [4] Midgley G F. Biodiversity and ecosystem function[J]. *Science*, 2012,335(6065):174-175.
- [5] 陶利波,于双,王国会,等. 封育对宁夏东部风沙区荒漠草原植物群落特征及其稳定性的影响[J]. *中国草地学报*,2018,40(2):67-74.
- [6] Piekarska-Stachowiak A, Szary M, Ziemer B, et al. An application of the plant functional group concept to restoration practice on coal mine spoil heaps [J]. *Ecological Research*, 2014,29(5):843-853.
- [7] Snajdr J, Dobiášová P, Urbanová M, et al. Dominant trees affect microbial community composition and activity in post-mining afforested soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013,56:105-115.
- [8] 戴泉玉,徐学才,顾卫. 黄土高原地区公路边坡重建植被群落初期演替研究[J]. *公路*,2014,59(3):165-173.
- [9] 吕春娟,白中科,陈卫国. 黄土区采煤排土场生态复垦工程实施成效分析[J]. *水土保持通报*,2011,31(6):232-236.
- [10] 郝婧,郭东罡,上官铁梁,等. 煤矸石场植被恢复初期生态绩效评价[J]. *生态学报*,2016,36(7):1946-1958.
- [11] 赵冰清. 黄土区露天煤矿排土场复垦初期人工植被动态[J]. *山西农业科学*,2020,48(8):1275-1282.
- [12] 岳秀贤,刘果厚,任林,等. 乌海草原化荒漠区种子植物区系研究[J]. *草地学报*,2011,19(1):7-12.
- [13] 李博,内蒙古草场资源遥感应用考察队伊克昭盟分队. 内蒙古鄂尔多斯高原自然资源与环境研究[M]. 北京:科学出版社,1990:90-93.
- [14] 王伯荪. 植物群落学[M]. 北京:高等教育出版社,1987.
- [15] 郑元润. 森林群落稳定性研究方法初探[J]. *林业科学*,2000,36(5):28-32.
- [16] 李林霞,王瑞君,辜彬,等. 海岛矿区岩质边坡植物群落演替中物种多样性的变化[J]. *生态学杂志*,2014,33(7):1741-1747.
- [17] 高艺宁,许丽,林凤友,等. 矿区复垦地土壤有机碳分布及与土壤化学特性的关系[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*,2016,37(1):54-60.
- [18] 珊丹,何京丽,刘艳萍,等. 草原矿区排土场恢复重建人工植被变化[J]. *生态科学*,2017,36(2):57-62.
- [19] 石占飞. 神木矿区土壤理化性质与植被状况研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2011.
- [20] 王琼,辜再元,史春华,等. 废弃采石场植被自然恢复过程中物种多样性变化特征[J]. *环境科学研究*,2009,22(11):1305-1311.
- [21] 张岗岗,王得祥,张明霞,等. 秦岭南坡松栎林群落演替过程中种间联结性和相关性研究[J]. *西北植物学报*,2015,35(8):1657-1668.
- [22] 高小虎,苏德荣,舒晓锐,等. 高速公路风化岩石路堑边坡植被恢复的群落稳定性研究[J]. *公路交通科技*,2018,35(2):129-136.
- [22] 陈军,陈晋,廖安平,等. 全球 30 m 地表覆盖遥感制图的总体技术[J]. *测绘学报*,2014,43(6):551-557.
- [23] 陈军,廖安平,陈晋,等. 全球 30 m 地表覆盖遥感数据产品-GlobeLand30[J]. *地理信息世界*,2017,24(1):1-8.
- [24] 徐泽源,罗庆辉,许仲林. 新疆地区土地覆被遥感数据的一致性研究[J]. *地球信息科学学报*,2019,21(3):427-436.
- [25] 陈学兄,张小军,韩伟宏. 快速城镇化地区土地利用变化的地形梯度特征分析:以榆次区为例[J]. *中国生态农业学报(中英文)*,2020,28(10):1637-1648.
- [26] 王敏,吴映梅,胡平平. 地形梯度视域下的云南山区土地利用时空格局变化研究[J]. *江西农业学报*,2020,32(4):123-131.
- [27] 龚文峰,袁力,范文义. 基于地形梯度的哈尔滨市土地利用格局变化分析[J]. *农业工程学报*,2013,29(2):250-259,303.
- [28] 梁发超,刘黎明. 基于地形梯度的土地利用类型分布特征分析:以湖南省浏阳市为例[J]. *资源科学*,2010,32(11):2138-2144.
- [29] 贺三维,王伟武,曾晨,等. 中国区域发展时空格局变化分析及其预测[J]. *地理科学*,2016,36(11):1622-1628.
- [30] Yuill R S. The standard deviational ellipse; an updated tool for spatial description [J]. *Geografiska Annaler: Series B, Human Geography*, 1971,53(1):28-39.
- [31] Lefever D W. Measuring geographic concentration by means of the standard deviational ellipse [J]. *American Journal of Sociology*, 1926,32(1):88-94.
- [32] 毛鸿欣,贾科利,高曦文,等. 1980—2018 年银川平原土地利用变化时空格局分析[J]. *科学技术与工程*,2020,20(20):8008-8018.

(上接第 189 页)