

DOI: 10.5846/stxb202007312000

张琳, 陆兆华, 唐思易, 张萌, 张润廷, 黄玉凯, 尚志. 露天煤矿排土场边坡植被组成特征及其群落稳定性评价. 生态学报, 2021, 41(14): 5764-5774.
Zhang L, Lu Z H, Tang S Y, Zhang M, Zhang R T, Huang Y K, Shang Z. Slope vegetation characteristics and community stability at different restoration years of open-pit coal mine waste dump. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5764-5774.

露天煤矿排土场边坡植被组成特征及其群落稳定性评价

张 琳¹, 陆兆华^{1,2,*}, 唐思易¹, 张 萌¹, 张润廷³, 黄玉凯³, 尚 志⁴

1 中国矿业大学(北京)恢复生态研究所, 北京 100083

2 滨州学院 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州 256603

3 神华宝日希勒能源有限公司, 呼伦贝尔 021025

4 神华北电胜利能源有限公司, 锡林浩特 026000

摘要: 研究植被恢复过程中植物群落组成、结构及稳定性的变化, 可进一步了解到植物群落的演替过程及规律。采用空间代时间的方法对内蒙古锡林郭勒盟北电胜利露天煤矿 4 个排土场边坡人工恢复植被进行群落调查, 在此基础上采用多样性指数与优化后的 M. Godron 稳定性指数对植物物种组成、物种多样性及其群落稳定性进行分析, 探究不同恢复年限排土场边坡植被在恢复过程中群落特征及稳定性变化特征。结果表明: (1) 排土场边坡植物物种组成共有 16 科 44 属 56 种, 植物群落组成较简单, 其中禾本科种类最多, 生长型以草本植物为主。(2) 随着恢复年限的增加, 植物生活型由一、二年生转变为多年生, 坡面优势种由人工种植植物转变为本土植物。(3) 整体看, 随着恢复年限增加, 物种多样性呈下降趋势, 群落稳定性整体呈上升趋势。(4) 由于不同坡向土壤微环境差异, 北坡恢复效果及稳定性好于南坡。本研究在一定程度上可为露天煤矿排土场边坡人工修复过程中植物物种及合理配置模式的选择提供科学依据。

关键词: 排土场边坡; 物种多样性; 植被特征; 群落稳定性

Slope vegetation characteristics and community stability at different restoration years of open-pit coal mine waste dump

ZHANG Lin¹, LU Zhaohua^{1,2,*}, TANG Siyi¹, ZHANG Meng¹, ZHANG Runtong³, HUANG Yukai³, SHANG Zhi⁴

1 Institute of Restoration Ecology, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

2 Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256603, China

3 Shenhua Group Baorixile Energy Company Limited, Hulunbuir 021025, China

4 Shenhua Beidian Victory Energy Company Limited, Xilinhot 026000, China

Abstract: Open-pit coal mine could destroy the original natural ecosystem, forming a considerable number of abandoned mining lands, causing a series of ecological problems as well. Revegetation is the core of ecological reconstruction, which has impacts on community characteristics and biological diversity of the vegetation, and does well to the soil physical and chemical properties at the same time. At present, studies on revegetation in mining areas, mainly focusing on the improvement of revegetation technology, the effect of vegetation and soil restoration, and vegetation allocation model, etc. There are less researches on the changes of plant community structure and stability in time series. As an important characteristic of ecosystem structure and function, community stability has an impact on the laws and characteristics of the

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0501108)

收稿日期: 2020-07-31; 修订日期: 2021-01-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luzhaohua@cumt.edu.cn

stability of vegetation. M.Godron index is a classical method for community stability evaluation, but it can only reflect the stability of the plant community without considering the changes of community structure. Therefore, the comprehensive analysis of the stability and composition characteristics of the plant community can further understand the ecological characteristics and restoration process of the plant community in the mining area, which is significant to the ecological restoration of the mining area. In this study, the communities of artificial revegetation of 4 waste dump slopes in Beidian Shengli open-pit coal mine in Xilinguole League of the Inner Mongolia, were phytocoenologically investigated using the method of space-substitute-time. The community characteristics and stability in the process of revegetation of waste dump slope with different restoration years were explored. The species composition, species diversity, and community stability of vegetation were analyzed using diversity index and the optimized M.Godron index. The results showed that: (1) a total of 56 naturally occurring plant species, belonging to 44 genera and 16 families, were observed in the slope of waste dump which mainly composed by Gramineae plants and the major growth type was herbaceous plants. (2) With the increase of restoration years, the life form of plants changed from biennial plants to perennial plants, and the dominant species on slope changed from artificial plants to native plants. (3) On the whole, the species diversity decreased and the community stability increased with the increase of restoration years. (4) Due to the difference of soil micro-environment in different slope directions, the restoration effect and stability of north slope was better than the south. To some extent, these findings can provide a scientific basis for the selection of plant species and rational allocation mode in the process of artificial remediation of open-pit coal mine dump.

Key Words: slope of dump; species diversity; vegetation characteristic; community stability

随着我国社会经济的快速发展,露天煤矿的采矿规模正逐年增加,在满足我国经济建设需要的同时,对地区原有的自然生态系统造成严重的破坏^[1]。煤矿开采产生的损毁土地主要为露天矿排土场,由采矿废弃物等大量废土、废渣堆积而成的排土场侵占了露天煤矿用地的一半以上,不仅严重破坏了原有的自然景观,对土壤、地下水、大气及生物群落也造成严重损害^[2],同时由于排土场边坡结构松散、植被覆盖率低、水土流失严重,也极易发生地表塌陷、边坡滑移等地质灾害^[3],因此对露天矿排土场进行生态修复已迫在眉睫。植被的恢复与重建一直是矿区排土场生态恢复的重要手段之一^[4],不仅可以改善土壤结构,提升土壤肥力,同时对重金属也起到一定去除作用^[2],从而促进植物群落回到稳定状态。目前,对于矿区植被恢复的研究大多集中在植被恢复技术的提升^[5-6]、植被及土壤恢复效果^[7]、植被对土壤的改良效果^[8]及植被配置模式^[9]等,但是在长时间序列上,有关植物群落结构和稳定性变化的研究却较为少见。

群落的稳定性是衡量一个生态系统对外界的抗干扰能力和受到干扰后回到稳定状态的恢复能力,是保证生态系统可持续发展的重要指标。研究植物群落稳定性可以较为直接地了解到植被本身稳定性的特征和规律^[10],为矿区人工植被恢复提供科学依据。M.Godron 指数法是经典的群落稳定性评价方法,是对植物群落稳定性进行测定和比较的一种实用方法^[11]。M.Godron 指数法的局限性是仅能判断群落是否稳定,没有考虑到群落结构的变化,因此综合分析群落稳定性与群落组成特征,可以进一步了解到矿区植物群落的生态特征及恢复进程,对矿区生态恢复具有重要意义。本研究以北电胜利矿区为例,通过对露天煤矿排土场边坡不同人工恢复年限植被组成特征、物种多样性以及群落稳定性的调查、计算和分析,研究排土场边坡在不同恢复阶段的植被恢复效果及群落稳定性,探讨排土场群落演替过程及规律,筛选适合露天煤矿排土场边坡生境的优势种植物,为该区域露天煤矿植被恢复及重建提供一定借鉴依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域

北电胜利矿区(115°30'—116°20'E,43°57'—44°14'N)位于内蒙古自治区锡林郭勒盟锡林浩特市北部,是

胜利煤田的主要矿区之一。该地区属半干旱草原性气候,全年风沙大,年温差在 35—43℃ 之间,降水多集中在 7—9 月份,年均降水量约为 295 mm^[12]。地域性土壤为典型栗钙土、暗栗钙土、草甸栗钙土及草甸土^[12]。植被类型主要为典型草原和荒漠草原植被,植物组成主要有针茅(*Stipa capillata*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、羊草(*Leymus chinensis*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、锦鸡儿(*Caragana sinica*)等。

本次调查以神华北电胜利矿区四个排土场(内排土场、沿帮排土场、南排土场、北排土场)为研究对象,该矿区排土场植被恢复始于 2008 年,截止 2014 年排土场全部完成绿化复垦,绿化面积 864 万 m²。研究区域土壤盐碱化严重,大部分为采矿过程中产生的废石和废渣。四个排土场均选取小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、羊草、冰草、栉叶蒿(*Neopallasia pectinata*)、紫苜蓿(*Medicago sativa*)作为主要恢复物种进行人工植被恢复,采用“排-覆-障-种-灌-护”六步绿化法进行绿化复垦^[13],经简单恢复后,恢复群落已初具规模,但因为恢复时间存在差异,群落组成及恢复效果存在差别。

1.2 野外植被调查与取样

通过对露天煤矿进行资料收集并结合实地调查,采用空间代时间的方法^[14],于 2019 年 7—8 月对露天煤矿各排土场进行野外植被调查。为减少样地选择存在的主观因素干扰或现实条件限制所产生的误差,对不同恢复年限排土场进行多点重复调查,以增加样本数,同时严格控制样地的坡向、坡度、高度等地形条件,尽量使地形因素趋于一致。

在对人工修复年限分别为 2a、6a、7a、10a 的内排土场、沿帮排土场、南排土场、北排土场进行现场踏查后,结合各排土场的地形及植被分布特点,分别在各排土场的南坡、北坡选一块具有代表性的样地进行群落调查,每个样地设置 3 个间距为 3 m 的 5 m×5 m 的等距样方,在每个样方内采用“五点取样法”设置五个 1 m×1 m 的小样方,共计 120 个小样方,记录各样方内出现植物的种类、株数、高度、盖度、频度等指标。

1.3 数据处理

1.3.1 群落多样性

群落多样性是描述群落功能和稳定性的重要指标,在一定程度上反映了群落的结构和特征^[15]。群落内多样性多用 α 多样性来描述^[15],但 α 多样性表征指标众多,且各指标测度的指数、模型和适用范围各不相同,单一的 α 多样性指数不能对物种多样性进行准确而全面的评价^[16]。本研究选取目前最为通用的几种 α 多样性指数:Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 生态优势度指数来进行计算^[16-20],通过 4 种不同测度的指数提供更多的有关群落多样性的信息,避免单一公式选取引起的不足。计算公式如下:

Shannon-Wiener 多样性指数(H):

$$H = - \sum_{i=1}^n (P_i \ln P_i) \quad (1)$$

Margalef 丰富度指数(R):

$$R = (S-1)/\ln N \quad (2)$$

Pielou 均匀度指数(E):

$$E = H/\ln S \quad (3)$$

Simpson 优势度指数(D):

$$D = 1 - \sum_{i=1}^n (P_i)^2 \quad (4)$$

式中, P_i 为群落中 i 物种的数量占群落中物种总数的比例; S 为群落中植物种数; N 为群落中所有物种的个体总数。

1.3.2 群落稳定性

采取 M.Godron 贡献定律法^[11]对群落稳定性进行分析。其原理是将目标群落中所有植物物种按频度大

小进行排序,并计算其相对频度,将总种数的倒数和相对频度进行累积,用百分数表示,以植物种倒数的累积百分数为 x 轴,以相对频度的累积百分数为 y 轴,建立曲线图,使之与直线 $y=100-x$ 相交,其交点 (x,y) 即为稳定性参考点,交点坐标与点 $(20,80)$ 的距离称为欧式距离,该距离越小说明植物群落越稳定,越大则越不稳定^[11]。郑元润^[21] 和王鲜鲜^[10] 对 M.Godron 法进行改进,认为在计算时用盖度代替频度更能体现群落空间稳定性^[10],同时采用一元三次方程进行拟合更能提高拟合精度^[21]。因此,在本研究中采用优化后的 M.Godron 法来计算群落稳定性。计算方程如下:

种累积百分数(X):

$$X=m/S \tag{5}$$

种累积盖度(Y):

$$Y=\sum_{i=1}^n C_i \tag{6}$$

平滑曲线拟合方程:

$$y=ax^3+bx^2+cx+d \tag{7}$$

直线方程:

$$y=100-x \tag{8}$$

式中, m 为第 m 个物种; S 为群落中植物种数; C_i 为第 i 个物种的相对盖度;根据实际情况,求得平滑曲线与直线的交点,舍弃无效值,得到交点坐标 (x,y) 。

2 结果

2.1 排土场边坡植物群落特征

2.1.1 排土场边坡植物群落物种组成

物种组成是植物群落的基本特征之一^[22]。如表 1 所示,调查区内共出现 56 种植物,分属于 16 科,44 属,其中禾本科 14 种,豆科 8 种,菊科 6 种,分别占物种总数的 25.00%、14.29%、10.71%,共占物种总数 50.00%。排土场边坡植物以草本植物为主,共计 52 种。灌木及半灌木植物仅出现小叶锦鸡儿、兴安胡枝子(*Lespedeza davurica*)、木地肤(*Kochia prostrata*)、细枝山竹子(*Corethroedendron scoparium*)4 种。

表 1 不同恢复年限物种重要值

Table 1 Important values (IV) of plant species in deferent age terraces

编号 Code	植物名 Name	重要值 Importance value/%							
		2aS	2aN	6aS	6aN	7aS	7aN	10aS	10aN
1	阿尔泰狗娃花 <i>Aster altaicus</i>	3.20		11.37	8.48	8.37	16.79	35.09	20.52
2	凹头苋 <i>Amaranthus blitum</i>						8.49		
3	北芸香 <i>Haplophyllum dauricum</i>	3.20							
4	篇蓄 <i>Polygonum aviculare</i>	3.33							
5	冰草 <i>Agropyron cristatum</i>			11.90		8.40		23.95	34.73
6	糙叶黄耆 <i>Astragalus scaberrimus</i>		6.07		8.38			22.50	
7	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>		5.60	23.53	25.85	9.13	34.09	22.57	29.94
8	草地风毛菊 <i>Saussurea amara</i>				8.37				
9	草木犀 <i>Melilotus officinalis</i>		24.13		16.95	8.45		11.18	
10	朝天委陵菜 <i>Potentilla supina</i>	3.35							8.89
11	寸草 <i>Carex duriuscula</i>				8.39		11.44		8.51
12	大果琉璃草 <i>Cynoglossum divaricatum</i>				8.45				
13	大籽蒿 <i>Artemisia sieversiana</i>				25.22	33.95	8.35	37.75	30.75
14	多叶隐子草 <i>Cleistogenes polyphylla</i>			17.84		17.18	25.49		
15	二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>					8.34	16.84		

续表

编号 Code	植物名 Name	重要值 Importance value/%							
		2aS	2aN	6aS	6aN	7aS	7aN	10aS	10aN
16	高粱 <i>Sorghum 'Bicolor'</i>	3.21						11.17	
17	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	18.96	20.67	49.80		42.74	40.47		
18	鹤虱 <i>Lappula myosotis</i>			5.56					
19	虎尾草 <i>Chloris virgata</i>	14.38	51.52	7.03		42.59	51.94		
20	华虫实 <i>Corispermum stauntonii</i>	25.92	9.52				18.78		
21	画眉草 <i>Eragrostis pilosa</i>			11.32					
22	灰白益母草 <i>Leonurus glaucescens</i>						8.38		
23	灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	9.33							
24	灰毛庭荠 <i>Alyssum canescens</i>								16.76
25	稷 <i>Panicum miliaceum</i>					9.15			
26	尖头叶藜 <i>Chenopodium acuminatum</i>		8.00						
27	碱韭 <i>Allium polyrhizum</i>						8.34		
28	角果碱蓬 <i>Suaeda corniculata</i>					8.34			
29	苣荬菜 <i>Sonchus wightianus</i>	4.34							
30	赖草 <i>Leymus secalinus</i>					18.19			
31	藜 <i>Chenopodium album</i>	12.50	6.93						
32	牻牛儿苗 <i>Erodium stephanianum</i>					9.98		11.54	
33	木地肤 <i>Kochia prostrata</i>	12.37							
34	平车前 <i>Plantago depressa</i>							1.32	
35	雀麦 <i>Bromus japonicus</i>		26.93	5.56					
36	少花米口袋 <i>Gueldenstaedtia verna</i>				8.35				
37	水棘针 <i>Amethystea caerulea</i>				16.72				
38	委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i>							11.61	
39	西伯利亚蓼 <i>Polygonum sibiricum</i>	3.33							
40	细枝山竹子 <i>Corethroedendron scoparium</i>							11.36	
41	香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i>	3.51	12.27	5.68	18.99	8.35	18.12		
42	小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>			49.66	32.26	40.36	29.71	28.31	52.51
43	斜茎黄耆 <i>Astragalus laxmannii</i>	21.70	29.51	16.73	8.35	34.81	34.61		
44	兴安虫实 <i>Corispermum chinganicum</i>			12.12					
45	兴安胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>			6.64	12.53			12.96	
46	羊草 <i>Leymus chinensis</i>	16.68	15.00	13.94	29.77		8.34	23.91	9.30
47	茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>					11.00	17.35		
48	银灰旋花 <i>Convolvulus ammannii</i>		6.27	11.45	22.51	9.72	27.85	38.44	29.36
49	硬质早熟禾 <i>Poa sphondylodes</i>								8.48
50	油白菜 <i>Brassica chinensis</i> var. <i>oleifera</i>	9.82	6.03						
51	芸苔 <i>Brassica rapa</i> var. <i>oleifera</i>	10.00	6.03						
52	针茅 <i>Stipa capillata</i>	8.05	5.63	34.91	27.84	8.95	26.78	23.45	
53	知风草 <i>Eragrostis ferruginea</i>	22.31	18.01				16.84		
54	栉叶蒿 <i>Neopallasia pectinata</i>	3.24		25.72	35.71	26.66	17.22	58.08	55.79
55	猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	43.26	36.56	46.01	60.53	41.17	39.97	39.22	29.13
56	紫苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	3.13		5.56	20.60	27.13	46.46	11.43	

a: 恢复年限 Age of restoration; S: 南坡 South slope; N: 北坡 North slope

随着恢复年限的增加,植物科、属组成随演替而变化,其中蓼科、藜科、芸香科逐渐消失,新增牻牛儿苗科、莎草科、车前科。在演替过程中,禾本科、豆科、菊科植物一直占优势地位,其中禾本科植物占比最高,是群落

组成的主体和群落功能的主导者。对不同坡向植物科、属组成进行分析发现,随着恢复年限的增加,科、属组成数目由南坡>北坡转变为北坡>南坡。

随着恢复年限的增加,各样地物种数量略有上升,物种组成趋于丰富,优势种更替明显,人工种植的羊草和紫苜蓿有退化趋势,同时大籽蒿、栉叶蒿等本土植物出现,且重要值呈上升趋势,逐渐成为优势种。同一年限不同坡向排土场植物群落组成也有差异,南坡主要以猪毛菜、狗尾草、栉叶蒿为优势种;北坡主要以虎尾草、猪毛菜、紫苜蓿、栉叶蒿为优势种。

2.1.2 排土场边坡植物群落物种生活型结构

从物种生活型分布来看(图1),人工恢复前期,猪毛菜、狗尾草、虎尾草、华虫实等一、二年生植物重要值占比较高,是坡面植物的主要构成物种;随着恢复年限的增加,栉叶蒿、小叶锦鸡儿、银灰旋花等多年生本土植物重要值显著增加,边坡植物生活型由以一、二年生植物为主转变为以多年生植物为主。由图1可知,随着恢复年限的增加,同一恢复年限排土场不同坡向的植物组成变化程度不同,多年生植物重要值占比在人工恢复10a时南、北坡分别达77.14%、74.44%,较人工恢复2a分别增加了46.90%、60.80%。整体来看,多年生植物依靠更强的侵入性和抗逆性,以及维持群落稳定的能力^[15],逐渐在演替过程中占据主导地位,使排土场边坡生态功能越来越强,生态系统结构向稳定的方向发展。

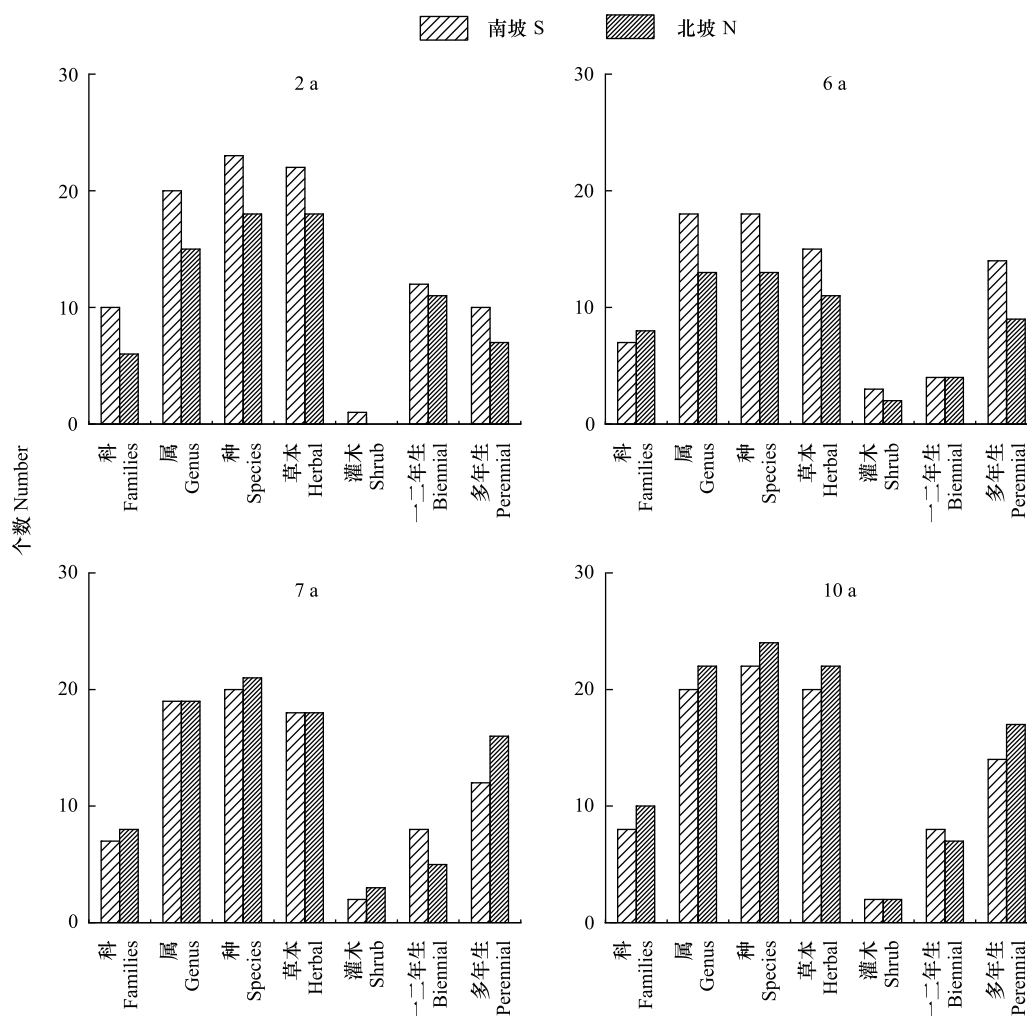


图1 不同恢复年限边坡植被物种组成变化

Fig.1 Species composition changes of slope vegetation in different restoration years

2.2 排土场边坡物种多样性及群落稳定性变化

2.2.1 排土场边坡物种多样性变化

群落的物种多样性可在一定程度上反映植物群落功能的复杂性和稳定性^[23]。由图 2 可知,在人工恢复初期,多样性指数均较高,随着恢复年限的增加,多样性指数略有波动但整体呈下降趋势。其中 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数在 7a 时有所回升,10a 时又下降,但变化不显著($P>0.05$),Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数随年限增加呈下降趋势。对比同一年限不同坡向的物种多样性指数,Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数为南坡>北坡,Pielou 均匀度指数在人工恢复前期为南坡>北坡,后期无明显区别,Margalef 丰富度指数为北坡>南坡。

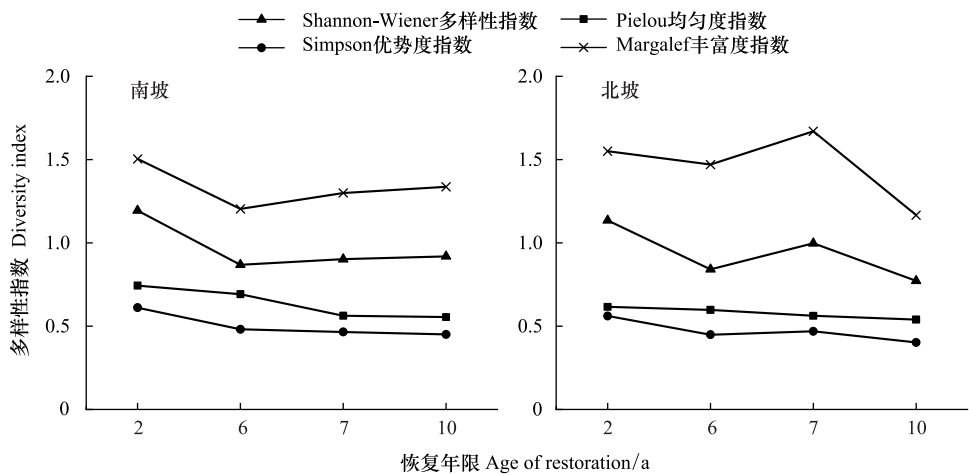


图 2 不同恢复年限边坡多样性指数
Fig.2 Slope diversity of species in different restoration years

对不同恢复年限多样性指数进行相关性分析,结果表明(表 2),Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数之间均呈极显著正相关性($P<0.05$),其中 Shannon-Wiener 多样性指数与 Simpson 优势度指数相关性系数最高(0.953),Simpson 优势度指数与 Pielou 均匀度指数相关性系数次之(0.875)。Margalef 丰富度指数与 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数之间相关性均不显著($P>0.05$),说明群落多样性更多地受 Shannon-Wiener 多样性、Simpson 优势度、Pielou 均匀度的影响,受 Margalef 丰富度影响较小。

表 2 不同恢复年限边坡物种多样性之间相关性

	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	优势度指数 Simpson dominance index	均匀度指数 Pielou evenness index	丰富度指数 Margalef richness index
Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	1			
优势度指数 Simpson dominance index	0.953 **	1		
均匀度指数 Pielou evenness index	0.795 **	0.875 **	1	
丰富度指数 Margalef richness index	0.091	0.132	0.419	1

* * 在 0.01 级别(双尾),相关性显著

2.2.2 排土场边坡群落稳定性变化

根据改进后的 M.Godron 稳定性测定方法,作排土场边坡植物群落 M.Godron 稳定性拟合曲线(图 3),稳定性系数的变化可以较清楚地表明植被恢复和演替过程中植物的种间竞争,并在一定程度上体现群落抵抗自然环境压力和人为扰动的能力^[24]。

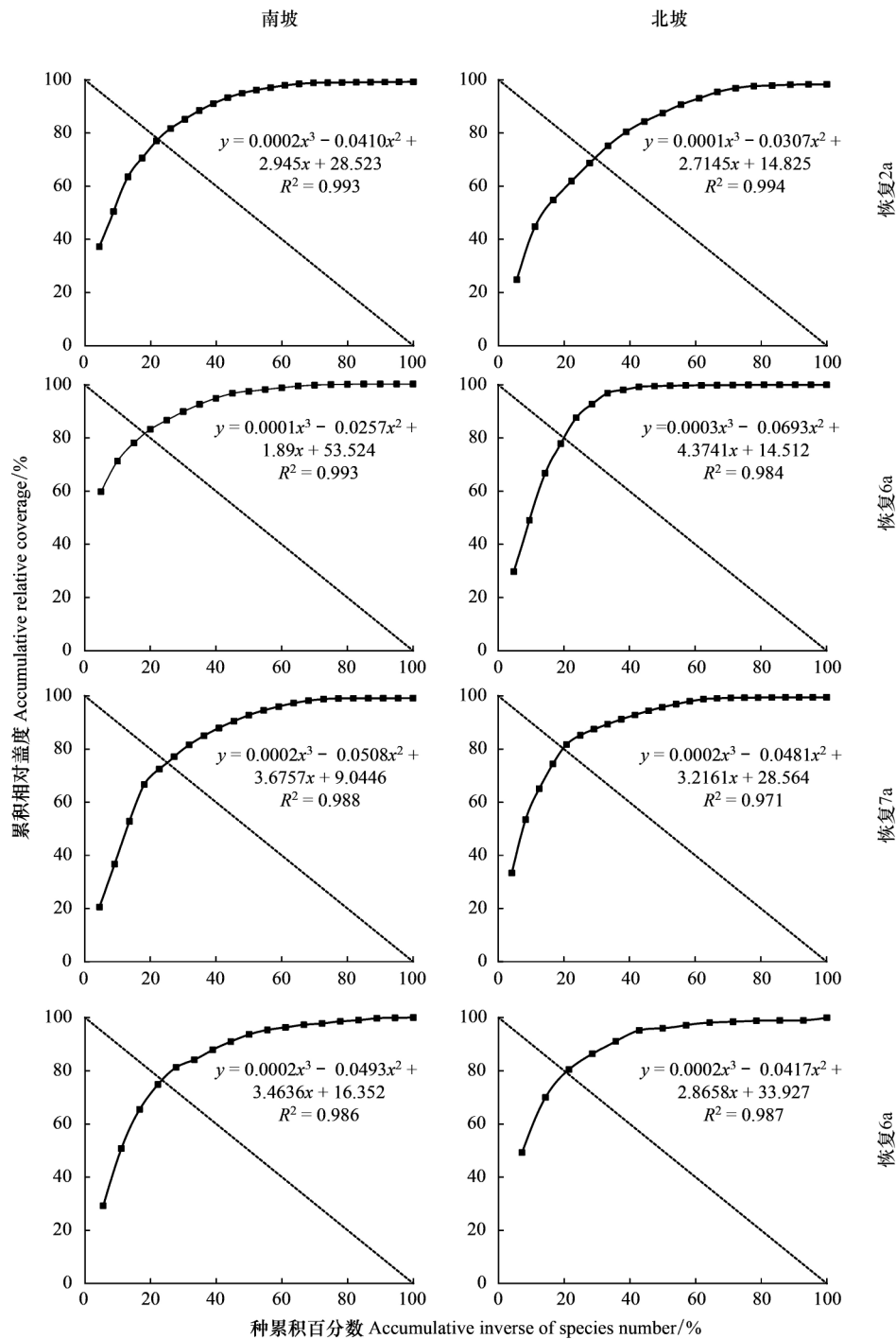


图3 排土场边坡 M.Godron 群落稳定性拟合曲线

Fig.3 M.Godron stability simulated curves of dump slopes

由表 3 可知,北坡在人工恢复 2a 时,欧氏距离最大,达 13.20,随着恢复年限的增加,欧氏距离逐渐减小,

稳定性越来越高。南坡欧氏距离为 $7a > 10a > 2a > 6a$, 在人工恢复 7a 时出现波动, 随后再次呈减小趋势。对比同一恢复年限不同坡向的欧氏距离, 人工恢复 2a 时为南坡 < 北坡, 人工恢复 6a 以后, 欧氏距离转变为北坡 < 南坡。

表 3 排土场边坡群落稳定性

Table 3 The community stability of dump slopes

恢复年限/a Age of restoration	坡向 Slope direction	拟合曲线 Fitting curve	R^2	交点坐标 Intersection coordinate	欧氏距离 Euclidean distance
2	S	$y = 0.0002x^3 - 0.0410x^2 + 2.945x + 28.523$	0.993	(22.28, 77.71)	3.23
	N	$y = 0.0001x^3 - 0.0307x^2 + 2.715x + 14.825$	0.994	(29.34, 70.68)	13.20
6	S	$y = 0.0001x^3 - 0.0257x^2 + 1.890x + 53.524$	0.993	(18.32, 81.68)	2.38
	N	$y = 0.0003x^3 - 0.0692x^2 + 4.358x + 14.512$	0.984	(20.00, 79.94)	1.68
7	S	$y = 0.0002x^3 - 0.0508x^2 + 3.676x + 9.045$	0.988	(25.15, 74.84)	7.29
	N	$y = 0.0002x^3 - 0.0481x^2 + 3.216x + 28.564$	0.971	(19.79, 81.19)	1.53
10	S	$y = 0.0002x^3 - 0.0493x^2 + 3.464x + 16.352$	0.986	(23.44, 76.51)	3.47
	N	$y = 0.0002x^3 - 0.0417x^2 + 2.866x + 33.927$	0.987	(20.52, 79.49)	0.73

3 讨论

3.1 排土场边坡植物群落特征变化

时间梯度上的物种组成变化,一定程度上反应了该生态系统恢复过程中群落环境变化以及该群落稳定性对这种变化的响应过程^[25]。研究表明北电胜利露天煤矿排土场边坡植被在恢复过程中以草本群落为主,禾本科、菊科、豆科植物重要值较高,其原因是禾本科、菊科、豆科植物适应性强,是我国矿区废弃地恢复的优势植物,这些植被生长快速,在短期内可实现较大的植被覆盖,同时这些植被还可以改善边坡微环境促进自身生长,从而适应恶劣的环境^[26]。此结论与珊丹^[27]、李向磊^[28]等对北电胜利矿区进行植被调查得出的结果一致。随着恢复年限增加,多年生植物快速生长逐渐替代浅根系的一、二年生植物,本土物种逐渐替代人工种植物种成为优势种,物种多样性指数大体呈下降趋势。其原因是在人工恢复初期,人工种植的一、二年生植物靠种子繁殖的能力较强,具有较强的侵入性和抗逆性,对土壤环境及能量的要求较低,能适应恶劣的生存环境,从而在排土场修复初期成为先锋物种,为土壤理化性质和植被的恢复奠定基础^[29]。随着恢复年限增加,植物在与环境的长期相互作用中产生了适应性^[30-31],栉叶蒿、小叶锦鸡儿、银灰旋花、糙隐子草等多年生本土植物具有较强耐受性的克隆器官,生活周期较长^[32],在扰动环境下具有生长和繁殖的优势^[33],并在一定程度上改变了边坡微环境,增强了边坡土壤固持的生态功能^[34],从而在演替过程中逐渐占据优势地位,促进排土场群落正向演替进程^[25],此结论与周涛^[35]、江沙沙^[33]等人关于不同恢复年限植物群落特征的研究中得到的结论一致。

群落演替是在物种间的不断竞争和植物对环境的不断适应过程中进行的,矿区排土场贫瘠的土壤环境限制了理想的演替进程。随着恢复年限的增加,植物群落组成发生较大变化,优势种的更替反映了矿区植被恢复过程中群落生态系统结构与功能的变化特征,恢复群落逐渐向矿区特有群落类型进行演替^[32],说明群落向更稳定的方向发展。研究表明,采用植被演替后期的植物对矿区进行植被恢复会大大加速植被演替的进程,因此在进行矿区人工植被恢复时可考虑选取能快速生长的禾本科、菊科、豆科植物作为建群种,并辅以栉叶蒿、小叶锦鸡儿、糙隐子草、银灰旋花等适应性较强的本土植物作为伴生种进行植被恢复。

3.2 排土场边坡植物群落稳定性变化

随着恢复年限的增加,露天煤矿排土场边坡植物群落稳定性整体呈上升趋势,稳定性由南坡 > 北坡转变为北坡 > 南坡。排土场北坡 M. Godron 稳定性的欧氏距离呈减小趋势,群落向更加稳定方向发展;南坡欧氏距

离在人工恢复 7a 时略有增加,但整体呈减小趋势,稳定性上升。M.Godron 稳定性主要由群落中优势种的比重决定,植物群落功能的变化通常也由优势种主导^[36],人工恢复 7a 时本土植物逐渐替代人工种植植物成为优势种,群落组成的变化在一定程度上影响其群落的稳定性^[37],而南、北坡面自然环境条件有较大差异,群落组成的变化对不同坡面群落的稳定性、演替速度及方向的影响也有较大不同^[38]。水分作为养分流动、循环的载体是影响干旱和半干旱地区植物群落组成和演替的关键因素^[39],对该地区生态恢复有很大影响,南坡由于太阳辐射较强,土壤表层温度较高,蒸发量大,同时立地环境较差,风化严重且土壤表层孔隙度较大,水分更容易蒸发和流失,导致土壤含水量较小,而北坡水分相对充足,温度适宜,营养物质也较充足,更适宜物种进行生存繁衍^[38]。不同坡向植物群落恢复效果及演替进程有差异,因此进行人工恢复时不仅要选取符合当地生境条件且具有相容性生态特征的本地物种进行恢复^[40],同时应对不同坡向选取不同植被配置模式进行植被恢复及重建,从而达到更好的恢复效果^[41]。

整体来看,随着恢复年限的增加,优势种更替明显,群落发生明显演替,物种多样性下降,稳定性上升。可见人工植被恢复已成为矿区植被恢复的有效手段。群落演替是一个长期、动态的过程,本研究采用空间代时间的方法进行分析讨论,对矿区排土场植物群落组成特征及稳定性的评价只是一个初步结果,对于长时间序列上的矿区植物群落组成特征及稳定性评价有待进一步研究。

4 结论

1) 露天煤矿排土场边坡植被在人工恢复过程中以草本植物为主,其中禾本科植物占据主要地位。随着恢复年限的增加,多年生植物比例增加,本土物种在植被恢复与演替的过程中逐渐成为优势种,群落进入进展演替。

2) 随着恢复年限的增加,排土场边坡植物物种多样性整体呈下降趋势,稳定性呈上升趋势。

3) 由于排土场南、北坡土壤等环境因子的差异性,南、北坡植被恢复效果略有差异:植被恢复前期南坡植物物种组成及多样性均高于北坡,随着恢复年限的增加,转变为北坡高于南坡;在恢复过程中,稳定性整体呈上升趋势,北坡稳定性增长速率大于南坡。

4) 研究表明,人工植被恢复是矿区植被恢复与重建的有效措施,且植被恢复时间越长,植被恢复效果及稳定性越好。在人工植被恢复时选取能快速生长的禾本科、菊科、豆科植物作为建群种,并辅以栉叶蒿、小叶锦鸡儿、糙隐子草、银灰旋花等适应性较强的本土植物作为伴生种进行植被恢复会在一定程度上促进群落演替进程,提高群落稳定性,达到更好的恢复效果。

参考文献(References):

- [1] 赵浩. 新时代露天煤矿发展趋势、面临的问题及相关建议. 煤炭经济研究, 2019, 39(4): 20-24.
- [2] 杨翠霞, 张成梁, 刘禹伯, 郑艳. 矿区废弃地近自然生态修复规划设计. 江苏农业科学, 2017, 45(17): 269-272.
- [3] 邓国春, 朱建新. 谈煤矿矿区生态修复规划. 资源环境与工程, 2008, 22(2): 254-256.
- [4] 吕凯, 李雪飞, 智颖. 露天煤矿排土场生物修复与生态重建技术. 内蒙古师范大学学报: 自然科学汉文版, 2019, 48(5): 458-464.
- [5] 刘丹, 杨兆青, 荣正阳, 梅静, 陆兆华. 露天煤矿排土场干草转移对坡面草本层重建与土壤改良研究. 环境与可持续发展, 2020, 45(3): 144-148.
- [6] 付战勇, 马一丁, 罗明, 陆兆华. 生态保护与修复理论和技术国外研究进展. 生态学报, 2019, 39(23): 9008-9021.
- [7] 韩煜, 赵伟, 张洪翔, 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.
- [8] 马宁, 李强, 郭玉涛, 李鹏飞. 神东矿区典型植被不同恢复年限对土壤质量的影响. 中国水土保持, 2019, (11): 59-62.
- [9] 杨勤学, 赵冰清, 郭东罡. 中国北方露天煤矿矿区植被恢复研究进展. 生态学杂志, 2015, 34(4): 1152-1157.
- [10] 王鲜鲜, 张克斌, 王晓, 杨晓辉. 宁夏盐池四儿滩湿地-干草原植被群落稳定性研究. 生态环境学报, 2013, 22(5): 743-747.
- [11] 李育中. 植物群落稳定性的一种测定方法. 中国草地, 1991, (2): 78-80.
- [12] 赵义博, 雷少刚, 刘英. 胜利矿区土壤养分空间变异特征与影响因素. 土壤, 2020, 52(2): 356-364.

- [13] 王党朝, 刘慧芳, 肖武, 邹玉珠, 王鑫. 胜利一号露天煤矿北排土场土壤物理性质空间分布研究. 中国煤炭, 2018, 44(11): 135-140, 145-145.
- [14] 陆志成, 温远光, 周晓果, 朱宏光, 李景文, 严理. 封育年限对岩溶植被组成和土壤肥力修复的影响. 广西植物, 2019, 39(8): 1016-1028.
- [15] 张继义, 赵哈林, 张铜会, 赵学勇. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态. 植物生态学报, 2004, 28(1): 86-92.
- [16] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(上). 生物多样性, 1994, 2(3): 162-168.
- [17] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(下). 生物多样性, 1994, 2(4): 231-239.
- [18] Shannon C E. The mathematical theory of communication. 1963. M.D. Computing; Computers in Medical Practice, 1997, 14(4): 306-317.
- [19] Margalef R. Information theory in ecology. General Systems, 1958, 3: 36-71.
- [20] Pielou E C. The measurement of diversity in different types of biological collections. Journal of Theoretical Biology, 1966, 13: 131-144.
- [21] 郑元润. 森林群落稳定性研究方法初探. 林业科学, 2000, 36(5): 28-32.
- [22] 张军红, 徐玉萍. 不同植被恢复模式对矿区土壤性质的影响. 南方农业, 2019, 13(7): 22-25.
- [23] 刘若莎, 王冬梅, 李平, 靳永庆, 梁士楚. 青海高寒区典型人工林植物多样性、地上生物量特征及其相关性. 生态学报, 2020, 40(2): 692-700.
- [24] 简小枚, 税伟, 王亚楠, 王前锋, 陈毅萍, 江聪, 项子源. 重度退化的喀斯特天坑草地物种多样性及群落稳定性——以云南沾益退化天坑为例. 生态学报, 2018, 38(13): 4704-4714.
- [25] 屈兴乐, 方江平. 不同修复年限退化草地植物群落的物种多样性和稳定性. 高原农业, 2018, 2(3): 220-229.
- [26] 闫德民, 赵方莹, 孙建新. 铁矿采矿业迹地不同恢复年限的植被特征. 生态学杂志, 2013, 32(1): 1-6.
- [27] 珊丹, 何京丽, 刘艳萍, 梁占岐, 荣浩. 草原矿区排土场恢复重建人工植被变化. 生态科学, 2017, 36(2): 57-62.
- [28] 李向磊, 毕银丽, 彭苏萍, 解琳琳, 王党朝. 西部露天矿区周边植物多样性与土壤养分空间变异性特征. 煤炭科学技术, 2020. (2020-05-19). <https://nxgp.cnki.net/kcms/detail?v=3uoqlhG8C46NmWw7YpEsKHTPvOGrU00qX1coEOzL8AEvbXVt0Pjha50KplhJsVtCHyK%25mmd2F7b4m3uRNffMvalqOIJrIlWOULx6C&uniplatform=NZKPT>.
- [29] 哈文秀, 肖桂英, 曹建华, 刘玉国, 崔明, 周金星. 喀斯特陷落盆地不同恢复阶段群落物种组成与多样性特征. 生态学杂志, 2020, 39(1): 36-45.
- [30] 王凯, 王道涵, 刘锋, 祝畅, 刘志斌. 露天矿排土场边坡自然恢复规律及其环境解释. 生态环境学报, 2014, 23(4): 581-585.
- [31] Ruiz-Jaén M C, Aide T M. Vegetation structure, species diversity, and ecosystem processes as measures of restoration success. Forest Ecology and Management, 2005, 218(1/3): 159-173.
- [32] 左小安, 赵哈林, 赵学勇, 郭铁瑞, 张铜会, 毛伟, 苏娜, 冯静. 科尔沁沙地不同恢复年限退化植被的物种多样性. 草业学报, 2009, 18(4): 9-16.
- [33] 江沙沙, 孙宗玖, 杨静, 董乙强. 封育年限对伊犁绢蒿荒漠草地群落种间关系及稳定性的影响. 中国草地学报, 2018, 40(3): 68-75.
- [34] 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.
- [35] 周涛, 苏正安, 何周窈, 杨鸿琨, 王晓艺. 不同恢复年限矿山排土场植物群落特征. 草业科学, 2019, 36(6): 1508-1517.
- [36] 廖哈茹, Tuvshintogtokh I, 郭通, 赵景学. 围封对蒙古荒漠草原和高山草原植物群落组成及稳定性的影响. 北京大学学报: 自然科学版, 2020, 56(3): 471-478.
- [37] 徐文兵, 施颖, 邢亚芸, 张茜, 郑志虎, 罗巧玉. 青海高寒草原鼠丘植物群落结构及稳定性特征. 草业科学, 2020, 37(4): 603-611.
- [38] 朱云云, 王孝安, 王贤, 邓美皎. 坡向因子对黄土高原草地群落功能多样性的影响. 生态学报, 2016, 36(21): 6823-6833.
- [39] 马晓慧, 张岩, 唐杰, 范聪慧. 半干旱黄土区不同自然恢复时期坡面植被组成与分布特征. 中国水土保持科学, 2018, 16(2): 62-72.
- [40] 郭道宇, 张金屯, 宫辉力, 张桂莲, 董志. 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.
- [41] 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.