商宇,李钢铁,麻云霞,等.鄂尔多斯矿区不同恢复年限排土场边坡植被演变规律[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(3):108-118.
Shang Y, Li G T, Ma Y X,et al.Vegetation succession law of dump slope with different restoration years in Ordos mining area [J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(3):108-118.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202401051

鄂尔多斯矿区不同恢复年限排土场边坡植被演变规律

商宇[1,2],李钢铁[1,2*],麻云霞[1,2],张月欣[1],贺琴[1],贾治[3]

(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和草原局重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010000;3.鄂尔多斯市乌兰煤炭(集团)有限责任公司,内蒙古 鄂尔多斯 017200)

摘　要:[目的]露天煤矿排土场边坡水土流失严重,合理的植被措施可以有效防止水土流失的进一步扩大。有关排土场边坡植被恢复种类的研究较少,分析边坡植被演替规律拓展初始恢复建群种类,可为矿区生态安全评估提供一定参考。[方法]采用时空替代的方法对满来梁露天煤矿4种不同恢复年限(2、6、10、12a)的排土场南北边坡进行植被调查,分析不同恢复年限下边坡群落的演替过程,筛选恢复过程中的优势植物种,为排土场边坡的稳定提供理论基础。[结果](1)露天煤矿排土场边坡植物组成为17科44属60种,以草本植物为主;(2)随着恢复年限的增加,多年生乡土植物逐渐占据优势地位,地上生物量增多,群落稳定性升高;(3)由于排土场南、北坡光照、土壤水分不同,故南、北坡植被存在差异,整体来看北坡植被恢复效果优于南坡;(4)在人工植被恢复时选取能快速生长的豆科植物如紫花苜蓿等作为建群种,并辅以羊草、黑沙蒿、披碱草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使群落演替进程加快,促进群落稳定。[结论]针对地区、坡向的不同选取适宜植被减少群落波动,促进群落稳定,可为矿山的绿色修复提供一定的参考。

关键词:边坡稳定; 植被恢复; 植物多样性; 群落稳定性; 演替规律
中图分类号:S157　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2024)03-0108-11

煤炭为地区带来高速发展,但其开采过程中也引发了严重的生态环境问题[1]。煤矿开采过程中引起的地表扰动,使西北干旱、半干旱地区脆弱的生态环境更加岌岌可危[2]。鄂尔多斯地区煤炭储量丰富,但气候干旱、自然环境恶劣,开采后如何进行生态恢复将是该地区面临的一个重要问题。因此,针对矿山的生态修复刻不容缓。露天煤矿破坏地表的同时也产生了一种由采矿废弃物人工堆垫而成的排土场结构,该结构松散、占据大量土地、损毁地表植被、易造成水土流失、环境污染甚至形成地质灾害[3]。排土场引起的生态系统退化甚至崩毁,严重制约着煤矿可持续发展及当地生态环境安全。

植被恢复是矿区生态修复的基础,植被将土壤、大气和水串联成一个整体,是生态系统中重要一环[4]。植被不仅是初始生态群落的生产者,还起到改善地表微环境、增强土壤肥力、提高土壤稳定性、防止水土流失等作用。排土场植被扰动与恢复监测对矿区生态修复的准确规划具有重要意义,有利于遭到破坏后生态系统积极恢复的正向调节。有关露天煤矿排土场生态恢复研究逐渐增多,Harris等[5]认为,栽植豆科植物作为恢复先锋种可以促进土壤中氮元素的积累,增强土壤肥力,改善土壤贫瘠的状态。Reid等[6]研究表明,在废弃矿山进行植被恢复后,土壤理化性质均优于未采取植被恢复措施的矿山。其中植物多样性[7]和群落稳定性[8]是生态恢复中的重要指标,植物多样性表示群落中个体数所表现出的群落结构特征。群

收稿日期:2024-01-22　　**修回日期**:2024-03-09
基金项目:内蒙古自治区鄂尔多斯市科技重大专项(2022EEDSKJZDZX012);内蒙古农业大学高层次/优秀博士人才引进科研启动项目(NDYB2021-9);内蒙古自治区高校科研自然科学重点项目(NJZZ23030)
作者简介:商宇(ORCID:0009-0005-9120-6497),硕士,研究方向:沙区植物资源保护与利用,E-mail:1523203281@qq.com
*通信作者:李钢铁,博士,教授,研究方向:沙区植物资源保护与利用,E-mail:13848817183@163.com

落稳定性描述受到干扰后系统恢复原状的能力。

本研究通过测定不同恢复年限排土场南北坡植物多样性和稳定性、地上生物量及土壤含水率等指标,运用空间代替时间的方法,旨在探讨排土场边坡植被群落演变过程及规律,选取适合露天煤矿排土场生长的植物,加快边坡演替进程,运用植物措施防治水土流失,为鄂尔多斯地区露天煤矿排土场生态恢复提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

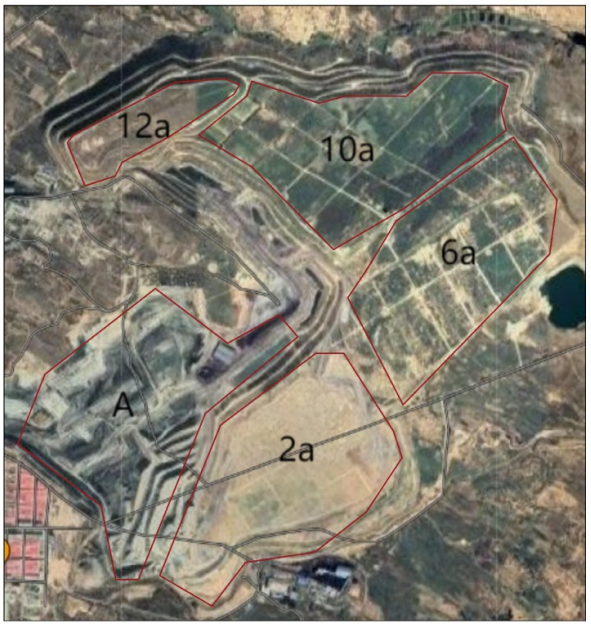
乌兰集团满来梁露天煤矿位于鄂尔多斯市伊金霍洛旗(北纬38°56′～39°49′,东经108°58′～110°25′),黄土高原地理特征显著。气候上属典型的温带大陆性季风气候,降水量少,蒸发量大,气候干燥。年平均降水量320 mm,降水集中在每年的7-8月。地域性土壤为砂壤土,植被类型以沙生植被与草甸植被为主[9]。

本次调查于2022年9月开始,以满来梁露天煤矿恢复2 a(2020年)、6 a(2016年)、10 a(2012年)、12 a(2010年)的4个不同恢复年限排土场为研究对象。该煤矿对排土场边坡及平台均进行了科学规划,排土场平台上覆原始地貌表土,厚度约2 m,在恢复10 a排土场平台种植农作物,其余复垦平台均种植紫花苜蓿;4个排土场边坡覆土,厚度约0.6 m,采用喷浆苜蓿草籽的方式进行植被恢复,防止边坡水土流失,经过若干年的恢复演替,边坡植被群落已逐渐成形,但由于恢复年限、坡向的不同,群落组成及边坡修复效果仍存在差异。

1.2　试验方法

植被调查是了解生态现状的基础,在收集整理煤矿现存原始记录的基础上结合实地植被调查,利用时空替代的方法[10],于2022年9月初对露天煤矿排土场边坡植被进行调查取样。

满来梁煤矿排土场于2010年开始植被恢复工程。排土场边坡长约20 m,人工整坡,坡度约20°。对4种不同恢复年限排土场进行实地调查,在不同恢复年限排土场的南、北坡选1块坡度、地形相似样地进行调查,每个样地设置3个5 m×5 m样方,距离相等为2 m,在每个5 m×5 m样方内四角和中心各设1个1 m×1 m样方,调查样方数量共120个,调查样地内植物种类、数量、高度、植被盖度等指标。每个5 m×5 m样方中随机选取3个1 m×1 m样方用铝盒分别取0～10,10～20,20～30 cm处土壤,并贴近地面剪取地上部分,带回实验室测定地上生物量。



2 a:恢复2年排土场;6 a:恢复6年排土场;10 a:恢复10年排土场;12 a:恢复12年排土场;A:露天采煤区

2 a: recovery duration of 2 years; 6 a: recovery duration of 6 years; 10 a: recovery duration of 10 years; 12 a: recovery duration of 12 years; A: Coal field

图1　排土场位置概况

Fig.1　Location of dumping site

1.3　统计分析

1.3.1　重要值计算

$$\text{重要值}[11]=(\text{相对盖度}+\text{相对密度}+\text{相对频度})/3 \quad (1)$$

1.3.2　群落多样性

本文群落多样性指数采用4种通用的多样性指数来进行计算。

Margalef丰富度指数(R):

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

Shannon-Wiener多样性指数(H):

$$H=-\sum_{i=1}^{n} p_i \ln p_i \quad (3)$$

Pielou均匀度指数(E):

$$E = H/\ln S \quad (4)$$

Simpson指数(D):

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{n} p_i^2 \quad (5)$$

式中,P_i表示1个群落中i物种的数量比物种总数;N为种群中所有植物的总个体数;S为种群中物种个数。

1.3.3 稳定性计算

采用邓元润[12]完善后的Godron[13]测定方法。将相对频度的累加替换为相对盖度的累加。相对盖度用百分数表示,定义为Y轴;按植物种类排序,以植物种倒数的累积百分数为X轴。绘制出变化的曲线图,使其与直线(Y=100-X)相交。交点(x,y)即参照物的稳定性。点(x,y)与(20,80)的直线距离为欧式距离。

1.3.4 地上生物量计算

采集植物样品时,用枝剪贴近地表,将选中样方中全部的地上植物部分剪下来,装入自封袋并编号,带回实验室烘干至恒重后用电子天平称量。

1.3.5 土壤含水率计算

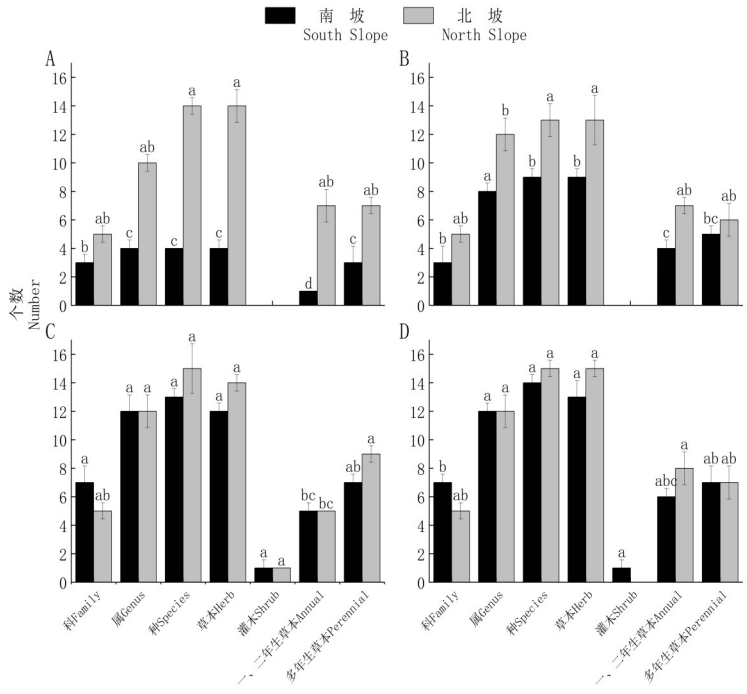
在4种不同恢复年限排土场南北坡选定样地中,每个5 m×5 m样方内随机选择3个1 m×1 m的样方取土。取土方法为轻轻刮去地表覆盖物,用四分法取0~10、10~20、20~30 cm处土样各1 kg,编号装入自封袋中,共计108个土样。土壤含水率采用烘干法测得。

2 结果

2.1 边坡植物群落特征

2.2.1 排土场边坡植物种类

由图2可知,样地共出现60种植物,分属17科,44属,60种。其中菊科22种,禾本科10种,豆科8种,藜科5种,这5科共45种,占所有物种的70%以上。草本植物为该煤矿排土场边坡主要物种,共54种。直立灌木及半灌木植物仅出现黑沙蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.)、牛枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、驼绒藜(*Ceratoides latens* (J. F. Gmel.) Reveal et Holmgren)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa* L.)4种。



A:恢复2a;B:恢复6a;C:恢复10a;D:恢复12a;不同小写字母表示相同坡向不同恢复年限间差异显著($P<0.05$)

A: recovery duration of 2 years; B: recovery duration of 6 years; C: recovery duration of 10 years; D: recovery 12 duration of years. Different lowercase letters indicate that there are significant differences between different recovery durations in the same slope direction ($P<0.05$)

图2 不同复垦时间下排土场边坡植物种类变化

Fig.2 Changes of plant composition of dump slope in different restoration durations

随着恢复年限增加,玄参科、大戟科、蒺藜科逐渐消失;新增蔷薇科、牻牛儿苗、萝藦科3个科。在演替过程中,菊科、禾本科、豆科、藜科占据主导地位,其中菊科植物的比例最高,在演替过程中,科、属的构成数量发生了变化,随着恢复年限的增加,科、属数量从开始恢复时南坡>北坡逐渐转变为北坡>南坡。

各样地的物种数量随着恢复时间而增多,物种组成多样化,优势物种发生改变,人工植被退化趋势明显,原貌植物占据优势,群落结构趋于稳定。同一年限内,不同坡位优势种植物也有所不同。随着恢复年限的加深,北坡植物生长状况、存活数量皆优于南坡。

2.1.2　排土场边坡植物种生活型分析

从表1分布来看,紫花苜蓿(*Medicago sativa*)存在于4种不同恢复年限排土场边坡,且重要值随恢复年限逐渐降低。恢复初期紫花苜蓿重要值最高,白茅(*Imperata cylindrica*(L.)Beauv.)和猪毛菜(*Salsola collina* Pall.)次之。随着恢复年限的增加原始地貌物种入侵并逐渐占据优势,恢复6 a时画眉草(*Eragrostis pilosa*(L.)Beauv.)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*(Fiseh. et Mey.)*O. Kuntze*)等一、二年生植物重要值较大,出现少量多年生植物;恢复12 a时阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*(Willd.)*Novopokr.*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.)、羊草(*Leymus chinensis*)、披碱草(*Elymus dahuricus* Turcz.)等多年生植物种重要值比重增多,多年生原貌植物逐渐取代人工播种的紫花苜蓿成为边坡植被生活型的主导。由表1可看出,排土场不同坡向恢复效果在相同恢复年限也有区别。其中在恢复12 a时南、北坡多年生植物重要值占比分别达到54.56%、56.60%,较恢复6 a分别增加了4.77%、18.66%。总体看来,多年生植物可以更好地维持种群稳定,且环境的扰动对其影响更小。物种生活型组成上的变化体现了植被恢复过程物种的竞争与演替,原始地貌物种的入侵促进生态系统变化,使群落趋向稳定。

表1　不同恢复时间植物种重要值

Table 1　Important value of plant species at different recovery time

编号 Code	植物名称 Name		重要值/% Importance value							
			2 aS	2 aN	6 aS	6 aN	10 aS	10 aN	12 aS	12 aN
1	雾冰藜	*Bassia dasyphylla*(Fiseh. et Mey.)O. Kuntze			8.63	27.67	19.34			13.60
2	羊草	*Leymus chinensis*(Trin.)Tzvel.			5.93			22.84		63.06
3	紫花苜蓿	*Medicago sativa*	43.44	68.38	37.16	27.56	14.85	38.17	26.28	23.54
4	白草	*Pennisetum centrasiaticum* Tzvel.	8.85	7.79	33.38	43.19		7.82		11.70
5	绢毛细蔓委陵菜	*Potentilla reptans* L. var. *sericopbylla Franch.*							8.16	
6	小蓬草	*Conyza canadensis*(L.)Cronq.								13.46
7	阿尔泰狗娃花	*Heteropappus altaicus*(Willd.)Novopokr.					17.26	33.08		44.75
8	披碱草	*Elymus dahuricus* Turcz.			22.35			16.82	13.94	33.63
9	冷蒿	*Artemisia frigida* Willd.							20.23	
10	黄花蒿	*Artemisia annua* L.		23.98		12.84	15.72		16.12	24.42
11	白茅	*Imperata cylindrica*(L.)Beauv.	66.47	23.74						
12	猪毛蒿	*Artemisia scoparia* Waldst. et Kit.		34.28		17.78				11.98
13	兴安女娄菜	*Melandrium brachypetalum*(Horn.)Fenzl							7.57	
14	角蒿	*Incarvillea sinensis* Lam.							12.30	22.81
15	砂珍棘豆	*Oxytropis gracilima* Bunge							6.97	
16	艾	*Artemisia argyi* Levl. et Van.		10.43						
17	苍耳	*Xanthium strumarium* L.		7.04						11.40
18	狭叶山野豌豆	*Vicia amoena*							7.39	
19	大籽蒿	*Artemisia sieversiana*		14.81				15.97		25.74
20	香青兰	*Dracocephalum moldavica* L.							15.92	
21	赖草	*Leymus secalinus*(Georgi)Tzvel.			14.61		25.51	14.58	33.08	

续表

编号 Code	植物名称 Name		重要值/% Importance value							
			2 aS	2 aN	6 aS	6 aN	10 aS	10 aN	12 aS	12 aN
22	猪毛菜	*Salsola collina* Pall.	47.91	31.72	48.92		41.15	23.63	18.98	
23	草木樨	*Melilotus suaveolens* Ledeb.						8.41		11.40
24	小花鬼针草	*Bidens parviflora* Willd.						29.70		31.48
25	藜	*Chenopodium album* L.		8.17	11.87			7.40	12.06	
26	冰草	*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn.								41.38
27	辽东蒿	*Artemisia verbenacea* (Kom.) Kitag.								12.10
28	白莲蒿	*Artemisia sacrorum* Ledeb.				24.59		23.82		
29	黑沙蒿	*Artemisia ordosica* Krasch.					28.87	15.16	34.37	
30	刺儿菜	*Cirsium segetum* Bunge						28.63	41.61	
31	山苦荬	*Ixeris chinensis* (Thunb.) Nakai		7.04					12.78	
32	狗尾草	*Setaria viridis* (L.) Beauv.							20.08	
33	牻牛儿苗	*Erodium stephanianum* Willd.							12.30	
34	地稍瓜	*Cynanchum thesioides* (Freyn) K. Schum.							12.06	
35	抱茎苦荬菜	*Ixeris sonchifolia* (Bunge) Hance							11.82	
36	柳穿鱼	*Linaria vulgaris* subsp. *Chinensis* (Bunge ex Debeaux) D. Y. Hong					12.62			
37	蒲公英	*Taraxacum mongolicum* Hand.-Mazz.					14.58			
38	乳浆大戟	*Euphorbia esula* L.					12.36			
39	蒺藜	*Tribulus terrestris* L.					27.81			
40	鹅绒藤	*Cynanchum chinense* R. Br.						7.31		
41	漏芦	*Stemmacantha uniflora* (L.) Dittrich					36.82			
42	风毛菊	*Saussurea japonica* (Thunb.) DC.						38.70		
43	苣荬菜	*Sonchus arvensis* L.						7.24		
44	牛枝子	*Lespedeza bicolor* Turcz.			7.26					
45	紫穗槐	*Amorpha fruticosa* L.			7.67					
46	画眉草	*Eragrostis pilosa* (L.) Beauv.			44.94	12.84				
47	五月艾	*Artemisia indica* Willd.		19.73						
48	粉报春	*Primula farinosa* L.		9.69						
49	女娄菜	*Melandrium apricum* (Turcz. ex Fisch. et Mey.)Rohrb.		9.01						
50	皱果苋	*Amaranthus viridis* L.		7.42						
51	圆叶牵牛花	*Pharbitis purpurea* (L.) Voigt			17.87					
52	虎尾草	*Chloris virgata* Swartz		8.17		26.83				
53	黄花苜蓿	*Medicago falcata* L.		7.04						
54	砂蓝刺头	*Echinops gmelini* Turcz.				17.80				
55	驼绒藜	*Ceratoides latens* (J. F. Gmel.) Reveal et Holmgren				25.43				
56	金色狗尾草	*Setaria glauca* (L.) Beauv.				20.43				
57	草木樨状黄芪	*Astragalus melilotoides* Pall.					12.89			
58	刺藜	*Astragalus melilotoides* Pall.					12.62			
59	茵陈蒿	*Artemisia capillaris* (Compositae)								12.58
60	鹤虱	*Lappula myosotis* V. Wolf.				8.77				

注:2 a:恢复2年;6 a:恢复6年;10 a:恢复10年;12 a:恢复12年;S:南坡;N:北坡

Note: 2 a: recovery duration of 2 years; 6 a: recovery duration of 6 years ; 10 a: recovery duration of 10 years; 12 a: recovery duration of 12 years; S: South slope; N: North slope

2.2　排土场边坡植物种类多样性变化及群落稳定性分析

2.2.1　边坡植物种类多样性分析

群落功能的稳定性体现在群落物种的多样性上。从图3可知,物种多样性指数在恢复初期较高,整体有降低波动,但幅度较小。其中Margalef丰富度指数与Shannon-Wiener多样性指数在恢复10 a时升高,恢复12 a时略有下降。Pielou均匀度指数和Simpson优势度指数变化相似,均在10 a时出现波动,12 a时结束;整体上看呈现出随着恢复年限的增加逐渐增加的趋势。比较相同年限不同方位坡的物种各项指数,Shannon-Wiener多样性指数整体呈现北坡>南坡;Margalef丰富度指数在恢复前期南坡>北坡,后期无明显区别;Simpson优势度指数在恢复后期南坡>北坡;Pielou均匀度指数无明显区别。

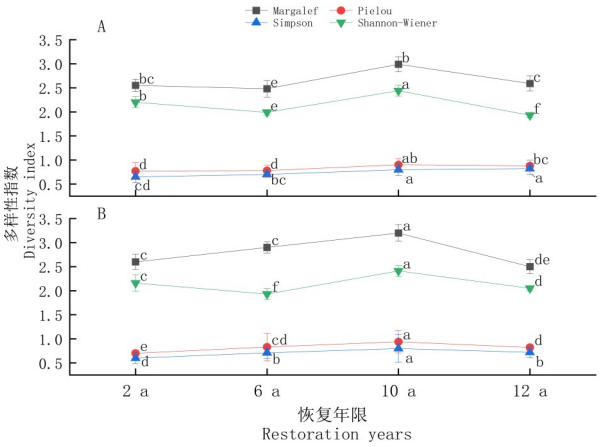
2.2.2　边坡群落稳定性

运用完善后的稳定性测定方法,绘制边坡群落稳定性拟合曲线(图4),得到植物群落稳定性图解,植物群落中各种群之间的变化关系在一定程度上表现了植物群落的稳定。

由表2可见,北坡在恢复初期欧式距离最大,最大值为28.71,随着恢复年限增加,欧式距离呈现整体减小趋势,表明群落稳定性逐渐上升。南坡欧氏距离为2 a>12 a>6 a>10 a,恢复10 a时南坡植被稳定性最高;北坡欧氏距离为2 a>10 a>12 a>6 a,恢复6 a时北坡稳定性最高。比较同一恢复年限不同坡位的欧氏距离,多数排土场稳定性北坡优于南坡,恢复10 a时出现波动。

2.3　地上生物量

不同恢复年限排土场边坡地上生物量分析



A:北坡;B:南坡;不同小写字母表示相同坡向不同恢复年限间差异显著($P<0.05$)

A: North slope; B: South slope; Different lowercase letters indicate that there are significant differences between different recovery durations in the same slope direction($P<0.05$)

图3　不同恢复年限边坡植物多样性指数

Fig.3　Plant diversity index of slopes with different restoration durations

(图5)表明,12 a排土场边坡地上生物量显著高于10 a($P<0.05$),6 a地上生物量显著高于2 a($P<0.05$),12 a地上生物量最高,10 a时出现波动,但整体上呈现随着恢复年限的增加而增加的趋势。恢复2 a时南坡地上生物量高于北坡,恢复10 a时略有波动,但整体上北坡生物量高于南坡,在恢复12 a时差距最大,最大值为56.67 g·m^{-2}。

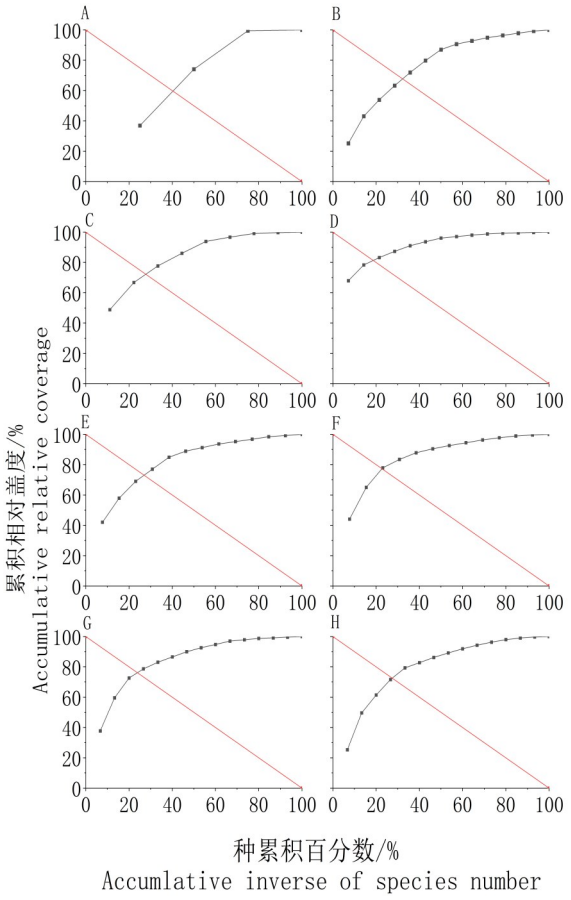
2.4　边坡土壤含水率

从图6可见,排土场边坡土壤含水率随着恢复年限增加而升高,表层0~10 cm处土壤含水率普遍低于20~30 cm处土壤含水率,土壤含水随深度增加而增加。北坡土壤含水整体上大于南坡,但

表2　排土场边坡植被群落稳定性分析

Table 2　Stability analysis of vegetation community on dump slope

恢复年限/a Age of arestoration	坡向 Slope direction	拟合曲线 Fitting curve	交点坐标 Intersection coordinate	欧氏距离 Euclidean distance
2	北坡	$y=11.90+2.93x-0.034x^2+0.000\ 14x^3$	(28.93,71.08)	12.62
	南坡	$y=1.825+1.191x+0.012x^2-0.000\ 14x^3$	(40.30,59.70)	28.71
6	北坡	$y=27.502+2.861x-0.040x^2+0.000\ 19x^3$	(22.70,77.30)	3.82
	南坡	$y=28.472+2.097x-0.021x^2+0.000\ 07x^3$	(27.79,72.21)	11.02
10	北坡	$y=9.229+3.314x-0.044x^2+0.000\ 20x^3$	(27.46,72.54)	10.55
	南坡	$y=24.964+2.545x-0.031x^2+0.000\ 14x^3$	(26.95,73.05)	9.83
12	北坡	$y=24.776+2.876x-0.039x^2+0.000\ 18x^3$	(23.86,76.13)	5.47
	南坡	$y=5.08+3.27x-0.041x^2+0.000\ 18x^3$	(29.02,70.98)	12.76

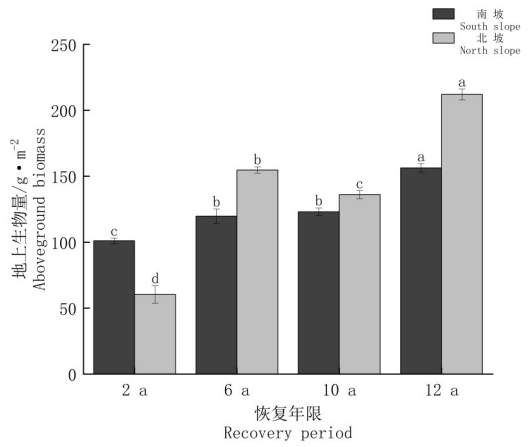


A、C、E、G:北坡;B、D、F、H:南坡;A、B:恢复2a;C、D:恢复6a;E、F:恢复10a;G、H:恢复12a;曲线为稳定性拟合曲线;直线为Y=100-X

A, C, E, G: North slope; B, D, F, H: South slope; A, B: recovery duration of 2 years; C, D: recovery duration of 6 years; E, F: recovery duration of 10 years; G, H: recovery duration of 12 years. The curve represents the stability fitting curve. The line means Y=100-X

图4 边坡植物群落稳定性拟合曲线

Fig.4 Slope plant community stability fitting curve



不同小写字母表示相同坡向不同恢复年限间差异显著($P<0.05$)

Different lowercase letters indicate that there are significant differences between different recovery durations in the same slope direction($P<0.05$)

图5 边坡植物地上生物量

Fig.5 Aboveground biomass of slope plants

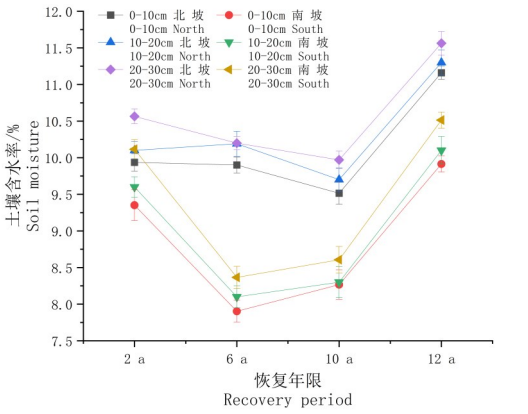


图6 边坡土壤含水率

Fig.6 Slope soil moisture content

在恢复初期有所波动,在恢复6 a和10 a时土壤含水率变化趋势大致相同,恢复12 a时土壤含水率达到峰值,土壤保水能力随恢复年限逐渐提高。

3 讨论

3.1 排土场边坡植物群落特征变化

物种多样性是植物群落的重要特征,是防止边坡水土流失,稳定排土场边坡生态系统的基础[14-15]。物种多样性在时间梯度上的变化在一定程度上反映了群落的演替进展[16-17]。该露天矿区排土场边坡主要生长草本植被,菊科、禾本科、豆科、藜科植物种数最多,占所有草本植物种类的70%以上,其原因是菊科、禾本科、豆科、藜科植物抗逆性强,具有良好的适应环境能力,菊科植物种子传播速度快、范围广、易存活[18],是入侵过程中的先锋物种;禾本科植物根系分布浅而广,有利于固结土壤;豆科植物根系有其特有的根瘤菌,可在土壤中固氮,增强土壤肥力[19]。故应因地制宜选取能适应矿山环境的植物,利用其快速生长、落地生根、抗逆性强等特点[20],可在较短时间内实现大范围植被覆盖,减少降雨对边坡的冲刷,改善土壤环境,形成根-土复合体,加固边坡土壤,防止水土流失[21]。恢复初期以栽种的紫花苜蓿为主要优势植物种,多年生植物随着恢复年限的增加,逐渐成为优势植物种。在人工恢复初期,排土场边坡土壤贫瘠,保水效果差,种植的紫花苜蓿结构较为单

一,为本土物种入侵提供了一定条件,具有繁殖能力强、入侵性高、抗逆性强的一、二年生本土植物快速入侵,其适应恶劣生存环境的能力强,是边坡演替的先锋物种[22]。随着恢复年限的增长,排土场北坡植物长势及数量均优于南坡。植株与环境随恢复年限的增加互相适应,逐渐达到群落稳定的临界点[23]。黑沙蒿、羊草等当地多年生植物具有较强的抗旱、耐风沙、根深固土等生物学特征,生存和繁殖受环境影响较小[24],且可以改良土壤微环境,因此有利于排土场的正向演替。

群落长期变化积累的结果产生了群落的演替,标志着优势物种的更替,甚至是所有物种的更替[25],露天煤矿排土场恶劣的自然环境限制了自然界中理想演替进程。边坡群落的物种组成随复原年份的增加而变化,优势种的更新换代则反映了群落生态结构和功能逐渐演替为当地原生植物群落且稳定性增强的过程[26]。研究显示,采矿区生态恢复栽种演替后期的优势植物,对植被演替过程起到有效的加速作用,缩短群落达到稳定的时间,更加有利于矿山的生态重建与治理[27],故在进行矿山修复时可以优先考虑菊科、禾本科、豆科、藜科等植物作为建群种。

3.2　排土场边坡植被群落稳定性变化

从物种多样性入手,进而研究群落的稳定性是生态系统研究过程中的必要环节[28]。排土场的边坡植被群落稳定性由恢复初期的南坡大于北坡演变为恢复中期的北坡大于南坡,恢复12 a时回到南坡大于北坡。排土场北坡欧氏距离总体上呈下降趋势,表明群落逐渐趋于稳定;南坡欧氏距离在恢复12 a时略微上升,但远远小于恢复2 a时的欧氏距离,由此可以推断,南坡稳定性呈现上升趋势。优势种的比重大小决定了群落稳定性,群落功能和结构的变化也与优势种有着密不可分的关系[29]。恢复时间越长,群落越稳定[30]。在恢复10 a时排土场边坡植物多样性、土壤含水率及地上生物量均存在突然上升的波动,其原因可能是恢复10 a排土场平台种植大量作物,平台作物有人为管控,人为因素造成了排土场边坡的波动。

总体来看,随着恢复年限的不断增加,物种的多样性整体有减小趋势但波动不大,稳定性提高。我们看到,通过人工促进植被恢复,在矿区已经成为一种有效的生态修复措施[31]。群落演替是一个长时间序列动态向前的过程,本文运用时空替代法进行讨论,对排土场边坡的群落组成特征和稳定性进行了初步研究,但在连续长时间序列下对半干旱矿区植物变化特征及顶级演替群落的评价还有待进一步探索。

3.3　地上生物量及土壤含水率变化

郭京衡[32]研究发现,水分是影响干旱区和半干旱区植物生长发育和群落演替的关键因素。生物量是排土场边坡生态现状及生产潜力的重要体现,生物量的多少取决于土壤中水分的含量。土壤含水率表现为随恢复年限而增加,深层土壤含水率大于表层土壤含水率,北坡土壤含水率大于南坡土壤含水率。本研究分析结果表明排土场边坡恢复时间越长,地上生物量越高,这与刘冲等[33]研究结论基本一致。随着恢复年限增加,北坡地上生物量大于南坡,其原因是南坡日照时间长,土壤水分含量低,不利于干旱地区植被生长。

4　结 论

露天煤矿排土场边坡植物组成为17科44属60种,以草本植物为主。随着恢复年限的增加,多年生乡土植物逐渐占据优势地位,地上生物量增多,群落稳定性升高。由于排土场南北坡光照、土壤水分不同,故南、北坡植被存在差异,整体来看北坡植被恢复效果优于南坡。研究表明,人工植被恢复是矿山绿化中的重要措施,且植被恢复年限越长,植被恢复效果及稳定性越好。优选适合的植被进行边坡恢复,可以防止水土流失,维持边坡安全稳定。在鄂尔多斯地区进行人工植被恢复时选取能快速生长的豆科植物如紫花苜蓿等作为建群种,并辅以羊草、黑沙蒿、披碱草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使群落演替进程加快,促进群落稳定,为矿山的绿色修复提供一定的参考。

参　考　文　献

[1]宝海风.鄂尔多斯煤矿集中分布区景观历史对植物多样性的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
Bao H F. Impact of landscape history on plant species biodiversity in the coal mines concentrated distribution area of ordos [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.

[2]张地伟,韩金伟.采煤沉陷区水土资源评价及生态修复技术实践研究[J/OL].煤炭技术:1-9.https://doi.org/10.13301/j.cnki.

ct.2024.06.25.
Zhang D W, Han J W. Evaluation of soil and water resources and practice of ecological restoration technology in coal mining subsidence areas [J/OL]. Coal Technology : 1-9. https://doi.org/10.13301/j.cnki.ct.2024.06.25.

[3]李全生,李淋,方杰,等.北方防沙带大型露天煤矿区生态保护与修复技术[J/OL].煤炭科学技术:1-13. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.
Li Q S, Li L, Fang J, et al. Ecological protection and restoration technology of large-scale open-pit coal mining area in the northern sand-proof belt[J/OL]. Coal Science and Technology : 1-13.http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.

[4]Guo J T, Li Q S, Xie H Z, et al. Monitoring of vegetation disturbance and restoration at the dumping sites of the baorixile open-pit mine based on the landtrendr algorithm [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(15):9066.

[5]Harris J A, Birch P, Palmer J P. Land restoration and reclamation: principles and practice [M]. Harlow, Essex, Eng.: Longman, 1996:39-41.

[6]Reid N B, Naeth M A. Establishment of a vegetation cover on tundra kimberlit mine tailings: 2. a field study [J]. Restoration Ecology, 2005, 13(4):602-608.

[7]高风,文仕知,韦铄星,等.桂西北石漠化区不同植被恢复类型对土壤理化性质、酶活与真菌群落多样性的影响[J].浙江农业学报,2023,35(10):2425-2435.
Gao F, Wen S Z, Wei S X, et al. Effect of vegetation restoration models on soil physiochemical properties, enzymes activities and fungal diversity in rocky desertification area of northwest Guangxi, China [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2023,35 (10) : 2425-2435.

[8]曹娓,郭佳月,武小栖,等.京港澳高速公路郑新段边坡植物群落稳定性[J].草业科学,2022,39(10): 2074-2082.
Cao W, Guo J Y, Wu X Q, et al. Stability analysis of the vegetation community in the Zheng-Xin section of the Beijing-Hong Kong-Macao Highway slope [J]. Pratacultural Science, 2022,39(10) : 2074-2082.

[9]韩雅璐.伊金霍洛旗不同凋落物对土壤有机碳转化的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
Han Y L. Effects of different litters on soil organic carbon transformation in Ejin horo banner[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2023.

[10]张琳,陆兆华,唐思易,等.露天煤矿排土场边坡植被组成特征及其群落稳定性评价[J].生态学报,2021,41(14):5764-5774.
Zhang L, Lu Z H, Tang S Y, et al. Slope vegetation characteristics and community stability at different restoration years of open-pit coal mine waste dump [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(14): 5764-5774.

[11]王皓月,郭月峰,徐雅洁,等.九峰山不同林分类型生态恢复植被-土壤系统耦合关系评价[J].生态环境学报,2021,30(12): 2309-2316.
Wang H Y, Guo Y F, Xu Y J, et al. Coupling relationship between vegetation and soil system in ecological restoration of different stand types in Jiufeng Mountain [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021,30(12): 2309-2316.

[12]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.
Zheng Y R. Comparison of methods for studying stability of forest community [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36 (5) : 28-32.

[13]Godron M. Some aspects of heterogeneity in grasslands of Cantal[J]. Statistical Ecology, 1972, 3:397-415.

[14]陈佳敏,王宁,赵富王,等.黄土丘陵区沟沿线不同微地形植物群落特征[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(5): 31-38.
Chen J M, Wang N, Zhao F W, et al. Plant community characteristics of different micro-topography along the shoulder line in loess hilly-gullied region[J]. Science of Soil and Water Conservation,2022,20(5):31-38.

[15]聂莹莹,徐丽君,辛晓平,等.围栏封育对温性草甸草原植物群落构成及生态位特征的影响[J].草业学报,2020,29(11): 11-22.
Nie Y Y, Xu L J, Xin X P, et al. Effects of fence enclosure on the plant community composition and niche characteristics in a temperate meadow steppe[J].Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(11): 11-22.

[16]高瑞,艾宁,刘广全,等.煤矿复垦区不同修复年限林下草本群落特征及其与土壤耦合关系[J].草业学报,2022,31(6): 61-68.
Gao R, Ai N, Liu G Q, et al. Characteristics of understory herb communities across time during restoration in coal mine reclamation areas and their coupling with soil properties [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022,31(6): 61-68.

[17]田起隆,张晓萍,王妙倩,等.植被演替下植物组成多样性和群落稳定性与土壤团聚体的关系[J].中国环境科学,2022,42(12):5885-5895.
Tian Q L, Zhang X P, Wang M Q, et al. Plant composition diversity and community stability under vegetation succession in relation to soil aggregates[J]. China Environmental Science, 2022,42(12): 5885-5895.

[18]黄丽菊,杨磊,李文超,等.甘肃马先蒿入侵对巴音布鲁克草原植物群落特征的影响[J].草业科学,2024,41(1):1-14.
Huang L J, Yang L, Li W C, et al. Effect of Pedicularis kansuensis invasion on plant community characteristics in Bayanbulak grassland[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(1): 1-14.

[19]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[J].生态学杂志,2015,34(4):1152-1157.
Yang Q X, Zhao B Q, Guo D G. A review on vegetation restoration of opencast coal mine areas in northern China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015,34 (4) : 1152-1157.

[20]许木桑,雷少刚,杨星晨,等.基于高光谱遥感的排土场植被覆盖与植物多样性分析[J].生态学杂志,2022, 41(3):603-609.
Xu M S, Lei S G, Yang X C, et al. Analysis of vegetation coverage and diversity of dump based on hyperspectral remote sensing[J].Chinese Journal of Ecology, 2022,41(3): 603-609.

[21]尚志.胜利一号露天煤矿排土场植物多样性研究[J].中国矿业,2020,29(S1):101-105.
Shang Z. Research on plant species diversity of Shengli No. 1 open-cast coal mine.[J]. China Mining Magazine, 2020, 29

(S1): 101-105.

[22]哈文秀,肖桂英,曹建华,等.喀斯特断陷盆地区不同恢复阶段群落物种组成与多样性特征[J].生态学杂志,2020,39(1):36-45.
Ha W X, Xiao G Y, Cao J H, et al. Species composition and diversity of plant community at different restoration stages of Karst graben basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(1): 36-45.

[23]刘百灵,李仓水.复垦植被对排土场土壤持水能力的影响与评价[J].山西农业大学学报(自然科学版),2023,43(6):89-98.
Liu B L, Li C S. Effects and evaluation of vegetation restoration on the soil's water retention capacity in reclaimed soil area[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2023,43(6): 89-98.

[24]范小杉,熊向艳,马建军,等.北方草原露天煤矿区生态景观变化研究——以呼伦贝尔市伊敏露天矿为例[J].环境工程技术学报,2019,9(6):732-740.
Fan X S, Xiong X Y, Ma J J, et al. Change of ecological landscape in open-pit coal mining area of northern grassland: taking Yimin open coal mine in Hulun Buir City as an example [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019,9(6): 732-740.

[25]张瑞红,蔡文涛,来利明,等.鄂尔多斯高原弃耕农田植物群落演替过程中物种多样性的变化[J].干旱区资源与环境,2018,32(10):178-183.
Zhang R H, Cai W T, Lai L M, et al. Changes of species diversity in plant community succession of abandoned cropland in Ordos Plateau [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018,32(10): 178-183.

[26]左小安,赵哈林,赵学勇,等.科尔沁沙地不同恢复年限退化植被的物种多样性[J].草业学报,2009,18(4):9-16.
Zuo X A, Zhao H L, Zhao X Y, et al. Species diversity of degraded vegetation in different age restorations in Horqin Sandy Land, Northern China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009,18(4): 9-16.

[27]陈思思,董滨,徐祖信.矿山生态修复及市政污泥稳定化产物应用潜力[J].中国环境科学,2022,42(12): 5734-5747.
Chen S S, Dong B, Xu Z X.Mine land ecological restoration and application potential of sewage sludge stabilization products [J].China Environmental Science, 2022,42(12): 5734-5747.

[28]杨桂梅,周友秀,杨钰华,等.广东鼎湖山河岸林水翁蒲桃+蒲桃群落的物种和功能多样性及群落稳定性分析[J].植物资源与环境学报,2023,32(1):19-28.
Yang G M, Zhou Y X, Yang Y H, et al. Analyses on species and functional diversities and community stability of Syzygium nervosum+Syzygium jambos community of riparian forest in Dinghu Mountain of Guangdong Province[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2023, 32(1): 19-28.

[29]廖晗茹,TuvshintogtokhIndree,郭通,等.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[J].北京大学学报(自然科学版),2020,56(3):471-478.
Liao H R, Tuvshintogtokh I, Guo T, et al. Effects of grazing exclusion on the vegetation community composition and the community stability of dry steppe and mountain steppe ecosystems in Mongolia [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2020,56(3): 471-478.

[30]庞景豪,梁燊,刘亚斌,等.恢复年限对高寒金属矿山排土场植物多样性和土壤化学特性的影响[J].水土保持通报,2023,43(4):110-120.
Pang J H, Liang S, Liu Y B, et al. Influence of recovery years on plant diversity and soil chemical properties for alpine metal mine dumps [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(4): 110-120.

[31]周国驰,杨卓,辛建宝,等.排土场复垦初期种群生态位与多样性动态分析[J].矿业安全与环保,2023,50(4):149-154.
Zhou G C, Yang Z, Xin J B, et al.Dynamic analysis of niche and diversity of populations in the early stage of dump reclamation [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023,50(4): 149-154.

[32]郭京衡,李尝君,曾凡江,等.2种荒漠植物根系生物量分布与土壤水分、养分的关系[J].干旱区研究,2016,33(1):166-171.
Guo J H, Li C J, Zeng F J, et al. Relationship between root biomass distribution and soil moisture, nutrient for two desert plant species[J]. Arid Zone Research, 2016,33(1): 166-171.

[33]刘冲,野起瑞,李江文,等.黄土丘陵区撂荒年限和坡向对灌丛生物量及丰富度的影响[J].草地学报,2023,31(9):2826-2833.
Liu C, Ye Q R, Li J W, et al. Influences of the uncultivation duration of arable lands and slope aspect on the biomass of shrub and subshrub life-form and species richness on lands in Loess Hilly Region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(9): 2826-2833.

Vegetation evolution patterns on slopes of different restoration durations in the Ordos mining area

Shang Yu[1,2], Li Gangtie[1,2*], Ma Yunxia[1,2], Zhang Yuexin[1], He Qin[1], Jia Zhi[3]

(*1.College of Desert science and Engineerin, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2.Key Laboratory of Desert Ecosystem Protection and Restoration, State Forestry and Grassland Administration, Hohhot 010018, China; 3.Ordos Wulan Development Group Incorporated, Ordos 017200, China*)

Abstract: [Objective] The serious soil erosion on the slopes of overburden dumps in open-pit coal mines can be effectively prevented from further expansion by implementing reasonable vegetation measures. However, there is limited research on the vegetation restoration on the slopes of overburden dumps. This study aimed to analyze the succession patterns of slope vegetation to expand the initial restoration species and provided a reference for the ecological security assessment of mining areas. [Methods] Using the spatiotemporal substitution method, vegetation surveys were conducted on the north and south slopes of overburden dumps with four different restoration durations (2, 6, 10, 12a) in the Manlailiang open-pit coal mine. The succession pro-

cess of slope communities under different restoration durations were analyzed to select dominant plant species during the restoration process, providing a theoretical basis for the stability of slope vegetation on overburden dumps. [Results] The findings included: (1) The vegetation composition on the slopes of the open-pit coal mine overburden dumps consisted of 60 species from 44 genera and 17 families, mainly comprising herbaceous plants. (2) With increasing restoration duration, perennial native plants gradually occupied a dominate position, aboveground biomass increased, and community stability improved. (3) Due to differences in sunlight and soil moisture between the north and south slopes of the overburden dumps, there were variations in vegetation, with overall better vegetation recovery on the north slope compared to the south slope. (4) During artificial vegetation restoration, selecting fast-growing leguminous plants such as *Medicago sativa* as pioneer species, supplemented by indigenous plants with strong adaptability such as *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel. 、*Artemisia ordosica* Krasch, and *Elymus dahuricus* Turcz, can accelerate the succession process of the community and promote community stability to some extent. [Conclusion] Selecting suitable vegetation according to different regions and aspects can reduce community fluctuations and promote community stability, providing a reference for the green restoration of mines.

Keywords: Side slope stability, Vegetation restoration, Plant diversity, Community stability, Succession rule

(编辑:郭玥微)