

DOI: 10.20103/j.stxb.202503100524

谢旭强, 刘星语, 彭琳, 赵宇彤, 师邵彤, 李森, 刘忠华, 彭霞薇. 大型露天矿排土场不同恢复模式植物群落时空演变特征. 生态学报, 2025, 45(22):

Xie X Q, Liu X Y, Peng L, Zhao Y T, Shi S T, Li S, Liu Z H, Peng X W. Characterization of spatio-temporal evolution of plant communities in different restoration modes in large open-pit mine dumps. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(22):

大型露天矿排土场不同恢复模式植物群落时空演变特征

谢旭强¹, 刘星语¹, 彭琳¹, 赵宇彤¹, 师邵彤¹, 李森¹, 刘忠华¹, 彭霞薇^{1,2,3,*}

1 北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083

2 北京林业大学树木发育与基因编辑研究院, 北京 100083

3 北京林业大学林业食品加工与安全北京市重点实验室, 北京 100083

摘要:露天矿排土场生态环境脆弱、水土流失严重, 导致植被自然恢复缓慢、群落结构简单且生态系统功能低下, 严重制约着当地生态环境治理和煤矿可持续发展。采用“空间代时间”的生态学研究方法, 对黑岱沟和哈尔乌素排土场 5 种不同恢复模式(自然恢复(NR)、人工草地恢复(GR)、人工灌木林恢复(SR)、人工乔木纯林恢复(PF)和人工针阔混交林恢复(MF))下 5 个不同恢复年限(< 5a (Y1), 5—10a (Y2), 10—15a (Y3), 15—20a (Y4), > 20a (Y5))的植被群落特征进行系统调查, 以探究不同恢复模式随恢复年限增加植物群落的演变规律。结果表明: 1) 黑岱沟和哈尔乌素排土场植物群落组成为 25 科 62 属 89 种, 其中菊科在物种丰富度上占据优势, 禾本科则在个体数量上占主导地位; 2) 各恢复模式随恢复年限增加, 植物群落多样性指数(Margalef 丰富度指数、Shannon-Weiner 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数)均呈现“下降-上升-趋于稳定”的非线性变化趋势, 反映出群落重建过程中存在明显的生态阈值效应; 3) 基于 Jaccard 相似性指数分析表明, 不同恢复模式下各恢复年限之间的相似性均为极不相似, 但相似性值逐渐增加, 演替方向趋于向相似演替; 4) 通过稳定性指数分析发现, 排土场不同恢复模式的群落稳定性在 Y3 阶段后整体向更稳定的方向发展, 除 NR 模式在整个恢复阶段稳定性没有明显变化、稳定性相对较差和 SR 模式在 Y3 阶段时达到相对稳定随后又趋向于不稳定外, 其他模式到 Y5 阶段时基本接近相对稳定的状态。该研究通过多模式、多时序的对比分析, 系统揭示了黑岱沟和哈尔乌素排土场不同恢复模式下近 30 年植被的时空演变特征, 为后续加强排土场人工恢复的实施提供了数据支撑和理论依据。

关键词:露天矿; 排土场; 恢复模式; 植物群落; 时空演变

Characterization of spatio-temporal evolution of plant communities in different restoration modes in large open-pit mine dumps

XIE Xuqiang¹, LIU Xingyu¹, PENG Lin¹, ZHAO Yutong¹, SHI Shaotong¹, LI Sen¹, LIU Zhonghua¹, PENG Xiawei^{1,2,3,*}

1 School of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Institute of Tree Development and Genome Editing, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Beijing Key Laboratory of Food Processing and Safety in Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Open-pit mine dumps which are characterized by fragile ecological environments and severe soil erosion due to extensive mining activities and the removal of topsoil, resulted in slow natural recovery of vegetation, simple community structure and low ecosystem functioning. These issues significantly restricted local ecological restoration and the sustainable

基金项目:国家重点研发计划(2023YFF1306004); 北京林业大学“5·5 工程”科研创新团队项目(BLRC2023B09)

收稿日期:2025-03-10; **网络出版日期:**2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pengxw@bjfu.edu.cn

development of coal mines. The “space for time” method, a widely used approach in ecological studies to understand long-term processes by examining different-aged sites simultaneously, was employed to systematically investigate vegetation community characteristics under five restoration modes (natural restoration (NR), artificial grassland restoration (GR), artificial shrub restoration (SR), artificial pure forest restoration (PF) and artificial mixed coniferous and broad-leaved forest restoration (MF)) across five restoration periods (< 5 years (Y1), 5 - 10 years (Y2), 10 - 15 years (Y3), 15 - 20 years (Y4), and >20 years (Y5)) at the Heidaigou and Halawusu dumps, which represent typical large-scale open-pit coal mining areas in northern China.. The study, aiming to provide a comprehensive understanding of vegetation recovery dynamics, explored the evolution patterns of plant communities across restoration modes with increasing duration. Key findings revealed several critical insights into the recovery processes of these degraded ecosystems. The results showed that: 1) Plant communities comprised 89 species from 62 genera and 25 families, exhibiting relatively simple composition. Asteraceae contained the highest species richness, and Poaceae dominated individual numbers. 2) Diversity indices (Margalef richness index, Shannon-Weiner diversity index, Pielou evenness index and Simpson dominance index) all show a non-linear trend of ‘decreasing-increasing-stabilising’, reflecting the obvious ecological threshold effect in the process of community reconstruction. 3) Based on the Jaccard similarity index analyses, it was shown that the community similarity was initially low across restoration years but gradually increased, indicating convergent successional pathways among modes. 4) An analysis of the stability index revealed that the community stability of different restoration modes in the dumps generally improved after the Y3 stage. However, exceptions were observed: the NR mode exhibited no significant stability changes throughout the restoration period and remained relatively unstable, while the SR mode attained relative stability at the Y3 stage but subsequently became unstable again. In contrast, other modes had achieved relatively stable states by the Y5 stage. Through a comparative multi-modal and multi-temporal analysis incorporating vegetation surveys, soil sampling, and statistical modeling, this study systematically revealed the spatiotemporal evolution characteristics of the vegetation under different restoration modes in the Heidaigou and Halawusu dumps in the last 30 years, providing critical data and theoretical support for optimizing artificial restoration strategies.

Key Words: open-pit mine; dumps; restoration modes; plant community; spatiotemporal evolution

露天煤矿开发作为我国重要的能源和原材料产业发展战略,带动了国民经济的发展,但露天煤矿开采的同时会产生采矿废弃物,其堆垫后则形成排土场。排土场土壤质地松散、生态环境脆弱、水土流失严重,造成了一系列地质灾害问题,甚至致使生态系统退化、崩毁,严重制约当地生态环境治理进程及煤矿可持续发展^[1]。因此,如何科学治理因露天煤矿开采而形成的排土场,尽快重塑植物群落稳定性和多样性结构是目前面临的一个新挑战。

植被恢复被普遍认为是对排土场进行修复的有效途径^[2],其基于生态学原理,利用植物的自然演替规律,重建已毁坏或破坏的森林以及其他自然生态系统,以恢复生物多样性及其生态系统功能^[3]。修复过程中,草本植物和木本植物种群不断发生演替推动植物群落的组成、结构和物种多样性不断变化,是一个重要且复杂的生态学过程^[4]。相关研究表明,随着恢复年限的增加,优势种也会变化,前期(2—3a)以一年生植物占优势地位,后期(5—10a)一年生植物逐渐退出演替进程,以多年生植物占优势地位,最终(15a以上)形成草灌丛生植物群落^[5];同时,在植被恢复过程中除了优势度朝着更具抗干扰能力和维持群落稳定性能力的物种发展外,植物多样性和丰富度也会明显增加,不同恢复阶段植物群落的多样性和结构差异显著^[6]。但是,王明明等^[7]在对科尔沁沙地的植物调查发现,随着恢复年限的增加植被盖度显著提高,生物量和多样性随恢复年限增加无显著趋势;刘世忠等^[8]对因人为因素形成的次生裸地进行植被特性研究时发现,经过20多年的自然恢复,废渣场的结构及组成仍处于演替初期。由此可见,植被修复的动态变化究竟如何,仍存在诸多疑虑,且因地理位置、土壤条件及区域气候等因素的不同,修复效果会表现出差异,但植被演替的方向始终是群落结构

和功能趋于稳定^[9-10]。

此外,进行植被恢复时植物种类和种植技术的选择一直是矿山排土场植被恢复的关键。有研究表明,植被的种类会对土壤中微生物活性和多样性产生显著影响^[11]。Huang 等^[12]对黄土高原不同复垦类型土壤理化性质研究发现,不同的植被种类对土壤理化性质的影响存在显著差别。周鹏飞等^[13]指出以乔、灌、草等不同的配置模式进行植被恢复建立起来的植物群落稳定性和可持续性比单一物种效果好。因此,在排土场恢复过程中,研究不同恢复模式下植物群落的动态演替特征,对指导大型露天矿排土场生态恢复具有重要意义。

目前国内外学者针对黑岱沟和哈尔乌素大型露天矿排土场等采矿废弃地修复的研究取得了一定成效,但主要研究内容为土壤理化性质^[14]、生态环境演变特征^[15]、边坡水力侵蚀^[16]、重金属污染^[17]和土壤碳储量变化^[18]等方面。关于黑岱沟和哈尔乌素大型露天矿排土场不同恢复模式下植物群落演替过程中结构特征和稳定性如何变化,及其未来的演替方向均不清楚,且对各恢复模式下植被的生长状况和演替动态缺乏连续的、长期的有效评估和监测。基于此,该研究采用“空间代时间”方法对黑岱沟和哈尔乌素大型露天矿排土场开展研究,通过植被调查,计算重要值、群落多样性、群落相似性及群落稳定性,分析该地区不同恢复模式下植被随恢复年限增加的动态演替特征。该研究主要解决两个科学问题:1)露天矿排土场不同恢复模式随恢复年限增加植物群落结构及演替方向如何变化? 2)露天矿排土场不同恢复模式随恢复年限增加植物群落是否稳定,哪一阶段开始稳定? 研究能够为露天矿排土场植被恢复的管理和未来演替方向预测提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

以内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗的黑岱沟露天煤矿和哈尔乌素大型露天煤矿为研究区。两矿区紧密相连,属黄土高原地区。两矿区整体地形南高北低,海拔标高在 1100—1300 m,属中温带半干旱大陆性气候区,雨量集中在 7—8 月,年平均降雨量为 386.5 mm,年平均气温为 5.3—7.6 ℃。研究区内土壤类型主要为黄绵土和风沙土,这两种土质地颗粒大,结构较差,极易受到侵蚀,造成水土、养分流失,致使当地生态环境恶劣。排土场覆土初期理化性质大致可参考刘志斌等^[19]的研究。

1.2 样地选择与调查方法

2024 年 7—9 月在黑岱沟和哈尔乌素露天煤矿内的排土场生态修复区内,采用“空间代时间”的方法,在全面踏查的基础上,根据代表性和典型性原则选取具有相似海拔、土壤类型、并能代表不同恢复模式和阶段的典型样地进行研究。根据相关资料,以恢复年限及起初植被恢复方式为划分依据,选择 5 种不同恢复模式(自然恢复(NR)、人工草地(GR)、人工灌木林(SR)、人工乔木纯林(PF)和人工针阔混交林(MF))下 5 个不同恢复年限(< 5a(Y1), 5—10a(Y2), 10—15a(Y3), 15—20a(Y4), > 20a(Y5))的样地进行植被调查(图 1)。具体样地信息见表 1。在不同恢复模式下各恢复年限的所有样地内分别随机设置 5 块 1m×1m 的样方开展草本植被调查。采用混合效应模型将树种作为随机因子检验后发现本研究中树种不存在显著效应,故 PF 模式同一年限下忽略树种影响。本研究鉴于以样地主要人工种植植物作为恢复模式的划分依据,且各样地内乔木、灌木植被类型单一,所以本文没有对乔木和灌木的物种多样性进行分析。分别记录草本层植物名称、数量(株)、株高(cm)和盖度(%)等植被指标。

1.3 植物群落结构特征计算

1.3.1 重要值计算

群落植物重要值以相对盖度和相对高度为原始数据,根据耿冰瑾等^[20]的重要值(important value, IV)等级划分:IV≥10%为优势种(IV≥30%为明显优势种,说明其生态位优势明显),10%>IV≥5%为亚优势种,5%>IV≥1%为伴生种,IV<1%则为偶见种。重要值计算公式如下:

$$IV_i = \frac{\text{相对盖度}_i + \text{相对高度}_i}{2} \quad (1)$$

式中,相对盖度*i*为*i*植物种的植被盖度与所有植物种的盖度之和的比;相对高度*i*为*i*植物种的平均高度与所有植物种的平均高度之和的比。

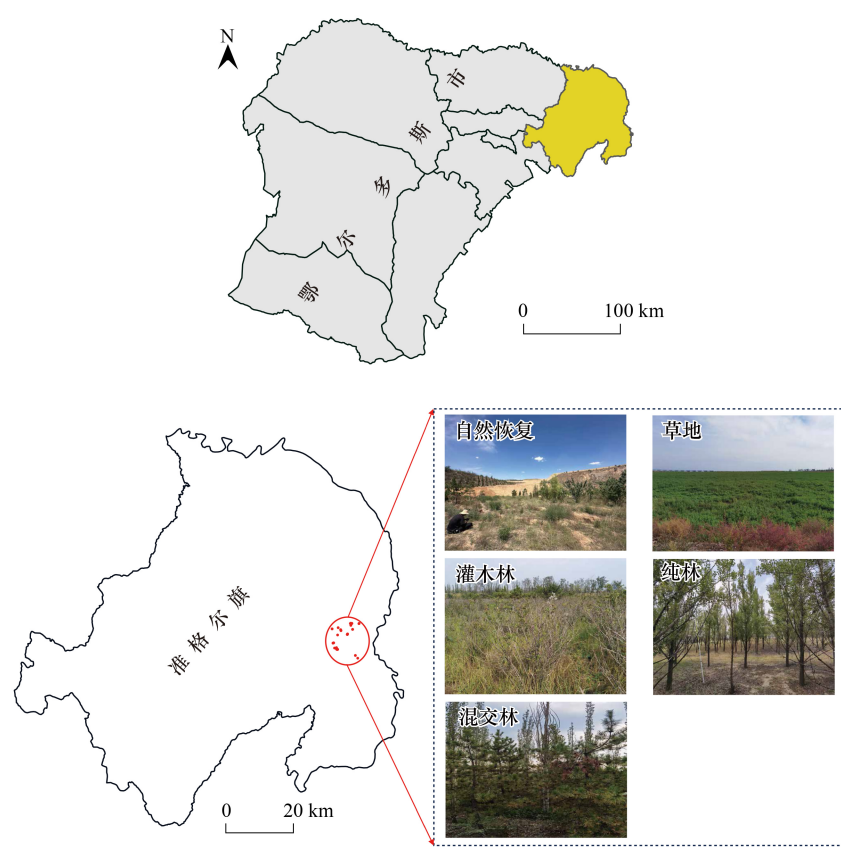


图 1 研究区位置及样地设计
Fig.1 Location of the studied area and sample plot design

表 1 样地信息表
Table 1 Sample plot information table

恢复模式 Modes	恢复年限 Years	初期植被类型 Vegetation type	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Elevation/m	乔木郁闭度 Canopy density
NR	Y1	自然恢复	111.2314°E	39.7358°N	1202	/
	Y2	自然恢复	111.2345°E	39.7356°N	1191	/
	Y3	自然恢复	111.2693°E	39.7763°N	1244	/
	Y4	自然恢复	111.2790°E	39.8040°N	1220	/
	Y5	自然恢复	111.3070°E	39.7868°N	1197	/
GR	Y1	紫花苜蓿 (<i>Medicago sativa</i>)	111.2520°E	39.7769°N	1296	/
	Y2	紫花苜蓿	111.2690°E	39.7761°N	1241	/
	Y3	短花针茅 (<i>Stipa breviflora</i>)	111.3088°E	39.8041°N	1247	/
	Y4	短花针茅	111.2866°E	39.7885°N	1286	/
	Y5	紫花苜蓿	111.2869°E	39.7897°N	1285	/
SR	Y1	小山杏 (<i>Armeniaca sibirica</i>)	111.2367°E	39.7930°N	1238	/
	Y2	丁香 (<i>Syringa oblata</i>)	111.3029°E	39.7852°N	1227	/
	Y3	紫穗槐 (<i>Amorpha fruticosa</i>)	111.3040°E	39.7856°N	1213	/
	Y4	小山杏	111.3135°E	39.8036°N	1271	/
	Y5	小山杏	111.2812°E	39.8041°N	1239	/

续表

恢复模式 Modes	恢复年限 Years	初期植被类型 Vegetation type	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Elevation/m	乔木郁闭度 Canopy density
PF	Y1	油松 (<i>Pinus tabulaeformis</i>)、樟子松 (<i>Pinus sylvestris</i> var. <i>Mongolica</i>)、小叶杨 (<i>Populus simonii</i>)、新疆杨 (<i>Populus alba</i> f. <i>pyramidalis</i>)	111.2504°E	39.7682°N	1251	0.5
	Y2	油松、樟子松、小叶杨、新疆杨	111.2624°E	39.7737°N	1224	0.3
	Y3	油松、樟子松、新疆杨	111.2565°E	39.7767°N	1215	0.2
	Y4	油松、樟子松、小叶杨、新疆杨	111.2898°E	39.7920°N	1246	0.4
	Y5	油松、新疆杨	111.2808°E	39.7981°N	1231	0.6
MF	Y1	油松、新疆杨混交	111.2467°E	39.7853°N	1208	0.6
	Y2	油松、新疆杨混交	111.2245°E	39.7398°N	1227	0.6
	Y3	油松、新疆杨混交	111.2844°E	39.8042°N	1248	0.4
	Y4	油松、新疆杨混交	111.2843°E	39.8046°N	1245	0.4
	Y5	油松、新疆杨混交	111.2835°E	39.7982°N	1263	0.7

NR:自然恢复 natural restoration;GR:人工草地恢复 artificial grassland restoration;SR:人工灌木林恢复 artificial shrubland restoration;PF:人工乔木纯林恢复 artificial pure forest restoration;MF:人工针阔混交林恢复 artificial mixed conifer-broadleaf forest restoration;“/”表示样地内无乔木树种

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,包括 Margale 丰富度指数 (R)、Shannon-weiner 多样性指数 (H)、Simpson 优势度指数 (D) 和 Pielou 均匀度指数 (E)。计算公式如下:

$$H = - \sum P_i \ln P_i \tag{2}$$

$$D = 1 - \sum P_i^2 \tag{3}$$

$$R = \frac{(S-1)}{\ln N} \tag{4}$$

$$E = \frac{H}{H_{max}} \tag{5}$$

$$P_i = \frac{N_i}{N} \tag{6}$$

$$H_{max} = \ln S \tag{7}$$

式中, P_i 表示第 i 种的个体数占群落总个体数的比例; S 表示群落中的总物种数量; N 表示观察到的个体总数; N_i 表示第 i 物种的个体数; H 表示实际观察的物种多样性指数; H_{max} 表示最大的物种多样性指数。

1.3.3 群落相似性

群落相似性系数采用 Jaccard 相似性公式计算^[21]:

$$C_s = \frac{c}{(a+b-c)} \tag{8}$$

式中, C_s 为相似性系数, c 为 A、B 群落共有物种数, a 为 A 群落物种数, b 为 B 群落物种数。根据相似性原理,可将 C_s 分为极不相似 ($0.00 \leq C_s \leq 0.25$)、中等不相似 ($0.25 < C_s \leq 0.50$)、中等相似 ($0.50 < C_s \leq 0.75$)、极相似 ($0.75 < C_s \leq 1.00$)。

1.3.4 群落稳定性

采用郑元润^[22]完善后的 Godron 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。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2021 进行数据整理,统计分析过程及作图均使用 R (R 4.0.2) 完成。借助 R 的

“agricolae”包完成方差分析(ANOVA)、多重比较以及箱线图的制作,其他图借助“ggplot2”包实现。分析之前先检验数据的正态性和齐性,对不满足正态性或齐性假设的数据进行对数变换使其符合正态分布。

2 结果与分析

2.1 排土场不同恢复模式随恢复年限增加植物群落组成及重要值

整体来看,该地区所有样地共调查出 89 种植物,分属 25 科,62 属。其中菊科 22 种,禾本科 17 种,豆科 13 种,3 科共占有所有物种总数的 60%以上(表 2)。不同恢复模式下的 5 个恢复年限中均存在阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)、大针茅(*Stipa grandis*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、鹅绒藤(*Cynanchum chinense*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、华北米蒿(*Artemisia giraldii*)、斜茎黄芪(*Astragalus laxmannii*)、羊草(*Leymus chinensis*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*),且其主要归属于菊科、禾本科和豆科。这表明在演替过程中菊科、禾本科、豆科占主导地位。所有恢复模式的科、属、种组成特征以及重要值数量特征均随恢复年限增加呈现先增加后减少的趋势。按重要值排序(图2),前五的建群种分别是羊草(7.90%)、大针茅(6.30%)、华北米蒿(5.40%)

表 2 不同恢复模式下各恢复年限植物科、属、种组成与数量特征

Table 2 Compositional and quantitative characteristics of plant families, genera and species in different restoration years under different restoration models

恢复模式 Modes	恢复年限 Years	科 Family	属 Genus	种 Species	物种 数量 Number	优势种的科属种 Family, genus, species of dominant species					
						科 Family		属 Genus		种 Species	
						比例/% Proportion	比例/% Proportion	比例/% Proportion	比例/% Proportion	比例/% Proportion	比例/% Proportion
NR	Y1	7	11	12	203	1	14.29	3	27.27	3	25.00
	Y2	5	9	10	196	3	60.00	4	44.44	5	50.00
	Y3	4	9	12	93	3	75.00	4	44.44	4	33.33
	Y4	7	10	13	98	3	42.86	3	30.00	4	30.77
	Y5	4	6	6	60	3	75.00	4	66.67	4	66.67
GR	Y1	8	15	16	118	2	25.00	2	13.33	2	12.50
	Y2	10	18	24	134	1	10.00	3	16.67	4	16.67
	Y3	4	9	10	138	1	25.00	1	11.11	1	10.00
	Y4	5	8	8	187	2	40.00	3	37.50	3	37.50
	Y5	5	7	8	135	2	40.00	2	28.57	2	25.00
SR	Y1	6	9	13	364	2	33.33	3	33.33	3	23.08
	Y2	4	10	13	395	3	75.00	4	40.00	4	30.77
	Y3	4	6	7	443	3	75.00	4	66.67	4	57.14
	Y4	8	17	22	401	2	25.00	2	11.76	2	9.09
	Y5	3	8	8	345	3	100.00	6	75.00	6	75.00
PF	Y1	5	17	22	77	2	40.00	2	11.76	2	9.09
	Y2	9	28	38	136	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	Y3	6	16	23	175	2	33.33	2	12.50	2	8.70
	Y4	7	21	29	166	1	14.29	1	4.76	1	3.45
	Y5	6	18	20	61	2	33.33	2	11.11	2	10.00
MF	Y1	4	11	12	196	3	75.00	4	36.36	4	33.33
	Y2	3	10	15	176	3	100.00	4	40.00	4	26.67
	Y3	4	11	13	176	2	50.00	3	27.27	3	23.08
	Y4	5	10	14	161	1	20.00	1	10.00	3	21.43
	Y5	4	9	10	120	2	50.00	2	22.22	2	20.00

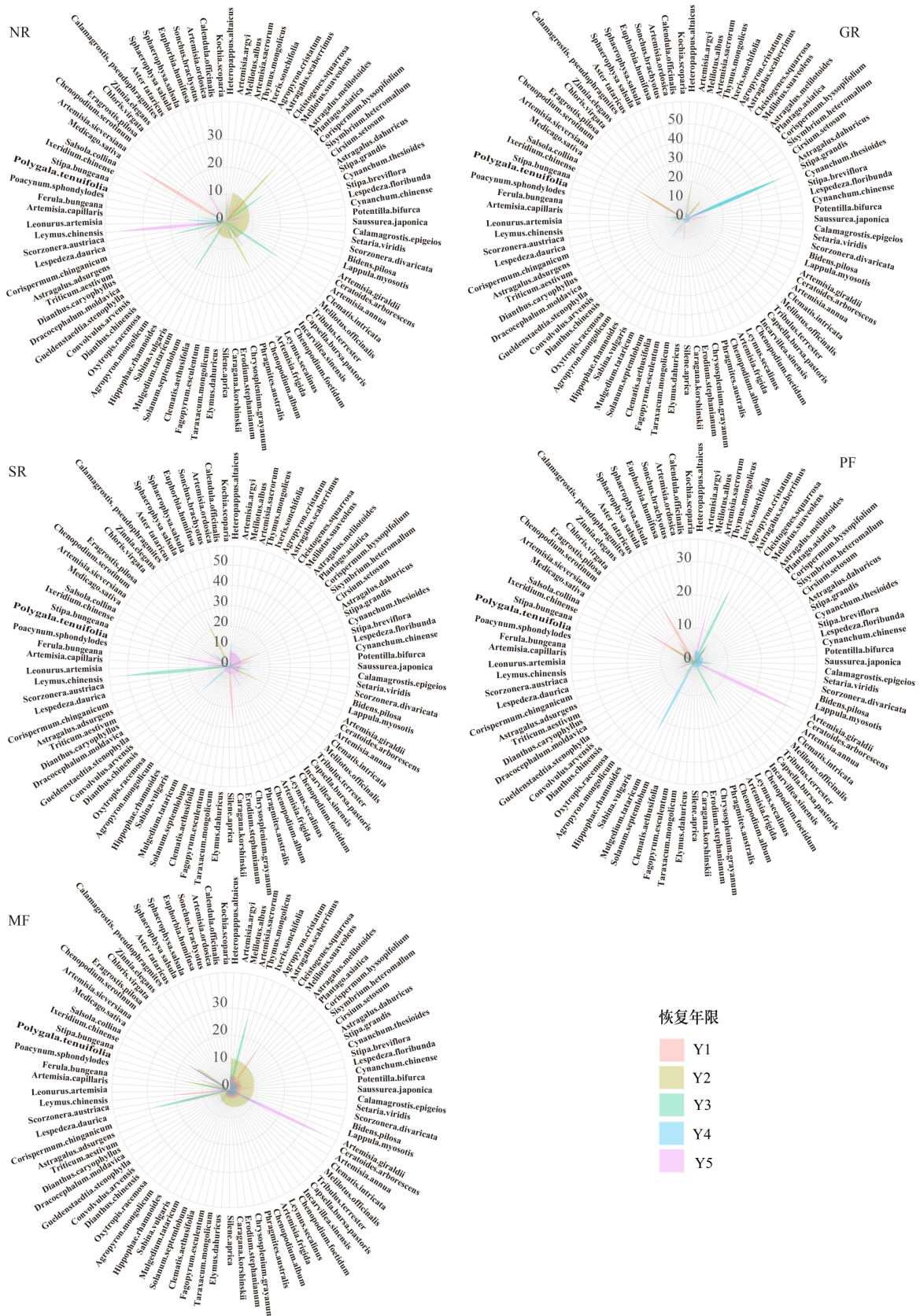


图2 黑岱沟和哈尔乌素排土场不同恢复模式下各恢复年限的植被重要值

Fig.2 Vegetation importance values under different restoration modes for each restoration year in Heidaigou and Halwusu dumps

NR:自然恢复 natural restoration; GR:人工草地恢复 artificial grassland restoration; SR:人工灌木林恢复 artificial shrubland restoration; PF:人工乔木纯林恢复 artificial pure forest restoration; MF:人工针阔混交林恢复 artificial mixed conifer-broadleaf forest restoration

和硬质早熟禾 (4.75%), 以菊科和禾本科为主。NR 模式中从 Y1—Y5 重要值占比最大的物种分别为 *Medicago sativa*-*Astragalus melilotoides*-*Artemisia annua* (黄花蒿)-*Artemisia capillaris*-*Leymus chinensis*; GR 模式中从 Y1-Y5 重要值占比最大的物种分别为 *Elymus dahuricus* (披碱草)-*Medicago sativa*-*Ferula bungeana* (硬阿魏)-*Stipa grandis*-*Cynanchum chinense*; SR 模式中从 Y1-Y5 重要值占比最大的物种分别为 *Silene aprica* (女娄菜)-*Sphaerophysa salsula* (苦马豆)-*Leymus chinensis*-*Convolvulus arvensis* (田旋花)-*Poacea sphondylodes* (硬质早熟禾); PF 模式中从 Y1—Y5 重要值占比最大的物种分别为 *Aster tataricus* (紫菀)-*Medicago sativa*-*Agropyron cristatum* (冰草)-*Setaria viridis*-*Artemisia giraldii*; MF 模式中从 Y1—Y5 重要值占比最大的物种分别为 *Leymus chinensis*-*Poacea sphondylodes*-*Artemisia sacrorum* (白莲蒿)-*Artemisia giraldii*-*Artemisia giraldii*。此外, 可以发现当到 Y2、Y3、Y4 阶段时, 明显呈现出多种植物重要值较高的现象, 表明此阶段物种多样性较高。当恢复年限到 Y4 阶段后, 各模式新增茄科、柏科和蔷薇科的多年生植物。综上, 所有恢复模式在 Y1、Y2、Y3 阶段主要以初期人工种植草本为优势, 偶见种较多; 当恢复到 Y4 阶段时, 一些偶见种逐渐消失, 优势物种发生改变, 逐渐形成以优势种、亚优势种、伴生种共存为主的生态格局, 人工恢复模式植被退化趋势明显, 群落结构随恢复年限逐渐趋于稳定。

2.2 排土场不同恢复模式下各恢复年限的植物群落多样性

生物多样性作为评估群落功能稳定性的关键指标, 它能够清晰地映射出群落结构的演变, 其变化趋势为我们提供了洞察生态系统动态和稳定性的重要视角。随着恢复年限的增加, 各恢复模式的植物群落多样性指标 (Margalef、Shannon-weiner、Pielou 和 Simpson) 存在显著差异, 且大多数呈现出先减小后增加再基本不变或略微减小的趋势 (图 3)。具体来看, NR 和 GR 模式的植物群落多样性变化规律一致, 其 Margalef、Shannon-Weiner 和 Simpson 均是先减小后增加再减小, 分别在 Y3、Y4 阶段有最高值, 在 Y2 阶段值最低 (Pielou 呈相反趋势); SR 模式的 Margalef、Pielou、Shannon-Weiner 和 Simpson 变化规律均是先减小后增加再趋于不变, Y2 和 Y3 阶段值显著低于其他阶段 ($P < 0.05$); PF 模式的 Margalef、Pielou、Shannon-Weiner 和 Simpson 变化规律为先减小后增加再基本趋于不变, 在 Y2 阶段有最小值, 且 Y2 的 Pielou 和 Simpson 显著低于其他恢复年限 ($P < 0.05$); MF 模式 Margalef、Pielou、Shannon-Weiner 和 Simpson 变化规律为先增加再减小后趋于不变, 相对来说 Y2、Y3 阶段高于其他阶段, 但无显著差异 ($P > 0.05$)。综上, 可以发现各恢复模式从 Y2 阶段开始植物群落多样性随着恢复年限的增加而增加, 到 Y4 阶段结构基本趋于稳定。

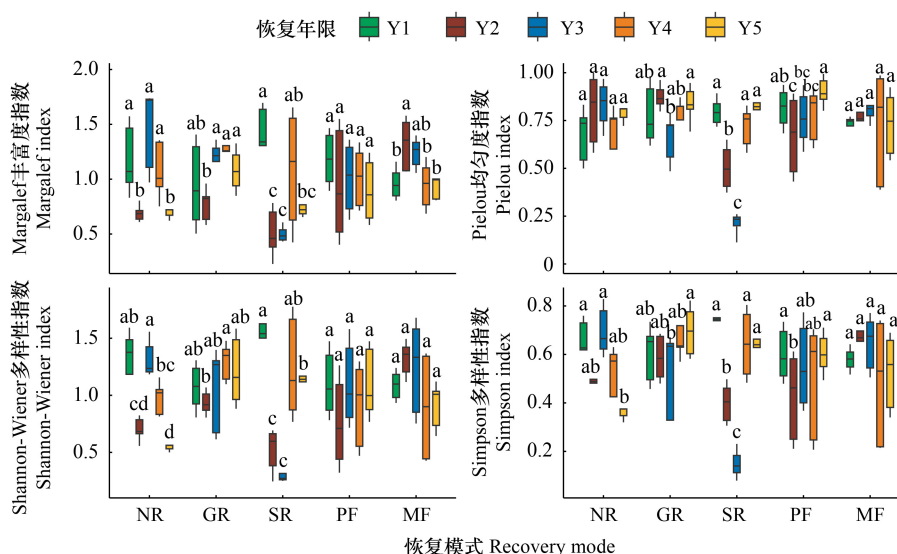


图 3 黑岱沟和哈尔乌素排土场不同恢复模式下各恢复年限的植物群落多样性

Fig.3 Diversity of plant communities under different restoration models for each restoration year in in Heidaigou and Halwusu dumps
同一指数的不同字母表示同一恢复模式下不同恢复年限之间差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 排土场不同恢复模式下各恢复年限的植物群落相似性

Jaccard 相似性是一种衡量样本集之间相似度的统计方法,根据其原理分析可知,此次调查的所有样地中仅有极不相似和中等不相似 2 个类别(图 4)。具体来看,NR 模式随恢复年限增加相似性值表现为从小到大的趋势;GR 模式随恢复年限增加相似性值表现为由大到小再到大的趋势;SR 模式随恢复年限增加相似性值表现为由小到大再到小的趋势;PF 与 MF 模式随恢复年限增加相似性值表现规律一致,为由大到小的趋势,且两种模式均是 Y2 与 Y3 之间呈中等不相似,其他为极不相似。综上,可以发现各恢复模式下不同恢复年限之间的相似性均为极不相似,但相似性值逐渐增加。表明该排土场植被演替方向是从极不相似趋于向相似演替。

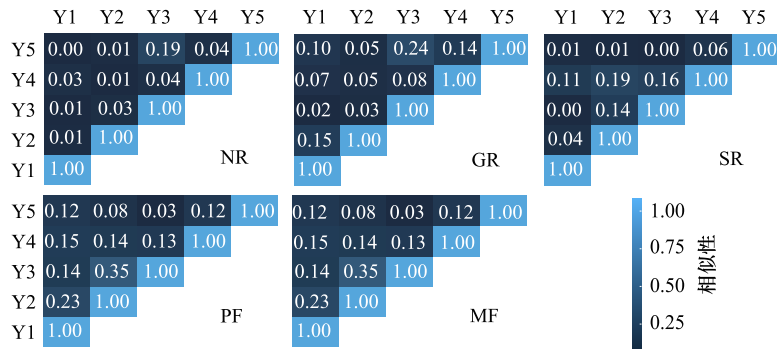


图 4 黑岱沟和哈尔乌素排土场不同恢复模式下不同恢复年限植物群落的相似性

Fig.4 Similarity of plant communities under different restoration modes and different restoration years in the Heidaigou and Halwusu dumps

2.4 排土场不同恢复模式下各恢复年限的群落稳定性

植物群落中各种群之间的稳定性拟合曲线在一定程度上表现了植物群落结构的稳定程度,拟合曲线系数的变化则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。根据图 5 和表 3,所有样地植物群落稳定曲线方程的 R^2 值都接近 1,说明曲线拟合较好。

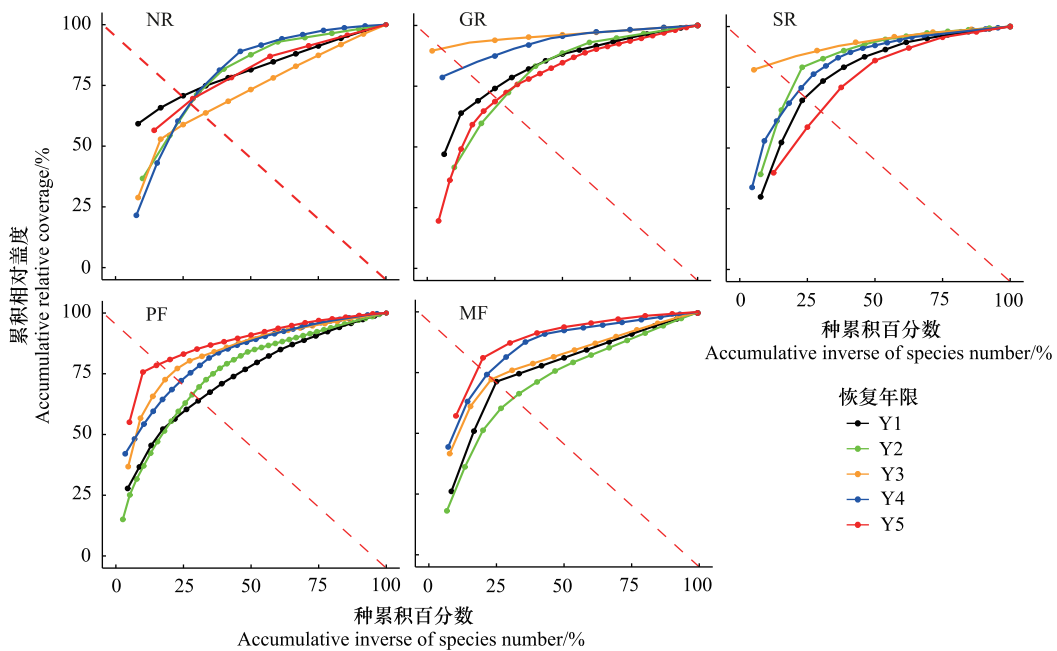


图 5 黑岱沟和哈尔乌素排土场不同恢复模式下各恢复年限植物群落的 Godron 稳定性拟合曲线

Fig.5 Fitted Godron stability curves of plant communities in different restoration modes for each restoration year in the Heidaigou and Halwusu dumps

拟合曲线与 $y=100-x$ 的交点坐标的 x 值介于 10.95—35.41 之间、 y 值介于 64.59—85.58 之间。具体来看,NR 与 GR 模式随恢复年限增加欧式距离均呈现先增大再减小的趋势,分别在 Y1 和 Y5 阶段有最小值,为 11.40 和 5.29;SR 模式中随恢复年限增加欧式距离呈现先减小再增大的趋势,在 Y3 阶段有最小值,为 4.28;PF 模式中随恢复年限增加欧式距离呈现一直减小的趋势,在 Y5 阶段有最小值,为 0.86;MF 模式中随恢复年限增加欧式距离呈现先增大再减小的趋势,在 Y5 阶段有最小值,为 2.37。综上,说明 NR 模式在 Y1—Y5 恢复期内群落结构一直是相对不稳定的状态;GR、PF、MF 均在恢复至 Y5 阶段时群落结构达到了相对比较稳定的状态,尤其 PF 与 MF 模式,在 Y5 阶段时欧氏距离甚至小于 1,表明其基本形成了“自维持、免维护”的系统体系,群落结构已经处于稳定状态;此外,需要格外关注的是,SR 模式在 Y3 阶段时群落结构相对稳定,然后随恢复年限增加又恢复为相对不稳定的状态。

表 3 黑岱沟和哈尔乌素排土场不同恢复模式下各恢复年限植物群落的 Godron 稳定性

Table 3 Godron stability of plant communities across restoration years under different restoration models in the Heidaigou and Halwusu dumps

恢复模式 Modes	恢复年限 Years	拟合曲线 Fitted curve	R^2	交点坐标 Fitted curve	欧氏距离 Euclidean distance
NR	Y1	$y=0.00003x^3-0.0065x^2+0.8225x+53.318$	0.999	(28.06,71.94)	11.40
	Y2	$y=0.0001x^3-0.0333x^2+2.8801x+10.483$	0.999	(30.18,69.82)	14.39
	Y3	$y=0.0001x^3-0.0274x^2+2.1895x+16.981$	0.981	(35.41,64.59)	21.79
	Y4	$y=0.0002x^3-0.0466x^2+3.7273x-4.0265$	0.999	(29.49,70.50)	13.43
	Y5	$y=0.00004x^3-0.0114x^2+1.3285x+39.752$	0.999	(29.75,70.24)	13.80
GR	Y1	$y=0.0001x^3-0.0238x^2+1.8949x+39.642$	0.989	(25.69,74.31)	8.04
	Y2	$y=0.0001x^3-0.0309x^2+2.6431x+18.077$	0.999	(28.92,71.08)	12.61
	Y3	$y=0.00002x^3-0.0036x^2+0.3093x+87.803$	0.995	(9.55,90.45)	14.77
	Y4	$y=0.00002x^3-0.0067x^2+0.699x+74.062$	0.999	(28.57,71.42)	12.13
	Y5	$y=0.0002x^3-0.0427x^2+3.0801x+13.61$	0.986	(16.26,83.74)	5.29
SR	Y1	$y=0.0002x^3-0.0474x^2+3.482x+8.0964$	0.993	(27.64,72.36)	10.81
	Y2	$y=0.0003x^3-0.055x^2+3.6304x+18.872$	0.968	(24.21,75.79)	5.95
	Y3	$y=0.00001x^3-0.0042x^2+0.479x+79.522$	0.999	(23.03,76.97)	4.28
	Y4	$y=0.0002x^3-0.0415x^2+2.9301x+26.341$	0.999	(14.42,85.58)	7.89
	Y5	$y=0.00008x^3-0.0243x^2+2.4582x+12.191$	0.999	(31.73,68.27)	16.58
PF	Y1	$y=0.00008x^3-0.0191x^2+1.8919x+22.148$	0.998	(33.18,66.82)	18.64
	Y2	$y=0.0002x^3-0.0361x^2+2.8755x+10.48$	0.999	(30.15,69.85)	14.36
	Y3	$y=0.0002x^3-0.038x^2+2.5832x+33.211$	0.972	(23.96,76.04)	5.60
	Y4	$y=0.0001x^3-0.0242x^2+2.0132x+35.877$	0.999	(26.20,73.80)	8.76
	Y5	$y=0.0001x^3-0.0215x^2+1.5422x+55.862$	0.934	(20.61,79.39)	0.86
MF	Y1	$y=0.0003x^3-0.0531x^2+3.6167x+2.8622$	0.978	(29.26,70.74)	13.10
	Y2	$y=0.0002x^3-0.04x^2+3.0606x+1.5846$	0.996	(33.38,66.62)	18.92
	Y3	$y=0.0002x^3-0.0338x^2+2.3872x+28.847$	0.979	(27.20,72.80)	10.18
	Y4	$y=0.0002x^3-0.0414x^2+2.8895x+27.867$	0.994	(23.94,76.06)	5.57
	Y5	$y=0.0002x^3-0.0384x^2+2.6176x+37.59$	0.967	(21.68,78.32)	2.37

3 讨论

3.1 排土场不同恢复模式下各恢复年限植物群落特征

植物群落的组成及结构的改变是植物在长期适应环境条件下自然演替的结果,对生态系统的稳定性具有深远影响^[23]。所有恢复模式中,以菊科、禾本科、豆科这些本土植物种数占比最高,占有植物种类的近 60%,并且各恢复模式随恢复年限增加到 Y5 阶段时优势植物均为菊科(PF 和 MF 模式)和禾本科植物(NR、

GR、SR 模式)(表 2,图 2)。这可能是因为本土物种对当地的环境具有良好的适应能力,尤其菊科植物的种子传播速度快、范围广、易存活^[24],是早期定殖过程中的先锋物种;禾本科植物根系分布浅而广,有利于固结土壤;豆科植物根系具有特有的根瘤菌,能通过土壤固氮,从而增强土壤肥力^[25]。随着恢复年限的增长,各模式下植物与生存环境的相互适应,逐渐达到群落稳定的临界点^[26],一些具有抗旱性强、耐风沙能力好、固土性强的植物由于其生存和繁殖受环境影响较小,逐渐演替成为排土场的优势植物种^[27],如大针茅、华北米蒿、硬质早熟禾和羊草等。表明在演替过程中,随着恢复年限增加多年生植物逐渐成为优势植物种,早期阶段定植的草本物种被演替后期的物种所取代。这与谭许脉等^[28]的研究结果一致。也符合陈芳清等^[29]提出的先锋植物入侵→定居→群聚→竞争,最终形成矿山废弃地植物群落的观点。因为根据群落演替的相关理论,植物群落的发展总是向着多稳态平衡和辩证的方向发展,其中竞争-协作平衡与干扰-恢复循环共同塑造群落轨迹。

物种多样性是植物群落的重要特征,其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^[30-31]。本研究中,各恢复模式的多样性指数除 Pielou 均匀度指数随恢复年限增加无明显规律外, Margalef 丰富度指数、Shannon-weiner 多样性指数和 Simpson 优势度指数均整体呈现出先减小后增加再减小的趋势,在 Y4 阶段有最高值, Y2 阶段值最低(图 3)。这是因为排土场初期植被是通过人为统一规划和种植实现的,存在人工管护效应,所以排土场初期阶段(Y1)植物多样性较高;然而,进入 Y2 阶段后,人工管护效应减弱,此时排土场出现土壤贫瘠、水分缺乏等问题^[32],限制了群落演替的理想进程,植物群落多样性自然下降。Y4 阶段各恢复模式的多样性较好,可能是因为随着时间的推移,到后期(Y4、Y5 阶段)排土场植物群落逐渐达到一定的稳定状态,一些适应性强、易生存的植被得以保留并占据优势地位^[12]。这与周涛等^[10]发现植被恢复演替过程中存在长期的生长适应和种间竞争的关系,最后趋于稳定的结果一致。也符合随着恢复年限的增加,物种多样性通常会有所提高的客观规律^[33]。降水、植被类型、土壤类型以及土地利用类型可能是导致群落多样性变化的主要原因^[34]。此外,需要格外关注的是 MF 模式多样性变化趋势与其他恢复模式相反;SR 恢复模式的植物群落多样性指标均在 Y3 阶段时有最低值。这可能是由于混交林地的树种复杂多样,密度较高,减少了林内的光照,使得林内地面的温度较低、温差变化较小,加之林内风速低,蒸发量低,导致林内湿度较高,同时枯落物较多,提高了林地质量,从而更快的在短期内改善了立地条件^[35],但随着恢复年限增加,土壤肥力供应不足,出现一些植被衰退甚至死亡的现象,其植物多样性又逐渐减少^[36];SR 模式的变化规律与哈文秀等^[37]的研究结果一致。

总之,以各种植被恢复方式对排土场进行修复极大的加速了场内的植被演替进程。排土场内植物群落多样性的变化体现了生态恢复过程中的动态变化规律,其中恢复初期植物群落多样性较单一,以恢复时人工种植的物种为主,而随着时间的推移,自我调节作用开始在群落结构的形成和演替中发挥更加重要的作用。这种从人为主导到自我调节的转变,是排土场生态恢复过程中的一个重要特征。

3.2 排土场不同恢复模式下各恢复年限植物群落稳定性变化特征

M. Godron 稳定性主要由群落中优势种的比重决定^[38]。一般认为物种多样性越高,群落结构越复杂,其稳定性也越高^[39];但越来越多的研究表明,群落稳定性与多样性有时并不一致,甚至相反^[31,40],说明物种多样性与群落稳定性间的关系较为复杂。本文结果支持后者。本研究中各恢复模式随恢复年限增加,植物群落多样性普遍在 Y5 阶段较低,尤其 MF 模式随恢复年限增加其优势科、属、种的比例逐渐减小(表 2),但群落稳定性结果显示,排土场不同恢复模式在 Y3 阶段后群落稳定性整体向更加稳定的方向发展(表 3)。这是因为不同演替阶段的植物群落稳定性随演替阶段变化而变化,植物群落的稳定性不仅与其结构有关,还与外界条件密切相关,当资源稀缺时,可能会导致一些弱势的物种或个体无法获取足够的资源,进而影响其生长和繁殖,甚至死亡,从而影响群落的稳定性^[41-42]。本研究中发现植物群落在恢复初期(Y1、Y2 阶段)处于不稳定状态,这与金晓明等^[43]的结果基本一致。这是因为恢复初期局部可共享资源有限,植物种类和数量较多,植物种间和种内竞争剧烈,致使群落稳定性低^[44];但随着恢复时间越长(Y4 阶段后),群落稳定性逐渐升高,尤

其 Y5 阶段时 MF 模式的欧氏距离甚至小于 1,可以说其相对形成了“自维持、免维护”的系统体系,群落结构已经处于稳定状态。然而相反的是,张琳等^[32]对露天煤炭排土场南坡植物群落稳定性的分析发现,恢复 2a 的植物群落稳定性明显高于恢复 7a 和 10a 的植物群落。这可能是因为张琳等^[33]的研究中恢复年限较短,加之其研究地点为边坡,随恢复年限增加边坡水土流失、光照不均等问题加剧^[45],从而致使其出现 2a 的植被群落稳定性明显高于恢复 7a 和 10a 的植物群落的结果。此外,该研究中同一恢复模式下不同恢复年限之间的相似性均为极不相似,除 NR 模式外,整体上呈由大到小再到大的趋势。这证实地表植被的演替方向遵循自然演替规律,每个恢复年限下植被类型存在差异^[46]。因为通常来说,废弃地植被恢复原则上遵循自然演替规律,演替阶段大致为裸地→草地→灌丛→针叶林→常绿与落叶阔叶混交林阶段^[28]。

4 结论

本研究采用“空间代时间”的方法对黑岱沟和哈尔乌素露天矿排土场植物群落组成特征、相似性及稳定性进行分析。在近 30 年的人工恢复过程中共调查出 25 科 62 属 89 种草本植物,其中菊科、禾本科、豆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。同时,各恢复模式排土场的植物多样性(Margalef 丰富度指数、Shannon-Weiner 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数)呈现先减小后增加再减小的变化趋势。排土场不同恢复模式的群落稳定性在 Y3 阶段后整体向更加稳定的方向发展,除 NR 模式在整个恢复阶段稳定性没有明显变化、稳定性相对较差和 SR 模式在 Y3 阶段时达到相对稳定随后又趋向于不稳定外,其他模式到 Y5 阶段时基本都已达到相对稳定的状态。本研究虽初步揭示了该地植被恢复演替特征,为加强排土场人工恢复的实施提供了依据,但考虑到植被恢复过程具有长期性、动态性且易受环境因子的影响,后续应在更长时间序列上对排土场植被群落特征进行动态监测和更全面的解析。

参考文献(References):

- [1] 李全生,李淋,方杰,周伟,雷少刚,包玉英,崔明. 北方防沙带大型露天煤矿区生态保护与修复技术. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 323-333.
- [2] Huang C B, Zeng Y X, Wang L C, Wang S Q. Responses of soil nutrients to vegetation restoration in China. Regional Environmental Change, 2020, 20(3): 82.
- [3] 闫成龙,薛悦,王艺菲,康海斌,王得祥. 秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素. 环境科学, 2024, 45(2): 992-1003.
- [4] Wang Z H. Process strengths determine the forms of the relationship between plant species richness and primary productivity. PLoS One, 2017, 12(11): e0185884.
- [5] 高德武,蔡体久,王晓辉. 露天金矿剥离物植被演替规律及植被恢复对策——以公别拉河流域为例. 水土保持研究, 2005, 12(6): 33-35.
- [6] 古琛,贾志清,何凌仙子,李清雪,高娅,张佳鹏,王陇. 恢复年限对高寒中间锦鸡儿群落组成和多样性的影响. 草业科学, 2022, 39(7): 1303-1311.
- [7] 王明明,刘新平,何玉惠,张铜会,魏静,车力木格,孙姗姗. 科尔沁沙地封育恢复过程中植物群落特征变化及影响因素. 植物生态学报, 2019, 43(8): 672-684.
- [8] 刘世忠,夏汉平,孔国辉,敖惠修,邓钊平,柯宏华,李丽华,谭鹏. 茂名北排油页岩废渣场的土壤与植被特性研究. 生态科学, 2002, 21(1): 25-28.
- [9] Cain M D, Shelton M G. Secondary forest succession following reproduction cutting on the Upper Coastal Plain of southeastern Arkansas, USA. Forest Ecology and Management, 2001, 146(1/2/3): 223-238.
- [10] 周涛,苏正安,何周筠,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.
- [11] Ciarkowska K. Organic matter transformation and porosity development in non-reclaimed mining soils of different ages and vegetation covers: a field study of soils of the zinc and lead ore area in SE Poland. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(8): 2066-2079.
- [12] Huang L, Zhang P, Hu Y G, Zhao Y. Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines. Ecological Engineering, 2016, 94: 638-646.
- [13] 周鹏飞,张世文,罗明,魏洪斌,宋强,方兵,庄红娟,陈弘扬. 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征. 环境科学, 2022, 43(2): 985-994.
- [14] 方瑛,马任甜,安韶山,赵俊峰,肖礼. 黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究. 环境科学, 2016, 37(3): 1121-1127.

- [15] 常铭, 孟淑英, 周毅, 赵鹏, 赵玉霞, 张子凡. 黑岱沟和哈尔乌素矿区 2000—2020 年生态环境质量时空格局与演变特征分析. 科学技术与工程, 2023, 23(25): 10701-10712.
- [16] 韩占占. 哈尔乌素露天煤矿边坡稳定性分析. 露天采矿技术, 2013, 28(9): 24-27.
- [17] 李斌, 华宇鹏, 田继兰, 牛海. 黑岱沟露天煤矿排土场周边土壤重金属污染分析. 四川环境, 2023, 42(3): 170-173.
- [18] 李健明, 康雨欣, 蒋福祯, 宋明丹, 祁凯斌, 卢素锦, 李正鹏. 基于 Meta 分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响. 环境科学, 2024, 45(3): 1629-1643.
- [19] 刘志斌, 陈建平, 范军富. 黑岱沟露天煤矿土地复垦中的几个关键问题. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(S1): 43-45.
- [20] 耿冰瑾, 王舒菲, 曹银贵, 郭春艳, 郭东罡, 赵冰清, 白中科. 山西平朔露天矿区不同年限复垦地植被重建特征对比分析. 生态学报, 2022, 42(8): 3400-3419.
- [21] 梅象信, 徐正会, 张继玲, 赵宇翔. 昆明西山森林公园东坡蚂蚁物种多样性研究. 林业科学研究, 2006, 19(2): 170-176.
- [22] 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.
- [23] Odum E P. The strategy of ecosystem development. Science, 1969, 164(3877): 262-270.
- [24] 黄丽菊, 杨磊, 李文超, 张玲卫, 李文军. 甘肃马先蒿入侵对巴音布鲁克草原植物群落特征的影响. 草业科学, 2024, 41(1): 1-14.
- [25] 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.
- [26] 秦朋遥, 杨会娟, 蒋凤玲, 张树彬, 田晓敏, 黄选瑞, 张志东. 河北省塞罕坝保护区天然植物群落数量分类. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1383-1392.
- [27] 左小安, 赵哈林, 赵学勇, 郭轶瑞, 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.
- [28] 谭许脉, 孙立祥, 杜忠毓, 李浩然, 党宁, 肖江, 张平选, 陈光才. 铜矿废弃地不同演替阶段植物群落特征及其稳定性. 生态学报, 2025, 45(4): 1900-1912.
- [29] 陈芳清, 卢斌, 王祥荣. 樟村坪磷矿废弃地植物群落的形成与演替. 生态学报, 2001, 21(8): 1347-1353.
- [30] 高瑞, 艾宁, 刘广全, 刘长海, 强方方. 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. 草业学报, 2022, 31(6): 61-68.
- [31] 田起隆, 张晓萍, 王妙倩, 王浩嘉, 易海杰, 贺洁, 许小明, 吕渡, 孙伟楠. 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. 中国环境科学, 2022, 42(12): 5885-5895.
- [32] 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.
- [33] 庞景豪, 梁桑, 刘亚斌, 李国荣, 朱海丽, 胡夏嵩, 史兴萍, 尚卿, 缪晓星, 王延秀. 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. 水土保持通报, 2023, 43(4): 110-120.
- [34] 杨鹏辉, 田佳, 张楠, 高雨珊, 冯雪娟, 杨灿灿, 彭道黎. 1990—2022 年黄河流域植被时空变化特征及未来趋势预测. 生态学报, 2024, 44(19): 8542-8553.
- [35] Feng Y, Wang J M, Bai Z K, Reading L. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: a review. Earth-Science Reviews, 2019, 191: 12-25.
- [36] 王友生, 吴鹏飞, 侯晓龙, 岳辉, 彭绍云, 马祥庆. 稀土矿废弃地不同植被恢复模式对土壤肥力的影响. 生态环境学报, 2015, 24(11): 1831-1836.
- [37] 哈文秀, 肖桂英, 曹建华, 刘玉国, 崔明, 周金星. 喀斯特断陷盆地地区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.
- [38] 廖哈茹, Indree Tuvshintogtokh, 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.
- [39] Mougi A, Kondoh M. Diversity of interaction types and ecological community stability. Science, 2012, 337(6092): 349-351.
- [40] Rao X, Chen J, Wang S P, Su H J, Rao Q Y, Xia W L, Liu J R, Fan X Y, Deng X W, Shen H, Xie P. Population asynchrony within and between trophic levels have contrasting effects on consumer community stability in a subtropical lake. Journal of Animal Ecology, 2024, 93(10): 1593-1605.
- [41] 方紫妍, 李林瑜, 艾克拜尔·毛拉, 周龙, 陆彪. 人为干扰对西天山野果林群落结构和物种多样性的影响. 水土保持通报, 2019, 39(2): 267-274.
- [42] 乔欢欢, 李强, 何国兴, 纪童, 杨冬阳, 文铜, 关文昊, 刘志刚, 杨军银, 柳小妮. 山地草甸植被生物多样性及群落稳定性对坡向的响应. 草地学报, 2022, 30(8): 2173-2181.
- [43] 金晓明, 刘及东, 艾琳, 卢欣石, 王旭. 呼伦贝尔沙地封育植被群落动态研究. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2010, 31(1): 15-20.
- [44] 杜忠毓, 王剑武, 邢文黎, 肖江, 薛亮, 侯红, 陈光才. 喀斯特锑矿植被恢复区植物多样性及群落稳定性. 环境科学研究, 2023, 36(1): 188-197.
- [45] 商宇, 李钢铁, 麻云霞, 张月欣, 贺琴, 贾治. 鄂尔多斯矿区不同恢复年限排土场边坡植被演变规律. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2024, 44(3): 108-118.
- [46] 王稳, 高晓东, 赵西宁, 杨孟豪. 黄土高原不同气候区刺槐林恢复年限对水、碳及植物多样性的影响. 生态学报, 2023, 43(23): 9770-9783.