

DOI:10.11686/cyxb2024078

http://cyxb.magtech.com.cn

侯晓磊, 武春丽, 邓雅元, 等. 宁东煤炭基地排矸场人工植物群落优势种生态位和种间关系研究. 草业学报, 2025, 34(1): 1-16.

HOU Xiao-lei, WU Chun-li, DENG Ya-yuan, *et al.* Niche and interspecific association of dominant plant species in artificial plant communities, the coal gangue dump of the Ningdong coal base, Middle East Ningxia. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(1): 1-16.

宁东煤炭基地排矸场人工植物群落优势种生态位和种间关系研究

侯晓磊¹, 武春丽¹, 邓雅元¹, 麻文章¹, 赵廷宁^{1*}, 曾文杰¹, 巩子涵¹, 芦治源¹, 吴国伟²

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750000)

摘要: 为建立稳定的煤矸石山人工植被生态系统, 以宁东煤炭基地排矸场生态恢复初期人工植物群落为研究对象, 基于样方法调查地上植被, 并计算灌草植物种重要值, 采用生态位宽度、生态位相似性、生态位重叠值、方差比率、卡方检验、Spearman相关性检验方法对矿区植物群落优势种进行种间联结与相关性分析。结果表明: 研究区灌草植物44种, 隶属于9科36属, 以禾本科、豆科、菊科、苋科为主。灌木植物生态位宽度与重要值排序不完全一致, 但总体趋势一致, 以猫头刺和柠条锦鸡儿为优势种; 草本植物生态位宽度与重要值排序一致, 以雾冰藜和紫花苜蓿为优势种。灌木层与草本层植物总体联结性的方差比率值均大于1, 其中灌木层植物种间呈显著正联结, 草本层种间联结性不显著。综上, 生态恢复区植物群落处于演替前期或中期阶段, 种间竞争平缓, 宁东煤炭基地植被配置应选择与优势植物种呈正联结的植物, 形成稳定的植物群落结构, 提高矿区生态恢复效率。

关键词: 生态位; 种间关系; 优势植物种; 排矸场; 宁东

Niche and interspecific association of dominant plant species in artificial plant communities, the coal gangue dump of the Ningdong coal base, Middle East Ningxia

HOU Xiao-lei¹, WU Chun-li¹, DENG Ya-yuan¹, MA Wen-zhang¹, ZHAO Ting-ning^{1*}, ZENG Wen-jie¹, GONG Zi-han¹, LU Zhi-yuan¹, WU Guo-wei²

1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750000, China

Abstract: Ecological restoration is an important part of mining operations. The aim of this study was to analyze the plant community at the initial stage of ecological restoration in the gangue yard at the Ningdong coal base, with an overall goal to establish a stable artificial vegetation ecosystem on the coal gangue hills. The aboveground vegetation was sampled using a quadrat method, and the importance values of shrubs and grasses were calculated. The niche width, niche similarity, niche overlap, and variance ratio were calculated. Chi-squared and Spearman's correlation analyses were used to explore the interspecific associations among, and correlations between, dominant species in the plant community in the mining area. The results showed that there were 44 species of shrubs and grasses in the study area, belonging to nine families and 36 genera. The main plant families were Poaceae, Fabaceae, Asteraceae, and Amaranthaceae. The niche width and importance value rankings of shrub species were not completely consistent, but

收稿日期: 2024-03-16; 改回日期: 2024-05-08

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划(2022BEG02001)资助。

作者简介: 侯晓磊(1999—), 女, 山西阳泉人, 在读硕士。E-mail: hxlbetter00@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhtning@bjfu.edu.cn

the overall trend was consistent, with *Oxytropis aciphylla* and *Caragana korshinskii* being the dominant species. The niche width and importance value rankings of herbaceous species were consistent, with *Grubovia dasyphylla* and *Medicago sativa* being the dominant species. The variance ratio of the overall association between shrubs and herbaceous plants was greater than one. There was a significant positive association among shrub species, whereas the association among herbaceous species was not significant. In conclusion, the plant community in the ecological restoration area is in the early or middle stage of succession, with weak interspecific competition. When designing an ecological restoration strategy for the Ningdong coal base, plants positively associated with dominant species should be selected to form a stable plant community structure, thereby improving the efficiency of ecological restoration in this mining area.

Key words: niche; interspecific association; dominant plant species; gangue dump; Ningdong

植被在维持生态系统平衡和地表稳定性方面起着决定性的作用,选择适合矿区的植物物种及构建稳定植物群落结构是矿区植被恢复的关键^[1]。生态位为量化群落中物种在生态系统中的时空位置及资源利用能力^[2]。种间联结代表不同物种之间的关系,进行植被恢复选择植物配置时,通过种间联结关系判断群落演替阶段,选择显著正相关的种对能够提高植被的群落稳定性^[3]。研究生态位与种间联结特征可从时空尺度上了解物种利用资源和适应环境的能力,客观反映现阶段群落结构稳定性,在了解群落动态、演替等方面具有重要意义^[4]。干旱环境下优势植物种及其多样性显著影响群落的稳定性^[5]。研究表明,优势植物种对环境和非优势种具有显著正向影响,对植物群落的发展具有重要意义^[6],通过改良土壤性质,减少非生物胁迫,创造适宜生境斑块^[7],增加其他植物的生态位宽度^[8]。

宁东煤炭基地位于西北干旱荒漠区,煤矿开采形成了松散堆积的排矸场,地面植被面临土壤养分及水分匮乏问题,植物多样性较低,种间联结性简单,群落稳定性差。目前有关矿区植被恢复研究多为不同植被类型的恢复效果^[9-10];植物群落物种多样性^[11]与群落结构稳定性分析^[12];植被配置功能性研究,如吴孟函等^[13]通过在野外设置样地并建立径流小区,提出了防治水土流失效果好的植物配置及配比;冯旭环等^[14]以地带性植物种为基础,根据植物根系抗拉力学性能,测试单根抗拉力、抗拉强度和弹性模量指标,筛选抗拉力学特性最优植物。在干旱荒漠区,刘琴等^[15]基于植物功能性状探究植物对矿区周边粉尘的滞尘效果,许爱云等^[16]通过田间试验模拟干旱风沙区环境筛选适生植物,张东梅等^[17]探究荒漠草原带盐碱地优势植物种对间水、盐梯度的生态位和种间关系。以上研究大多为恢复时间较长的废弃地或自然恢复区,而鲜有研究针对恢复初期的生态恢复区,探究植物群落演替阶段及生态恢复潜力。研究表明植被恢复存在优先效应,在植物群落建设中,早期植物种对后期物种的建植、生长及繁殖等会产生一定影响,会对群落结构功能及演替动态等过程起到重要的调控作用^[18]。采矿废弃地植被恢复初期,人工种植恢复相比自然恢复效果更好^[19],而植被的恢复不能依靠长期的灌溉养护措施,为建设可持续性恢复策略,本研究以宁东煤炭基地排矸场恢复初期人工植被为对象,通过对物种生态位和种间关联性进行研究,为矿区的植被恢复以及生态重建筛选适应当地环境的植物及配置,增强植物群落的稳定性,建立能够自我维持的生态系统,为西北干旱荒漠区的生态修复工程应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏东部灵武市宁东镇(图1)。宁东煤炭基地地处西北干旱荒漠草原区,地貌类型以沙漠丘陵地形为主,地形较平缓。平均海拔约为1270 m;属于温带干旱气候,干旱少雨,年平均气温10.0℃,年平均降水量为180.9 mm,全年日照时数2712 h,年平均风速2.6 m·s⁻¹;植被类型以荒漠草原和草原带沙生植被为主;主要土壤类型为灰钙土和风沙土^[20]。宁东煤炭基地开采方式主要以井工开采为主^[21],采煤和洗煤过程中排放的煤矸石堆积后进行土地复垦,排矸场的生态恢复主要采用“平整土地—覆盖表土—绿化种植”的方法,养护灌溉用水为处理达标的矿井水,乔灌木多采用滴灌,草本植物采用喷灌措施。

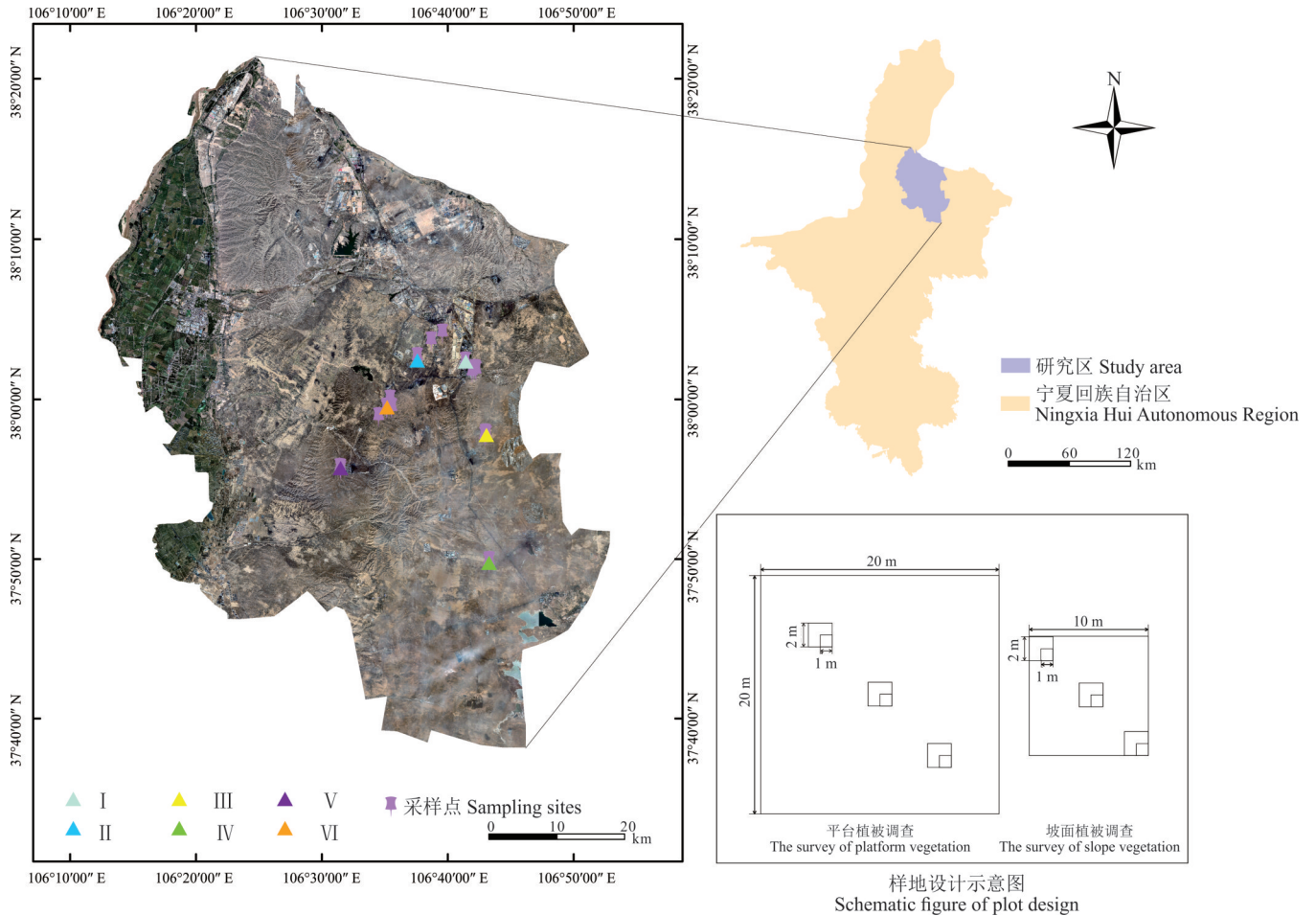


图 1 研究区概况

Fig. 1 The overview of the study area

基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)3333号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website of the Ministry of Natural Resources with the drawing review No. GS(2019)3333, the boundary of the base map is not modified.

1.2 样地设置与调查

于 2023 年 8—9 月,经调查,选择 6 个人工生态恢复初期恢复年限为 2~4 年的矿区(表 1),调查排矸场平台、边坡的生态优势种群。依据植被类型和立地(平台、边坡)类型,设置样地 25 个,平台上选取 20 m×20 m 的样方用于乔木调查,坡面设置 10 m×10 m 的样方,在每个样方内沿对角线布设 3 个 2 m×2 m 的灌木样方和 3 个 1 m×1 m 的草本样方进行调查,样地设计见图 1;同时调查记录各样方的经纬度、海拔、坡度、坡向以及植物的种类、密度、高度和盖度。其中密度为样方中出现的各物种个体数量;高度为各物种自然高度的平均值;植被盖度调查通过目估法和无人机法相结合,目测有植物生长的格数占总格数的比例同时使用无人机(大疆 Phantom 4)垂直拍摄样地影像,并利用软件 Photoshop 的色彩范围法计算样地植被覆盖度^[10]。相对密度为某植物种的密度占所有种的密度,相对高度和相对盖度计算方式与相对密度相同。

表 1 调查煤矸石山的基本情况

Table 1 Basic information of the investigated coal gangue hills

矿区 Mining area	纬度 Latitude (N)	经度 Longitude (E)	平均海拔 Average alti- tude (m)	恢复年限 Restoration period (a)
I	38°02'23"	106°41'24"	1276	4
II	38°02'37"	106°37'34"	1292	4
III	37°57'47"	106°43'03"	1329	2
IV	37°49'47"	106°43'16"	1376	3
V	37°55'43"	106°31'28"	1339	2
VI	37°59'31"	106°35'10"	1331	4

1.3 数据处理

由于乔木层树种较为单一,因此不考虑乔木层的总体联结和种间联结,对灌草植物进行生态位特征和种间联结性研究。重要值(importance value)的计算公式^[22]为:

$$\text{重要值} = (\text{相对密度} + \text{相对高度} + \text{相对盖度}) / 3$$

生态位特征包括生态位宽度、生态位相似性和生态位重叠^[23]。生态位重叠和生态位相似性反映物种的空间资源竞争关系,计算采用Pianka生态位重叠指数(O_{ik})与Schoener生态位相似性指数(C_{ik});生态位宽度表示物种所能利用的各类资源总和,采用Levins指数和Shannon指数进行计算^[24];多物种种间联结显著性检验采用方差比率法(variance ratio, VR)^[25]测定,统计量W检验关联程度;使用卡方检验(χ^2)和Spearman检验种间联结显著性, χ^2 检验能较客观、准确地判断种间联结的显著性,采取Yates的连续校正公式,使用Spearman秩相关检验在数量数据基础上补充完善 χ^2 检验^[25];为辨别种间关联性的差异性,使用种间联结系数(association coefficient, AC)判定种间联结性强弱,为避免两个物种均不出现的样方数过多使得AC偏高,采用Jaccard指数(JI)计算补充关联性不显著物种间共同出现的概率^[26]。各指标计算公式如下。

Shannon生态位宽度(B_s)与Levins生态位宽度(B_L):

$$B_s = - \sum_{i=1}^r P_{ij} \ln P_{ij}$$

$$B_L = 1 / \sum_{j=1}^r P_{ij}^2$$

式中: P_{ij} 代表物种*i*在资源位*j*上的重要值与该物种在所有资源位上重要值总和的比值; r 为样方总数。

生态位相似指数(C_{ik})和生态位重叠指数(O_{ik}):

$$C_{ik} = 1 - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^r |P_{ij} - P_{kj}|$$

$$O_{ik} = \sum_{j=1}^r P_{ij} P_{kj} / \sqrt{\sum_{j=1}^r P_{ij}^2 \sum_{j=1}^r P_{kj}^2}$$

式中: C_{ik} 的阈值为 $[0, 1]$, C_{ik} 值越大,生态位相似性越高; O_{ik} 的阈值为 $[0, 1]$, O_{ik} 值越大,生态位重叠度越高。 P_{ij} 和 P_{kj} 分别表示物种*i*和物种*k*在资源位*j*处的重要值。

$$P_i = n_i / N$$

$$S_T^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_j^2 - t)^2$$

$$\delta_T^2 = \sum_{i=1}^S P_i (1 - P_i)$$

$$VR = S_T^2 / \delta_T^2$$

$$W = VR \times N$$

式中: S_T^2 为样方中物种数的方差; δ_T^2 为总体样本方差; P_i 为物种*i*出现的频度; n_i 为物种*i*出现的样方数目; T_j 为各样方*j*内出现的物种数目; t 为样方中物种平均值; N 为样方数; S 为所有物种总数; VR 是总体联结值; W 是检验 VR 显著性的指数。

Spearman秩相关系数用 $r_s(i, k)$ 表示:

$$r_s(i, k) = 1 - \frac{6 \sum_{j=1}^N d_j^2}{N^3 - N}$$

$$d_j = x_{ij} - x_{kj}$$

式中: d_j 为物种*i*和*k*在样方*j*中重要值秩序的差分集合; x_{ij} 和 x_{kj} 是物种*i*和物种*k*在样地*j*重要值的平均值。

卡方检验(χ^2):

$$\chi^2 = \frac{N[(|ad - bc|) - 0.5N]^2}{(a + b)(c + d)(a + c)(b + d)}$$

种间联结系数(AC):

$$\text{当 } ad \geq bc \text{ 时, } AC = \frac{ad - bc}{(a + b)(b + d)}$$

$$\text{当 } ad < bc \text{ 且 } d \geq a \text{ 时, } AC = \frac{ad - bc}{(a + b)(a + c)}$$

$$\text{当 } ad < bc \text{ 且 } d < a \text{ 时, } AC = \frac{ad - bc}{(b + d)(d + c)}$$

Jaccard 指数 (JI):

$$JI = \frac{a}{a + b + c}$$

式中: a 为两个物种同时出现的样方个数; b 为种 A 出现且种 B 不出现的样方个数; c 为种 B 出现且种 A 不出现的样方个数; d 为两个物种均不出现的样方个数。

1.4 数据分析与作图

采用 Excel 对草本层和灌木层重要值等数据进行计算; 采用 R 4.2.0 中 spaa、corrplot 程序包及 Origin 2021 进行生态位计算和种间联结性分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 群落物种组成

宁东煤炭基地煤矸石山经调查共统计到植物种类 44 种, 隶属于 9 科 36 属, 以禾本科 (Poaceae)、豆科 (Fabaceae)、菊科 (Asteraceae)、苋科 (Amaranthaceae) 植物为主。其中矿区灌木层植物种类 9 种, 以豆科、怪柳科 (Tamaricaceae) 为主, 草本层植物 35 种, 以禾本科、豆科、菊科、苋科等为主, 多年生草本占比 48.6%, 藤本植物占比 5.7%, 一年生及二年生草本占比 45.7% (表 2)。矿区煤矸石山人工种植柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii*)、沙拐枣 (*Calligonum mongolicum*)、冰草 (*Agropyron cristatum*)、稷 (*Panicum miliaceum*)、秋英 (*Cosmos bipinnatus*)、黑沙蒿 (*Artemisia ordosica*)、斜茎黄芪 (*Astragalus laxmannii*)、花棒 (*Corethroedendron scoparium*)、羊柴 (*Corethroedendron fruticosum*)、红花多枝怪柳 (*Tamarix gallica*)、罗布麻 (*Apocynum venetum*)、紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)、披碱草 (*Elymus dahuricus*)、苦豆子 (*Sophora alopecuroides*)、短花针茅 (*Stipa breviflora*) 等灌草植物; 经过调查, 与最初人工种植的植物相比, 植被恢复 2~4 年后, 增加灌草植物种有红砂 (*Reaumuria songarica*)、猫头刺 (*Oxytropis aciphylla*)、芦苇 (*Phragmites australis*)、白茎盐生草 (*Halogeton arachnoideus*)、狗尾

表 2 植物群落组成

Table 2 Plant community composition

序号 Number	科 Family	植物物种数 Number of plant species				
		灌木 Bush	草本 Herb			
			一年生 Annual	一年生及二年生 Annual and biennial	多年生 Perennial	藤本 Vine
1	豆科 Fabaceae	4	—	1	5	—
2	禾本科 Poaceae	—	4	—	6	—
3	菊科 Asteraceae	1	1	1	6	—
4	苋科 Amaranthaceae	1	7	—	—	—
5	怪柳科 Tamaricaceae	2	—	—	—	—
6	夹竹桃科 Apocynaceae	1	—	—	—	1
7	白刺科 Nitrariaceae	—	—	—	1	—
8	葫芦科 Cucurbitaceae	—	—	—	—	1
9	紫葳科 Bignoniaceae	—	—	—	1	—

—: 无数据 No data.

草(*Setaria viridis*)、雾冰藜(*Grubovia dasyphylla*)、地肤(*Bassia scoparia*)、鹅绒藤(*Cynanchum chinense*)、蒙古虫实(*Corispermum mongolicum*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、虎尾草(*Chloris virgata*)、秋英、拂子茅(*Calamagrostis epigeios*)、藜(*Chenopodium album*)、尖头叶藜(*Chenopodium acuminatum*)、艾(*Artemisia argyi*)等。按照植物对水分条件的适应性进行分类,生态恢复后植物生态型多以旱生植物为主,占总物种数的34.1%,其余依次为中生、旱中生、中旱生、强旱生、超旱生植物,占比为31.8%、11.4%、9.1%、6.8%和6.8%(图2)。

2.2 重要值与生态位特征分析

筛选出现样地数 ≥ 2 的植物种作为优势物种进行分析(表3和表4)。生态位宽度(niche breadth)代表物

种可利用资源的定量指标。灌木层和草本层的Levins生态位宽度(niche breadth Levins, B_L)分别为1.30~8.47和1.03~10.84, Shannon生态位宽度(niche breadth Shannon, B_S)为0.39~2.32和0.08~2.48。在灌木中,猫头刺、柠条锦鸡儿、黑沙蒿生态位宽度较大,其中猫头刺的生态位宽度值最大;红砂的生态位宽度值最小。在草本植物中,雾冰藜、紫花苜蓿、藜子朴、芦苇、藜生态位宽度较大,在所处环境中具有较强的资源利用能力。已有研究表明,雾冰藜和藜为一年生草本植物,繁殖能力强,随生长期推进植物将能量优先分配到地上部分,保证物种繁殖和扩张^[27];虎尾草、稷、狗尾草、黄花蒿、拂子茅、芦苇等重要值较大,出现频率较高,更倾向于泛化种。灌木植物种Levins和Shannon生态位宽度排序基本一致,重要值和生态位宽度排序不完全相同,但总体趋势一致。

表3 灌木层优势植物重要值与生态位宽度

Table 3 The important value and niche breadth of shrub dominant plants

编号 Number	物种缩写 Species abbreviation	物种 Species name	重要值 Importance value (%)	生态位宽度 Niche breadth	
				Levins	Shannon
1	OA	猫头刺 <i>O. aciphylla</i>	25.5	8.47	2.32
2	RS	红砂 <i>R. songarica</i>	0.9	1.30	0.39
3	AO	黑沙蒿 <i>A. ordosica</i>	6.6	2.70	1.15
4	CK	柠条锦鸡儿 <i>C. korshinskii</i>	22.9	5.79	1.83
5	TG	红花多枝怪柳 <i>T. gallica</i>	5.9	1.98	0.80
6	HA	梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>	1.6	1.77	0.63
7	AV	罗布麻 <i>A. venetum</i>	0.3	1.31	0.40
8	CF	羊柴 <i>C. fruticosum</i>	6.8	1.43	0.48

2.3 生态位相似比与生态位重叠值

生态位相似性和生态位重叠反映不同生物种群对环境资源的竞争^[28]。物种间的竞争差异代表所处环境下将资源转化为种群增长的效率。物种间的共存有以下几种可能:当物种在资源利用存在差异时,或者当它们竞争能力相等时,可以在资源利用部分重叠的情况下共存^[29]。灌木植物群落共组成28个种对(图3),生态位相似比(C_{ik})和重叠值(O_{ik})均值分别约为0.15和0.19。 $C_{ik} \geq 0.50$ 有2种对,占比7.1%,红砂和梭梭(0.68)、红花多枝怪柳和罗布麻(0.69)对环境资源需求比较相似(图3a)。生态位重叠值为0~0.89, $O_{ik} \geq 0.50$ 的种对有3个:红砂和梭梭

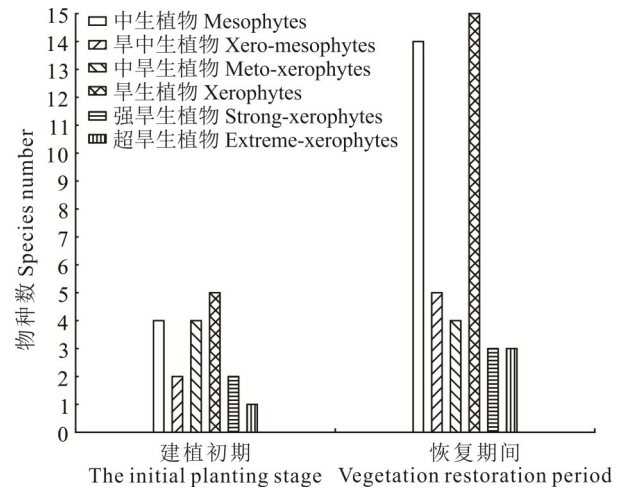


图2 植物的水分生态型

Fig. 2 The water ecological type of plants

表 4 草本层优势植物重要值与生态位宽度

Table 4 The important value and niche breadth of herb dominant plants

编号 Number	物种缩写 Species abbreviation	物种 Species name	重要值 Importance value (%)	生态位宽度 Niche breadth	
				Levins	Shannon
1	PM	稷 <i>P. miliaceum</i>	4.0	1.99	0.75
2	CAL	藜 <i>C. album</i>	3.6	5.42	1.98
3	GD	雾冰藜 <i>G. dasyphylla</i>	18.7	10.84	2.48
4	IS	蓼子朴 <i>Inula salsoloides</i>	3.5	5.75	1.87
5	SC	猪毛菜 <i>S. collina</i>	1.3	2.76	1.05
6	MS	紫花苜蓿 <i>M. sativa</i>	18.4	8.88	2.35
7	CV	虎尾草 <i>C. virgata</i>	4.5	4.26	1.64
8	CE	拂子茅 <i>C. epigeios</i>	7.6	3.65	1.42
9	SV	狗尾草 <i>S. viridis</i>	8.8	4.52	1.76
10	CM	蒙古虫实 <i>C. mongolicum</i>	0.7	3.70	1.35
11	CAC	尖头叶藜 <i>C. acuminatum</i>	1.4	1.82	0.69
12	CC	鹅绒藤 <i>C. chinense</i>	1.2	3.57	1.42
13	LT	乳苣 <i>Lactuca tatarica</i>	2.0	3.60	1.37
14	PA	芦苇 <i>P. australis</i>	4.9	5.45	1.83
15	AA	黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	3.6	3.76	1.55
16	AF	冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>	0.3	1.99	0.69
17	AC	茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>	2.7	1.03	0.08
18	HAR	白茎盐生草 <i>H. arachnoideus</i>	1.2	3.69	1.46
19	SS	苦马豆 <i>Sphaerophysa salsula</i>	0.4	1.38	0.45
20	AM	草木樨状黄耆 <i>Astragalus melilotoides</i>	0.4	1.15	0.25

(0.89)、罗布麻和红花多枝怪柳(0.89)、梭梭和罗布麻(0.56),占比 10.7%。 $0 < O_{ik} < 0.50$ 的有 18 个种对,占比 64.3%。 $O_{ik} = 0$ 有 7 个种对,占比 25.0%(图 3b)。梭梭、红花多枝怪柳、罗布麻均为旱生灌木半灌木植物,抗旱能力强、耐盐碱,其种间重叠较大极有可能是植物对于土壤盐分适应有相似性^[30]。草本植物群落共组成 190 个种对,生态位相似比和重叠值均值分别约为 0.10 和 0.12。 $C_{ik} \geq 0.50$ 有 2 种对,占比 1.1%,表明鹅绒藤和乳苣(0.56)、芦苇和乳苣(0.53)对环境资源需求比较相似(图 4a)。生态位重叠值为 0~0.75, $O_{ik} \geq 0.50$ 的种对有 9 个,占比 4.7%。 $0 < O_{ik} < 0.50$ 的有 118 个种对,占比 62.1%(图 4b)。

2.4 总体联结性

经研究,对灌木层和草本层植物总体关联性进行分析,其方差比率均大于 1,表明灌木和草本群落物种总体关联性整体呈正联结(表 5)。灌木群落物种总体关联性整体呈显著正关联,卡方临界值 $\chi^2_{0.95(18)} = 9.390$, $\chi^2_{0.05(18)} = 28.869$, $W = 36.46$, W 值落在 $\chi^2_{0.95(18)}$ 与 $\chi^2_{0.05(18)}$ 之外,表明灌木群落 8 个物种总体联结性为显著正联结;草本植物卡方临界值 $\chi^2_{0.95(25)} = 14.611$, $\chi^2_{0.05(25)} = 37.652$, $W = 29.96$, 介于 $\chi^2_{0.95(25)}$ 与 $\chi^2_{0.05(25)}$ 之间,表明群落 20 个优势物种总体联结性为不显著正联结。

2.5 种间联结性分析

2.5.1 卡方检验

用 Yates 的连续校正公式对显著程度进行卡方检验,当 $\chi^2 \geq 6.635$ 时,种间联结性极显著 ($P < 0.01$, 下同);当 $3.841 \leq \chi^2 < 6.635$ 时,种间联结性显著 ($P < 0.05$, 下同);当 $\chi^2 < 3.841$ 时,种间联结性不显著,2 个物种呈独立分布。灌木层存在正相关关系的种对数为 18 对,占比 64.3%,负相关有 10 对,占比 35.7%,正负关联比为 1.8,显著与不显著之比为 0.12。极显著正相关有 1 对:梭梭和罗布麻,占比 3.6%;显著正相关有 2

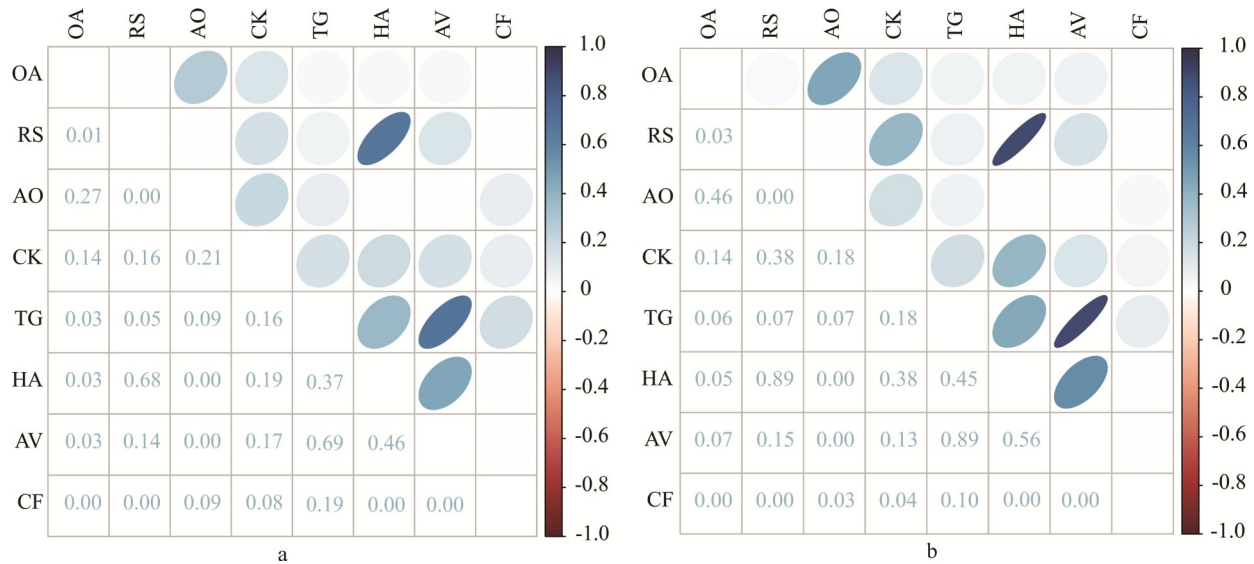


图3 优势灌木层生态位相似比(a)及重叠值(b)

Fig. 3 The niche similarity ratio (a) and overlap value (b) of dominant shrub layer

OA: 猫头刺 *O. aciphylla*; RS: 红砂 *R. songarica*; AO: 黑沙蒿 *A. ordosica*; CK: 柠条锦鸡儿 *C. korshinskii*; TG: 红花多枝柽柳 *T. gallica*; HA: 梭梭 *H. ammodendron*; AV: 罗布麻 *A. venetum*; CF: 羊柴 *C. fruticosum*. 下同 The same below.

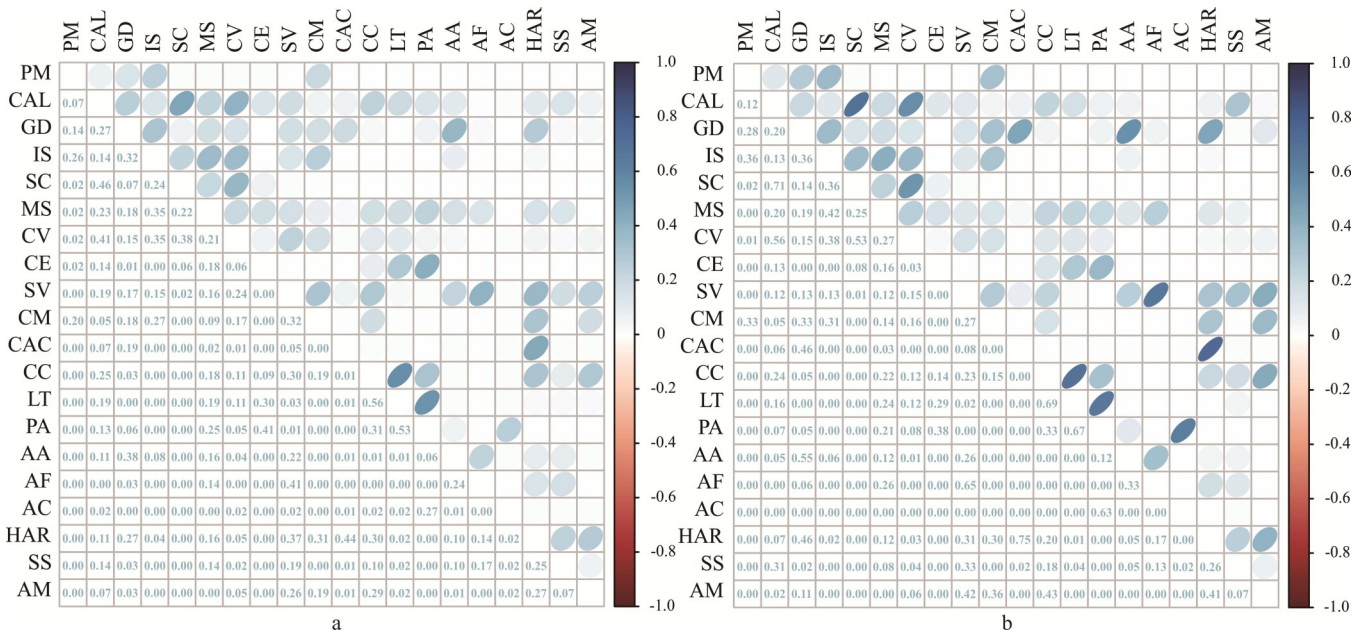


图4 优势草本层生态位相似比(a)及重叠值(b)

Fig. 4 The niche similarity ratio (a) and overlap value (b) of dominant herb layer

PM: 稷 *P. miliaceum*; CAL: 藜 *C. album*; GD: 雾冰藜 *G. dasyphylla*; IS: 蓼子朴 *I. salsoloides*; SC: 猪毛菜 *S. collina*; MS: 紫花苜蓿 *M. sativa*; CV: 虎尾草 *C. virgata*; CE: 拂子茅 *C. epigeios*; SV: 狗尾草 *S. viridis*; CM: 蒙古虫实 *C. mongolicum*; CAC: 尖头叶藜 *C. acuminatum*; CC: 鹅绒藤 *C. chinense*; LT: 乳苣 *L. tatarica*; PA: 芦苇 *P. australis*; AA: 黄花蒿 *A. annua*; AF: 冷蒿 *A. frigida*; AC: 茵陈蒿 *A. capillaris*; HAR: 白茎盐生草 *H. arachnoideus*; SS: 苦马豆 *S. salsula*; AM: 草木樨状黄耆 *A. melilotoides*. 下同 The same below.

对: 红花多枝柽柳和梭梭、红花多枝柽柳和罗布麻, 占比7.1%; 呈不显著正相关有15对, 占比53.6%; 呈不显著负相关的种对数有10对, 占比35.7%(图5a)。罗布麻、梭梭、红花多枝柽柳作为盐碱沙荒地上的植物, 抗逆性很强, 是防风固沙、改良盐碱地的理想植物种。已有研究表明, 在生态林重建区域中最佳灌草结构配置为“柽柳+梭梭+罗布麻”^[31], 且本研究结果中罗布麻、梭梭、红花多枝柽柳间呈显著正联结, 可进行混植。

表 5 生态恢复区植物群落总体联结

Table 5 Total species association of community in mining ecological restoration area

生长型 Growth form	样方数 Number of plots	方差比 Variance ratio	统计量 Statistic (W)	χ^2 临界值 Marginal value [$\chi_{0.95(df)}^2, \chi_{0.05(df)}^2$]	结果 Results
灌木 Shrub	18	2.03	36.46	[9.390, 28.869]	显著正联结 Significant positive association
草本 Herbaceous	25	1.20	29.96	[14.611, 37.652]	不显著正联结 Non-significant positive association

草本层 20 种优势植物组成的 190 个种对中,存在正相关关系的种对数 93 对,占比 48.9%,负相关有 97 对,占比 51.1%,正负关联比为 0.96,显著与不显著之比为 0.04,呈极显著正相关有 1 对:鹅绒藤和乳苣,占比 0.5%;显著正相关有 3 对:拂子茅和芦苇、乳苣和芦苇、白茎盐生草和苦马豆,占比 1.6%;呈不显著正相关有 88 对,占比 46.8%;呈极显著负相关有 1 对,占比 0.5%;显著负相关有 3 对,占比 1.1%;呈不显著负相关有 94 对,占比 49.5%(图 5b)。

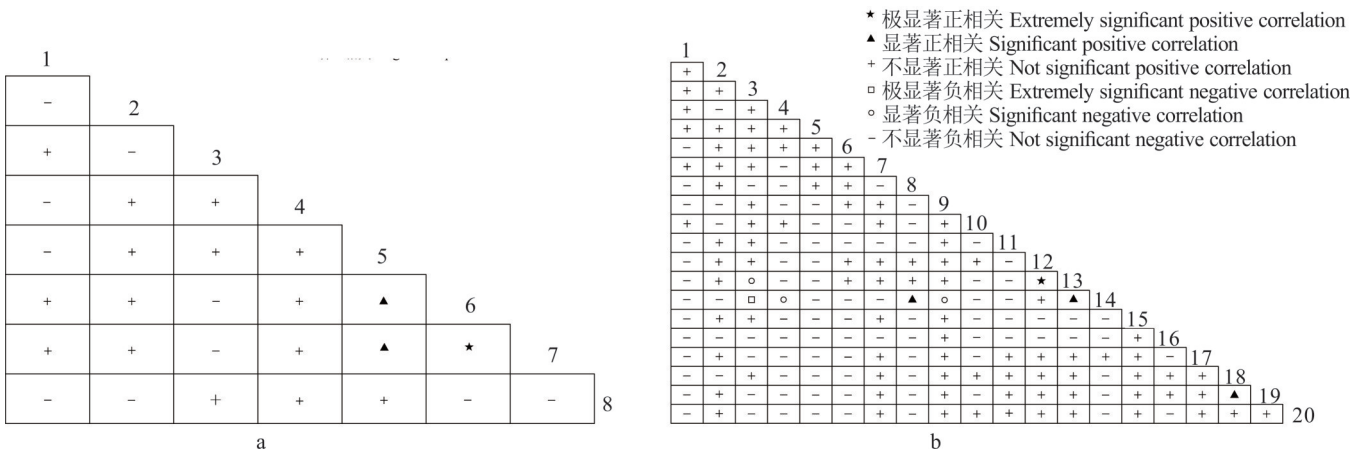


图 5 灌木层(a)及草本层(b)优势植物种间联结 χ^2 值半矩阵图

Fig. 5 Shrub layer (a) and herbaceous layer (b), half-matrix diagram of interspecific connectivity values for dominant plant species

a图中 In Figure a, 1: 猫头刺 *O. aciphylla*; 2: 红砂 *R. songarica*; 3: 黑沙蒿 *A. ordosica*; 4: 柠条锦鸡儿 *C. korshinskii*; 5: 红花多枝怪柳 *T. gallica*; 6: 梭梭 *H. ammodendron*; 7: 罗布麻 *A. venetum*; 8: 羊柴 *C. fruticosum*. b图中 In Figure b, 1: 稷 *P. miliaceum*; 2: 藜 *C. album*; 3: 雾冰藜 *G. dasyphylla*; 4: 蓼子朴 *I. salsoloides*; 5: 猪毛菜 *S. collina*; 6: 紫花苜蓿 *M. sativa*; 7: 虎尾草 *C. virgata*; 8: 拂子茅 *C. epigeios*; 9: 狗尾草 *S. viridis*; 10: 蒙古虫实 *C. mongolicum*; 11: 尖头叶藜 *C. acuminatum*; 12: 鹅绒藤 *C. chinense*; 13: 乳苣 *L. tatarica*; 14: 芦苇 *P. australis*; 15: 黄花蒿 *A. annua*; 16: 冷蒿 *A. frigida*; 17: 茵陈蒿 *A. capillaris*; 18: 白茎盐生草 *H. arachnoideus*; 19: 苦马豆 *S. salsula*; 20: 草木樨状黄耆 *A. melilotoides*. 下同 The same below.

2.5.2 Spearman 秩相关性检验

Spearman 秩相关性检验结果(图 6 和图 7)显示,灌木层下的 28 个种对间有 15 对正相关,负相关种对 13 个,正负关联比为 1.15,呈极显著正相关种对 3 个:梭梭和罗布麻、红花多枝怪柳和梭梭、红花多枝怪柳和罗布麻,占比 10.7%,呈显著正相关种对 1 个:红砂和梭梭,占比 3.6%;呈显著负相关种对 2 个,占比 7.1%(图 6)。该结果与 χ^2 检验结果略有差别,总体趋势一致。同在自然条件下研究结果一致,红砂和梭梭是荒漠区优势种对,对土壤水分、盐分、pH 等都有较广阔的适应范围^[30]。草本层 190 个种对间有 89 对正相关,负相关种对 101 个,正负关联比 0.88,呈极显著($P < 0.001$ 和 $P < 0.01$, 下同)正相关种对 21 个,占比 11.1%,呈显著($P < 0.05$, 下同)正关联种对 13 个,占比 6.8%,以鹅绒藤和乳苣的正相关系数最高,拂子茅和芦苇、狗尾草和白茎盐生草、乳苣和芦苇、雾冰藜和蓼子朴等次之;呈极显著负相关种对 8 个,占比 4.2%,呈显著负相关种对 11 个,占比 5.8%(图 7)。乳苣、芦苇、拂子茅、白茎盐生草、狗尾草、雾冰藜和蓼子朴等耐性强,在矿区植被恢复中常作为优势物种,种子传播能力强,对环境适应性高,如芦苇与拂子茅生命力强,是多年生根茎禾草^[32];白茎盐生草为

荒漠盐生植物,根际富集盐分^[33]。

2.5.3 联结系数 AC 灌木层联结系数 AC 值(图 8)中,存在正联结的种对数 18 对,负联结 10 对。 $AC \geq 0.67$ 的种对 8 对,占比 28.6%; $0.33 \leq AC < 0.67$ 的种对 4 对,占比 14.3%; $0 \leq AC < 0.33$ 的种对 6 对,占比 21.4%; $-0.33 \leq AC < 0$ 的种对 3 对,占比 10.7%; $AC < -0.67$ 的种对 7 对,占比 25.0%。草本层联结系数 AC 值(图 9)显示,正联结的种对数 93 对,负联结 97 对。 $AC \geq 0.67$ 的种对 14 对,占比 7.4%; $0.33 \leq AC < 0.67$ 的种对 24 对,占比 12.6%; $0 \leq AC < 0.33$ 的种对 55 对,占比 28.9%; $-0.33 \leq AC < 0$ 的种对 21 对,占比为 11.1%; $-0.67 \leq AC < -0.33$ 的种对 12 对,占比 6.3%; $AC < -0.67$ 的种对 64 对,占比 33.7%。该结果与 χ^2 检验结果一致,灌木层种间联结性呈显著正联结,草本层种间联结性呈不显著正联结。

2.5.4 匹配系数 JI 物种共同出现百分率 Jaccard 能消除 AC 值产生的偶然误差。灌木层 $JI \geq 0.75$ 的种对 1 对,占比 3.6%; $0.60 \leq JI < 0.75$ 的种对 2 对,占比 7.1%; $0.30 \leq JI < 0.45$ 的种对 3 对,占比 10.7%; $0.15 \leq JI < 0.30$ 的种对 10 对,占比 35.7%; $JI \leq 0.15$ 的种对 12 对,占比 42.9%(图 8)。草本层 $JI \geq 0.56$ 的种对 1 对,占比 0.5%; $0.44 \leq JI < 0.56$ 的种对 4 对,占比 2.1%; $0.33 \leq JI < 0.44$ 的种对 13 对,占比 6.8%; $0.22 \leq JI < 0.33$ 的种对

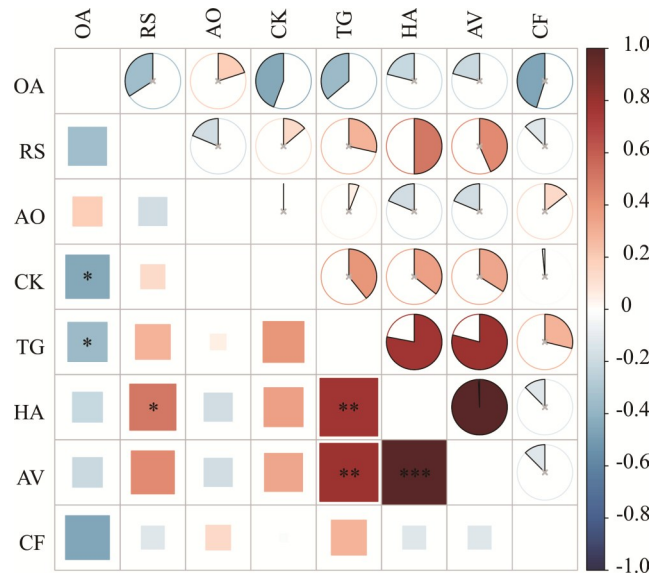


图 6 优势灌木的 Spearman 秩相关检验分析

Fig. 6 Spearman's rank correlation coefficients of dominant shrub species

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$. 下同 The same below.

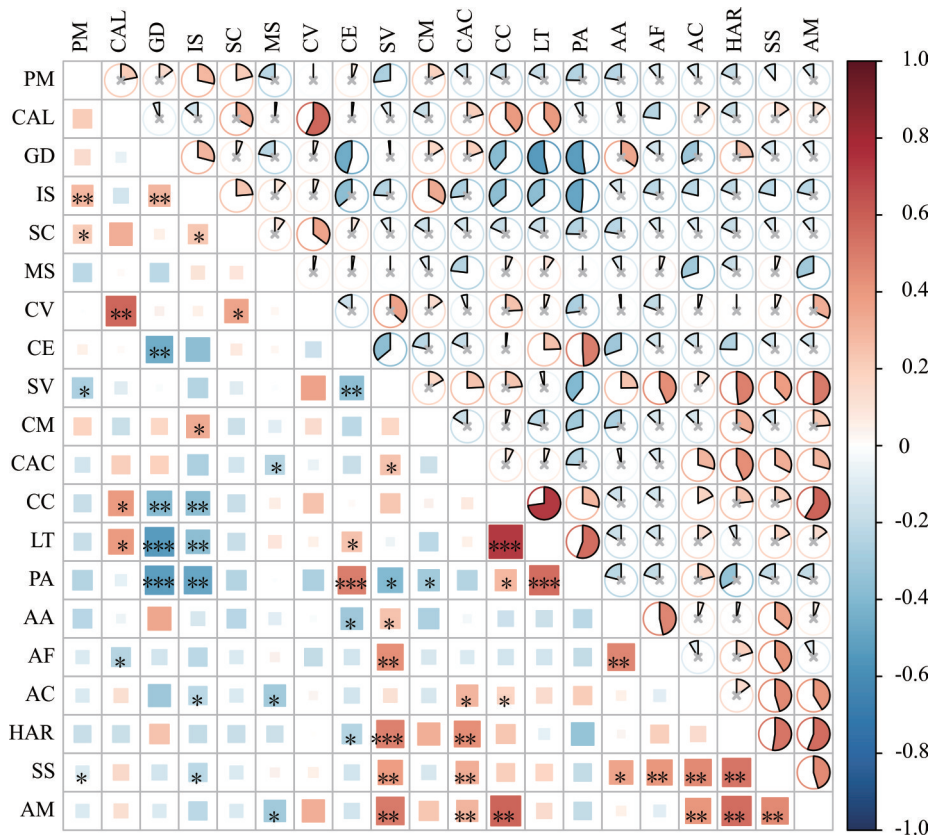


图 7 优势草本的 Spearman 秩相关检验分析

Fig. 7 Spearman's rank correlation coefficients of dominant herb species

25 对, 占比 13.2%; $0.11 \leq JI < 0.22$ 的种对 52 对, 占比 27.4%; $JI \leq 0.11$ 的种对 95 对, 占比 50.0% (图 9)。Jaccard 指数的检验结果与 χ^2 检验结果一致。

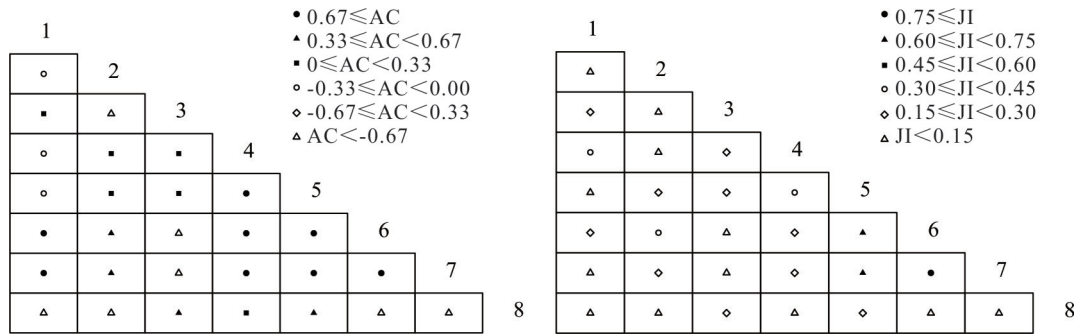


图 8 优势灌木种间联结系数 (AC) 和 Jaccard 指数 (JI) 半矩阵

Fig. 8 Semi-matrix of association coefficient and Jaccard index of dominant shrub species

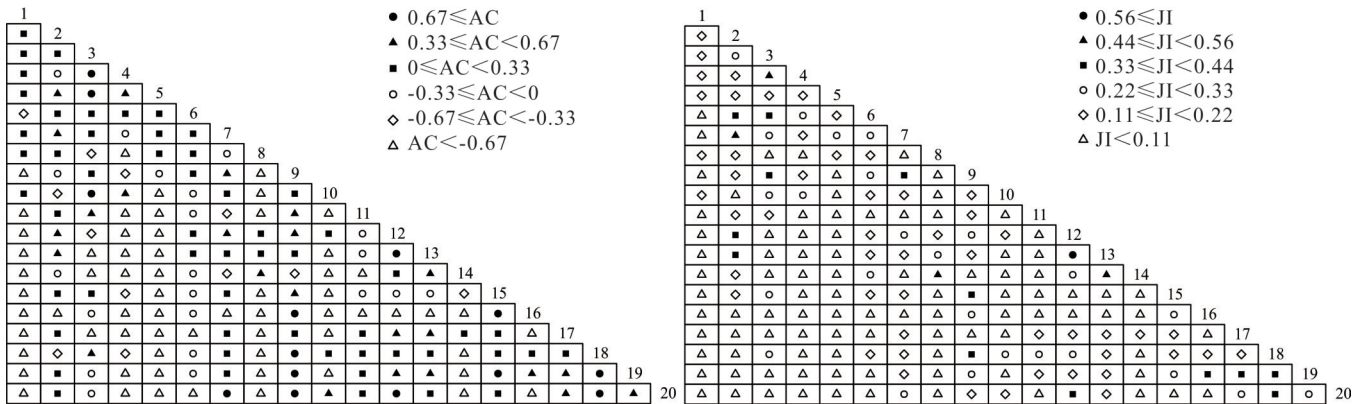


图 9 优势草本种间联结系数 (AC) 和 Jaccard 指数 (JI) 半矩阵

Fig. 9 Semi-matrix of association coefficient and Jaccard index of dominant herb species

3 讨论

3.1 群落物种组成

在植物群落恢复初期, 受非生物因素的影响较大, 且最初的恢复物种存在优先效应, 影响植被演替的进程^[34]。排矸场生态恢复区植物组成以豆科、禾本科、菊科、苋科为主, 伴有较多的雾冰藜、紫花苜蓿、柠条、猫头刺等先锋植物, 与相同环境条件下废弃地恢复结果基本一致^[35-36]。随着植被恢复年限的增加, 植物种类也逐渐丰富, 多年生草本植物比例相较于一年生植物有所增加, 促进植被群落的演替。从植物对水分条件的适应性划分的生态型来看, 植被组成由建设初期旱生植物为主变为中生、中旱生、旱中生、旱生、强旱生植物多种生态型。研究表明土壤种子库与地表植被的关系十分密切^[37], 排矸场修复措施采取平整土地及覆盖表土, 而引起研究区植被组成变化的原因主要是排矸场在生态恢复经覆土改造后, 覆土层中包含大量的种子, 矿区的灌溉养护措施有助于土壤种子库中种子的萌发, 原生植被得以生长繁殖, 恢复初期植被覆盖度低, 增加了外来物种进入的机会, 为该土壤种子库输入了种子, 这些都使得植被生态型发生改变, 且研究区管控较为严格, 排除放牧产生的粪便带入外来种子。

3.2 生态位特征

生态位特征能够体现物种在群落演替中的作用及其对环境的适应能力, 具有较宽生态位或繁殖能力强的物种通常成为演替的先锋物种^[38]。煤矸石山生态恢复区植物重要值与生态位宽度趋势基本一致, 灌木植物中, 猫头刺(25.5)和柠条锦鸡儿(22.9)的重要值靠前, 生态位宽度大于其他物种。上述植物种适应环境能力强, 在群落资

源的竞争中处于优势地位,是维持群落稳定的关键种。而稷、尖头叶藜、冷蒿、茵陈蒿、苦马豆、草木樨状黄耆的生态位宽度较小,说明这些物种对环境的适应能力较弱,资源利用具有倾向性,不适合大规模种植。个别物种重要值大的,生态位宽度较小,如羊柴和红花多枝怪柳,可能是由于其分布的样地数目少,在某一特定环境下占据优势导致其生态位宽度小。草本植物中,雾冰藜(18.7)重要值最高,为优势种,这与前人研究结果一致^[27],雾冰藜在扰动后的疏松土壤中生长繁殖,占据裸地形成适宜生境斑块,形成有利于其他植物的生长环境^[39]。

生态恢复区土层水分和养分贫瘠,资源匮乏,且不同生活型植物种群占据不同的空间层次^[40]。生态位重叠值大(小)表示种间竞争较为激烈(缓和)^[41]。绝大部分草本层和灌木层群落植被生态位相似指数与生态位重叠指数较小,为0~0.5,种间竞争缓和,部分原因是灌木群落和草本群落处在演替前期向中期的过渡阶段,物种对资源的利用程度正在随环境变化调整,且物种占据的生态位分化明显,空间资源利用不充分。优势植物种之间存在生态位重叠现象,生态位宽度较大的物种普遍具有较高的生态位重叠,但生态位宽度和生态位重叠并没有趋向一致,生态位宽度较小的植物种也具有较高生态位重叠度,例如:尖头叶藜和猪毛菜(0.71)、尖头叶藜和白茎盐生草(0.75),红砂和梭梭(0.89),梭梭和罗布麻(0.56),可能是因为这几个物种资源需求相似,表现出较高的生态位重叠,也可能与矿区的环境异质性有关,矿区水土资源匮乏,土壤结构较差、土壤养分含量较低,存活于此环境的物种集中在局部资源较好的区域,在此环境中有着较大的生态位重叠^[42-43],同时上述优势种可能在不同环境资源程度上有较大的重叠,如水分、pH值、盐分梯度上,生态位特化,使它们能够彼此共存^[44]。

3.3 种间联结特征

植物群落的总体联结性能反映植被群落的稳定性。煤矸石山生态恢复区草本层群落和灌木层群落总体联结性都表现为正联结关系, χ^2 检验和 Spearman 秩相关检验结果总体趋势一致,但也存在差异。在本研究中,灌木层群落检验显著率 21.4%(Spearman 秩相关检验) $>10.7\%$ (χ^2 检验);草本层群落检验显著率 27.9%(Spearman 秩相关检验) $>3.7\%$ (χ^2 检验)。结果表明,灌木层群落正联结种对大于负联结种对,各种群间联结性紧密,群落相对稳定;草本层群落不显著种对数量多,关联性弱,且正联结种对少于负联结种对,种对间多呈负相关,种对间的生态适应相异性大,生态位分散性较强,群落处于演替前期向中期过渡的阶段。联结系数(AC)的显著检验结果高于 χ^2 检验结果,如:虎尾草和草木樨状黄耆、狗尾草和苦马豆、狗尾草和草木樨状黄耆等6对联结系数均表现为显著正联结, χ^2 表现为不显著联结,是因为上述部分物种在样地出现次数较少, χ^2 检验难以检测出它们的种间联结,且这些种对都不出现的样方多,导致 AC 值偏高,所以 JI 值 <0.3 ,表现较低的联结性。综上,草本层群落种间关联性较弱,分布格局趋向分散,应将种间联结运用于植物配置中,选择正联结的植物进行配置组合,充分利用环境资源,使群落处于稳定状态。

水分和土壤环境是限制矿区植被恢复,造成负联结的种对数占比高的原因之一。水分是西北干旱半干旱区植被演替的主导因子,应以水资源植被承载力权衡植被恢复效应^[45],植物对环境的适宜性和可持续发展性是生态恢复效果的关键因素,恢复初期在灌溉养护措施下建立人工植物群落促进恢复进程,伴随植物群落的演替,稳定的植被群落将促进生态系统的自维持机制,因此需建立抗逆性强的植物群落。人工植被的生长发育在无灌溉养护下主要充分利用降水或地下水,应选用抗旱节水且适应性强的植物。红砂、罗布麻、梭梭、黑沙蒿、白茎盐生草是本地区适应性极强的灌草植物,蒸腾耗水量少,成活率高,且红砂灌丛具有明显的沃岛效应,有利于草本植物的生长,因此在缺水地区或无灌溉少养护条件下,可参考以上植物种进行恢复^[46-47],建立稳定的植物群落及自我维持性强的生态恢复系统。植物化感作用是植株配置的科学依据,应避免相克或排斥作用物种搭配^[48],如黑沙蒿与羊柴、柠条;冷蒿与冰草、披碱草;紫花苜蓿与藜、骆驼蓬(*Peganum harmala*)等^[49]。由于植被恢复受多种因素的影响,下一步研究计划将土壤理化性质、植物生物量、群落多样性指数等因素考虑在内,为植被配置结构的优化与宁东煤炭基地环境的改善提供理论和实践价值。

4 结论

排矸场生态恢复区植物组成以豆科、禾本科、菊科、苋科为主;植物生态型多以旱生植物为主,相较于植被建植时,灌草植物种类显著增加。雾冰藜、紫花苜蓿、猫头刺和柠条锦鸡儿生态位宽度大。建议在同地区未实施植被恢复的排矸场,将以上优势种作为先锋物种进行混植,促进植被恢复进程。灌草植物均处于演替初级或中级阶段,草本植物群落优势种间联结较为松散,朝地带性植被恢复方向演替;灌木植物种间联结较为紧密,向与该地区环境条件相适应的稳定阶段发展。生态恢复区需重点考虑植物种类和配置,以应对停止养护灌溉后的情况。建议在缺水或无灌溉地区推荐对当地适应性强的抗旱植物及与其呈显著正联结的植被配置:白茎盐生草和苦马豆、梭梭和罗布麻、红花多枝怪柳和梭梭、红花多枝怪柳和罗布麻、梭梭和红砂等。

参考文献 References:

- [1] Shan D, Xing E D, Rong H, *et al.* Ecological restoration of different vegetation collocations of coal mine dump in typical steppe. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(2): 336—342.
珊丹, 邢恩德, 荣浩, 等. 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.
- [2] Li J T, Mu J, Shen K P, *et al.* Niche and interspecific association of dominant woody plants in *Camellia luteoflora* community. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(1): 283—294.
李锦婷, 穆君, 申开平, 等. 小黄花茶群落优势木本植物生态位及种间联结性. *生态学报*, 2024, 44(1): 283—294.
- [3] Zhang L M, Lan B, Zhang D S, *et al.* Niche and interspecific association of dominant herbaceous plants in the water-level-fluctuating zone of Fuling-Fengjie section of the Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(8): 3228—3240.
张乐满, 兰波, 张东升, 等. 三峡水库涪陵—奉节段消落带优势草本植物生态位与种间联结性研究. *生态学报*, 2022, 42(8): 3228—3240.
- [4] Huang Y Y, Han H, Tang C, *et al.* Plant community composition and interspecific relationships among dominant species on a post-seismic landslide in Hongchun Gully, China. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(10): 1985—1994.
- [5] He W L, Wang L L, Wang L, *et al.* Community stability was maintained by divergent mechanisms in arid desert ecosystem. *Rangeland Ecology & Management*, 2019, 72(5): 742—748.
- [6] Arnillas C A, Borer E T, Seabloom E W, *et al.* Opposing community assembly patterns for dominant and nondominant plant species in herbaceous ecosystems globally. *Ecology and Evolution*, 2021, 11(24): 17744—17761.
- [7] Navarro-Cano J A, Horner B, Goberna M, *et al.* Additive effects of nurse and facilitated plants on ecosystem functions. *Journal of Ecology*, 2019, 107(6): 2587—2597.
- [8] Khalil M I, Gibson D J, Baer S G. Functional response of subordinate species to intraspecific trait variability within dominant species. *Journal of Ecology*, 2019, 107(5): 2040—2053.
- [9] Li R P, Shi C Q, Yang J Y, *et al.* Ecological restoration effect evaluation of Zhangxuan iron tailings in Hebei Province of northern China under different vegetation patterns. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(8): 66—76.
李瑞鹏, 史常青, 杨建英, 等. 不同植被模式下张宣铁尾矿生态恢复效果评价. *北京林业大学学报*, 2022, 44(8): 66—76.
- [10] Shi L T, Shi C Q, Zhao T N, *et al.* Vegetation restoration effect in abandoned quarries: A case study of Dashiwo Town quarry in Fangshan District, Beijing. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(5): 1416—1425.
侍柳彤, 史常青, 赵廷宁, 等. 采石场废弃地植被恢复效果——以北京房山区大石窝镇采石场为例. *生态学杂志*, 2024, 43(5): 1416—1425.
- [11] Zhang Y, Zhao T N, Shi C Q, *et al.* Evaluation of vegetation and soil characteristics during slope vegetation recovery procedure. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(3): 124—131.
张艳, 赵廷宁, 史常青, 等. 坡面植被恢复过程中植被与土壤特征评价. *农业工程学报*, 2013, 29(3): 124—131.
- [12] Zhang P, Shen Y, Zhang X J, *et al.* Study on leaf carbon, nitrogen and phosphorus eco-stoichiometric characteristics and community stability of dominant plants in Ningxia desert steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(6): 18—26.
张鹏, 沈艳, 张小菊, 等. 宁夏荒漠草原优势植物叶片C、N、P生态化学计量特征及群落稳定性研究. *中国草地学报*, 2022, 44(6): 18—26.
- [13] Wu M H, Hou J, Zhang Y Q, *et al.* Ratio of dominant soil and water conservation plants in catchment of loess hilly region based on CATS model. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(8): 2455—2461.
吴孟函, 侯健, 张彦勤, 等. 基于CATS模型的黄土丘陵小流域优势水土保持植物配比. *草地学报*, 2023, 31(8): 2455—

2461.

- [14] Feng X H, Zhou L, Xiong W, *et al.* Tensile mechanical properties of the roots of the native shrubs and herbs in the dry-hot valley of Dadu river. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(7): 159–169.
冯旭环, 周璐, 熊伟, 等. 大渡河干热河谷区本土优势灌草植物根系的抗拉力学特性及其影响因素研究. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(7): 159–169.
- [15] Liu Q, Yang J Y, Hou J, *et al.* Ratio of dominant dust retaining plants in waste dump of desert open-pit coal mine based on CATS model. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, 39(4): 775–782.
刘琴, 杨建英, 侯健, 等. 基于CATS模型的干旱荒漠露天煤矿排土场优势滞尘植物配比. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(4): 775–782.
- [16] Xu A Y, Cao B, Xie Y. Physiological-ecological responses of twelve herbaceous plant species under drought stress and evaluation of their drought resistance when planted in coal producing basis in arid windy and sandy areas. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(10): 22–34.
许爱云, 曹兵, 谢云. 干旱风沙区煤炭基地12种草本植物对干旱胁迫的生理生态响应及抗旱性评价. *草业学报*, 2020, 29(10): 22–34.
- [17] Zhang D M, Zhao W Z, Luo W C. Niche and interspecific association of dominant plant species in saline-alkaline soils of desert steppe zone. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(5): 1307–1315.
张东梅, 赵文智, 罗维成. 荒漠草原带盐碱地优势植物生态位与种间联结. *生态学杂志*, 2018, 37(5): 1307–1315.
- [18] Yan X H, Niu J M, Li Y H, *et al.* Priority effects on plant community assembly and ecological restoration significance. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(10): 217–225.
闫晓红, 牛建明, 李元恒, 等. 物种优先效应对植物群落构建的影响及其生态恢复意义. *草业学报*, 2022, 31(10): 217–225.
- [19] Liu L T, Wang X D, Wen Q, *et al.* Interspecific associations of plant populations in rare earth mining wasteland in southern China. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 118: 82–88.
- [20] Xu L, Feng F, Liu Y, *et al.* Relationship between plant species diversity and soil chemical properties in coal gangue dump: early stage of ecological restoration in Lingwu Mining Area. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(4): 97–104.
许丽, 丰菲, 刘莹, 等. 煤矸石山植物物种多样性与土壤化学因子的关系——以灵武矿区生态修复初期为例. *煤炭科学技术*, 2020, 48(4): 97–104.
- [21] Yang S L, Liu C Y, Li M, *et al.* Determination of roadway cross-section shape in upward mining of Yangchangwan Coal Mine. *Coal Engineering*, 2022, 54(2): 5–11.
杨胜利, 刘传义, 李明, 等. 羊场湾煤矿上行开采合理巷道断面形状确定. *煤炭工程*, 2022, 54(2): 5–11.
- [22] Li Y, Luo J F, Hou Z Y, *et al.* Plant diversity and environmental interpretation of Mang Shan Lang Pan Lake national important wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(12): 1–11.
李阳, 罗健夫, 侯志勇, 等. 莽山湖畔湖国家重要湿地植物多样性及环境解释. *生态学报*, 2024, 44(12): 1–11.
- [23] Wang J, Liu J J, Liu C, *et al.* Species niche and interspecific associations alter flora structure along a fertilization gradient in an alpine meadow of Tianshan Mountain, Xinjiang. *Ecological Indicators*, 2023, 147: 109953.
- [24] Liu Y P, Ye X Z, Ye L Q, *et al.* Niche and interspecific association of dominant tree species in *Michelia odora* community. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(10): 2670–2678.
刘益鹏, 叶兴状, 叶利奇, 等. 观光木群落优势树种生态位和种间联结. *应用生态学报*, 2022, 33(10): 2670–2678.
- [25] Ding M, Wang Y K, He Y R, *et al.* Changes of species diversity, interspecific associations and community stability for the deciduous broad-leaved forest in Yaoluoping National Nature Reserve, Anhui Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(7): 2818–2830.
丁茂, 汪宇坤, 何煜然, 等. 安徽鹞落坪国家级自然保护区落叶阔叶林树种多样性、种间联结及群落稳定性变化. *生态学报*, 2023, 43(7): 2818–2830.
- [26] Xu M H, Liu M, Zhai D T, *et al.* A review of contents and methods used to analyze various aspects of plant interspecific associations. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(24): 8224–8233.
徐满厚, 刘敏, 翟大彤, 等. 植物种间联结研究内容与方法评述. *生态学报*, 2016, 36(24): 8224–8233.
- [27] Guo W T, Wang G H, Gou Q Q, *et al.* Module growth and biomass allocation of three typical *Chenopodiaceae* annuals in a typical desert-oasis ecotone of the Hexi Corridor in Gansu Province, China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(2): 25–38.
郭文婷, 王国华, 缙倩倩, 等. 河西走廊荒漠绿洲过渡带3种典型一年生藜科植物构件生长及生物量分配特征. *草业学报*,

- 2022, 31(2): 25–38.
- [28] Hu Y, Wang H C, Jia H P, *et al.* Ecological niche and interspecific association of plant communities in alpine desertification grasslands: A case study of Qinghai Lake Basin. *Plants*, 2022, 11(20): 2724.
- [29] Pastore A I, Barabás G, Bimler M D, *et al.* The evolution of niche overlap and competitive differences. *Nature Ecology & Evolution*, 2021, 5(3): 330–337.
- [30] Zhang L J, Yue M, Zhang Y D, *et al.* Analysis on the niche of the main plant species of oasis-desert ecotone in Fukang of Xinjiang. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6): 969–972.
张林静, 岳明, 张远东, 等. 新疆阜康绿洲荒漠过渡带主要植物种的生态位分析. *生态学报*, 2002, 22(6): 969–972.
- [31] Yao L B. Study on the optimization mode of the restored vegetation community structure in the middle and lower reaches of Tarim river. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2005.
姚利兵. 塔里木河中下游植被重建中的群落结构配置优化模式研究. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2005.
- [32] Zeng Y, Zhao C Y, Li C J, *et al.* Spatial distribution pattern and association of *Populus euphratica* community in different habitats along the Tarim River. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(11): 3273–3282.
曾勇, 赵成义, 李传金, 等. 塔里木河沿岸不同生境下胡杨(*Populus euphratica*)群落的空间分布格局及关联性. *生态学杂志*, 2019, 38(11): 3273–3282.
- [33] Wang J Y, Wang M L, Liu G M, *et al.* Analysis of the typical halophytic vegetation resistance and restoration process in abandoned salinized field. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2015, 52(1): 129–136.
王静娅, 王明亮, 刘广明, 等. 盐渍化弃耕地典型盐生植被抗逆性与恢复重建过程分析. *新疆农业科学*, 2015, 52(1): 129–136.
- [34] Helsen K, Hermy M, Honnay O. Trait but not species convergence during plant community assembly in restored semi-natural grasslands. *Oikos*, 2012, 121(12): 2121–2130.
- [35] Peng L, Mao Q, Cao L Y, *et al.* Insight into the adaptability of dominant plant *Indigofera amblyantha* Craib for ecological restoration of rock slopes in stone coal mine. *Adsorption Science & Technology*, 2021, DOI:10.1155/2021/3827991.
- [36] Woodbury D J, Yassir I, Arbainsyah, *et al.* Filling a void: Analysis of early tropical soil and vegetative recovery under leguminous, post-coal mine reforestation plantations in East Kalimantan, Indonesia. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(4): 473–487.
- [37] Qi D H, Liu W S, Li S Y, *et al.* Relationship between aboveground vegetation and soil seed banks from different communities of initial restoration stage in Lanping Lead/Zinc Mining Area. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, 33(11): 2317–2325.
齐丹卉, 刘文胜, 李世友, 等. 兰坪铅锌矿区植被恢复初期土壤种子库与地上植被关系的研究. *西北植物学报*, 2013, 33(11): 2317–2325.
- [38] Li T, Wu M H, Tang C D, *et al.* Advances in the key driving mechanism of vegetation succession and its guiding implication in metal mine remediation. *Environmental Ecology*, 2020, 2(12): 48–54.
李婷, 吴明辉, 唐春东, 等. 植被演替的关键驱动机制研究及其在金属矿山修复中的指导意义. *环境生态学*, 2020, 2(12): 48–54.
- [39] Zhao X Y, Zhu C L, Hai Y, *et al.* Community characteristics of naturally established plants in mined site—Take the Awei Gobi Mining Area in Qinghe County, Xinjiang Uygur Autonomous Region as an example. *Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2022, 41(4): 8–15.
赵晓英, 朱成林, 海鹰, 等. 采矿废弃地自然定居植物的群落特征——以新疆维吾尔自治区青河县阿苇戈壁矿区为例. *新疆师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(4): 8–15.
- [40] Qi S, Liu Z S, Du D, *et al.* Spatial heterogeneity of plant community and its influencing factors in Longxiang Mountain. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(1): 75–85.
戚赏, 刘占时, 牡丹, 等. 龙翔山植物群落空间异质性及影响因子. *生态学杂志*, 2024, 43(1): 75–85.
- [41] 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. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(6): 61–68.
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. *草业学报*, 2022, 31(6): 61–68.
- [42] Costa D S, Gerschlauser F, Kiese R, *et al.* Plant niche breadths along environmental gradients and their relationship to plant functional traits. *Diversity and Distributions*, 2018, 24(12): 1869–1882.

- [43] 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. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2023, 50(4): 149–154.
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. *矿业安全与环保*, 2023, 50(4): 149–154.
- [44] Zhang Y D, Pan X L, Gu F X, *et al.* Shrub and undershrub niches in vegetation of the Fukang Desert. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2001, 25(6): 741–745.
张远东, 潘晓玲, 顾峰雪, 等. 阜康荒漠植被灌木与半灌木种群生态位的研究. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 741–745.
- [45] Lyu J X, Liang K, Liu C M, *et al.* Spatial differentiation mechanism of land cover and related changes in water-carbon variables in Wuding River Basin. *Arid Zone Research*, 2023, 40(4): 563–572.
吕锦心, 梁康, 刘昌明, 等. 无定河流域土地覆被空间分异机制及相关水碳变量变化. *干旱区研究*, 2023, 40(4): 563–572.
- [46] Li M Z. Preliminary study on the benefits of non-irrigation vegetation restoration in the north mountain area of Lanzhou city. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(1): 150–153, 157.
李茂哉. 兰州市北山无灌溉区植被恢复效益初步研究. *水土保持通报*, 2008, 28(1): 150–153, 157.
- [47] Lei C Y, Wu M, Jiang L, *et al.* Sand-fixing experiment of *Apocynum venetum* without irrigation in grass-grid sand-barrier. *Protection Forest Science and Technology*, 2020(1): 5–7.
雷春英, 吴明, 姜黎, 等. 草方格沙障内无灌溉种植罗布麻固沙试验研究. *防护林科技*, 2020(1): 5–7.
- [48] Qin S G, Wu B, Zhang Y Q. A review of belowground interspecific interactions and allelopathy in silvopasture systems. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(2): 253–261.
秦树高, 吴斌, 张宇清. 林草复合系统地下部分种间互作关系与化感作用研究进展. *草业学报*, 2011, 20(2): 253–261.
- [49] Wang F L, Xu X Y, Wang L D, *et al.* Research progress of allelopathy of arid desert plants in northwest. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(5): 165–172.
王方琳, 徐先英, 王理德, 等. 西北干旱荒漠区植物化感作用研究进展. *中国农学通报*, 2016, 32(5): 165–172.

《草业学报》2024年承蒙以下专家审稿,特此表示感谢
(以姓氏拼音为序)

毕玉蓉	边疆晖	曹成有	陈旭君	陈长青	程建峰	程金花	戴其根	丁成龙	丁国华
董全民	董召荣	杜自强	段廷玉	方香玲	冯彦皓	高丽倩	高学文	耿玉清	郭丁
郭继勋	郭龙	郭正刚	韩立强	韩烈保	韩云华	杭苏琴	何树斌	贺晓	胡涛
黄晓东	贾倩民	贾善刚	井新	雷蕾	李飞	李辉信	李建龙	李万宏	李伟斌
李旭东	李彦忠	李造哲	李镇清	林慧龙	蔺吉祥	凌宁	刘杰	刘权	刘世亮
刘文献	刘永杰	刘宇婧	刘志民	吕晓涛	马啸	毛培胜	毛胜勇	穆春生	强胜
尚占环	邵涛	沈益新	沈禹颖	石遵计	时磊	宋秋艳	苏永中	孙丽娟	田沛
汪诗平	王德利	王虎成	王剑峰	王俊	王丽佳	王三根	王思然	王晓娟	吴鹏飞
谢文刚	徐浩杰	徐世健	杨成德	杨惠敏	杨宪龙	姚拓	尹红菊	于应文	于卓
袁明龙	臧飞	曾彦军	张吉宇	张建国	张金屯	张雷	张世挺	张万军	张卫建
张兴旭	张英俊	赵宁	赵祺	赵威	周强	朱宏	朱剑霄	庄苏	