

露天煤矿排土场不同植被配置沙棘林对 植被与土壤养分的影响

张泽忠¹, 麻云霞^{1,2,3}, 杨光^{1,2,3}, 郭欣宇¹, 梁田雨⁴, 穆其尔⁵

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古农业大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室, 呼和浩特 010019;

3. 内蒙古杭锦荒漠生态系统定位观测研究站, 内蒙古 鄂尔多斯 017400; 4. 内蒙古科技大学
包头师范学院, 内蒙古 包头 014030; 5. 内蒙古自治区林业和草原保护总站, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘 要: [目的] 探究露天煤矿排土场沙棘林不同植被配置对林下植物多样性与土壤养分的影响, 明确适宜的生态修复模式, 为矿区排土场生态修复提供科学依据。[方法] 以内蒙古伊金霍洛旗满来梁露天煤矿排土场为研究区, 对纯沙棘林(类型 I)、苜蓿与沙棘同年种植林(类型 II)、苜蓿早两年种植沙棘林(类型 III) 3 种沙棘配置类型进行植被群落调查和土壤化学性质测定, 采用 Pearson 相关性分析和主成分分析(PCA)对其生态效应进行综合评估。[结果] ① 3 种配置之间林下植被多样性和土壤养分含量具有显著差异($p < 0.05$), 物种多样性指数大小均为: 类型 I > 类型 III > 类型 II。② 在 0—40 cm 土壤养分方面, 土壤有机质含量为: 类型 I (7.54 g/kg) > 类型 III (6.82 g/kg) > 类型 II (6.65 g/kg); 全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾的含量均表现为: 类型 III > 类型 I > 类型 II。③ 相关性分析显示, 全钾、速效钾等土壤指标与物种多样性指数呈正相关, 碱解氮与物种多样性呈负相关, 在排土场资源异质性偏弱且水分胁迫突出的生境中, 沙棘在较高碱解氮条件下适合度好, 遮荫和竞争排他主导, 引起群落多样性下降。④ 主成分分析显示, 植被恢复配置中应注意土壤基础养分供给能力、群落形成后的可持续能力(群落稳定性、土壤-植被系统养分良性循环)。苜蓿早两年种植沙棘林配置接近于养分供给与活化增强的恢复模式, 纯沙棘林配置接近于群落稳定与养分循环维持的恢复模式。[结论] 不同植被配置的沙棘林土壤化学性质及生物量均具有显著性差异。纯沙棘林在促进群落物种多样性及土壤养分提升方面综合表现最佳, 苜蓿与沙棘同年种植模式最差。

关键词: 露天煤矿; 沙棘林; 配置模式; 植被多样性; 土壤养分; 生态恢复

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)04-0085-10

中图分类号: S793.6, S714.2

文献参数: 张泽忠, 麻云霞, 杨光, 等. 露天煤矿排土场不同植被配置沙棘林对植被与土壤养分的影响[J]. 水土保持通报, 2026, 46(4): 85-94. Zhang Zezhong, Ma Yunxia, Yang Guang, et al. Effects of different vegetation configurations of *Hippophae rhamnoides* forests on vegetation and soil nutrients in an open-pit coal mine dump site [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(4): 85-94.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.005

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.04.005

Effects of different vegetation configurations of *Hippophae rhamnoides* forests on vegetation and soil nutrients in an open-pit coal mine dump site

Zhang Zezhong¹, Ma Yunxia^{1,2,3}, Yang Guang^{1,2,3}, Guo Xinyu¹, Liang Tianyu⁴, Muqier⁵

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

Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and

Environment in Arid Area, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019,

China; 3. Inner Mongolia Hangjin Desert Ecological Position Research Station, Ordos, Inner Mongolia 017400,

China; 4. Baotou Teachers College, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia

014030, China; 5. Inner Mongolia Forestry and Grassland Protection Station, Hohhot, Inner Mongolia 010000, China)

收稿日期: 2025-08-30

修回日期: 2026-01-20

采用日期: 2026-01-21

资助项目: 内蒙古自治区“揭榜挂帅”项目“十大孔兑风水复合侵蚀区泥沙阻控与近自然生态修复技术集成与示范”(2024JBGS0023), “黄河湿地(包头段)盐碱地土壤微生物功能多样性与生态驱动机制研究”(NJZY22029)

第一作者: 张泽忠(2002—), 男(蒙古族), 内蒙古赤峰市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: 15204763077@163.com。

通信作者: 麻云霞(1991—), 女(汉族), 内蒙古乌兰察布市人, 博士, 副教授, 主要从事沙区植物资源保护与利用方面的研究。Email: 1572666975@qq.com。

Abstract: [Objective] The effects of different vegetation configurations of *Hippophae rhamnoides* forests in an open-pit coal mine dump site on understory plant diversity and soil nutrients were investigated, and suitable ecological restoration modes were identified, in order to provide a scientific basis for ecological restoration of mine dump sites. [Methods] Taking a dump site of the Manlailiang open-pit coal mine in Ejina Horo Banner, Inner Mongolia, as the study area, field surveys of vegetation communities and measurements of soil chemical properties were conducted for three *H. rhamnoides* configuration types: pure *H. rhamnoides* forest (type I), simultaneous planting of *Medicago sativa* and *H. rhamnoides* (type II), and sequential planting in which *M. sativa* was established two years earlier than *H. rhamnoides* (type III). Pearson correlation analysis and principal component analysis (PCA) were used to comprehensively evaluate their ecological effects. [Results] ① Understory vegetation diversity and soil nutrient contents differed significantly among the three configurations ($p < 0.05$), and species diversity indices were ranked as type I > type III > type II. ② In the 0—40 cm soil layer, soil organic matter content followed the order: type I (7.54 g/kg) > type III (6.82 g/kg) > type II (6.65 g/kg). Total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available phosphorus and available potassium all followed the order: type III > type I > type II. ③ Correlation analysis showed that total potassium and available potassium were positively correlated with species diversity indices, whereas alkali-hydrolyzable nitrogen was negatively correlated with species diversity. In the dump-site habitat with weak resource heterogeneity and pronounced water stress, *H. rhamnoides* shows better adaptability under higher alkali-hydrolyzable nitrogen conditions, and shading and competitive exclusion dominated, leading to decreased community diversity. ④ Principal component analysis showed that vegetation restoration configurations should emphasize both the supply capacity of basic soil nutrients and the sustainability after community establishment (community stability and the positive nutrient cycling of the soil-vegetation system). The configuration in which *M. sativa* was established two years earlier than *H. rhamnoides* was close to a restoration mode characterized by enhanced nutrient supply and activation, whereas the pure *H. rhamnoides* forest was closer to a restoration mode characterized by community stability and maintenance of nutrient cycling. [Conclusion] Different vegetation configurations of *H. rhamnoides* forests show significant differences in soil chemical properties and biomass. Overall, the pure *H. rhamnoides* forest performs best in promoting community species diversity and improving soil nutrients, whereas the simultaneous planting mode of *M. sativa* and *H. rhamnoides* performs worst.

Keywords: open-pit coal mine; *Hippophae rhamnoides* forest; configuration pattern; vegetation diversity; soil nutrients; ecological restoration

随着中国经济的持续增长,煤炭资源开发强度不断加大,以煤炭资源开采为主的矿业活动为国家经济提供了重要支撑,但高强度的露天开采对生态系统造成严重破坏,已成为制约区域可持续发展的突出难题^[1]。露天矿区及排土场因矿产开采与场地建设活动强度大,扰动范围广,成为生态系统破坏最为严重的区域之一,植被大面积消失,土壤结构被严重破坏表层有机质大量流失,土壤养分流失和生物多样性明显减少^[2],露天煤矿开采使土壤功能退化,及水土流失加重,生态系统变得更加脆弱^[3],已成为影响矿区生态安全与可持续发展的一项关键因素。

人工生态工程是推动矿区生态恢复的重要途径,其中植物修复作为关键手段,在防治水土流失,改善土壤质量和恢复生态系统功能方面发挥着核心

作用^[4-5]。在现有研究中^[6-7],学者们主要通过选取植被配置模式及生态修复方式,分析植被因子指标和土壤因子指标的变化,来探讨物种多样性及土壤肥力的演变规律。沙棘(*Hippophae rhamnoides*)因其耐贫瘠,抗旱固沙,改善土壤肥力等生态适应性优势,被广泛应用于露天煤矿排土场的植被恢复。关于植被配置模式对生态恢复效果的影响,目前研究结论存在一定差异。有学者^[8]认为混交林更有利于林下植被的生长与更新,但也有观点认为纯林的效果更佳^[9]。

植被配置包括种类配置、时空配置,都会影响到植被与土壤间的水分、养分循环强度与模式,从而对区域生态系统恢复效果产生深远影响。当前生态恢复多聚焦于物种组成或静态混交模式,忽视了植物种植顺序在调控群落演替中的作用。在剧烈扰动的

排土场生境中,先锋物种的种植顺序会改变恢复前期养分吸收与培肥间的平衡、后期群落组成与资源竞争格局,最终影响恢复效应。现有研究已证实种植沙棘能够提升土壤养分^[8],但其与伴生植物的配置方式如何协同作用于恢复力,仍缺乏定量解析。特别是在扰动强烈的排土场环境中,种植时序对土壤养分重建与群落演替过程的影响缺乏系统的量化研究。相关研究表明,植物种植的时间差异可能通过调节资源获取的先后顺序、根际互作关系和空间利用格局,进而影响群落结构的稳定性与物种间的持续共存。因此,从种植时间的角度出发,探讨当地广为种植的沙棘与苜蓿在不同配置方式下的生态响应,不仅有助于深入理解植物之间的互作关系,也为建立更具适应性的矿区植被修复策略提供了研究基础。

本研究以伊金霍洛旗满来梁露天煤矿排土场为试验区域,选取3种植被配置的沙棘林为研究对象,系统分析其对林下植被群落特征及土壤养分的影响效应。通过定量比较不同植被配置沙棘林下的植被组成、物种多样性指数及土壤养分变化,探究最适配该地区的植被配置模式。研究结果可为露天煤矿排土场的植被恢复与生态重建提供基础数据和技术参考,同时为本地区矿区生态治理模式的优化探索提供科学依据和实践支持。

1 研究区概况

本研究区位于内蒙古自治区伊金霍洛旗满来梁矿区排土场(110°15′53″—110°18′38″E, 39°27′46″—39°29′16″N),地处鄂尔多斯高原东南部,属典型的温带大陆性气候区,年平均温度为7.0~7.2℃,最高气温38.3℃,最低温度-3.9℃,年降雨量400 mm左右,降雨集中在7—9月,多为暴雨天气,研究区年平均蒸发量2 082 mm,气候干旱,降水量时空分布不均,蒸发量远大于降水量,生态环境较为脆弱^[10];研究区地势总体起伏较大,多为丘陵与台地相间分布,土壤类型以风沙土和栗钙土为主,质地较疏松,养分含量较低,保水保肥能力较差,植被自然恢复困难;主要的植被类型包括:紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、赖草(*Leymus secalinus*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、朝天委陵菜(*Potentilla supina*)、阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置与样本采集

于2024年7—9月在内蒙古自治区伊金霍洛旗满来梁煤矿排土场开展野外调查和样品采集工作。

以不同植被配置类型对应的连续恢复地块作为样地,为控制立地条件对恢复效果的干扰,选取地形相对平坦、海拔相近的区域作为研究样地,并在此基础上随机布设了3种不同混植模式的人工植被样地,分别为纯沙棘林、沙棘与苜蓿同年混交林以及先种植苜蓿2 a后种植沙棘的时序配置林,所选沙棘品种均为俄罗斯大果沙棘(*Hippophae rhamnoides*),且林分密度一致(4 m×4 m),样地基本信息见表1。在不同模式人工植被种植区,分别选择3个面积为10 m×10 m的大样方(共计9个),通过每木检尺对样地内沙棘个体进行测量,记录其树高和冠幅的生长指标。在每个大样方内通过3点取样法设置1 m×1 m的标准样方(共计27个),记录样方内所有植物种的频度、高度及盖度。土壤采样与植被调查同步进行,沿每个大样方对角线方向均匀设置3个土壤采样点作为重复,使用剖面法采集原状土,采样深度为0—20 cm和20—40 cm。同一个大样方,同一土层的3个重复土壤样品在现场等量混合,构成1份混合样,用于试验分析。3种人工配置模式共计9个大样方,27个标准样方,27个土壤采样点,采集土壤混合样本18份。

2.2 林下植被特征分析

2.2.1 重要值计算

依据不同植被配置沙棘林林下植被的实地调查,计算各物种的相对高度、相对密度与相对频度,并据此确定其重要值。通过重要值分析,可量化植被优势度,反映不同物种在防护林演替过程中的空间分布与生态功能地位^[11]。

重要值(IV):

$$IV = (RHI + RDE + RFE) / 3 \quad (1)$$

式中:RHI为相对高度;RDE为相对密度;RFE为相对频度。

2.2.2 多样性指数

根据前人对物种多样性的研究成果,选用Simpson多样性指数、Shannon-Wiener物种多样性指数、Pielou均匀度指数、Margalef丰富度指数来研究不同立地类型沙棘林的群落物种多样性变化。

Simpson多样性指数(D):

$$D = 1 - \sum_{j=1}^S P_j^2 \quad (2)$$

Shannon-Wiener物种多样性指数(H):

$$H = - \sum_{j=1}^S P_j \ln(P_j) \quad (3)$$

Pielou均匀度指数(J):

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

Margalef丰富度指数(d):

$$d=(S-1)/\ln(N) \tag{5}$$

式中: N 为样方内所有物种的个体总数; P_j 为第 j 个物种的个体数占样方总个体数的比例; S 为群落中记录的总物种数。

表 1 研究区沙棘林基本群落特征描述

Table 1 Basic community characteristics of *Hippophae rhamnoides* forests in study area

样地类型	编号	植被配置	林龄/a	植被类型+ 种植年限	种植间隔	沙棘树高/cm	沙棘冠幅/cm	海拔 高度/m
类型 I	T ₁₁	纯灌木林	4 a	沙棘 4 a	一行一带	232.2±11.27	182.8±8.16	1 264
	T ₁₂				沙棘:4 m×4 m	252±15.82	209.2±17.98	1 258
	T ₁₃					250.4±13.65	212.9±20.58	1 266
类型 II	T ₂₁	灌草同年混交	4 a	沙棘 4 a+ 苜蓿 4 a	一行一带	200.3±19.14	173.15±12.69	1 275
	T ₂₂				沙棘:4 m×4 m	218.8±22.84	183.05±15.45	1 271
	T ₂₃				苜蓿:100 株/m ²	226.5±18.65	188.2±20.75	1 273
类型 III	T ₃₁	灌草异年混交	4 a	沙棘 4 a+ 苜蓿 6 a	一行一带	175.5±8.97	159.3±8.07	1 270
	T ₃₂				沙棘:4 m×4 m	172.8±10.86	157±10.36	1 267
	T ₃₃				苜蓿:100 株/m ²	185.3±12.13	168.6±9	1 269

注:表中数值为平均值±标准差

2.3 土壤样品处理与测定

将采集的土壤样本在无光条件下自然风干。土壤有机质含量采用重铬酸钾-外加热法测定;全氮含量采用凯氏定氮法测定;全磷、速效磷含量采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;速效钾含量采用火焰光度法测定,每组重复试验 3 次。

2.4 主成分分析法

本研究采用主成分分析法(PCA),以 Z-score 法对数据标准化,并经 KMO 和巴特利特检验确认适用性后,对土壤理化性质和植被多样性指标进行建模。通过提取特征值大于 1 的主成分及其方差贡献率,综合反映多维信息,减少主观赋权偏差,从而构建不同植被类型的土壤综合评价体系

2.5 数据处理与分析

使用 Excel 进行数据整理,采用 SPSS 27.0 软件进行 ANOVA 单因素方差分析、Pearson 相关性分析和主成分分析,利用 Origin 2024 软件进行作图。

3 结果与分析

3.1 植物群落科属组成与生活型特征

本研究所调查的 9 块样地内的 27 个样方中,共发现植物 22 种,分属于 7 科 17 属。如图 1 所示,其中,禾本科植物 7 种,隶属于 6 个属,占所出现植物种的 31.82%;菊科植物 8 种,隶属于 4 个属,占所出现植物种的 36.36%;藜科植物 3 种,隶属于 3 个属,占所出现植物种的 13.64%;上述 3 科共计涵盖 13 属 18 种,占全部种数的 81.82%;其他 4 种植物均为 1 科 1 属 1 种。

这说明整体上林下植物的科属组成单一,仅有少数植物能够成功定殖并形成相对稳定的群落结构。

表 2 为调查了 3 种不同植被配置沙棘林林下的植物群落结构,分析了其科属种组成及生活型特征。结果表明,不同植被配置沙棘林林下的植物物种组成存在一定差异,类型 I 具有最多的植物种类,包含 7 科 14 属 14 种,表明此样地的植物多样性最高。类型 II 和类型 III 的植物种类较少,分别为 3 科 6 属 8 种和 3 科 8 属 10 种。类型 I 的一年生、二年生植物与多年生植物比例相当,分别为 50.00%,类型 II 以一年生和二年生植物为主,占 62.50%,多年生植物占 37.50%。类型 III 的一年生、二年生植物占 60.00%,多年生植物占 40.00%。

3.2 不同类型沙棘人工林林下草本群落物种组成与重要值

不同植被配置沙棘人工林林下物种组成与重要值见表 3。不同类型的植物种类数量表现为:类型 I > 类型 II > 类型 III,其中类型 I 植物种类最为丰富,涵盖 14 种植物,优势种除阿尔泰狗娃花等一年生植被外仅有一种多年生植被赖草;类型 II 中有 8 种植物,优势种为白茅;类型 III 含有 10 种植物,狼尾草和猪毛菜为该类型地的优势种。综上所述,群落中仍存在一定程度的物种共存,显示出一定的结构复杂性,但整体仍以少数优势种为主导。

3.3 不同类型沙棘人工林林下草本群落物种多样性变化

各样地植被多样性变化如图 2 所示,通过对不同配置方式下沙棘林群落多样性进行比较,总体呈现

出:类型 I > 类型 III > 类型 II 的规律。在 Simpson, Shannon-Wiener, Pielou 以及 Margalef 4 项指数上, 3 种类型均呈现显著差异($p < 0.05$)。其中类型 I 与类型 II 相比 Simpson 多样性指数高 0.18, Shannon-Wiener 物种多样性指数高 0.63, Pielou 均匀度指数高 0.10, Margalef 丰富度指数高 1.51。

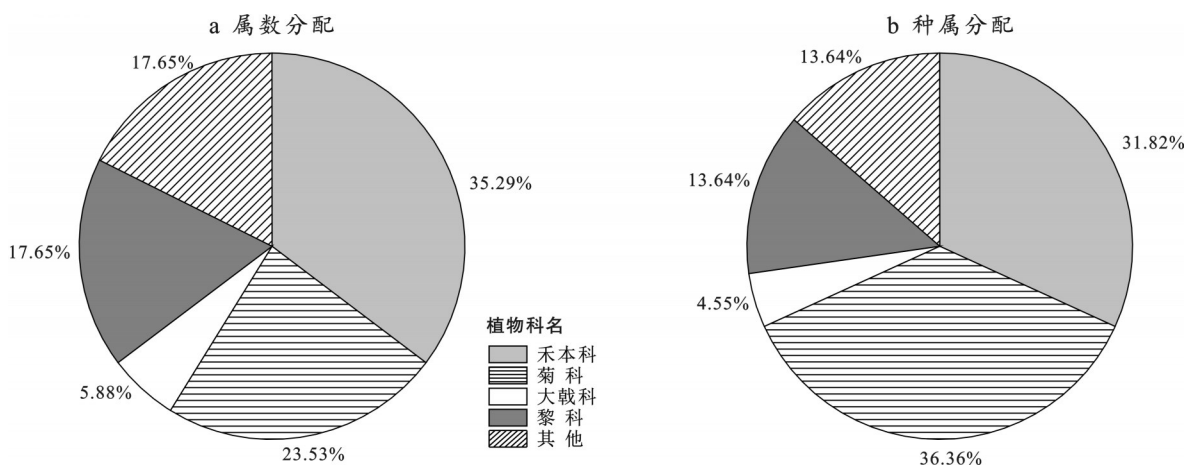


图 1 样地草本植物科属分配比例
Fig.1 Distribution of herbaceous plant families and genera in sample plots

表 2 不同植被配置沙棘人工林林下植物组成分科特征及生活型结构

Table 2 Family-level composition characteristics and life-form structure of understory plant communities in *H. rhamnoides* plantations with different vegetation configurations

样地编号	科数	属数	种数	一、二年生植物种数/%	多年生植物种数/%
类型 I	7	14	14	7(50.00)	7(50.00)
类型 II	3	6	8	5(62.50)	3(37.50)
类型 III	3	8	10	6(60.00)	4(40.00)

3.4 不同类型沙棘人工林土壤化学性质

如图 3 所示,各植被配置下沙棘林土壤养分含量普遍表现为随土层加深而逐渐下降的趋势。在 0—40 cm 土层,土壤有机质含量最高,为 7.54 g/kg,类型 II 和类型 III 土壤有机质含量显著低于类型 I ($p < 0.05$);全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾的含量均表现为:类型 III > 类型 I > 类型 II,其中全氮、全磷、全钾、速效磷含量在表层土壤(0—20 cm)之间均有显著性差异($p < 0.05$),在深层土壤(20—40 cm)间全氮在类型 II 与类型 III 间差异显著($p < 0.05$);全磷、速效磷在类型 I 与类型 II 和类型 III 间差异显著($p < 0.05$);全钾在 3 种类型地间均具有显著性差异($p < 0.05$);碱解氮在类型 II 与类型 I 和类型 III 间差异显著($p < 0.05$);类型 I 与类型 II 在垂直剖面上碱解氮含量差异不显著($p > 0.05$),类型 II 各土层间全磷含量也呈现出无显著差异($p > 0.05$)。

表 3 不同样地物种组成及重要值

Table 3 Species composition and importance values in different sample plots

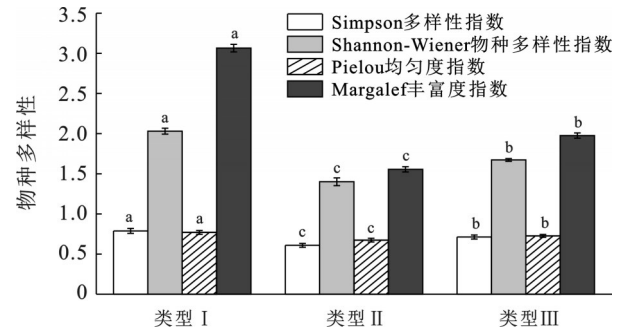
植物种类	类型 I	类型 II	类型 III
白茅(<i>Imperata cylindrica</i>)	0	60.32	0
赖草(<i>Leymus secalinus</i>)	41.02	8.37	5.23
猪毛菜(<i>Salsola collina</i>)	5.55	2.11	19.07
狼尾草(<i>Pennisetum alopecuroides</i>)	0	0	48.48
阿尔泰狗娃花(<i>Aster altaicus</i>)	11.28	0	4.41
朝天委陵菜(<i>Potentilla supina</i>)	4.05	0	0
狐尾草(<i>Alopecurus pratensis</i>)	2.71	0	8.12
黄花蒿(<i>Artemisia annua</i>)	0	3.71	3.18
乳浆大戟(<i>Euphorbia esula</i>)	10.86	0	0
5月艾(<i>Artemisia indica</i>)	0	0	2.75
羊草(<i>Leymus chinensis</i>)	0	0	4.04
茵陈蒿(<i>Artemisia capillaris</i>)	9.09	0	0
车前草(<i>Plantago asiatica</i>)	1.26	0	0
梅花草(<i>Parnassia palustris</i>)	2.10	0	0
大籽蒿(<i>Artemisia sieversiana</i>)	0	8.51	0
菊苣(<i>Cichorium intybus</i>)	2.16	0	0
苦蕒菜(<i>Ixeris polycephala</i>)	1.66	0	0
细裂叶蒿(<i>Artemisia tanacetifolia</i>)	0	8.42	0
狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)	2.30	4.53	0
画眉草(<i>Eragrostis pilosa</i>)	2.60	4.03	0
灰绿藜(<i>Oxybasis glauca</i>)	2.76	0	1.84
盐地碱蓬(<i>Suaeda salsa</i>)	0	0	2.89

3.5 不同类型沙棘人工林林下植被与土壤养分之间的相关性

对不同植被类型沙棘林物种多样性指数与不同土层深度的土壤理化性质进行 Pearson 相关分析,由

图 4 可知,在 0—20 cm 土层深度中,土壤有机质含量与 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 物种多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数极显著正相关($p < 0.01$);全氮、全磷、全钾、速效磷和速效钾与各多样性指数呈正相关;碱解氮与各物种多样性指数呈负相关关系,其中碱解氮与 Margalef 丰富度指数呈显著负相关($p < 0.05$)。

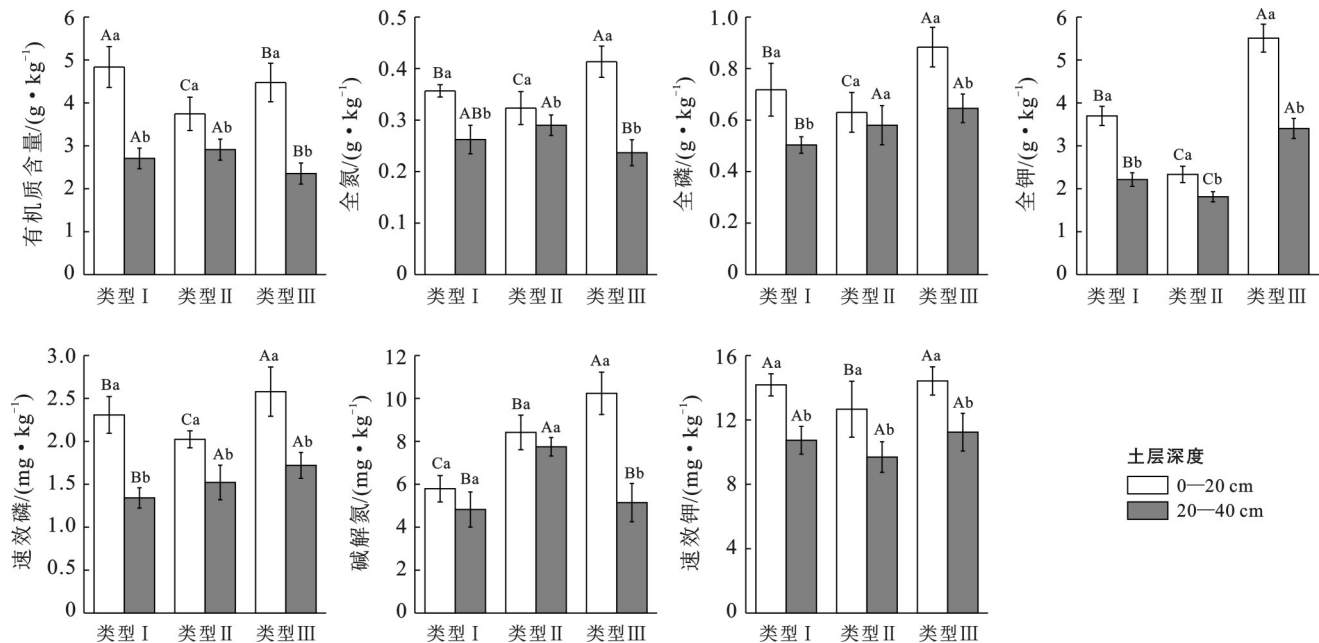
在 20—40 cm 土层中,土壤有机质含量、全氮、全磷、速效磷和碱解氮与各物种多样性之间呈负相关关系,其中碱解氮与 Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 物种多样性指数呈显著负相关($p < 0.05$);全钾和速效钾均与物种多样性呈正相关。



注:图中相同小写字母表示同一指数不同样地间差异不显著($p < 0.05$)。

图 2 不同样地物种多样性变化

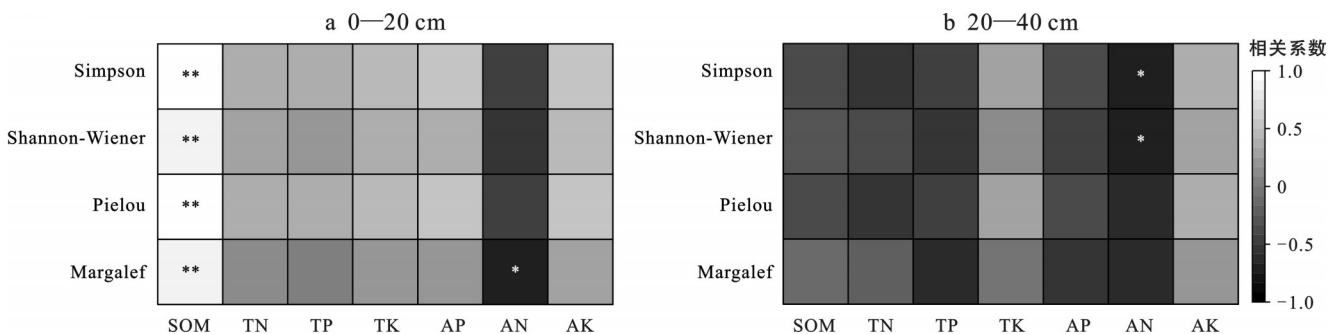
Fig.2 Changes in species diversity among different sample plots



注:图中相同大写字母表示样地间差异不显著,相同小写字母表示同一样地不同土层差异不显著($p < 0.05$)。

图 3 不同植被配置沙棘林土壤养分含量及变化

Fig.3 Soil nutrient contents and variations in *H. rhamnoides* forests with different vegetation configurations



注:*表示显著相关;**表示极显著相关。

图 4 物种多样性指数与土壤化学性质的相关关系分析

Fig.4 Relationships between species diversity indices and soil chemical properties

3.6 不同类型沙棘人工林林下植被与土壤养分主成分分析

本研究对多样性指数与土壤养分指标进行主成

分分析时,所有变量的共同度均大于 0.4,表明它们对主成分具有较强的解释力,无需剔除。检验结果显示 KMO 值为 0.597,接近 0.600,满足主成分分析

KMO值大于0.5的基本要求; Bartlett球形度检验 $p < 0.001$, 进一步验证了数据适合开展主成分分析。最终共提取出2个特征值大于1的主成分, 其特征值分别为5.214, 4.246, 方差贡献率依次为47.402%和38.604%, 累计方差贡献率达到86.006%。这两个主成分能够有效浓缩原始变量信息, 较好地代表了各项指标的综合特征。

由图5可见, 不同植被类型沙棘林主成分1得分具体表现为类型Ⅲ(1.10) > 类型Ⅰ(0.23) > 类型Ⅱ(-1.33), 类型Ⅲ与类型Ⅱ的得分相差2.43; 主成分2得分表现为类型Ⅰ(2.50) > 类型Ⅲ(-0.40) > 类型Ⅱ(-2.10), 类型Ⅰ和类型Ⅱ之间的得分差异最大, 为4.60; 综合表现在综合考虑两个主成分权重后的总体得分上类型Ⅰ(1.25) > 类型Ⅲ(0.43) > 类型Ⅱ(-1.67), 在综合考虑前两个主成分的权重后, 类型Ⅰ在主成分综合得分中表现最高, 类型Ⅲ和类型Ⅱ得分相对较低, 其中类型Ⅲ优于类型Ⅱ。

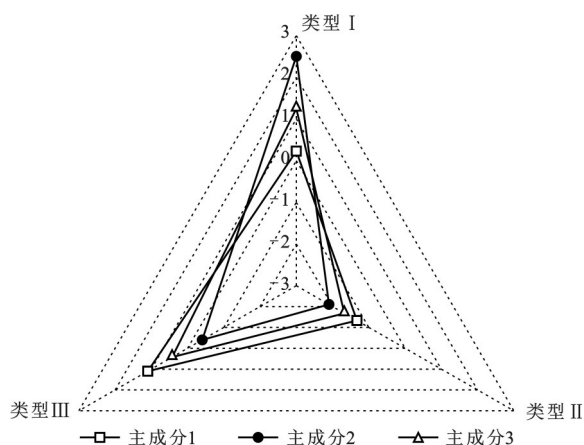


图5 不同植被配置沙棘林主成分得分及综合得分

Fig.5 Principal component scores and composite scores for *H. rhamnoides* forests with different vegetation configurations

4 讨论

4.1 不同植被配置沙棘林植被特性的差异

本研究中, 不同植被配置沙棘林林下物种多样性表现为: 类型Ⅰ > 类型Ⅲ > 类型Ⅱ, 不同配置沙棘林均有助于植被恢复, 沙棘纯林的林下物种多样性均显著高于两种混交配置模式。这一差异是冠层结构、资源竞争与土壤改良等多重生态因子协同作用的结果。首先, 冠层结构所调控的光资源分配格局是导致多样性差异的关键驱动因素^[12]。类型Ⅰ相较于类型Ⅱ和类型Ⅲ, 具有更高的冠层开放度和较为均一的结构特征, 林隙比例较大, 冠层透光性较好, 有利于在林下形成稳定且持续的光照环境。这种结

构特征不仅提升了地表的可利用光资源, 也在一定程度上缓解了林下光照分布的不均匀性, 为草本植物的萌发和生长创造了有利条件。此结果与黄团冲等^[13]、郭洋楠等^[14]、赵富王等^[15]的研究结论一致, 即沙棘纯林下的总辐射通量密度显著高于冠层郁闭度较高的林分, 显示出其更强的透光性, 从而促进了地被植物多样性的维持。相较之下, 混交林由于树种间冠层高度错落, 常形成多层次、非均质的冠层结构, 显著降低了林隙比例。强烈的遮荫效应导致光合有效辐射在穿透冠层过程中被大量消耗, 使得林下环境以低强度的散射光为主, 直射光比例大幅下降^[16-17], 从而抑制了部分喜光草本植物的生长与定居^[15]。因此, 混交林在恢复初期的冠层结构可能限制了草本植物多样性的提升, 不利于群落的结构复杂化和演替进程的推进。

其次, 环境条件的均一性是促使纯林物种多样性提升的重要因素。在资源分布相对均衡的生境中, 不同物种面临的竞争压力相对较小, 更有利于多种植物的共存, 从而提升群落的整体多样性水平。这一观点与Grime^[18]的研究结论相一致, 其提出“资源倾斜”是减少多样性的重要机制, 而资源均一性可降低优势种的选择性垄断。在混交配置中, 由于苜蓿的引入加剧了水分、光照和养分的强烈竞争, 相比混交配置, 类型Ⅰ竞争压力减少, 为草本和低矮灌木提供了更有利的生境, 形成更复杂、稳定的植物群落。然而种植时序性可在一定程度上调节这种竞争关系, 类型Ⅲ物种多样性高于类型Ⅱ, 可能得益于苜蓿作为豆科植物的土壤改良效应, 提前种植的苜蓿通过生物固氮逐步提升土壤肥力, 为后续沙棘及林下植物提供了相对良好的土壤基础, 形成一定的“资源先导优势”, 从而缓解了同期种植时激烈的资源竞争, 更有利于林下植物群落的早期建成与多样性发展^[19]。

4.2 不同植被配置沙棘林土壤特性的差异

在0—40 cm土层中, 3种不同植被配置的沙棘林养分含量整体表现为表层高于深层, 类型Ⅰ土壤有机质含量高于类型Ⅱ和类型Ⅲ, 类型Ⅲ在全氮、全磷、全钾、速效磷和速效钾含量上最高, 类型Ⅱ碱解氮含量最高。

类型Ⅲ在多项土壤养分指标上表现突出, 主要与其错时种植策略有关^[20]。提前两年种植的苜蓿通过死亡根系残体直接输入有机质与养分, 同时其根系与根瘤菌共生形成高效固氮系统, 大幅度提升土壤中的氮含量, 而类型Ⅰ中的碱解氮含量均小于类型Ⅱ和类型Ⅲ, 该结果与刘文祥等^[21]的研究结论相

一致。他们指出错时种植的苜蓿在早期阶段可有效提升土壤速效氮含量,为后续植物的定居和生长创造有利条件。苜蓿根瘤菌的共生固氮作用,不仅直接提高了氮素供应,苜蓿根系分泌的有机酸能够溶解于土壤中难溶性磷酸盐,提高有效磷含量,此外苜蓿根系可达 2~3 m,能够吸收土壤深层的钾离子,并通过凋落物分解将钾归还至表层土壤,间接增强了磷、钾等养分的可利用性^[22]。

类型Ⅱ在碱解氮含量上表现突出,这可能源于苜蓿与沙棘同期种植初期形成的活跃根际互动,增强了微生物活动与氮素矿化效率;同时,同期根系竞争促进了氮素的快速释放与转化,提升了短期内土壤的可供氮水平。但类型Ⅱ整体土壤养分水平低于类型Ⅰ和类型Ⅲ。由于沙棘和苜蓿两种植物在生长初期对水分和养分的竞争过于激烈,尤其在干旱贫瘠的矿区环境中,有限的资源供需失衡,加剧了根际间的竞争,进而抑制了养分的有效积累。该现象与于铁峰等^[23]的研究相符。他们指出在植被混播初期,地上植物群落与地下微生物系统之间的耦合尚不完善,导致生态系统内的养分循环反馈机制不健全,从而限制了土壤养分的重分配与持续积累。

相比之下,类型Ⅰ在土壤有机质积累方面表现最优,这既得益于沙棘自身较强的枯落物输入能力,也与其未引入苜蓿从而减少竞争有关。这使其在贫瘠的生境中更易实现有机质的积累。综上所述,类型Ⅲ通过错时配置增强氮素固定和养分活化,显著改善土壤肥力,类型Ⅰ则在有机质积累方面优势明显,而同期配置因竞争加剧,整体养分提升效果较弱。由此可见,种植顺序与配置方式对土壤质量恢复具有重要影响,修复实践中应合理匹配物种功能与种植时序,以提升土壤改良效率与生态恢复成效。

4.3 不同植被配置沙棘林与土壤恢复的最适配置模式

相关性分析表明,在 0—20 cm 土壤中,Simpson, Shannon-Wiener, Pielou 以及 Margalef 指数均与土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷和速效钾呈正相关关系。在 20—40 cm 土壤中,土壤有机质、全氮、全磷、速效磷和碱解氮呈负相关关系。这表明表层土壤有机质含量高,微生物活性较强,养分循环更为活跃,有利于促进物种共存。随着土层加深,有机质含量和微生物活性降低,养分的转化和利用效率下降,深层土壤中的养分与物种多样性呈负相关关系^[24]。特别的,0—40 cm 土层范围内物种多样性指标与土壤碱解氮含量呈负相关,一般而言。群落物种多样性与资源水平及资源异质性密切相关,在资源水平

适度提升且空间异质性较强的条件下,生态位维度增加,物种共存机会增大,多样性往往随之提高。但在排土场这类强扰动生境中,资源异质性普遍较弱且水分胁迫突出,当碱解氮含量升高时,群落结构更容易转向优势种主导的路径。在特定资源水平下,沙棘对氮响应更敏感,适合度更高,能够更快获取资源并形成优势度,进而通过遮阴效应增强、根际空间与水分竞争加剧等机制产生竞争性排他,使其他物种的定殖与存活受到限制,最终表现为多样性下降^[25]。在资源异质性不足背景下,氮素可利用性的提高并不必然带来多样性提升,反而可能强化优势种竞争并触发排他过程,使群落更快进入优势化阶段,导致多样性降低。

主成分分析提供了综合效应的评估视角,有助于将相关性分析的单因子关系转化为群落和土壤整体恢复效果的判别。本研究的主成分结果表明,类型Ⅲ在第 1 主成分上得分最高,类型Ⅰ在第 2 主成分及综合得分上均为最高。主成分 1 主要由土壤速效养分指标构成,这些速效养分代表了土壤养分供给和活化能力梯度。较高的速效磷和速效钾含量意味着植物生长所需的关键养分更为充足,有利于植物初期定殖和生物量积累,从而促进群落建立^[26]。相比之下,主成分 2 则与土壤有机质积累及群落稳定性密切相关。类型Ⅰ在主成分 2 上得分最高,反映出其土壤有机质含量和林下多样性优势明显。土壤有机质是衡量土壤质量的重要指标,其增加意味着土壤结构和养分库的改善。较高的有机质含量可以提供缓慢释放的养分来源并提升土壤保水保肥能力,培育更丰富的土壤微生物区系,从而为更多植物种的共存创造条件^[27]。

综合 Pearson 相关性和 PCA 结果,Pearson 分析中显著相关的土壤指标在相应主成分上具有较高载荷,不同植被配置在该主成分上的得分也与其相关性趋势一致。可以构建完整的恢复效应评估逻辑,土壤养分提升与群落多样性二者需要协同推进,方能实现最佳的生态恢复状态。类型Ⅰ在兼顾土壤养分积累与物种多样性方面表现最优,可作为该区域植被恢复的优先配置模式。类型Ⅲ在速效养分提升方面具显著优势,适用于土壤贫瘠、需快速改良的立地条件,可作为次优配置模式加以推广。

5 结 论

(1) 不同植被配置对林下植被多样性与群落稳定有显著影响,纯沙棘林在 Simpson, Shannon-Wiener, Pielou 和 Margalef 等多样性指数上均表现最

优,群落结构丰富且稳定,有利于草本植物的自然定殖与演替;苜蓿早两年种植沙棘林次之,具有一定的过渡稳定性;苜蓿与沙棘同年种植林群落结构最为单一,优势物种显著,物种多样性最低。

(2) 苜蓿早两年种植沙棘林在全氮、全磷、速效磷、速效钾等养分指标上表现优越,显示出前期养分积累作用显著;纯沙棘林则在有机质和速效钾等方面优势明显,在自然恢复中对土壤结构与基础养分的稳定贡献;苜蓿与沙棘同年种植林土壤肥力最弱。

(3) 纯沙棘林在物种多样性与土壤肥力综合得分中最高,是最有利于维持生态系统稳定性与功能恢复的配置模式;苜蓿早两年种植沙棘可作为过渡性方案,在相对土壤基础差,恢复滞后的区域有一定应用价值;苜蓿与沙棘同年种植综合得分最低,矿区修复效果较差。

参考文献(References)

- [1] Liu Ying, Heng Wenjing, Yue Hui. Quantifying the coal mining impact on the ecological environment of Gobi open-pit mines [J]. Science of the Total Environment, 2023,883:163723.
- [2] 焦晓亮,尹可敬,毕银丽,等.露天采煤区不同复垦处理下植物多样性及其与土壤酶活性和养分的关系[J].煤炭科学技术,2023,51(增刊2):316-327.
Jiao Xiaoliang, Yin Kejing, Bi Yinli, et al. Plant diversity and its relationship with soil enzyme activities and nutrients under different reclamation treatments in open-pit coal mining area [J]. Coal Science and Technology, 2023,51(S2):316-327.
- [3] Zhang Lijia, Zhou Xu, Zhou Yan, et al. Surface coal mining impacts on land use change and ecological service value: A case study in Shengli coalfield, Inner Mongolia [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2022,9(1):65.
- [4] Xu Qiao, Xu Hailiang, Wei Yan, et al. Restoration effects of supplementary planting measures on the abandoned mining areas in the Altay Mountain, northwest China [J]. Sustainability, 2023,15(20):14974.
- [5] 张亮,李龙,王婧,等.半干旱区露天矿排土场不同植物水分利用策略的季节变化[J].水土保持通报,2024,44(5):28-37.
Zhang Liang, Li Long, Wang Jing, et al. Seasonal variation in water use strategies of different plants in an open-pit mine dump site in semi-arid area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(5):28-37.
- [6] Chen Jinhui, Jiskani I M, Li Guoqing. Ecological restoration of coalmine-degraded lands: Influence of plant species and revegetation on soil development [J]. Sustainability, 2023,15(18):13772.
- [7] 张可,郑岩,刘传林,等.不同植被模式对矿山废弃地表层土壤性质的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2024,22(2):131-137.
Zhang Ke, Zheng Yan, Liu Chuanlin, et al. Effects of different vegetation types on the surface soil properties of mine waste site [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024,22(2):131-137.
- [8] 甄倩,王百田,赵耀,等.基于土壤理化性质和植物多样性的晋西黄土区人工林质量评价[J].中国水土保持科学(中英文),2020,18(4):12-20.
Zhen Qian, Wang Baitian, Zhao Yao, et al. Evaluation of plantation quality based on soil physico-chemical properties and plant diversity in the loess area of western Shanxi Province [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020,18(4):12-20.
- [9] 周文洁,魏天兴,刘广全,等.陕北典型退耕地沙棘群落与土壤因子的耦合关系[J].中国水土保持科学,2020,18(2):1-9.
Zhou Wenjie, Wei Tianxing, Liu Guangquan, et al. Coupling relationship between *Hippophae rhamnoides* community and soil factor in typical returning farmland to forest area in northern Shaanxi Province [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020,18(2):1-9.
- [10] 刘彤彤.露天煤矿排土场不同林龄沙棘林与土壤互馈响应研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2024.
Liu Tongtong. Study on the mutual feedback response between seabuckthorn forest and soil of different forest ages in open-pit coal mine dump [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.
- [11] 郭欣宇,杨光,陆乃静,等.造林密度对科尔沁沙地奈曼沙区小叶杨防护林林下植被的影响[J].水土保持研究,2024,31(1):199-206.
Guo Xinyu, Yang Guang, Lu Naijing, et al. Influence of *Populus simonii* planted forest density on understory in Naiman Banner of the Horqin sandy land [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(1):199-206.
- [12] 刘昌,路琦,汪生财,等.微生境对黄檗幼树生长发育的影响[J].生态学杂志,2023,42(11):2569-2577.
Liu Chang, Lu Qi, Wang Shengcai, et al. Effects of microhabitat on the growth of *Phellodendron amurense* saplings [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(11):2569-2577.
- [13] 黄团冲,贺康宁,王先棒,等.北川河流域森林冠层结构对林下植被多样性的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(4):106-114.

- Huang Tuanchong, He Kangning, Wang Xianbang, et al. Effects of forest canopy structure on the diversity of understory vegetation in Beichuan River basin of an Alpine region [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(4): 106-114.
- [14] 郭洋楠, 唐佳佳, 杨永均, 等. 利用 LiDAR 揭示采煤沉陷区人工修复植物群落冠层结构分异[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(6): 37-41.
- Guo Yangnan, Tang Jiajia, Yang Yongjun, et al. Using LiDAR to reveal the canopy structure differentiation of artificially restored plant communities in coal mining subsidence area [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(6): 37-41.
- [15] 赵富王, 王宁, 葛芳红. 光照对陕北退耕地主要植物种子萌发的影响[J]. 草业科学, 2019, 36(5): 1353-1360.
- Zhao Fuwang, Wang Ning, Ge Fanghong. Effects of light on the germination of dominate plant seeds in an abandoned cropland in northern Shaanxi [J]. Pratacultural Science, 2019, 36(5): 1353-1360.
- [16] 陈峰峰, 赵江平, 乔雨宁, 等. 纯林和混交林 3 种植物光合特征研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2023, 43(1): 18-27.
- Chen Fengfeng, Zhao Jiangping, Qiao Yuning, et al. Study on photosynthetic characteristics of 3 tree species in pure and mixed forests [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2023, 43(1): 18-27.
- [17] Zhang Ningyi, van Westreenen A, Anten N P R, et al. Disentangling the effects of photosynthetically active radiation and red to far-red ratio on plant photosynthesis under canopy shading: A simulation study using a functional-structural plant model [J]. Annals of Botany, 2020, 126(4): 635-646.
- [18] Grime J P. Competitive exclusion in herbaceous vegetation [J]. Nature, 1973, 242(5396): 344-347.
- [19] Yuan Yuwei, Chen Zhi, Huang Xin, et al. Comparative analysis of nitrogen content and its influence on actinorhizal nodule and rhizospheric microorganism diversity in three *Alnus species* [J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1230170.
- [20] 崔盛超, 图雅, 萨拉, 等. 呼伦贝尔寸草苔草原群落特征及物种多样性与土壤理化性质的关系[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 27-34.
- Cui Shengchao, Tu Ya, Sa La, et al. Relationship between community characteristics and species diversity of *Carex duriuscula* and soil physiochemical properties in Hulunbuir steppe [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 27-34.
- [21] 刘文祥, 李勇, 于寒青. 草灌植被恢复提高坡地土壤水稳性团聚体和碳、氮含量的有效性: 退耕年限的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 164-170.
- Liu Wenxiang, Li Yong, Yu Hanqing. Soil water stable aggregates and carbon and nitrogen storage enhanced by conversion of farmland to shrub and grass in China Loess Plateau: The influence of conversion cultivation time [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2016, 22(1): 164-170.
- [22] 陈利云, 王弋博, 李三相, 等. 苜蓿-根瘤菌复合盐高效抗性共生体系构建[J]. 草业科学, 2016, 33(9): 1690-1695.
- Chen Liyun, Wang Yibo, Li Sanxiang, et al. Establishment of highly efficient and salt tolerance alfalfa rhizobia symbiotia [J]. Pratacultural Science, 2016, 33(9): 1690-1695.
- [23] 于铁峰, 郝凤, 张永亮, 等. 沙地豆禾混播草地土壤酶与土壤养分对混播比例的响应[J]. 草地学报, 2021, 29(6): 1217-1223.
- Yu Tiefeng, Hao Feng, Zhang Yongliang, et al. Response of soil enzyme and soil fertility of artificial grassland in sandy soil to different mixture ratio of alfalfa and smooth brome [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(6): 1217-1223.
- [24] Lei Jie, Du Hailun, Duan Aiguo, et al. Effect of stand density and soil layer on soil nutrients of a 37-year-old *Cunninghamia lanceolata* plantation in Naxi, Sichuan Province, China [J]. Sustainability, 2019, 11(19): 5410.
- [25] Ondier J O, Okach D O, Onyango J C, et al. Interactive influence of rainfall manipulation and livestock grazing on species diversity of the herbaceous layer community in a humid savannah in Kenya [J]. Plant Diversity, 2019, 41(3): 198-205.
- [26] Cheng Huan, Che Mingxuan, Hu Wangyang, et al. Soil-available nutrients associated with soil chemical and aggregate properties following vegetation restoration in western Sichuan, China [J]. Forests, 2023, 14(2): 259.
- [27] Dong Zhenjie, Geng Qinghong, Wei Kun, et al. Soil available phosphorus and pH regulate the distribution of *Juniperus przewalskii* forest understory plant community diversity along an elevation gradient [J]. Forest Ecology and Management, 2025, 580: 122524.