

黄土高原典型林分植物多样性和生物量对乔木密度的响应分析

栗惠英¹, 杨思佳^{1*}, 刘津芳², 焦永娜¹

(1. 石家庄铁路职业技术学院, 石家庄 050000; 2. 上海交通大学设计学院, 上海 200240)

摘要: 为探究黄土高原典型林分植物多样性与生物量的密度响应特征及其驱动机制, 以刺槐林和油松林为研究对象, 分别设置5个密度梯度(刺槐林密度梯度 I 为1 200~1 500 株/hm²、密度 II 为1 500~1 800 株/hm²、密度 III 为1 800~2 100 株/hm²、密度 IV 为2 100~2 400 株/hm²、密度 V 为2 400~2 700 株/hm²; 油松林密度梯度 I 为1 000~1 500 株/hm²、密度 II 为1 500~2 000 株/hm²、密度 III 为2 000~2 500 株/hm²、密度 IV 为2 500~3 000 株/hm²、密度 V 为3 000~3 500 株/hm²), 结合样地调查、多样性指数计算及生物量测定, 通过单因素方差分析、双因素方差分析和 Pearson 相关性解析其影响因素。结果表明, 1) 林型影响植物多样性与生物量, 油松林下灌木多样性及乔木生物量显著高于刺槐, 而刺槐林下草本多样性更优。2) 刺槐林下灌木和草本多样性指数与密度呈双峰曲线, 在1 500~1 800 株/hm²时达到峰值, 而油松林下灌木多样性指数在1 500~2 000 株/hm²时最大, 草本多样性则在低密度(1 000~1 500 株/hm²)时显著较高。刺槐地上与全株生物量在1 800~2 100 株/hm²时最大, 油松生物量对密度响应较弱。3) 相关性分析显示, 刺槐林下灌木的多样性指数与树高呈显著负相关, 草本均匀度指数与坡度呈显著负相关。对于油松林, 灌木和草本植物的多样性与冠幅具有显著相关性, 且与胸径和树高有显著的正相关关系。4) 油松在黄土高原生态恢复中更具竞争优势。适度密度(刺槐1 800~2 100 株/hm²、油松1 500~2 000 株/hm²)可协同提升植物多样性与生物量, 胸径、冠幅及地形因子是关键调控因素。研究结果为黄土高原退耕还林工程中林分密度优化与生态功能提升提供科学依据。

关键词: 人工林; 植物多样性; 影响因素; 双因素方差分析; 黄土高原

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.issn.1006-8023.2025.06.016

Response Analysis of Plant Diversity and Biomass to Tree Density in Typical Forest Stands on the Loess Plateau

LI Huiying¹, YANG Sijia^{1*}, LIU Jinfang², JIAO Yongna¹

(1. Shijiazhuang Institute Of Railway Technology, Shijiazhuang 050000, China; 2. School of Design, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To investigate the density response characteristics and driving mechanisms of plant diversity and biomass in typical forest stands of the Loess Plateau, this study focused on *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* plantations, establishing five density gradients for each (The density gradient I of *Robinia pseudoacacia* forests was 1 200–1 500 stems/hm², density gradient II was 1 500–1 800 stems/hm², density gradient III was 1 800–2 100 stems/hm², density gradient IV was 2 100–2 400 stems/hm², and density gradient V was 2 400–2 700 stems/hm². The density gradient I of *Pinus tabulaeformis* forests was 1 000–1 500 stems/hm², density gradient II was 1 500–2 000 stems/hm², density gradient III was 2 000–2 500 stems/hm², density gradient IV was 2 500–3 000 stems/hm², and density gradient V was 3 000–3 500 stems/hm²). Through field surveys, diversity index calculations, and biomass measurements, we employed one-way ANOVA, two-way ANOVA, and Pearson correlation analysis to identify influencing factors. The results showed,

收稿日期: 2025-02-28

基金项目: 河北省教育科学规划课题(13051483)。

第一作者简介: 栗惠英, 硕士, 副教授。研究方向为环境生态学、人文地理学。E-mail: sjzlh20@163.com

***通信作者:** 杨思佳, 硕士, 副教授。研究方向为环境生态学、环境设计。E-mail: sjzysj0715@163.com

引文格式: 栗惠英, 杨思佳, 刘津芳, 等. 黄土高原典型林分植物多样性和生物量对乔木密度的响应分析[J]. 森林工程, 2025, 41(6): 1268–1278.

LI H Y, YANG S J, LIU J F, et al. Response analysis of plant diversity and biomass to tree density in typical forest stands on the Loess Plateau [J]. Forest Engineering, 2025, 41(6): 1268–1278.

(1) Forest type significantly affected plant diversity and biomass, with shrub diversity and tree biomass significantly higher in *Pinus tabuliformis* stands, while herbaceous diversity was greater in *Robinia pseudoacacia* stands. (2) In *Robinia pseudoacacia* stands, shrub and herb diversity indices exhibited bimodal curves with density, peaking at 1 500–1 800 stems/hm², whereas in *Pinus tabuliformis* stands, shrub diversity peaked at 1 500–2 000 stems/hm², and herb diversity was significantly higher at low densities (1 000–1 500 stems/hm²). Aboveground and total biomass of *Robinia pseudoacacia* reached maxima at 1 800–2 100 stems/hm², while *Pinus tabuliformis* biomass showed weaker density dependence. (3) Correlation analysis revealed that shrub diversity indices in *Robinia pseudoacacia* stands were negatively correlated with tree height, and herb evenness indices were negatively correlated with slope. For *Pinus tabuliformis* stands, diversity indices of shrubs and herbs were significantly correlated with crown width, and positively correlated with diameter at breast height (DBH) and tree height. (4) *Pinus tabuliformis* demonstrated greater competitive advantages in Loess Plateau ecological restoration. Moderate densities (*Robinia pseudoacacia*: 1 800–2 100 stems/hm²; *Pinus tabuliformis*: 1 500–2 000 stems/hm²) synergistically enhanced plant diversity and biomass, with DBH, crown width, and topographic factors identified as key regulators. These findings provide a scientific basis for optimizing stand density and improving ecological functions in the Grain for Green Project on the Loess Plateau.

Keywords: Planted forests; plant diversity; influencing factors; two-way analysis of variance; Loess Plateau

0 引言

黄土高原是我国的重要生态屏障,其生态环境的演变与恢复一直备受关注^[1]。长期以来,由于自然因素与人为活动的双重影响,黄土高原面临着严重的水土流失、土地退化和生态脆弱等问题^[2]。为了应对这些问题,我国自20世纪90年代末启动了大规模的退耕还林工程,旨在通过植树造林和植被恢复,改善黄土高原的生态环境,提高生态系统的稳定性和生产力^[3]。

在黄土高原的退耕还林工程中,选择适宜的植物种类和合理的林分管理措施,对于生态系统恢复的效果至关重要^[4]。刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和油松(*Pinus tabuliformis*)作为黄土高原地区常用的退耕还林树种,具有较强的抗旱性、适应性和生长潜力,因此在大规模植树造林过程中被广泛应用^[5]。然而,林分的密度、种植配置及其生态效应对植物多样性和生物量的影响尚未得到充分的研究和探讨。

植物多样性与生物量是衡量森林生态系统健康与稳定性的重要指标^[6]。植物多样性不仅反映了物种的种类和数量,还揭示了生态系统内不同物种之间的相对关系和资源分配情况^[7]。物种多样性的提高通常意味着生态系统的稳定性和抗逆性增强^[8]。而生物量作为衡量生态系统生产力的指标,能够直观地反映植物群落的生长状态及其物质循环过程^[9]。生物量的积累直接与植物的生长潜力、碳储量以及水分和养分的利用效率相关,是评估生态恢复效果的重要参考^[10]。

黄土高原的退耕还林区,特别是在不同林分密度下的植物多样性和生物量表现,尚缺乏系统的研究。已有的研究主要集中在植物单一因素的作用上,如土壤条件、气候变化或某一特定树种的生长特性等^[11–14]。然而,林分密度作为影响植物生长和生物多

样性的重要因素,其不同密度下对林分生态功能的作用机制仍然未得到全面分析。过高或过低的林分密度,可能影响植株间的光照、养分竞争,进而导致物种多样性下降或生物量的减少^[15]。尤其是对于刺槐和油松这2个树种,密度效应可能对其生长表现、物种组成以及群落结构产生重要影响,因此,探索不同密度梯度下的植物多样性与生物量关系具有重要的科学价值。

本研究以黄土高原典型林分刺槐和油松为研究对象,通过设置不同密度梯度的样地,调查其植物多样性和生物量特征,并探讨其影响因素。研究为制定科学的植被恢复策略和优化林分管理措施提供理论依据和数据支持。

1 研究区与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于山西省西部的方山县,地处黄土高原的核心地带。地理坐标大约为35°25′–35°58′N、111°25′–112°10′E。该区域属于典型的黄土丘陵沟壑侵蚀地貌,地形起伏较大,山峦连绵,沟壑纵横,海拔为900~1 700 m。这样的地貌特征为多种林分类型的形成和发育提供了多样的环境条件。方山县气候属温带大陆性气候,年平均气温为8~10℃,年降水量500~700 mm,降水主要集中在夏季,冬季干旱且寒冷。方山县的植被类型以黄土高原典型森林及灌丛为主。主要植物包括:乔木植物有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabuliformis*)等;灌木植物有柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等;草本植物有包括长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等。由于近年来植被恢复措施的加强,森林覆盖度逐年增加,尤其在山坡地带和浅山丘陵区,植被的多样性和生态稳定性得到了不同程度的提升。

1.2 样地设置与调查

2024年8月,在研究区选择典型的退耕还林营造树种刺槐和油松为研究对象,所选刺槐和油松的林龄分别为25 a和28 a。根据林分初植密度,将刺槐林划分为5个密度梯度(密度I为1 200~1 500株/hm²(I)、密度II为1 500~1 800株/hm²(II)、密度III为1 800~2 100株/hm²(III)、密度IV为2 100~2 400株/hm²(IV)、密度V为2 400~2 700株/hm²(V)),将油松林划分为5个密度梯度(密度I为1 000~1 500株/hm²(VI)、密度II为1 500~2 000株/hm²(VII)、密度III为2 000~2 500株/hm²(VIII)、密度IV为2 500~3 000株/hm²(IX)、密度V为3 000~3 500株/hm²(X))。每个密度梯度设置3个

样地,刺槐和油松分别15个样地,样地大小为20 m×20 m。对每个样地乔木进行每木检尺,测量胸径、树高和冠幅等指标。使用GPS数据采集仪测量每个样地的海拔,使用地质罗盘仪测定坡度和坡向。将坡向方位角进行转换,坡向由0°~360°的罗盘值转换为0~1的值,转换公式为

$$T_{\text{RASP}} = \{1 - \cos[(\pi/180)(a_{\text{spect}} - 30)]\} / 2. \quad (1)$$

式中: T_{RASP} (transformation of aspect, TRASP)为坡向指数; a_{spect} 为坡向方位角。通过转换,坡向指数的变化范围介于0~1,其数值越大,代表生境越向阳、越干热。样地基本情况见表1。

表1 样地基本情况

Tab. 1 Basic information about the sample plots

编号 Number	林分类型 Forest type	密度/(株·hm ⁻²) Stand density	海拔/m Elevation	坡度/(°) Slope	坡向/(°) Slope direction	坡向指数 TRASP	胸径/cm DBH	树高/m Tree height	冠幅/m Tree crown width
I	刺槐密度 I	1 200-1500	1 114.0	30	270 阳	0.75	11.04 ± 1.40a	10.66 ± 2.33a	4.01 ± 0.63a
			1 059.0	30	310 阳	0.41			
			1 118.9	26	75 阴	0.15			
II	刺槐密度 II	1 500-1 800	1 158.1	20	210 阳	1.00	11.40 ± 0.27a	10.27 ± 1.68a	4.03 ± 0.54a
			1 127.8	28	105 阴	0.37			
			1 120.0	30	240 阳	0.93			
III	刺槐密度 III	1 800-2 100	1 140.0	19	200 阳	0.99	11.01 ± 0.67a	9.95 ± 1.42a	3.78 ± 0.20a
			1 080.0	25	230 阳	0.97			
			1 158.0	26	280 阳	0.67			
IV	刺槐密度 IV	2 100-2 400	1 109.7	25	90 阴	0.25	9.08 ± 1.16b	9.20 ± 0.86a	3.70 ± 0.13a
			1 076.0	25	130 阴	0.59			
			1 096.2	18	200 阳	0.99			
V	刺槐密度 V	2 400-2 700	1 148.2	28	270 阳	0.75	9.01 ± 0.77b	8.25 ± 0.13a	3.29 ± 0.31a
			1 061.8	20	200 阳	0.99			
			1 088.6	40	30 阴	0.00			
VI	油松密度 I	1 000-1 500	1 123.0	28	120 阴	0.50	14.65 ± 0.57a	8.19 ± 0.61a	4.56 ± 0.40a
			1 118.0	34	80 阴	0.18			
			1 130.0	39	80 阴	0.18			
VII	油松密度 II	1 500-2 000	1 350.0	38	300 阴	0.50	13.94 ± 1.25a	9.94 ± 1.15a	3.22 ± 0.18bc
			1 171.0	27	261 阳	0.82			
			1 366.8	28	50 阴	0.03			
VIII	油松密度 III	2 000-2 500	1 343.8	30	320 阴	0.33	13.32 ± 1.33ab	8.79 ± 0.84a	3.52 ± 0.16b
			1 196.0	30	295 阴	0.54			
			1 403.0	18	270 阳	0.75			
IX	油松密度 IV	2 500-3 000	1 354.0	25	60 阴	0.07	11.63 ± 1.78bc	8.82 ± 1.96a	3.04 ± 0.25c
			1 336.2	38	180 阳	0.93			
			1 336.5	30	23 阴	0.00			
X	油松密度 V	3 000-3 500	1 368.4	20	75 阴	0.15	10.44 ± 0.46c	7.90 ± 1.00a	2.97 ± 0.09c
			1 284.2	25	60 阴	0.07			
			1 350.0	38	300 阴	0.50			

注:不同字母表示不同密度之间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different letters indicate significant differences between different densities ($P < 0.05$).

1.3 指标测定

1.3.1 物种多样性计算

在每个乔木样地的中心和对角线设置5个5 m×5 m的灌木样方,在每个灌木样方的中心和对角线设置5个1 m×1 m的草本样方,记录灌木及草本植物种名、株数等。物种多样性包括 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 优势度指数、Margalef 丰富度指数^[16],以下分别为其计算公式。

Shannon-Wiener 多样性指数 H 公式

$$H = -\sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i \quad (2)$$

Pielou 均匀度指数 J 公式

$$J = \frac{H}{\log_2 S} \quad (3)$$

Simpson 优势度指数 D 公式

$$D = \sum_{i=1}^s \frac{N_i(N_i - 1)}{N(N - 1)} \quad (4)$$

Margalef 丰富度指数 R 公式

$$R = \frac{S - 1}{\log_2 N} \quad (5)$$

式中: N_i 为第*i*个物种的个体数; N 为所有物种的总个体数; S 为物种数目; P_i 为频度, $P_i = N_i/N$ 。

1.3.2 乔木生物量测定

在每个样地内根据该样地全部树木的平均树高、平均胸径选定标准木,并整株挖掘。将标准木树干、枝条、叶片、根分别进行称质量,将树木各器官取样在85℃烘箱中烘干至质量恒定,测量其干质量。地上生物量为树干、枝条、叶片的生物量之和,地下生物量为根的生物量,全株生物量为地上生物量与地下生物量之和^[17]。刺槐和油松的单株立木生物量模型为

$$B_R = 0.237(D_{BH}^2 H)(D_{BH}^2 H)^{0.781} \quad (6)$$

$$B_P = 7.599 + 0.024(D_{BH}^2 H) \quad (7)$$

式中: B_R 为刺槐生物量,kg; B_P 为油松生物量,kg; D_{BH} 为胸径,cm; H 为树高,m。

1.4 数据处理

本研究运用双因素方差分析林型和密度对植物多样性和乔木生物量的影响,运用单因素方差分析(analysis of variance, ANOVA)对不同密度刺槐、油松林下植物多样性及乔木地上、地下、全株生物量进行方差分析和差异显著性检验($\alpha=0.05$),运用 Pearson 相关性分析刺槐、油松林密度、林分结构以及地形与林下植物多样性和乔木生物量的相关性。使用 Excel 2021 和 SPSS 22.0 软件进行数据处理和统计分析,使用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 林型、密度对林下植物多样和乔木生物量的影响

由表2可知,利用双因素方差分析研究林型和密度对于植物多样性和乔木生物量的影响关系,林型均呈现出显著性($P<0.05$ 或 $P<0.01$),说明林型会对植物多样性和乔木生物量产生显著影响。密度和林型×密度对草本多样性影响显著($P<0.05$),密度和林型×密度对灌木多样性和乔木生物量影响不显著($P>0.05$)。比较3种差异源的*F*发现,林型的*F*均为最大,表明林型更易影响植物多样性和乔木生物量。

表2 植物多样和乔木生物量的双因素方差分析

Tab. 2 Two-way analysis of variance on plant diversity and tree biomass

指标 Index	差异源 Variance source	<i>F</i>	<i>P</i>
灌木多样性 Shrub diversity	林型	6.776	0.017*
	密度	1.752	0.178
	林型×密度	0.414	0.797
草本多样性 Herb diversity	林型	45.744	0.000**
	密度	3.722	0.020*
	林型×密度	2.972	0.045*
乔木生物量 Tree biomass	林型	20.121	0.000**
	密度	2.212	0.104
	林型×密度	0.495	0.739

注:*表示显著相关($P<0.05$),**表示极显著相关($P<0.01$)。

Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates highly significant correlation ($P<0.01$).

由表3可知,对2种林型植物多样和乔木生物量事后多重比较。灌木多样性和乔木生物量的*t*为负数(*t*的正负反映了刺槐与油松均值差异的方向,即哪一组的均值更高)分别为-2.603和-4.486,表明油松的灌木多样性和乔木生物量显著大于刺槐($P<0.05$)。草本多样性的*t*为6.763,表明刺槐的草本多样性显著大于刺槐($P<0.01$)。

2.2 不同密度刺槐、油松林下植物多样性变化趋势

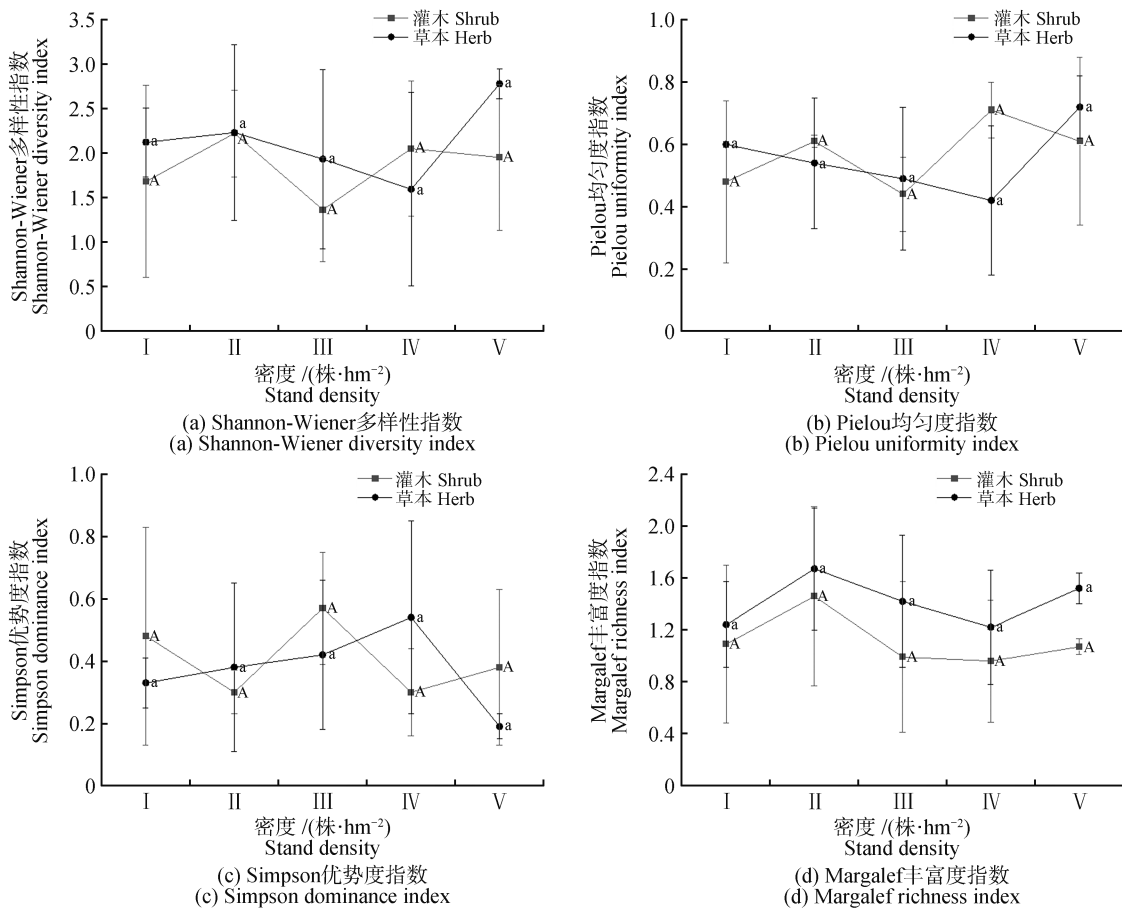
由图1可知,在刺槐林下,灌木 Shannon-Wiener 多样性指数随密度增大呈双峰变化趋势,在1500~1800株/hm²(II)达到最大值;草本 Shannon-Wiener 多样性指数随密度增大呈先减小后增大的趋势,在2400~2700株

表 3 2 种林型植物多样和乔木生物量事后多重比较
Tab. 3 Post multiple comparisons of plant diversity and tree biomass between two forest type

分析项 Analytical items	指标 Index	t	P
刺槐与油松 <i>Robinia pseudoacacia</i> and <i>Pinus tabuliformis</i>	灌木多样性 Shrub diversity	-2.603	0.017*
	草本多样性 Herb diversity	6.763	0.000**
	乔木生物量 Tree biomass	-4.486	0.000**

注: *表示显著相关($P < 0.05$), **表示极显著相关($P < 0.01$)。

Note: * indicates significant correlation ($P < 0.05$), ** indicates highly significant correlation ($P < 0.01$).



不同大写字母表示不同密度下灌木物种多样性差异显著,不同小写字母表示不同密度下草本物种多样性差异显著($P < 0.05$)。

Different uppercase letters indicate significant differences in shrub species diversity among different densities, while different lowercase letters indicate significant differences in herbaceous species diversity among different densities ($P < 0.05$).

图 1 不同密度刺槐林下植被物种多样性

Fig. 1 Species diversity of understory vegetation in *Robinia pseudoacacia* forests with different densities

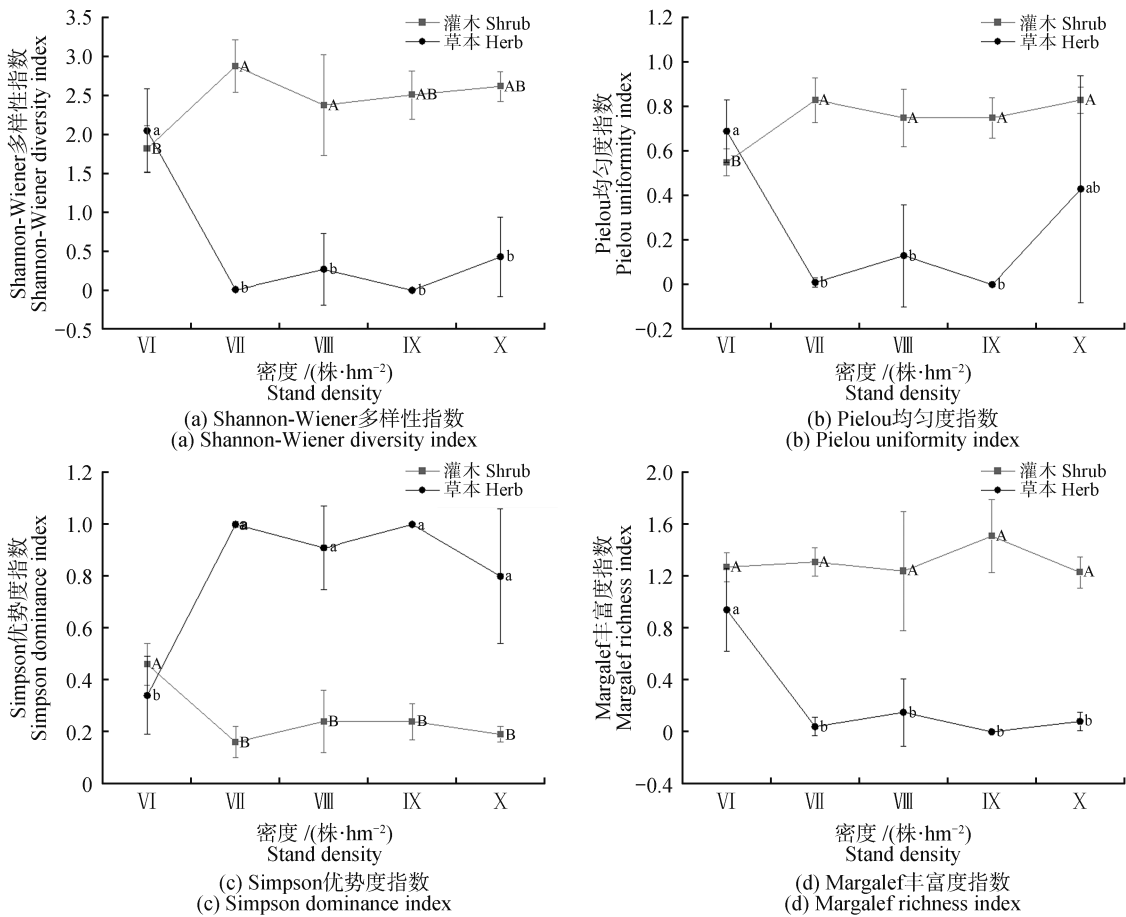
由图 2 可知,在油松林下,密度为 1 500~2 500 株/hm²(VII 和 VIII)时,灌木 Shannon-Wiener 多样性指数显著大于 1 000~1 500 株/hm²(VI)时($P < 0.05$),且灌木 Shannon-Wiener 多样性指数在密度为 1 500~2 000 株/hm²(VII)时最大;密度为 1 000~1 500 株/hm²(VI)时的

hm²(V)达到最大值。灌木 Pielou 均匀度指数随密度增大呈双峰变化趋势,在 2 100~2 400 株/hm²(IV)达到最大值;草本 Pielou 均匀度指数随密度增大呈先减小后增大的趋势,在 2 400~2 700 株/hm²(V)达到最大值。灌木 Simpson 优势度指数随密度增大呈双峰变化趋势,在 1 800~2 100 株/hm²(III)达到最大值;草本 Simpson 优势度指数随密度增大呈先增大后减小的趋势,在 2 100~2 400 株/hm²(IV)达到最大值。灌木和草本 Margalef 丰富度指数随密度增大均呈双峰变化趋势,并同时在 1 500~1 800 株/hm²(II)时达到最大。刺槐林下灌木和草本物种多样性随密度变化无显著差异($P > 0.05$)。

草本 Shannon-Wiener 多样性指数显著大于其他密度($P < 0.05$), 1 500~3 500 株/hm²(VII—X)的草本 Shannon-Wiener 多样性指数极小。密度为 1 000~1 500 株/hm²(VI)时,灌木 Pielou 均匀度指数显著小于其他密度($P < 0.05$);密度为 1 000~1 500 株/hm²(VI)时的草本 Pielou

均匀度指数显著大于 1 500~3 000 株/hm² (VII—IX) 时 ($P < 0.05$), 1 500~3 000 株/hm² (VII—IX) 的草本 Pielou 均匀度指数极小。灌木 Simpson 优势度指数在密度为 1 000~1 500 株/hm² (VI) 时最大, 且显著大于其他密度 ($P < 0.05$); 草本 Simpson 优势度指数在密度为 1 000~1 500 株/hm² (VI) 时最小, 显著大于其他密度 ($P <$

0.05)。灌木 Margalef 丰富度指数随密度增大变化不明显, 无显著差异 ($P > 0.05$); 草本 Margalef 丰富度指数在密度为 1 000~1 500 株/hm² (VI) 时最大, 且显著大于其他密度 ($P < 0.05$), 1 500~3 500 株/hm² (VII—X) 的草本 Margalef 丰富度指数极小。



不同大写字母表示不同密度下灌木物种多样性差异显著, 不同小写字母表示不同密度下草本物种多样性差异显著 ($P < 0.05$)。

Different uppercase letters indicate significant differences in shrub species diversity among different densities, while different lowercase letters indicate significant differences in herbaceous species diversity among different densities ($P < 0.05$).

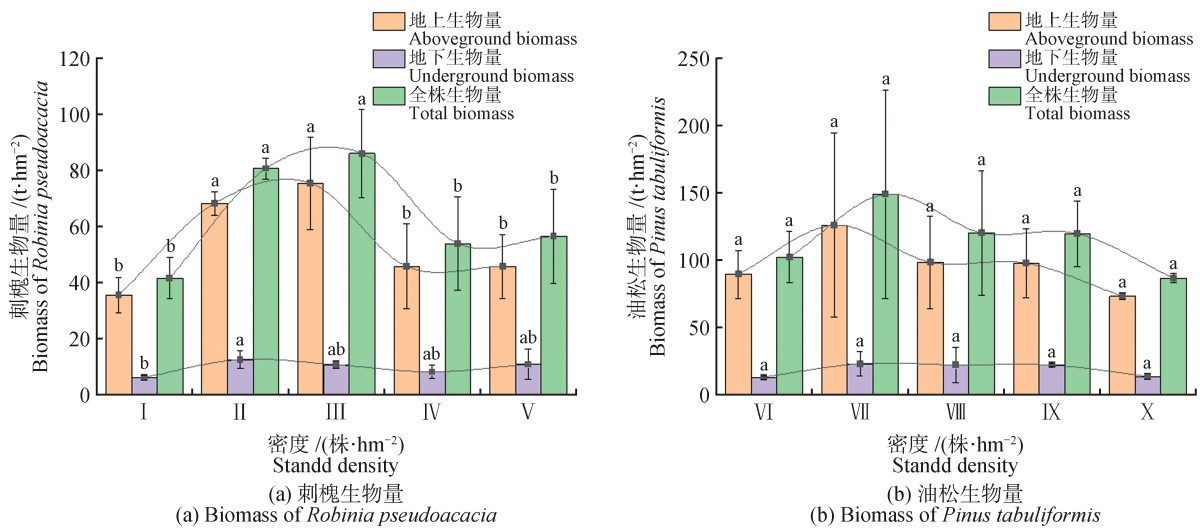
图 2 不同密度油松林下植被物种多样性

Fig. 2 Species diversity of understory vegetation in *Pinus tabuliformis* forests with different densities

2.3 不同密度刺槐、油松生物量特征

由图 3 可知, 刺槐地上生物量随密度增大呈先增大后减小的趋势, 在密度为 1 800~2 100 株/hm² (II) 时达到最大值, 密度为 1 500~2 100 株/hm² (II 和 III) 的刺槐地上生物量显著大于其他密度 ($P < 0.05$)。刺槐地下生物量在密度为 1 500~1 800 株/hm² (II) 时显著大于密度为 1 200~1 500 株/hm² (I) 时。刺槐全株生物量随密度增大呈先增大后减小的趋势, 在密度为 1 800~2 100 株/hm² (III) 时达到最大值, 密度为 1 500~

2 100 株/hm² (II 和 III) 的刺槐全株生物量显著大于其他密度 ($P < 0.05$), 与刺槐地上生物量的变化趋势一致。油松地上生物量随密度增大呈先增大后减小的趋势, 在密度为 1 500~2 000 株/hm² (VII) 时达到最大值。油松地下生物量随密度增大变化不明显。油松全株生物量随密度增大呈先增大后减小的趋势, 在密度为 1 500~2 000 株/hm² (VII) 时达到最大值, 与油松地上生物量的变化趋势一致。油松的地上、地下和全株生物量随密度变化无显著差异 ($P > 0.05$)。



不同小写字母表示不同密度间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences among different densities ($P < 0.05$).

图3 不同密度刺槐和油松生物量

Fig. 3 Biomass of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabuliformis* at different densities

2.4 刺槐和油松林植物多样性和生物量与影响因素的相关性分析

由图4可知,刺槐林下灌木Pielou均匀度指数与刺槐胸径呈显著负相关 ($P < 0.05$);刺槐林下灌木Shannon-Wiener多样性指数和Margalef丰富度指数与刺槐树木高度呈显著负相关 ($P < 0.05$);刺槐林下草本Pielou均匀度指数与坡度呈显著负相关 ($P < 0.05$);刺槐林下灌木Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数与坡向指数呈极显著正相关 ($P < 0.01$),灌木Simpson优势度指数与坡向指数呈极显著负相关 ($P < 0.01$);刺槐地上生物量和全株生物量与海拔呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与胸径呈显著正相关 ($P < 0.05$)。对于油松,油松林下灌木Pielou均匀度指数和草本Simpson优势度指数与林分密度呈显著正相关 ($P < 0.05$),与油松冠幅呈极显著负相关 ($P < 0.01$);草本Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数与坡向指数呈极显著正相关 ($P < 0.01$),草本Simpson优势度指数与坡向指数呈极显著负相关 ($P < 0.01$);草本Simpson优势度指数与海拔呈极显著正相关 ($P < 0.01$);灌木Simpson优势度指数与林分密度呈显著负相关 ($P < 0.05$),与油松冠幅呈极显著正相关 ($P < 0.01$);草本Shannon-Wiener多样性指数和Margalef丰富度指数分别与林分密度、海拔呈极显著负相关 ($P < 0.01$),与油松冠幅呈极显著正相关 ($P < 0.01$);草本Pielou均匀度指数与海拔呈显著负相关 ($P < 0.05$),与油松冠幅呈显著正相关 ($P < 0.05$);灌木Shannon-Wiener多样性指数与油松冠幅呈显著负相关 ($P < 0.05$);油松地上生物量

和全株生物量与胸径呈显著正相关 ($P < 0.05$),与树木高度呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

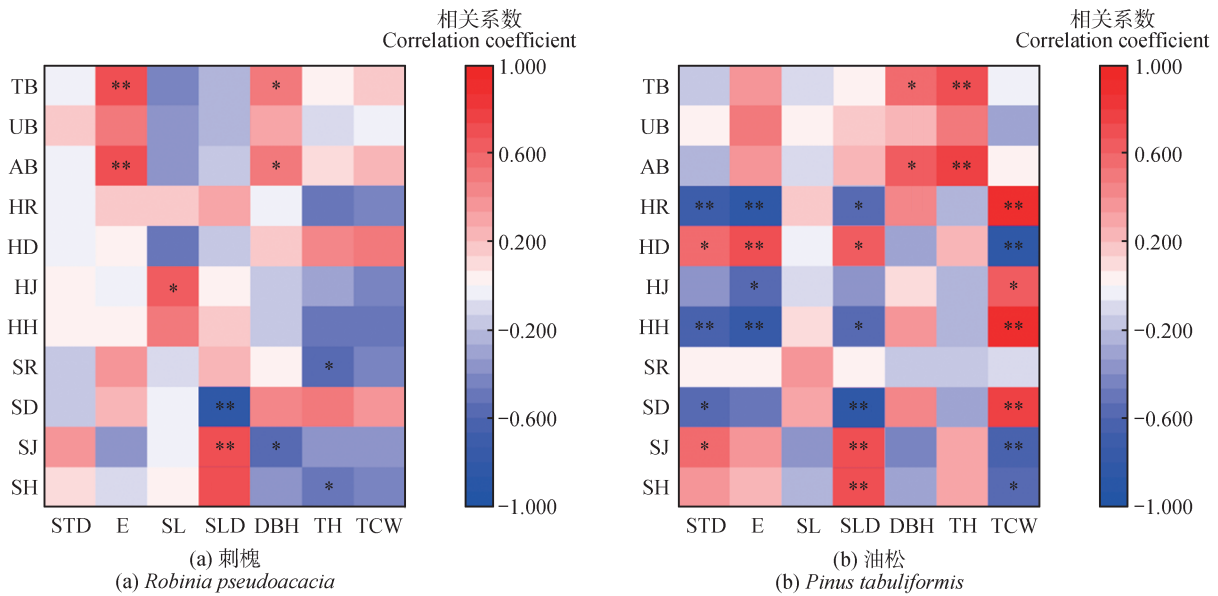
3 讨论

3.1 林型对植物多样性与生物量的影响

本研究的结果表明,林型在不同密度下显著影响植物多样性和乔木生物量。双因素方差分析结果显示,林型对草本物种多样性、灌木物种多样性和乔木生物量的影响均为显著,这与李浩等^[18]的研究结果一致。林型通过不同的环境因子(如光照、土壤水分和营养供应等)直接影响植物的生长和竞争关系,从而影响植物群落的组成和物种多样性^[19]。刺槐和油松2种树种的生态特性差异是导致这种显著差异的主要原因。在本研究中,油松林下灌木多样性和乔木生物量显著大于刺槐林下,这可能与油松的根系结构、树冠覆盖及其生态适应性密切相关。油松是一种深根性、耐旱性强的树种,在较干旱的环境中表现出了更强的竞争优势,在复杂生态环境中能更好地适应生长,形成较为稳定的群落结构^[20]。相比之下,刺槐虽然具备较强的抗旱能力,但其浅根系结构和较低的群落稳定性,可能在密度较大的情况下竞争力较弱,导致生物量和物种多样性较低^[21]。

3.2 不同密度下植物多样性的变化趋势

刺槐和油松林下植物的物种多样性随密度变化呈现出不同的规律。刺槐林下灌木和草本的Shannon-Wiener多样性指数在1500~1800株/hm²时达到最大,表明在该密度下,生态系统的资源利用和空间分配最



STD 为林分密度; E 为海拔; SL 为坡度; SLD 为坡向指数; DBH 为胸径; TH 为树高; TCW 为冠幅; SH 为灌木 Shannon-Wiener 多样性指数; SJ 为灌木 Pielou 均匀度指数; SD 为灌木 Simpson 优势度指数; SR 为灌木 Margalef 丰富度指数; HH 为草本 Shannon-Wiener 多样性指数; HJ 为草本 Pielou 均匀度指数; HD 为草本 Simpson 优势度指数; HR 为草本 Margalef 丰富度指数; AB 为乔木地上生物量; UB 为乔木地下生物量; TB 为乔木全株生物量。* 表示显著相关 ($P < 0.05$), ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

STD stands for stand density; E stands for elevation; SL stands for slope gradient; SLD stands for transformation of aspect; DBH stands for diameter at breast height; TH stands for tree height; TCW stands for crown width; SH stands for the Shannon-Wiener diversity index of shrubs; SJ stands for the Pielou evenness index of shrubs; SD stands for the Simpson dominance index of shrubs; SR stands for the Margalef richness index of shrubs; HH stands for the Shannon-Wiener diversity index of herbs; HJ stands for the Pielou evenness index of herbs; HD stands for the Simpson dominance index of herbs; HR stands for the Margalef richness index of herbs; AB stands for the aboveground biomass of trees; UB stands for the underground biomass of trees; TB stands for the whole-plant biomass of trees. * indicates significant correlation ($P < 0.05$), ** indicates highly significant correlation ($P < 0.01$).

图 4 刺槐和油松林下植物多样性和生物量与影响因素的相关性
Fig. 4 Correlation between understory plant diversity and biomass, and their influencing factors in *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabuliformis* forests

为合理, 可能为植物提供了最佳的生长空间和光照条件, 该结论与王宇等^[22]的研究结果相近。然而, 当密度过高 (2 400~2 700 株/hm²) 时, 树冠的竞争加剧, 植物生长受到抑制, 从而导致多样性下降, 这与李景文^[23]的研究理论相符, 即密度过高时, 植物生长空间受限, 资源利用率降低, 导致物种多样性下降。这一趋势同样适用于油松林, 油松密度在 1 500~2 000 株/hm² 时, 灌木 Shannon-Wiener 多样性指数达到最大。油松林下草本植物的 Shannon-Wiener 多样性指数则呈现出在低密度 (1 000~1 500 株/hm²) 时显著增大, 而在较高密度 (1 500~3 500 株/hm²) 时显著减小的趋势, 这一结论与王玲^[24]的研究结果一致。这一现象可能与油松的树冠遮蔽效应有关, 随着密度的增加, 油松的树冠密度增大, 光照条件变差, 草本植物的生长受到压制, 导致多样性显著降低^[25]。相比之下, 低密度下的林分有更多的光照资源可供草本植物生长, 因此其多样性

较高^[26]。

3.3 生物量的变化与林分密度的关系

生物量是衡量生态系统生产力的重要指标, 密度对生物量的影响因树种而异。在刺槐林中, 地上和全株生物量随着密度的增加先增大后减小, 最大值出现在 1 800~2 100 株/hm² 的密度梯度。这说明适中的密度能够促进植株生长和生物量积累, 而过高的密度会导致资源竞争激烈, 抑制个体的生长, 从而导致生物量的下降^[27]。相比之下, 油松的生物量随密度变化不明显, 尤其是在地上生物量和全株生物量上, 密度对其影响较小。这可能与油松生长特性有关, 油松具有较强的抗逆性和较大的生长空间需求, 其生物量对密度的变化表现出较低的敏感度^[28]。

3.4 影响植物多样性和生物量的关键因素

从相关性分析结果来看, 刺槐林下植物多样性与多个因素呈现出显著的相关性。灌木的 Shannon-Wie-

ner多样性指数与坡向呈显著负相关,而草本的Pielou均匀度指数与坡度呈显著负相关。这表明,坡向和坡度的变化可能通过影响土壤水分、光照等条件,从而间接调控植物群落的多样性^[29]。此外,胸径与刺槐林的生物量有着显著的正相关关系,这也表明,刺槐的生长和生物量积累主要受胸径的制约。对于油松林,冠幅对多样性指标具有显著影响,尤其是草本植物的Shannon-Wiener多样性指数和Margalef丰富度指数均与冠幅呈显著正相关。油松树冠的扩展为草本植物提供了更多的生长空间和光照,从而促进了草本植物的多样性^[30]。此外,油松的生物量与胸径和树高有着密切的正相关关系,表明树木的生长状态是其生物量积累的关键驱动因子^[31]。

综上所述,本研究通过对不同密度梯度下刺槐和油松林植物多样性和生物量及其影响因素的探讨,揭示了黄土高原典型林分植物多样性和生物量的分布格局及其主要影响因素。这些研究结果对于指导黄土高原地区退耕还林工程的科学规划和合理布局具有重要意义。未来研究可进一步探讨不同树种组合和配置方式对植物多样性和生物量的影响,以及气候变化对黄土高原林分结构和功能的影响等科学问题。

4 结 论

油松与刺槐相比具有更强的竞争优势。不同密度下的刺槐和油松林分对植物多样性和生物量有显著影响。适度的林分密度可以促进植物多样性和生物量的积累,而过高的密度会导致植物群落的竞争加剧,抑制植物生长。地形因子、树木的生长特征以及密度调控是影响植物多样性和生物量的关键因素。通过合理的林分管理,可以有效促进黄土高原地区森林生态系统的多样性和生产力。

参 考 文 献

- [1] 刘泓君,牛腾,于强,等. 基于“重要性—敏感性—景观特征”的黄土高原生态屏障带生态空间网络构建[J]. 水土保持通报,2022,42(3):103-111.
LIU H J, NIU T, YU Q, et al. Construction of ecological security pattern in ecological barrier zone of Loess Plateau based on “importance-sensitivity-landscape features” [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42 (3) : 103-111.
- [2] 王聪,张守红,杜自强,等. 黄土高原小流域生态系统综合治理与生态系统服务协同提升[J]. 生态学报,2025(8):1-7[2025-02-26].
WANG C, ZHANG S H, DU Z Q, et al. The comprehensive ecosystem governance and coordinated enhancement of ecosystem services in the small watersheds of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025 (8) : 1-7 [2025-02-26].
- [3] 杨致远,刘琪璟,秦立厚,等. 延安市退耕还林工程生态效益评价[J]. 西北林学院学报,2022,37(1):259-266.
YANG Z Y, LIU Q J, QIN L H, et al. Ecological benefit assessment of the grain for green project in Yan'an [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37 (1) : 259-266.
- [4] 牛丽楠,邵全琴,宁佳,等. 黄土高原生态恢复程度及恢复潜力评估[J]. 自然资源学报,2023,38(3):779-794.
NIU L N, SHAO Q Q, NING J, et al. Evaluation on the degree and potential of ecological restoration in Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(3) : 779-794.
- [5] 熊瑛楠,冯天骄,王平,等. 晋西黄土区长期人工林恢复对土壤水分和养分性质的影响[J]. 水土保持学报,2022,36(2):228-237,246.
XIONG Y N, FENG T J, WANG P, et al. Effects of long-term artificial forest restoration on soil moisture and nutrient characteristics in the loess area of western Shanxi Province, China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2) : 228-237, 246.
- [6] DONG S K, SHA W, SU X K, et al. The impacts of geographic, soil and climatic factors on plant diversity, biomass and their relationships of the alpine dry ecosystems: Cases from the Aerjin Mountain Nature Reserve, China [J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 170-177.
- [7] SADIA S, WAHEED M, FIRDOUS S, et al. Ecological analysis of plant community structure and soil effects in subtropical forest ecosystem [J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1):1275.
- [8] PENNEKAMP F, PONTARP M, TABI A, et al. Biodiversity increases and decreases ecosystem stability [J]. Nature, 2018, 563: 109-112.
- [9] 籍翠莹,孙鹤嘉,周颖,等. 冀北山区樟子松生物量分配特征及模型研建[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2025, 45(2):90-101[2025-02-26].
JI C Y, SUN H J, ZHOU Y, et al. Biomass allocation characteristics and model development of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in northern Hebei mountainous area [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2025, 45(2) : 90-101 [2025-02-26].
- [10] 苟小林,周青平,涂卫国,等. 高寒半湿润沙地土壤水分与根系生物量对植被恢复的响应[J]. 中国草地学报,2022,44(7):53-60,86.

- GOU X L, ZHOU Q P, TU W G, et al. Response of soil water content and root biomass to vegetation restoration in alpine semi-humid sandy land [J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(7): 53-60, 86.
- [11] 叶小曼, 魏天兴, 于欢, 等. 黄土丘陵区典型森林生态系统碳储量及其影响因素[J]. 生态学杂志, 1-10 [2025-02-26].
YE X M, WEI T X, YU H, et al. Carbon storage and its influencing factors in typical forest ecosystems of the loess hilly region [J]. Chinese Journal of Ecology, 1-10 [2025-02-26].
- [12] 于秀立, 降瑞娇, 徐满厚. 黄土高原东部山地林下不同植物功能群地上生物量对模拟增温的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(10): 133-143.
YU X L, JIANG R J, XU M H. Responses of aboveground biomass for different plant functional groups to experimental warming in a mountain forest in the eastern Loess Plateau, China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(10): 133-143.
- [13] 南国卫, 王静慧, 秦淑莹, 等. 不同恢复年限刺槐林林下草本层的物种多样性[J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(5): 978-985.
NAN G W, WANG J H, QIN S Y, et al. Diversity characteristics of herbaceous species under *Robinia pseudoacacia* forest in different years [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024, 41(5): 978-985.
- [14] 刘亚玲, 信忠保, 李宗善, 等. 黄土丘陵区小流域不同海拔刺槐径向生长对气候的响应差异[J]. 生态学报, 2023, 43(24): 10119-10130.
LIU Y L, XIN Z B, LI Z S, et al. Radial growth responses of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) to climate at different elevations in a Loess Plateau watershed [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10119-10130.
- [15] HERBERICH M M, GAYLER S, ANAND M T K. Biomass-density relationships of plant communities deviate from the self-thinning rule due to age structure and abiotic stress [J]. Oikos: A Journal of Ecology, 2020, 129(9): 1393-1403.
- [16] 邓婷婷, 魏岩, 任思远, 等. 北京东灵山暖温带落叶阔叶林地形和林分结构对林下草本植物物种多样性的影响[J]. 生物多样性, 2023, 31(7): 18-29.
DENG T T, WEI Y, REN S Y, et al. Effects of topography and stand structure of warm temperate deciduous broad-leaved forest on understory herb diversity in Donglingshan, Beijing [J]. Biodiversity Science, 2023, 31(7): 18-29.
- [17] 陈波兰, 吴雨茹, 钟欣艺, 等. 林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和生物量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2023, 41(4): 665-672.
CHEN B L, WU Y R, ZHONG X Y, et al. Effects of stand density on understory plant diversity and biomass in a *Cupressus funebris* plantation in Yunding mountain [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2023, 41(4): 665-672.
- [18] 李浩, 宋玉林, 杨泽凡, 等. 南亚热带典型林型群落特征分析[J]. 森林工程, 2024, 40(5): 39-49.
LI H, SONG Y L, YANG Z F, et al. Analysis of characteristics of typical forest communities in south Asian tropics [J]. Forest Engineering, 2024, 40(5): 39-49.
- [19] 田平, 程小琴, 韩海荣, 等. 环境因子对山西太岳山典型森林类型物种多样性及其功能多样性的影响[J]. 西北植物学报, 2017, 37(5): 992-1003.
TIAN P, CHENG X Q, HAN H R, et al. Effect of environment factors on species diversity and functional diversity of the typical forests of Taiyue Mountain Shanxi, China [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(5): 992-1003.
- [20] 王移, 卫伟, 杨兴中, 等. 黄土丘陵沟壑区典型植物耐旱生理及抗旱性评价[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(4): 56-61.
WANG Y, WEI W, YANG X Z, et al. Drought-tolerance physiology and drought-tolerance of plants typical of hilly-gullied area of Loess Plateau [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, 27(4): 56-61.
- [21] 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, 2020, 18(4): 12-20.
ZHEN Q, WANG B T, ZHAO Y, 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.
- [22] 王宇, 王冬梅, 王彦辉, 等. 黄土高原退耕刺槐中龄林密度和空间结构对灌草多样性的影响[J]. 生态学报, 2025, 45(2): 822-836.
WANG Y, WANG D M, WANG Y H, et al. Effects of density and spatial structure of middle-aged *Robinia pseudoacacia* plantations on the diversity of shrub and grass in the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(2): 822-836.
- [23] 李景文. 森林生态学(第2版)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.

- LI J W. Forest ecology (2nd ed.) [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2002.
- [24] 王玲. 林分密度对油松人工林群落结构和植物多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(12): 2328-2336.
- WANG L. Effects of different stand densities on community structure and species diversity of *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(12): 2328-2336.
- [25] 公宁宁, 马履一, 贾黎明, 等. 不同密度和立地条件对北京山区油松人工林树冠的影响[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(5): 9-12.
- GONG N N, MA L Y, JIA L M, et al. Effects of different stand densities and site conditions on crown of *Pinus tabulaeformis* plantations in Beijing mountain area [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(5): 9-12.
- [26] 仲怡铭, 陈徽尼, 王慧慧, 等. 油松人工林林分特征对密度调控的响应[J]. 森林与环境学报, 2023, 43(6): 606-613.
- ZHONG Y M, CHEN Z N, WANG H H, et al. Responses of Stand characteristics of *Pinus tabuliformis* plantation to density regulation [J]. Journal of Forest and Environment, 2023, 43(6): 606-613.
- [27] LIN G, WANG L, LI Y, et al. Optimal planting density increases the seed yield by improving biomass accumulation and regulating the canopy structure in rapeseed [J]. Plants (Basel). 2024, 13(14): 1986.
- [28] 肖军, 雷蕾, 李肇晨, 等. 不同经营方式对油松成熟人工林生长和植物多样性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(12): 1-10.
- XIAO J, LEI L, LI Z C, et al. Effects of different management methods on growth and plant diversity in mature *Pinus tabuliformis* plantations [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(12): 1-10.
- [29] 武文娟, 查同刚, 张志强. 恢复方式和地形对晋西黄土区退耕林分物种多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1121-1127.
- WU W J, ZHA T G, ZHANG Z Q. Effects of revegetation approach and terrain on plant species diversity as a result of converting croplands to forests in the loess region of western Shanxi Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(4): 1121-1127.
- [30] CHENG X, PING T, LI Z, et al. Effects of environmental factors on plant functional traits across different plant life forms in a temperate forest ecosystem [J]. New Forests, 2022, 53(1): 125-142.
- [31] 杨周, 张建军, 赵炯昌, 等. 林分密度对晋西黄土区油松人工林生长特性的影响[J]. 生态学杂志, 2025, 44(5): 1427-1435.
- YANG Z, ZHANG J J, ZHAO J C, et al. Effects of stand densities on the growth characteristics of *Pinus tabuliformis* plantation in loess region of western Shanxi Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(5): 1427-1435.