北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

林分密度对油松人工林生长特征及林下植被多样性的影响

张犇 王红俊 贾亚倢 杨建英 张建军 赵廷宁 胡亚伟

Effects of stand density on the growth characteristics of *Pinus tabuliformis* plantation and understory vegetation diversity

Zhang Ben, Wang Hongjun, Jia Yajie, Yang Jianying, Zhang Jianjun, Zhao Tingning, Hu Yawei

引用本文:
张犇, 王红俊, 贾亚倢, 杨建英, 张建军, 赵廷宁, 胡亚伟. 林分密度对油松人工林生长特征及林下植被多样性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(8):133–141. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250289
Zhang Ben, Wang Hongjun, Jia Yajie, Yang Jianying, Zhang Jianjun, Zhao Tingning, Hu Yawei. Effects of stand density on the growth characteristics of *Pinus tabuliformis* plantation and understory vegetation diversity[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(8):133–141. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250289

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250289

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

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
Effects of different management methods on growth and plant diversity in mature *Pinus tabuliformis* plantations
北京林业大学学报, 2023, 45(12): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220302

晋西黄土区典型人工林与天然林林下植被物种多样性差异及其影响因素
Differences and influencing factors of understory vegetation species diversity between typical plantations and natural forests in the loess area of western Shanxi Province, northern China
北京林业大学学报, 2025, 47(4): 103–116. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240228

晋西黄土区油松林土壤碳氮磷计量特征对林龄和密度的响应
Response of soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics of *Pinus tabuliformis* forests to stand age and density in the Loess Plateau region of western Shanxi Province, northern China
北京林业大学学报, 2024, 46(12): 30–40. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240188

晋西黄土区油松人工林密度和立地对细根特征的影响
Influence of density and site on fine root characteristics of *Pinus tabuliformis* plantations in loess area of western Shanxi Province, northern China
北京林业大学学报, 2024, 46(10): 22–32. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230282

主伐龄油松建筑材林生长及土壤性质对林分密度的响应
Response of growth and soil properties of Chinese pine building timber forest at felling age to stand density
北京林业大学学报, 2022, 44(12): 88–101. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210442

长白落叶松人工林林分碳储量生长模型系研究
Stand carbon stock growth model system for *Larix olgensis* plantation
北京林业大学学报, 2021, 43(11): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210040

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250289

林分密度对油松人工林生长特征及林下植被多样性的影响

张 犇[1,2] 王红俊[3] 贾亚倢[1] 杨建英[1] 张建军[1,4] 赵廷宁[1] 胡亚伟[1]

（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 威海市林业发展中心，山东 威海 264200；3. 山西人祖山省级自然保护区管理局，山西 临汾 041000；4. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，北京 100083）

摘要:【目的】研究不同密度油松人工林的生长特征及其对林下植被多样性的影响，为晋西黄土区油松林的可持续经营提供科学依据。**【方法】**以 11 种林分密度的油松人工林（林龄为 30 年）为研究对象，通过野外调查和室内试验，测定油松林生长特征、生物量和植被多样性，利用单因素方差分析、Pearson 相关分析和结构方程模型分析林分密度对油松生长特性及林下植被多样性的影响。**【结果】**（1）油松的平均树高均随密度增大呈波动变化，平均胸径呈递减趋势。（2）高密度林分（≥3 250 株/hm^2）促进树干、松果的生物量分配，低密度林分（≤1 750 株/hm^2）更利于枝条和叶片的生物量分配；单株生物量随密度增大呈下降趋势，林分总生物量随密度增大呈先增后减的单峰变化，在 1 750 株/hm^2 时达到最大值 148.81 t/hm^2。（3）林下灌木层 Shannon-Wiener 多样性指数在 1 750 株/hm^2 时最大，Margalef 丰富度指数在 1 250 株/hm^2 时最大；草本层 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数在 1 250 株/hm^2 时最大。（4）结构方程模型分析显示，密度通过油松生长特征间接正向调控草本多样性，负向调控灌木多样性。**【结论】**晋西黄土区油松林通过间伐将密度调控至 1 250～1 750 株/hm^2 区间，可实现林分生产力与林下生物多样性的协同提升。

关键词：油松人工林；林分密度；生长特征；生物量；林下植被多样性；结构方程模型

中图分类号：S753.3 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)08−0133−09

引文格式：张犇，王红俊，贾亚倢，等. 林分密度对油松人工林生长特征及林下植被多样性的影响［J］. 北京林业大学学报，2026，48(8)：133−141. Zhang Ben, Wang Hongjun, Jia Yajie, et al. Effects of stand density on the growth characteristics of *Pinus tabuliformis* plantation and understory vegetation diversity［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(8): 133−141.

Effects of stand density on the growth characteristics of *Pinus tabuliformis* plantation and understory vegetation diversity

Zhang Ben[1,2] Wang Hongjun[3] Jia Yajie[1] Yang Jianying[1]
Zhang Jianjun[1,4] Zhao Tingning[1] Hu Yawei[1]

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Weihai Forestry Development Center, Weihai 264200, Shandong, China;
3. Shanxi Renzu Mountain Provincial Nature Reserve Management Bureau, Linfen 041000, Shanxi, China;
4. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Chinese National Ecosystem Research Network, Beijing 100083, China)

Abstract: ［**Objective**］ This study aimed to investigate the growth characteristics of *Pinus tabuliformis* plantations at different densities and their impacts on understory vegetation diversity, providing a scientific basis for sustainable management of *P. tabuliformis* forests in the loess region of western Shanxi Province of

收稿日期: 2025−07−28 **修回日期:** 2026−04−04

基金项目: 国家重点研发计划（2022YFE0104700）。

第一作者: 张犇。主要研究方向：林业生态工程。Email：zb17352900765@163.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 杨建英，博士生导师，教授。主要研究方向：水土保持与流域治理。Email：jyyang@bjfu.edu.cn 地址：同上。

本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

northern China. [**Method**] Eleven plantation densities of *P. tabuliformis* (forest age is 30 years) were selected as study objects. Field surveys and laboratory experiments were conducted to measure growth traits, biomass, and vegetation diversity. Univariate analysis of variance (ANOVA) and structural equation modeling (SEM) were employed to analyze the effects of stand density on growth traits of *P. tabuliformis* and understory vegetation diversity. [**Results**] The findings revealed: (1) The average tree height of *P. tabuliformis* fluctuates with increasing stand density, while the average diameter at breast height (DBH) exhibits a decreasing trend. (2) High-density stands promoted biomass allocation to stems, cones, whereas low-density stands favored branches and leaves. As stand density increases, the individual biomass of *P. tabuliformis* shows a decreasing trend, whereas the total stand biomass reaches its maximum value of 148.81 t/hm^2 at a density of 1 750 trees/ha. (3) The Shannon-Wiener diversity index of the understory shrub layer reaches its maximum at a density of 1 750 trees/ha, while the Margalef richness index peaks at 1 250 trees/ha. For the herbaceous layer, both the Shannon-Wiener diversity index and the Margalef richness index attain their maximum values at a density of 1 250 trees/ha. (4) SEM analysis indicated that density indirectly enhanced herbaceous diversity by positively influencing *P. tabuliformis* growth traits and individual tree biomass but inhibited shrub diversity. [**Conclusion**] By thinning the *P. tabuliformis* forests in the loess region of western Shanxi to achieve a density within the range of 1 250–1 750 trees/ha, it is possible to achieve a synergistic enhancement of both stand productivity and understory biodiversity.

Key words: *Pinus tabuliformis* plantation; stand density; growth traits; biomass; understory vegetation diversity; structural equation modeling

在黄土高原地区，水土流失问题长期制约着区域生态环境的可持续发展，而植被恢复与重建作为防治水土流失、改善生态环境的关键举措，一直是该区域生态学研究的重点领域[1]。然而，传统植被恢复与重建工作往往更侧重于提升植被的生产力，以快速实现植被覆盖，对植被恢复过程中生态功能的协同提升关注不足，缺乏对生产力与生态功能协同发展的深入研究。森林植被中，林分密度作为森林结构的核心特征，能够直接影响林木生长和整体生态功能，对林下植被的物种多样性和资源利用率亦存在显著调控作用[2]。它不仅决定了群落中树木间的资源竞争强度[3−4]，还影响光照[5]、水分和养分等资源的分配格局，并调控林分的生长表现和生态功能[6−7]。

近年来，林分密度对植被生长影响的研究已取得了丰硕的成果。在密度与生产力关系方面，韩新生等[8]以 37 年生华北落叶松（*Larix gmelinii*）为研究对象，探讨了在不同密度条件下林木的生长指标（树高、胸径）、生物量以及材积的变化趋势，进而确定 1 100 ~ 1 350 株/hm^2 为华北落叶松的合理林分密度；卢德浩等[9]通过研究不同密度 11 年生杉木（*Cunninghamia lanceolata*）人工纯林的林分结构与林分生长特征，得出林分密度对杉木林分结构与生长特征均存在显著影响，且当密度在 3 100 株/hm^2 时总体生长表现最好。在密度与生物多样性关系方面，Zhang 等[10]和 Chen 等[11]研究均表明，较低的油松（*Pinus tabuliformis*）林分密度有利于实现物种多样性和自然更新。然而，现有林分密度研究多集中于单一功能优化，对生产力与生物多样性功能的权衡协同关系探讨较少。且针对黄土高原区域特殊环境下的长龄人工林生态功能研究鲜有报道，这限制了通过合理调控林分密度实现生态效益最大化的实践应用。

油松是中国北方主要的水土保持树种，具有保育土壤、涵养水源、固碳释氧等功能[12]，大面积种植于黄土高原地区[13−14]，在防治水土流失、减少土壤侵蚀及改善生态环境等方面发挥重要作用。然而，目前油松人工林的种植管理中，林分密度对其生产力及生态功能的优化仍缺乏系统认识。基于此，本研究聚焦山西吉县蔡家川流域 30 年生油松人工林，选择典型样地开展不同密度条件下油松生长特征及林下植被多样性变化规律的系统研究，旨在揭示不同林分密度对油松生长特征及林下植被多样性的影响，探寻实现生产力与生物多样性协同的密度阈值，为该流域油松人工林高质量发展提供科学依据和理论参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究区位于山西省临汾市吉县蔡家川流域国家森林生态系统野外科学观测研究站（36°14′27″ ~ 36°18′23″N，110°39′45″ ~ 110°47′45″E）。流域总面积 39.33 km^2，海拔 904 ~ 1 592 m。该区域属暖温带

大陆性气候，年均气温约 10 ℃，年降水量约 575.9 mm，降水主要集中在 6—9 月。土壤主要由碳酸盐褐土构成，黄土母质。主要造林树种有油松、刺槐（*Robinia pseudoacacia*）、侧柏（*Platycladus orientalis*）等，林下植物主要有黄栌（*Cotinus coggygria*）、黄刺玫（*Rosa xanthina*）、连翘（*Forsythia suspensa*）、薹草（*Carex* spp.）、蔺草（*Phalaris arundinacea*）等。

1.2　样地选择与调查

2023 年 6—8 月，在流域内选择林龄 30 年、立地条件基本一致且远离林缘的油松人工林样地 40 块（表 1）。设置 11 个密度梯度（750、1 250、1 750、2 250、2 750、3 250、3 750、4 250、4 750、5 250、5 750 株/hm^2），其中 750 ~ 2 250 株/hm^2 设置 3 个重复，2 750 ~ 5 750 株/hm^2 设置 4 个重复。样地面积 20 m × 20 m。

对样地内所有油松进行每木检尺，记录其树高、胸径、冠幅等生长指标。通过计算各样地的平均树高和平均胸径，选择相应标准树木进行伐倒，每块样地伐倒 1 株标准木。以树干为中心向外辐射挖掘根系，挖掘范围延伸至树冠投影边缘外 1 m，深度至无可见根系，将清洗后的根系晾干，按直径分级装袋，立即称取鲜质量；分别测定全株松果、松叶、枝条、树干鲜质量，并对各器官取样（1 kg）带回实验室，在 65 ℃ 的烘箱内烘干至质量恒定，计算含水率及各器官生物量。

在每块样地四角及中心设置 5 m × 5 m 灌木样方和 1 m × 1 m 草本样方各 1 个，记录物种名及株（丛）数。采用物种丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数及 Pielou 均匀度指数量化林下植被的物种组成与多样性特征[15]。

1.3　统计分析

采用 Excel 2010 对数据进行基础处理，运用 SPSS 进行单因素方差分析，最小显著性差异检验法进行差异显著性分析，使用 Pearson 相关分析探究林分密度与生长因子的关系。使用 Origin 2021 制作图表，使用 Amos 22.0 软件建立结构方程模型。

2　结果与分析

2.1　不同密度林木生长分布特征

不同密度油松林的树高、胸径和冠幅分布均呈单峰型（图 1）。各密度林分的树高主要集中于 6 ~ 10 m，树高 < 2 m 和 > 14 m 的油松株数极少。各密度林分的胸径主要集中于 4 ~ 18 cm 区间，优势胸径随林分密度增大呈向小胸径偏移。低密度林分（≤1 750 株/hm^2）的优势胸径为 14 ~ 16 cm；密度增至 2 250 株/hm^2 后，优势胸径降至 8 ~ 16 cm；密度≥3 250 株/hm^2 后，优势胸径进一步降至 8 ~ 12 cm。各密度林分的冠幅主要集中于 1 ~ 6 m 区间，优势冠幅随林分密度增大呈递减趋势。低密度林分（≤1 750 株/hm^2）的优势冠幅为 3 ~ 5 m；密度增至 2 750 株/hm^2 后，优势冠幅降至 2 ~ 4 m；密度≥4 250 株/hm^2 后，优势冠幅为 2 ~ 3 m。

2.2　油松林各生长因子对林分密度的响应

由表 1 可知，不同密度油松人工林平均树高随密度增加呈波动变化，在 1 750 株/hm^2 时最大，5 750 株/hm^2 时最小；平均胸径随密度增加呈递减趋势，在 750 株/hm^2 时最大，5 750 株/hm^2 时最小；高径比（树高/胸径）随林分密度增加呈波动递增趋势。Pearson 相关性分析发现，林分密度与胸径呈极显著负相关（$p < 0.01$），与高径比呈极显著正相关

表 1　样地基本情况

Tab. 1　Basic information of the sample plots

林分密度/(株·hm^{-2})	海拔/m	坡度/(°)	坡向/(°)	地位指数	树高/m	胸径/cm	高径比
750	1 217	26	330	10	8.05 ± 0.75b	14.94 ± 1.14a	0.54 ± 0.03d
1 250	1 220	30	60	10	8.42 ± 0.26ab	14.62 ± 0.61a	0.58 ± 0.05d
1 750	1 295	27	300	12	9.94 ± 1.15a	13.94 ± 1.25ab	0.71 ± 0.09c
2 250	1 254	29	280	11	8.76 ± 0.69ab	12.74 ± 1.60b	0.69 ± 0.06bc
2 750	1 336	25	30	11	8.70 ± 1.42ab	11.28 ± 1.34c	0.77 ± 0.04bc
3 250	1 258	30	35	9	8.66 ± 1.03ab	11.08 ± 1.15c	0.73 ± 0.08c
3 750	1 270	25	25	10	8.62 ± 1.20ab	10.93 ± 0.50c	0.80 ± 0.03b
4 250	1 333	24	20	10	8.66 ± 1.16ab	10.73 ± 0.5cd	0.76 ± 0.05bc
4 750	1 300	24	30	9	7.74 ± 2.12c	9.43 ± 1.68d	0.82 ± 0.06b
5 250	1 305	23	25	11	8.85 ± 0.76ab	9.40 ± 1.12d	0.94 ± 0.08a
5 750	1 285	24	25	9	7.43 ± 1.28c	7.90 ± 0.89e	0.94 ± 0.05a

注：不同字母表示不同密度之间存在显著差异（$p < 0.05$）。

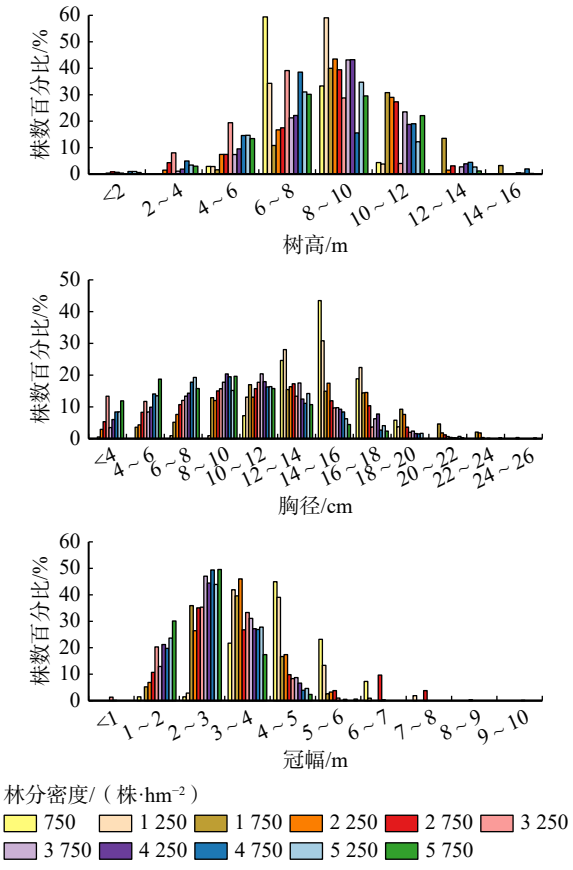


图 1 不同密度油松人工林生长指标分布特征

Fig. 1 Distribution characteristics of growth indices of *Pinus tabuliformis* forests with varying densities

($p < 0.01$)。

2.3 不同密度林木生物量及其分配

林分密度对油松人工林各器官生物量及其分配影响不同(图 2、表 2)。单株生物量随林分密度增加逐渐下降，在密度达 3 250 株/hm^2 后趋于平稳波动，不同密度间差异极显著($p < 0.01$)。各器官中，单株油松的树干、枝条、叶片、根系和地上生物量均随密度增加而降低，松果生物量变化不显著。

生物量分配方面，树干生物量占比在密度为 5 250 株/hm^2 时最高，1 250 株/hm^2 时最低；枝条、叶片生物量占比均在 1 250 株/hm^2 时最高，5 250 株/hm^2 时最低；松果生物量占比在 5 750 株/hm^2 时最高，750 株/hm^2 时最低；根系生物量占比在 4 750 株/hm^2 时最高，在 1 250 株/hm^2 时最低。差异性分析发现，不同密度间单株油松树干、枝条、叶片、根系和地上生物量存在极显著差异($p < 0.01$)。

由表 3 可知，林分密度对林分生物量(单位面积生物量)的影响与单株生物量的变化规律不同。林分总生物量随密度增加呈先增后减趋势，在 1 750 株/hm^2 时达到峰值 148.81 t/hm^2，3 250 株/hm^2 后趋于稳定，不同密度间差异显著($p < 0.05$)。各器官中，树干、枝条、叶片和地上生物量均呈先增后减趋势；松果和根系生物量变化规律不明显。

生物量分配方面，树干生物量占比在密度为 3 250 株/hm^2 时最大，1 250 株/hm^2 时最小；枝条生物量占比在 1 250 株/hm^2 时最大，4 250 株/hm^2 时最小；叶片生物量占比在 1 250 株/hm^2 时最大，3 250 株/hm^2 时最小；松果生物量占比在 3 250 株/hm^2 时最大，750 株/hm^2 时最小；根系生物量占比在 4 750 株/hm^2 时最大，1 250 株/hm^2 时最小。差异性分析显示，不同密度间枝条、叶片、松果和根系生物量差异显著($p < 0.05$)，树干生物量差异不显著($p > 0.05$)。

2.4 不同密度林下植被多样性

由表 4 可知，油松林下灌木层 Margalef 丰富度指数在 1 250 株/hm^2 时最高；Shannon-Wiener 多样性指数在密度 5 250 株/hm^2 时最低，在 1 750 株/hm^2 时最高；Simspon 优势度指数在 1 250 株/hm^2 时最低，1 750 株/hm^2 时最高；Pielou 均匀度指数随密度变化呈波动趋势。草本层 Margalef 丰富度指数随林分密度增加呈波动趋势；Shannon-Wiener 多样性指数和 Simspon 优势度指数均在 1 750 株/hm^2 时最低，1 250 株/hm^2 时最高；Pielou 均匀度指数随着密度变化呈

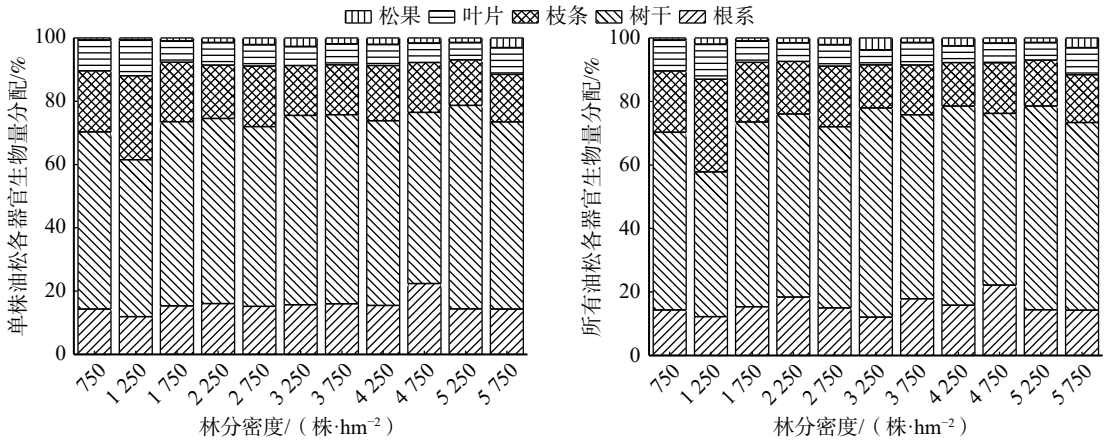


图 2 不同密度油松林各器官生物量分配

Fig. 2 Biomass allocation in various organs of *Pinus tabuliformis* forests with different densities

表 2　不同密度油松林单株油松各器官生物量

Tab. 2　Biomass of individual tree organs in *Pinus tabuliformis* under varying stand densities

林分密度/(株·hm^{-2})	生物量/kg						
	树干	枝条	叶片	松果	地上生物量	地下生物量(根)	总生物量
750	59.20 ± 0.74a	20.42 ± 4.69b	10.31 ± 3.31a	0.69 ± 0.45a	90.62 ± 4.36a	15.19 ± 5.69a	105.81 ± 6.47a
1 250	50.34 ± 0.53ab	26.95 ± 0.64a	11.45 ± 0.64a	0.67 ± 0.03a	89.41 ± 6.32a	12.14 ± 0.2b	101.55 ± 8.21a
1 750	46.19 ± 7.01b	14.93 ± 8.84c	5.34 ± 1.01b	0.78 ± 0.75a	67.24 ± 5.21b	12.22 ± 4.80b	79.46 ± 4.32b
2 250	29.24 ± 1.95c	8.39 ± 4.19d	3.60 ± 1.17c	0.72 ± 0.46a	41.95 ± 3.29c	8.02 ± 7.19c	49.97 ± 1.32c
2 750	25.65 ± 6.60cd	8.65 ± 3.29d	3.07 ± 1.49cd	0.94 ± 0.68a	38.31 ± 1.55d	6.84 ± 1.47cd	45.15 ± 5.21c
3 250	15.09 ± 1.74e	3.98 ± 0.95f	1.52 ± 0.73de	0.68 ± 0.10a	21.27 ± 3.45e	3.97 ± 0.39e	25.24 ± 2.22e
3 750	19.45 ± 4.59d	5.15 ± 1.86e	2.15 ± 0.44d	0.61 ± 0.36a	27.36 ± 1.54e	5.22 ± 0.87d	32.58 ± 1.05d
4 250	19.07 ± 6.54d	5.72 ± 3.09e	2.18 ± 1.34d	0.67 ± 0.14a	27.64 ± 4.87e	5.06 ± 1.81d	32.70 ± 3.21d
4 750	14.64 ± 5.84e	4.27 ± 2.43ef	1.67 ± 0.58de	0.43 ± 0.30a	21.01 ± 3.00e	6.06 ± 0.41cd	27.07 ± 5.21e
5 250	16.76 ± 3.56e	3.74 ± 1.86f	1.44 ± 0.01e	0.38 ± 0.23a	22.32 ± 1.14e	3.75 ± 0.14e	26.07 ± 3.02e
5 750	12.19 ± 3.92e	3.10 ± 1.36f	1.75 ± 0.30de	0.63 ± 0.32a	17.67 ± 4.23f	2.95 ± 1.00e	20.62 ± 1.39f

表 3　不同密度油松林林分生物量分配

Tab. 3　Biomass allocation in stands of *Pinus tabuliformis* with different densities

林分密度/(株·hm^{-2})	生物量/(t·hm^{-2})						
	树干	枝条	叶片	松果	地上生物量	地下生物量(根)	总生物量
750	44.40 ± 0.56d	15.32 ± 3.51c	7.74 ± 2.48cd	0.52 ± 0.34e	67.98 ± 2.44d	11.40 ± 4.27e	79.38 ± 3.14d
1 250	56.41 ± 1.26c	36.11 ± 1.64a	13.64 ± 1.68a	2.46 ± 2.97c	108.62 ± 8.23b	15.12 ± 2.80d	123.74 ± 8.65b
1 750	86.51 ± 5.70a	27.96 ± 6.59b	10.00 ± 1.91b	1.47 ± 1.40d	125.94 ± 4.21a	22.88 ± 9.01b	148.81 ± 5.41a
2 250	81.96 ± 3.76a	23.53 ± 6.00b	8.40 ± 2.6c	2.09 ± 0.71c	115.98 ± 3.55b	26.15 ± 1.59a	142.13 ± 10.23a
2 750	73.81 ± 7.62ab	24.69 ± 8.26b	8.82 ± 4.23c	2.70 ± 2.03c	110.02 ± 5.11ab	19.43 ± 3.6b	129.44 ± 6.58b
3 250	74.61 ± 9.47ab	15.33 ± 1.71c	5.39 ± 0.55d	4.24 ± 0.01a	99.57 ± 8.77c	13.67 ± 3.17e	113.24 ± 5.98c
3 750	66.35 ± 9.23b	17.86 ± 1.57c	8.13 ± 0.90c	1.67 ± 1.15d	94.01 ± 4.69c	20.46 ± 4.62b	114.47 ± 8.25c
4 250	71.86 ± 3.89ab	15.66 ± 6.47c	6.06 ± 1.83d	2.8 ± 0.78c	96.38 ± 6.26c	18.10 ± 6.61cd	114.48 ± 7.78c
4 750	66.48 ± 2.82b	19.55 ± 1.87c	7.64 ± 2.65cd	1.99 ± 1.37c	95.66 ± 8.56d	27.20 ± 1.93a	122.86 ± 7.65c
5 250	70.72 ± 2.87ab	15.92 ± 9.33c	6.08 ± 2.29d	1.61 ± 1.06d	94.33 ± 7.68c	15.86 ± 5.96d	110.19 ± 5.45c
5 750	70.00 ± 1.88ab	17.88 ± 7.92c	10.11 ± 1.74b	3.62 ± 1.93b	101.61 ± 6.47c	16.96 ± 5.07d	118.58 ± 6.23c

波动趋势。

2.5　林分密度影响油松生长及林下植被多样性的路径分析

结构方程模型 χ^2/df = 2.12, GFI = 0.97, CFI = 0.95, NFI = 0.94, 拟合度良好。由图 3 可知, 密度对油松生长特征有极显著负向影响(路径系数−0.864, $p < 0.01$), 对单株生物量有极显著负向影响(路径系数−0.827, $p < 0.01$), 对总生物量有极显著负向影响(路径系数−0.312, $p < 0.05$), 对灌木和草本物种多样性直接影响不显著($p > 0.05$)。单株油松生物量对总生物量有极显著正向影响(路径系数 0.783, p <0.01)。生长特征对单株生物量有显著正向影响(路径系数 0.446, p<0.05)。对草本多样性有显著正向影响(路径系数 0.479, $p < 0.05$), 对灌木多样性有显著负向影响(路径系数−0.518, p <0.05)。

3　讨　　论

3.1　林分密度对油松生长特征的影响

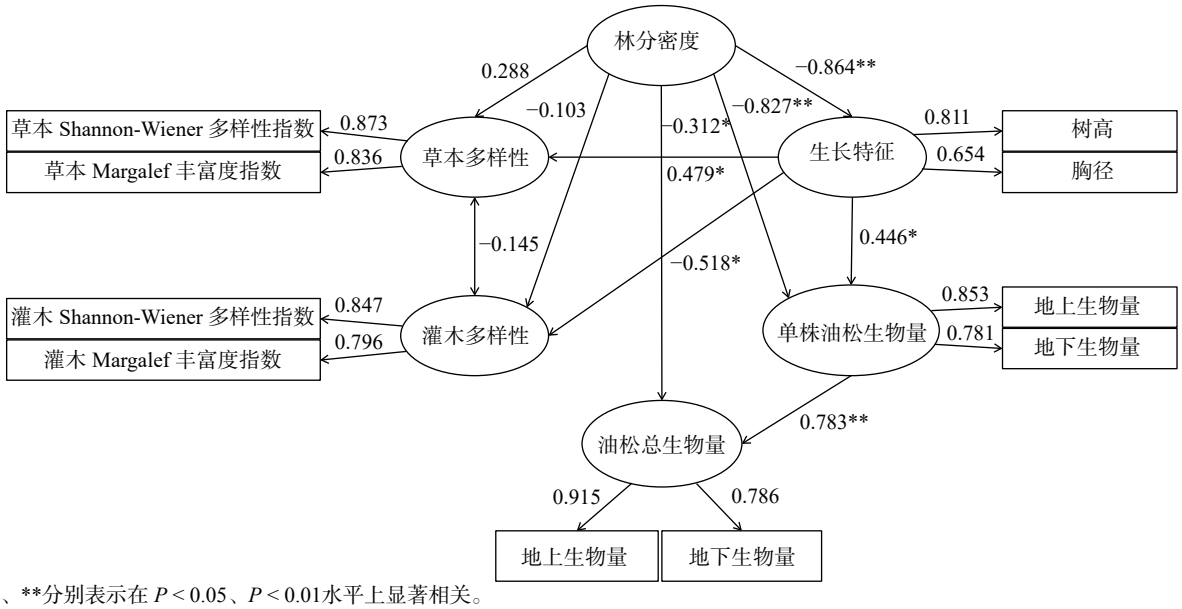
树高、胸径和冠幅作为林木生长因子, 能直观反映林木的生长情况[16]。本研究中, 油松人工林的密度变化对油松林的胸径具有显著影响, 平均胸径均随密度的增加整体呈减小趋势。这是由于低密度林分竞争较弱, 树木可获得充足光照与生长空间; 而随林分密度增大, 个体树木可利用的生长空间明显压缩, 且林木之间对有限的养分资源, 特别是土壤养分和水分的竞争加剧, 对林木正常的生长发育构成显著制约[17]。

而本研究中油松林的树高主要集中于 6 ~ 10 m,

表 4 不同密度油松林灌木层和草本层物种多样性

Tab. 4 Species diversity of the shrub and herbaceous layers under *Pinus tabuliformis* forests with varying stand densities

植被层	林分密度/(株·hm^{-2})	Margalef丰富度指数	Shannon-Wiener多样性指数	Simpson优势度指数	Pielou均匀度指数
灌木层	750	1.680 ± 0.02b	2.643 ± 0.02b	0.766 ± 0.05a	0.677 0 ± 0.01b
	1 250	2.696 ± 0.03a	2.242 ± 0.03c	0.563 ± 0.03b	0.496 ± 0.01c
	1 750	1.499 ± 0.04b	3.269 ± 0.04a	0.881 ± 0.04a	0.837 ± 0.01a
	2 250	1.997 ± 0.04b	2.862 ± 0.02b	0.812 ± 0.05a	0.662 ± 0.02b
	2 750	1.851 ± 0.05b	3.125 ± 0.03a	0.859 ± 0.03a	0.765 ± 0.03b
	3 250	1.306 ± 0.02c	2.423 ± 0.05b	0.696 ± 0.04b	0.655 ± 0.03b
	3 750	1.812 ± 0.03b	2.947 ± 0.05ab	0.778 ± 0.01a	0.682 ± 0.03b
	4 250	1.269 ± 0.02c	3.079 ± 0.03a	0.863 ± 0.02a	0.859 ± 0.06a
	4 750	1.900 ± 0.04b	3.163 ± 0.02a	0.850 ± 0.05a	0.759 ± 0.05b
	5 250	1.281 ± 0.05c	2.161 ± 0.03c	0.668 ± 0.03b	0.584 ± 0.05c
	5 750	1.231 ± 0.04c	2.777 ± 0.06b	0.818 ± 0.02a	0.803 ± 0.04a
草本层	750	1.496 ± 0.03b	2.658 ± 0.06a	0.729 ± 0.05a	0.703 ± 0.03a
	1 250	1.656 ± 0.05a	2.811 ± 0.02a	0.792 ± 0.06a	0.665 ± 0.03a
	1 750	1.225 ± 0.02b	2.143 ± 0.03a	0.654 ± 0.04a	0.632 ± 0.03a
	2 250	0.528 ± 0.01c	0.233 ± 0.01d	0.055 ± 0.01c	0.090 ± 0.01d
	2 750	0.214 ± 0.02d	0.842 ± 0.02b	0.387 ± 0.01b	0.531 ± 0.02b
	3 250	0.111 ± 0.03e	0.187 ± 0.02d	0.056 ± 0.02c	0.187 ± 0.01c
	3 750	0.317 ± 0.04d	0.180 ± 0.01d	0.044 ± 0.02c	0.090 ± 0.01d
	4 250	0.110 ± 0.02e	0.586 ± 0.02c	0.242 ± 0.01b	0.586 ± 0.02b
	4 750	0.129 ± 0.03e	0.043 ± 0.02e	0.009 ± 0.01e	0.043 ± 0.01d
	5 250	0.390 ± 0.03d	0.285 ± 0.03d	0.075 ± 0.01c	0.143 ± 0.01c
	5 750	0.147 ± 0.01e	0.074 ± 0.01e	0.018 ± 0.01d	0.074 ± 0.01d



*、**分别表示在 $P < 0.05$、$P < 0.01$水平上显著相关。

图 3 林分密度对油松生长特征和植物多样性的影响

Fig. 3 The impact of stand density on the growth characteristics of *Pinus tabuliformis* and plant diversity in the understory

树高小于 2 m 和大于 14 m 的油松株数极少，这与尤健健等[18]、韩照日格图等[19]研究结论相似。但王云霓等[20]发现密度对华北落叶松树高存在负影响，这可能与树种遗传特性和立地条件有关，且两者对树高生长的作用可能大于密度效应。

3.2　林分密度对油松生物量及其分配的影响

森林生物量是评估生态系统生产力与植被承载能力的重要指标，也是物质循环和能量流动的基础[8]。植物的生物量分配格局决定了植物获取资源的能力，也是反映植物间竞争水平的衡量标准[21−22]。本研究中，林分密度对油松人工林树干、枝条、叶片、松果、根系的生物量及其分配影响存在差异，高密度（≥3 250 株/hm^2）林分有利于油松树干、松果生物量分配，而低密度（≤1 750 株/hm^2）林分则有利于油松枝条和叶片的生物量分配。高密度林分中，林木为争夺光照资源优先保障树干的纵向生长，树干生物量占比提升[23]。低密度林分中光照充足，林木无需过度投入树干与根系生长，可分配更多生物量到枝条和叶片，以扩大光合面积、提升光合效率，促进生物量增加[24]。

随密度增大，冠层闭合导致光合效率下降[25]，且土壤养分竞争加剧[26−27]，单株可利用资源减少。为保证林分生物量及其质量，需结合干材质量、经济目标与生态功能综合确定最优经营密度[28]，适时间伐调控。针对本研究 30 年生的油松林，1 750 株/hm^2 可实现林分总生物量最大化。

3.3　林分密度对油松林下植被多样性的影响

物种多样性是评估植物群落中物种组成、林分结构、变迁演变以及群落稳定性的关键衡量指标[29]。本研究中，Margalef 丰富度指数在 1 250 株/hm^2 密度下达到最大值，后随林分密度增加呈波动降低趋势，这可能因为高密度下种间竞争加剧，尤其对光照的竞争，导致部分物种被淘汰[30]。灌木层 Shannon-Wiener 指数在 1 750 株/hm^2 密度下最高，但 Shannon-Wiener、Simspon 多样性指数与 Pielou 均匀度指数随密度波动，无显著规律性，反映林下植被群落尚未形成稳定的竞争–共存平衡，这可能与油松林未经抚育干扰，密度效应可能被林分自然异质性部分掩盖。

综合来看，中低密度（1 250 ~ 1 750 株/hm^2）有利于维持较高的林下植被综合多样性。其中，1 750 株/hm^2 更利于灌木层物种多样性与群落优势度的提升，1 250 株/hm^2 密度下灌木层物种丰富度最高，草本层多样性也处于最优水平，在物种丰富度与群落均匀度间实现了较好的均衡。为兼顾灌木与草本层的多样性保护，建议将林分密度控制在 1 250 ~ 1 750 株/hm^2 区间，为林下植被的生长与更新创造适宜的环境条件。

3.4　基于结构方程模型的林分密度对油松生长和植被多样性的影响

本研究通过结构方程模型定量解析了林分密度对油松生长特征、生物量积累及林下植被多样性的直接与间接调控路径，揭示了晋西黄土区 30 年生油松人工林“密度—生长—生物量—多样性”的耦合机制。模型结果显示，林分密度是驱动油松人工林生态系统结构与功能变化的核心因子。林分密度对油松生长特征呈极显著负向调控，这与 2.2 节中“林分密度与胸径呈极显著负相关”的实测结果完全一致，也符合森林生态学的基本规律。随着林分密度增大，林木间对光照、水分和养分的种内竞争加剧，导致单株林木的径向生长受到显著抑制。密度对单株生物量的极显著负向影响，正是这种生长抑制效应的直接体现。实测中林分总生物量随密度增大呈先增后减的单峰变化趋势，而结构方程模型中密度对总生物量表现为直接负向效应。这种结果，实际上是密度的直接负向效应与生长特征、单株生物量的间接正向效应共同作用的结果，在低密度阶段（< 1 750 株/hm^2），密度增加带来的株数增加效应超过了单株生物量下降的效应，因此林分总生物量随密度增大而上升；当密度超过 1 750 株/hm^2 后，单株生物量的急剧下降无法被株数增加所弥补，密度的直接负向效应占据主导，导致林分总生物量随密度增大而下降。这一结果清晰地解释了林分总生物量单峰变化的内在机制，也验证了 1 750 株/hm^2 是晋西黄土区 30 年生油松人工林生产力最优密度的结论。林分密度对灌木和草本多样性均无显著直接影响，主要通过油松生长特征实现间接调控，且对灌木和草本的调控方向存在显著差异。密度通过负向影响油松生长特征，间接正向影响草本多样性，而对灌木多样性表现为间接负向影响。这种差异化调控机制与灌木和草本的生态适应性差异密切相关。草本植物多为耐阴或中性物种，对林冠层遮阴的耐受性较强，油松生长越好，林下适度的遮阴环境越能抑制强光对草本植物的灼伤，同时减少土壤水分蒸发，因此生长特征对草本多样性呈正向影响；而油松生长越好，林冠层郁闭度越高，林下光照条件越差，会显著抑制灌木的生长与更新。

本研究明确了晋西黄土区油松人工林“生产力最优密度 1 750 株/hm^2、多样性最优密度 1 250 株/hm^2”的阈值特征，揭示了林分密度对生产力与多样性的权衡调控机制。研究结果可为晋西黄土区油松人工林的可持续经营提供精准的密度调控依据，但

本研究仅针对 30 年生油松人工林开展，不同林龄油松林的密度调控阈值、长期经营下密度—生长—多样性的动态变化规律，仍需通过长期定位监测进一步研究。

4 结　　论

（1）油松人工林平均树高随密度呈波动变化，平均胸径随密度增加呈递减趋势。林分总生物量在 1 750 株/hm^2 时达最大值 148.81 t/hm^2，不同密度间生物量差异显著（$p < 0.05$）。油松生物量分配随林分密度变化，高密度林分（≥3 250 株/hm^2）更利于树干、松果的生物量分配，低密度林分（≤1 750 株/hm^2）更利于枝条和叶片的生物量分配。

（2）林下灌木层 Shannon-Wiener 多样性指数在 1 750 株/hm^2 时达峰值，Margalef 丰富度指数在 1 250 株/hm^2 时最大；草本层 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数在 1 250 株/hm^2 时最优；林分密度通过油松生长特征间接正向调控草本多样性，对灌木多样性表现为间接负向影响。

（3）晋西黄土区 30 年生油松人工林在密度 1 750 株/hm^2 时油松总生物量最大。建议通过间伐将林分密度调控至 1 250 ~ 1 750 株/hm^2 区间，兼顾林分生产力与林下生物多样性保护，实现油松人工林生态与生产功能的协同提升。

参 考 文 献

［1］ 张秀萍. 推进林草生态保护建设, 筑牢生态安全屏障 [J]. 中国林业产业, 2023(8): 46−47.
Zhang X P. Promote the construction of forest and grass ecological protection and build an ecological security barrier [J]. China Forestry Industry, 2023(8): 46−47.

［2］ 陈长启, 和璐璐, 段劼. 北京油松人工林生长对密度和立地的响应 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2024, 44(6): 8−20.
Chen C Q, He L L, Duan J. Growth pattern to density and site condition of *Pinus tabuliformis* plantation in Beijing [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2024, 44(6): 8−20.

［3］ 杨盛扬. 马尾松人工林密度效应规律研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
Yang S Y. Study on density effect law of *Pinus massoniana* plantation[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2022.

［4］ 罗也, 王君, 杨雨春, 等. 东北胡桃楸次生林生长随林龄和林分密度的变化规律 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(6): 10−19.
Luo Y, Wang J, Yang Y C, et al. Growth patterns of *Juglans mandshurica* secondary forest with stand age and stand density in Northeast China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(6): 10−19.

［5］ 仲怡铭, 陈徵尼, 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.

［6］ 郭艳杰, 毕华兴, 赵丹阳, 等. 不同密度油松林地土壤水碳分布特征及其耦合关系 [J]. 应用生态学报, 2025, 36(1): 50−58.
Guo Y J, Bi H X, Zhao D Y, et al. Soil water and carbon distribution characteristics and their coupling relationship in *Pinus tabuliformis* plantations with different densities [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(1): 50−58.

［7］ Chen S, Wei W, Huang Y. Biophysical controls on canopy transpiration of *Pinus tabulaeformis* under different soil moisture conditions in the Loess Plateau of China [J]. Journal of Hydrology, 2024, 631: 130799.

［8］ 韩新生, 许浩, 郭永忠, 等. 六盘山西侧华北落叶松林密度对生长和林分蓄积的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(2): 169−179.
Han X S, Xu H, Guo Y Z, et al. Influence of stand density on growth and stand volume of *Larix principis-rupprechtii* plantations on the west side of Liupan Mountain [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023, 58(2): 169−179.

［9］ 卢德浩, 陈世清, 谢惠燕, 等. 不同密度杉木人工林林分生长和林分结构差异研究 [J]. 西北林学院学报, 2023, 38(6): 162−170.
Lu D H, Chen S Q, Xie H Y, et al. Differences in stand growth and structure of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different densities [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(6): 162−170.

［10］ Zhang Y, Liu T, Guo J, et al. Changes in the understory diversity of secondary *Pinus* tabulaeformis forests are the result of stand density and soil properties [J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 28: e01628.

［11］ Chen Y, Cao Y. Response of tree regeneration and understory plant species diversity to stand density in mature *Pinus tabulaeformis* plantations in the hilly area of the Loess Plateau, China [J]. Ecological Engineering, 2014, 73: 238−245.

［12］ 兰道云, 毕华兴, 赵丹阳, 等. 晋西黄土区不同密度油松人工林保育土壤功能评价 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 189−196.
Lan D Y, Bi H X, Zhao D Y, et al. Evaluation on soil conservation function of *Pinus tabulaeformis* plantation with different densities in the loess area of western Shanxi Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 189−196.

［13］ Qing S, Yang H, Xu Z, et al. Mid- to long-term influence of gaps on natural regeneration in *Pinus tabuliformis* plantations on the Loess Plateau [J]. Forest Ecology and Management, 2025, 584: 122612.

［14］ Wang J, Gao J, Zhang H, et al. Changes in rhizosphere soil fungal communities of *Pinus tabuliformis* plantations at different development stages on the Loess Plateau [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(12): 6753.

［15］ 宋永昌. 植被生态学 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2017.
Song Y C. Vegetation ecology[M]. 2nd ed. Beijing: Higher

Education Press, 2017.

[16] Jagodziński A M, Dyderski M K, Gęsikiewicz K, et al. Effects of stand features on aboveground biomass and biomass conversion and expansion factors based on a *Pinus sylvestris* L. chronosequence in Western Poland [J]. European Journal of Forest Research, 2019, 138(4): 673−683.

[17] 李若楚, 徐剑莹, 李铁华, 等. 不同密度对长周期经营杉木林生长、土壤理化性质和微生物的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2025, 45(2): 165−174.
Li R C, Xu J Y, Li T H, et al. Effects of different densities on growth, soil physicochemical properties and microorganisms of long-period management *Cunninghamia lanceolata* forest [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025, 45(2): 165−174.

[18] 尤健健, 张文辉, 邓磊. 油松中龄林间伐的密度效应 [J]. 西北林学院学报, 2015, 30(1): 172−177.
You J J, Zhang W H, Deng L. Intermediate cutting density effects on middle-aged *Pinus* tabulaeformis plantation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(1): 172−177.

[19] 韩照日格图, 白玉荣, 王立军, 等. 沙地樟子松林分密度对林木生长的影响研究 [J]. 林业调查规划, 2021, 46(4): 1−6.
Han Z, Bai Y R, Wang L J, et al. Effects of stand density of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on forest growth in sandy land [J]. Forest Inventory and Planning, 2021, 46(4): 1−6.

[20] 王云霓, 高孝威, 苏雅拉巴雅尔, 等. 林分密度和林龄对华北落叶松人工林生长特征的影响 [J]. 内蒙古林业科技, 2018, 44(3): 12−16.
Wang Y N, Gao X W, Su Y, et al. Effects of different densities and ages on growth of *Larix principis-rurechitii* plantation in Daqing Mountains of Inner Mongolia [J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2018, 44(3): 12−16.

[21] 李宇婷, 马爱云, 苗铮, 等. 邻域竞争对长白落叶松生物量及其分配的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(4): 92−102.
Li Y T, Ma A Y, Miao Z, et al. Effects of neighborhood competition on biomass and its allocation of *Larix olgensis* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(4): 92−102.

[22] 高青青, 于小萌, 许竹锐, 等. 坡向对冀北山地蒙古栎幼树生长及生物量分配的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(12): 49−58.
Gao Q Q, Yu X M, Xu Z R, et al. Effects of aspect on growth and biomass allocation of *Quercus mongolica* saplings in the mountain area of northern Hebei Province, northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(12): 49−58.

[23] Farooq T H, Wu W, Tigabu M, et al. Growth, biomass production and root development of Chinese fir in relation to initial planting density [J]. Forests, 2019, 10(3): 236.

[24] Tun T N, Guo J, Fang S, et al. Planting spacing affects canopy structure, biomass production and stem roundness in poplar plantations [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2018, 33(5): 464−474.

[25] 唐鹏, 张建军, 赵炯昌, 等. 晋西黄土区油松人工林空间结构与水文效应的关系 [J]. 生态学杂志, 2025, 44(5): 1417−1426.
Tang P, Zhang J J, Zhao J C, et al. Relationship between spatial structure and hydrological effect of *Pinus tabuliformis* plantation in the loess region of western Shanxi Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(5): 1417−1426.

[26] 宋爱云, 董林水, 周金星, 等. 晋西黄土丘陵边缘区油松人工林密度调控与生物量特征 [J]. 西北林学院学报, 2016, 31(4): 7−11,66.
Song A Y, Dong L S, Zhou J X, et al. Suitable density management and biomass characters of *Pinus* tabulaeformis plantations in the ecotone between bedrock region and loess hill area of west Shanxi Province [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(4): 7−11,66.

[27] 胡亚伟, 施政乐, 刘畅, 等. 晋西黄土区刺槐林密度对林下植物多样性及土壤理化性质的影响 [J]. 生态学杂志, 2023, 42(9): 2072−2080.
Hu Y W, Shi Z L, Liu C, et al. Effects of stand densities on understory vegetation diversity and soil physicochemical properties of *Robinia pseudoacacia* forest in loess region of western Shanxi Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(9): 2072−2080.

[28] 李晓燕, 孙建军, 段爱国, 等. 杉木幼龄林生长的良种与初植密度互作效应研究 [J]. 林业科学研究, 2024, 37(6): 62−72.
Li X Y, Sun J J, Duan A G, et al. Interaction effects between improved varieties and planting densities in young Chinese fir plantations [J]. Forest Research, 2024, 37(6): 62−72.

[29] 猴倩倩, 刘婧, 王国华, 等. 晋西北丘陵风沙区柠条林下草本植物群落组成和种群生态位变化特征 [J]. 生态学报, 2022, 42(22): 9069−9090.
Gou Q Q, Liu J, Wang G H, et al. Changes of herbaceous plant composition and niche characteristics in different-aged artificial *Caragana korshinskii* forest in sandy-hilly region of northwest Shanxi Province, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9069−9090.

[30] 吴海平, 孙清琳, 张彦君, 等. 不同密度油松人工林群落特征与物种多样性耦合关系 [J]. 西北林学院学报, 2022, 37(5): 1−8.
Wu H P, Sun Q L, Zhang Y J, et al. Coupling relationship between community characteristics and species diversity of *Pinus tabuliformis* plantations with different densities [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(5): 1−8.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　臧润国）