

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第9期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.09.017

论文标题： 林分密度对胡桃楸天然次生林林下植物多样性与土壤养分的影响

作　　者： 王雨童，吕跃东，张建瑛，等

收稿日期： 2025-11-14

引文格式： 王雨童,吕跃东,张建瑛,等.林分密度对胡桃楸天然次生林林下植物多样性与土壤养分的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(9):191-200.

Wang Y T, Lyu Y D, Zhang J Y, et al. Effect of stand density on understory plant diversity and soil nutrients in *Juglans mandshurica* natural secondary forest[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):191-200.

相关论文推荐

Recommended articles

林下植被对胡桃楸人工林细根生物量和形态特征的影响

Effects of understory vegetation on the fine root biomass and morphological characteristics in *Juglans mandshurica* plantation

林分类型和密度对增城林场人工林林下植物多样性的影响

Effects of understory plant diversity on stand type and density in Zengcheng forest farm

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

Effects of different densities on growth, soil physicochemical properties and microorganisms of long-period management *Cunninghamia lanceolata* forest

间伐保留密度对基于大径材培育下杉木人工林生长和材种结构的影响

Effects of thinning retention density on growth and wood species structure of Chinese fir plantation based on large-diameter timber cultivation

张广才岭不同林分密度下物种组成及其多样性

Species composition and diversity under different stand densities in Zhangguangcailing

大青山不同林龄、密度油松人工林细根生物量及其与土壤养分的关系

Relationship between fine root biomass and soil nutrients in *Pinus tabulaeformis* plantations with different stand ages and densities in Daqing mountain

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.09.017
http: //qks.csuft.edu.cn

林分密度对胡桃楸天然次生林林下植物多样性与土壤养分的影响

王雨童，吕跃东，张建瑛，孔文汇，刘忠玲，葛文志
（黑龙江省林业科学研究所 黑龙江省速生林木培育重点实验室，黑龙江 哈尔滨 150081）

摘　要：【目的】探究林分密度对胡桃楸 *Juglans mandshurica* 林下植物群落结构、物种多样性及土壤养分含量的影响，揭示植物多样性与土壤养分的内在联系。【方法】以帽儿山不同林分密度（840、680、480 株·hm^{-2}）的胡桃楸天然次生林为研究对象，采用野外群落调查与室内土壤理化分析相结合的方法，测定林下植物的物种组成、重要值、多样性指数以及不同土层土壤养分指标，并进行相关性分析。【结果】1）在整个研究区域内胡桃楸林下共调查到 65 种植物。其中木本植物 16 种，隶属于 11 科 14 属；草本植物 49 种，隶属于 28 科 45 属。2）木本层的优势种为暴马丁香 *Syringa reticulata* subsp. *amurensis*，其重要值在 480 株·hm^{-2} 的林分密度中最大，为 85.23%；草本层的优势种为茵草 *Beckmannia syzigachne*，其重要值在 680 株·hm^{-2} 的林分密度中最大，为 50.49%。3）物种丰富度在林分密度为 680 株·hm^{-2} 时最高，其木本植物和草本植物的丰富度指数分别为 11 和 31；Simpson、Shannon-Wiener 多样性指数随着林分密度的减小表现为先升高后降低的趋势，林分密度为 680 株·hm^{-2} 时多样性指数值最高；均匀度指数随着林分密度的减小而增大，当林分密度为 480 株·hm^{-2} 时草本植物的均匀度指数最高，为 0.81。4）土壤养分含量在 0 ～ 10 cm 土层最高，当林分密度为 680 株·hm^{-2} 时，该土层中的有机质、全氮、碱解氮和有效磷含量显著高于其他林分密度。木本植物多样性与土壤全氮含量呈极显著正相关，与土壤 pH 值呈显著负相关；草本植物丰富度与有效磷含量呈极显著正相关。【结论】680 株·hm^{-2} 是本研究区域内维持胡桃楸林下植物多样性和提升土壤肥力的最适林分密度。

关键词：胡桃楸天然次生林；林分密度；植物多样性；土壤养分
中图分类号：S725.6　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)09-0191-10

Effect of stand density on understory plant diversity and soil nutrients in *Juglans mandshurica* natural secondary forest

Wang Yutong, Lü Yuedong, Zhang Jianying, Kong Wenhui, Liu Zhongling, Ge Wenzhi

(Heilongjiang Forestry Institute, Key Laboratory of Fast-growing Tree Cultivating of Heilongjiang Province, Harbin 150081, Heilongjiang, China)

Abstract:【Objective】To investigate the effects of stand densities on the structure of understory plant communities, species diversity and soil nutrient content in *Juglans mandshurica* forests, and to reveal the intrinsic relationship between plant diversity and soil nutrients. 【Method】This study focused on natural secondary forests of *Juglans mandshurica* on Mao'er mountain with different densities (840, 680 and 480 trees·hm^{-2}). Through field community surveys and indoor soil analysis, the species composition, importance values, diversity index of understory woody and herbaceous plants were investigated, and soil nutrient indicators at different soil layer depths were measured for correlation analysis.【Result】1) A total of 65 plant species were surveyed under the *Juglans mandshurica* tree forest throughout the study area, including 16 woody species belonging to 11 families and 14 genera, and 49 herbaceous species belonging to 28 families and 45 genera; 2) The dominant species of the woody layer is *Syringa reticulata subsp. amurensis*, with a maximum importance value of 85.23% at a stand density of 480 trees·hm^{-2}; the dominant species of the herbaceous layer is *Beckmannia*

收稿日期（Received）：2025-11-14　　**修订日期**（Revised）：2025-12-29
基金项目：黑龙江省省属科研院所科研业务费项目（JC-202506）；国家重点研发计划项目（2017YFD0600605）。
第一作者：王雨童（18249662623@163.com），实习研究员，硕士。
通信作者：刘忠玲（30083936@qq.com），研究员，博士；葛文志（49554190@qq.com），研究员，硕士。
引文格式：王雨童 , 吕跃东 , 张建瑛 , 等 . 林分密度对胡桃楸天然次生林林下植物多样性与土壤养分的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(9):191-200.
Wang Y T, Lü Y D, Zhang J Y, et al. Effect of stand density on understory plant diversity and soil nutrients in *Juglans mandshurica* natural secondary forest[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):191-200.

syzigachne, with a maximum importance value of 50.49% at a stand density of 680 trees·hm^{-2}; 3) Species richness is highest when the stand density is 680 trees·hm^{-2}, with the richness indices of woody and herbaceous plants being 11 and 31, respectively; the Simpson and Shannon-Wiener diversity indices show a trend of first increasing and then decreasing as stand density decreases, reaching their highest values at a stand density of 680 trees·hm^{-2}; the evenness index increases as stand density decreases, and the highest evenness index for herbaceous plants is 0.81 at a stand density of 480 trees·hm^{-2}; 4) The nutrient content in the soil is highest in the 0-10 cm layer. When the stand density is 680 trees·hm^{-2}, the contents of organic matter, total nitrogen, alkaline nitrogen and available phosphorus in this soil layer are significantly higher than those in other density treatments. Woody plant diversity is extremely significantly positively correlated with total soil nitrogen content and significantly negatively correlated with soil pH, while herbaceous plant richness is extremely significantly positively correlated with the content of available phosphorus.【Conclusion】A stand density of 680 trees·hm^{-2} is the optimal density in the study area for maintaining understory plant diversity in *Juglans mandshurica* forests and enhancing soil fertility. Stand density indirectly regulates the composition and diversity of plant communities by altering the soil environment, this study will provide a reasonable management density for secondary forests of *Juglans mandshurica* and offer a scientific basis for the sustainable management of *Juglans mandshurica*.

Keywords: *Juglans mandshurica*; stand densities; plant diversity; soil nutrients

森林是陆地表面最重要的生态系统，其结构复杂，不断进行能量转换和物质循环，生物生产力高，生态效应显著，对人类社会可持续发展具有重大意义[1-2]。森林培育过程中，林分密度是林业工作者可调控的主要营林因子，合理的林分密度在森林培育及生产经营中至关重要[3-4]。林分密度不仅影响林分的生长发育及林地生产力水平，而且影响森林群落中光、热、水分等生态因子的分配，从而改变林下环境，使得林下物种结构和多样性发生改变，最终影响林地土壤养分[5]。土壤作为植物生长的载体，其养分种类及含量直接影响物种多样性，植物从土壤中吸收养分的同时，又通过凋落物的分解将有机质等养分返还土壤，构成生物小循环[6]。植物的多样性作为森林生态系统群落结构和功能稳定性、复杂性的重要量度指标，反映了生态系统中各种植物对资源环境的竞争及协调利用[7-8]。林下植物的多样性与林分结构密切相关，林分密度是调控林分结构的一种重要手段，对提高林下植物多样性、减少林分病虫害发生和增强林分稳定性均具有重要意义[9]。植物多样性越丰富，该林分的稳定性和恢复性越强[10]。植物和土壤之间的相互作用形成了完整的林地生态系统[11-12]，生物多样性是衡量森林质量状况的指标之一，丰富的物种组成会使生态系统更加稳定[13-14]。

因此，研究不同林分密度的林地植物多样性和土壤养分状况，对于探究林地自我修复与调节能力以及可持续经营管理具有重要的参考价值[15]。目前，关于林分密度对林下植物多样性和土壤理化性质的影响研究较多，因研究区域环境条件、林分类型或林分密度的差异，研究结果大相径庭。马尾松 *Pinus massoniana* 人工林密度越小，林下植物丰富度和多样性指数越高[16]。随着柏木 *Cupressus funebris* 人工林密度的增加，灌木层物种多样性指数呈先增后减的趋势，草本层呈先增后减再增再减的双峰形变化模式[12]。随着林分密度的增加，油松 *Pinus tabuliformis* 次生林林下草本层和灌木层植物呈现由喜光植物到耐阴植物的变化[17]。云杉 *Picea asperata* 林下植物多样性指数随林分密度的增加而减小[18]。650 株·hm^{-2} 的林分密度能够促进杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林下植被发育，增加林下植被物种多样性[19]。

黑龙江省帽儿山林区天然林面积占森林总面积的 85% 以上，其中胡桃楸 *Juglans mandshurica* 为天然次生林群落的优势建群树种[20]，以胡桃楸为主的森林群落对该地区生态系统的维持起着重要作用。基于此，以胡桃楸为研究对象，调查不同林分密度下的林下植物组成，分析其林下植物多样性与土壤养分含量随林分密度的变化规律，探究林分密度对林下植被多样性和土壤养分的影响，确定黑龙江地区胡桃楸次生林的最适林分密度，以期为胡桃楸次生林可持续经营提供理论参考。

1 试验地概况

研究地点位于东北林业大学帽儿山实验林场（127°36′ ～ 127°39′ E，45°23′ ～ 45°26′ N），平均海拔 390 m。气候类型属温带大陆性季风气候，1 月平均温度 −20 ℃，7 月平均温度 21 ℃，年均气温 3 ℃；年平均湿度 70%，年降水量 723.8 mm，年平均蒸发量 1 094 mm；无霜期 120 ～ 140 d，≥ 10 ℃ 的积温 2 526 ℃。地带性土壤为暗棕壤，土壤平均厚度 43 cm，腐殖质层平均厚度 10 cm。

2 研究方法

2.1 样地设置

本研究选取的胡桃楸样地为经轻度人为干扰

后自然演替形成的天然次生林，分布于南坡，海拔 375 m。林分伴生树种以榆树 *Ulmus pumila* 为主，混有少量水曲柳 *Fraxinus mandshurica*、山杨 *Populus davidiana* 和白桦 *Betula platyphylla*。为探究密度效应，选取低（MJ3，480 株·hm^{-2}）、中（MJ2，680 株·hm^{-2}）、高（MJ1，840 株·hm^{-2}）3 种林分密度的胡桃楸次生林为研究对象，于各林分密度内分别设置 3 块 20 m×30 m 的标准地。所有标准地布设时确保相邻间距大于 100 m，并远离林缘，以最大限度减少边缘效应与样地间的干扰。样地基本概况见表 1。

表 1　胡桃楸次生林样地基本特征 †

Table 1　Basic features of *Juglans mandshurica* natural secondary forest with different stand densities

样地 Plot No.	树种组成（胸径≥ 4 cm） Species (DBH ≥ 4 cm)	林分密度 Stand density /（株·hm^{-2}）	坡度 Slope /(°)	坡位 Slope position	平均树高 Mean height /m	平均胸径 Mean DBH /cm
MJ1	5 胡 3 榆 1 水 1 杨	840	4	下	11.80±0.17	18.30±0.09
MJ2	6 胡 3 榆 1 桦	680	12	中下	18.20±0.28	19.60±0.17
MJ3	6 胡 4 榆	480	5	下	13.20±0.13	21.37±0.38

† 表中数据为平均值 ± 标准误差（n=3）。The data in the table are expressed as mean ± SD (n=3).

2.2　植物多样性的调查

对各样地内胡桃楸林下植被开展群落调查，样方布设采用典型取样法：于每块样地四角及中心共计布设 5 个规格 5 m×5 m 灌木样方，全面调查样方内全部林下木本植物，逐一记录物种名称、植株数量、冠层盖度、株高等指标。同时，在各灌木样方边角嵌套布设 1 个 1 m×1 m 草本小样方，同步开展草本群落调查，记录草本物种、植株数量（丛生草本统计丛数）、植被盖度等基础参数。

2.3　土壤养分含量的测定

本研究采用分层混合法采集土壤样品，在每块 20 m×30 m 的标准样地内，随机布设 3 个土壤采样点。在每个采样点，按 0 ～ 10、10 ～ 20、20 ～ 30 cm 3 个土层深度分别采集土壤，每层采集 3 个样品，同时将同一土层的样品均匀混合，随即标记并装入采样袋。所有样品带回实验室后，经自然风干、研磨并过筛预处理，参照文献 [21] 中所述方法测定土壤中氮、磷、钾等含量。

2.4　物种多样性

物种多样性采用 Simpson 多样性指数（D）、Shannon-Wiener 多样性指数（H）、Patrick 物种丰富度（R）、Pielou 均匀度指数（J）来表示。重要值采用相对密度、相对盖度、相对频度之和的平均值来表示。其中相对密度是指某种植物的密度占全部植物总密度的百分比，相对盖度是指某种植物的盖度占全部植物总盖度的百分比，相对频度是指某种植物的频度占全部植物总频度的百分比。具体公式如下：

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{S} P_i^2 \text{；} \tag{1}$$

$$H = -\sum_{i=1}^{S} P_i^2 \ln P_i \text{；} \tag{2}$$

$$R = S \text{；} \tag{3}$$

$$J = \frac{H}{\ln S} \text{。} \tag{4}$$

式中：P_i=n_i/N，n_i 为样方内某物种的个体数，N 为样方内所有物种的个体数；S 为样方内物种数。

2.5　数据处理

用 Excel 2019 软件整理数据，用 SPSS 23.0 软件对整理后的数据进行方差分析及相关性分析，用 Origin 2024 软件作图。

3　结果与分析

3.1　林分密度对胡桃楸林下植物组成及重要值的影响

在整个研究区域内，胡桃楸林下共调查到 65 种植物。其中木本植物 16 种，隶属于 11 科 14 属；草本植物 49 种，隶属于 28 科 45 属。由表 2 可知，MJ1 和 MJ3 木本层的优势种均为暴马丁香 *Syringa reticulata* subsp. *amurensis*，其重要值在 MJ3 中最大（85.23%），在 MJ1 中重要值为 73%；MJ2 木本层的优势种为东北扁禾木 *Prinsepia sinensis*，其重要值为 53.42%。

不同林分密度林下草本植物组成及重要值见表 3。由表 3 可知，不同林分密度下胡桃楸林下草本层中优势种均为菌草 *Beckmannia syzigachne*，其在中等密度样地（MJ2）的重要值为 50.49%，高于 MJ1（46.01%）和 MJ3（37.1%）。

表 2 不同林分密度下胡桃楸林下木本植物组成及重要值
Table 2 Understory woody plant composition and importance values of *Juglans mandshurica* forest at different stand densities

种名 Species name	重要值 Importance values /%		
	MJ1	MJ2	MJ3
暴马丁香 *Syringa reticulata* subsp. *amurensis*	73.00	36.37	85.23
东北卫矛 *Euonymus sacrosancta*	34.31	28.76	8.44
东北扁核木 *Prinsepia sinensis*	16.46	53.42	8.44
北悬钩子 *Rubus arcticus*	8.70	18.91	
秋子梨 *Pyrus ussuriensis*	8.41		10.80
五味子 *Schisandra chinensis*	8.27	23.70	
稠李 *Prunus padus*	8.19	21.46	
红松 *Pinus koraiensis*	7.96		
鼠李 *Rhamnus davurica*	7.31		
小叶鼠李 *Rhamnus parvifolia*		16.30	
刺五加 *Eleutherococcus senticosus*		14.92	
东北鼠李 *Rhamnus schneideri*		11.15	
黄檗 *Phellodendron amurense*		7.54	
金银忍冬 *Lonicera maackii*		7.46	9.61
东北茶藨子 *Ribes mandshuricum*			8.79
东北山梅花 *Philadelphus schrenkii*			8.68

3.2 林分密度对胡桃楸林下植物多样性的影响

物种多样性是反映植物群落结构和功能的重要指标。由表 4 可知，随着林分密度的降低，林下木本植物的多样性指数（*R*、*D*、*H* 和 *J*）呈先升高后降低的趋势，峰值出现在林分密度为 680 株·hm^{-2} 时。MJ2 的木本植物种数和草本植物种数分别占总种数的 68.75% 和 63.27%；MJ2 的木本植物丰富度指数为 11，高于 MJ1（9）和 MJ3（7）。MJ2 木本植物的各项多样性指数均最高：与 MJ1 相比，*D*、*H* 和 *J* 值分别高出 46.97%、57.25% 和 44.10%；与 MJ3 相比，*D*、*H* 和 *J* 值分别高出 104.13%、115.69% 和 75.05%。草本植物的多样性指数（*D*、*H*）与木本植物的趋势一致，但均匀度指数（*J*）随林分密度的降低而持续上升，MJ3 的均匀度指数为 0.812 1，较 MJ1 和 MJ2 分别提高了 5.55% 和 1.86%。

3.3 林分密度对胡桃楸林下土壤养分含量的影响

由图 1 可知，胡桃楸林下土壤整体呈微酸性，

表 3 不同林分密度下胡桃楸林下草本植物组成及重要值
Table 3 Understory herbaceous plant composition and importance values of *Juglans mandshurica* forest at different stand densities

种名 Species name	重要值 Importance value /%			种名 Species name	重要值 Importance value /%		
	MJ1	MJ2	MJ3		MJ1	MJ2	MJ3
菌草 *Beckmannia syzigachne*	46.01	50.49	37.10	欧洲冷蕨 *Cystopteris sudetica*		16.06	
毛茛 *Ranunculus japonicus*	36.95	16.41	8.08	中华蹄盖蕨 *Athyrium sinense*		14.75	7.70
蚊子草 *Filipendula digitata*	36.54	26.79	16.49	山麦冬 *Liriope spicata*		13.84	
东北羊角芹 *Aegopodium alpestre*	35.06	19.19	33.39	大叶风毛菊 *Saussurea grandifolia*		8.08	
莓叶委陵菜 *Potentilla fragarioides*	22.90		14.24	山酢浆草 *Oxalis griffithii*		7.97	
猴腿蹄盖蕨 *Athyrium multidentatum*	19.27	31.62	51.75	乌苏里薹草 *Carex ussuriensis*		7.44	9.21
鸡腿堇菜 *Viola acuminata*	15.59	6.81		菊芋 *Helianthus tuberosus*		7.44	
拉拉藤 *Galium spurium*	14.72		6.84	铃兰 *Convallaria keiskei*		7.37	
萝藦 *Metaplexis japonica*	14.72			金莲花 *Trollius chinensis*		7.32	
天门冬 *Asparagus cochinchinensis*	14.31			短毛独活 *Heracleum moellendorffii*		7.26	
东北山黧豆 *Lathyrus vaniotii*	14.23			阴地蒿 *Artemisia sylvatica*		7.20	6.90
白花碎米荠 *Cardamine leucantha*	14.15	21.95	22.46	水金凤 *Impatiens noli-tangere*		7.20	13.86
山野豌豆 *Vicia amoena*	9.24	7.14	7.42	唐松草 *Thalictrum aquilegiifolium*		7.08	15.90
剪秋罗 *Silene fulgens*	8.15			北重楼 *Paris verticillata*		7.08	
龙牙草 *Agrimonia pilosa*	7.46			盒子草 *Actinostemma tenerum*		6.87	14.21
柳叶菜 *Epelobium hirsutum*	7.41			林大戟 *Euphorbia lucorum*		6.84	
草本水杨梅 *Geum aleppicum*	7.35			老鹳草 *Geranium wilfordii*		6.84	
风毛菊 *Saussurea japonica*	7.23	14.22		冷蕨 *Cystopteris fragilis*			18.86
泽芹 *Sium suave*	7.23			金腰子 *Chrysosplenium serreanum*			15.90
林奈蝇子草 *Silene linnaeana*	7.17	15.82	8.07	山茄子 *Brachybotrys paridiformis*			14.38
水珠草 *Circaea lutetiana*	7.15	6.90		尾叶香茶菜 *Isodon excisus*			14.31
东北百合 *Lilium distichum*	7.15			毛金腰 *Chrysosplenium pilosum*			7.96
乌头 *Aconitum carmichaelii*	7.00	6.96		类叶升麻 *Actaea asiatica*			7.00
林问荆 *Equisetum sylvaticum*		25.39		野芝麻 *Lamium barbatum*			6.95
掌叶铁线蕨 *Adiantum pedatum*		17.00					

表 4　不同林分密度胡桃楸林下物种多样性指数

Table 4　Species diversity index of understory species in different stand densities of *Juglans mandshurica* forest

样地 Plot No.	木本植物 Woody plant				草本植物 Herbaceous plant			
	R	*D*	*H*	*J*	*R*	*D*	*H*	*J*
MJ1	9	0.591 7	1.370 7	0.623 8	23	0.872 1	2.412 6	0.769 4
MJ2	11	0.869 6	2.155 4	0.898 9	31	0.912 6	2.737 9	0.797 3
MJ3	7	0.426 0	0.999 3	0.513 5	23	0.894 2	2.546 3	0.812 1

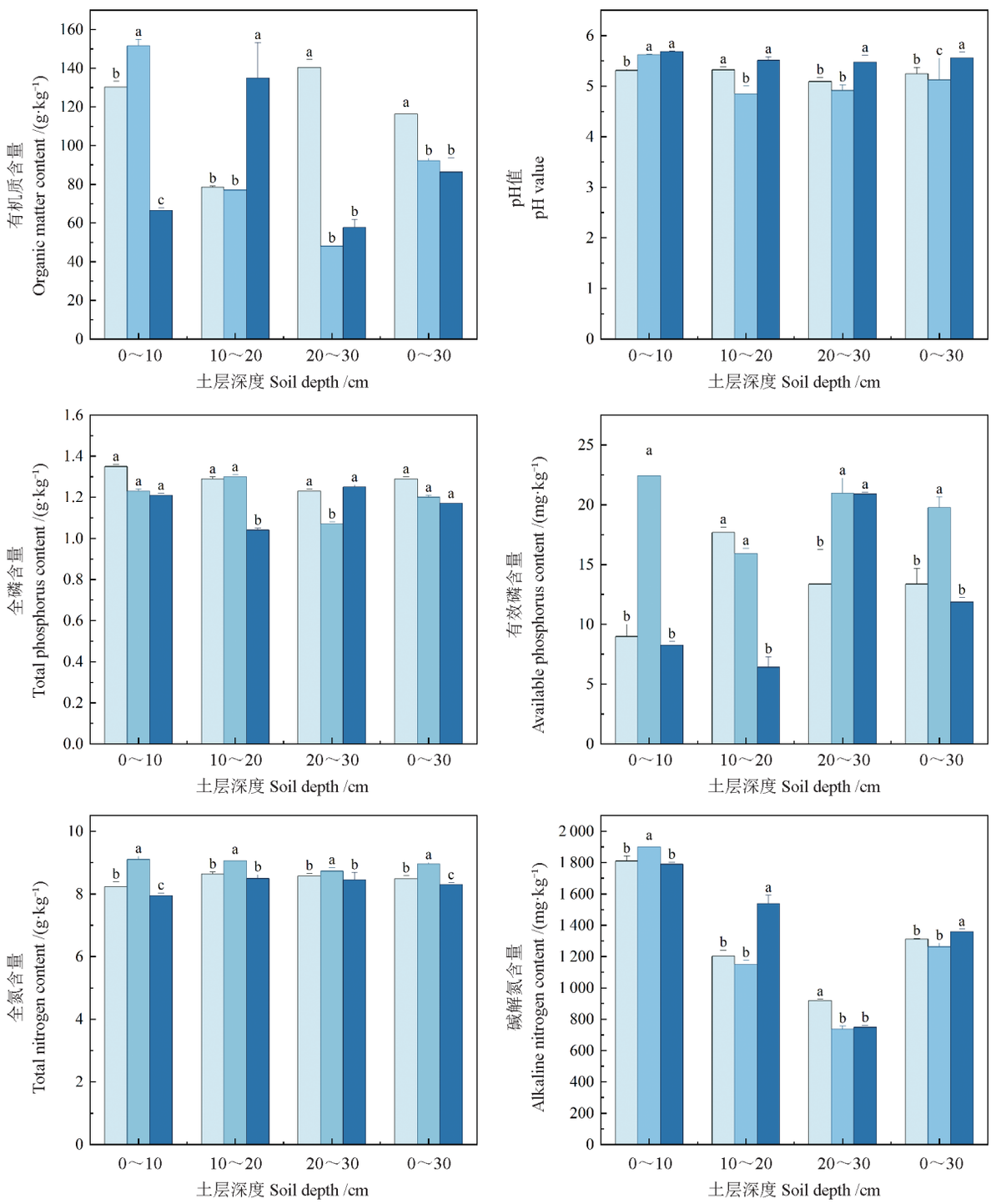
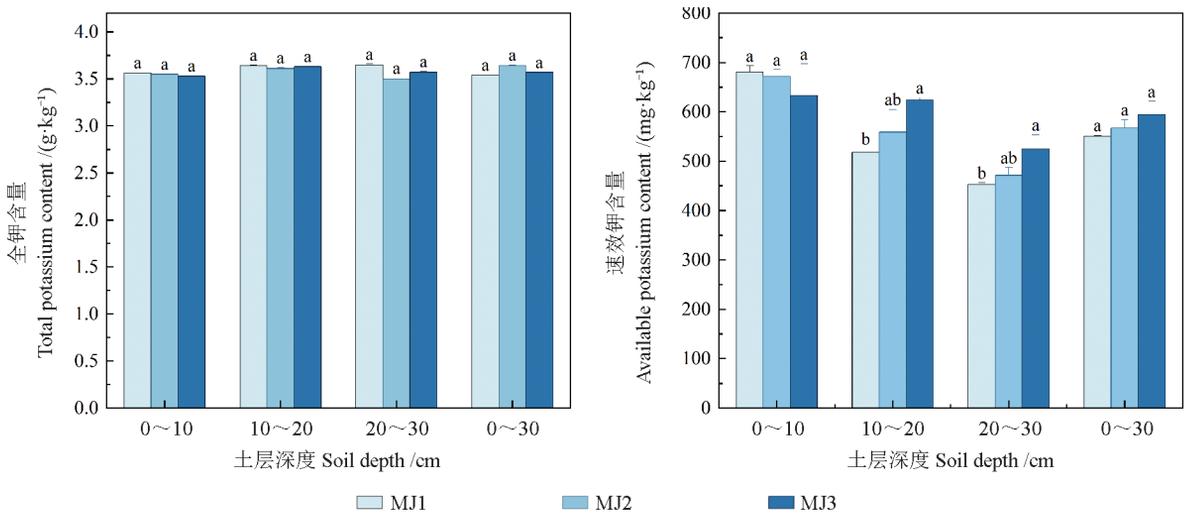


图 1　不同林分密度胡桃楸林下土壤养分含量

Fig. 1　Soil nutrient content under *Juglans mandshurica* forests with different stand densities



不同小写字母表示在同一土层深度不同林分密度之间差异显著（$P < 0.05$）。
Different lowercase letters indicate significant differences in stand density at the same soil depth ($P < 0.05$).

续图 1
Continuation of Fig. 1

0 ～ 10 cm 土层的 pH 值高于其他土层，10 ～ 20、20 ～ 30 cm 土层的 pH 值随林分密度的提高呈先降低后升高的趋势。林分密度对 0 ～ 10 cm 土层的有机质、全氮、碱解氮、速效钾及有效磷含量均存在显著影响（$P < 0.05$），具体表现为：MJ2 样地的有机质、全氮、碱解氮和有效磷含量显著高于 MJ1 和 MJ3（$P < 0.05$）；速效钾、全钾、全磷含量在高密度（MJ1）下达到最大值，但差异不显著（$P > 0.05$）。此外，表层土壤的各养分含量均在低密度（MJ3）条件下最低。

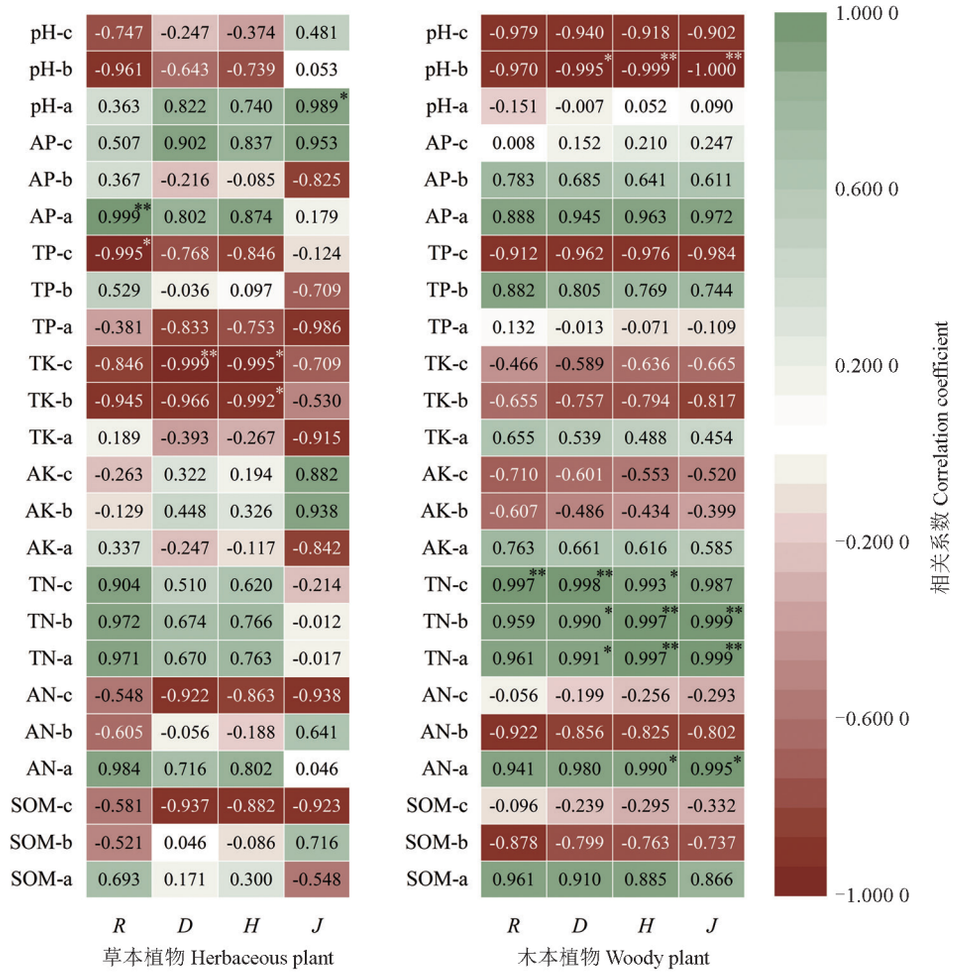
3.4 胡桃楸林下植物多样性指数与土壤养分的相关性分析

胡桃楸林下植物多样性指数与土壤养分含量的相关性分析如图 2 所示。草本植物：Patrick 物种丰富度与 0 ～ 10 cm 土层的有效磷含量呈极显著正相关（$P < 0.01$）；Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数与土壤的全钾含量呈显著负相关（$P < 0.05$）；Pielou 均匀度指数与表层土壤的 pH 值显著相关。木本植物 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数与 0 ～ 10 cm 土层和 10 ～ 20 cm 土层的全氮含量呈极显著正相关（$P < 0.01$），Patrick 物种丰富度和 Simpson 多样性指数与 20 ～ 30 cm 土层的全氮含量呈极显著正相关（$P < 0.01$）；Pielou 均匀度指数与表层土壤中的碱解氮含量呈显著正相关（$P < 0.05$）；Simpson 多样性指数与 10 ～ 20 cm 土层的 pH 值呈显著负相关（$P < 0.05$），Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数与 10 ～ 20 cm 土层的 pH 值均呈极显著负相关（$P < 0.01$）。

4 讨 论

物种多样性对维系生态系统的功能稳定性至关重要。高物种多样性的生态系统通常更加稳定，能够更好地抵抗外来物种入侵和环境变化的影响。物种多样性也是生物资源的重要来源，对于维系人类社会的可持续发展具有重要意义。

在整个研究区域内胡桃楸次生林林下共调查到 65 种植物。其中木本植物 16 种，隶属于 11 科 14 属；草本植物 49 种，隶属于 28 科 45 属。中等林分密度（MJ2）时草本植物和木本植物的物种丰富度最高，且各多样性指数值最高。罗也等 [22] 在研究张广才岭不同林分密度下物种组成及其多样性时，发现较高的林分密度使草本生存的微生境发生改变，最终留存下来的草本物种相对较少，多样性也随之显著降低。本研究发现，随着林分密度的降低，林下草本植物和木本植物的多样性均呈现规律性变化，其中草本植物的均匀度指数随着林分密度的降低而增大，此结果与不同林分密度下油松人工林林下植物多样性的研究结果一致 [23]。Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数在草本植物和木本植物中呈现相似的变化规律，均表现为随着林分密度的减小其指数呈先降低后升高的变化趋势，与李民义等 [24]、吕婧娴等 [25] 的研究结果相同。另有研究指出，低密度林分林下光照充足、生境空间开阔，这可能是其林下植物多样性、物种均匀度更高的主要原因。在草本植物中，林分密度与 Simpson 多样性指数、Patrick 物种丰富度、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数均呈负相关，这与林分密度对



图中 a、b、c 分别表示 0 ～ 10、10 ～ 20、20 ～ 30 cm 土层。AP，有效磷；TP，全磷；TK，全钾；AK，速效钾；TN，全氮；AN，碱解氮；SOM，有机质。* 表示在 0.05 水平下显著，** 表示在 0.01 水平下显著。

In the figure, a, b, and c represent the soil layers of 0-10, 10-20, and 20-30 cm, AP: Available phosphorus, TP: Total phosphorus, TK: Total potassium, AK: Available potassium, TN: Total nitrogen, AN: Alkaline nitrogen, SOM: Soil organic matter, * indicates significant differences at the 0.05 level, ** indicates significant differences at the 0.01 level.

图 2　胡桃楸林下植物多样性指数与土壤理化性质的相关性

Fig. 2　Correlation between understory plant diversity index and soil physicochemical properties in *Juglans mandshurica* forests

蒙古栎 *Quercus mongolica*[26] 和华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii*[27] 林下植物多样性的影响一致。此外，本研究发现暴马丁香的重要值在中等密度林分中下降，取代其优势地位的是同样喜光的东北扁禾木，且有少量白桦伴生，白桦作为先锋阳性树种也与其在冠层展开竞争；同时，丰富的土壤养分又促进了下层灌木的生长，使其陷入多维竞争压力。可见，中等林分密度条件下群落物种多样性达到峰值，其内在机制为适度压减单一优势树种竞争优势，释放林下生态位，进而促进多物种共存 [28]。

林分密度主要通过影响林间环境及植物组成，进而影响土壤理化性质。本研究发现，林分密度显著影响胡桃楸次生林土壤养分含量，并呈现出明显的中等密度效应。在中等林分密度条件下，0 ～ 10 cm 土层的有机质、全氮、碱解氮和有效磷含量均显著高于其他林分，这表明该林分密度最有利于土壤肥力的维持和营养元素的循环。然而，速效钾、全钾和全磷含量则在高林分密度下达到最大值，说明不同养分元素对林分密度的响应模式存在差异。总体来看，中等密度林分为多数关键养分元素的积累创造了最优条件，这一结果与张筱等 [29] 的研究结果一致。因此，中等林分密度下的高植物多样性与高土壤养分含量很可能是相互促进、协同发展的，与张荣等 [30] 的“物种多样性与土壤养分之间是一种双向互动的关系”这一观点相吻合。有效磷含量与草本植物的丰富度呈极显著正相关，这一结果与杨立学等 [31] 研究的土壤有效磷对草本植物多样性指数影响较大这一结论相同。此外，本研究观察到林下土壤呈微酸性，这与郭超等 [32] 在帽儿山胡桃楸人工林中的发现（土壤 pH 值为 4.82 ～ 5.22）相符。

受制于野外自然生境条件，本研究虽控制样地坡向、海拔保持一致，弱化宏观地形干扰，但

难以消除样地坡度差异带来的影响，且坡度最高的中密度林分（MJ2）样地兼具最优土壤养分条件与最高林下物种多样性。适宜的林分密度为林下草本植物与木本植物的发育提供了适宜的光环境，从而显著提高了地表植被的覆盖度与根系生物量。这种茂密的林下植被层能有效减缓地表径流、促进水分下渗，并拦截径流中携带的泥沙和养分[33]。因此，尽管该样地坡度较大，但由密度调控形成的这种植被结构在一定程度上抵消了坡度可能加剧的土壤侵蚀与养分流失风险。此外，较高的林下生物量也意味着更多的凋落物归还，这可能进一步促进了土壤有机质和养分的积累。当然，这一解释仍需通过更精细的试验设计加以验证。胡桃楸作为一种典型的具有化感作用的树种，其根系分泌的胡桃醌是主要化感物质，化感作用会随着胡桃醌浓度的变化而有所差异，但胡桃楸林下植物多样性受胡桃醌的影响较小，在其他环境因子成为非限制性因子时，胡桃醌的抑制作用便可能成为影响林下植物组成与多样性的主导因子[31,34]。

5 结 论

1）林分密度显著影响胡桃楸次生林林下植物多样性和土壤养分含量。林分密度过高或过低均会限制森林生态系统各项生态功能的正常发挥。中等林分密度能够创造最适宜的生境条件，林下木本植物和草本植物的物种丰富度与多样性最高，同时土壤关键养分（有机质、氮、磷）富集程度最高，体现了生物与非生物环境因子的协同效应。

2）林分密度可改变林下植物的种间竞争格局。在中等林分密度下，林内光照、土壤水分等资源分配趋于均衡，可为更多伴生树种提供适宜生存空间，从而形成物种组成丰富、群落结构稳定的植物群落。低密度林分冠层开阔，草本层种间竞争减弱，使其物种均匀度最高。

3）植物多样性与土壤养分之间存在紧密的耦合关系。土壤全氮是驱动木本植物多样性的关键因子，而土壤有效磷主导着草本植物的物种丰富度。该结果验证了土壤养分作为耦合载体，是林分密度间接作用于植物群落的重要路径。综上所述，将胡桃楸次生林的林分密度调控至 680 株·hm^{-2} 左右，是实现其生态系统生物多样性保护与地力维持双重目标的有效经营措施。今后森林抚育管理应重视密度 - 植物 - 土壤间的反馈机制。林下植被作为森林生态系统的一个重要组成部分，在维护森林多样性、推动森林生态系统物质循环与功能运转中发挥不可替代的作用，更好地保护和管理林下植被对于维持森林生态系统的整体功能及可持续发展至关重要。

参考文献：

[1] 李伟伟 , 谷建才 , 陈瑜 , 等 . 林分密度对华北落叶松人工林林下植被多样性影响的研究 [J]. 中国农学通报 ,2009,25(6):84-88.
Li W W, Gu J C, Chen Y, et al. Research on the effects of stand density on understory vegetation diversity of *Larix princips-rupprechii* plantation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009,25(6):84-88.

[2] 张勇强 , 李智超 , 厚凌宇 , 等 . 林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响 [J]. 土壤学报 ,2020,57(1):239-250.
Zhang Y Q, Li Z C, Hou L Y, et al. Effects of stand density on understory species diversity and soil nutrients in Chinese fir plantation[J]. Acta Pedologica Sinica,2020,57(1):239-250.

[3] 丁继伟 . 五台山华北落叶松天然林林分密度效应及其调控机制研究 [D]. 太谷 : 山西农业大学 ,2018:3-5.
Ding J W. The effect of stand density and its regulation mechanism of *Larix principis-rupprechtiti* in Wutai forest[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University,2018:3-5.

[4] 王凯娜 . 不同密度华北落叶松林下草本多样性与生物量研究 [D]. 太谷 : 山西农业大学 ,2021:3.
Wang K N. Study on herbage diversity and biomass under different densities *Larix principis-rupprechtii* forest[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University,2021:3.

[5] 娄清 , 谌红辉 , 丁贵杰 , 等 . 造林密度对马尾松人工林林下植被及土壤性质的影响 [J]. 西部林业科学 ,2022,51(5):139-145,163.
Lou Q, Chen H H, Ding G J, et al. Effects of planting density on understory vegetation and soil properties of *Pinus massoniana* plantation[J]. Journal of West China Forestry Science,2022,51(5):139-145,163.

[6] 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.

[7] 胡延辰 , 张晓林 , 韩晓义 , 等 . 蒙古栎次生林的生长更新与林下植被多样性对林分密度的响应 [J]. 应用生态学报 ,2022,33(3):727-732.
Hu Y C, Zhang X L, Han X Y, et al. Responses of stand growth, regeneration, and understory species diversity in *Quercus mongolica* secondary forest to stand density[J]. Chinese Journal

of Applied Ecology,2022,33(3):727-732.

[8] 张柳桦 , 齐锦秋 , 李婷婷 , 等 . 林分密度对新津文峰山马尾松人工林林下物种多样性和生物量的影响 [J]. 生态学报 ,2019,39(15):5709-5717.
Zhang L H, Qi J Q, Li T T, et al. Effects of stand density on understory plant diversity and biomass in a *Pinus massoniana* plantation in Wenfeng mountain, Xinjin County[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(15):5709-5717.

[9] Rawlik M, Kasprowicz M, Jagodziński A M. Differentiation of herb layer vascular flora in reclaimed areas depends on the species composition of forest stands[J]. Forest Ecology and Management, 2018,409:541-551.

[10] 张洋洋 , 周清慧 , 许骄阳 , 等 . 林龄对马尾松人工林林下植物与土壤种子库多样性的影响 [J]. 生态环境学报 ,2021,30(11):2121-2129.
Zhang Y Y, Zhou Q H, Xu J Y, et al. Effects of forest ages on the diversity of understory plants and soil seed bank of *Pinus massoniana* plantations[J]. Ecology and Environment Sciences, 2021,30(11):2121-2129.

[11] Peichl M, Leava N A, Kiely G. Above- and belowground ecosystem biomass, carbon and nitrogen allocation in recently afforested grassland and adjacent intensively managed grassland[J]. Plant and Soil,2012,350:281-296.

[12] 王媚臻 , 毕浩杰 , 金锁 , 等 . 林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响 [J]. 生态学报 ,2019,39(3):981-988.
Wang M Z, Bi H J, Jin S, et al. Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of a *Cupressus funebris* plantation in Yunding mountain[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(3):981-988.

[13] 岳明 , 崔延棠 , 王双峰 . 陕北黄土高原森林群落物种多样性分析 [J]. 水土保持通报 ,2003,23(1):39-41,45.
Yue M, Cui Y T, Wang S F. Analysis of species diversity on forest community in the Loess Plateau of north Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2003,23(1):39-41,45.

[14] 陈煜 . 太白山林下草本植物多样性及其维持机制研究 [D]. 西安 : 西北大学 ,2016:7-10.
Chen Y. Maintenance mechanism of understory herbaceous species diversity in Taibai mountain[D]. Xi'an: Northwest University, 2016:7-10.

[15] 孙千惠 , 吴霞 , 王媚臻 , 等 . 林分密度对马尾松林林下物种多样性和土壤理化性质的影响 [J]. 应用生态学报 ,2018,29(3):732-738.
Sun Q H, Wu X, Wang M Z, et al. Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of *Pinus massoniana* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2018,29(3):732-738.

[16] 谷振军 , 刘倩 , 曾纪孟 , 等 . 马尾松人工林密度控制对林下植被多样性的影响 [J]. 森林与环境学报 ,2021,41(5):504-509.
Gu Z J, Liu Q, Zeng J M, et al. Effects of density management on understory plant diversity in plantation forests of *Pinus massoniana*[J]. Journal of Forest and Environment,2021,41(5):504-509.

[17] 覃志杰 , 董威 , 刘泰瑞 , 等 . 油松天然次生林林下植物多样性对林分密度的响应研究 [J]. 山西农业大学学报 (自然科学版),2019,39(1):61-67.
Qin Z J, Dong W, Liu T R, et al. Responses of understory plant diversity to stand density in natural secondary forests of *Pinus tabulaeformis*[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition),2019,39(1):61-67.

[18] 杨爱芳 , 韩有志 , 杨秀清 , 等 . 不同密度云杉林下草本植物多样性 [J]. 浙江农林大学学报 ,2014,31(5):676-682.
Yang A F, Han Y Z, Yang X Q, et al. Diversity of understory herbs in *Picea* forests with different stand densities[J]. Journal of Zhejiang A & F University,2014,31(5):676-682.

[19] 舒韦维 , 卢立华 , 李华 , 等 . 林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响 [J]. 生态学报 ,2021,41(11):4521-4530.
Shu W W, Lu L H, Li H, et al. Effects of stand density on understory vegetation and soil properties of *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(11):4521-4530.

[20] 初兴国 , 丰绪霞 , 付廷军 , 等 . 帽儿山天然次生林多样性特征分析 [J]. 防护林科技 ,2015(12):46-48.
Chu X G, Feng X X, Fu T J, et al. Diversity of natural secondary forest community in Maoer mountain[J]. Protection Forest Science and Technology,2015(12):46-48.

[21] 中国科学院南京土壤研究所 . 土壤理化分析 [M]. 上海 : 上海科学技术出版社 ,1978:62-136.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil physical and chemical analysis[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publishing House,1978:62-136.

[22] 罗也 , 何怀江 , 张忠辉 , 等 . 张广才岭不同林分密度下物种组成及其多样性 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2023,43(11):131-141.
Luo Y, He H J, Zhang Z H, et al. Species composition and diversity under different stand densities in Zhangguangcailing[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023,43(11):131-141.

[23] 鲁绍伟 , 刘凤芹 , 余新晓 , 等 . 北京山区不同密度油松结构与功能研究 [J]. 水土保持研究 ,2008,15(1):117-121.
Lu S W, Liu F Q, Yu X X, et al. Studies on the configuration and function of different density pine in rocky mountain area of Beijing[J]. Research of Soil and Water Conservation,2008,15(1):

117-121.

[24] 李民义 , 张建军 , 郭宝妮 , 等 . 晋西黄土区不同密度油松人工林林下植物多样性及水文效应 [J]. 生态学杂志 ,2013,32(5):1083-1090.
Li M Y, Zhang J J, Guo B N, et al. Understory plant species diversity and hydrological effect of *Pinus tabulaeformis* plantations with different stand densities in Loess Plateau of western Shanxi, China[J]. Chinese Journal of Ecology,2013,32(5):1083-1090.

[25] 吕婧娴 , 王得祥 , 张宋智 , 等 . 小陇山林区不同密度油松人工林林下物种多样性研究 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版),2010,38(11):49-56.
Lü J X, Wang D X, Zhang S Z, et al. Study on the species diversity of undergrowth in the different stand densities of *Pinus tabulaeformis* plantation of Xiaolongshan area[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition),2010,38(11):49-56.

[26] 王义贺 , 郭鑫 , 姜海燕 , 等 . 林分密度对蒙古栎林下草本植物多样性的影响研究 [J]. 林业调查规划 ,2023,48(2):40-45,56.
Wang Y H, Guo X, Jiang H Y, et al. Effects of stand density on diversity of understory herbs in *Quercus mongolica* forest[J]. Forest Inventory and Planning,2023,48(2):40-45,56.

[27] 李颖 , 余治家 , 佘萍 , 等 . 林分密度对人工华北落叶松林下植物多样性影响 : 以六盘山叠叠沟小流域为例 [J]. 甘肃农业大学学报 ,2021,56(2):114-120.
Li Y, Yu Z J, She P, et al. Effects of stand density on understory plant diversity of *Larix principis-rupprechtii* plantation: a case study in Diediegou small watershed in Liupan mountain[J]. Journal of Gansu Agricultural University,2021,56(2):114-120.

[28] Gamfeldt L, Roger F. Revisiting the biodiversity-ecosystem multifunctionality relationship[J]. Nature Ecology & Evolution, 2017,1:168.

[29] 张筱 , 陈义堂 , 杨秋菊 , 等 . 不同地形 100 年生杉木人工林土壤理化性质及林下植被多样性差异分析 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学),2021,41(6):60-70.
Zhang X, Chen Y T, Yang Q J, et al. Differences of soil physicochemical properties and undergrowth vegetation diversity of 100-year-old Chinese fir plantations in different terrain[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science),2021,41(6):60-70.

[30] 张荣 , 李婷婷 , 金锁 , 等 . 不同海拔高度对周公山柳杉人工林植物多样性及土壤养分的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2020,40(5):38-46.
Zhang R, Li T T, Jin S, et al. Effects of different altitude on plant diversity and soil nutrients of *Cryptomeria fortunei* plantation in Zhougong mountain[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2020,40(5):38-46.

[31] 杨立学 , 孙跃志 . 不同林龄胡桃楸林下植物多样性的差异 [J]. 生态学杂志 ,2013,32(4):807-812.
Yang L X, Sun Y Z. Biodiversity of understory vegetation in different-aged Manchurian walnut plantations[J]. Chinese Journal of Ecology,2013,32(4):807-812.

[32] 郭超 , 王东男 , 张硕 , 等 . 林下植被对胡桃楸人工林细根生物量和形态特征的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(1):82-89,101.
Guo C, Wang D N, Zhang S, et al. Effects of understory vegetation on the fine root biomass and morphological characteristics in *Juglans mandshurica* plantation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(1):82-89,101.

[33] 田培 , 毛梦培 , 潘成忠 . 植被调控水土流失机制研究进展及展望 [J]. 中国水土保持科学 ,2024,22(1):131-140.
Tian P, Mao M P, Pan C Z. Research progress and prospect of vegetation control mechanism of soil and water loss[J]. Science of Soil and Water Conservation,2024,22(1):131-140.

[34] Yang L X, Wang P, Kong C H. Effect of larch *(Larix gmelini* Rupr.) root exudates on Manchurian walnut (*Juglans mandshurica* Maxim.) growth and soil juglone in a mixed-species plantation[J]. Plant and Soil,2010,329:249-258.

[本文编校：谢荣秀]