

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10期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.10.014

论文标题： 辽西地区不同油松混交林植物多样性和土壤化学计量特征

作　　者： 荆 烁，胡志宝，林 阳，等

收稿日期： 2025-09-16

引文格式： 荆烁,胡志宝,林阳,等.辽西地区不同油松混交林植物多样性和土壤化学计量特征[J].中南林业科技大学学报,2026,46(10):156-165.

Jing S, Hu Z B, Lin Y, et al. Plant diversity and soil stoichiometric characteristics of different mixed forests of *Pinus tabuliformis* in western Liaoning Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(10):156-165.

---

相关论文推荐

Recommended articles

油松天然林林分空间结构特征

Stand spatial structure characteristics of *Pinus tabuliformis* natural forest

科尔沁沙地油松人工林林龄对土壤酶活性及化学性质的影响

Effects of stand age on soil enzyme activity and chemical properties of *Pinus tabuliformis* plantation in Horqin sandy land

密度调控对陇西黄土高原油松人工林林下植被与土壤环境的影响

Effects of density regulation on understory vegetation and soil environment of *Pinus tabuliformis* plantation on Longxi Loess Plateau

间伐强度对油松飞播林林分空间结构及灌草多样性的影响

Effects of thinning intensity on stand spatial structure and shrub and grass diversity in *Pinus tabuliformis* fly-seeded forest

2个径级油松细根对土壤水分条件和草本根系竞争的季节性响应

Seasonal responses of *Pinus tabuliformis* fine roots of two diameter classes to soil water content and herb root competition

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 tabuliformis* plantations with different stand ages and densities in Daqing mountain

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.10.014
http: //qks.csuft.edu.cn

# 辽西地区不同油松混交林植物多样性和土壤化学计量特征

荆　烁，胡志宝，林　阳，王洪江，张皓凯，申逸男，胡芳媛
（辽宁省旱地农林研究所，辽宁 朝阳 122000）

**摘　要：**【目的】探讨林分类型对植物多样性和土壤化学计量特征的影响，为干旱、半干旱地区人工林营造及植被恢复与重建提供理论参考。【方法】选择油松黄栌混交林、油松蒙古栎混交林、油松柠条混交林、油松山杏混交林、油松五角槭混交林和油松纯林为研究对象，通过典型样地调查及室内实验，计算林下植物多样性指数、土壤有机碳（SOC）、全氮（TN）、全磷（TP）含量和储量及化学计量比。【结果】林分类型显著影响林下灌草植物组成及多样性特征。林下植物种数依次为油松蒙古栎混交林（39 种）、油松柠条混交林（38 种）、油松黄栌混交林（27 种）、油松山杏混交林（27 种）、油松纯林（21 种）和油松五角槭混交林（20 种）；灌木层以混交树种的更新为主要优势种；草本层以胡枝子和亚柄薹草为共同优势种。灌木层，油松蒙古栎混交林植物多样性指数显著高于其他林分；油松纯林植物丰富度最低，但均匀度指数较高。草本层，油松柠条混交林植物多样性指数最高，油松纯林植物多样性指数与多数林分无显著差异。油松混交林的 SOC、TN 含量和储量显著高于纯林，TP 含量和储量无显著差异。油松蒙古栎混交林和油松黄栌混交林的土壤 C ∶ N 与油松纯林相比无显著差异，C ∶ P 和 N ∶ P 均显著高于油松纯林。主成分分析结果表明，6 种林分类型综合得分依次为油松蒙古栎混交林＞油松黄栌混交林＞油松柠条混交林＞油松山杏混交林＞油松五角槭混交林＞油松纯林。【结论】油松纯林引入阔叶树种有利于林下植物多样性的增加和土壤养分固持。其中油松蒙古栎混交林在物种多样性、土壤养分含量等方面表现最佳，是生态修复中的理想配置。

**关键词：**油松；林分类型；植物多样性；化学计量
**中图分类号：**S718.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)10-0156-10

# Plant diversity and soil stoichiometric characteristics of different mixed forests of *Pinus tabuliformis* in western Liaoning Province

Jing Shuo, Hu Zhibao, Lin Yang, Wang Hongjiang, Zhang Haokai, Shen Yinan, Hu Fangyuan

(Institute of Agriculture and Forestry in Arid Areas of Liaoning Province, Chaoyang 122000, Liaoning, China)

**Abstract:**【Objective】To explore the effects of stand types on plant diversity and soil stoichiometric characteristics, and to provide theoretical references for afforestation and vegetation restoration and reconstruction in arid and semi-arid regions.【Method】In this study, *Pinus tabuliformis*×*Cotinus coggygria* (Pt×Cc), *Pinus tabuliformis*×*Quercus mongolica* (Pt×Qm), *Pinus tabuliformis*×*Caragana korshinskii* (Pt×Ck), *Pinus tabuliformis*×*Prunus sibirica* (Pt×Ps), *Pinus tabuliformis*×*Acer mono* (Pt×Am) and *Pinus tabuliformis* (Pt) were selected as the research objects. Based on the investigation of typical plots and the results of indoor experiments, the understory diversity and contents, stocks and stoichiometric ratios of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the soil were calculated.【Result】Stand types significantly influence the composition and diversity characteristics of understory shrubs and herbs. The understory plant species are as follows: Pt×Qm (39 species), Pt×Ck (38 species), Pt×Cc (27 species), Pt×Ps (27 species), Pt (21 species), and Pt×Am (20 species). The dominant species in the shrub layer consist primarily of regenerating saplings from the mixed tree species, while the herb layer is co-dominated by *Lespedeza bicolor* and *Carex lanceolata*. In the shrub layer, the plant

**收稿日期**（Received）：2025-09-16　　**修订日期**（Revised）：2025-12-15
**基金项目：**中央财政林草科技推广示范项目（辽〔2025〕TG11 号）；辽宁省农业科学院基本科研业务费协同创新专项项目（2025XTCX0402）；辽宁省农业科学院基本科研业务费绿色发展专项项目（2021HQ1914）。
**第一作者：**荆烁（hds_js@163.com），工程师，硕士。　　**通信作者：**王洪江（wanghongjiang0902@126. com），正高级工程师。
**引文格式：**荆烁 , 胡志宝 , 林阳 , 等 . 辽西地区不同油松混交林植物多样性和土壤化学计量特征 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026, 46(10):156-165.
Jing S, Hu Z B, Lin Y, et al. Plant diversity and soil stoichiometric characteristics of different mixed forests of *Pinus tabuliformis* in western Liaoning Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(10):156-165.

diversity index of the Pt×Qm was significantly higher than that of other stands. The plant richness of Pt is the lowest, but the evenness index is relatively high. In the herb layer, the Pt×Ck exhibited the highest plant diversity index, while the Pt showed a relatively high plant diversity index with no significant difference compared to most other forest stands. The content and stocks of SOC and TN in mixed forests were significantly higher than those in pure forests, and there was no significant difference in TP content and stocks. The soil C∶N of Pt×Qm and Pt×Cc showed no significant differences compared to Pt, while their soil C∶P and N∶P were significantly higher than that of Pt.The comprehensive scores of the six stand types were ranked as follows: Pt×Qm ＞ Pt×Cc ＞ Pt×Ck ＞ Pt×Ps ＞ Pt×Am ＞ Pt.【Conclusion】Introducing broadleaf tree species into Pt can enhance understory plant diversity and promote soil nutrient retention. The Pt×Qm demonstrates optimal performance in terms of species diversity and soil nutrient content, making it an ideal configuration for ecological restoration efforts.

**Keywords:** *Pinus tabuliformis*; stand type; plant diversity; stoichiometry

油松 *Pinus tabuliformis* 是我国北方重要的乡土针叶树种，因其耐干旱瘠薄、适应性强和木材用途广泛等特点 [1]，在辽西干旱、半干旱地区具有长期的栽培历史，现已成为该区域水土保持和生态修复的关键树种之一。自 20 世纪 60 年代以来，辽西地区油松造林保存面积已超过 28 万 $hm^2$，为区域生态屏障建设、环境改善及地方经济发展作出了重要贡献。然而，长期大面积栽植油松纯林也导致林分结构单一、生物多样性下降和土壤肥力衰退等一系列问题，最终导致油松纯林出现生长衰退与生态功能减弱 [2-3]。相较之下，油松混交林通过不同树种的合理配置，能够更充分地利用光热资源和土壤养分，提升林分抵御自然灾害的能力，从而实现生态效益与经济效益的协同提升。

林下植被作为森林生态系统的重要组成部分，在维持森林结构、调控生态系统物质循环和能量流动等方面发挥着重要作用 [4-6]。植物多样性是衡量一定区域内植物资源丰富程度的指标，其高低既反映了植物个体之间的复杂程度，也体现了植物与环境因子之间的相互作用 [6]。研究表明，单一树种栽植模式往往难以维持较高的植物多样性水平，而通过合理优化树种组成、实施树种混交，不仅有助于促进林下植被的恢复与生长，还能改善土壤肥力状况，从而推动森林生态系统的可持续经营 [7-8]。宋霞等 [9] 对广东化州不同林龄人工林植物多样性的研究表明，营造人工混交林对提高林下植物多样性更加有利；赵耀等 [10] 在晋西黄土区对人工林、天然林灌草植物多样性的研究也表明，人工混交林更有利于提升林下植物多样性。因此，探究不同林分类型对林下植物物种多样性的影响，是评估人工林经营合理性及可持续发展能力的重要依据。

不同林分类型下，凋落物的组成、储量及分解速率的差异直接导致其对土壤碳、氮、磷等关键养分的调控作用各不相同 [11-12]。土壤 C、N、P 含量及其化学计量比控制生态系统中养分循环和贮存，受植被变化、土壤养分浓度、环境因子的影响，其变化可导致物种组成和养分循环的潜在变化 [13-14]。其中，碳氮比直接影响土壤有机质矿化速率和微生物活性，可作为有机质分解效率的预测指标；碳磷比影响凋落物和有机质的分解速率，体现土壤 P 的矿化能力；而氮磷比则能准确反映植物养分限制类型，并为评估有机质矿化效率提供重要依据 [12,15]。营造混交林是增加生态系统稳定性、提高土壤肥力、改善土壤养分循环的重要经营措施 [13,16]。如肖指柔等 [17] 对南亚热带地区马尾松 *Pinus massoniana*、格木 *Erythrophleum fordii* 纯林及其混交林的研究结果表明，混交林对平衡土壤 C、N 含量的效果优于纯林。崔秋芳等 [18] 对南太行山区针叶侧柏 *Platycladus orientalis* 纯林及其混交林的研究结果表明，混交林提高了土壤 C、N、P 含量及化学计量比值。因此，分析不同油松混交类型下的土壤 C、N、P 生态化学计量特征能反映土壤质量变化趋势及植被恢复效果，对探讨其在退化生态修复中的作用和贡献具有重要意义。

目前，关于油松纯林的研究多集中于林分结构、密度、林龄等对单一林分生态指标的影响，而对多因素耦合作用下混交林的植物多样性与土壤化学元素平衡的内在关联机制探讨尚不深入。有必要开展混交林与纯林体系的对比研究，阐明植物多样性特征与土壤化学计量特征之间的协同变化规律与生态学意义，为解决油松人工林衰退与可持续经营提供方向。本研究以辽西地区 6 种不同林分类型油松人工林为对象，包括油松黄栌混交林（*Pinus tabuliformis*×*Cotinus coggygria*）、油松蒙古栎混交林（*Pinus tabuliformis*×*Quercus mongolica*）、油松柠条混交林（*Pinus tabuliformis*×*Caragana korshinskii*）、油松山杏混交林（*Pinus tabuliformis*×*Prunus sibirica*）、油松五角槭混交林（*Pinus tabuliformis*×*Acer mono*）和油松纯林 *Pinus tabuliformis*，探讨不同混交类型对林下植物多样性

和土壤 C、N、P 的影响，可为油松人工林的发展及其优良模式的筛选提供理论依据，对于促进我国的生态文明建设和经济建设以及减轻我国碳排放的压力和经济的可持续发展具有重要的现实意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于辽宁省凌源市宋杖子乡（119°15′55″ ～ 119°16′47″E，41°10′01″ ～ 41°10′22″N），海拔 589 ～ 598 m，属于温带大陆性季风气候，具有典型的辽西地区气候特点，四季分明、雨热同期、春季干旱多风、冬季寒冷少雪，年平均气温 8 ～ 10 ℃，年降水量 500 ～ 600 mm，土壤类型为褐土，土层薄，下层碳酸钙沉积，保水保肥能力差。

油松人工林始建于 1975 年，1983 年采取带状间伐措施，引入黄栌、蒙古栎、柠条、山杏和五角槭，分别形成油松黄栌混交林（A）、油松蒙古栎混交林（B）、油松柠条混交林（C）、油松山杏混交林（D）和油松五角槭混交林（E）5 种混交林，混交比例为 1∶1，并以同期营造的油松纯林（F）作为对照，平均林分密度为 2 250 株 /hm$^2$。

### 1.2 样地设置与调查

野外样地调查及样品采集的时间在 2023 年 9 月。为避免地形及土壤异质性等非植被因素的干扰，本试验选取同一坡向中下部、立地条件基本一致的林分为研究对象，每种林分类型分别随机设置 3 个面积为 20 m×20 m 的标准样地。利用 GPS 记录样地的经纬度、海拔和坡度等立地因子，采取每木检尺法调查样地内油松的胸径、树高、冠幅以及株数。在每个样地内设置 3 块 5 m×5 m 的灌木样方，并在每个灌木样方内设置 1 m×1 m 的草本样方，分别记录灌木层和草本层植物的种类、高度、株数和盖度等指标。样地基本信息见表 1。

**表 1 样地基本信息 †**

**Table 1 Basic information of sample plots**

| 林分代码 Forest code | 林分类型 Stand type | 平均树高 Mean tree height /m | 平均胸径 Mean DBH /cm | 海拔 Elevation /m | 坡度 Slope /(°) | 容重 Bulk density /(g·cm$^{-3}$) | 最大持水量 Maximum water capacity /(g·kg$^{-1}$) | 总孔隙度 Total porosity /% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 油松黄栌混交林 | 7.08 | 11.15 | 589 | 10 | 1.30±0.03 | 39.55±1.53 | 50.75±0.89 |
| B | 油松蒙古栎混交林 | 8.61 | 15.52 | 598 | 7.5 | 1.12±0.03 | 43.77±1.38 | 48.30±0.74 |
| C | 油松柠条混交林 | 8.11 | 13.75 | 593 | 10 | 1.29±0.02 | 38.48±0.79 | 49.52±0.78 |
| D | 油松山杏混交林 | 8.21 | 15.13 | 589 | 12 | 1.22±0.03 | 39.01±1.56 | 47.04±0.98 |
| E | 油松五角槭混交林 | 7.03 | 12.71 | 589 | 15 | 1.27±0.03 | 41.06±1.15 | 51.80±0.65 |
| F | 油松纯林 | 7.52 | 14.56 | 589 | 10 | 1.20±0.02 | 41.54±1.22 | 49.55±0.82 |

† 表格中生长数据为混交林中的油松数据。The growth data in the table represent the values of *Pinus tabuliformis* in the mixed forest.

### 1.3 植物多样性计算

根据调查数据，统计样方内灌木层和草本层植物组成、数量和盖度等指标，得出样方中植物的相对盖度（$R_C$）、相对密度（$R_D$）及相对频度（$R_F$），计算得到样方内植物重要值（$I_V$）。采用灌木层和草本层群落的植物丰富度（$S$）、Shannon-Wiener 多样性指数（$H'$）、Simpson 优势度指数（$D$）和 Pielou 均匀度指数（$J$）4 种指标讨论本样地的植物多样性，其中，植物丰富度以物种数来反映（$S$），其他指数计算公式如下：

$$I_V = \frac{R_C + R_F + R_F}{3} \quad (1)$$

$$R_C = \frac{\text{某个种的盖度}}{\text{所有种的盖度之和}} \quad (2)$$

$$R_D = \frac{\text{某个种的个体数}}{\text{所有种的个体数之和}} \quad (3)$$

$$R_F = \frac{\text{某个种的频度}}{\text{所有种的频度之和}} \quad (4)$$

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} P_i \ln P_i \quad (5)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{S} P_i^2 \quad (6)$$

$$J = \frac{H'}{\ln S} \quad (7)$$

式中：$S$ 为物种数；$N$ 为所有物种的个体总数；$P_i$ 为第 $i$ 种个体数占总个体数的比例。

### 1.4 土壤采集及测定

在每个标准采样区内，采用对角线法布设采样点，清除地表凋落物和草本植被。分别使用环刀在 0 ～ 10 cm 和 10 ～ 20 cm 土层中部采集原状土样，并分别采集 0 ～ 10 cm 和 10 ～ 20 cm 的混

合土样，带回实验室进行土壤理化性质测定。土壤物理性质采用烘干法测定，土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化法测定；全氮含量采用凯氏定氮法测定；全磷含量采用钼锑抗显色法测定。土壤 SOC、TN、TP 储量计算公式如下：

$$R_{\mathrm{SOC}}=\sum_{i=1}^{n}(SOC_i\times BD_i\times D_i\times 0.1) \quad (8)$$

$$R_{\mathrm{TN}}=\sum_{i=1}^{n}(TN_i\times BD_i\times D_i\times 0.1) \quad (9)$$

$$R_{\mathrm{TP}}=\sum_{i=1}^{n}(TP_i\times BD_i\times D_i\times 0.1) \quad (10)$$

式中：$R_{\mathrm{SOC}}$、$R_{\mathrm{TN}}$ 和 $R_{\mathrm{TP}}$ 代表 SOC、TN 和 TP 储量（t/hm$^2$）；$SOC_i$、$TN_i$ 和 $TP_i$ 代表第 $i$ 层 SOC、TN 和 TP 含量（g/kg）；$BD_i$ 代表第 $i$ 层土壤容重（g/cm$^3$）；$D_i$ 代表第 $i$ 层土层厚度（cm）；0.1 为单位转换系数。

### 1.5　数据处理

使用 Excel 2010 和 SPSS 26.0 软件进行数据处理及分析；利用双因素方差分析（Two-way ANOVA）比较林分类型和土壤深度及其交互作用对土壤化学计量特征的影响；利用单因素方差分析（One-way ANOVA）和 Duncan 多重比较进行不同林分类型差异性检验；利用主成分分析法对植物多样性和土壤化学计量特征进行综合评价。

## 2　结果与分析

### 2.1　不同类型油松人工林林下植物组成和多样性特征

本次调查共记录到林下灌草植物 61 种，隶属于 26 科 58 属，不同林分类型之间林下植物组成存在明显差异（表 2）。各林分林下植物种数由高到低依次为油松蒙古栎混交林（39 种）、油松柠条混交林（38 种）、油松黄栌混交林（27 种）、油松山杏混交林（27 种）、油松纯林（21 种）和油松五角槭混交林（20 种）。其中油松蒙古栎混交林林下植物种类最丰富，灌木层中，6 种林分的主要优势种具有明显差异，但均以混交树种的天然更新为主。油松黄栌混交林中黄栌更新的重要值最高（0.60），油松柠条混交林中的柠条更新占据绝对优势（0.33），油松五角槭混交林中则以酸枣（0.33）和五角槭更新（0.26）的重要值较高，油松纯林中油松自身更新的重要值最高（0.41）。此外，春榆、山葡萄、鼠李等灌木在多个林分中均有出现，但其重要值普遍较低。草本层中，万年蒿在 6 种林分中均有分布，重要值较为稳定（0.08 ～ 0.17）；亚柄薹草在所有林分中均保持较大优势，重要值在 0.12 ～ 0.30 之间；胡枝子在 5 种林分中均有分布，其中油松黄栌混交林和油松五角槭混交林中重要值较高，分别为 0.20 和 0.30。油松柠条混交林的草本层植物最丰富，各物种重

表 2　不同林分类型植物组成与重要值

**Table 2　Plant composition and importance values in different stand types**

| 林分类型 Stand type | 层次 Layer | 科 Family | 属 Genera | 种 Species | 主要植物及重要值 Plant species and importance value |
|---|---|---|---|---|---|
| A | 灌木层 | 6 | 9 | 9 | 黄栌更新 (0.60)、油松更新 (0.14)、鼠李 *Rhamnus davurica* (0.06)、山葡萄 *Vitis amurensis* (0.05)、春榆 *Ulmus davidiana* (0.05) |
| | 草本层 | 13 | 18 | 18 | 亚柄薹草 *Carex lanceolata* (0.29)、胡枝子 *Lespedeza bicolor* (0.20)、中华卷柏 *Selaginella sinensis* (0.12)、万年蒿 *Artemisia sacrorum* (0.09)、早开堇菜 *Viola prionantha* Bunge (0.05) |
| B | 灌木层 | 11 | 14 | 15 | 油松更新 (0.21)、春榆 (0.19)、蒙古栎更新 (0.14)、酸枣 *Ziziphus jujuba* (0.11)、山葡萄 (0.09) |
| | 草本层 | 12 | 23 | 24 | 亚柄薹草 (0.16)、胡枝子 (0.14)、万年蒿 (0.13)、油芒 *Spodiopogon cotulifer* (0.09)、中华卷柏 (0.09) |
| C | 灌木层 | 9 | 13 | 13 | 柠条更新 (0.33)、春榆 (0.16)、黄栌更新 (0.14)、油松更新 (0.09)、中国小檗 *Berberis chinensis* (0.04) |
| | 草本层 | 15 | 25 | 25 | 万年蒿 (0.17)、婆婆针 *Bidens bipinnata*(0.10)、狗尾草 *Setaria viridis* (0.12)、亚柄薹草 (0.12)、胡枝子 (0.10) |
| D | 灌木层 | 6 | 7 | 7 | 油松更新 (0.44)、山杏更新 (0.18)、鼠李 (0.13)、春榆 (0.10)、山葡萄 (0.07) |
| | 草本层 | 11 | 20 | 20 | 中华卷柏 (0.20)、亚柄薹草 (0.14)、胡枝子 (0.13)、狗尾草 (0.08)、万年蒿 (0.08) |
| E | 灌木层 | 5 | 6 | 6 | 酸枣 (0.33)、五角槭更新 (0.26)、山葡萄 (0.10)、山杏更新 (0.10)、鼠李 (0.07) |
| | 草本层 | 9 | 14 | 14 | 胡枝子 (0.30)、隐子草 *Cleistogenes serotina* (0.17)、亚柄薹草 (0.15)、万年蒿 (0.13)、狗尾草 (0.04) |
| F | 灌木层 | 5 | 6 | 6 | 油松更新 (0.41)、春榆 (0.21)、山葡萄 (0.17)、酸枣 (0.17)、小檗 (0.02) |
| | 草本层 | 7 | 14 | 15 | 亚柄薹草 (0.30)、油芒 (0.13)、万年蒿 (0.12)、隐子草 (0.09)、火绒草 *Leontopodium leontopodioides* (0.08) |

要值分布相对均衡。综上，林分类型显著影响林下灌草植物组成，混交林（尤其是油松蒙古栎混交林）更有利于提升林下植物丰富度，而纯林则相对较低。各林分灌木层优势种以混交树种的天然更新为主，草本层则以亚柄薹草等耐阴植物为共同优势种，但不同林分间仍存在一定差异。

不同林分类型灌草植物多样性指数存在显著差异（表 3）。灌木层中，油松蒙古栎混交林植物多样性显著高于其他林分类型（$P < 0.05$）；油松纯林植物丰富度最低，但其均匀度指数与油松蒙古栎混交林无显著差异，表明油松纯林虽然物种数量较少，但分布较为均匀。草本层中，油松柠条混交林植物多样性最高，油松纯林植物多样性与多数林分无显著差异，表明其能够较好地维持草本层多样性。油松五角槭混交林在草本层的各项多样性指标均较低，提示该混交模式可能抑制了草本层植物的生长。

## 2.2 不同类型油松人工林土壤化学计量特征

双因素方差分析结果表明（表 4），林分类型对 SOC 含量、TN 含量及其储量具有极显著影响（$P < 0.001$），对 SOC 储量（$P < 0.01$）和 C∶N（$P < 0.05$）影响显著，而对 TP 含量和储量及其化学计量比无显著影响。不同土壤深度之间均不存在显著差异（$P > 0.05$），表明在本研究设置的剖面层次内，养分含量未呈现明显的垂直分异，反映出该区域土壤表层养分分布相对均匀。不同林分类型与土壤深度间均不存在交互作用，说明不同林分类型下土壤养分的垂直分布格局具有一致性，并未因植被类型的不同而形成差异化的剖面垂直分异。

本研究对比分析了 6 种林分 0 ～ 20 cm 土层的土壤养分平均值差异（表 5），结果表明林分类型对 SOC 与 TN 含量及储量具有显著调控作用，而对 TP 含量及储量则无显著影响。其中，油松蒙古栎混交林和油松黄栌混交林的 SOC 与 TN 含量及储量最高，而油松纯林的 SOC、TN 含量和储量均显著低于其他林分类型（$P < 0.05$），其 SOC、TN 固持能力较弱。在化学计量特征方面，油松纯林与油松混交林土壤 C∶N 均无显著差异，油松黄栌和油松蒙古栎混交林的土壤 C∶P 和 N∶P 显著高于油松纯林（$P < 0.05$），其他林分类型间无显著差异。这一结果表明，相较于纯林，混交林可通过改变凋落物组成或土壤微环境影响有机质的分解过程及磷的相对利用效率。

表 3 不同林分类型林下植物多样性比较 †

**Table 3 Comparison of understory plant diversity in different forest stand types**

| 层次 Layer | 林分类型 Stand type | 丰富度 $S$ | 多样性指数 $H'$ | 优势度指数 $D$ | 均匀度指数 $J$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 灌木层 Shrub layer | A | 4.11±0.35 b | 0.36±0.08 c | 0.16±0.04 c | 0.26±0.05 c |
| | B | 7.00±0.78 a | 1.55±0.10 a | 0.73±0.02 a | 0.82±0.02 a |
| | C | 4.22±0.40 b | 0.82±0.10 b | 0.43±0.06 b | 0.58±0.07 b |
| | D | 4.11±0.35 b | 0.89±0.14 b | 0.46±0.07 b | 0.64±0.08 ab |
| | E | 4.11±0.35 b | 1.06±0.10 b | 0.56±0.05 b | 0.76±0.04 ab |
| | F | 3.11±0.39 b | 0.92±0.14 b | 0.53±0.07 b | 0.79±0.10 a |
| 草本层 Herb layer | A | 6.33±0.67 bc | 1.42±0.12 a | 0.68±0.04 a | 0.79±0.03 a |
| | B | 7.89±0.79 ab | 1.66±0.14 a | 0.74±0.04 a | 0.83±0.04 a |
| | C | 9.11±0.54 a | 1.68±0.12 a | 0.75±0.04 a | 0.76±0.04 ab |
| | D | 5.78±0.83 c | 1.32±0.15 a | 0.65±0.06 a | 0.80±0.04 a |
| | E | 3.67±0.69 d | 0.82±0.18 b | 0.42±0.09 b | 0.59±0.12 b |
| | F | 6.00±0.47 bc | 1.51±0.09 a | 0.72±0.03 a | 0.85±0.03 a |

† 不同小写字母表示不同林分类型间的差异显著（$P < 0.05$），下同。
Different lowercase letters denote significant differences ($P < 0.05$) among different stand types, the same below.

表 4 林分类型和土壤深度对土壤养分特征的双因素方差分析 †

**Table 4 Two-way ANOVA on the effects of stand type and soil depth on soil nutrient characteristics**

| 因素 Factors | 有机碳 Organic carbon / ($g \cdot kg^{-1}$) | 全氮 Total nitrogen / ($g \cdot kg^{-1}$) | 全磷 Total phosphorus / ($g \cdot kg^{-1}$) | 碳储量 Carbon storage / ($t \cdot hm^{-2}$) | 氮储量 Nitrogen storage / ($t \cdot hm^{-2}$) | 磷储量 Phosphorus storage / ($t \cdot hm^{-2}$) | 碳氮比 C∶N | 碳磷比 C∶P | 氮磷比 N∶P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| X | 5.753*** | 6.672*** | 0.278 | 5.088** | 6.849*** | 0.600 | 2.862* | 2.382 | 1.818 |
| Y | 2.533 | 0.958 | 0.008 | 0.851 | 0.004 | 0.445 | 2.810 | 0.613 | 0.143 |
| X×Y | 1.083 | 0.569 | 2.659 | 0.936 | 0.370 | 2.716 | 1.417 | 1.070 | 1.287 |

† X 表示林分类型，Y 表示土壤深度；* 表示 $P < 0.05$ 的显著性，** 表示 $P < 0.01$ 的显著性，*** 表示 $P < 0.001$ 的显著性。
X represents stand type, Y represents soil depth. * indicates significance at $P < 0.05$, ** indicates significance at $P < 0.01$, and *** indicates significance at $P < 0.001$.

表 5　不同林分类型的 SOC、TN、TP 含量和储量及化学计量比
**Table 5　SOC, TN and TP contents, stocks and stoichiometric ratios of different stand types**

| 林分类型 Stand type | 有机碳 Organic carbon / ($g \cdot kg^{-1}$) | 全氮 Total nitrogen / ($g \cdot kg^{-1}$) | 全磷 Total phosphorus / ($g \cdot kg^{-1}$) | 碳储量 Carbon storage / ($t \cdot hm^{-2}$) | 氮储量 Nitrogen storage / ($t \cdot hm^{-2}$) | 磷储量 Phosphorus storage / ($t \cdot hm^{-2}$) | 碳氮比 C∶N | 碳磷比 C∶P | 氮磷比 N∶P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 30.05±4.26 ab | 1.98±0.16 a | 0.26±0.02 a | 77.38±4.21 a | 5.12±0.15 a | 0.68±0.03 a | 15.12±0.93 ab | 113.3±4.65 ab | 7.51±0.20 a |
| B | 34.17±5.85 a | 1.74±0.19 ab | 0.25±0.02 a | 75.14±1.98 a | 3.85±0.09 b | 0.54±0.01 a | 19.55±0.57 a | 138.93±5.85 ab | 7.11±0.29 a |
| C | 21.47±3.04 abc | 1.39±0.16 b | 0.28±0.03 a | 55.51±4.17 b | 3.59±0.12 b | 0.72±0.11 a | 15.45±0.99 ab | 84.21±21.86 bc | 5.35±1.10 ab |
| D | 23.08±2.46 abc | 1.54±0.17 ab | 0.25±0.04 a | 57.18±3.48 b | 3.79±0.25 b | 0.63±0.05 a | 15.08±0.31 ab | 90.87±1.71 abc | 6.03±0.15 ab |
| E | 18.02±1.73 bc | 1.26±0.15 b | 0.31±0.08 a | 46.02±1.91 b | 3.22±0.25 b | 0.81±0.22 a | 14.48±1.37 b | 63.58±12.74 bc | 4.62±1.21 ab |
| F | 11.95±1.14 c | 0.76±0.09 c | 0.27±0.07 a | 28.71±1.16 c | 1.82±0.12 c | 0.65±0.13 a | 16.03±1.64 ab | 46.53±6.91 c | 3.03±0.65 b |

### 2.3　不同类型油松人工林生态因子综合评价

通过主成分分析方法对 6 个林分类型 14 个指标进行综合评价，共提取出 4 个特征值大于 1 的有效主成分，累计贡献率达到 89.605%，能够反映绝大部分信息，可以对大多数指标进行充分概括（表 6）。其中，第 1 主成分的方差贡献率为 30.757%，主要反映灌木群落的多样性，特征向量在灌木丰富度、多样性指数、优势度指数和均匀度指数上均高于 0.80，可定义为“灌木多样性因子”；第 2 主成分的方差贡献率为 22.666%，在草本优势度指数与丰富度上呈正向载荷，而在草本多样性指数、均匀度指数及土壤碳含量上则为负向载荷，具有明显的生态权衡特征，可定义为“生态权衡因子”；第 3 主成分的方差贡献率为 21.314%，集中体现了草本群落的多样性与土壤养分含量的正相关关系，定义为“草本多样性 - 土壤养分协同因子”；第 4 主成分的方差贡献率为 14.868%，高度代表 TN、TP 的储量，其载荷均在 0.97 以上，作为相对独立的“养分储量因子”。

表 6　主成分分析结果
**Table 6　Principal component analysis results**

| 指标 Indicators | 主成分 Principal component | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 灌木丰富度 *S* | 0.857 | 0.452 | 0.078 | 0.093 |
| 灌木多样性指数 *H′* | 0.856 | 0.466 | 0.000 | -0.018 |
| 灌木优势度指数 *D* | 0.848 | 0.406 | 0.184 | 0.055 |
| 灌木均匀度指数 *J* | 0.809 | 0.489 | -0.115 | 0.023 |
| 草本丰富度 *S* | -0.547 | 0.438 | 0.396 | -0.296 |
| 草本多样性指数 *H′* | 0.119 | -0.686 | 0.594 | 0.112 |
| 草本优势度指数 *D* | -0.540 | 0.598 | 0.571 | -0.059 |
| 草本均匀度指数 *J* | 0.402 | -0.541 | 0.729 | 0.028 |
| 碳含量 SOC | 0.306 | -0.624 | 0.699 | 0.066 |
| 氮含量 TN | -0.484 | 0.588 | 0.624 | 0.049 |
| 磷含量 TP | -0.302 | 0.544 | 0.596 | 0.224 |
| 碳储量 $R_{SOC}$ | 0.498 | -0.029 | 0.565 | -0.059 |
| 氮储量 $R_{TN}$ | -0.120 | 0.036 | -0.032 | 0.978 |
| 磷储量 $R_{TP}$ | -0.133 | 0.045 | -0.100 | 0.974 |
| 特征值 Eigenvalue | 4.306 | 3.173 | 2.984 | 2.082 |
| 累计贡献率 Cumulative contribution rate /% | 30.757 | 53.423 | 74.737 | 89.605 |

以选取的主成分的方差贡献率作为权重，构建不同林分类型植物多样性及土壤养分的综合得分：$F=0.307\ 57F_1+0.226\ 66F_2+0.213\ 14F_3+0.148\ 68F_4$。结果表明，6 种林分类型中油松蒙古栎混交林的综合得分最高；油松黄栌混交林和油松柠条混交林分别位列第 2 和第 3；油松山杏混交林、油松五角槭混交林和油松纯林综合得分为负，分别位列第 4、第 5 和第 6（表 7）。

表 7　综合得分及排名
**Table 7　Comprehensive scores and rankings**

| 林分类型 Stand type | 主成分得分 Principal component scores | | | | 综合得分 Comprehensive score | 综合排名 Comprehensive ranking |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | | |
| A | 0.486 | 1.386 | -0.872 | -0.105 | 0.293 | 2 |
| B | 0.757 | 0.110 | 1.411 | -0.218 | 0.588 | 1 |
| C | -0.314 | 0.460 | 0.212 | 0.207 | 0.093 | 3 |
| D | -0.361 | -0.254 | -0.218 | 0.342 | -0.183 | 4 |
| E | 0.617 | -0.931 | -0.634 | -0.081 | -0.188 | 5 |
| F | -1.183 | -0.772 | 0.101 | -0.144 | -0.600 | 6 |

## 3　结论与讨论

### 3.1　讨　论

#### 3.1.1　林分类型对林下灌草植物组成和多样性的影响

本研究发现，林分类型显著影响林下灌草植物物种组成。油松混交林的植物种数明显高于油松纯林，该结果与生态位理论相符合：混交林通过形成更复杂的冠层结构与根系分布，能够创造更高的生境异质性，从而为多种生活型的植物提供空间资源 [7,19]。灌木层中，上层乔木直接主导林下植被的发育轨迹，这与孟祥玉等 [20] 的研究结论

一致，林下植物多样性与乔木层物种组成及营林方式存在显著相关性。草本层中，灌木胡枝子更新以其发达的根蘖和优秀的固氮能力，在贫瘠的生境中具备显著的竞争优势。然而，由于其资源分配倾向于快速繁殖而非长期竞争，缺乏耐阴性与高位生长能力，随着林分自然演替，郁闭度增加，光照资源受限，胡枝子在垂直空间竞争中逐渐不敌耐阴灌木与乔木幼树。亚柄薹草和万年蒿在多数林分中保持稳定优势，反映了其对林下环境的广泛适应性。

本研究发现，林分类型显著影响林下灌草多样性。灌木层中，油松蒙古栎混交林在维持植物多样性方面具有突出优势；油松纯林物种丰富度最低，但其优势度、多样性及均匀度指数与多数混交林相当，表明混交林虽然物种数较多，但分布并不均匀。这主要是由于灌木优势种均以混交树种的天然更新为主，这些个体在数量、盖度或生物量上占据绝对优势，导致其他物种个体稀少。草本层中，油松柠条混交林在维持植物多样性方面具有突出优势，油松纯林多样性水平与多数混交林相当。这与谭许脉等 [21] 的研究结果一致，即针叶林郁闭度相对较低，林下光照条件较好，有利于更多草本植物的生存与繁殖，草本层植物多样性对林分类型的响应程度要低于灌木层 [22]。相比之下，油松五角槭混交林在草本层的各项多样性指标均较低，表明该混交类型对草本层植物生长产生了抑制作用。这可能与五角槭的化感作用或竞争机制有关，需要进一步研究验证。

#### 3.1.2 林分类型对其土壤 SOC、TN、TP 含量和储量及化学计量特征的影响

本研究发现，林分类型是影响土壤 C、N 循环的关键驱动因素，这一结果与许窕孜等 [23] 对北江中下游地区植被与土壤关系的研究结论相吻合。该研究表明，不同林分类型通过改变凋落物质量与数量、根系分布格局及微生物活性，显著调控土壤 C 和 N 的积累过程。林分类型对 P 指标影响不显著，这与王燕等 [24] 在东北东部山区的研究结论一致。P 在土壤中的迁移转化主要受成土母质、矿物类型及长期风化过程控制，短期内植被变化对其影响有限。本研究中，土壤深度未表现出显著影响，可能与取样深度范围较浅有关。植被根系主要分布在 0 ～ 50 cm 土层，养分循环也集中在这一范围，导致剖面分异不明显。未来研究可考虑加深取样深度，进一步揭示养分在更深土层的分布规律。林分类型与土壤深度无显著交互作用，这一发现表明不同林分类型下土壤养分的垂直分布格局具有一致性。这与崔秋芳等 [18] 在南太行山区侧柏纯林及其混交林中的研究结果相似，虽然树种混交显著提高了表层土壤养分，但林分类型对养分剖面分布的影响规律基本一致，即土壤养分含量随着土壤深度的增加而下降。

本研究表明，与油松纯林相比，混交林显著提升了 SOC 与 TN 含量和储量，这与多数研究认为混交林能促进土壤养分积累的结论一致 [15,25-26]。其内在机制主要体现在凋落物输入与根系互作两方面：一方面，混交林凋落物种类更丰富、数量更高，且阔叶凋落物更易分解，为土壤微生物提供了优质碳源，从而加速 C、N 矿化过程 [24,27-28]。另一方面，树种间的根系互作可调控激素水平与 N 同化酶活性，增强 N 的吸收与转化效率 [29-31]。不同林分类型土壤 TP 含量和储量无显著差异，主要是因为 P 受土壤母质和生物地球化学过程的影响，本研究地理位置相近，土壤组成相似，枯落物和微生物分解产生的 P 不满足林木消耗，周转速率慢，进而导致整体差异不明显。

营造混交林是改善土壤肥力、增强林地养分循环的重要措施，而混交效应受到树种自身特性的影响。本研究中，混交后的林分土壤 C∶N 与纯林相比无显著变化。这是因为造林方式发生变化后，土壤 C 和 N 含量的变化趋势是一致的 [28]，在积累和消耗的过程中具有相对固定的比例 [32]，即同步增加或降低 [33]，这与西北半干旱地区土壤 C、N、P 化学计量特征变化的研究结果一致 [27]。本研究结果表明，混交林有较高的 C∶P 和 N∶P 值，说明混交提高了有机质的分解速率，增加了土壤 SOC 和 TN 的含量，但相对增加了 TP 对林木生长的限制。这是因为混交林增加了林地表面的凋落物数量，直接促进土壤 SOC 和 TN 的储存，而土壤 TP 含量主要受土壤母质的影响，释放速率相对滞后，不像 SOC 和 TN 变化得那么明显 [23,34-36]。这一结果表明，混交林在增强 C、N 固存的同时，可能加剧 P 对林木生长的潜在限制。因此，在干旱、半干旱区植被恢复中，营造混交林虽是改善土壤肥力的有效途径，但需关注 P 的协同管理，以维持生态系统养分平衡，提升森林多功能性。

#### 3.1.3 不同林分类型综合评价

本研究通过主成分分析，将 14 项植被、土壤指标降维为 4 个相互独立的综合因子，能够较为全面地反映灌木 - 草本 - 土壤系统的协同与权衡关系。其中，第 1 主成分贡献率最高，表明灌木群落是区分不同林分林下生态功能的首要因素，其通过调控光照、凋落物输入及微环境，深刻影响

草本层的发育以及土壤 C、N 的积累。第 2、第 3 主成分贡献率相近，这种权衡与协同可能是因为草本通过快速生长竞争光、水及养分等关键资源，从而抑制灌木的天然更新；同时，灌木凋落物通常更易于形成稳定的土壤 C 库，而草本凋落物分解与 C 周转速率较快，但不利于长期固 C。这一发现提示在植被恢复中应避免单一功能导向，需统筹考虑生态系统的整体性。第 4 主成分贡献率相对较低，其表征的是土壤基础养分库，储量大小主要受植被类型、成土母质和长期生物地球化学循环等缓慢过程影响。但长期来看，该因子仍是生态系统稳定的重要基础，需持续监测。

主成分分析作为一种客观评价植物多样性和土壤养分特征的综合分析方法，能够对多种影响因子进行全面评估，进而筛选出最优林分类型。油松山杏混交林、油松五角槭混交林和油松纯林的综合得分均为负数，表明这 3 种林分类型的综合表现未达到理想状态。在人工林经营中，理想的林分应具有较高的植物物种丰富度及均衡的土壤养分状况，以促进林木的健康生长并维持生态系统功能稳定。而油松蒙古栎混交林综合得分为 0.588，在第 1 主成分和第 3 主成分上均取得高分，实现了“稳定结构”与“高效循环”的协同增效，林下植物多样性和土壤养分特征呈现出更为均衡且良好的态势。因此，蒙古栎是油松纯林较为适宜的混交树种，有助于提升植物多样性、促进土壤 SOC 与 TN 的积累，并对退化林地生态修复具有积极作用。本研究结果对油松人工林经营管理具有重要启示，在生态恢复实践中应重视树种配置对植物多样性及土壤养分循环的影响。

本研究明确了不同林分类型的生态效应，但仍存在一定的局限性。首先，本研究虽集中于同一坡面的中下部以控制立地条件，但未能完全排除土壤初始异质性的潜在影响，同时研究周期较短，难以揭示林分结构与功能关系的长期动态。其次，针对特定现象，如油松 - 五角槭混交林对草本层的抑制现象，仅停留在化感作用或资源竞争的推测层面，缺乏直接的植物生理或土壤微生物学证据支持。未来应开展长期定位监测，以揭示植被 - 土壤系统的相互作用，并结合土壤微生物、酶活性及化感物质检测等研究，深入分析树种间相互作用机理，从而为混交林的树种选择与精准调控提供更坚实的理论依据。

### 3.2　结　论

1）林分类型显著影响林下植被多样性。油松与蒙古栎混交有利于灌木层多样性的发展，而与柠条混交则有利于草本层丰富度的提高，油松纯林在维持草本层多样性方面表现出与多数混交林相近的水平。

2）油松混交林显著提高 SOC、TN 含量与储量。混交林由于更高的凋落物输入量、更优的分解特性以及树种互作对 N 转化效率的促进作用，显著提高了 SOC、TN 含量及储量。然而，混交林较高的 C∶P 与 N∶P 表明，TP 的有效性相对降低，可能成为系统长期生产力的潜在限制因子。

3）油松蒙古栎混交林在植物多样性和土壤养分方面综合表现最佳，可作为干旱、半干旱地区油松人工林改造及植被恢复与重建的理想配置。

### 参考文献：


[1] 何盼盼 , 马全林 , 陈徵尼 , 等 . 密度调控对陇西黄土高原油松人工林林下植被与土壤环境的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(12):143-153.
He P P, Ma Q L, Chen Z N, et al. Effects of density regulation on understory vegetation and soil environment of *Pinus tabuliformis* plantation on Longxi Loess Plateau[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(12):143-153.

[2] Zhang J Z, Fu B J, Stafford-Smith M, et al. Improve forest restoration initiatives to meet sustainable development goal 15[J]. Nature Ecology & Evolution,2021,5:10-13.

[3] 杜满义 , 张连金 , 裴顺祥 , 等 . 不同类型油松混交林土壤物理特性 [J]. 生态学杂志 ,2020,39(11):3588-3595.
Du M Y, Zhang L J, Pei S X, et al. Soil physical characteristics in different types of *Pinus tabuliformis* mixed forests[J]. Chinese Journal of Ecology,2020,39(11):3588-3595.

[4] 樊东 , 杨振奇 , 秦富仓 , 等 . 砒砂岩区不同油松人工林密度对林下植物多样性与土壤理化性质的影响 [J]. 水土保持通报 , 2024,44(6):68-76.
Fan D, Yang Z Q, Qin F C, et al. Influence of afforestation density on plant diversity and soil physicochemical properties of *Pinus tabulaeformis* in Arsenic sandstone area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2024,44(6):68-76.

[5] 胡尔查 , 王铮 , 李梓豪 , 等 . 毛乌素沙地不同人工林林下植物多样性及其与土壤理化性质的关系 [J]. 林业科学研究 , 2024,37(4):174-181.
Hu E C, Wang Z, Li Z H, et al. Understory plant diversity and its relationship with soil physicochemical properties in different plantations in Mu Us sandy land[J]. Forest Research,2024,37(4): 174-181.

[6] 孙婉怡 , 余新晓 , 贾国栋 , 等 . 内蒙古半干旱地区不同人工林土壤因子与林下植物多样性的相关性 [J]. 东北林业大学学报 ,

2024,52(7):51-57.

Sun W Y, Yu X X, Jia G D, et al. Correlation between soil factors and understory plant diversity in different plantations in semi-arid regions of Inner Mongolia[J]. Journal of Northeast Forestry University,2024,52(7):51-57.

[7] 云慧雅 , 毕华兴 , 焦振寰 , 等 . 晋西黄土区不同林分类型和密度条件下林下灌草组成及多样性特征 [J]. 浙江农林大学学报 , 2023,40(3):569-578.

Yun H Y, Bi H X, Jiao Z H, et al. Composition and diversity of understory plants under different stand types and densities in loess region of western Shanxi Province[J]. Journal of Zhejiang A & F University,2023,40(3):569-578.

[8] 汪国彬 . 福建柏不同混交模式对林木生长及林下多样性的影响 [J]. 湖南林业科技 ,2025,52(6):49-55.

Wang G B. The impact of different mixed planting types of *Chamaecyparis hodginsii* on tree growth and understory diversity[J]. Hunan Forestry Science & Technology,2025,52(6):49-55.

[9] 宋霞 , 邓子超 , 董辉 , 等 . 广东化州 3 种不同林龄人工林植物多样性研究 [J]. 林业与环境科学 ,2021,37(4):108-116.

Song X, Deng Z C, Dong H, et al. Study on plant diversity of three different age plantations in Huazhou, Guangdong Province[J]. Forestry and Environmental Science,2021,37(4):108-116.

[10] 赵耀 , 王百田 . 晋西黄土区不同林地植物多样性研究 [J]. 北京林业大学学报 ,2018,40(9):45-54.

Zhao Y, Wang B T. Plant diversity of different forestland in the loess region of western Shanxi Province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University,2018,40(9):45-54.

[11] 何高迅 , 王越 , 彭淑娴 , 等 . 滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征 [J]. 生态学报 ,2020,40(13):4425-4435.

He G X, Wang Y, Peng S X, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks and ecological stoichiometry characteristics of different vegetation restorations in degraded mountainous area of central Yunnan, China[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(13):4425-4435.

[12] 曹全恒 , 胡健 , 陈雪玲 , 等 . 川西北沙地植被恢复对土壤碳氮磷及生态化学计量特征的影响 [J]. 草地学报 ,2022,30(3):523-531.

Cao Q H, Hu J, Chen X L, et al. Effects of vegetation restoration of sandy land on the characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus and its ecological stoichiometry in northwest Sichuan[J]. Acta Agrestia Sinica,2022,30(3):523-531.

[13] 徐芷君 , 刘苑秋 , 方向民 , 等 . 亚热带 2 种针叶林土壤碳氮磷储量及化学计量比对混交的响应 [J]. 水土保持学报 ,2019,33(1):165-170.

Xu Z J, Liu Y Q, Fang X M, et al. The responses of soil carbon, nitrogen and phosphorus storage and their stoichiometry in two coniferous forests to mixed effect in subtropical area[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2019,33(1):165-170.

[14] 李虹谕 , 杨会侠 , 孙佳彤 , 等 . 中、幼龄红松人工林生长季非结构性碳水化合物和碳氮磷生态化学计量特征 [J]. 浙江农林大学学报 ,2025,42(3):495-502.

Li H Y, Yang H X, Sun J T, et al. Structural carbohydrate and carbon, nitrogen, phosphorus ecological stoichiometry in young and middle-aged *Pinus koraiensis* plantations during growing seasons[J]. Journal of Zhejiang A & F University,2025,42(3):495-502.

[15] 王薇菡 , 虞依娜 , 谢嘉淇 , 等 . 中国南亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳、氮、磷的积累及化学计量特征 [J]. 生态学报 , 2023,43(5):1793-1803.

Wang W H, Yu Y N, Xie J Q, et al. Characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus accumulation and their ecological stoichiometry in Chinese subtropical forest under different afforestation patterns[J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(5):1793-1803.

[16] 刘长德 , 刘梦瑶 , 陈锦睿 , 等 . 不同树种配置模式和郁闭度对桉树改造林土壤养分的影响 [J]. 森林工程 ,2025,41(1):86-99.

Liu C D, Liu M Y, Chen J R, et al. Effects of different tree species configuration modes and canopy density on soil nutrients in *Eucalyptus robusta* plantation[J]. Forest Engineering,2025,41(1):86-99.

[17] 肖指柔 , 滕金倩 , 秦佳琪 , 等 . 土壤碳氮磷生态化学计量比对针阔人工混交林及其纯林的差异响应 [J]. 西部林业科学 , 2024,53(2):56-63.

Xiao Z R, Teng J Q, Qin J Q, et al. Differential responses of soil carbon, nitrogen and phosphorus eco-stoichiometric ratio to monoculture and mixed coniferous-broadleaf plantations[J]. Journal of West China Forestry Science,2024,53(2):56-63.

[18] 崔秋芳 , 程倩 , 杨喜田 . 南太行山区侧柏纯林及其混交林土壤生态化学计量特征 [J]. 西部林业科学 ,2020,49(1):20-24,30.

Cui Q F, Cheng Q, Yang X T. Soil ecological stoichiometry characteristics of the *Platycladus orientalis* forests in the southern Taihang mountain [J]. Journal of West China Forestry Science, 2020,49(1):20-24,30.

[19] 刘利杰 , 李季衡 , 陈岸军 , 等 . 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 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2023,43(9):89-96.

Liu L J, Li J H, Chen A J, et al. Effects of understory plant diversity on stand type and density in Zengcheng forest farm[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,43(9):89-96.

[20] 孟祥玉 , 范舒欣 , 董丽 , 等 . 北京城市森林林下植物多样性与土壤因子的相关性 [J]. 东北林业大学学报 ,2023,51(7):102-114.
Meng X Y, Fan S X, Dong L, et al. Correlation between understory plant diversity and soil factors in Beijing urban forests[J]. Journal of Northeast Forestry University,2023,51(7):102-114.

[21] 谭许脉 , 张文 , 肖纳 , 等 . 杉木林改造成乡土阔叶林对林下植物物种组成和多样性的影响 [J]. 生态学报 ,2022,42(7):2931-2942.
Tan X M, Zhang W, Xiao N, et al. Effects of understory plant composition and diversity under transforming Chinese fir into precious indigenous broadleaf plantations[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(7):2931-2942.

[22] 刘玉宝 .29 年生杉木林下植物多样性与密度的关系 [J]. 福建林学院学报 ,2005,25(1):27-30.
Liu Y B. Relationship between undergrowth species diversity and stand density of 29-year-old Chinese fir plantations[J]. Journal of Fujian College of Forestry,2005,25(1):27-30.

[23] 许窕孜 , 叶彩红 , 张耕 , 等 . 北江中下游不同林分类型土壤 C、N、P 生态化学计量特征 [J]. 应用生态学报 ,2023,34(4):962-968.
Xu T Z, Ye C H, Zhang G, et al. Soil C, N and P stoichiometry in different forest stand types in the middle and lower reaches of Beijiang river, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(4):962-968.

[24] 王燕 , 张全智 , 王传宽 , 等 . 恢复方式对东北东部森林土壤碳氮磷计量特征的影响 [J]. 植物生态学报 ,2024,48(7):943-954.
Wang Y, Zhang Q Z, Wang C K, et al. Effects of restoration approaches on forest soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in eastern northeast China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2024,48(7):943-954.

[25] 胡亚林 , 汪思龙 , 黄宇 , 等 . 凋落物化学组成对土壤微生物学性状及土壤酶活性的影响 [J]. 生态学报 ,2005,25(10):2662-2668.
Hu Y L, Wang S L, Huang Y, et al. Effects of litter chemistry on soil biological property and enzymatic activity[J]. Acta Ecologica Sinica,2005,25(10):2662-2668.

[26] 于宁楼 . 九龙山不同森林类型立地长期生产力研究 [D]. 北京 : 中国林业科学研究院 ,2001:106.
Yu N L. A study on long-term site productivity of different forest types in Jiulongshan mountain[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2001:106.

[27] Chen M Y, Yang X, Shao M A, et al. Changes in soil C-N-P stoichiometry after 20 years of typical artificial vegetation restoration in semiarid continental climate zones[J]. Science of the Total Environment,2022,852:158380.

[28] 徐云浩 , 刘婷婷 , 刘贵梅 , 等 . 混交林林木根系对氮磷养分的吸收利用及竞争策略 [J]. 世界林业研究 ,2025,38(1):38-44.
Xu Y H, Liu T T, Liu G M, et al. Absorption and utilization of nitrogen and phosphorus nutrients by tree root systems in mixed forests and their competition strategies[J]. World Forestry Research,2025,38(1):38-44.

[29] 杨果果 , 孔玉华 , 赵佳宝 , 等 . 不同松栎混交林土壤溶解性有机碳氮的差异分析 [J]. 水土保持研究 ,2017,24(6):79-83.
Yang G G, Kong Y H, Zhao J B, et al. Differences of dissolved organic carbon and nitrogen in soil of four mixed pine-oak plantations[J]. Research of Soil and Water Conservation,2017, 24(6):79-83.

[30] 周正虎 , 王传宽 . 生态系统演替过程中土壤与微生物碳氮磷化学计量关系的变化 [J]. 植物生态学报 ,2016,40(12):1257-1266.
Zhou Z H, Wang C K. Changes of the relationships between soil and microbes in carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry during ecosystem succession[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2016,40(12):1257-1266.

[31] Murty D, Kirschbaum M U F, McMurtrie R E, et al. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature[J]. Global Change Biology, 2002,8:105-123.

[32] 张藤子 . 油松—蒙古栎混交林中油松针叶养分特征及其影响因素研究 [D]. 沈阳 : 沈阳农业大学 ,2018:34.
Zhang T Z. Nutrient characteristics and its influencing factors of *P. tabuliformis* needle in *P. tabuliformis* and *Q. mongolica* mixed stand[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,2018:34.

[33] Funakawa S, Fujii K, Kadono A, et al. Could soil acidity enhance sequestration of organic carbon in soils?[M]//Hartemink A E, McSweeney K. Soil Carbon. Heidelberg: Springer,2014.

[34] Liu M H, Chen S X, Korpelainen H, et al. Nitrogen addition affects eco-physiological interactions between two tree species dominating in subtropical forests[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2021,162:150-160.

[35] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C ∶ N ∶ P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry,2010,98:139-151.

[36] 李路 , 常亚鹏 , 许仲林 . 天山雪岭云杉林土壤 CNP 化学计量特征随水热梯度的变化 [J]. 生态学报 ,2018,38(22):8139-8148.
Li L, Chang Y P, Xu Z L. Stoichiometric characteristics of *Picea schrenkiana* forests with a hydrothermal gradient and their correlation with soil physicochemical factors on Tianshan mountain[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(22):8139-8148.

[ 本文编校：吴　彬 ]