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

不同间伐强度对大别山黄山松人工林林下植物多样性的长期影响

马闯 刘彦春 王梦涵 马思雨 李青林 苏芳龙 杨中领 李国勇

Long-term effects of different thinning intensities on understory plant diversity of *Pinus taiwanensis* plantations in Dabieshan Mountain of central China

Ma Chuang, Liu Yanchun, Wang Menghan, Ma Siyu, Li Qinglin, Su Fanglong, Yang Zhongling, Li Guoyong

引用本文:
马闯, 刘彦春, 王梦涵, 马思雨, 李青林, 苏芳龙, 杨中领, 李国勇. 不同间伐强度对大别山黄山松人工林林下植物多样性的长期影响[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(10):11–18. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250208
Ma Chuang, Liu Yanchun, Wang Menghan, Ma Siyu, Li Qinglin, Su Fanglong, Yang Zhongling, Li Guoyong. Long–term effects of different thinning intensities on understory plant diversity of *Pinus taiwanensis* plantations in Dabieshan Mountain of central China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(10):11–18. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250208

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250208

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

间伐强度对马尾松人工林冠下套种树种生长的影响

Effects of thinning intensity on the growth of interplanting broadleaved trees under *Pinus massoniana* plantation

北京林业大学学报, 2021, 43(1): 58–65. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200086

不同间伐强度下竞争对东北阔叶红松林主要树种生长气候关系的影响

Influence of competition on the relationship between tree growth and climate of main tree species in the broadleaved Korean pine forest under different thinning intensities in northeastern China

北京林业大学学报, 2023, 45(1): 30–39. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210515

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

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

亚热带马尾松林阔叶化改造对林分结构的影响

Effects of broadleaved transformation on stand structure of *Pinus massoniana* forest in subtropical area

北京林业大学学报, 2025, 47(1): 11–21. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240292

基于抚育间伐效应的红松人工林枝条密度模型

Branch density model for *Pinus koraiensis* plantation based on thinning effects

北京林业大学学报, 2021, 43(2): 10–21. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200057

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250208

不同间伐强度对大别山黄山松人工林林下植物多样性的长期影响

马 闯 刘彦春 王梦涵 马思雨 李青林 苏芳龙 杨中领 李国勇
（河南省全球变化生态学国际联合实验室，河南大学生命科学学院生物多样性保护与生态修复实验室，河南 开封 475004）

摘要:【目的】本研究旨在通过长期定位观测，探究不同强度（弱度、中度、强度）的抚育间伐对大别山地区黄山松人工林林下植物物种丰富度、多样性和群落结构的长期影响。**【方法】**选取大别山地区黄山松人工林长期间伐试验样地，测定 0（对照）、10%、20% 和 30% 4 种间伐强度处理 17 年后林下植物多样性指数及主要的土壤理化性质，分析不同间伐强度对林下植物多样性的长期影响。**【结果】**（1）随着间伐强度的增强，土壤速效磷含量逐渐下降且下降幅度逐渐增加；（2）Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数随着间伐强度的增加呈现出先增加后减少的变化趋势；（3）相关分析表明，土壤表层（0 ~ 10 cm）有机碳含量与林下植物 Pielou 均匀度指数呈显著正相关关系。**【结论】**林下植物在保持水土、调节微气候及生物多样性维持等方面扮演着关键角色。黄山松人工林林下植物多样性随间伐强度增加呈先增后降的趋势，10%~20% 的间伐强度有利于提升林下植物多样性。这一发现为科学理解人工林间伐的长期生态效益提供了数据支撑和科学依据。

关键词：黄山松人工林；林下植物；多样性；间伐强度
中图分类号：S753 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)10−0011−08
引文格式：马闯，刘彦春，王梦涵，等. 不同间伐强度对大别山黄山松人工林林下植物多样性的长期影响［J］. 北京林业大学学报，2025，47(10)：11−18. Ma Chuang, Liu Yanchun, Wang Menghan, et al. Long-term effects of different thinning intensities on understory plant diversity of *Pinus taiwanensis* plantations in Dabieshan Mountain of central China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(10): 11−18.

Long-term effects of different thinning intensities on understory plant diversity of *Pinus taiwanensis* plantations in Dabieshan Mountain of central China

Ma Chuang Liu Yanchun Wang Menghan Ma Siyu Li Qinglin Su Fanglong
Yang Zhongling Li Guoyong
(International Joint Research Laboratory for Global Change Ecology, Laboratory of Biodiversity Conservation and Ecological Restoration, School of Life Sciences, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: ［**Objective**］This study aims to investigate the long-term effects of different intensities (low, medium, and high) of thinning on the species richness, diversity, and community structure of understory vegetation in artificial forests of *Pinus taiwanensis* plantations in the Dabieshan Mountain of central China through long-term fixed-point observations. ［**Method**］This study selected long-term thinning experimental plots of *Pinus taiwanensis* plantations in the Dabieshan Mountain. Understory plant diversity index and different main soil physicochemical properties were measured after 17 years of thinning intensities of 0

收稿日期: 2025−06−11 **修回日期:** 2025−10−10
基金项目: 信阳研究院开放基金（2023DBS07、2023XYZD01、2023XYQN10），河南省研究生教育改革与质量提升工程（YJS2025GZZ26）。
第一作者: 马闯。主要研究方向：森林生态系统凋落叶及细根周转过程。Email: kxdnh123@163.com 地址：475004 河南省开封市龙亭区河南大学生命科学学院。
责任作者: 刘彦春，博士生导师，教授。主要研究方向：森林生态系统结构和功能的关系及其对气候变化的响应。Email: yanchunliu@henu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

(control), 10%, 20% and 30%, and the indexes of different soil physicochemical properties were determined. The long-term effects of varied thinning intensities on understory plant diversity were analyzed. [**Result**] (1) As thinning intensity increased, soil available phosphorus content gradually decreased, with the rate of decline accelerating progressively. (2) The Margalef richness index, Pielou evenness index, Simpson diversity index and Shannon-Wiener diversity index increased first and then decreased with the increase of thinning intensity. (3) Correlation analysis revealed that surface soil (0–10 cm) organic carbon content was significantly positively correlated with the Pielou evenness index of understory plants. [**Conclusion**] Understory plants play a key role in soil and water conservation, microclimate regulation, and the maintenance of biodiversity. This study finds that the diversity of understory plants in *Pinus taiwanensis* plantations first increases and then decreases with increasing thinning intensity. Among them, 10%–20% thinning intensity can sustainably enhance understory plant diversity. This finding provides data support and scientific evidence for a better understanding of long-term ecological benefits of thinning in plantations.

Key words: *Pinus taiwanensis* plantations; understory plant; diversity; thinning intensity

人工林在全球森林资源中扮演着重要角色，不仅大幅度抵消持续增长的木材需求并有效减缓人类对天然林的依赖和采伐，此外，还为市场提供了丰富的林副产品。人工林在生态修复、景观重建和环境改善等方面也提供了重要的生态服务功能[1−2]。然而，与天然林相比，人工林在物种多样性、群落稳定性和生产力等方面存在一定的不足，如林分生长速率随着林龄的增加而逐渐减慢，并且会增加林分爆发病虫害的风险[3]。在人工林管理中，一个重要的科学问题是如何通过人为干预来优化林分结构和提升生产力。抚育间伐是一种广泛应用的人工林经营措施，指在未成熟林分中通过多次选择性伐除劣质个体、保留优质林木，以改善林内环境、促进保留木生长，从而提高林分质量与蓄积量[4−5]。

林下植被（高度 < 1.5 m 的树苗、灌木、草本、藤本以及苔藓地衣）是森林生态系统服务功能的重要组成部分[6−7]，对生物多样性维持和生物量积累和生态服务供给具有不可或缺的作用[7]。林下植物的丰富度和多样性主要受资源的可利用性和环境异质性的影响，同时也受林龄、干扰方式以及林冠层的组成和多样性的影响[8]。作为人工林管理的一项重要措施，抚育间伐通过降低林分密度直接改变林分结构和环境。除了快速提高保留乔木个体的胸径外，抚育间伐也会通过改善林下光照条件和土壤养分的生物有效性进而影响林下植物多样性[9−11]。如在马尾松（*Pinus massoniana*）、杉木（*Cunninghamia lanceolata*）等人工林中开展的研究发现抚育间伐可以促进林下植物的发育，增加林下植物生物多样性、盖度和生物量[12−13]。

然而，针对抚育间伐对森林林下植物多样性影响的研究大多聚焦于间伐处理后的短期（2 ~ 5 年）影响[14−15]，对其长期（ > 10 年）影响的科学评估仍显不足。随着时间的推移，间伐处理林下植物种类组成和多样性是否会发生显著变化尚缺乏系统认识。因此，本研究以河南省信阳市黄柏山林场的黄山松（*Pinus taiwanensis*）人工林为研究对象，依托 20 世纪 60 年代建立的人工林间伐示范基地开展林下植物多样性调查，以探究长期间伐处理后不同间伐强度对林下植物多样性的影响，为科学评价人工林管理与人工林生物多样性之间的关系提供理论支持。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于河南大别山森林生态系统国家野外科学观测研究站黄柏山站（115°13′ ~ 115°20′E，31°23′ ~ 31°35′N）。该地区属大别山北麓，地貌类型多样，海拔在 400 ~ 900 m，最高峰九峰尖海拔 1 352.6 m，土壤类型为黄棕壤。季风型大陆性气候，年平均气温 14.8 ℃，年平均降水量 1 298.2 mm。该地区典型植被是常绿针叶混交林。主要的乔木树种有黄山松、柳杉（*Cryptomeria fortunei*）、杉木等。黄柏山林场内分布有维管植物 179 科 809 属 2 116 种，乔木林面积 1.26 万 hm^2，活立木蓄积量 92 万 m^3，森林覆盖率 97.43%[16]。黄山松人工林是黄柏山上主要的植被类型，1964 年建立，分别于 1978 年（林龄 14 年）、1985 年（21 年）、1995 年（31 年）和 2007 年（43 年）按照林分蓄积量的 10%、20% 和 30% 进行 4 次间伐[17]，形成了多次间伐的长期示范样地。

1.2 样地设置与调查

间伐试验共 4 个处理，重度间伐（30%）、中度间伐（20%）、轻度间伐（10%）和不间伐（对照）。试验样地为随机区组设计，4 个区组，共 16 个样地，每个样地大小为 20 m × 30 m，所有样地的坡度、坡向、海拔等保持基本一致。本研究于第 4 次间伐（2007 年）处

理后 17 年(2024 年)进行。在每个间伐处理样地中设置一个 5 m × 5 m 的灌木样方，同时在灌木样方中设置一个 1 m × 1 m 的草本样方，记录每个样方中灌木和草本的种类、盖度、高度和密度，并计算每个样地的乔木平均胸径和密度等，对不同处理下的乔木密度、林下灌木盖度、林下草本密度和林下主要物种组成进行对比分析(表 1)。在不同间伐强度处理下，林下灌木盖度和林下草本密度无显著差异，与对照组相比，间伐处理后林下主要物种组成产生了一些变化，出现的主要物种有八角麻(*Boehmeria platanifolia*)、白叶莓(*Rubus innominatus*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、竹叶草(*Oplismenus compositus*)、鳞毛蕨(*Dryopteris chinensis*)和山胡椒(*Lindera glauca*)等。

1.3　植物多样性测定

本研究采用 Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数[11]对林下物种多样性进行评价。

1.4　土壤理化性质的测定

采用五点取样法，在每个样方内，随机选择 5 个样点分别采集 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 深度的土壤样本。采集后的土壤样本带回实验室，自然风干至质量恒定。风干过程中，剔除样本中较大的植物残体和石块等杂质。随后，将风干后的土壤样本过 2 mm 孔径土壤筛，以确保样本的均匀性和一致性。最后，采用四分法从筛分后的土壤样本中取出部分混匀样本，装入密封袋保存，待后续分析检测。

测定方法：采用高氯酸–硫酸硝化凯氏定氮法测土壤全氮(total nitrogen，TN)含量；碱熔–铝锑抗比色法测全磷(total phosphorus，TP)含量；盐酸–硫酸浸提法测速效磷(available phosphorus，AP)含量；重铬酸钾氧化法测土壤有机碳(soil organic carbon，SOC)含量[18]。

1.5　数据处理

所有数据采用 Microsoft Excel_2019 进行整理和初步计算，在 SPSS_26 软件中进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)，最小显著差异法检验不同间伐强度下物种多样性的差异显著性，以相关分析和多元逐步回归分析探究林下植物多样性指数与植被及土壤理化特性的关系，采用 Origin_2024 和 ChiPlot (https://www.chiplot.online)作图。

2　结果与分析

2.1　长期抚育间伐对土壤基本理化特性的影响

与对照相比，不同间伐处理导致 0 ~ 10 cm 土层的 AP 含量均有所下降(表 2)。具体而言，10%、20% 和 30% 间伐强度处理分别导致 AP 含量下降了 30%、33% 和 51%。这表明随着间伐强度的增加，AP 含量的降低幅度呈递增趋势。30% 间伐处理导致 0 ~ 10 cm 土层 AP 含量降低最为显著($P < 0.05$)。在 TN 和 SOC 含量方面，不同间伐处理与对照相比均无显著差异。而在 TP 含量方面，20% 间伐处理的 0 ~ 10 cm 土层 TP 含量显著低于对照($P < 0.05$)。然而，不同间伐处理下 10 ~ 20 cm 土层的 AP 含量与对照相比均无显著差异，这可能与该土层的根系分布和微生物活性有关。与 0 ~ 10 cm 土层相似，10 ~ 20 cm 土层的 TN、SOC 含量在各处理组与对照组间均无显著差异；20% 间伐处理显著降低 10 ~ 20 cm 土层的 TP 含量($P < 0.05$)。

2.2　不同间伐强度下的林下物种多样性指数

方差分析表明，随着间伐强度的增加，Margalef 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数的变化趋势相对一致，呈现出先增加后减少的显著变化趋势。与对照相比，10% 和 20% 间伐处理导致 Margalef 丰富度指数显著增加($P < 0.05$)；30% 间伐处理下 Margalef 丰富度指数增加不显著(图 1a)。此外，与对照相比，10% 间伐处理显著提高了 Shannon-Wiener 多样性指数；与 10% 间伐处理相比，30% 间伐处理显著降低该指数($P < 0.05$)，这表明适度间伐有助于提高林下植物多样性，但高强度间伐则对林下植物多样性的长期影响较弱(图 1c)。在 Pielou 均匀度指数和 Simpson 多样性指数方面，不同间伐处

表 1　样地基本情况

Tab. 1　Basic information of sample plots

间伐强度/%	乔木密度/(株·hm^{-2})	林下灌木盖度/%	林下草本密度/(株·m^{-2})	林下主要物种
0	1 450.00 ± 110.97a	38.00 ± 1.73a	13.67 ± 11.17a	八角麻 *Boehmeria platanifolia*、白叶莓 *Rubus innominatus*、芒萁 *Dicranopteris dichotoma*、竹叶草 *Oplismenus compositus*
10	900.00 ± 37.88b	42.57 ± 8.07a	12.75 ± 4.50a	八角麻 *Boehmeria platanifolia*、白叶莓 *Rubus innominatus*、芒萁 *Dicranopteris dichotoma*、鳞毛蕨 *Dryopteris chinensis*
20	712.50 ± 23.94c	42.33 ± 9.84a	11.00 ± 2.45a	八角麻 *Boehmeria platanifolia*、白叶莓 *Rubus innominatus*、芒萁 *Dicranopteris dichotoma*、鳞毛蕨 *Dryopteris chinensis*
30	633.33 ± 18.00c	43.20 ± 8.67a	5.75 ± 1.44a	八角麻 *Boehmeria platanifolia*、山胡椒 *Lindera glauca*、芒萁 *Dicranopteris dichotoma*、竹叶草 *Oplismenus compositus*

注：不同小写字母表示不同间伐强度之间差异显著($P < 0.05$)。

表 2 土壤基本理化特征

Tab. 2 Basic physicochemical characteristics of soil

间伐强度/%	土壤深度/cm	总氮含量/（g·kg^{-1}）	总磷含量/（g·kg^{-1}）	有机碳含量/（g·kg^{-1}）	速效磷含量/（mg·kg^{-1}）
0	0 ~ 10	3.662 ± 0.396a	0.659 ± 0.025a	47.405 ± 5.453a	9.033 ± 0.809a
10	0 ~ 10	3.485 ± 0.344a	0.534 ± 0.026a	44.757 ± 2.788a	6.325 ± 0.413b
20	0 ~ 10	3.150 ± 0.329a	0.507 ± 0.070b	45.287 ± 7.209a	6.075 ± 0.562bc
30	0 ~ 10	3.223 ± 0.184a	0.553 ± 0.025a	35.974 ± 1.388a	4.400 ± 0.515c
0	10 ~ 20	3.124 ± 0.287a	0.599 ± 0.008a	40.112 ± 3.458a	4.667 ± 0.801a
10	10 ~ 20	2.337 ± 0.371a	0.499 ± 0.052ab	29.278 ± 5.743a	3.950 ± 0.968a
20	10 ~ 20	2.239 ± 0.702a	0.414 ± 0.069b	27.264 ± 2.475a	4.850 ± 0.742a
30	10 ~ 20	2.992 ± 0.327a	0.548 ± 0.033ab	32.408 ± 3.268a	3.175 ± 0.409a

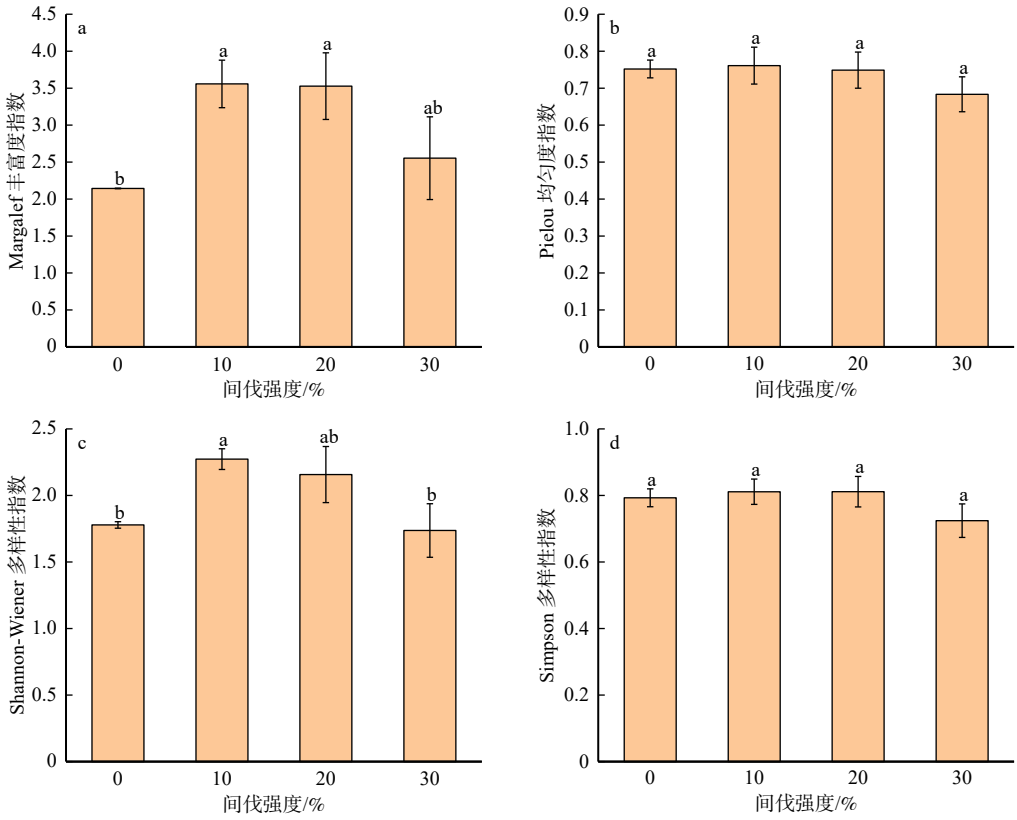
注：不同小写字母表示同一土壤深度不同间伐强度之间差异显著（$P < 0.05$）。

理均无显著差异（图 1b、d）。

2.3 林下植物多样性指数与植被及土壤理化特性的关系

相关分析表明，林下植物总物种数与灌木物种数、Margalef 丰富度指数及 Shannon-Wiener 多样性指数之间呈极显著的正相关（图 2，$P < 0.01$），而草本物种数及其密度与多样性指数之间无显著的相关关系。土壤 10 ~ 20 cm 土层的 TN、TP、SOC 和 AP 含量与多样性指数之间均无显著关系。而土壤 0 ~ 10 cm 土层的 SOC 含量与 Pielou 均匀度指数呈显著正相关（$P < 0.05$），这很大程度上反映了林下植物均匀度对 SOC 含量的影响。

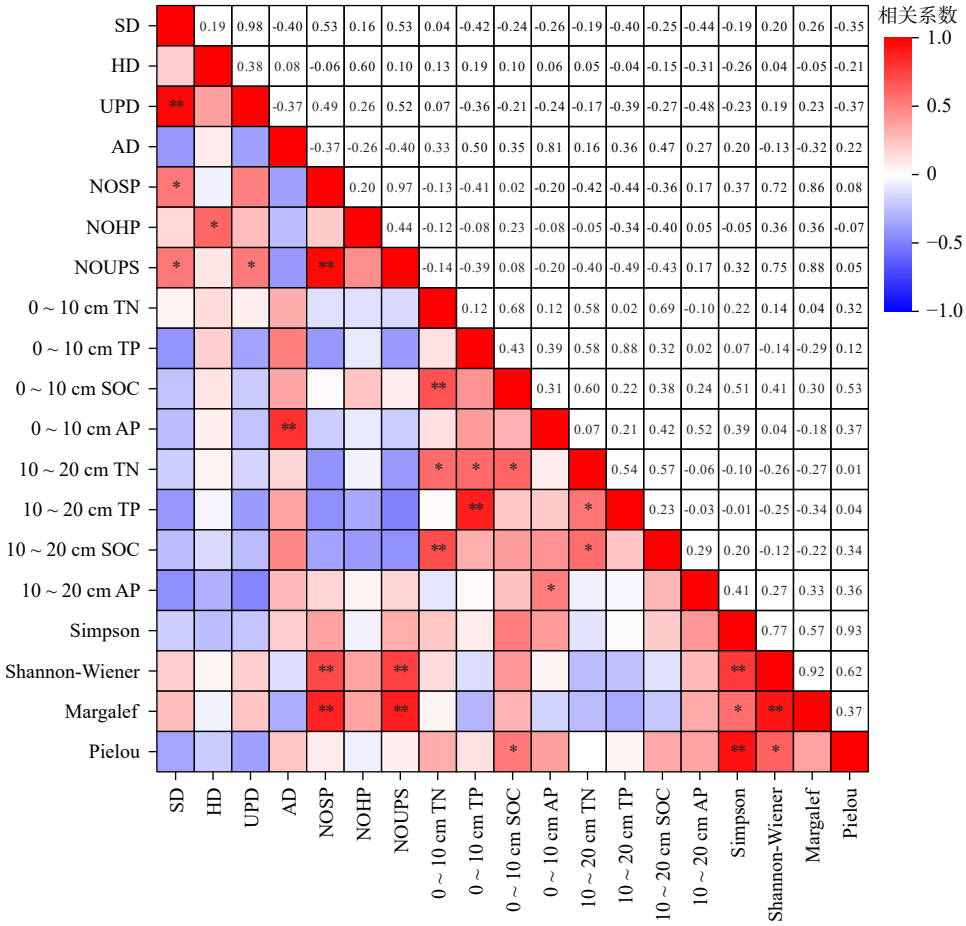
多元逐步回归分析表明，0 ~ 10 cm 土层的 TN 含量与 Margalef 丰富度指数存在正相关关系，林下植物总物种数和总密度也是解释 Margalef 丰富度指数差异的重要因子。同时，林下植物总物种数是解释 Shannon-Wiener 多样性指数变化的主要环境因子。0 ~ 10 cm 土层的 SOC 含量则是解释 Pielou 均匀度指数变化的主要因子，这与相关分析的结果一致（表 3）。由上述分析可知，土壤养分特征对林下植物



不同小写字母表示不同间伐强度之间差异显著（$P < 0.05$）。

图 1 间伐强度对林下植物物种多样性的影响

Fig. 1 Effects of thinning intensity on species diversity of understory plants



SD. 灌木密度; HD. 草本密度; UPD. 林下植物密度; AD. 乔木密度; NOSP. 灌木物种数; NOHP. 草本物种数; NOUPS. 林下植物总物种数; TN. 氮含量; TP. 磷含量; SOC. 土壤有机碳含量; AP. 速效磷含量; 下同。*. $P < 0.05$, **. $P < 0.01$。

图 2　林下植物特征及土壤理化特性和多样性指数的相关性

Fig. 2　Correlations of understory vegetation characteristics, soil physicochemical properties and diversity index of soil

多样性指数的影响因土层厚度而异，0 ~ 10 cm 土层的土壤养分对植物多样性指数的解释贡献更高，这可能与林下植物根系主要分布于 0 ~ 10 cm，以及地表凋落物分解后矿质养分优先输入并补充到 0 ~ 10 cm 土层有关(图 2)。

3　讨　　论

3.1　长期抚育间伐对土壤基本理化特性的影响

森林植物与土壤相互作用形成一种反馈关系，一方面，植被的演替过程会对土壤结构和元素的形成和改善产生影响；另一方面，土壤中各元素及养分含量会影响森林植物的生长情况[19]。土壤的理化特性直接对植物群落的物种构成和多样性产生作用，土壤中养分的多少、水分与盐分的状态以及酸碱度的高低及其相互之间的关联，共同决定了植物群落物种多样性的变化趋势[20]。间伐对人工林土壤理化特征的影响因树种和间伐年限而异。曹芹等[21]研究发现土壤碳、氮、磷含量随间伐强度增大呈现先增加后降低的趋势，并在中度间伐下达到最大值。此外，周璇等[22]发现土壤容重随间伐强度增大而显著降低。

表 3　影响林下植物多样性指数的多元线性逐步回归模型分析

Tab. 3　Analysis of multiple linear stepwise regression model affecting understory vegetation diversity index

因变量	因素	β值	标准误差	t值	P值
Shannon-Wiener 多样性指数	NOUPS	0.061	0.015	4.232	0.001
Margalef 丰富度指数	NOUPS	0.230	0.024	9.645	＜ 0.001
	UPD	−0.007	0.002	−3.140	0.009
	0 ~ 10 cm TN	0.378	0.162	2.333	0.040
Pielou 均匀度指数	0 ~ 10 cm SOC	0.005	0.002	2.236	0.043

注: β值为标准化回归系数。

本研究发现，与对照相比，不同间伐强度的长期处理对土壤 P 元素含量有一定程度的影响，表现为速效磷含量随着间伐强度的加强逐步下降。抚育间伐对 SOC、土壤 TN 无显著影响，一方面，本调查是在最后一次间伐后 17 年进行的，林分的自我恢复过程可能使林分生产力及对土壤元素库的补充相对稳定；另一方面，这种现象很可能源于多种关键生态过程的综合作用与平衡。具体而言：土壤中不同元素的分解与积累过程维持着动态平衡；土壤有机碳库本身也表现出相当的稳定性；同时，生物活动（如微生物）对养分的固定（固持）与释放（矿化）也处于一种平衡状态。此外，植物对养分的吸收需求与土壤有效养分的供应之间存在着持续的供需平衡调节；最后，植物根系对不同养分元素的选择性吸收策略也在其中扮演着重要角色。正是这些机制的共同作用，导致了长期观测下 SOC 和土壤 TN 含量的相对稳定[23–25]。

3.2 抚育间伐对林下植物多样性的短期及长期影响对比

抚育间伐作为人工林的管理措施之一，通过改变林分结构[26]和光照条件，影响土壤养分，进而提升森林生态系统的稳定性和林下植物多样性。本研究发现第 4 次抚育间伐 17 年后，不同处理下林下植物多样性具有显著差异，林下植物各多样性指数随着间伐强度的增加均呈现出先增加后减少的趋势，这与李国雷等[27]在油松（*Pinus tabuliformis*）人工林中的研究发现一致。然而，本研究结果与该实验平台在间伐 6 年后的调查结果并不一致，张建设等[17]于本实验平台第 4 次间伐处理 6 年后的研究发现通过间伐调整林分密度，能有效提高黄山松人工林林下植被物种多样性，且间伐强度越大，效果越显著，即林下植物多样性与间伐强度呈线性增加趋势。具体表现为随着间伐强度增加，灌木物种丰富度指数分别增加 10%、29%、51%，草本物种丰富度指数分别增加 33%、79%、109%；灌木和草本的 Simpson 多样性指数也随着间伐强度增加而逐步增大，这些变化都与本研究结果存在差异。这种差异可能归因于以下方面。人工林抚育间伐对林下植物总物种数和植被层多样性指数具有较强的促进作用，但是这种促进作用依赖于时间尺度。在间伐后的早期这种促进效应更加明显，这是由于初期改善的光照和土壤条件，有助于新植物物种种子的传入、定居和生长，间伐强度越大，林分空间与资源释放越多，越有利于生物多样性提升。随着间伐后恢复时间增长，林下植被多样性先增加后减少，这是由于间伐强度越高，林下植物中喜光物种的比例越大，其快速的生长特征有助于其占据间伐后释放的资源，从而抑制其他物种生长，导致多样性降低[11,28]。林分郁闭度是重要的环境因子，间伐对早期林分的郁闭度影响更为显著，随着树木个体的生长，不同间伐强度之间郁闭度的差异可能会减少，这也是导致影响林下植物多样性格局的一个原因。总体而言，间伐措施对林下植物多样性的影响因森林类型、间伐强度、间伐方式和间伐后林分恢复时间的不同而有所差异，轻度和中度间伐能够在间伐初期和较长时间尺度上提高林下植被的多样性，而重度间伐对多样性的促进作用仅发生在间伐初期。这表明从生物多样性角度看，低强度间伐可以在更长的时间尺度上对林下植物的多样性产生促进作用。

3.3 土壤理化特性与林下植物多样性的关系

本研究结果表明，土壤不同土层的养分特性对林下植被多样性的影响存在显著差异。在 0 ~ 10 cm 土层，SOC 含量与 Pielou 均匀度指数呈显著正相关，TN 含量与 Margalef 丰富度指数存在正相关关系；而在 10 ~ 20 cm 土层，SOC、TN、TP 和 AP 含量与林下植被多样性指数均无显著相关性。这一发现表明，林下植物群落的均匀度分布可能主要受表层土壤有机碳库的调控，而非深层土壤养分状况。导致这一结果的原因可能是 10 ~ 20 cm 土层的深层土壤有机碳分解速率较低[29]，土壤环境的稳定性导致其养分周转速率较慢，难以形成显著的空间异质性；而表层土壤的养分周转速率较快[30]，其较高的有机碳含量可能支持更丰富的微生物功能群（如菌根真菌），进而通过共生网络促进不同植物物种的共存。此外，林下植物根系在深层土壤中的分布密度较低[31]，可能也致使深层土壤养分与多样性指数的无关联性。本研究强调了表层土壤（0 ~ 10 cm）有机碳库在维持林下植被均匀度中的关键作用。未来研究可结合各种有效技术，进一步解析不同土壤理化对多样性的调控机制。在森林管理实践中，若需提升林下植被均匀度，可考虑减少表层土壤扰动并优化凋落物管理，以促进土壤碳库的稳定积累。

4 结　　论

在抚育间伐处理 17 年之后，黄山松人工林林下植物物种多样性随着间伐强度的增加，呈现先增加后降低的变化趋势。10% 的间伐强度处理可以显著提高黄柏山黄山松人工林林下植物多样性，但 30% 间伐强度处理则会降低林下植物的多样性。该发现与间伐后 6 年林下植物多样性变化规律有所不同，这意味着低强度间伐可以在更长的时间尺度上促进林下植物多样性，而中、重度间伐对林下植物多样性的促进作用仅发生于较短的时间尺度上。此外，间伐

后林分的恢复过程及其导致的林下土壤养分组成和含量变化可能是调节林下植物多样性的重要因素。

参 考 文 献

[1] 朱教君, 张金鑫. 关于人工林可持续经营的思考 [J]. 科学, 2016, 68(4): 37−40, 63.
Zhu J J, Zhang J X. Perspectives on sustainable management of plantations[J]. Science, 2016, 68(4): 37−40, 63.

[2] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营 [J]. 生态学报, 2018, 38(1): 1−10.
Liu S R, Yang Y J, Wang H. Development strategy and management countermeasures of planted forests in China: transforming from timber-centered single objective management towards multi-purpose management for enhancing quality and benefits of ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 1−10.

[3] Zheng G C, Su X P, Chen X L, et al. Variations in fine root biomass, morphology, and vertical distribution in both trees and understory vegetation among Chinese fir plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2024, 557: 121748.

[4] Zhang B S, Dong X B, Qu H F, et al. Effects of thinning on ecosystem carbon storage and tree-shrub-herb diversity of a low-quality secondary forest in NE China[J]. Journal of Forestry Research, 2022, 34(4): 977−991.

[5] Kuo C H, Wei C H, Chen J C, et al. Effects of thinning intensities on litterfall characteristics and decomposition in the natural secondary lowland forests of southeastern Taiwan[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2023, 38(3): 166−173.

[6] Deng J J, Fang S, Fang X M, et al. Forest understory vegetation study: current status and future trends[J]. Forestry Research, 2023, 3: 6.

[7] 井学辉, 曹磊, 臧润国. 阿尔泰山小东沟林区乔木物种丰富度空间分布规律 [J]. 生态学报, 2013, 33(9): 2886−2895.
Jing X H, Cao L, Zang R G. Spatial distribution of tree species richness in Xiaodonggou forest region of the Altai Mountains, Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(9): 2886−2895.

[8] Su X P, Wang M H, Huang Z Q, et al. Forest understorey vegetation: colonization and the availability and heterogeneity of resources[J]. Forests, 2019, 10(11): 944.

[9] Zhang H L, Liu S R, Yu J Y, et al. Thinning increases forest ecosystem carbon stock[J]. Forest Ecology and Management, 2024, 555: 121702.

[10] Liu Q, Sun Y, Wang G R, et al. Short-term effects of thinning on the understory natural environment of mixed broadleaf-conifer forest in Changbai Mountain area, Northeast China[J]. PeerJ, 2019, 7: e7400.

[11] 王佳佳, 贺涛, 张沂, 等. 间伐强度对阿尔泰山天然林下植物的影响 [J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9761−9768.
Wang J J, He T, Zhang Y, et al. Effects of thinning intensity on understory plant of natural forest in Altay Mountains, Xinjiang, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9761−9768.

[12] 陈贝贝, 姜俊, 陆元昌, 等. 间伐强度对马尾松人工林冠下套种树种生长的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(1): 58−65.
Chen B B, Jiang J, Lu Y C, et al. Effects of thinning intensity on the growth of interplanting broadleaved trees under *Pinus massoniana* plantation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(1): 58−65.

[13] 徐雪蕾, 孙玉军, 周华, 等. 间伐强度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响 [J]. 林业科学, 2019, 55(3): 1−12.
Xu X L, Sun Y J, Zhou H, et al. Effects of thinning intensity on understory growth and soil properties in Chinese fir plantation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(3): 1−12.

[14] 李萌, 陈永康, 徐浩成, 等. 不同间伐强度对南亚热带杉木人工林林下植物功能群的影响 [J]. 生态学报, 2020, 40(14): 4985−4993.
Li M, Chen Y K, Xu H C, et al. Effects of different thinning intensities on undergrowth plant functional groups in subtropical *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 4985−4993.

[15] 王祖华, 李瑞霞, 王晓杰, 等. 间伐对杉木人工林林下植被多样性及生物量的影响 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(12): 2778−2782.
Wang Z H, Li R X, Wang X J, et al. Effects of thinning on biomass and species diversity of understory in Chinese fir plantations[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(12): 2778−2782.

[16] 万猛, 梁丰, 李春方. 黄柏山林场 4 个主要树种带皮胸径与去皮胸径关系模型分析 [J]. 山东林业科技, 2023, 53(2): 55−58.
Wan M, Liang F, Li C F. Analysis of models for the relationship between diameter-outside-bark and diameter-inside-bark for four species in Huangbaishan Forest Farm[J]. Shandong Forestry Science and Technology, 2023, 53(2): 55−58.

[17] 张建设, 邱林, 王晓云, 等. 间伐强度对黄山松人工林林下植被的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2025, 60(1): 224−230.
Zhang J S, Qiu L, Wang X Y, et al. Effects of thinning intensity on understory vegetation of *Pinus taiwanensis* plantation[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2025, 60(1): 224−230.

[18] 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.

[19] 孙小丽, 康萨如拉, 张庆, 等. 荒漠草原物种多样性、生产力与气候因子和土壤养分之间关系的研究 [J]. 草业学报, 2015, 24(12): 10−19.
Sun X L, Kang Sarula, Zhang Q, et al. Relationship between species diversity, productivity, climatic factors and soil nutrients in the desert steppe[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(12): 10−19.

[20] 赵啸龙, 谢玉鸿, 马旭君, 等. 科尔沁沙质草地不同恢复年限草本层群落结构及其与土壤理化性质的关系 [J]. 中国沙漠, 2022, 42(2): 134−141.
Zhao X L, Xie Y H, Ma X J, et al. Vegetation structure and its relationship with soil physicochemical properties in restoring sandy grassland in Horqin Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(2): 134−141.

[21] 曹芹, 邱新彩, 刘欣, 等. 不同间伐强度对华北落叶松人工林土壤养分−微生物生物量−胞外酶化学计量的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(4): 83−92.
Cao Q, Qiu X C, Liu X, et al. Effects of different thinning intensities on the C∶N∶P stoichiometry of soil nutrients, microbial biomass, and extracellular enzymes in *Larix principis-rupprechtii* plantations[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(4): 83−92.

[22] 周璇, 刘凯利, 胡佳怡, 等. 川西柳杉幼林间伐后林下植被和土壤特征变化 [J]. 西北林学院学报, 2024, 39(1): 44−51.
Zhou X, Liu K L, Hu J Y, et al. Understory vegetation and soil characteristic variations of young *Cryptomeria japonica* var. *sinensis* plantations after thinning in western Sichuan[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024, 39(1): 44−51.

[23] 陈蕾如, 温正宇, 徐小牛, 等. 长期氮磷添加对亚热带森林土壤有机碳储量及其组分的影响 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2024, 48(5): 139−146.
Chen L R, Wen Z Y, Xu X N, et al. Effects of long-term nitrogen and phosphorus additions on soil organic carbon storage and its components in a subtropical forest[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2024, 48(5): 139−146.

[24] 田大伦, 项文化, 康文星. 马尾松人工林微量元素生物循环的研究 [J]. 林业科学, 2003, 39(4): 1−8.
Tian D L, Xiang W H, Kang W X. Study on biological cycling of microelements in *Pinus massoniana* plantations[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(4): 1−8.

[25] 于淼, 张碧嘉, 王泽锦, 等. 功能性状和立地条件与树木根系 NO_3^-吸收能力的关系 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(1): 35−43.
Yu M, Zhang B J, Wang Z J, et al. Relationship of functional traits and site conditions with NO_3^- uptake capacity of tree root[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(1): 35−43.

[26] 董莉莉, 张慧东, 毛沂新, 等. 间伐对红松 *Pinus koraiensis* 针阔混交林冠层结构及林下植被的影响 [J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(2): 159−165.
Dong L L, Zhang H D, Mao Y X, et al. Influence of thinning on canopy structure and understory vegetation of coniferous-broad leaved *Pinus koraiensis* mixed forest[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(2): 159−165.

[27] 李国雷, 刘勇, 徐扬, 等. 间伐强度对油松人工林植被发育的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(2): 70−75.
Li G L, Liu Y, Xu Y, et al. Effects of thinning intensity on the development of undergrowth in *Pinus tabulaeformis* plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(2): 70−75.

[28] 陈涵, 郭弘婷, 陈睿, 等. 杉木人工林林下植物多样性及其环境对不同间伐强度的短期响应 [J]. 生态学报, 2023, 43(24): 10274−10284.
Chen H, Guo H T, Chen R, et al. Understory plant diversity of *Cunninghamia lanceolata* plantations and its short-term environmental response to different thinning intensities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10274−10284.

[29] Li J, Dong J Z, Yang S S, et al. Depth-dependent driver of global soil carbon turnover times[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2023, 185: 109−149.

[30] 戴雯笑, 楼晨阳, 许大明, 等. 浙西南常绿阔叶林凋落物空间分布及其对土壤养分的影响 [J]. 生态学报, 2021, 41(2): 513−521.
Dai W X, Lou C Y, Xu D M, et al. Spatial distribution of litter yield in an evergreen broadleaf forest and its effects on the heterogeneityof soil nutrients[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 513−521.

[31] 拓行行, 李玉华, 李美慧, 等. 六盘山 4 种典型林分林下草本细根生物量与土壤特性的关系 [J]. 西北林学院学报, 2023, 38(2): 53−60.
Tuo H H, Li Y H, Li M H, et al. Relationship between fine root biomass of understory herb layer and soil characteristics of four kinds of stands in the Liupan Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(2): 53−60.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 臧润国）