

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6期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.06.004

论文标题： 林竹复合经营对土壤养分的影响

作　　者： 江涵宇，张孟楠，陈　南，等

收稿日期： 2025-06-02

引文格式： 江涵宇,张孟楠,陈南,等.林竹复合经营对土壤养分的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(6):34-43.

JIANG H Y, ZHANG M N, CHEN N, et al. The influence of bamboo and forest compound management on soil nutrients[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):34-43.

相关论文推荐

Recommended articles

“以竹代塑”科技创新与基础科学问题

Technological innovation and fundamental science for bamboo as a substitute for plastic

不同经营方式下毛竹林物种多样性及碳汇功能差异性

Differences of species diversity and carbon sink capacity of moso bamboo forest under different management modes

毛竹种子发育过程中形态和生理特性变化

Changes in morphological and physiological characteristics of *Phyllostachys edulis* seeds during development

竹林扩张进入杉木人工林对土壤磷素的影响

Effects of bamboo forest expansion on soil phosphorus in *Cunninghamia lanceolata* plantation

带状采伐对毛竹生物量和根系非结构性碳水化合物的影响

Effects of strip logging on the biomass and root non-structural carbohydrates of *Phyllostachys edulis*

不同钾水平对毛竹幼苗生长及生理指标的影响

Effects of different potassium levels on seedling growth and physiological indexes of *Phyllostachys edulis*

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.06.004 http: //qks.csuft.edu.cn

林竹复合经营对土壤养分的影响

江涵宇[1]，张孟楠[1]，陈　南[2]，邓　鹏[3]，贾　强[3]

（1. 四川省林业科学研究院，四川 成都 610081；2. 筠连县林业和竹业发展服务中心，四川 筠连 645250；
3. 筠连县国有林场，四川 筠连 645250）

摘　要：【目的】以四川省筠连县国有林场内杉木 / 檫木林下套种方竹的复合经营林分为研究对象，通过对比杉木＋方竹、檫木＋方竹复合林与杉木、檫木、方竹纯林的土壤养分特征，探讨林竹复合经营对土壤养分的影响效应，以期为川南丘陵区森林土壤提质增效提供科学依据。【方法】通过对杉木＋方竹、檫木＋方竹复合林分以及杉木、檫木和方竹纯林林分土壤养分进行分析测定，并采用 Nemerow 法进行综合评价，探讨复合经营对森林土壤养分的影响。【结果】1）复合经营模式显著提升了土壤养分含量。在基础养分方面，杉木＋方竹、檫木＋方竹复合林的土壤有机质含量分别为 77.20±3.07 g/kg 和 82.57±16.43 g/kg，较杉木纯林 53.97±6.08 g/kg 和檫木纯林 72.17±7.40 g/kg 分别提高了 43.1% 和 14.4%；2）在有效养分层面，檫木＋方竹复合林的水解性氮、有效磷、速效钾含量分别为 268.00±43.21 mg/kg、3.42±1.16 mg/kg、145.67±20.67 mg/kg，较檫木纯林分别提高 16.0%、10.7% 和 20.7%；3）土壤综合评价显示，檫木＋方竹复合林的 Nemerow 综合指数为 1.46，森林土壤养分等级从中等提高为良。【结论】林竹复合经营通过物种间的生态互补效应，相比纯林经营有效改善了土壤养分状况，其中檫木＋方竹复合林分在提升土壤有机质含量、促进氮磷钾养分积累及提高有效性养分比例方面表现最优。本研究不仅丰富了林竹复合经营的土壤生态学理论，可为川南丘陵退化林地的生态修复和可持续经营提供实践参考。

关键词：林竹复合经营；土壤养分；质量评价；改良提质

中图分类号：S714.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)06-0034-10

The influence of bamboo and forest compound management on soil nutrients

JIANG Hanyu[1], ZHANG Mengnan[1], CHEN Nan[2], DENG Peng[3], JIA Qiang[3]

(1. Sichuan Academy of Forestry Sciences, Chengdu 610081, Sichuan, China;
2. Forestry and Bamboo Industry Development Service Center of Junlian County, Junlian 645250, Sichuan, China;
3. State-owned Forest Farm of Junlian County, Junlian 645250, Sichuan, China)

Abstract:【Objective】This study focused on the soil nutrient characteristics of the mixed forest of *Cunninghamia lanceolata*/*Sassafras tzumu* with *Chimonobambusa quadrangularis* planted under the canopy in the state-owned forest farm of Junlian County, Sichuan Province. By comparing the soil nutrient features of the mixed forests of *Cunninghamia lanceolata* + *Chimonobambusa quadrangularis* and *Sassafras tzumu*+*Chimonobambusa quadrangularis* with those of the pure forests of *Cunninghamia lanceolata*, *Sassafras tzumu* and *Chimonobambusa quadrangularis*, the study aimed to explore the effect of forest and bamboo compound management on soil nutrients, and to provide a scientific basis for improving soil quality and efficiency in the hilly areas of southern Sichuan.【Method】By analyzing and determining the soil chemical properties of the compound forest stands of *Cunninghamia lanceolata* + *Chimonobambusa quadrangularis*, *Sassafras tzumu* + *Chimonobambusa quadrangularis*, the pure forest stands of *Cunninghamia lanceolata*, *Sassafras tzumu* and *Chimonobambusa quadrangularis*, using the Nemerow method for comprehensive evaluation of soil, the influence of mixed management on forest soil was explored. 【Result】1) The mixed management significantly increased soil nutrient content. In terms of basic nutrients, the soil organic matter content of the mixed forests of *Cunninghamia lanceolata*+*Chimonobambusa quadrangularis* and *Sassafras tzumu*+*Chimonobambusa quadrangularis* was 77.20±3.07 g/kg and 82.57±16.43 g/kg, respectively, which was 43.1% and 14.4% higher than that of the pure forests of *Cunninghamia lanceolata* (53.97±6.08 g/kg) and *Sassafras tzumu* (72.17±7.40 g/kg);

收稿日期（Received）：2025-06-02　　**修订日期**（Revised）：2025-08-24
基金项目：四川省科技资源共享服务平台（2024HXWT11，2024HXWT02）。
第一作者：江涵宇（634508809@qq.com），助理工程师，硕士。
引文格式：江涵宇 , 张孟楠 , 陈南 , 等 . 林竹复合经营对土壤养分的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(6):34-43.
JIANG H Y, ZHANG M N, CHEN N, et al. The influence of bamboo and forest compound management on soil nutrients[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):34-43.

2) In terms of available nutrients, the contents of water-soluble nitrogen, available phosphorus and available potassium in the mixed forest of *Sassafras tzumu+Chimonobambusa quadrangularis* were 268.00 ± 43.21 mg/kg, 3.42 ± 1.16 mg/kg and 145.67 ± 20.67 mg/kg, respectively, which were 16.0%, 10.7% and 20.7% higher than those of the pure forest of *Sassafras tzumu*; 3) The comprehensive evaluation of soil showed that the Nemerow comprehensive index of the mixed forest of *Sassafras tzumu+Chimonobambusa quadrangularis* was 1.46, and the forest soil nutrient grade was improved from medium to good. 【Conclusion】The mixed management of forest and bamboo effectively improved the soil nutrient status through the ecological complementary effect among speciess compared with pure forest management. Among them, the compound forest of *Sassafras tzumu+Chimonobambusa quadrangularis* performed best in increasing soil organic matter content, promoting the accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium nutrients and improving the proportion of available nutrients. The research results not only enriched the soil ecological theory of forest-bamboo mixed management, but also provided practical references for the ecological restoration and sustainable management of degraded forest land in the hilly areas of southern Sichuan.
Keywords: bamboo-forest composite management; soil nutrients; quality evaluation; improvement and quality enhancement

土壤是森林生态系统赖以生存的基础，是养分与水分获取的主要来源，是森林环境的重要组成部分 [1-2]。一方面，土壤可为森林植被的生长繁育提供必要的物质基础；另一方面，森林植被的活动及演替也能反作用于土壤的形成和调节。近年来，纯林经营、木材采伐和退林还耕等人工森林经营活动导致森林土壤质量下降，产生了水土流失和土壤退化等一系列环境问题 [3-5]。随着对森林土壤研究的不断深入，研究人员逐渐意识到森林生态环境的稳定和林业可持续发展与土壤息息相关。而如何治理才能减少水土流失、提高土壤养分积累、维护森林生态环境的稳定是当下森林经营需要重点解决的问题 [6]。

在对森林生态环境的调查中，混交林相比于纯林，物种组成不仅更为丰富，而且生态稳定性和抗逆性都更高，对土壤的保护和改良作用也更强。王迎春 [7] 研究不同植被模式的水土保持及土壤改良效果，发现林竹结合的林分相比针叶林、竹林乃至林草结合的林分土壤中全氮及速效氮的含量更高。李正才等 [8] 对毛竹 *Phyllostachys edulis* 竹阔混交林及其纯林地力保持的对比研究表明，竹阔混交林在长期经营过程中，其地力维持能力更强，地力衰退减缓。研究证明复合经营有利于提升当地的土壤肥力，增强森林涵养水源的能力，恢复当地的物种多样性，促进当地的生态修复 [9-10]。因此，对混交林和复合经营林分下的土壤变化特性及影响因素的研究逐渐加深，目前关于森林土壤肥力的研究较多，但关于林竹混交复合经营的土壤肥力研究及评价相对较少，特别是缺乏对林下土壤特征影响的深入探讨 [11-12]。

本研究以筠连县国有林场的杉木 *Cunninghamia lanceolata*、檫木 *Sassafras tzumu* 和方竹 *Chimonobambusa quadrangularis* 人工纯林及复合林为对象，该林场已具有相对成熟的林竹复合经营林分体系和一定规模的杉木 / 檫木 + 方竹复合林分与 3 种纯林，可作为复合经营研究的示范样地。通过对林下的土壤进行采样测定，对比分析复合经营相比纯林经营模式对土壤的影响，研究林竹复合经营对土壤的改良作用。本研究旨在对土壤养分进行调查评价，为川南山区林竹复合经营对土壤地力维持和改良提供理论依据。本研究结果将有助于为林竹复合经营模式下森林土壤提质增效、森林植被恢复和森林生态效益提升等服务功能提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　采样地概况

试验地位于四川省宜宾市筠连县国有林场，当地属于四川盆地南缘，地形整体呈南高北低，系四川盆地向云贵高原的过渡地带，云贵高原北麓川滇结合部，地处 104°17′45″ ～ 104°47′20″E，27°50′37″ ～ 28°14′28″N。当地属四川盆地中亚热带湿润季风气候区，气候温暖、降水充沛、四季分明、冬暖春早、夏长秋短、霜雪较少。常年平均气温 17.6 ℃，最热月（7 月）26.5 ℃，最冷月（1 月）7.3 ℃，差值 19.2 ℃。常年日照时数 1 064.4 h，占可照时数的 25%。筠连县 0 ℃以上无霜期，年平均 337 d，最长 365 d，最短 271 d。当地林场以黄棕壤土为主，从 2020 年开始在林场内原有杉木、檫木人工林下套种方竹，选择套种的杉木、檫木林分土壤质地和土层深度基本一致。

1.2　试验设计

1.2.1　样地设置

2024 年在筠连县国有林场，根据当地林竹复合经营类型（杉木纯林、檫木纯林、方竹纯林、杉木 + 方竹复合林、檫木 + 方竹复合林）设置 20 m×20 m 的标准样地，每个样地 3 个重复。对样地进行本底调查后基本情况如表 1 所示。

表 1 复合林分及纯林样地基本情况
Table 1 Basic situation of compound stand and pure forest sample plot

林分类型 Stand type	树龄 Ages /a	株数 Numbers / 株	平均胸径 Mean DBH /cm	平均树高 Average tree height /m	平均盖度 Average coverage /%	郁闭度 Canopy density
杉木 + 方竹	30	27±3	19.6±5.3	12.3±3.5	85.0±2.1	0.6
檫木 + 方竹	30	22±9	20.4±6.2	11.3±3.4	87.7±4.7	0.6
杉木	30	24±3	19.4±2.8	11.6±2.1	—	0.6
檫木	30	23±6	20.5±1.7	13.3±0.5	—	0.6
方竹	—	—	—	—	30.0±11.6	0.6

1.2.2 土壤采样方法

根据 LY/T 2250 森林土壤调查技术规程，在不同经营类型林分的样地内，按“S”形取样法选 5 个点采集土样，每个取样点采土深度为 40 cm。每份土样去除根系和石块等杂质后，经自然风干后粉碎，过 2 mm 孔径筛后进行土壤化学性质及养分的测定（风干土采用四分法取土样）。

1.2.3 测定方法

根据 GB 系列森林土壤测定技术规程调查试验样地的土壤化学性质及养分含量：有机质、pH 值、全氮、全磷、全钾、水解性氮、有效磷和速效钾等，具体方法如表 2 所示。

表 2 土壤理化性质测定方法
Table 2 Determination methods of soil physicochemical properties

样品 Sample	测定指标 Determination index	方法 Method
风干土样 Air-dried soil sample	有机质 SOM	重铬酸钾容量法——外加热法
	pH 值 pH value	电位法
	全氮 TN	凯氏定氮法
	全磷 TP	酸溶法
	全钾 TK	NaOH 熔融——原子吸收光谱法
	水解性氮 AN	碱解扩散法
	有效磷 AP	0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提——原子吸收光谱法
	速效钾 AK	1 mol/L 中性 NH_4OAc 浸提——原子吸收光谱法

1.3 土壤养分评价方法

研究采用修正的内梅罗（Nemerow）综合指数法评价土壤养分等级 [13]。在进行评价前，为消除土壤评价因子间单位和量纲的影响，首先参照第二次土壤普查中土壤各属性分级标准（表 3）对评价因子进行标准化处理：

$$P_i=\begin{cases} C_i / X_a & C_i \leqslant X_a \\ 1+(C_i-X_a)/(X_c-X_a) & X_a < C_i \leqslant X_c \\ 2+(C_i-X_c)/(X_p-X_c) & X_c < C_i \leqslant X_p \\ 3 & C_i > X_p \end{cases}$$

式中：P_i 为肥力系数，C_i 为相应属性的实测值，X_a、X_c 和 X_p 为分级指标。

最后采用内梅罗综合指数法分别对研究区不同林分类型土壤进行综合评价。其公式为：

$$P=\sqrt{\frac{(P_{\min})^2+(P_i)^2}{2}}\cdot\frac{(n-1)}{n}$$

式中：P 为土壤综合指数；P_i 为评价属性分指数的平均值，$P_{\min}$ 为最小值；n 为参评个数。当土壤综合指数 $P \geqslant 2$ 时，对应其土壤养分等级为优；当 $1.5 \leqslant P < 2$ 时，对应等级为良；当 $1 \leqslant P < 1.5$ 时，对应等级为中等；当 $P < 1$ 时，对应等级为差。

表 3 土壤各属性分级标准 †
Table 3 Classification standards of soil attributes

测定指标 Determination index	内梅罗分级指数 Nemerow grading index		
	X_a	X_c	X_p
pH 值 pH value	6.50	5.50	4.50
有机质 SOM	30.00	20.00	10.00
全氮 TN	2.00	1.50	0.75
全磷 TP	1.00	0.60	0.40
全钾 TK	25.00	20.00	5.00
水解性氮 AN	180.00	120.00	60.00
有效磷 AP	20.00	10.00	5.00
速效钾 AK	200.00	150.00	100.00

† X_a、X_c、X_p 分别代表差、中等、较好三个等级。
X_a, X_c and X_p represent poor, medium and good grades respectively.

1.4 数据处理

使用 Excel 2019 软件对数据进行统计与作图；使用 SPSS 23.0 软件对数据进行单因素方差分析（One-way ANOVA）和多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤化学性质

土壤化学性质及养分含量数据如表 4 所示，pH 值变幅在 3.80 ～ 5.85，均值为 4.45±0.12，变异系数为 10.75%；有机质含量变幅在 30.20 ～ 111.00 g/kg，均值为 69.75±5.53 g/kg，变异系数为

30.73%；全氮含量变幅在 1.73 ～ 4.52 g/kg，均值为 2.96±0.20 g/kg，变异系数为 26.67%；全磷含量变幅在 0.28 ～ 1.95 g/kg，均值为 0.57±0.11 g/kg，变异系数为 76.77%；全钾含量变幅在 8.32 ～ 26.30 g/kg，均值为 13.75±1.08 g/kg，变异系数为 30.41%；水解性氮含量变幅在 146.00 ～ 350.00 mg/kg，均值为 237.00±15.11 mg/kg，变异系数为 24.69%；有效磷含量变幅在 1.23 ～ 5.18 mg/kg，均值为 2.66±0.29 mg/kg，变异系数为 41.64%；速效钾含量变幅在 94.20 ～ 187.00 mg/kg，均值为 130.15±5.54 mg/kg，变异系数为 16.50%。

表 4　森林土壤化学性质含量
Table 4　Statistics of forest soil chemical property content

测定指标 Determination index	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均值 Mean value	标准误 Standard error	变异系数 CV /%
pH 值 pH value	3.80	5.85	4.45	0.12	10.75
有机质 SOM /(g·kg^{-1})	30.20	111.00	69.75	5.53	30.73
全氮 TN /(g·kg^{-1})	1.73	4.52	2.96	0.20	26.67
全磷 TP /(g·kg^{-1})	0.28	1.95	0.57	0.11	76.77
全钾 TK /(g·kg^{-1})	8.32	26.30	13.75	1.08	30.41
水解性氮 AN /(mg·kg^{-1})	146.00	350.00	237.00	15.11	24.69
有效磷 AP /(mg·kg^{-1})	1.23	5.18	2.66	0.29	41.64
速效钾 AK /(mg·kg^{-1})	94.20	187.00	130.15	5.54	16.50

2.2　不同林分类型对土壤 pH 值和有机质的影响

不同林分类型土壤 pH 值和有机质含量如图 1 所示，方竹纯林土壤 pH 值最高为 5.03±0.43，杉木＋方竹复合林最低为 4.15±0.25，其余从大到小依次为杉木纯林 4.47±0.10，檫木纯林 4.30±0.14，檫木＋方竹复合林 4.29±0.14。其中杉木＋方竹复合林土壤 pH 值显著低于方竹纯林，与其他林分类型土壤 pH 值差异不显著。

不同林分类型土壤有机质由少到多依次为杉木纯林 53.97±6.08 g/kg，方竹纯林土壤有机质含量 62.87±20.98 g/kg，檫木纯林 72.17±7.40 g/kg，杉木＋方竹复合林 77.20±3.07 g/kg，檫木＋方竹复合林 82.57±16.43 g/kg。由于檫木林为阔叶落叶树种，相比常绿树种的杉木，秋季和冬季大量落叶积蓄在土壤表层，增加土壤有机质含量，因此檫木纯林与复合林土壤有机质含量均高于杉木林分。不同林分类型的土壤 pH 值和有机质方差分析结果显示，林分类型对土壤 pH 值和有机质的影响差异不显著（表 5）。

2.3　不同林分类型对土壤全氮、全磷、全钾的影响

如图 2 所示，不同林分类型土壤全氮含量由少到多依次为杉木纯林土壤全氮含量 2.13±0.26 g/kg，檫木纯林 3.01±0.14 g/kg，杉木＋方竹复合林 3.03±0.16 g/kg，方竹纯林 3.21±0.70 g/kg，檫木＋方竹复合林 3.41±0.62 g/kg。檫木纯林与檫木＋方竹复合林分土壤全氮含量明显高于杉木纯林与杉木＋方竹复合林分，而方竹纯林土壤全氮含量高于杉木纯林与杉木＋方竹复合林分。

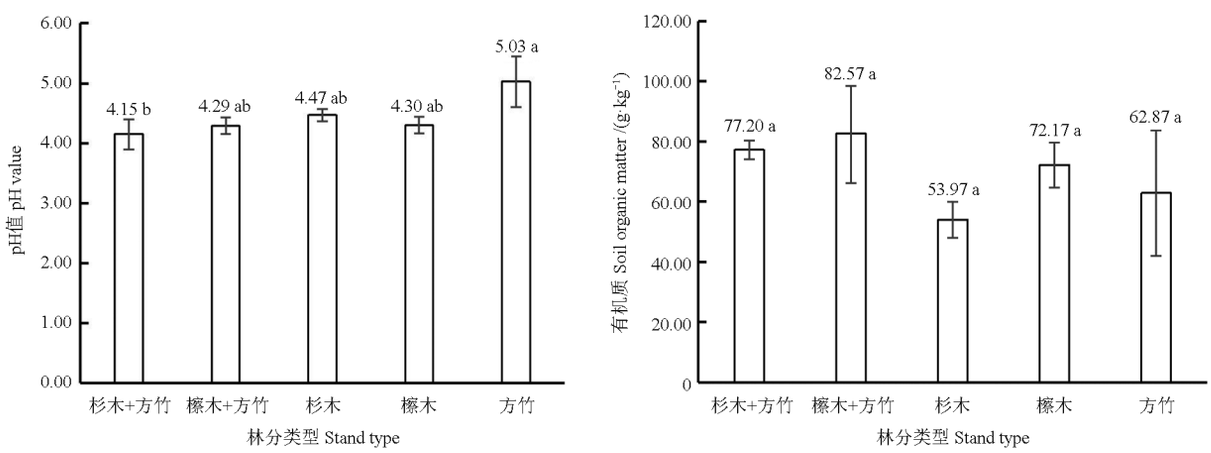


图 1　不同林分类型土壤 pH 值和有机质含量
Fig. 1　Soil pH and SOM content of different stand types

表 5 不同林分类型土壤 pH 值和有机质方差分析
Table 5 Variance analysis of soil pH and SOM in different stand types

测定指标 Determination index	变异来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 *df*	均方 Mean square	*F* 值 *F* value	显著性 Significance
pH 值 pH value	组间	1.42	4	0.35	1.98	0.17
	组内	1.79	10	0.18		
	总计	3.20	14			
有机质 SOM	组间	1 566.31	4	391.58	0.81	0.55
	组内	4 865.87	10	486.59		
	总计	6 432.18	14			

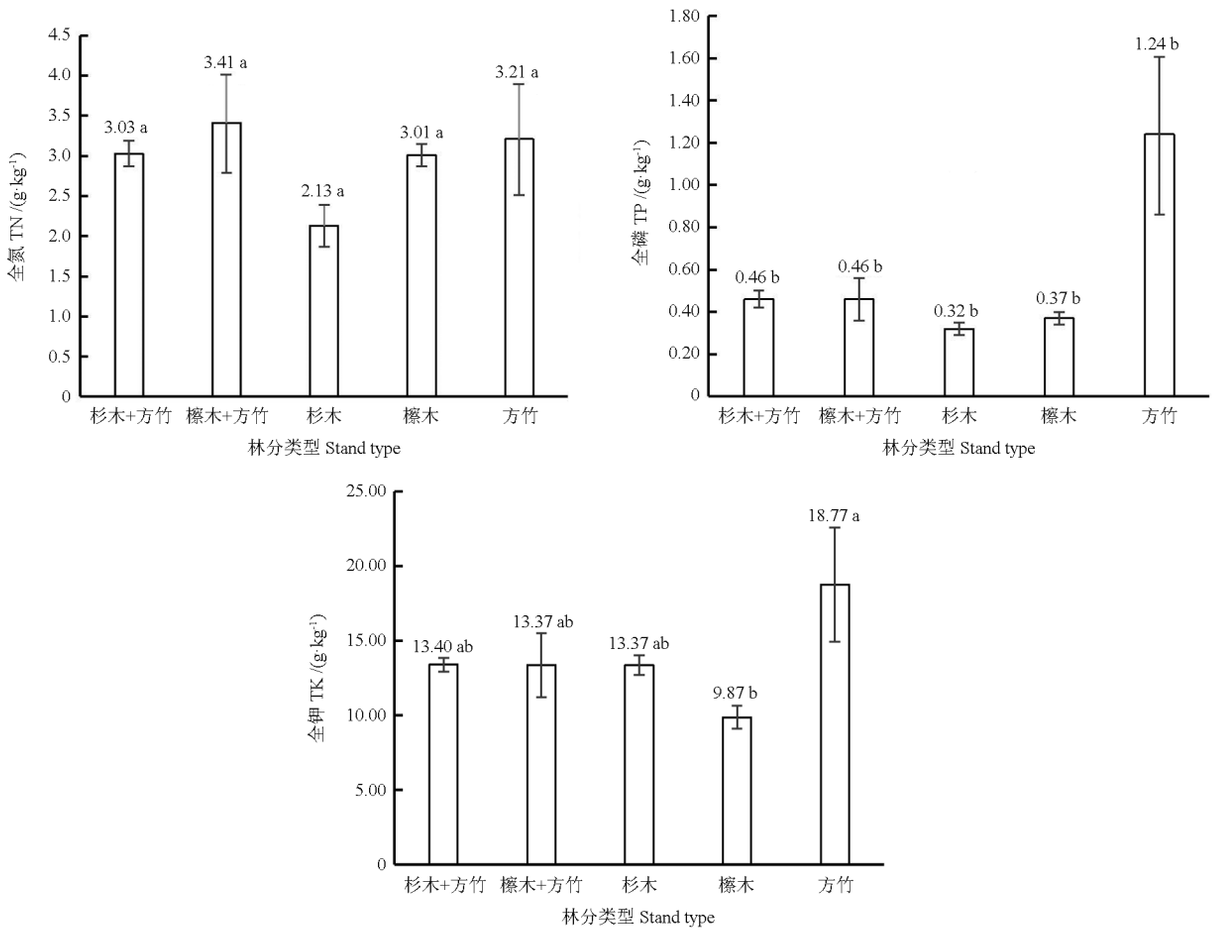


图 2 不同林分类型土壤全氮、全磷、全钾含量
Fig. 2 Contents of total nitrogen, total phosphorus and total potassium in soil of different stand types

不同林分类型土壤全磷含量其中由少到多依次为杉木纯林土壤全磷含量 0.32±0.03 g/kg，檫木纯林 0.37±0.03 g/kg，杉木 + 方竹复合林 0.46±0.04 g/kg，檫木 + 方竹复合林 0.46±0.10 g/kg，方竹纯林 1.24±0.38 g/kg。方竹纯林土壤全磷含量显著高于其他林分，且复合林分土壤全磷含量高于杉木和檫木纯林。

不同林分类型土壤全钾含量由少到多依次为檫木纯林土壤全钾含量 9.87±0.78 g/kg，杉木纯林 13.37±0.67 g/kg，檫木 + 方竹复合林 13.37±2.14 g/kg，杉木 + 方竹复合林 13.40±0.46 g/kg，方竹纯林 18.77±3.83 g/kg。其中方竹纯林土壤全钾含量显著高于其他林分，而檫木纯林林分土壤全钾含量显著低于其他林分。

不同林分类型下土壤氮磷钾元素含量的方差分析结果显示，林分类型对土壤全磷含量的影响差异显著，对土壤全氮全钾含量的影响差异不显著（表 6）。

2.4 不同林分类型对土壤水解氮、有效磷、速效钾的影响

如图 3 所示，不同林分类型土壤水解氮含量由少到多依次为杉木纯林土壤水解氮含量 171.67±15.98 mg/kg，檫木纯林 231.00±10.60 mg/kg，杉

木 + 方竹复合林 251.00±11.02 mg/kg，方竹纯林 263.33±50.53 mg/kg，檫木 + 方竹复合林 268.00±43.21 mg/kg，不同类型林分间土壤水解性氮含量间无显著差异。

表 6　不同林分类型土壤全氮、全磷、全钾含量方差分析 †

Table 6　Variance analysis of soil total nitrogen, total phosphorus and total potassium content in different stand types

测定指标 Determination index	变异来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 *df*	均方 Mean square	*F* 值 *F* value	显著性 Significance
全氮 TN	组间	2.87	4	0.72	1.23	0.36
	组内	5.84	10	0.58		
	总计	8.71	14			
全磷 TP	组间	1.73	4	0.43	4.61*	0.02
	组内	0.94	10	0.09		
	总计	2.67	14			
全钾 TK	组间	121.84	4	30.46	2.47	0.11
	组内	123.14	10	12.31		
	总计	244.98	14			

† * 代表相关性显著。* means significant correlation.

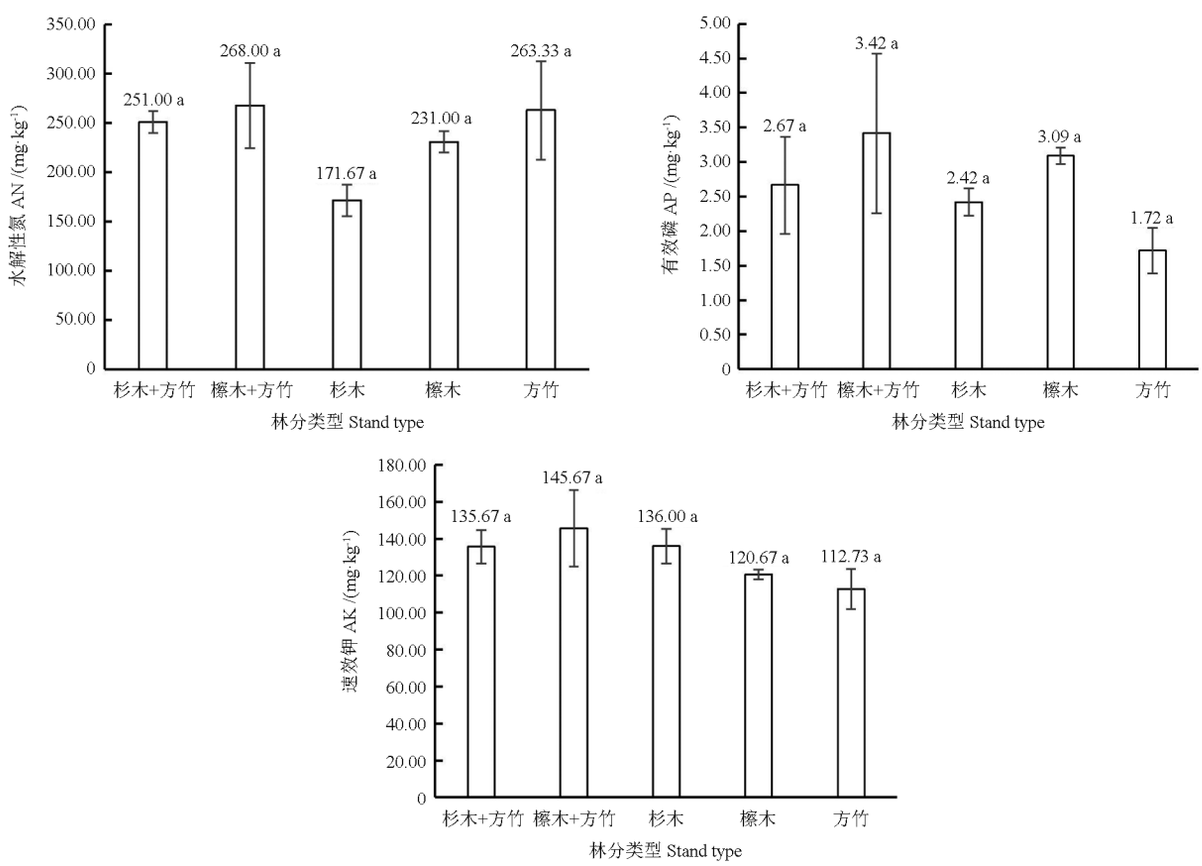


图 3　不同林分类型土壤水解性氮、有效磷、速效钾含量

Fig. 3　Content of soil hydrolyzed nitrogen available phosphorus available potassium in different stand types

不同林分类型土壤有效磷含量由少到多依次为方竹纯林土壤有效磷含量 1.72±0.33 mg/kg，杉木纯林 2.42±0.20 mg/kg，杉木 + 方竹复合林 2.67±0.71 mg/kg，檫木纯林 3.09±0.12 mg/kg，檫木 + 方竹复合林 3.42±1.16 mg/kg，不同类型林分间土壤有效磷含量间无显著差异。

不同林分类型土壤速效钾含量由少到多依次为方竹纯林土壤速效钾含量 112.73±10.92 mg/kg，檫木纯林 120.67±2.67 mg/kg，杉木 + 方竹复合林 135.67±9.13 mg/kg，杉木纯林 136.00±9.45 mg/kg，檫木 + 方竹复合林 145.67±20.67 mg/kg，不同类型林分间土壤速效钾含量间无显著差异。

不同林分类型下土壤有效性养分含量的方差分析结果显示，林分类型对土壤水解性氮、有效磷和速效钾含量的影响差异不显著（表 7）。

表 7 不同林分类型土壤水解性氮、有效磷、速效钾含量方差分析
Table 7 Variance analysis of soil hydrolyzed nitrogen available phosphorus available potassium content in different stand types

测定指标 Determination Index	变异来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 *df*	均方 Mean square	*F* 值 *F* value	显著性 Significance
水解性氮 AN	组间	18 464.67	4	4 616.17	1.57	0.26
	组内	29 453.33	10	2 945.33		
	总计	47 918.00	14			
有效磷 AP	组间	5.13	4	1.28	1.06	0.43
	组内	12.10	10	1.21		
	总计	17.23	14			
速效钾 AK	组间	2 096.09	4	524.02	1.20	0.37
	组内	4 359.23	10	435.92		
	总计	6 455.32	14			

2.5 土壤评价分析

林分土壤 pH 值、有机质、氮磷钾元素及有效性养分等指标的相关性分析结果如表 8 所示。pH 值与全磷、全钾之间呈极显著正相关（$P < 0.01$），而与有机质、有效磷呈显著负相关（$P < 0.05$）。土壤有机质含量与全氮、水解性氮之间呈极显著正相关（$P < 0.01$）。土壤全氮与土壤水解性氮之间呈极显著正相关（$P < 0.01$）。土壤全磷与土壤全钾之间呈极显著正相关（$P < 0.01$）。土壤速效钾与土壤有效磷之间呈显著正相关（$P < 0.05$）。分析结果表明，pH 值对土壤养分中的全磷影响较大，而对全氮无明显影响。而有机质与全氮之间的影响作用较强，推测土壤有机质分解会释放蛋白质和 DNA 等物质中的氮元素，补充土壤氮素。全氮与全磷、全钾无显著相关性，与水解性氮则显著相关，可见氮素转化为有效养分作用机制较强；而全磷与全钾之间显著相关，证明两者之间可相互影响，但全磷与有效磷、全钾与速效钾之间的相关性不显著。

表 8 林分土壤 8 个指标的相关性分析 †
Table 8 Correlation analysis of 8 indexes of stand soil

测定指标 Determination index	pH 值 pH value	有机质 SOM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	水解性氮 AN	有效磷 AP	速效钾 AK
pH 值 pH value	1							
有机质 SOM	-0.634*	1						
全氮 TN	-0.434	0.916**	1					
全磷 TP	0.775**	-0.339	-0.024	1				
全钾 TK	0.721**	-0.451	-0.187	0.861**	1			
水解性氮 AN	-0.421	0.874**	0.977**	0.021	-0.109	1		
有效磷 AP	-0.470	0.155	0.048	-0.419	-0.079	0.148	1	
速效钾 AK	-0.561*	0.347	0.282	-0.282	-0.158	0.299	0.551*	1

† * 代表相关性显著，** 代表相关性极显著。* means significant correlation, ** means very significant correlation.

采用内梅罗综合指数法对研究区不同林分类型土壤进行评价，结果如表 9 所示。当地土壤有机质、全氮、水解性氮评价标准总体较高，而土壤有效磷评价标准偏低。土壤综合评价指数杉木 + 方竹均值为 1.41，檫木 + 方竹均值为 1.46，杉木均值为 1.30，檫木均值为 1.35，方竹均值为 1.48。其中檫木 + 方竹复合林分的土壤养分综合指数虽小于 1.5，但在其 3 个样地土壤样本的综合指数中有 2 个大于 1.5，评价为良。而方竹纯林的 3 个样地土壤样本中仅有 1 个综合指数大于 1.5，综合来看评价为中等，其他林分类型下的土壤样本指数均小于 1.5，养分评价均为中等。

3 讨论与结论

3.1 林竹复合经营对土壤化学性质的影响

檫木 + 方竹混交林相比檫木纯林可有效提高土壤 pH 值和氮磷钾等养分元素含量。土壤 pH 值是反映土壤环境的重要指标之一，生态系统中一些生物的生理活动以及大气中酸沉降都会导致森林土壤酸化，但土壤中的微生物可以进行脱酸作用，在二者的相互作用之下土壤 pH 值保持动态稳

表 9　土壤各指标分级及综合指数评价
Table 9　Grading of soil indicators and Composite index evaluation

林分类型 Stand type	土壤养分指标的标准化均值 P_i Standardized mean value P_i of soil nutrient index							综合指数 Composite Index	评价 Evaluation
	有机质 SOM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	水解性氮 AN	有效磷 AP	速效钾 AK		
杉木 + 方竹	3.00±0.00	3.00±0.00	1.28±0.21	2.56±0.03	3.00±0.00	0.53±0.14	2.36±0.09	1.41±0.03	中等
檫木 + 方竹	3.00±0.00	3.00±0.00	1.27±0.47	2.56±0.14	3.00±0.00	0.69±0.23	2.46±0.21	1.46±0.11	良
杉木	3.00±0.00	2.82±0.18	0.63±0.17	2.56±0.05	2.74±0.17	0.48±0.04	2.36±0.09	1.30±0.03	中等
檫木	3.00±0.00	3.00±0.00	0.83±0.14	2.33±0.05	3.00±0.00	0.62±0.02	2.21±0.03	1.35±0.02	中等
方竹	3.00±0.00	3.00±0.00	2.72±0.28	2.78±0.12	2.97±0.03	0.34±0.06	2.11±0.13	1.48±0.04	中等

定 [14-15]。植物对土壤化学性质的影响主要通过根系分泌物产生，分泌物中的有机酸、酶等物质直接作用于土壤，导致其 pH 值下降，从而影响土壤微环境，进而影响根系对土壤中氮磷钾等元素的吸收 [16-17]。复合林分和纯林林分的土壤都呈酸性，但方竹纯林平均 pH 值为 5.03，而其他林分类型的 pH 值均低于 4.50。方竹鞭根深度主要在 0 ～ 30 cm 土层中 [18]，相比杉木和檫木等树种，根系浅、质量小，有机酸分泌物含量也相对较少，因此对土壤 pH 值的影响弱于乔木树种。而复合林分有机酸等分泌物含量增加，与土壤中的盐碱类物质反应，降低了土壤 pH 值。

混交林和纯林中土壤中的氮磷钾元素含量也存在明显差异，其中全氮含量差异最为明显。檫木 + 方竹复合林相比檫木纯林土壤全氮含量平均增加了 0.40 g/kg，而杉木 + 方竹复合林相比杉木纯林土壤全氮含量平均增加了 0.90 g/kg。吴义远 [19] 在对比筠竹 *Chimonobambusa tumidissinoda* 纯林和筠竹 - 黄皮树 *Phellodendri chinensis* 混交林对氮素吸收利用的研究中发现，混交林相较于纯林具有更低的氮损失率。与混交林相比，纯林的氮素总损失率、氨挥发、径流、淋溶和硝化 - 反硝化损失率均显著增加。此外，分泌物中的蛋白质、氨基酸和核苷酸等物质也为土壤中输入了氮、磷等元素，因此杉木、檫木的复合林分相比于纯林，土壤全氮全磷含量也有了明显提高 [20]。

3.2　林竹复合经营对土壤养分作用的影响

复合林分相比于纯林，土壤中有机质及有效性元素成分的含量明显提高，其中檫木 + 方竹的复合林分土壤中有效性养分含量最高。森林土壤养分的来源错综复杂，但在自然条件下大体为三个方面：1）土壤母质中的矿物质分解 [21]；2）动植物残体的分解 [22]；3）大气降水中携带的养分元素 [23]。此外，人为施肥也可为林分土壤输入大量的养分元素。土壤中的有机质和氮磷钾等养分元素需要经过复杂的化学反应，才能转化为有效性成分从而被植物根系吸收。因此，土壤中有效性成分的种类和含量才是决定土壤养分的关键。复合经营林分相比于纯林，土壤中的有机质、水解氮、有效磷和速效钾含量均明显提高，其中檫木 + 方竹复合林分的有机质含量在 82.57±16.43 g/kg，土壤有效养分水解氮含量在 268.00±43.21 mg/kg，有效磷含量在 3.42±1.16 mg/kg，速效钾含量在 145.67±20.67 mg/kg，明显高于其他林分类型。研究证明，林竹混交造林相比于纯林，林下土壤酶活性和微生物生物量增加，进而提高土壤养分及有效性成分含量 [24-25]。而相关性分析中有机质与水解氮极显著相关，相关性高达 0.874，也证明了有机质会对土壤有效性成分产生影响。檫木属于落叶阔叶树种，秋冬季大量落叶为土壤输入了丰富的有机物质和养分元素，而套种的方竹在林下形成荫蔽，阻挡了大部分照射到地表的光辐射和林间气流流通，减少了地表水分的散失，有利于土壤中细菌和真菌等微生物的活动，加快了凋落物转化为有机质和养分的效率。

3.3　林竹复合经营对土壤的改良效果

林竹复合经营相比于纯林更有助于改良林分土壤，其中檫木 + 方竹的复合经营将森林土壤养分等级从中等提高到良。在林竹复合的经营模式下，乔木树种的根系可往土壤下层深入延伸，而混交的方竹的鞭根主要在土壤表层四散延展，从而形成了深浅两层的复合根系网络。单位面积内地下根系总质量和总表面积的增加，将更多的有机酸、酶和糖类物质等根系分泌物渗入土壤中，提高了土壤养分含量，活化了磷钾等矿物质元素 [26]。而根系的增加也有助于增强土壤透气性，提高土壤含氧量，促进土壤中氨化细菌和硝化细菌等好氧细菌的活动，加速分解土壤中有机态氮 [27]，有

利于土壤的养分循环和积累。土壤是森林赖以生存延续的基础，土壤的正向改良不仅有利于森林中植物的生长，而且对于森林生态系统长期稳定发展具有积极意义。因此，从土壤提质增效的目的和促进林分生长等综合效益方面考虑，檫木与方竹复合经营是最佳选择。但由于本研究林分复合经营的时限较短（4 a），后续还需进一步长期观测以明确林竹混交对土壤养分的影响机制。

参考文献：

[1] 于晨一 , 李镇江 , 刘升云 , 等 . 宝天曼国家级自然保护区木本植物多样性及土壤养分的海拔梯度格局 [J]. 东北林业大学学报 ,2023,51(9):101-106,119.
YU C Y, LI Z J, LIU S Y, et al. Altitudinal gradient pattern of woody species diversity and soil nutrients in Baotianman national nature reserve[J]. Journal of Northeast Forestry University,2023, 51(9):101-106,119.

[2] 朱燕 , 翟博超 , 孙美美 , 等 . 黄土丘陵区不同密度刺槐和油松人工林土壤理化性质与化学计量特征 [J]. 水土保持研究 , 2023,30(6):160-167.
ZHU Y, ZHAI B C, SUN M M, et al. Soil physicochemical properties and stoichiometry characteristics in *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabuliformis* plantations across different densities in the loess hilly region[J]. Research of Soil and Water Conservation,2023,30(6):160-167.

[3] 邹文涛 , 陈绍志 , 方庆 , 等 . 中国森林质量评价指标研究进展 [J]. 世界林业研究 ,2024,37(5):67-72.
ZOU W T, CHEN S Z, FANG Q, et al. Research advances in China’s forest quality evaluation indicators[J]. World Forestry Research,2024,37(5):67-72.

[4] 潘文琦 . 基于间接土地利用变化的区域动态林业净碳平衡研究 [D]. 南京 : 南京林业大学 ,2023.
PAN W Q. Research on regional dynamic net forestry carbon balance based on indirect land use change[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2023.

[5] 宋小军 . 川西南林地红色土壤肥力及其碳、氮、磷化学计量比特征研究 [D]. 雅安 : 四川农业大学 ,2022.
SONG X J. Study on fertility characteristics and stoichiometric ratio of C, N and P of forest red soil in southwest Sichuan[D]. Ya’an: Sichuan Agricultural University,2022.

[6] 何雨璇 . 不同混交模式对杉木林下植被和土壤性质的影响 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2024.
HE Y X. Effects of different mixing patterns on understory vegetation and soil properties in fir forests[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2024.

[7] 王迎春 . 退耕还林区不同植被恢复模式的水土保持及土壤改良效果评价 [D]. 雅安 : 四川农业大学 ,2002.
WANG Y C. The evaluation on the effect of water and soil conservation for different vegetation restoration models in the area of converting agricultural land into forest and pasture[D]. Ya’an: Sichuan Agricultural University,2002.

[8] 李正才 , 傅懋毅 , 谢锦忠 , 等 . 毛竹竹阔混交林群落地力保持研究 [J]. 竹子研究汇刊 ,2003,22(1):32-37.
LI Z C, FU M Y, XIE J Z, et al. Study on the productivity maintenance of bamboo and broad-leave tree mixed stands[J]. Journal of Bamboo Research,2003,22(1):32-37.

[9] PAUDEL D, TIWARI K R, RAUT N, et al. Species composition and carbon stock in different agroforestry practices in the mid-hills of Nepal[J]. Journal of Sustainable Forestry,2023,42(7): 695-711.

[10] LING Q, GAO X D, ZHAO X N, et al. Soil water effects of agroforestry in rainfed jujube (*Ziziphus jujube* Mill.) orchards on loess hillslopes in northwest China[J]. Agriculture, Ecosystem and Environment,2017,247:343-351.

[11] 杨贵云 , 李林鑫 , 何昆 , 等 . 林下植被对杉木人工林生长的影响研究进展 [J]. 世界林业研究 ,2023,36(6):20-25.
YANG G Y, LI L X, HE K, et al. Research advances in the effects of understorey vegetation on growth of Chinese fir plantation[J]. World Forestry Research,2023,36(6):20-25.

[12] 白祖云 , 杨太橡 , 蒲鸿 , 等 . 云南昭通中小径笋用竹造林中乔木树种配置 [J]. 世界竹藤通讯 ,2024,22(5):83-90.
BAI Z Y, YANG T X, PU H, et al. Tree species configuration for afforestation of small-and medium-diameter bamboo forests for shoot producing in Zhaotong City, Yunnan Province[J]. World Bamboo and Rattan,2024,22(5):83-90.

[13] 黄菲 , 张佛熠 , 钟嘉琳 , 等 . 南昌城市森林土壤肥力综合评价及其空间分布特征 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(8): 129-138.
HUANG F, ZHANG F Y, ZHONG J L, et al. Comprehensive evaluations and spatial distribution characteristics of soil fertility in urban forest in Nanchang[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(8):129-138.

[14] ZHANG Q Y, ZHU J X, WANG Q F, et al. Soil acidification in China’s forests due to atmospheric acid deposition from 1980 to 2050[J]. Science Bulletin,2022,67(9):914-917.

[15] ZOU Y N, NING D L, HUANG Y, et al. Functional structures of soil microbial community relate to contrasting N_2O emission patterns from a highly acidified forest[J]. Science of the Total Environment,2020,725:138504.

[16] 宗殿龙 . 不同树种套种中药材对土壤肥力和微生物群落的影响 [J]. 中国林副特产 ,2024(5):98-100.
ZONG D L. Effects of interplanting Chinese medicinal materials

with different tree species on soil fertility and microbial community[J]. Forest By-Product and Speciality in China, 2024(5):98-100.

[17] 忙顺兰 , 罗晓蔓 , 丁贵杰 , 等 . 马尾松幼苗根系分泌物对土壤酶活性和养分的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2021,41(12):53-59.
MANG S L, LUO X M, DING G J. Effects of root exudates of *Pinus massoniana* seedlings on enzyme activity and nutrient in soil[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2021,41(12):53-59.

[18] 张喜 , 张庭嘉 , 姜霞 , 等 . 黔北金佛山方竹林立地类型划分及竹林质量响应 [J]. 世界竹藤通讯 ,2024,22(1):19-29.
ZHANG X, ZHANG T J, JIANG X, et al. Site type classification and quality response of *Chimonobambusa uitilis* forest in northern Guizhou Province[J]. World Bamboo and Rattan,2024,22(1):19-29.

[19] 吴义远 . 筜竹纯林和筜竹 - 黄皮树混交林氮素吸收利用差异研究 [D]. 南京 : 南京林业大学 ,2024.
WU Y Y. Variation in nitrogen absorption and utilization between pure *Qiongzhuea tumidinoda* bamboo forests and *Q. tumidinoda-Phellodendri chinensis* mixed forests[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2024.

[20] 唐颖 . 西南山地落叶 / 常绿树种根系分泌物及其介导的土壤 N 素转化过程差异研究 [D]. 南充 : 西华师范大学 ,2020.
TANG Y. Differences in root exudates inputs and associated soil N transformation processes between deciduous and evergreen tree species in southwest mountainous regions, China[D]. Nanchong: China West Normal University,2020.

[21] 王慧芳 . 应用于植被护坡的两种岩生植物土壤微生物特性研究 [D]. 雅安 : 四川农业大学 ,2004.
WANG H F. Study on soil microbial characteristic of two kinds of petrophifle plants applied on slope eco-engineering[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University,2004.

[22] 罗航 . 不同林龄互叶白千层人工林养分生物循环特征 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2021.
LUO H. Characteristics of nutrient biological cycle in *Melaleuca alternifolia* plantations with different stand ages[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2021.

[23] 李娟 , 王亚静 , 杨相东 , 等 . 农业高质量发展背景下的新型肥料发展 [J]. 蔬菜 ,2024(6):1-13.
LI J, WANG Y J, YANG X D, et al. Development of new fertilizers under the background of high-quality agricultural development[J]. Vegetables,2024(6):1-13.

[24] 张美曼 . 不同竹阔混交林冠层结构、土壤特性及毛竹生物量研究 [D]. 北京 : 中国林业科学研究院 ,2021.
ZHANG M M. Study on canopy structure, soil characteristics and biomass of *Phyllostachys edulis* in different bamboo and broad-leaved mixed forests[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2021.

[25] 程欢 , 付雨欣 , 董洪君 , 等 . 川中丘陵区不同植被类型土壤理化性质及水文效应 [J]. 应用与环境生物学报 ,2019,25(4):845-853.
CHENG H, FU Y X, DONG H J, et al. Physical and chemical properties of soil and the hydrological effects of different vegetation types in the central Sichuan hilly region[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2019,25(4):845-853.

[26] 杨豆 . 毛竹向阔叶林和针叶林扩张对土壤磷生物有效性的影响及其机制 [D]. 南昌 : 江西农业大学 ,2022.
YANG D. Effect of moso bamboo expands to broadleaf and conifer forests on soil phosphorus bioavailability and its mechanism[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University,2022.

[27] 蔡琼 , 丁贵杰 . 森林土壤生态环境质量评价指标研究概述 [J]. 山地农业生物学报 ,2006,25(3):256-261.
CAI Q, DING G J. A discussion on evaluation indexes of forestry soil eco-environment quality[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology,2006,25(3):256-261.

[本文编校：吴　彬]