

马尾松—油茶针阔混交林土壤肥力评价

安冰 黄俊锭 赵喜 覃斯婕 李苑 周艳玲 卢开成*

(广西国有派阳山林场, 广西宁明 532500)

摘要: 以广西国有派阳山林场马尾松—油茶混交林为例, 研究马尾松针阔混交林与纯林土壤肥力的差异, 对马尾松人工林阔叶化改造有重要意义。分析马尾松—油茶混交林和马尾松纯林8项土壤化学指标(pH值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾含量)的差异, 采用5种方法(秩和比综合评价法、优劣解距离法、主成分分析法、多准则妥协解排序法和熵值法)综合评价土壤肥力, 确定不同化学指标在土壤质量评估中的权重, 对比马尾松—油茶混交林和纯林的土壤肥力差异。结果显示: 混交比例7:3的马尾松—油茶混交林土壤化学指标评价等级分别为有效磷二级水平, 有机质四级水平, pH值、全氮、全钾和全磷五级水平, 速效钾和碱解氮六级水平; 马尾松纯林的各项化学指标数值均低于该混交林, 其中全磷和有效磷差异明显, 均为六级水平。土壤肥力综合评价结果表明, 马尾松混交林土壤肥力高于纯林, 马尾松与油茶的混交比例7:3优于5:5, 表层土壤肥力高于亚表层土壤。土壤化学指标权重分析结果表明, 有效磷权重最高, 在综合评价中具有关键判别作用, 全磷和速效钾次之, 三者土壤肥力评价中占据核心地位。马尾松与油茶复层异龄混交, 有助于增加土壤有机质和养分含量, 缓解南亚热带酸性红壤区土壤酸化趋势, 提高土壤肥力, 是马尾松人工林阔叶化改造的有效经营策略。

关键词: 马尾松人工林; 混交林; 土壤肥力评价; 秩和比综合评价法; 熵值法; 优劣解距离法
中图分类号: S714.8; S159.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2097-5279(2025)04-0079-09

Soil fertility evaluation in mixed forests of *Pinus massoniana* and *Camellia oleifera*

AN Bing HUANG Junding ZHAO Xi QIN Sijie LI Yuan ZHOU Yanling LU Kaicheng*

(Guangxi Paiyangshan State Forest Farm, Ningming 532500, China)

Abstract: Taking the mixed forest of *Pinus massoniana* and *Camellia oleifera* in the state-owned Paiyangshan Forest Farm of Guangxi, China as an example, studying the differences in soil fertility between the mixed coniferous and broad-leaved *P. massoniana* forest and the pure forest is significant for the broad-leaved transformation of *P. massoniana* plantations. The differences in eight soil chemical indicators, including pH value, organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus and available potassium content, between the mixed forest of *P. massoniana* and *C. oleifera* and the pure forest of *P. massoniana* were analyzed. Five evaluation methods, namely the rank-sum ratio comprehensive evaluation method, technique for order preference by similarity to ideal solution, the principal component analysis method, the multi-criterion compromise solution ranking method and the entropy method, were used to conduct a comprehensive evaluation of soil fertility, to determine the weights of different chemical indicators in soil quality assessment and compare the differences in soil fertility between mixed forests of *P. massoniana* and *C. oleifera* and pure forests. The evaluation grades of soil chemical indicators for the mixed forest of *Pinus sasanqua* and *C. oleifera* (7:3) are as follows: available phosphorus level 2, organic matter level 4, pH value, total nitrogen, total potassium and total phosphorus level 5, available potassium and alkali-hydrolyzable nitrogen level 6. All the chemical index values of the pure *P. massoniana* forest were lower than those of the mixed forest. Among them, the differences in total phosphorus and available phosphorus were significant, both reaching the sixth grade level. The comprehensive evaluation results of soil fertility show that the soil fertility of the mixed forest of *P. massoniana* is higher than that of the pure forest. The mixed ratio of *P. massoniana* and *C. oleifera* in 7:3 is better than 5:5, and the fertility of the surface soil is higher than that of the sub-surface soil. The analysis of weight results of soil chemical indicators shows that available phosphorus has the highest weight and plays a key discriminating role in the comprehensive evaluation, followed by total phosphorus and available potassium. The three occupy a core position in the evaluation of soil fertility. The multi-layered

收稿日期: 2025-06-21; 修回日期: 2025-08-11。

基金项目: 广西林业自筹科技项目(2023GXZCLK50、2023GXZCLK51); 崇左市科技计划项目(崇科20231223)。

* 通信作者: 卢开成(E-mail: 1986752412@qq.com), 高级工程师。

intercropping of *C. oleifera* and *P. massoniana* at different ages helps increase soil organic matter and nutrient content, alleviate acidification trend in the acidic red soil of the Southern subtropical zone, and enhance soil fertility. It is an effective management strategy for the broad-leaved transformation of *P. massoniana* plantations.

Keywords: *Pinus massoniana* plantation; mixed plantation; soil fertility evaluation; rank-sum ratio comprehensive evaluation method; entropy method; technique for order preference by similarity to ideal solution

在针叶林下引入阔叶树种,将纯林改培为混交林,是人工林可持续经营的重要管理策略之一(白云星, 2022)。这种模式通过立体空间布局和资源互补,可有效提升生态系统质量和稳定性,显著提高土地利用率和林业生产力(程分生等, 2021)。在构建多物种人工林时,引入阔叶树种有助于改善土壤结构、提高物种多样性,从而缓解纯林常见的土壤肥力和生物多样性下降等问题(Okada et al., 2019)。研究表明,树种调控可显著增加林下表层土壤有机质及氮、磷含量(樊后保等, 2006),针阔混交林的土壤有机碳和氮储量也显著高于针叶纯林(Wang et al., 2013)。此外,通过调整树种组成,能够优化林分结构、改善林内小环境、促进土壤养分循环(Wu et al., 2019),最终提高人工林的生产力。研究表明,马尾松 *Pinus massoniana* Lamb 与油茶 *Camellia oleifera* Abel 套种能够形成多层次冠层结构。其中,马尾松作为上层乔木提供适度遮荫,而油茶作为下层灌木能够充分利用光能资源(朱洪如, 2020)。通过引入油茶来构建异龄混交林,对亚热带地区马尾松针叶人工林的土壤保育至关重要(白云星, 2022)。油茶根系性状复杂,凋落物分解迅速,可有效改善土壤质量和功能。此外,相关研究表明,不同阔叶树种对土壤改良的层次深度存在差异(林德喜等, 2004)。马尾松与阔叶树种套种后,土壤有机质及氮、磷含量均显著提升,进一步印证了树种调控在土壤肥力恢复中的积极效果。

研究发现,不同的土壤肥力评价方法直接影响土壤评价结果的准确性和客观性。目前,主要采用判别分析法、加权综合法和主成分分析法等综合评价方法,但尚未形成统一标准。土壤肥力评价方法应尽量减少人为的主观性,并充分利用新技术和新手段(骆东奇等, 2002)。蒲成伟等(2025)的研究结果表明,不同肥力评价方法得出的结果存在显著差异,其中变异系数法的评价结果偏高,而熵权系数法的评价结果较为适宜。

在广西南亚热带赤红壤地带,马尾松人工林经阔叶化改造后的土壤肥力变化尚不明确。目前,如何有效应用多种综合性评价方法进行土壤肥力评估,

仍有待进一步实践和探讨。本研究通过监测广西国有派阳山林场马尾松纯林和改培后混交林土壤养分含量,采用多准则妥协解排序法、秩和比综合评价法、优劣解距离法、主成分分析法和熵值法5种不同的评价方法,对马尾松纯林和混交林的土壤肥力进行评估,以期马尾松人工林可持续经营提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区地处广西西南地区南亚热带,海拔400~500 m,为富铝化特征的赤红壤地带。试验林位于广西国有派阳山林场国家重点林木良种基地马尾松二代种子园,面积35323.53 hm²。该园于2012年完成砧木湿地松定植;2013年完成桐棉种源马尾松嫁接,种植密度为270株/hm²;2015年套种油茶,套种密度分别为270株/hm²(混交比例5:5)和120株/hm²(混交比例7:3)。以无套种的马尾松纯林为对照。2021年油茶进入初产期。

1.2 试验方法

选择立地条件相对一致的地块,设置20 m×20 m的标准样地作为试验点,共计3个样地,每个样地设置3个重复,各样地之间间隔50 m(表1)。2024年8月上旬,在标准样地中沿对角线选择3个样点(混交林选择距针-阔林木120 cm的样点,纯林选择两林木间120 cm的样点),挖掘土壤剖面,采用环刀法(环刀容积为100 cm³)分别取表层(0~20 cm)和亚表层(20~40 cm)2个剖面土样,送至广西华测检测认证有限公司检测(段晓阳等, 2025)。参照《土壤农业化学分析方法》测定主要化学性质指标,土壤pH和有机质分别采用电位法和重铬酸钾氧化-外加热法测定;全氮、全磷和全钾分别采用凯氏蒸馏法、碱融-钼锑抗分光光度法和氢氟酸-高氯酸熔融-火焰光度计法测定;碱解氮、有效磷和速效钾分别采用碱解-扩散法、钼锑抗比色法和火焰光度计法测定(段晓阳等, 2025)。土壤单因子质量评价参照段晓阳等(2025)的方法,按照全国第二次土壤普查土壤养分分级指标,将土壤肥力分为六个等级,从极高(一级)到极低(六级)(白云星, 2022)。

表1 试验点布设情况表

Tab. 1 Layout of soil monitoring points

编号 Number	试验点 Monitoring points	林龄 Forest age	郁闭度 Canopy density	监测指标 Monitoring indicators	施肥措施 Fertilization measures
A	马尾松—油茶混交林(7:3)		0.8		
B	马尾松纯林	马尾松 12 a 油茶 10 a	0.7	土壤pH值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量	施用有机质含量 25%以上的有机无机复混肥(总养分30%, N:P ₂ O ₅ :K ₂ O=13:11:6)。每年施肥1次, 每株1kg
C	马尾松—油茶混交林(5:5)		0.5		

土壤试验样地编号分别为A、B和C。按照土壤深度, A1、B1和C1为表层(0~20 cm), A2、B2和C2为亚表层(20~40 cm), 0~40 cm土壤深度的土壤养分指标数据为0~20 cm和20~40 cm土壤深度的数据平均值, 均值分别为A、B和C(0~40 cm)。

1.3 土壤肥力综合评价方法与统计分析

采用秩和比综合评价法(Rank-sum ratio comprehensive evaluation method, RSR)、优劣解距离法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)、主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)、多准则妥协解排序法(VlseKriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje, VIKOR)和熵值法(entropy method, EM)5种不同的评价方法进行土壤肥力综合评价(林丽珍等, 2024), 采用SPSSPRO在线数据分析平台(<https://www.spsspro.com/introduction/>)进行分析, 利用CNSknowall在线数据分析云平台(<https://cnsknowall.com/#/HomePage>)绘图。

2 结果与分析

2.1 马尾松混交林及纯林土壤化学指标

马尾松混交林及纯林土壤养分含量结果显示(图1、2), 土壤pH值为4.27~4.91, 混交林及纯林土壤pH值排序为A>B>C, 亚表层酸性高于表层土壤。根据全国第二次土壤普查养分分级标准(段晓阳等, 2025), 试验地均属酸性土壤, C和C2为六级, 其他均为五级。有机质含量为8.82~21.50 g/kg, 各试验点含量差异显著, 排序为A>C>B, 表层土壤有机质含量高于亚表层。养分等级除了A1为三级、B和B2为五级, 其他均为四级。

全氮含量为0.45~0.87 g/kg, 各试验点差异显著, 排序为C>A>B。试验地B和C的表层土壤全氮含量高于亚表层。B2为六级, C、C1和C2为四级, 其他均为五级。全磷含量为0.17~0.48 g/kg, 试验点A的土壤全磷含量显著高于试验点B和C, 排序为A>B>C; 试验地A和B表层土壤全磷含量高于亚表层土壤; 养分等级除了A1是四级、C、C1和B2为六级, 其他

均为五级。全钾含量为4.26~12.90 g/kg, 各试验点含量差异显著, 排序为C>A>B, 试验地亚表层土壤全钾含量高于表层土壤。养分等级除了B和B1为六级、C、C1和C2为四级, 其他均为五级。

碱解氮含量为18.50~49.50 mg/kg, 试验点A和B的碱解氮含量显著高于试验点C, 排序为A>B>C; 试验地A和B亚表层土壤碱解氮含量高于表层土壤; 养分等级除了B1为五级, 其他均为六级。有效磷含量为0.61~89.81 mg/kg, 各试验点含量差异显著, 排序为A>B>C, 试验地表层土壤有效磷含量高于亚表层土壤; 养分等级差异显著, A1、A和A2分别是一级、二级和三级, B1和B分别为四级和五级, 其他均为六级。速效钾含量为20.80~76.80 mg/kg, 各试验点含量差异显著, 排序为C>A>B; 试验地A和B亚表层土壤碱解氮含量高于表层土壤; 养分等级除了C、C1和C2为四级、A2为五级, 其他均为六级。

如图2所示, 3个试验点中, 0~40 cm土壤深度试验点A马尾松—油茶混交林(7:3)的土壤pH值、有机质、全磷、碱解氮和有效磷含量排名均为第一, 全氮、全钾和速效钾含量排名均为第二; 试验点C马尾松—油茶混交林(5:5)土壤全氮、全钾和速效钾含量排名均为第一, 有机质含量排名第二, pH值、碱解氮、全磷和有效磷含量排名均为第三; 试验点B马尾松纯林土壤pH值、碱解氮、全磷和有效磷含量排名均为第二, 有机质、全氮、全钾和速效钾含量排名均为第三。试验结果显示, A1土壤酸性最低, 有机质、全磷和有效磷含量最高; B1全钾和速效钾含量最低, B2有机质、全磷、全氮和碱解氮含量最低; C1全氮和速效钾含量最高, C2全钾含量最高, 有效磷含量最低, 土壤酸性最强。

各项土壤养分指标中, 3个试验点表层土壤的pH值、有机质和有效磷含量均高于亚表层; 试验地B和C表层土壤的全氮含量, 以及A和B表层土壤的全磷含量均高于亚表层; 3个试验地亚表层土壤的全钾含量均高于表层; 试验地A和C亚表层土壤的碱解氮含量以及A和B速效钾含量高于表层。3个试

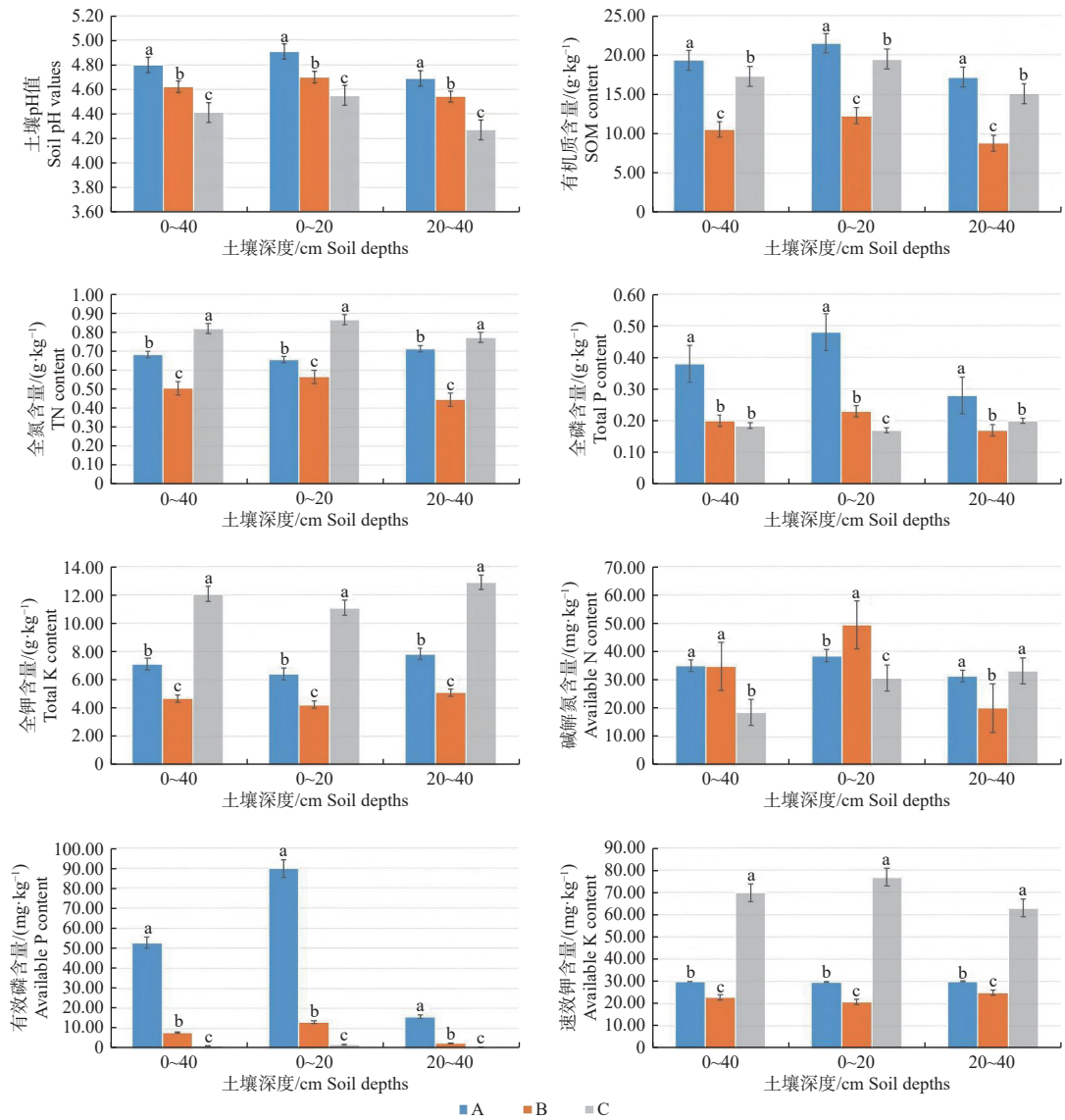


图1 土壤化学指标统计图

Fig. 1 Statistical chart of soil chemical indicators

注:小写字母 a、b 和 c 表示相同土壤深度下各试验点间 *t* 检验(双侧)存在显著差异($P < 0.05$)。

Notes: Lowercase letters a, b and c indicate significant differences in t-test (two-sided) between test points at the same soil depth ($P < 0.05$).

验点土壤有机质含量评价等级横跨三级至五级,全氮、全磷、全钾和速效钾含量评价等级横跨四级至六级, pH 值和碱解氮含量评价等级横跨五级至六级,有效磷含量评价等级跨越度最大,横跨一级至六级。

2.2 马尾松混交林及纯林土壤肥力评价

采用秩和比综合评价法、优劣解距离法、主成分分析法、多准则妥协解排序法和熵值法 5 种不同的评价方法进行土壤肥力综合评价,结果显示(图 3),不同评价方法下的土壤肥力存在差异。在多准则妥协解排序法评价结果中,评价值越大、扇形面积越大,土壤肥力评价价值越低,其他 4 种评价方法评价结果则相反。5 种不同的评价方法中,秩和比综合评价法、优劣解距离法和熵值法扇形面积比例一致,即评综

合价数值排序一致。主成分分析法和多准则妥协解排序法面积比例差异明显。主成分分析法的 KMO 检验和 Bartlett 球形检验结果用于衡量主成分分析适用程度。本试验显著性 P 值小于 0.001,表明原始变量之间存在显著相关性,主成分分析有效。然而,本试验 KMO 检验值为 0.262, Bartlett 球形检验中 KMO 值低于 0.5 表示极不适合主成分分析,说明主成分分析不适合本试验数据分析。

秩和比综合评价法、优劣解距离法和多准则妥协解排序法,均使用熵权法确定指标权重构建评价体系。分析结果表明,土壤化学指标的权重结果一致(图 4)。计算结果显示,各指标权重差异显著,土壤化学指标对综合评价体系的贡献度存在明显分化。

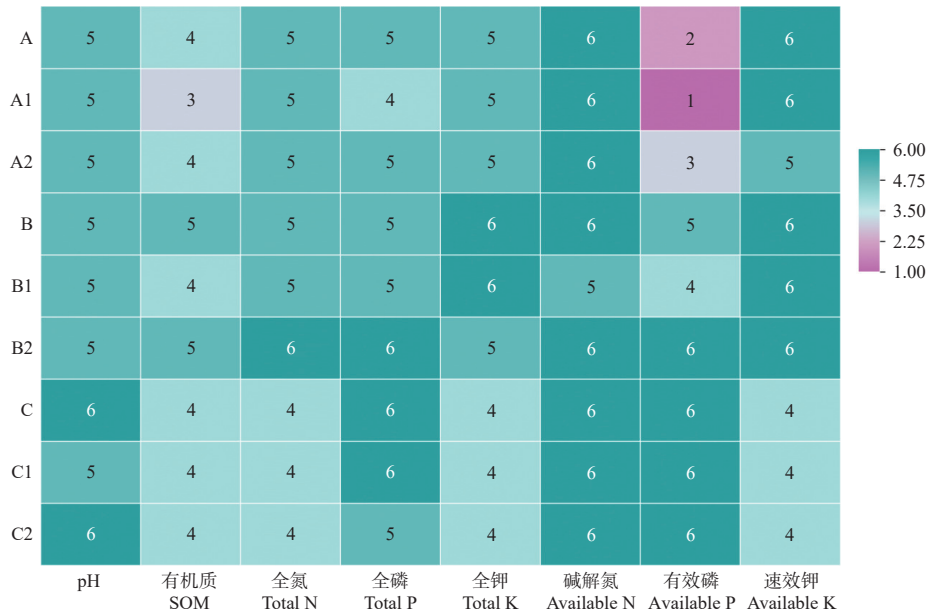


图 2 土壤化学指标评价等级方块热图

Fig. 2 Soil chemical index evaluation grade block heatmap

注：图中的数字代表土壤化学指标评价等级，不同等级用不同颜色区分。

Notes: The numbers in the figure represent the evaluation grades of soil chemical indicators, with different colors distinguishing between different grades.



图 3 土壤肥力评价对比图

Fig. 3 Comparison chart of soil fertility evaluation

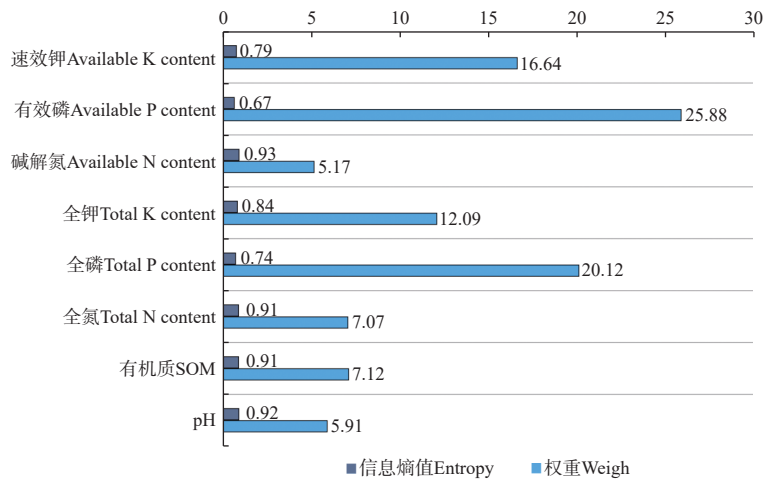


图 4 土壤化学指标权重统计图

Fig. 4 Soil chemical index weight statistical chart

其中，有效磷权重最高(25.88%)，其信息熵值最低(0.67)，表明该指标数据离散程度高、区分度强，在综合评价中具有关键判别作用，这与有效磷含量评价等级跨越度最大(横跨一级至六级)相吻合。全

磷权重(20.12%)与速效钾权重(16.64%)次之，二者与有效磷的熵值均低于0.8，说明有效磷、全磷和速效钾在土壤肥力评价中占据核心地位。全钾、有机质和全氮权重(分别为12.09%、7.12%和7.07%)构成

第二梯队,其熵值介于0.84至0.91之间,显示中等变异特性。pH值与速效氮的权重最低(分别为5.91%和5.17%),对应熵值超过0.9,说明其数据分布相对均匀、信息冗余度较高。该权重分配表明,磷素和钾素的权重突出,二者速效养分权重均高于全量养分。

秩和比综合评价法的F检验结果显示,显著性P值为极显著水平,模型的拟合优度 R^2 为0.955,表明模型表现优秀。在变量共线性方面,VIF值全部小于10,说明模型不存在多重共线性问题,构建合理。模型公式为 $y=-0.449+0.168*\text{Probit}$ 。多准则妥协解排

序法分析结果显示,决策机制系数为0.5,说明该决策过程将给予群体效用最大化与个体遗憾最小化同等权重,即最接近理想解且个体遗憾最小,可视为稳妥妥协解。计算结果显示,妥协解的排序依据为利益比率值越小,综合表现越优。因此,在图3和图5中,A1面积最大,A次之,两者利益比率值分别为0.002和0.141,综合表现最优;B2面积最小,利益比率值为0.976,综合表现最差。综上所述,5种评价土壤肥力的方法中,秩和比综合评价法、优劣解距离法和熵值法最优,多准则妥协解排序法其次,主成分分析法评价不适合。

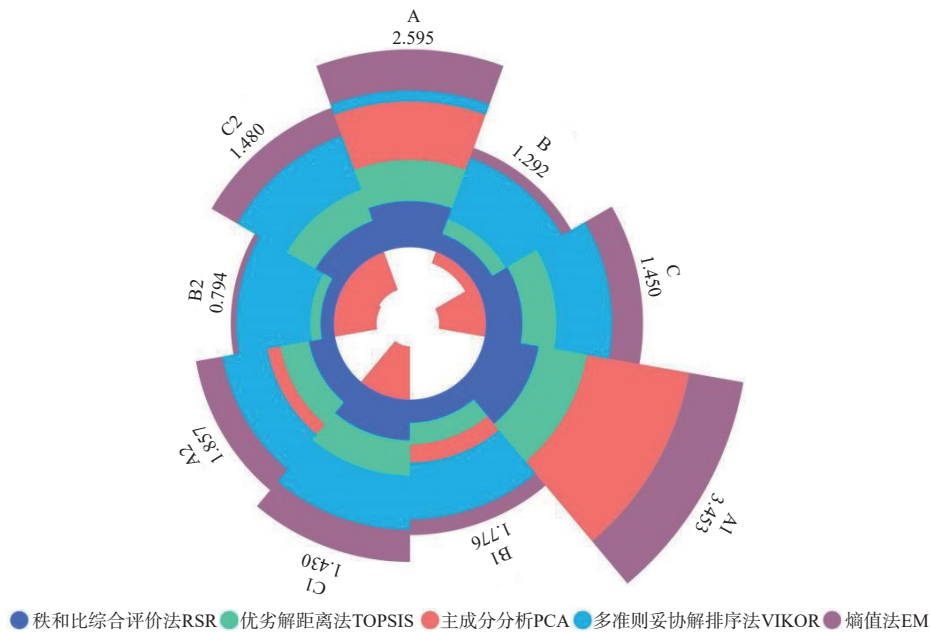


图5 土壤肥力评价结果排名图

Fig. 5 Ranking chart of soil fertility evaluation results

土壤肥力评价结果排名详见图5,其中,秩和比综合评价法、优劣解距离法和熵值法土壤肥力排名结果一致,均为 $A1>A>C1>C>C2>A2>B1>B>B2$ 。主成分分析法和多准则妥协解排序法评价结果显示,A1和A土壤肥力排名前两位,3个试验点土壤肥力 $A>C>B$,这与前3种评价方法的结果一致。5种评价方式结果显示,表层土壤肥力均高于亚表层土壤,即上层(0~20cm)土壤肥沃,下层(20~40cm)土壤贫瘠。相同土壤深度下, $A>C>B$ 、 $A1>C1>B1$ 、 $A2>C2>B2$,马尾松混交林土壤肥力高于纯林,马尾松-油茶的混交比例7:3优于5:5。

3 讨论

本研究结果表明,马尾松混交林土壤肥力高于纯林,且表层土壤肥力均高于亚表层,这与白云星

(2022)的研究结果一致。试验点A,马尾松—油茶混交林(7:3)土壤pH值、有机质、碱解氮、全磷和有效磷含量排名均为第一;试验点C,马尾松—油茶混交林(5:5)土壤全氮、全钾和速效钾含量排名均为第一。土壤肥力综合评价结果表明,马尾松与油茶的混交比例7:3优于5:5。马尾松纯林群落结构单一,土壤质量下降,针阔混交能够提高土壤肥力,这一结论与张薰元(2021)的研究结果一致。针阔比例7:3土壤肥力调控效果最好,优于5:5的混合比例,可能是因为马尾松与油茶不同混交比例凋落物输入,对土壤肥力流失具有改善作用(陆晓辉,2017)。采用7:3的混交比例时,混交林中马尾松占据主导地位,其根系可以深入到60cm以下的土层,而油茶的根系则主要集中于表层土壤,这种分布方式使得2个树种的根系在不同土壤层次中各自发挥作用,从而

更充分地利用土壤资源,提高养分吸收效率。白云星(2022)的研究也得出同样的结论。

马尾松—油茶混交林A(混交比例7:3,土壤深度0~40 cm)的土壤化学指标评价等级显示,有效磷达到二级水平,有机质为四级,pH值、全氮、全钾和全磷均为五级,速效钾和碱解氮为六级。相比之下,马尾松纯林的各项化学指标数值均低于混交林,其中全磷和有效磷差异明显,均为六级。这与白云星(2022)和张薰元(2021)的研究结果一致。针阔混交林A缓解了土壤酸性,增加了有机质和氮、磷、钾等养分含量,其主要原因是针阔混合凋落物改变了土壤微生物群落和多样性,凋落物和根系在矿化过程中提供的养分远高于纯林。陆晓辉(2017)研究发现,马尾松针阔混交能够提高土壤全量养分含量,其中土壤全磷变化趋势较为复杂;混交林与纯林土壤有效磷含量差异显著,不同混交比例下,会出现混交林有效磷含量低于纯林的情况,这是因为松针养分归还量大,而混交后阔叶降低了磷素归还量。这与本试验的研究结果一致。

除主成分分析法以外的4种评价方法中,土壤化学指标权重结果一致,有效磷权重最高,在综合评价中具有关键判别作用;全磷和速效钾次之;三者土壤肥力评价中占据核心地位。马尾松混交林有效提升了土壤氮、磷和钾及其部分有效态含量,其中有效磷含量成为主要限制性养分,这与翟林(2024)的研究结果一致。亚热带赤红壤地区的酸性土壤富含铁、铝等金属离子,磷素易与这些离子结合形成不溶性化合物,从而导致有效磷含量低。马尾松—油茶混交林通过多种机制促进了磷素的活化,尤其是在油茶根系分泌物对磷的解吸作用方面发挥了重要作用。油茶适应酸性土壤,其根系分泌物中的有机酸和酶类物质能够有效解离土壤中与铁、铝金属离子结合的磷素,提高有效磷含量,其他研究也得出相似结论(白云星,2022;翟林,2024)。权重分配表明,磷素和钾素的权重突出,二者速效养分权重均高于全量养分。贺明霞等(2025)研究发现,亚热带地区酸性红壤中,磷素易与铁、铝结合形成化合物,加剧磷素固定作用,有效磷缺乏,从而限制树木生长和生态系统功能。谢娜等(2023)研究发现,油茶适应酸性土壤环境,具有较高根系生物量及碳储量,作为马尾松复层异龄混交改造树种,可有效改良土壤肥力,提高生物多样性。

5种评价方式结果一致表明,3个试验点土壤肥力A>C>B,马尾松混交林土壤肥力高于纯林,A1和

A土壤肥力排名前两位,表层土壤肥力均高于亚表层土壤,马尾松与油茶的混交比例7:3优于5:5,这与白云星(2022)、陆晓辉(2017)和张薰元(2021)的研究结果一致。在本试验评价土壤肥力的方法中,秩和比综合评价法、优劣解距离法和熵值法最优,多准则妥协解排序法次之,主成分分析法评价不适合,这与林丽珍等(2024)的研究结果一致。目前土壤肥力评价多基于各类土壤指标,通过数学模型进行分析,由于土壤系统的复杂性和评价目的和评价指标的差异性,以及评价思路和数学方法的不同,尚未形成统一标准(周王子等,2016)。对土壤养分指标进行权重赋值后综合评分法,能全面联系各指标,得到可靠的土壤肥力综合评分值,是较为全面和可靠的土壤肥力评价方法(许咏梅等,2005)。本研究采用秩和比综合评价法、优劣解距离法和多准则妥协解排序法,均使用熵权法确定指标权重并构建评价体系。黄海娟(2021)研究发现,熵权法评价结果适宜在土壤肥力评价中,减少主观因素对赋权的依赖和影响;多种评价方法对比和筛选,有助于体现数据本身的统计规律性,更具科学性和合理性。本试验得出类似结果。

油茶适于亚热带酸性红壤,根系性状复杂,凋落物分解迅速,与马尾松复层异龄混交后,可有效改良土壤肥力,提高生物多样性,改善土壤质量和功能,有助于马尾松人工林可持续经营(白云星,2022;陆晓辉,2017;薛沛沛等,2025;张薰元,2021)。本研究测定的土壤理化指标有限,评价体系未纳入森林生态功能和碳汇功能、土壤微生物、凋落物和酶活性、生物多样性等内容,未进行土壤肥力改良机理研究、土壤肥力演变与林木生长的相关性分析,存在较大局限性(黄海娟,2021)。今后将进一步监测跟踪马尾松混交林土壤肥力演变,摸索复层异龄混交技术体系,促进林业产业健康发展。

4 结论

针阔混交林土壤肥力评价结果表明,马尾松—油茶混交林的土壤肥力高于马尾松纯林,马尾松与油茶的混交比例7:3优于5:5。混交比例7:3的马尾松—油茶混交林土壤化学指标评价等级分别为:有效磷二级,有机质四级,pH值、全氮、全钾和全磷均为五级,速效钾和碱解氮六级。相比之下,马尾松纯林各项化学指标数值均低于混交林,尤其是全磷和有效磷差异显著,均为六级。土壤化学指标权重分析结果表明,有效磷权重最高,在综合评价中具有

关键判别作用,全磷和速效钾次之,三者 in 土壤肥力评价中占据核心地位。油茶与马尾松复层异龄混交模式,不仅有助于增加土壤有机质和养分含量,还能缓解南亚热带酸性红壤区土壤酸化趋势,从而提高土壤肥力。这一模式可作为马尾松人工林阔叶化改造的科学合理经营策略。

参 考 文 献

- 白云星. 2022. 马尾松人工林阔叶化改造对凋落物-土壤系统生态功能影响机制研究[D]. 贵阳: 贵州大学.
- Bai Y X. 2022. Study on the mechanism of broadleaf transformation of *Pinus massoniana* plantation on the ecological function of litter-soil system[D]. Guiyang: Guizhou University. (in Chinese)
- 程分生, 尤龙辉, 叶功富, 等. 2021. 亚热带红壤侵蚀区马尾松不同套种模式生态系统碳平衡[J]. 应用生态学报, 32(4): 1163-1174.
- Cheng F S, You L H, Ye G F, et al. 2021. Carbon balance in an interplanting *Pinus massoniana* stand in subtropical eroded red soil re-gion, China.[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 32(4): 1163-1174. (in Chinese)
- 段晓阳, 杨晓婷, 韩露, 等. 2025. 山东省烟台市填海造陆居住区绿地土壤质量现状调查与评价[J]. 树木医学, 2(1): 87-96.
- Duan X Y, Yang X T, Han L, et al. 2025. Investigation and evaluation of soil quality in green space in sea reclamation residential areas of Yantai City, Shandong Province[J]. Tree Health, 2(1): 87-96. (in Chinese)
- 樊后保, 李燕燕, 黄玉梓, 等. 2006. 马尾松纯林改造成针阔混交林后土壤化学性质的变化[J]. 水土保持学报, 20(4): 77-81.
- Fan H B, Li Y Y, Huang Y Z, et al. 2006. Changes of soil chemical properties after pure Masson's pine plantations transferred into mixed conifer-hardwood stands[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 20(4): 77-81. (in Chinese)
- 贺明霞, 黄雪蔓, 尤业明, 等. 2025. 马尾松人工林混交改造下根系-菌丝-微生物互作对土壤磷转化的调控机制[J]. 北京林业大学学报, 47(3): 83-94.
- He M X, Huang X M, You Y M, et al. 2025. Regulatory mechanism of root-mycelial-microorganism interactions on soil phosphorus transformation of *Pinus massoniana* plantation under mixed renovation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 47(3): 83-94. (in Chinese)
- 黄海娟. 2021. 桉树人工林土壤肥力质量指标的筛选与评价[D]. 长沙: 中南林业科技大学.
- Huang H J. 2021. Index screening and evaluation of soil fertility quality of *Eucalyptus* plantation[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology. (in Chinese)
- 林德喜, 樊后保, 苏兵强, 等. 2004. 马尾松林下套种阔叶树土壤理化性质的研究[J]. 土壤学报, 41(4): 655-659.
- Lin D X, Fan H B, Su B Q, et al. 2004. Effect of interplantation of broad leaved trees in *Pinus massoniana* forest on physical and chemical properties of the soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 41(4): 655-659. (in Chinese)
- 林丽珍, 付军, 刘奇林, 等. 2024. 不同连栽代次桉树人工林土壤肥力评价[J]. 桉树科技, 41(1): 14-19.
- Lin L Z, Fu J, Liu Q L, et al. 2024. Evaluation of soil fertility of *Eucalyptus* plantations with different successive planting times[J]. China Industrial Economics, 41(1): 14-19. (in Chinese)
- 陆晓辉. 2017. 马尾松凋落物特性及松针分解过程与调控研究[D]. 贵阳: 贵州大学.
- Lu X H. 2017. Study on litter characteristics of *Pinus massoniana* and pine needle decomposition process and regulation[D]. Guiyang: Guizhou University. (in Chinese)
- 骆东奇, 白洁, 谢德体. 2002. 论土壤肥力评价指标和方法[J]. 土壤与环境, 11(2): 202-205.
- Luo D Q, Bai J, Xie D T. 2002. Research on evaluation norm and method of soil fertility[J]. Soil and Environmental Sciences, 11(2): 202-205. (in Chinese)
- 蒲成伟, 周立, 张绩, 等. 2025. 不同评价方法下土壤肥力的差异性: 以南充市为例[J]. 热带作物学报, 46(2): 460-473.
- Pu C W, Zhou L, Zhang J, et al. 2025. Differences in soil fertility under different evaluation methods: A case study of Nanchong, Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 46(2): 460-473. (in Chinese)
- 谢娜, 郭其强, 袁刚毅, 等. 2023. 马尾松及其林下油茶细根分解特征[J]. 南方农业学报, 54(1): 190-199.
- Xie N, Guo Q Q, Yuan G Y, et al. 2023. Fine root decomposition characteristics of *Pinus massoniana* Lamb. and *Camellia oleifera* Abel. under *P. massoniana* forest[J]. Journal of Southern Agriculture, 54(1): 190-199. (in Chinese)
- 许咏梅, 王讲利, 刘骅. 2005. 应用综合评价法评价新疆灰漠土土壤质量的研究[J]. 土壤通报(4): 465-468.
- Xu Y M, Wang J L, Liu Y. 2005. Evaluation of grey desert soil quality by index method[J]. Chinese Journal of Soil Science, (4): 465-468. (in Chinese)
- 薛沛沛, 齐代华, 陈本文, 等. 2025. 马尾松林阔叶化改造对土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量特征的影响[J/OL]. 生态学杂志, 1-11[2025-07-04]. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202510.021>.
- Xue P P, Qi D H, Chen W B, et al. 2025. The effects of broadleaved transformation of *Pinus massoniana* forests on the contents and ecological stoichiometry of C, N and P in soil[J/OL]. Chinese Journal of Ecology, 1-11[2025-07-04]. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202510.021>. (in Chinese)
- 翟林. 2024. 红壤侵蚀区不同恢复阶段和套种模式马尾松林生态系统碳固存研究[D]. 福州: 福建农林大学.
- Zhai L. 2024. Study on Carbon Sequestration of *Pinus massoniana* Forest Ecosystem in Different Restoration Stages and Interplanting Patterns in Red Soil Erosion Area[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. (in Chinese)
- 张薰元. 2021. 马尾松人工林物种调控后凋落物对土壤肥力的影响研究[D]. 贵阳: 贵州大学.
- Zhang X Y. 2021. Study on the relationship of litter to soil fertility of *Pinus massoniana* Lamb. after species control[D]. Guiyang: Guizhou University. (in Chinese)
- 周王子, 董斌, 刘俊杰, 等. 2016. 基于权重分析的土壤综合肥力评价方法[J]. 灌溉排水学报, 35(6): 81-86.
- Zhou W Z, Dong B, Liu J J, et al. 2016. Method of comprehensive evaluation on soil fertility on the basis of weight analysis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 35(6): 81-86. (in Chinese)
- 朱洪如. 2020. 不同郁闭度马尾松林下套种油茶产流产沙及养分流失研

- 究[J]. 林业勘察设计, 40(4): 57–59.
- Zhu H R. 2020. Runoff and sediment and nutrient loss characteristic under forest canopy inter-planting *Camellia oleifera* of *Pinus massoniana* with different canopy density[J]. Forestry Prospect and Design, (4): 57–59. (in Chinese)
- Okada M, Hirao T, Kaji M, *et al.* 2019. Role of fallen logs in maintaining the species diversity of understory vascular plants in a mixed coniferous and broad-leaved forest in Hokkaido, northern Japan[J]. [Forest Ecology and Management](#), 448: 249–255.
- Wang H, Liu S R, Wang J X, *et al.* 2013. Effects of tree species mixture on soil organic carbon stocks and greenhouse gas fluxes in subtropical plantations in China[J]. [Forest Ecology and Management](#), 300: 4–13.
- Wu H L, Xiang W H, Ouyang S, *et al.* 2019. Linkage between tree species richness and soil microbial diversity improves phosphorus bioavailability[J]. [Functional Ecology](#), 33(8): 1549–1560.