

不同造林模式对桉树生长和土壤理化性质的影响

余玉珠 黄兰清 庞世莲 胡雪玲 陈卫国

(广西壮族自治区国有钦廉林场 广西 钦州 535000)

摘 要:【目的】探究不同造林模式对桉树生长和土壤理化性质的影响,探索最佳的混交造林模式。

【方法】以处理1(巨尾桉纯林)、处理2(巨尾桉×刨花润楠混交模式)、处理3(巨尾桉×红锥混交模式)3种造林模式为研究对象,对巨尾桉的生长指标及林地土壤理化性质进行测定和分析。【结果】结果表明:伴生树种刨花润楠和红锥对巨尾桉的树高、胸径、单株材积和蓄积量均有显著的促进作用。处理2(巨尾桉×刨花润楠混交模式)中巨尾桉的树高、胸径、单株材积和蓄积量分别较处理1(巨尾桉纯林)大18.16%、14.72%、36.84%和39.93%,均差异显著($P<0.05$,下同)。处理3(巨尾桉×红锥混交模式)中巨尾桉的树高、胸径、单株材积和蓄积量分别较处理1(巨尾桉纯林)高13.40%、16.02%、29.41%和34.64%,均差异显著。随着土层深度的增加,土壤容重变大,土壤总孔隙度和土壤毛管孔隙度变小。不同土层深度的巨尾桉纯林的土壤容重均大于其他2个混交模式,处理3(巨尾桉×红锥混交模式)中最小,而巨尾桉纯林的土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度和田间持水量均小于其他2个混交模式,处理3(巨尾桉×红锥混交模式)最大。除了处理3(巨尾桉×红锥混交模式)外,其他模式类型的土壤全氮含量随着土层深度的增加,呈上升趋势,而土壤速效氮、土壤全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、有机质、有效铜、有效铁、有效锌及有效硼含量随着土层增加呈下降趋势。各个混交模式的土壤中大量、微量元素及有机质含量均高于巨尾桉纯林。除了土壤容重外,各项指标与巨尾桉生长指标均呈正相关,部分指标呈显著或极显著正相关。【结论】综上所述,两种混交模式均可提高巨尾桉的生长量及改善土壤质量,但从生长指标来看,处理2(巨尾桉×刨花润楠混交模式)的造林模式更有利于巨尾桉的生长。

关键词:巨尾桉;混交林;生长;土壤物理性质;土壤化学性质

Effects of different silvicultural patterns on the growth of Eucalyptus and soil physicochemical properties

Abstract: 【Objective】 To investigate the effects of different silvicultural modes on the growth of eucalyptus trees and soil physicochemical properties, and to explore the best mixed silvicultural mode. 【Method】 The growth indexes and soil physical and chemical properties of *Eucalyptus megacephalus* were measured and analyzed in three plantation models, namely, treatment 1 (*Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* pure forest), treatment 2 (*Eucalyptus grandis*×*E. urophylla*×*Machilus pauhoi* mixed model), and treatment 3 (*Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* × *Castanopsis hystrix* mixed model). 【Result】 The results showed that the companion species of *Machilus pauhoi* and *Castanopsis hystrix* had a significant effect on *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* tree height, diameter at breast height, volume of wood per plant and volume of stock. The tree height, diameter at breast height, volume of timber per plant and volume of standing stock of *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* in Treatment 2 (*Eucalyptus grandis*×*E. urophylla*×*Machilus pauhoi* mixed model) were 18.16%, 14.72%, 36.84% and 39.93% larger than those in Treatment 1 (*Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* pure forest), respectively, and the differences were all significant

项目基金: 广西自筹经费林业科技项目(桂林科研[2022ZC]第97号)。

*陈卫国为通讯作者。

($P < 0.05$, the same as below). The tree height, diameter at breast height, volume of wood per plant and volume of storage of *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* in treatment 3 (*Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* × *Castanopsis hystrix* mixed model) were 13.40%, 16.02%, 29.41% and 34.64% higher than that in treatment 1 (*Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* pure forest), and the differences were all significant. As the soil depth increased, the soil bulk density became larger, and the total soil porosity and soil capillary porosity became smaller. The soil capacity of *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* pure forest at different soil depths was greater than that of the other two hybrid models, and was the smallest in treatment 3 (*Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* × *Castanopsis hystrix* mixed model), while the total soil porosity, soil tubular porosity, and water holding capacity of *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* pure forest in the field were smaller than that of the other two hybrid models, and was the largest in treatment 3 (*Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* × *Castanopsis hystrix* mixed model). With the exception of treatment 3 (*Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* × *Castanopsis hystrix* mixed model), soil total nitrogen in the other model types showed an increasing trend with increasing soil depth, while soil quick nitrogen content, soil total phosphorus, total potassium, quick nitrogen, quick phosphorus, quick potassium, organic matter, effective copper, effective iron, effective zinc and effective boron showed a decreasing trend with increasing soil depth. The content of bulk and trace elements and organic matter in the soil was higher than that of *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* pure forest in all mixing patterns. With the exception of soil capacity, all indicators were positively correlated with *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* growth indicators, and some of them were significantly or very significantly positively correlated. 【 Conclusion 】 In summary, both mixing patterns can increase the growth of *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* and improve the soil quality, but from the point of view of growth indexes, the silvicultural pattern of treatment 2 (*Eucalyptus grandis*×*E. urophylla*×*Machilus pauhoi* mixed model) is more favorable to the growth of *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla*.

Key words: *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla*; mixed forests; growth; soil physical properties; soil chemical properties

桉树 (*Eucalyptus*) 为桃金娘科 (Myrtaceae) 的常绿树种, 是我国南方速生丰产的战略树种, 相较于其他造林树种, 具有显著的速生优势, 能在较短的时间成林 (祁述雄, 2002; 谢耀坚, 2003)。巨尾桉 (*Eucalyptus grandis*×*E. urophylla*) 是巨桉 (*Eucalyptus grandis*) 和尾叶桉 (*Eucalyptus urophylla*) 的杂交种, 具有父母本的杂交优势, 干形通直, 分枝高, 父本优势更为明显 (周宏愿, 2020)。桉树人工林已经成为广西森林资源的主要组成部分之一, 在国家木材供给方面发挥重要作用 (王豁然, 2010)。然而, 长期以来多以培育大面积的桉树纯林, 多代连栽的经营方式, 这种方式带来土壤肥力衰退、生物多样性下降、病虫害日益严重及生态不稳定等问题, 这对我国的木材安全和生态安全均产生负面影响 (于福可等, 2009; 温远光等, 2005; 王震洪等, 1998; 温远光等, 2019)。研究表明, 营建人工混交林, 不仅可以有效地丰富林分的层次结构, 提高土壤肥力, 促进生态平衡, 而且可以有效利用林内空间资源、改善林地环境, 从而提高林分生产力、稳定性和多样性 (Santos et al., 2017; 郭东强等, 2018; Maire et al., 2013)。如蒋林等 (2022) 研究发现, 与纯林相比, 不同的混交林的土壤有机质、全氮、全磷及全钾含量显著上升, 微量元素中铜和锌含量也显著上升。王磊等 (2022) 研究发现, 桉树与红锥 (*Castanopsis hystrix*) 混交能显著提高林下物种多样性, 维持灌草生物量平衡, 改善土壤质量, 有效提升桉树和伴生树种的生长量。因此, 探索适宜的伴生树种, 营建高质量的桉树混交林, 对促进桉树可持续发展具有重要意义。

选择伴生树种是营建混交林的关键环节, 不同的伴生树种的生长和生理特性与混交林的营林目的和效果息息相关。在选择伴生树种时, 应以乡土树种为主, 其具有适应性和抗逆性强等特点。刨花润楠 (*Machilus pauhoi*) 和红锥为均常绿乔木, 是我国主要乡土树种, 其具有生长快、适应性强和木材价值高等特点, 广泛分布于我国南方省份和地区 (吴振伙等, 2008; 朱细俭等, 2003; 张文元, 2016)。因此, 本研究选用刨花润楠和红锥作为伴生树种, 分别与巨尾桉进行混交后营建不同模式桉树人工混交林, 探讨不同混交模式下桉树的生长状况及土壤养分情况, 以期对桉树人工林的可持续发展提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验林概况

试验区布设于广西壮族自治区国有钦廉林场升平分场(108° 09′ —109° 13′ E, 21° 71′ —22° 19′ N), 为典型的亚热带季风气候, 气候特点为热量丰富、雨量充沛。该地年平均气温 22.6℃, 年均降雨量 1500—1800 mm。主要以山地和丘陵为主, 土壤为砖红壤活红色砖红壤, 平均土层厚度约 60 cm, 肥力中等。林下植物主要以茜草科、马鞭草科、禾本科及蕨类植物为主。

巨尾桉造林时间为 2017 年 6 月, 幼苗由广西八桂种苗高科技集团股份有限公司提供, 苗龄为 6 个月, 苗高为 30.00—35.00 cm、地径为 0.15—0.20 cm。混交树种刨花润楠和红锥造林时间为 2019 年 9 月, 幼苗均由广西国有钦廉林场林科所苗圃提供, 苗龄均为 2 年, 刨花润楠苗高为 50—65 cm, 地径为 0.60—0.75 cm, 红锥苗高为 40.00—55.00 cm, 地径为 0.40—0.50 cm。试验林中的巨尾桉株行距 3 m×3 m, 混交树种的株行距均为 2 m×3 m。巨尾桉混交模式中均采用带状的整地方式。栽植后, 每年施肥一次, 除草视情况而定。

1.2 样地设置

在处理 1(巨尾桉纯林)、处理 2(巨尾桉×刨花润楠混交模式)、处理 3(巨尾桉×红锥混交模式)选取地形、土壤及光照等自然环境条件基本一致的典型区域, 各设立 3 个 20 m×20 m 的标准样地(间隔>20 m), 即每种模式设 3 个重复, 共 9 个标准样地。

1.3 生长量调查

2023 年 11 月中旬, 在桉树纯林和每个桉树混交模式中 3 个 20 m×20 m 的样地进行调查。

(1) 胸径: 巨尾桉用胸径尺测量, 精度 0.1 cm。

(2) 树高: 巨尾桉用激光测高仪测量, 精度 0.1 m。

(3) 单株材积: 对样地内的每株巨尾桉进行生长量调查, 用激光测高仪测量树高、胸径尺测量胸径, 按公式①计算巨尾桉的单株材积(莫晓勇等, 2005):

$$V=0.62876 \times 10^{-4} \times D^{1.821621} \times H^{0.96436} \quad (1)$$

式中, V 为单株材积 (m^3), D 为胸径 (cm), H 为树高 (m)。

(4) 林分蓄积量: $V \times$ 林木保留株数。

1.4 土壤理化性质测定

采样: 在各种植模式中的 3 个 20 m×20 m 样地, 在各个样地四角及中心设采样点, 共 5 个, 去除表层中的杂草和枯枝落叶等杂物, 挖掘土壤剖面, 剖面深度为 60 cm, 宽 50 cm, 按土壤 20 cm、40 cm 分层进行采样, 使用环刀先采集下层土壤, 再采上层, 放入封口袋后编号取回。测完土壤物理性质后, 将所有土样自然风干后, 过筛, 用封口袋保存, 用于土壤全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、有机质、有效铜、有效铁、有效锌及有效硼含量等化学性质的测定。

(1) 物理性质的测定: 参照王毓靖(2023)的测定方法, 测定土壤容重、土壤总孔隙度、土壤毛细孔隙度、非毛细孔隙度、田间持水量, 其中非毛细孔隙度=土壤总孔隙度—土壤毛细孔隙度。

(2) 化学性质的测定: 土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定; 全磷含量用碱熔-钼锑抗分光光度法测定; 全钾含量用硝酸-高氯酸消煮, 火焰光度计法测定; 速效氮含量用碱解扩散法测定; 速效磷含量用 HCl-HF 浸提, 酶标仪测定; 速效钾用四苯硼钠浸提, 酶标仪测定; 有机质测定用重铬酸钾-硫酸溶液氧化, 外加热法测定; 有效铜、有效铁含量用原子吸收分光光度法测定; 有效锌含量用二乙三胺五乙酸(DTPA)浸提法测定; 有效硼含量采用沸水浸提, 提取液用 EDTA 消除铁、铝干扰, 用高锰酸钾消退有机质的颜色后, 在弱酸性条件下以甲亚胺-H 比色法测定提取液中的硼量。

1.5 数据处理与分析

试验数据用 Excel2010 整理统计, 用 SPSS27.0 进行数据单因素方差分析、多重比较及相关性分析, 采用 Origin2022 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同模式类型桉树的生长量

由表 1 可知，伴生树种刨花润楠和红锥对巨尾桉的树高、胸径、单株材积和蓄积量均有显著的促进作用。通过方差分析和多重比较可知，处理 2（巨尾桉×刨花润楠模式）中巨尾桉的树高、胸径、单株材积和蓄积量分别较处理 1（巨尾桉纯林）大 18.16%、14.72%、36.84%和 39.93%，均差异显著（ $P<0.05$ ）。处理 3（巨尾桉×红锥混交模式）中巨尾桉的树高、胸径、单株材积和蓄积量分别较处理 1（巨尾桉纯林）高 13.40%、16.02%、29.41%和 34.64%，均差异显著（ $P<0.05$ ）。处理 2（巨尾桉×刨花润楠模式）中巨尾桉的树高、胸径、单株材积和蓄积量较处理 3（巨尾桉×红锥混交模式）的巨尾桉无显著差异（ $P>0.05$ ）。

表 1 不同模式类型桉树的生长量（均值±标准差）^①

Table 1 Growth of eucalyptus trees in different model types (Mean ± SD)

处理	树高	胸径	单株材积	蓄积量
Treatment	Tree height/m	Diameter of chest/cm	Volume of timber per plant/m ³	Storage capacity/ (m ³ ·hm ⁻²)
处理 1 Treatment1	15.77±1.02 ^b	12.63±0.27 ^b	0.12±0.02 ^b	127.76±16.98 ^b
处理 2 Treatment2	19.27±0.49 ^a	14.81±0.58 ^a	0.19±0.01 ^a	212.68±13.22 ^a
处理 3 Treatment3	18.21±1.20 ^a	15.04±0.95 ^a	0.17±0.03 ^a	195.46±33.50 ^a

①不同小写字母表示同列各模式类型之间差异显著($P<0.05$)，处理 1 为巨尾桉纯林，处理 2 为巨尾桉×刨花润楠混交模式，处理 3 为巨尾桉×红锥混交模式，下同。 Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among the pattern types in the same column, Treatment 1 is *Eucalyptus grandis*×*E.urophylla* pure forest, treatment 2 is *Eucalyptus grandis*×*E.urophylla*×*Machilus pauhoi* mixed model, and treatment 3 is *Eucalyptus grandis*×*E.urophylla* × *Castanopsis hystrix* mixed model, the same as below.

2.2 不同模式类型的土壤物理性质差异性分析

由表 2 可知，3 种模式类型的土壤容重均介于 1.48~1.70 g·cm⁻³，随着土层深度的增加，土壤容重变大。不同土层深度的巨尾桉纯林的土壤容重均大于其他 2 个混交林，在土层深度为 20 cm 时，处理 2（巨尾桉×刨花润楠混交模式）的土壤容重较处理 1（巨尾桉纯林）减小了 0.60%，差异不显著、处理 3（巨尾桉×红锥混交模式）的土壤容重较处理 1（巨尾桉纯林）减小了 8.07%，差异显著，在土层深度为 40 cm 时，处理 2（巨尾桉×刨花润楠混交模式）的土壤容重较处理 1（巨尾桉纯林）减小了 1.10%，差异不显著、处理 3（巨尾桉×红锥混交模式）的土壤容重较处理 1（巨尾桉纯林）减小了 7.05%，差异显著。

土壤总孔隙度随着土层的增加，呈减小趋势，在土层深度为 20cm 时，处理 2（巨尾桉×刨花润楠混交模式）的土壤总孔隙度较处理 1（巨尾桉纯林）增大了 7.93%，差异不显著，处理 3（巨尾桉×红锥混交模式）的土壤总孔隙度较处理 1（巨尾桉纯林）增大了 17.69%，差异显著，土层深度为 40 cm 时，各模式类型的土壤总孔隙度之间差异显著。各模式类型的土壤毛管孔隙度表现的规律均是随着土层深度的增加而减小，变化趋势与土壤总孔隙度相同。在土层深度 20 cm 时，各模式类型的非毛管孔隙度之间无显著性差异。在土层深度为 40 cm 时，处理 3（巨尾桉×红锥混交模式）的非毛管孔隙度最大，较处理 1（巨尾桉纯林）、处理 2（巨尾桉×刨花润楠混交模式）差异显著。

田间持水量是植物可利用的最高土壤水分含量。在土层深度为 20 cm 时，处理 2（巨尾桉×刨花润楠混交模式）的田间持水量最大，但与其他模式无显著差异，在土层深度为 40 cm 时，处理 3（巨尾桉×红锥混交模式）的田间持水量最大，较处理 1（巨尾桉纯林）增大了 18.63%，差异显著。

表 2 不同模式类型的土壤物理性质^①

Table 2 Soil physical properties of different model types

处理	土层	土壤容重	土壤总孔隙度	土壤毛管孔隙度	非毛管孔隙度	田间持水量
Treatment	Layer of soil	Soil capacity/(g·cm ⁻³)	Total soil porosity (%)	Soil capillary porosity (%)	Non-capillary porosity (%)	Field water holding capacity (%)
处理 1 Treatment1	20cm	1.61±0.15 ^a	37.40±1.64 ^b	26.41±1.79 ^b	10.99±1.28 ^a	6.91±1.37 ^a
	40cm	1.70±0.05 ^A	28.92±5.36 ^C	17.49±6.06 ^C	11.43±1.29 ^A	6.55±1.02 ^B
处理 2 Treatment2	20cm	1.60±0.08 ^{ab}	40.62±5.72 ^b	28.90±5.32 ^b	11.72±0.66 ^a	7.31±0.59 ^a
	40cm	1.68±0.07 ^A	38.14±4.48 ^B	25.36±4.17 ^B	12.78±2.21 ^A	7.35±0.88 ^{AB}
处理 3 Treatment3	20cm	1.48±0.04 ^b	45.44±2.98 ^a	35.68±4.51 ^a	9.75±2.64 ^a	7.00±1.43 ^a
	40cm	1.58±0.08 ^B	43.41±2.04 ^A	34.98±3.53 ^A	8.43±2.21 ^B	8.05±1.14 ^A

①不同小写字母表示同列各模式类型 20cm 土层之间差异显著($P<0.05$), 不同大写字母表示同列各模式类型 40cm 土层之间差异显著($P<0.05$), 下同。Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) between the 20cm soil layers of each model type in the same column, and different capital letters indicate significant differences ($P<0.05$) between the 40cm soil layers of each model type in the same column, the same as below.

2.3 不同模式类型的土壤化学性质的差异性分析

2.3.1 土壤大量元素及有机质含量 由表 3 可知, 除了处理 3 (巨尾桉×红锥混交模式) 外, 其他模式类型的土壤全氮随着土层深度的增加, 呈上升趋势, 而土壤速效氮含量呈下降趋势。在土层深度为 20cm 时, 处理 3 (巨尾桉×红锥混交模式) 的土壤全氮含量和土壤速效氮含量最高, 处理 1 (巨尾桉纯林) 最低, 处理 3 (巨尾桉×红锥混交模式) 的土壤全氮含量和土壤速效氮含量分别较处理 1 (巨尾桉纯林) 增加了 47.62%、45.78%, 差异显著。在土层深度为 40cm 时, 不同模式类型之间的土壤全氮含量无显著差异, 而不同模式类型之间的土壤速效氮含量差异显著, 处理 3 (巨尾桉×红锥混交模式) 的土壤速效氮含量最高, 处理 1 (巨尾桉纯林) 最低。

各个处理的土壤全磷含量随着土层深度的增加, 呈下降趋势, 土壤速效磷也呈相似的规律。在土层深度为 20cm 时, 处理 2 (巨尾桉×刨花润楠混交模式) 的土壤全磷含量和土壤速效磷含量最高, 处理 1 (巨尾桉纯林) 最低, 处理 2 (巨尾桉×刨花润楠混交模式) 的土壤全磷含量和土壤速效磷含量分别较处理 1 (巨尾桉纯林) 增加了 27.85%、7.18%, 差异显著。在土层深度为 40cm 时, 不同模式类型之间的土壤全磷含量、土壤速效磷含量差异显著, 处理 2 (巨尾桉×刨花润楠混交模式) 的土壤全磷含量最高, 处理 1 (巨尾桉纯林) 最低, 处理 1 (巨尾桉纯林) 最高, 处理 3 (巨尾桉×红锥混交模式) 的土壤速效磷最低。

各个处理的土壤全钾含量、土壤速效钾含量随着土层深度的增加, 呈下降趋势。处理 2 (巨尾桉×刨花润楠混交模式) 的土壤全钾含量在 2 个土层深度均为最大, 土层深度为 20cm、40cm 的土壤全钾含量分别较处理 1 (巨尾桉纯林) 增加了 20.63%、26.67%, 差异显著。处理 3 (巨尾桉×红锥混交模式) 的土壤速效钾含量在 2 个土层深度均为最大, 土层深度为 20cm、40cm 的土壤速效钾含量分别较处理 1 (巨尾桉纯林) 增加了 30.98%、5.36%, 差异显著。

各个处理的土壤有机质含量随着土层深度的增加, 呈现出减小的趋势。处理 2 (巨尾桉×刨花润楠混交模式) 的土壤有机质含量在 2 个土层深度均为最大, 土层深度为 20cm、40cm 的土壤有机质分别较处理 1 (巨尾桉纯林) 增加了 14.26%、17.65%, 差异显著。

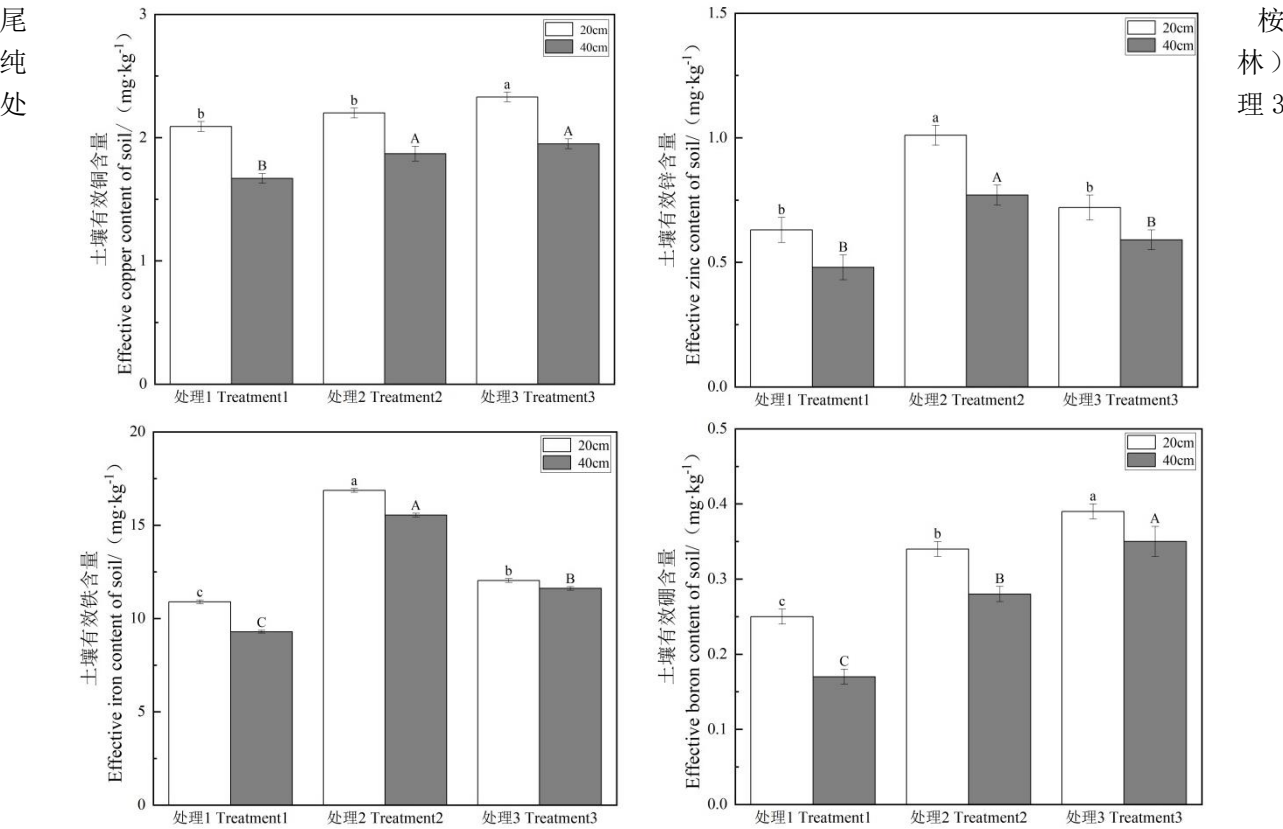
表 3 土壤大量元素及有机质含量

Table 3 Soil massive elements and organic matter content

处理	土层	全氮含量 Tot	全磷含量	全钾含	速效氮含	速效磷含量	速效钾含量 Q	有机质含量
Treatm	Layer	al N content/(	Total P conte	量	量 Quick-actin	Quick-acting P	uick-acting K cont	Organic ma
ent	of soi	g·kg ⁻¹)	nt/(mg·kg ⁻¹)	Total K co	g N content /	content/(μg·g ⁻¹)	ent/(mg·kg ⁻¹)	tter content/(
	l			ntent (%)	(mg·kg ⁻¹)			g·kg ⁻¹)
处理 1 Treatment1	20cm	0.44±0.01 ^c	373.44±3.24 ^c	1.00±0.01 ^c	26.54±1.40 ^c	3.23±0.09 ^b	36.74±1.85 ^b	11.36±0.34 ^b
	40cm	0.50±0.01 ^A	355.44±4.94 ^C	0.88±0.03 ^B	20.72±1.40 ^B	3.78±0.08 ^A	35.52±0.25 ^B	10.03±0.20 ^C
处理 2 Treatment2	20cm	0.50±0.01 ^b	517.61±4.95 ^a	1.26±0.01 ^a	30.61±1.39 ^b	3.48±0.02 ^a	52.25±0.46 ^a	13.25±0.31 ^a
	40cm	0.52±0.01 ^A	449.09±3.22 ^A	1.20±0.01 ^A	20.81±1.38 ^B	3.30±0.04 ^B	36.63±0.73 ^{AB}	12.18±0.17 ^A
处理 3 Treatment3	20cm	0.84±0.01 ^a	471.53±4.93 ^b	1.19±0.02 ^b	48.95±1.40 ^a	3.47±0.07 ^a	53.23±0.38 ^a	12.26±0.64 ^{ab}
	40cm	0.51±0.01 ^A	435.67±3.22 ^B	0.90±0.01 ^B	25.04±1.39 ^A	3.08±0.05 ^C	37.53±0.35 ^A	11.67±0.17 ^B

2.3.2 土壤微量元素含量 由图 1 可知，各处理的土壤有效铜、锌、铁、硼含量随着土层深度的增加，呈下降趋势。在土层深度为 20cm 时，处理 3（巨尾桉×红锥混交模式）的土壤有效铜、硼含量最高，处理 1（巨尾桉纯林）的最低，分别较处理 1（巨尾桉纯林）增加了 10.30%、35.90%，差异显著，在土层深度为 40cm 时，土壤有效铜、硼含量与土层深度为 20cm 的呈现相同的规律。

在土层深度为 20cm 时，处理 2（巨尾桉×刨花润楠混交模式）的土壤有效锌含量最高，较处理 1（巨



（巨尾桉×红锥混交模式）分别增加了 37.62%、28.71%，差异显著。在土层深度为 40cm 时，处理 2（巨尾桉×刨花润楠混交模式）的土壤有效锌含量最高，较处理 1（巨尾桉纯林）增加了 37.66%，差异显著。在土层深度为 20cm 时，处理 2（巨尾桉×刨花润楠混交模式）的土壤有效铁含量最高，较处理 1（巨尾桉纯林）增加了 35.41%，差异显著。在土层深度为 40cm 时，处理 2（巨尾桉×刨花润楠混交模式）的土壤有效铁含量最高，较处理 1（巨尾桉纯林）增加了 40.22%，差异显著。

图 1 土壤微量元素含量

Fig. 1 Soil micronutrient content

不同小写字母表示各模式类型在 20cm 土层之间差异显著($P<0.05$)，不同大写字母表示各模式类型在 40cm 土层之间差异显著($P<0.05$)。Different lowercase letters indicate significant ($P<0.05$) differences between pattern types in the 20 cm soil layer, and different uppercase letters indicate significant ($P<0.05$) differences between pattern types in the 40 cm soil layer.

2.4 部分指标相关性分析

表 4 中土壤的理化性质的各项指标的数据为土层深度为 20cm 时的土样测定的数据。由表可知，在生长量指标中，树高（X1）与胸径（X2）之间呈显著正相关（ $P<0.05$ ，下同），树高（X1）与单株材积（X3）呈极显著正相关（ $P<0.01$ ，下同）。说明树高、胸径和单株材积的生长是呈现出相互促进、相辅相成的效果。土壤物理性质中的土壤容重（X4）与各生长指标呈负相关，但差异不显著，土壤总孔隙度（X5）、田间持水量（X6）与各生长指标呈正相关。说明土壤容重越大越不利于林木的生长。土壤化学性质中大量元素中的土壤全氮（X7）、全磷（X8）、全钾（X9）、速效氮（X10）、速效磷（X11）和速效钾（X12）的含量与生长指标均呈正相关，其中土壤全磷含量（X8）、土壤全钾含量（X9）、土壤速效磷含量（X11）、土壤速效钾含量（X12）与各生长指标呈显著或极显著正相关，表明土壤中大量元素含量较高时有利于林木的生长。土壤有机质含量（X13）与生长指标的树高与单株材积呈显著正相关。土壤化学性质中微量元素中土壤有效铜含量（X14）、土壤有效锌含量（X15）、土壤有效铁含量（X16）、土壤有效硼含量（X17）与生长指标之间呈正相关，其中土壤有效硼含量（X17）与胸径（X2）之间呈显著正相关，表明土壤中的微量元素可促进林木生长。

表 4 部分指标相关性分析^①

Table 4 Correlation analysis of selected indicators

	X X X X X X X X X X X X X X X X X X																
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	9	0	11	12	13	14	5	16	17
X1	1																
X2	0.93*	1															
X3	1.00**	0.93*	1														
X4	-0.29	-0.63	-0.31	1													
X5	0.59	0.85	0.61	-0.94*	1												
X6	0.86	0.61	0.85	0.24	0.10	1											
X7	0.35	0.68	0.37	-0.99*	0.96*	-0.17	1										
X8	1.00**	0.92*	0.99*	-0.27	0.58	0.87	0.34	1									
X9	0.99*	0.94*	1.00**	-0.32	0.62	0.84	0.39	0.99*	1								
X10	0.38	0.70	0.40	-0.99*	0.97*	-0.14	0.99*	0.37	0.42	1							
X11	0.97*	0.99*	0.97*	-0.53	0.78	0.70	0.59	0.96*	0.97*	0.61	1						
X12	0.94*	0.99*	0.95*	-0.60	0.83	0.63	0.66	0.93*	0.95*	0.68	0.99*	1					
X13	0.97*	0.80	0.96*	-0.04	0.37	0.96*	0.11	0.97*	0.96*	0.14	0.87	0.82	1				
X14	0.64	0.89	0.66	-0.92*	0.99*	0.17	0.94*	0.69	0.67	0.95*	0.82	0.89	0.43	1			
X15	0.87	0.62	0.86	0.22	0.11	1.00**	-0.16	0.88	0.85	-0.12	0.71	0.64	0.96*	0.18	1		
X16	0.84	0.58	0.83	0.27	0.07	0.99*	-0.20	0.85	0.82	-0.17	0.67	0.61	0.95*	0.13	0.99*	1	
X17	0.79	0.96*	0.80	-0.82	0.96*	0.37	0.85	0.78	0.81	0.87	0.92*	0.95*	0.61	0.98*	0.38	0.34	1

①**. 在 0.05 级别（双尾），相关性显著，**. 在 0.01 级别（双尾），相关性极显著。X1-树高、X2-胸径，X3-单株材积量，X4-土壤容重、X5

-土壤总孔隙度、X6-田间持水量、X7-土壤全氮含量、X8-土壤全磷含量、X9-土壤全钾含量、X10-土壤速效氮含量、X11-土壤速效磷含量、X12-土壤速效钾含量、X13-土壤有机质含量、X14-土壤有效铜含量、X15-土壤有效锌含量、X16-土壤有效铁含量、X17-土壤有效硼含量。 **。 Correlations are significant at the 0.01 level (two-tailed), **. At 0.01 level (two-tailed), the correlation is significant. X1-tree height, X2-breast diameter, X3-timber volume per plant, X4-soil bulk weight, X5-total soil porosity, X6-field water holding capacity, X7-soil total nitrogen content, X8-soil total phosphorus content, X9-soil total potassium content, X10-soil quick nitrogen content, X11-soil quick phosphorus content, X12-soil quick potassium content, X13-soil organic matter content, X14-soil effective copper content, X15-soil effective zinc content, X16-soil effective iron content, X17-soil effective boron content.

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 不同模式类型对桉树生长量的影响 混交模式有助于调节林下气候环境、增强林木光能利用率,从而促进林木生长(叶绍明等,2008)。本研究中,伴生树种刨花润楠和红锥对巨尾桉的树高、胸径、单株材积和蓄积量均有显著的促进作用。何林骏(2020)研究发现桉树与红锥混交可促进桉树生长,与本研究结果基本一致,这可能是因为桉树的速生优势显著,能与伴生树种形成复层林结构,这可调节林地的光照环境,丰富林下植物多样性及改善林地土壤环境。处理2(巨尾桉×刨花润楠模式)中巨尾桉的树高、单株材积和蓄积量均大于处理3(巨尾桉×红锥混交模式),而胸径小于处理3(巨尾桉×红锥混交模式),可能是因为处理3(巨尾桉×红锥混交模式)中水平空间资源较大,减缓了树种之间水平空间资源的竞争效应,从而有利于巨尾桉胸径的生长,这结果与林婉奇等(2019)研究香樟(*Cinnamomum camphora*)的结果相似。

3.1.2 不同模式类型对林下土壤物理性质的影响 前人研究表明,营造混交林能显著降低土壤容重,提高土壤孔隙度、田间持水量等,改善了土壤物理性质(赵燕波等,2015)。随着土层深度的增加,土壤容重变大,土壤总孔隙度和土壤毛管孔隙度变小。不同土层深度的巨尾桉纯林的土壤容重均大于其他2个混交模式,处理3(巨尾桉×红锥混交模式)中最小,而巨尾桉纯林的土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度和田间持水量均小于其他2个混交模式,处理3(巨尾桉×红锥混交模式)最大。说明混交林的土壤具有较好的疏松度,土壤通气度良好,水分充足,与雷定战(2018)研究松树(*Pinus*)与桉树混交的结果相似。这可能是因为合理的混交模式改善了林分空间结构,丰富了林下植物多样性,土壤中的根系数量不断增大,土壤受到根系的挤压穿插,减小土壤的板结程度,降低了土壤容重,增加了土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度和田间持水量。

3.1.3 不同模式类型对林下土壤化学性质的影响 氮、磷、钾是植物生长发育必须营养的大量元素,是体内多种物质的重要组成部分,在植物体内的代谢过程起着至关重要的作用(柴楠,2008)。本研究,除了处理3(巨尾桉×红锥混交模式)外,其他模式类型的土壤全氮随着土层深度的增加,呈上升趋势,而土壤速效氮含量、土壤全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾及有机质随着土层增加呈下降趋势,与欧军等(2023)研究结果具有一定的相似性。这可能是因为土层深度较浅时,微生物比较活跃能将表层的动物的遗体及凋落物快速分解,使土壤中养分含量增加。各个混交模式的土壤中大量元素及有机质含量均高于巨尾桉纯林,与王磊等(2022)人研究结果相似,这可能是因为混交林改变凋落物的数量与质量,通过光照、温湿度等环境因素加快分解速率,增加养分的归还量。微量元素铜、铁、锌和硼等元素在土壤中含量较低,但这些元素对植物生命的重要性并不亚于大量元素(李海峰等,2012)。本研究中,各处理的土壤有效铜、锌、铁、硼含量随着土层深度的增加,呈下降趋势,各个混交模式的土壤微量元素有效铜、有效铁、有效锌和有效硼含量均高于巨尾桉纯林,与曾珠等(2022)研究结果相同。一方面可能是因为不同树种对土壤中微量元素的需求量不同,导致土壤中有效铜、有效铁、有效锌和有效硼含量各有不同,另一方面是不同树种的凋落物中含有的微量元素有差异性,凋落物分解后,回归的含量不一致。

3.1 结论

伴生树种刨花润楠和红锥对巨尾桉的树高、胸径、单株材积和蓄积量均有显著的促进作用。处理2(巨尾桉×刨花润楠混交模式)中巨尾桉的树高、单株材积和蓄积量分别较处理3(巨尾桉×红锥混交模式)

大。随着土层深度的增加,土壤容重变大,土壤总孔隙度和土壤毛管孔隙度变小。不同土层深度的巨尾桉纯林的土壤容重均大于其他 2 个混交模式,而巨尾桉纯林的土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度和田间持水量均小于其他 2 个混交模式。除了处理 3 (巨尾桉×红锥混交模式)外,其他模式类型的土壤全氮随着土层深度的增加,呈上升趋势,而土壤速效氮含量、土壤全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、有机质、有效铜、有效铁、有效锌及有效硼随着土层增加呈下降趋势。各个混交模式的土壤中大量、微量元素及有机质含量均高于巨尾桉纯林。除了土壤容重外,各项指标与巨尾桉生长指标均呈正相关,部分指标呈显著或极显著正相关。综上所述,两种混交模式均可提高巨尾桉的生长量、提高土壤水分和养分含量、减小土壤板结程度,从而改善土壤质量,但从生长指标来看,处理 2 (巨尾桉×刨花润楠混交模式)的造林模式更有利于巨尾桉的生长。

参 考 文 献

- 祁述雄. 2002. 中国桉树. 第 2 版. 北京: 中国林业出版社.
- (Qi, S X. 2002. *Eucalyptus in China*. 2nd edition. Beijing: China Forestry Press. [in Chinese])
- 谢耀坚. 2003. 中国桉树人工林可持续经营战略初探. 世界林业研究, (05):59-64.
- (Xie Y J. 2003. A preliminary study of sustainable management strategies for eucalyptus plantations in China. *World Forestry Research*, (05):59-64. [in Chinese])
- 周弘愿. 2020. 桂西南巨尾桉人工林凋落物量及养分动态特征. 南宁: 广西大学.
- (Zhou H Y. 2020. Characteristics of apoplastic volume and nutrient dynamics in *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* plantation forests in southwestern Guangxi. Nanning: Guangxi University. [in Chinese])
- 王豁然. 2010. 桉树生物学概论. 北京: 科学出版社.
- (Wang, H R. 2010. *Introduction to Eucalyptus Biology*. Beijing: Science Press. [in Chinese])
- 于福科, 黄新会, 王克勤等. 2009. 桉树人工林生态退化与恢复研究进展. 中国生态农业学报, 17(02):393-398.
- (Yu F K, Huang X H, Wang K Q, et al. 2009. Progress in ecological degradation and restoration of *Eucalyptus* plantation forests. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 17(02):393-398. [in Chinese])
- 温远光, 刘世荣, 陈放等. 2005. 桉树工业人工林植物物种多样性及动态研究. 北京林业大学学报, (04):17-22.
- (Wen Y G, Liu S R, Chen F et al. 2005. Plant species diversity and dynamics in *Eucalyptus* industrial plantation forests. *Journal of Beijing Forestry University*, (04):17-22. [in Chinese])
- 王震洪, 段昌群, 起联春等. 1998. 我国桉树林发展中的生态问题探讨. 生态学杂志, (06):65-69+56.
- (Wang Z H, Duan C Q, Qi L C et al. 1998. Discussion on ecological problems in the development of *eucalyptus* forests in China. *Journal of Ecology*, (06):65-69+56. [in Chinese])
- 温远光, 周晓果, 朱宏光等. 2019. 桉树生态营林的理论探索与实践. 广西科学, 26(02):159-175+252.
- (Wen Y G, Zhou X G, Zhu H G et al. 2019. Theoretical exploration and practice of *eucalyptus* ecological camping. *Guangxi Science*, 26(02):159-175+252. [in Chinese])
- Santos F M, Chaer G M, Diniz A R, et al. 2017. Nutrient cycling over five years of mixed-species plantations of *Eucalyptus* and *Acacia* on a sandy tropical soil. *Forest Ecology and Management*, 384:110-121.
- 郭东强, 卢陆峰, 邓紫宇等. 2018. 我国桉树混交林研究进展. 桉树科技, 35(04):27-32.
- (Guo D Q, Lu F, Deng Z Y et al. 2018. Progress of research on *Eucalyptus* mixed forests in China. *Eucalyptus Science and Technology*, 35(04):27-32. [in Chinese])
- Maire G L, Nouvellon Y, Christina M, et al. 2013. Tree and stand light use efficiencies over a full rotation of single- and mixed-species *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* plantations. *Forest Ecology and Management*, 288:31-42.
- 蒋林, 覃恒, 邓建英等. 2022. 不同树种和比例对桉树人工混交林土壤肥力质量的影响. 桉树科技, 39(02):9-14.
- (Jiang L, Qin H, Deng JY, et al. 2022. Effects of different tree species and proportions on soil fertility quality of *Eucalyptus* plantation mixed forests. *Eucalyptus Science and Technology*, 39(02):9-14. [in Chinese])
- 王磊, 温远光, 周晓果等. 2022. 尾巨桉与红锥混交对林下植被和土壤性质的影响. 生态环境学报, 31(07):1340-1349.
- (Wang L, Wen Y G, Zhou X G, et al. 2022. Effects of hybridization of *Eucalyptus Urophylla*× *E. grandis* and *Castanopsis hystrix* on understory vegetation and soil properties. *Journal of Ecological Environment*, 31(07):1340-1349. [in Chinese])

- 吴振伙,吴兆平,全尚龙. 2008.刨花润楠综合利用价值及其育苗技术.现代农业科技, (20):55.
- (Wu Z H, Wu Z P, Quan S L. 2008. Comprehensive utilization value of planed *Machilus pauhoi* and its seedling nursery technology. Modern Agricultural Science and Technology, (20):55. [in Chinese])
- 朱细俭,黄少锋,张志鸿. 2003.红锥混交林生长情况调查分析.广东林业科技, (04):46-48.
- (Zhu X J, Huang S F, Zhang Z H. 2003. Survey and analysis on the growth of red cone mixed forest. Guangdong Forestry Science and Technology, (04):46-48. [in Chinese])
- 张文元. 2016. 红锥与桉树混交造林试验.防护林科技, (06):28-30.
- (Zhang, W Y. 2016. Experiments on mixed forestation of *Castanopsis hystrix* and *Eucalyptus*. Protection Forest Science and Technology, (06):28-30. [in Chinese])
- 莫晓勇,余雪标,朱成庆,等. 2005.桉树人工林培育的理论和方法.北京:中国林业出版社.
- (Mo X Y, Yu X B, Zhu C Q, et al. 2005. Theories and methods of *Eucalyptus* plantation cultivation. Beijing: China Forestry Press. [in Chinese])
- 王毓靖. 2023. 桉树红锥纯林及混交林根系特征与土壤理化性质研究.长沙:中南林业科技大学.
- (Wang Y J. 2023. Research on root characteristics and soil physicochemical properties of *Eucalyptus Castanopsis hystrix* and mixed forests. Changsha: Central South Forestry University of Science and Technology. [in Chinese])
- 叶绍明,郑小贤,杨梅,等. 2008. 尾叶桉与马占相思人工复层林生物量及生产力研究.北京林业大学学报, (03):37-43.
- (Ye S M, Zheng X X, Yang M, et al. 2008. Biomass and productivity of *Eucalyptus urophylla* and *Acacia mangium* plantation forests. Journal of Beijing Forestry University, (03):37-43. [in Chinese])
- 何林骏. 2020. 桉树红锥大叶桉混交林生长规律及生产力研究.长沙:中南林业科技大学.
- (He L J. 2020. Research on the growth pattern and productivity of *Eucalyptus Castanopsis hystrix* and *Quercus griffithii* mixed forests. Changsha: Central South Forestry University of Science and Technology. [in Chinese])
- 林婉奇,蔡金桓,薛立. 2019. 不同密度樟树(*Cinnamomum camphora*)幼苗生长和叶片性状对氮磷添加的响应.生态学报, 39(18):6738-6744.
- (Lin W Q, Cai J H, Xue L. 2019. Growth and leaf traits of *Cinnamomum camphora* seedlings at different densities in response to nitrogen and phosphorus additions. Journal of Ecology, 39(18):6738-6744. [in Chinese])
- 赵燕波,纪托未,张丹桔,等. 2015. 3个树种与巨桉混交土壤理化性质、凋落物量和养分含量特征.应用与环境生物学报, 21(05):948-953.
- (Zhao Y B, Ji T W, Zhang D J, et al. 2015. Characteristics of physicochemical properties, apoplastic volume and nutrient content of soil mixed with *Eucalyptus grandis* by three tree species. Journal of Applied and Environmental Biology, 21(05):948-953. [in Chinese])
- 雷定战. 2018. 不同松桉混交模式对林分生长和土壤理化性质的影响.南宁:广西大学.
- (Lei D Z. 2018. Effects of different *Pinus* and *Eucalyptus* hybridization patterns on forest growth and soil physicochemical properties. Nanning:Guangxi University. [in Chinese])
- 柴楠. 2008. 克拉玛依中心城区土壤养分状况系统研究及施肥指标的建立.乌鲁木齐:新疆农业大学.
- (Chai, N. 2008. Systematic study of soil nutrient status and establishment of fertilization indexes in the central city of Karamay. Wulumuqi: Xinjiang Agricultural University. [in Chinese])
- 欧军,郑伟,付军,等. 2023. 桂西南桉树林下套种阔叶树种对土壤肥力的影响.亚热带农业研究, 19(04):241-246.
- (Ou J, Zheng W, Fu J, et al. 2023. Effect of *Eucalyptus* interplanted with understory broadleaved species on soil fertility in Southwest Guangxi. Research on subtropical agriculture, 19(04):241-246. [in Chinese])
- 李海峰,曾凡江,桂东伟,等. 2012. 不同利用强度下绿洲农田土壤微量元素有效含量特征.生态学报, 32(06):1803-1810.
- (Li H F, Zeng F J, Gui D W, et al. 2012. Characterization of effective micronutrient contents in oasis farmland soils under different utilization intensities. Journal of Ecology, 32(06):1803-1810. [in Chinese])
- [27]曾珠,毛纯,李万年,等. 2022.林分改造对桉树人工林土壤微量元素的影响.森林与环境学报, 42(03):253-261.
- (Zeng Z, Mao C, Li W N, et al. 2022. Effects of forest conversion on soil trace elements in *Eucalyptus* plantations. Journal of Forest and Environment, 42(03):253-261. [in Chinese])