

海南热带雨林国家公园不同海拔桉树人工林土壤-微生物碳氮磷特征

张学丰¹, 余雪标¹, 余慧霖¹, 黄 海², 陈海辉², 张建龙¹, 陈佳欣¹, 韦建杏^{2*}

1. 海南大学热带农林学院, 海南海口 570228; 2. 海南省林业科学研究院(海南省红树林研究院), 海南海口 571100

摘 要: 为探究海南热带雨林国家公园不同海拔梯度上桉树(*Eucalyptus*)人工林土壤-微生物碳氮磷特征, 以五指山片区不同海拔(500、700、900 m)的典型桉树人工林为研究对象, 以同海拔天然次生林作为对照。研究表明:(1)桉树人工林土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)含量随海拔升高呈逐渐上升的趋势, 全磷(TP)含量随海拔升高呈逐渐下降的变化规律, 变化范围分别为13.16~13.58、0.93~1.15、0.17~0.19 g/kg, SOC、TP含量低于天然次生林, 并且SOC、TN、TP含量低于全国森林平均值。(2)桉树人工林土壤微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)含量随海拔升高呈逐渐上升的趋势, 而微生物量磷(MBP)含量随海拔升高呈下降趋势, 变化范围分别为237.46~398.26、23.04~30.74、4.77~9.59 mg/kg, 且与TP呈极显著正相关关系($P<0.01$)。与同海拔天然次生林均无显著差异。(3)桉树人工林土壤MBC/MBN、MBC/MBP、MBN/MBP均随海拔升高呈逐渐上升的趋势, 比值变化范围分别为9.05~13.17、24.73~80.99、2.76~6.60。500 m处桉树人工林MBC/MBP、MBN/MBP与天然次生林有显著差异。(4)不同海拔桉树人工林土壤微生物熵碳(qMBC)、微生物熵氮(qMBN)、微生物熵磷(qMBP)的变幅为1.89%~3.34%、2.90%~3.23%、1.33%~5.41%。qMBC随海拔升高逐渐上升, 而qMBP随海拔的升高逐渐下降。桉树人工林土壤qMBC、qMBP高于天然次生林。土壤有机碳和全氮是影响其变化的关键因子。综上所述, 海拔梯度显著影响桉树人工林土壤-微生物碳、氮、磷含量及化学计量比。与同海拔的天然次生林相比, 桉树人工林土壤均表现出碳、磷含量的匮乏, 但提高了土壤碳、磷向微生物量碳、磷的转化效率。基于此, 海南热带雨林国家公园的桉树人工林应采取保留处理, 在后续的管理中应注重碳、磷元素养分的影响。

关键词: 海拔; 碳氮磷; 桉树人工林; 微生物熵

中图分类号: S792.39 文献标志码: A

Characteristics of Soil-Microbial Carbon, Nitrogen and Phosphorus in *Eucalyptus* Plantations at Different Altitudes in National Park of Hainan Tropical Rainforest.

ZHANG Xuefeng¹, YU Xuebiao¹, YU Huilin¹, HUANG Hai², CHEN Haihui², ZHANG Jianlong¹, CHEN Jiabin¹, WEI Jianxing^{2*}

1. College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Hainan Academy of Forestry (Hainan Mangrove Research Institute), Haikou, Hainan 571100, China

Abstract: The study was aimed to investigate the soil-microbial carbon, nitrogen and phosphorus characteristics of *Eucalyptus* plantations at different altitude gradients in Hainan Tropical Rainforest National Park. Typical *Eucalyptus* plantation forests at different altitudes (500 m, 700 m and 900 m) in Wuzhishan were used as the study object, and natural secondary forests at the same altitude were used as the control. Soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) content

收稿日期 2024-09-22; 接受日期 2024-10-31

基金项目 海南省重点研发项目(No. ZDYF2023SHFZ174)。

作者简介 张学丰(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 森林生态及森林培育学。*通信作者(Corresponding author): 韦建杏(WEI Jianxing), E-mail: 343451655@qq.com。

showed a gradual increase with elevation, and total phosphorus (TP) showed a gradual decrease. The range of variation was 13.16–13.58, 0.93–1.15, 0.17–0.19 g/kg, respectively, which was lower than the SOC and TN contents of natural secondary forests, and lower than the national average values of SOC, TN and TP contents of forests. The microbial biomass carbon (MBC) and microbial biomass nitrogen (MBN) showed a trend of gradual increase with elevation, and the microbial biomass phosphorus (MBP) content overall showed a decreasing trend with elevation, with the range of 237.46–398.26, 23.04–30.74, 4.77–9.59 mg/kg, respectively, and with the TP contents. TP showed highly significant positive correlation ($P < 0.01$). The differences were not significant compared with those of natural secondary forests at the same elevation. MBC/MBN, MBC/MBP and MBN/MBP all tended to increase with elevation, with ratios ranging from 9.05–13.17, 24.73–80.99 and 2.76–6.60. At 500 m, the MBC/MBP and MBN/MBP of the *Eucalyptus* plantation were significantly different from those of the natural secondary forest. The variation of microbial quotient carbon (qMBC), microbial quotient nitrogen (qMBN) and microbial quotient phosphorus (qMBP) at different elevations was 1.89%–3.34%, 2.90%–3.23% and 1.33%–5.41%, respectively. qMBC showed a gradual increase in elevation, and qMBP declined with the elevation. qMBC and qMBP were higher than those of natural secondary forests. qMBC and qMBP were higher than those of natural secondary forests. Soil organic carbon and total nitrogen were the key factors affecting the changes. In conclusion, the elevation gradient has a significant impact on the content and stoichiometric ratio of soil-microbial carbon, nitrogen, and phosphorus in *Eucalyptus* plantations. Compared with natural secondary forests at the same elevation, the soil of *Eucalyptus* plantations exhibited a deficiency in carbon and phosphorus contents, but enhanced the conversion efficiency of soil carbon and phosphorus to microbial biomass carbon and phosphorus. Based on this, the *Eucalyptus* plantations in the park should be conserved, and attention should be paid to the influence of carbon and phosphorus elements in the subsequent management.

Keywords: altitudes; carbon, nitrogen and phosphorus; *Eucalyptus* plantations; microbial quotient

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.03.024

土壤是森林生态系统中不可或缺的组成部分,是林木生长的载体^[1]。而土壤微生物作为土壤环境中的分解者,在维持土壤养分循环过程中起到关键作用。生态化学计量学的引入,将土壤-微生物的碳氮磷元素紧密联系在一起^[2],其中海拔梯度是驱使其变化的重要因素。随着海拔梯度增加,土壤与微生物均表现出明显的空间异质性特征^[3-4]。研究发现热带地区的土壤有机碳、总氮和总磷及其生态化学计量比均随海拔升高而增加^[5]。微生物量的变化可反映土壤能量转化和养分循环的微生物数量,并且在检测土壤有机碳、全氮和全磷变化前,表现出更显著的差异。微生物熵(microbial biomass quotient)反映了微生物对土壤的利用效率,这一指标多用于预测土壤养分库的细微变化、监测土壤退化程度以及评估恢复效果。在生态系统中,受海拔梯度、森林类型、土壤类型差异的影响,土壤与微生物指标的变化规律亦不同^[6]。因此,针对研究区典型的桉树人工林,探索土壤-微生物间的化学计量关系,对阐明桉树人工林土壤养分特征以及揭示土壤与微生物的养分平衡机制具有重要意义。

桉树具有速生、高产、可再生、用途广泛等特点^[7]。1917年引入海南并广泛种植^[8]。而近年来在桉树人工林经营过程中由于缺乏科学管理和规划,

大量的桉树人工林存在撂荒的现象^[9]。其中在海南热带雨林国家公园内仍保存有 14 448.73 hm² 的桉树人工林,约占该公园面积的 3.53%^[10]。总体分布于海拔 500~900 m 处,且位于生态区域比较重要的核心保护区或重要物种的连接地带,对热带雨林的分布及野生动物的栖息和扩散有较大的影响。此外,大面积桉树纯林的森林群落结构相对简单,对土壤养分的需求单一。若不采取人工干预使林分乔木层长期保持纯林状态,林下植被、土壤及微生物将受到严重的影响,森林生态系统抗性将持续下降。因此,通过探究桉树人工林土壤-微生物养分特征,为今后通过人工干预,提高国家公园森林群落多样性和生态系统稳定性,恢复热带雨林原真性提供科学参考依据。

目前,对海南岛桉树人工林的研究区域主要分布在海南热带雨林国家公园以外的区域,对公园内的桉树人工林鲜有研究,且集中于林下植被多样性及无性系研究方面^[11-12]。对桉树人工林土壤生态化学计量的研究虽有报道,但集中于林龄、器官方面,尚无土壤-微生物随海拔梯度变化的研究^[13-14]。本文以海南热带雨林国家公园不同海拔桉树人工林为研究对象,以同海拔天然次生林为对照,对土壤及土壤微生物取样测定,以揭示土

壤-微生物碳、氮、磷含量与生态化学计量特征的海拔特征,并探究土壤碳氮磷与土壤微生物量之间的关系。为后续海南热带雨林国家公园桉树人工林的经营和管理提供科学依据,并为人工林生态系统化学计量学研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于海南省海南热带雨林国家公园五指山片区(109°23'47"~109°49'31"E, 18°42'35"~18°59'42"N)。海拔 250~1867 m,属热带雨林气候^[15]。年平均气温 22.4℃,年活动积温 8166.2~8411.5℃,年平均相对湿度为 84%,旱季为 11 月至翌年 4 月,雨季为 5 月至 10 月,平均年降水量 1860 mm,总体随海拔升高而增加。土壤类型多样,土壤主要类型为山地黄壤和山地赤红壤,另有少量山地灌丛草甸土。

海拔 500 m 处的桉树人工林下主要优势物种为木姜子(*Litsea pungens*)、亮叶猴耳环(*Archidendron lucidum*)、藿香蓟(*Ageratum conyzoides*) , 次生林为三桠苦(*Melicope pteleifolia*)、亮叶猴耳环(*Archidendron lucidum*)、九节(*Psychotria asiatica*) ; 海拔 700 m 处的桉树人工林下主要优势物种为印度野牡丹(*Elastoma malabathricum*)、地毯草(*Axonopus compressus*)、飞机草(*Chromolaena odorata*) , 次生林为山石榴(*Catunaregam spinosa*)、三桠苦(*Melicope pteleifolia*)、越南山矾(*Symplocos cochinchinensis*) ; 海拔 900 m 处的桉树人工林下主要优势物种为绞股蓝(*Gynostemma pentaphyllum*)、飞机草、竹节草(*Chrysopogon aciculatus*) , 次生林为深绿卷柏(*Selaginella doederleinii*)、箬竹(*Indocalamus tessellatus*)、海南草珊瑚(*Sarcandra glabra*)。样地基本信息见表 1。

表 1 样地基本信息
Tab. 1 Basic information on sample plots

森林类型 Forest type	海拔 Altitude/m	平均气温 Average temperature/℃	平均降雨量 Average rainfall/mm	地理位置 Geographic location
桉树人工林	500	23.4	2400	109°21'58"E, 18°45'44"N
天然次生林				109°21'47"E, 18°45'44"N
桉树人工林	700	22.8	2470	109°31'56"E, 18°48'57"N
天然次生林				109°31'39"E, 18°49'14"N
桉树人工林	900	20.5	2530	109°35'23"E, 18°48'46"N
天然次生林				109°35'11"E, 18°48'31"N

1.2 方法

1.2.1 样品采集 选取海南热带雨林国家公园中部的五指山片区不同海拔的典型桉树人工林及同海拔天然次生林作为样地,按照立地条件一致原则,所选桉树人工林样地均已撂荒,无人工干预且初植密度基本一致。于 2024 年 4 月中旬进行土壤样品采集,在海拔 500~900 m 区间内设 3 个海拔梯度(500、700、900 m),每个海拔梯度设置 3 个 20 m×20 m 的桉树人工林样方(每个样方相隔 20 m 以上),并在周边设置 3 个天然次生林样方,共计 18 个样方。采样方法如下:(1)采用环刀法与随机取样法进行取样,在土坑深度 0~20 cm 处使用 100 cm³ 环刀取土并用自封袋取约 500 g 土样,用于测定土壤理化性质。(2)采用五点取样法,使用无菌自封袋对样方内深度 0~20 cm 土壤进行取样,约 100 g。将每个采样点的

土壤混合后分装 3 份,用于检测土壤微生物量。

1.2.2 项目测定 (1)土壤物理性质。采用(105±2)℃烘干法测定土壤含水率(SEC)、土壤容重(BD)、土壤总孔隙度(STP)^[16]。

(2)土壤化学性质。按照水:土=2.5:1 充分搅拌,采用玻璃电极法测定土壤 pH;采用高温外热 K₂Cr₂O₇ 氧化-容量法测定土壤有机碳(SOC);采用开氏-蒸馏滴定法测定土壤全氮(TN);采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮-钼锑抗比色法测定土壤全磷(TP)^[17]。

(3)土壤微生物量。采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法测定微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)^[18];采用氯仿熏蒸-NaHCO₃ 浸提法测定微生物量磷(MBP)^[19]。

1.3 数据处理

使用 SPSS 26.0 统计软件进行单因素方差分

析 (One-way ANOVA) 检验土壤微生物指标的差异, 并使用双因素方差分析法 (Two-way ANOVA) 分析不同海拔梯度与不同森林类型及其交互作用对土壤微生物量的影响。采用皮尔逊相关系数法 (Pearson correlation analysis) 分析土壤微生物量碳、氮、磷各指标间的相关性; 以土壤理化性质为解释变量, 土壤微生物量为响应变量进行冗余分析 (redundancy analysis); 使用 Origin 2021 与 Canoco Sofeware 5.0 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同海拔土壤理化性质

由表 2 可知, 不同海拔桉树人工林的土壤容重、含水率、总孔隙度均无显著差异, 变化范围分别为 1.36~1.45 g/cm³、23.57%~29.52%、32.14%~44.24%。同一海拔桉树人工林土壤容重均高于天然次生林, 且在 500 m 与 900 m 海拔处存在显著差异 ($P<0.05$)。天然次生林的土壤含水率与土壤总孔隙度均高于桉树人工林, 土壤含水率在 700 m 与 900 m 海拔处存在显著差异, 土壤总孔隙度在 500 m 处存在显著差异。说明海拔对桉树人工林土壤物理性质的影响较小, 而与研究区天然次生林相比, 桉树人工林的生长对土壤容重、含水量、总空隙度均产生显著影响。

桉树人工林土壤 pH 随海拔升高呈逐渐下降的趋势, 900 m 海拔处与其他海拔存在显著差异, 且同一海拔天然次生林土壤 pH 均高于桉树人工林并存在显著差异。说明随海拔上升桉树人工林土壤酸度升高, 且桉树生长会使土壤 pH 降低。桉树人工林土壤有机碳、全氮含量随海拔升高呈逐渐上升的趋势, 其中有机碳含量的范围为 13.16~13.58 g/kg, 桉树人工林土壤有机碳含量均低于同一海拔天然次生林并存在显著差异; 桉树人工林土壤全氮含量范围为 0.93~1.15 g/kg, 与同一海拔天然次生林无显著差异。桉树人工林土壤全磷含量随海拔升高呈逐渐下降的趋势, 含量范围为 0.17~0.19 g/kg, 均低于同一海拔天然次生林并存在显著差异 (表 2)。研究表明, 海拔差异仅对桉树人工林土壤 pH 产生显著影响。与研究区天然次生林相比, 桉树人工林的生长对土壤有机碳、全磷的需求较高, 导致土壤养分显著降低。

2.2 不同海拔土壤微生物量及化学计量特征

2.2.1 土壤微生物量特征 不同海拔桉树人工林

表 2 样地土壤理化性质
Tab. 2 Physical and chemical properties of sample soil

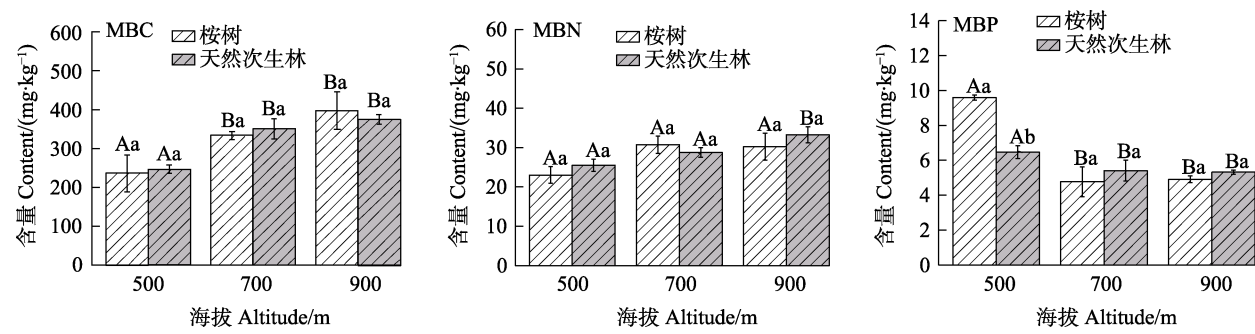
指标 Index	海拔 Altitude/m	桉树人工林 <i>Eucalyptus</i> plantation	天然次生林 Natural secondary forest
土壤容重/ (g·cm ⁻³)	500	1.45±0.09 ^{Aa}	1.11±0.1 ^{Ab}
	700	1.36±0.08 ^{Aa}	1.35±0.17 ^{Aa}
	900	1.42±0.12 ^{Aa}	1.25±0.03 ^{Ab}
土壤含水率/%	500	23.57±8.32 ^{Aa}	32.58±2.13 ^{Aa}
	700	29.52±1.27 ^{Aa}	39.57±13.50 ^{Ab}
	900	29.45±4.89 ^{Aa}	32.75±2.14 ^{Ab}
土壤总孔隙度/%	500	32.14±9.26 ^{Aa}	48.07±11.34 ^{Ab}
	700	39.45±1.68 ^{Aa}	47.22±11.71 ^{Aa}
	900	44.24±2.36 ^{Aa}	47.52±2.78 ^{Aa}
pH	500	4.33±0.06 ^{Aa}	4.90±0.07 ^{ABb}
	700	4.30±0.02 ^{Aa}	4.48±0.48 ^{Ab}
	900	4.18±0.08 ^{Ba}	4.41±0.13 ^{Bb}
土壤有机碳/ (g·kg ⁻¹)	500	13.16±3.95 ^{Aa}	28.51±1.26 ^{Ab}
	700	13.43±1.88 ^{Aa}	25.41±7.37 ^{Ab}
	900	13.58±4.16 ^{Aa}	22.92±2.97 ^{Bb}
全氮/(g·kg ⁻¹)	500	0.93±0.23 ^{Aa}	0.89±0.14 ^{Aa}
	700	0.96±0.06 ^{Aa}	0.87±0.09 ^{Aa}
	900	1.15±0.26 ^{Aa}	1.19±0.06 ^{Ba}
全磷/(g·kg ⁻¹)	500	0.19±0.04 ^{Aa}	0.28±0.04 ^{Ab}
	700	0.18±0.02 ^{Aa}	0.26±0.03 ^{Ab}
	900	0.17±0.05 ^{Aa}	0.24±0.02 ^{Ab}

注: 不同大写字母表示相同森林类型不同海拔间差异显著 ($P<0.05$); 不同小写字母表示相同海拔不同森林类型间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different uppercase letters indicate significant difference between different altitudes in the same forest type ($P<0.05$); Different lowercase letters indicate significant difference between different forest types at the same altitude ($P<0.05$).

土壤微生物量见图 1。桉树人工林 MBC 含量随海拔升高呈逐渐上升的趋势, 含量变化范围为 237.46~398.26 mg/kg, 均值为 322.24 mg/kg, 在海拔 500 m 处的 MBC 含量显著低于其他海拔, 而与同一海拔的天然次生林均无显著差异; 桉树人工林 MBN 含量整体上随着海拔上升而增加, 变化范围为 23.04~30.74 mg/kg, 均值为 28.01 mg/kg, 在 3 个海拔区间内 MBN 含量均无显著差异, 且与同海拔的天然次生林也无显著差异; 桉树人工林 MBP 含量整体随海拔的上升呈下降趋势, 变化范围为 4.77~9.59 mg/kg, 均值为 6.42 mg/kg, 海拔 500 m 处的 MBP 含量显著高于其他海拔, 而与同一海拔的天然次生林均无显著差异。

通过双因素方差分析可知 (表 3), 海拔对 MBC、MBN 含量的影响分别达到极显著 ($P<0.01$)



不同大写字母表示相同森林类型不同海拔间差异显著 ($P<0.05$) ; 不同小写字母表示相同海拔不同森林类型间差异显著 ($P<0.05$) 。
Different uppercase letters indicate significant difference between different altitudes in the same forest type ($P<0.05$); Different lowercase letters indicate significant difference between different forest types at the same altitude ($P<0.05$).

图 1 不同海拔土壤微生物量特征

Fig. 1 Characterization of soil microbial biomass characteristics at different elevations

表 3 土壤 MBC、MBN、MBP 的双因素方差分析
Tab. 3 Two-way ANOVA for soil MBC, MBN and MBP

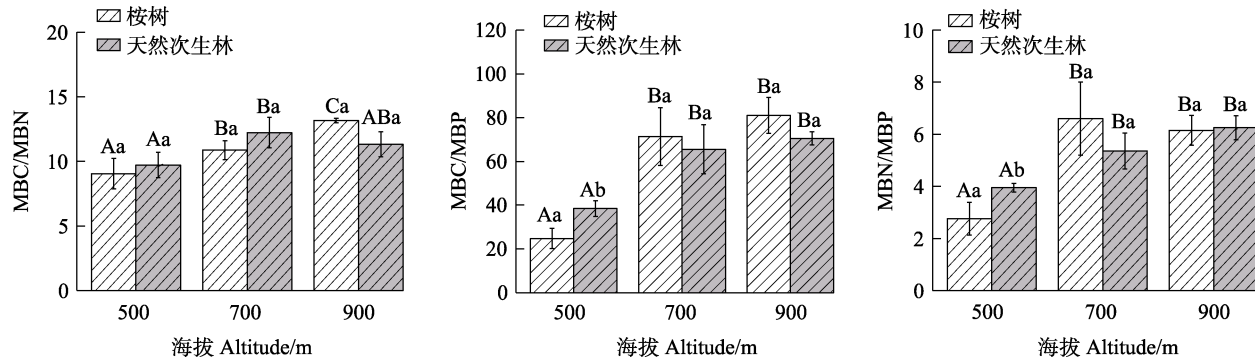
指标 Index	F (P)		
	海拔 Altitude	森林类型 Forest type	海拔×森林类型 Altitude×Forest type
MBC	36.08 (0.00)**	2.54 (0.92)	0.76 (0.49)
MBN	4.81 (0.03)*	3.25 (0.99)	1.01 (0.40)
MBP	24.10 (0.00)**	10.06 (0.17)	31.11 (0.00)**

注: *表示显著相关 ($P<0.05$) ; **表示极显著相关 ($P<0.01$) 。
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

和显著水平 ($P<0.05$) , 而森林类型及海拔与森林类型的交互作用对 MBC、MBN 含量均无显著影响。MBP 含量受海拔及海拔与森林类型的交互

作用的影响均达极显著水平 ($P<0.01$) 。总体而言, 桉树的生长对土壤微生物量的影响较小, 而土壤微生物量受海拔的影响显著。

2.2.2 土壤微生物量化学计量特征 土壤微生物量化学计量特征见图 2, 桉树人工林 MBC/MBN、MBC/MBP、MBN/MBP 均呈随海拔的上升而上升的趋势, 比值变化范围分别为 9.05~13.17、24.73~80.99、2.76~6.60, 均值分别为 13.37、66.18、4.93; 桉树人工林 MBC/MBN 在 500、700、900 m 海拔间均存在显著差异, 而与同海拔天然次生林差异不显著; 桉树人工林 MBC/MBP、MBN/MBP 在 500 m 海拔处与其他海拔存在显著差异, 且与同一海拔天然次生林差异达到显著水平。



不同大写字母表示相同森林类型不同海拔间差异显著 ($P<0.05$) ; 不同小写字母表示相同海拔不同森林类型间差异显著 ($P<0.05$) 。
Different uppercase letters indicate significant difference between different altitudes in the same forest type ($P<0.05$); Different lowercase letters indicate significant difference between different forest types at the same altitude ($P<0.05$).

图 2 不同海拔土壤微生物量化学计量特征

Fig. 2 Characterization of soil microbial biomass stoichiometry at different elevations

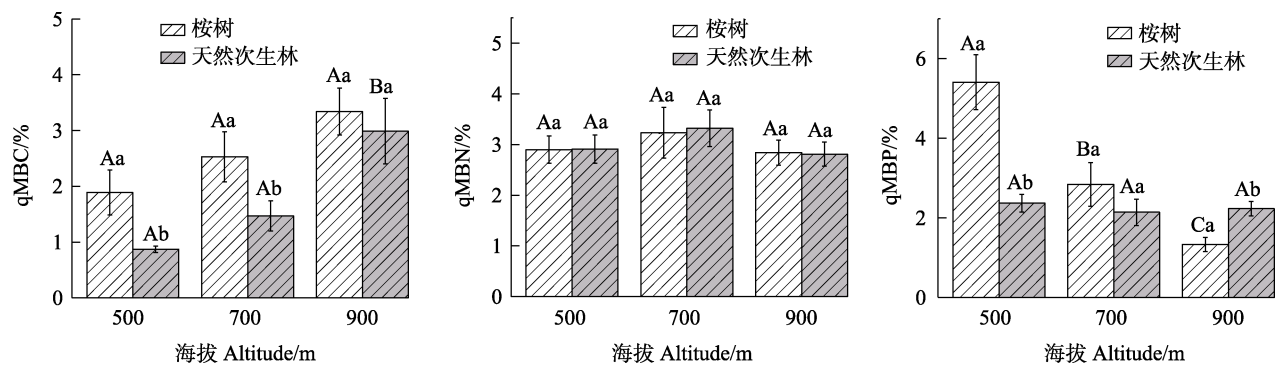
通过双因素方差分析可知 (表 4) , MBC/MBN、MBC/MBP、MBN/MBP 受海拔梯度的影响均达极显著水平 ($P<0.01$) , 对森林类型的响应均未达显著水平。海拔梯度与森林类型交互作

用对 MBC/MBN、MBN/MBP 的影响显著 ($P<0.05$) , 而对 MBC/MBP 无显著影响。

2.3 不同海拔土壤微生物熵特征

不同海拔土壤微生物熵特征见图 3, 桉树人

工林微生物熵碳 (qMBC) 随海拔升高呈逐渐上升的变化规律, 变幅为 1.89%~3.34%, 平均值为 2.58%, 各海拔间无显著差异, 500 m 与 700 m 海拔处 qMBC 显著高于同一海拔天然次生林; 桉树人工林微生物熵氮 (qMBN) 变幅为 2.90%~3.23%, 总体变化平缓, 且与同海拔天然次生林差异不显著; 桉树人工林微生物熵磷 (qMBP) 随海拔的升高而下降, 变幅为 1.33%~5.41%, 平均值为 3.19%, 各海拔间均存在显著差异, 500 m 与 900 m 海拔处 qMBC 与天然次生林存在显著差异。



不同大写字母表示相同森林类型不同海拔间差异显著 ($P<0.05$) ; 不同小写字母表示相同海拔不同森林类型间差异显著 ($P<0.05$) 。
Different uppercase letters indicate significant difference between different altitudes in the same forest type ($P<0.05$); Different lowercase letters indicate significant difference between different forest types at the same altitude ($P<0.05$).

图 3 不同海拔土壤微生物熵特征

Fig. 3 Characteristics of soil microbial quotient at different elevations

通过双因素方差分析可知 (表 5), 海拔梯度与森林类型对 qMBC 的影响分别呈极显著 ($P<0.01$) 与显著水平 ($P<0.05$), 其交互作用无显著影响。海拔梯度、森林类型及海拔梯度与森林类型交互作用对 qMBN 无显著影响。qMBP 对海拔梯度、森林类型及海拔梯度与森林类型交互作用的响应均达到极显著水平 ($P<0.01$)。

表 5 土壤微生物熵的双因素方差分析
Tab. 5 Two-way ANOVA for soil microbial quotient

指标 Index	F (P)		
	海拔 Altitude	森林类型 Forest type	海拔×森林类型 Altitude×Forest type
qMBC	7.99 (0.01)**	4.73 (0.05)*	0.40 (0.68)
qMBN	1.10 (0.37)	2.56 (0.94)	2.50 (0.98)
qMBP	18.88 (0.00)**	11.03 (0.01)**	16.17 (0.00)**

注: *表示显著相关 ($P<0.05$); **表示极显著相关 ($P<0.01$) 。
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

2.4 不同海拔土壤碳氮磷与土壤微生物量及化学计量间的相关性

为探究桉树人工林土壤碳氮磷与土壤微生

表 4 土壤微生物量化学计量特征的双因素方差分析
Tab. 4 Two-way ANOVA for stoichiometric characterization of soil microbial biomass

指标 Index	F (P)		
	海拔 Altitude	森林类型 Forest type	海拔×森林类型 Altitude×Forest type
MBC/MBN	15.44 (0.00)**	12.17 (0.89)	4.95 (0.03)*
MBC/MBP	49.41 (0.00)**	5.27 (0.83)	3.60 (0.06)
MBN/MBP	26.41 (0.00)**	1.28 (0.96)	3.93 (0.05)*

注: *表示显著相关 ($P<0.05$); **表示极显著相关 ($P<0.01$) 。
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

物碳氮磷及化学计量的影响因素, 对不同海拔的土壤碳氮磷与土壤微生物量及化学计量特征参数进行相关性分析。由表 6 可知, 海拔与 TP 含量、MBN 含量、MBN/MBP 呈显著正相关 ($P<0.05$), 与 MBC 含量、MBC/MNN、MBC/MBP 呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与 MBP 含量呈极显著负相关 ($P<0.05$); 土壤 SOC 含量与 MBC、TN 含量分别呈显著与极显著正相关; 土壤 TN 含量与 MBN 含量呈极显著正相关; 土壤 TP 含量与 MBC、MBP 含量、MBC/MNN 呈显著正相关; 此外, MBC 与 MBN 含量呈显著正相关, 与 MBC/MBN、MBC/MBP、MBN/MBP 呈极显著正相关, 与 MBP 含量呈极显著负相关; MBN 含量与 MBN/MBP 呈显著正相关; MBP 含量与 MBC/MBN 呈显著负相关, 与 MBC/MBP、MBN/MBP 呈极显著负相关; MBC/MBN 与 MBC/MBP 呈极显著正相关; MBC/MBP 与 MBN/MBP 呈极显著正相关。综上表明土壤碳氮磷显著影响土壤微生物量碳氮磷且呈正相关, 与前文研究结果一致。

表 6 土壤碳氮磷与土壤微生物量及化学计量的相关性
Tab. 6 Correlation between soil carbon, nitrogen and phosphorus and soil microbiota and stoichiometry

指标 Index	海拔 Altitude	SOC	TN	TP	MBC	MBN	MBP	MBC/MBN	MBC/MBP
SOC	0.05								
TN	0.41	0.89**							
TP	0.76*	0.22	0.57						
MBC	0.90**	0.68*	0.29	0.68*					
MBN	0.70*	0.16	0.88**	0.28	0.69*				
MBP	-0.84**	-0.05	-0.27	0.65*	-0.80**	-0.48			
MBC/MBN	0.93**	0.24	0.30	0.72*	0.83**	0.18	-0.73*		
MBC/MBP	0.89**	0.0043	0.25	0.51	0.92**	0.59	-0.96**	0.80**	
MBN/MBP	0.74*	0.012	0.18	0.29	0.81**	0.68*	-0.95**	0.58	0.95**

注：*表示显著相关 ($P<0.05$)；**表示极显著相关 ($P<0.01$)。
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

2.5 不同海拔土壤微生物熵与土壤理化性质的相关性

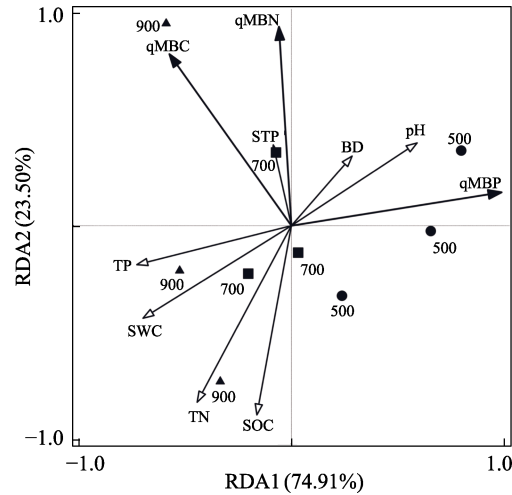
为探究不同海拔桉树人工林土壤微生物熵的影响因素，选取土壤因子中的 3 个物理性质指标和 4 个化学性质指标作为解释变量，以土壤微生物熵作为响应变量进行冗余分析。由图 4 可知，第一、二轴分别解释微生物熵的 74.91%、23.50%，累计贡献率为 98.41%。表明土壤理化性质对微生物熵的影响较大，并具有密切的相关性，其中，qMBC 与土壤物理性质均呈正相关，与土壤化学性质中的 pH、TP 呈正相关，与 SOC、TN 呈负相

关；qMBN 与土壤物理性质中的 BD、STP 呈正相关，与 SWC 呈负相关，与化学性质中的 pH 呈正相关，与其他化学性质均呈负相关；qMBP 与土壤物理性质中的 BD 呈正相关，与 SWC、STP 呈负相关，与化学性质中的 pH 呈正相关，与其他化学性质均呈负相关。由图 4 可知，土壤物理性质的各项指标箭头长度整体上均小于土壤化学性质的指标，表明土壤化学性质是影响桉树人工林土壤微生物熵的主要因素。

通过蒙特卡洛置换方法进一步进行显著性检验并排序。由表 7 可知，土壤理化性质解释度由大到小排序为 TN、SOC、SWC、TP、BD、STP、pH。其中土壤 TN 与 SOC 的解释度分别为 40.9% 和 34.9%，达到极显著水平 ($P<0.01$)。结果表明，SOC、TN 是影响桉树人工林土壤微生物熵变化的关键因子。

表 7 蒙特卡洛检验排序
Tab. 7 Ranking of Monte Carlo tests

指标 Index	解释度 Explain/%	贡献度 Contribution/%	F	P	排序 Ranking
TN	40.9	41.1	4.9	0.006	1
SOC	34.9	35.0	8.7	0.008	2
SWC	12.2	12.3	5.1	0.056	3
TP	6.1	6.1	4.1	0.490	4
BD	2.1	2.1	0.8	0.320	5
STP	1.8	1.8	0.7	0.600	6
pH	1.6	1.6	<0.1	0.008	7



白色箭头表示解释变量；黑色箭头表示响应变量；箭头长短为影响程度；箭头间夹角为相关程度。

White arrows indicate explanatory variables; Black arrows indicate response variables; The length of the arrow is the degree of influence; The angle between the arrows is the degree of correlation.

图 4 不同海拔土壤理化性质与微生物熵的冗余分析
Fig. 4 Redundancy analysis of soil physicochemical properties and microbial quotient at different elevations

3 讨论

3.1 海拔对桉树人工林土壤理化性质的影响

本研究结果显示，在海拔 500~900 m 范围内，

桉树人工林土壤的物理性质均无显著差异。通过对比相同海拔的天然次生林,桉树人工林的种植对土壤物理性质的影响较为显著。总体表现为土壤容重增大,总孔隙度与含水率下降的现象。这与魏圣钊等^[20]对巨桉土壤物理性质的研究结果一致。土壤容重和孔隙度的变化可能是由于桉树间伐、采伐后的林地清理和炼山活动的影响。这些作业几乎完全清除了原有植被,重型机械设备和木材对土壤的反复碾压,使土壤逐渐变得紧实,而随着桉树人工林连栽代数的增加,也导致土壤通气与容蓄能力的下降^[21]。研究表明,桉树的根系具有二态性,在土壤表层 0~60 cm 范围内分布着大量的侧根,对水分的需求巨大。在旱季,桉树的侧根首先使用土壤表层的水分,深层的土壤水分则由主根进行吸取^[22]。另一方面,与天然次生林茂密的林下植被相比,桉树人工林较为裸露的地表环境致使土壤蒸腾耗水量增加。因此出现了桉树人工林土壤含水率下降的现象。

桉树人工林土壤随海拔升高有逐渐酸化的趋势,这与张珊等^[23]对亚高山不同海拔表层土壤 pH 的变化规律一致。本研究区所属山地湿润区,土壤自身呈一定弱酸性,而在桉树连栽过程中,由于酸性肥料的残留及桉树根系分泌物的累积导致土壤酸化趋势加剧。土壤有机碳与土壤全氮含量均随海拔的升高而呈增加的趋势。土壤有机碳含量源于受森林凋落物的矿化分解和转化积累,而土壤全氮含量主要受到地表径流、动植物残体归还以及氮素内部的固氮、硝化、反硝化作用的影响,土壤微生物的活性在这一系列过程中起到关键作用。因此,随着海拔上升和气温下降,地表植被减少,矿化速率和土壤微生物活性降低,使土壤有机碳和全氮含量增加。这与张巧明等^[24]、张健等^[25]、罗钰颖等^[26]的研究结果一致。土壤全磷含量在 500~900 m 海拔梯度内无明显差异,土壤全磷主要来自岩石风化且迁移率低,属于沉积性元素,海拔对土壤全磷的影响较小,这与刘爱琴等^[27]和魏孝荣等^[28]的研究结果一致。TIAN 等^[29]研究得出,桉树人工林土壤有机碳、全氮、全磷含量平均值分别为 13.39、1.01、0.18 g/kg,均远低于全国土壤有机碳、全氮、全磷含量平均值 20.47、1.34、0.25 g/kg,表现出碳、氮、磷元素的匮乏;与天然次生林(25.61、0.98、0.26 g/kg 相比),桉树人工林地则表现为对土壤碳、磷的匮乏。

3.2 海拔对桉树人工林土壤微生物量与化学计量特征的影响

本研究发现,桉树人工林土壤微生物碳、氮含量随海拔的升高呈上升的趋势,其中 MBC 与海拔呈极显著正相关,而土壤 MBP 随海拔的上升而下降,与海拔呈极显著负相关。这与前人得出的结论有差异,何容等^[30]对武夷山植被的研究表明,随着海拔的升高,林下草本植物的增加使土壤微生物量逐渐上升。另一方面,赵盼盼等^[31]认为由于低海拔的温度较高,有效促进了微生物的生长及活性,从而加速其对无机养分的利用,因此土壤 MBC、MBN 和 MBP 均随海拔升高而显著降低。土壤微生物量是生态系统中最具活性的组成成分,有学者认为,除了对海拔梯度变化的反应,森林类型也可能是影响其变化的重要因素^[32-33]。然而通过桉树人工林与天然次生林土壤微生物量的差异分析表明,相同海拔 2 种森林类型土壤微生物量均无显著差异。表明海拔是影响土壤微生物量的主要因素。

在土壤微生物量化学计量特征方面, MBC/MBN、MBC/MBP、MBN/MBP 均随海拔的升高而呈上升的趋势,其中 MBC/MBN 对海拔变化的反应最为灵敏,在 500~900 m 海拔区间内均呈显著差异。研究表明, MBC/MBN 可以反映土壤微生物群落的主要组成成分,其中其值为 5/1 时以细菌为主, 6/1 时以放线菌为主, 10/1 时以真菌为主^[34]。真菌数量的上升,土壤腐殖化能力提高,进而提升了土壤的固碳能力^[35]。MBC/MBP、MBN/MBP 在海拔 500 m 处为最小值,且仅与相同海拔天然次生林存在显著差异,表明海拔升高,温度降低导致森林类型对 MBN、MBP 的影响减弱。同时反映了在海拔 500 m 处桉树人工林微生物矿化和转化过程中释放 C、N 的潜力较高,且林下植被对 C、N 的需求最大, P 的需求相对较小。多数研究认为微生物具有一定的内稳定性,当外部环境中的土壤 C、N、P 含量发生改变时,微生物的生态化学计量特征依然保持相对一致^[36-37]。而有部分学者认为微生物对土壤养分状况具有较强的依赖性^[38]。本研究倾向于后者,随着海拔的升高,土壤微生物量的变化与土壤 C、N、P 的变化趋于一致。但与天然次生林更为丰富的土壤 C、N、P 含量相比,桉树人工林微生物量无显著差异。表明土壤微生物量 C、N、P 累积需要一定的土壤

C、N、P 供应才能维持稳定的化学计量比。

3.3 土壤理化性质对桉树人工林土壤微生物熵的影响

本研究表明, 桉树人工林土壤微生物熵随海拔升高其变化规律有差异, 其中 qMBC 随海拔升高逐渐上升, 说明高海拔土壤碳库相对活跃, 土壤碳向微生物碳转化的效率较高。不同海拔 qMBC 均值为 2.58%, 均高于次生林 (1.78%) 与全国森林平均水平 (1.92%)。qMBN 的变化趋势未达到显著水平, 均值均低于次生林 (3.01%) 与全国森林平均水平 (3.43%), 且该地区的土壤 N 含量也低于全国森林平均水平, 因此可以推断 qMBN 受研究区 N 元素匮乏的制约, 不利于土壤 N 向微生物 N 的转化。qMBP 随海拔的升高而下降, 均值高于次生林 (2.25%), 低于全国森林平均水平 (3.76%)。对土壤微生物熵进行冗余分析, 发现土壤化学性质是影响土壤微生物熵的主要因素, 这与 SRIVASTAVA 等^[39]的研究结论一致。对土壤化学指标进一步检验, 表明有机碳和全氮是影响不同海拔梯度表层土壤微生物熵变化的主要环境因子, 这与贺若阳等^[40]对川西亚高山森林的研究结果一致。研究结果表明, 人工林在自然恢复下, 林分结构趋于复杂化, 物种组成和物种多样性逐渐增加^[41]。此外研究显示, 随着人工林植被演替的进行, 其地表枯落物、根系分泌物的增加, 致使土壤养分上升^[42]。基于此, 对于园区的桉树人工林应采取保留处理, 在后续的管理中应注重 C、P 元素养分的影响, 对其采取近自然化管理或者补植混交树种的方式, 随着演替时间的推移, 桉树人工林的生态效益将得到逐步恢复与提升。

4 结论

通过对海南热带雨林国家公园不同海拔的桉树人工林及天然次生林土壤-微生物碳、氮、磷特征研究, 表明在海拔 500~900 m 范围内, 海拔梯度显著影响桉树人工林土壤-微生物碳、氮、磷含量及化学计量比。而与同海拔的天然次生林相比, 桉树人工林的种植一定程度上降低了土壤的碳、磷含量, 但对土壤微生物量及生态化学计量的影响并不显著, 反而促进了土壤养分中碳、磷元素的利用效率。其中土壤有机碳、全氮是影响桉树人工林土壤微生物熵变化的关键因子。研究表明

研究区内的桉树人工林的生长对土壤的负面影响并不显著, 且该林分仍具备较强的生态功能。本研究为进一步了解桉树人工林的土壤-微生物碳、氮、磷特征及园区内桉树人工林的处置提供一定理论基础与参考依据。

参考文献

- [1] 冯广, 艾训儒, 臧润国, 丁易. 鄂西南亚热带常绿落叶阔叶混交林不同群落类型土壤特征分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(7): 1173-1184.
FENG G, AI X R, ZANG R G, DING Y. Soil characteristics under different community types in the subtropical evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest in southwest Hubei[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(7): 1173-1184. (in Chinese)
- [2] CHEN Q Q, SHI Z, CHEN S C, GOU Y X, ZHUO Z Q. Role of environment variables in spatial distribution of soil C, N, P ecological stoichiometry in the typical black soil region of northeast China[J]. Sustainability, 2022, 14(5): 26-36.
- [3] 曹瑞, 吴福忠, 杨万勤, 徐振锋, 谭波, 王滨, 李俊, 常晨晖. 海拔对高山峡谷区土壤微生物生物量和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1257-1264.
CAO R, WU F Z, YANG W Q, XU Z F, TAN B, WANG B, LI J, CHANG C H. Effects of altitudes on soil microbial biomass and enzyme activity in alpine-gorge regions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(4): 1257-1264. (in Chinese)
- [4] 陈凌云, 龙永丽, 申啸天, 金丽琼, 杜海峰. 祁连山不同海拔青海云杉林土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2023, 59 (6): 111-120.
CHEN L Y, LONG Y L, SHEN X T, JIN L Q, DU H F. Ecological stoichiometry of soil C, N and P indifferent elevations of *Picea crassipes* forest in Qilian Mountains[J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2023, 59(6): 111-120. (in Chinese)
- [5] HE X J, HOU E Q, LIU Y, WEN D Z. Altitudinal patterns and controls of plant and soil nutrient concentrations and stoichiometry in subtropical China[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 24-26.
- [6] 曹丽花, 刘合满, 杨红, 连玉珍. 色季拉山不同海拔土壤微生物及真菌群落组成特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 371-378.
CAO L H, LIU H M, YANG H, LIAN Y Z. Soil microbial distribution and fungal community composition at different altitudes on Sejila Mountain, southeastern Tibet[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 371-378. (in Chinese)

- [7] LEMENIH M, OLSSON M, KARLTUN E. Comparison of soil attributes under *Cupressus lusitania* and *Eucalyptus* saline established on abandoned farmlands with continuously cropped farmlands and natural forest in Ethiopia[J]. Forest ecology and Management, 2004, 195(1/2): 57-67.
- [8] 杜珊, 余雪标, 史茂源, 周华, 陈海辉, 黄海, 吴金群. 海南桉树人工林林下植物多样性特征研究[J]. 热带作物学报, 2023, 44(1): 92-102.
- DU S, YU X B, SHI M Y, ZHOU H, CHEN H H, HUANG H, WU J Q. Characteristics of understory plant diversity of *Eucalyptus* plantation in Hainan[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(1): 92-102. (in Chinese)
- [9] 黄振格, 何斌, 谢敏洋, 张日施, 惠柳笛. 连栽桉树人工林土壤氮素季节动态特征[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(9): 88-94.
- HUANG Z G, HE B, XIE M Y, ZHANG R S, HUI L D. Characteristics of seasonal dynamics of soil nitrogen in continuous *Eucalyptus* plantations[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(9): 88-94. (in Chinese)
- [10] 陈宗铸, 雷金睿, 吴庭天, 陈德祥, 周璋, 李苑菱, 洪小江, 杨众养, 李意德. 国家公园生态系统生产总值核算: 以海南热带雨林国家公园为例[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3883-3892.
- CHEN Z Z, LEI J R, WU T T, CHEN D X, ZHOU Z, LI Y L, HONG X J, YANG Z Y, LI Y D. Gross ecosystem product accounting of national park: taking Hainan Tropical Rainforest National Park as an example[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 3883-3892. (in Chinese)
- [11] 薛世玉, 崔之益, 徐谔为, 徐大平, 杨曾奖, 杨光大, 肖嘉杰, 刘小金, 郭俊誉. 海南不同降雨量地区桉树人工林与天然林及其他经济林分植被多样性差异研究[J]. 热带作物学报, 2023, 44(5): 1039-1051.
- XUE S Y, CUI Z Y, XU A W, XU D P, YANG Z J, YANG G D, XIAO J J, LIU X J, GUO J Y. Research of vegetation diversity difference between *Eucalyptus* plantation and natural forests and other stands in different rainfall areas of Hainan province, China[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(5): 1039-1051. (in Chinese)
- [12] 徐建民, 陆钊华, 白嘉雨, 温茂元, 吴有昌, 牛永强, 林造生, 杨国敏. 海南岛西北部地区桉树无性系选择研究[J]. 桉树科技, 2004(1): 1-6.
- XU J M, LU Z H, BAI J Y, WEN M Y, WU Y C, NIU Y Q, LIN Z S, YANG G M. Selected on *Eucalyptus* clone in northwestern region of Hainan island[J]. Eucalypt Science & Technology, 2004(1): 1-6. (in Chinese)
- [13] 竹万宽, 许宇星, 王志超, 杜阿朋. 不同林龄桉树人工林土壤碳氮储量及 C/N 化学计量特征[J]. 桉树科技, 2018, 35(3): 16-19.
- ZHU W K, XU Y X, WANG Z C, DU A P. Soil carbon and nitrogen storage and C/N ratios in *Eucalyptus* plantations of different ages[J]. Eucalypt Science & Technology, 2018, 35(3): 16-19. (in Chinese)
- [14] 杨青青, 陈小花. 热带地区桉树各器官碳氮磷生态化学计量特征及其与土壤因子的关系[J]. 防护林科技, 2023(5): 1-5.
- YANG Q Q, CHEN X H. Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus of each organ in *Eucalyptus* plantation in tropical areas and its relationship with soil factors[J]. Protection Forest Science and Technology, 2023(5): 1-5. (in Chinese)
- [15] 符国媛, 冯绍信. 海南五指山森林的垂直分布及其特征[J]. 广西植物, 1995(1): 57-69.
- FU G A, FENG S X. The vertical distribution and characteristics of forest of Wuzhishan, Hainan[J]. Guihaia, 1995(1): 57-69. (in Chinese)
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU R K. Methods of soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [18] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.
- [19] BROOKES P C, POWLSON D S, JENKINSON D. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1982, 14(4): 319-329.
- [20] 魏圣钊, 李林, 骆晓, 谭靖星, 刘雄, 刘行, 杨帅, 曹芹, 黄从德. 不同连栽代次的巨桉(*Eucalyptus grandis*)人工林土壤酶活性及其与土壤理化性质的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(6): 1312-1318.
- WEI S Z, LI L, LUO X, TAN J X, LIU X, LIU X, YANG S, CAO Q, HUANG C D. Effect of continuous planting of *Eucalyptus grandis* on biomass and number of soil microbes[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2019, 25(6): 1312-1318. (in Chinese)
- [21] 王城城, 陈丽艳, 赵从举. 热带桉树人工林液流特征及其对环境因子的响应[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(7): 69-75.
- WANG C C, CHEN L Y, ZHAO C J. Sap flow in tropical *Eucalyptus* plantation and its response to environmental changes[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(7): 69-75. (in Chinese)
- [22] SMITH H G, SHERIDAN G J, LANE P N J, BREN L J. Wildfire and salvage harvesting effects on runoff generation

- and sediment exports from radiata pine and *Eucalypt* forest catchments, southeastern Australia[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(3): 570-581.
- [23] 张珊, 田晓娟, 顾振东, 安谈红, 马瑞鹏, 赵瑞桃. 甘肃亚高山不同海拔梯度云杉人工林土壤理化性质研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2021, 56(6): 111-118.
- ZHANG S, TIAN X J, GU Z D, AN T H, MA R P, ZHAO R T. Study on soil physical and chemical properties in the artificial forest of spruce plantation along altitudinal gradients in the subalpine region of Gansu province[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2021, 56(6): 111-118. (in Chinese)
- [24] 张巧明, 王得祥, 龚明贵, 张丽楠. 秦岭火地塘林区不同海拔森林土壤理化性质[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 69-73.
- ZHANG Q M, WANG D X, GONG M G, ZHANG L N. Changes in physicochemical properties of forest soil along different altitudes in Huoditang of Qinling Mountains[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 69-73. (in Chinese)
- [25] 张健, 郭倩, 孙一铭, 林丛, 蔡丽平, 张厚喜. 武夷山不同海拔毛竹林土壤碳氮磷的生态化学计量特征[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2022, 51(3): 367-373.
- ZHANG J, GUO Q, SUN Y M, LIN C, CAI L P, ZHANG H X. Ecological stoichiometries characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in mosso bamboo forests at different altitudes in Wuyi Mountain[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2022, 51(3): 367-373. (in Chinese)
- [26] 罗钰颖, 朱玉婷, 唐青, 王澍. 哀牢山不同海拔表层土壤理化性质变化规律研究[J]. 西部林业科学, 2022, 49(1): 140-148.
- LUO Y Y, ZHU Y T, TANG Q, WANG S. Variation pattern of physicochemical properties in different altitudes of Ailao Mountain[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2022, 49(1): 140-148. (in Chinese)
- [27] 刘爱琴, 严加亮, 侯晓龙, 蔡丽平, 邹显花, 苏漳文. 武夷山自然保护区不同海拔土壤磷素的分布规律[J]. 森林与环境学报, 2015, 35(4): 310-316.
- LIU A Q, YAN J L, HOU X L, CAI L P, ZOU X H, SU Z W. Heterogeneity distribution of soil phosphorus in Wuyishan Nature Reserve[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2015, 35(4): 310-316. (in Chinese)
- [28] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 603-612.
- WEI X R, SHAO M A. The distribution of soil nutrients on sloping land in the gully region watershed of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2007, 27(2): 603-612. (in Chinese)
- [29] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, JERRY M M, CHARLES A S H. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(3): 139-151.
- [30] 何容, 汪家社, 施政, 方燕鸿, 徐自坤, 权伟, 张增信, 阮宏华. 武夷山植被带土壤微生物量沿海拔梯度的变化[J]. 生态学报, 2009, 9(9): 5138-5144.
- HE R, WANG J S, SHI Z, FANG Y H, XU Z K, QUAN W, ZHANG Z X, RUAN H H. Variations of soil microbial biomass across four different plant communities along an elevation gradient in Wuyi Mountains, China[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2009, 29(9): 5138-5144. (in Chinese)
- [31] 赵盼盼, 周嘉聪, 林开森, 林伟盛, 袁萍, 曾晓敏, 苏莹, 徐建国, 陈岳民, 杨玉盛. 不同海拔对福建戴云山黄山松林土壤微生物生物量和土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2009, 39(8): 2676-2686.
- ZHAO P P, ZHOU J C, LIN K M, LIN W S, YUAN P, ZENG X M, SU Y, XU J G, CHEN Y M, YANG Y S. Effects of different altitudes on soil microbial biomass and enzyme activities in *Pinus taiwanensis* forests on Daiyun Mountain, Fujian province[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2009, 39(8): 2676-2686. (in Chinese)
- [32] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C : N : P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass?[J]. *Biogeochemistry*, 2009, 85(3): 235-252.
- [33] 李相楹, 张维勇, 刘峰, 张珍明, 何腾兵, 林昌虎. 不同海拔高度下梵净山土壤碳、氮、磷分布特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 19-24.
- LI X Y, ZHANG W Y, LIU F, ZHANG Z M, HE T B, LIN C H. The distribution characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus at different altitudes in Fanjingshan Mountain[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(3): 19-24. (in Chinese)
- [34] WARDLE D A. Controls of temporal variability of the soil microbial biomass: a global scale synthesis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(13): 1627-1637.
- [35] BAILEY V L, SMITH J L, BOLTON H. Fungal-to-bacterial ratios in soils investigated for enhanced C sequestration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(7): 997-1007.
- [36] HALL E K, MAIXNER F, FRANKLIN O, DAIMS H, RICHTER A, BATTIN T. Linking microbial and ecosystem ecology using ecological stoichiometry: a synthesis of conceptual and empirical approaches[J]. *Ecosystems*, 2010, 14(2): 261-273.
- [37] 胡宗达, 刘世荣, 刘兴良, 胡璟, 罗明霞, 李亚非, 石松林, 吴德勇, 肖玖金. 川西亚高山天然次生林不同演替阶段土壤-微生物生物量及其化学计量特征[J]. 生态学报, 2021,

- 41(12): 4900-4912.
- HU Z D, LIU S R, LIU X L, HU J, LUO M X, LI Y F, SHI S L, WU D Y, XIAO J J. Soil and soil microbial biomass contents and C : N : P stoichiometry at different succession stages of natural secondary forest in sub-alpine area of western Sichuan, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(12): 4900-4912. (in Chinese)
- [38] 陈婕妮, 石思雨, 钟羨芳, 司友涛, 马红亮, 高人, 尹云锋. 武夷山不同海拔土壤微生物生物量碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(10): 2999-3004.
- CHEN J N, SHI S Y, ZHONG X F, SI Y T, MA H L, GAO R, YIN Y F. Soil microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus contents and their ecological stoichiometric characteristics along an elevation gradient in the Wuyi Mountains[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(10): 2999-3004. (in Chinese)
- [39] SRIVASTAVA S C, SINGH J S. Microbial C, N and P in dry tropical forest soils: effects of alternate land-uses and nutrient flux[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23(2): 117-124.
- [40] 贺若阳, 杨万勤, 杨开军, 李志杰, 庄丽燕, 谭波, 徐振锋. 川西亚高山 3 种森林土壤碳氮磷及微生物生物量特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(4): 606-611.
- HE R Y, YANG W Q, YANG K J, LI Z J, ZHUANG L Y, TAN B, XU Z F. Soil C, N, P and microbial biomass properties of three dominant subalpine forests of western Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2016, 22(4): 606-611. (in Chinese)
- [41] 陈海辉, 黄海, 田乐宇, 韦建杏, 余雪标, 王旭. 自然恢复下马占相思人工林植被群落特征变化[J]. *南方农业学报*, 2024, 55(9): 2721-2733.
- CHEN H H, HUANG H, TIAN L Y, WEI J X, YU X B, WANG X. Changes of vegetation community characteristics of *Acacia mangium* plantation under natural restoration[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2024, 55(9): 2721-2733. (in Chinese)
- [42] ZHONG Z K, ZHANG X Y, WANG X, FU S Y, WU S J, LU X Q, REN C J, HAN X H, YANG G H. Soil bacteria and fungi respond differently to plant diversity and plant family composition during the secondary succession of abandoned farmland on the Loess Plateau, China[J]. *Plant and Soil*, 2020, 448(1): 183-200.