

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230044

云南亚热带地区主要林地类型土壤碳含量变化及影响因素研究

赵巧巧¹, 赵筱青^{2*}, 黄佩¹, 普军伟¹, 周世杰², 冯严²,
顾泽贤^{1,3}, 石小倩⁴, 储博程⁵

(1. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 650500; 2. 云南大学地球科学学院, 云南 昆明 650500; 3. 怒江州林业和草原局, 云南 泸水 673100; 4. 云南国土资源职业学院, 云南 玉溪 652500; 5. 云南风蓝项目投资咨询集团有限公司, 云南 昆明 650200)

摘要: [目的] 作为陆地生态系统最大的碳库, 森林土壤有机碳变化对全球碳循环产生显著影响。通过探究不同林地类型森林土壤碳含量差异及其影响因素, 以期为森林碳汇管理提供理论依据。[方法] 以澜沧县桉树人工林、思茅松纯林和常绿阔叶林为研究对象, 运用单因素、Duncan 方差分析和冗余分析法, 探究 3 种林地类型在 0~20 cm、20~40 cm 及 40~60 cm 不同土层深度的土壤有机碳含量和密度、碳氮比 (C/N) 水平及垂直分布变化规律, 并揭示其主要影响因素。[结果] (1) 0~60 cm 土层, 3 种林地类型土壤有机碳含量差异显著。其变化范围为 14.89~22.05 g·kg⁻¹, 高于全国森林土壤有机碳水平, 以常绿阔叶林最高 (22.05 g·kg⁻¹); 有机碳密度处于 3.42~4.12 kg·m⁻² 之间, 以常绿阔叶林最高 (4.12 kg·m⁻²); 土壤 C/N 在 12.99~13.82 之间, 以桉树人工林最高 (13.82); (2) 随着土层加深, 3 种林地类型土壤有机碳含量、有机碳密度和 C/N 均呈下降趋势, 以常绿阔叶林土壤有机碳含量和密度下降趋势最明显; (3) 3 种林地类型有机碳含量和密度主要受土壤密度、有机质、全氮、水解性氮和全磷影响, 环境和地形因子影响较小; 土壤 C/N 主要影响因子为有机质、pH 和坡向, 环境因子对其影响较小。[结论] 常绿阔叶林和桉树人工林土壤在碳汇方面具有优势, 而思茅松纯林碳汇功能较弱。土壤碳含量变化受土壤理化指标影响较大, 而受环境和地形因子影响较小。

关键词: 云南桉树引种区; 林地类型; 土壤碳; 影响因素; 冗余分析

中图分类号: S714;X833

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2024)01-0063-10

我国二十大报告中指出, 要积极稳妥推进碳达峰和碳中和^[1]。土壤碳代表着地球陆地生态系统中最大的碳储量^[2], 其中约 50% 的有机碳储存在森林土壤中^[3], 高达 787 Pg^[4]。森林土壤有机碳主要分布于土层 1 m 深度以内, 约占陆地土壤碳库的 40%^[4]。有研究表明, 如果 100 cm 深的土壤碳含量增加 4‰, 就能抵消当前 CO₂ 的净排放, 从而

实现相对“零排放”^[5]。因此, 研究森林土壤有机碳特征变化是维持碳平衡和调节碳循环的关键一环。

目前, 对森林土壤碳含量变化的研究因研究尺度、指标和角度不同而存在差异。研究尺度主要从国家^[6-8]和区域^[9-10]的宏观尺度、不同林地类型实地取样分析的局部尺度^[11-12]展开; 研究指标主要包括有机碳的含量、质量分数、组分、密度, 以及

收稿日期: 2023-02-03 修回日期: 2023-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目“云南桉树引种区生态系统服务供需演变、耦合机制与平衡调控”(42061052); 云南大学研究生人才培养模式改革计划: 云南大学-云南风蓝项目投资咨询产教融合研究生联合培养基地建设项目 (CZ22622203-2022-28); 云南省产教融合研究生联合培养基地项目: 云南大学-云南省国土资源规划设计研究院产教融合研究生联合培养基地建设项目 (CZ22622203-2022-29); 云南大学专业学位研究生实践创新项目: 桉树大规模引种区土壤持水能力对不同林地类型的响应 (2021Y029)

* 通讯作者: 赵筱青, 博士, 教授, 主要从事土地生态学及国土空间研究。电话:13888949695 Email: xqzhao@ynu.edu.cn

碳储量、碳氮比等指标^[13-18]；研究角度主要从土地利用方式^[19]、人工处理措施^[20]和林地类型^[21]等方面展开对森林土壤碳的研究。研究表明，近几十年的气候变化和人类干扰导致自然生态系统中大量土壤碳流失^[22]，这已成为土壤动态研究中最具有争议的课题^[23]。而森林土壤碳变化主要与造林、树种、轮作^[3]、土地利用方式、气候^[24]、土壤理化性质^[25]及地形^[15]等因素有关。Mathias 等研究表明人工林代替原生林会对土壤碳储量造成负面影响^[3]；Li 等研究发现不同树种造林后土壤碳储量产生明显差异^[24]；Cools 等研究得出欧洲森林树种不同是影响土壤碳氮比的主要因素^[26]。由此可见，土壤有机碳含量在不同林地类型变化情况各异。因此，亟需探明林地类型间土壤有机碳含量的影响因素，这对森林土壤碳库变化预测具有重要意义，也可为提高森林土壤固碳能力和养分有效性提供理论参考^[27]。

云南省作为桉树引种省份之一^[28]，森林资源生物种类繁多、植被类型多样^[29]。然而，针对桉树引种区土壤有机碳含量变化的研究较少且存在争议^[24,30]，其影响因素尚未明确。因此，论文基于大量野外采样数据，选取亚热带地区澜沧县外来树种桉树人工林（*Eucalyptus robusta* Smith plantation forest）、当地特有种思茅松纯林（*Pinus kesiya* var. *langbianensis* pure forest）和天然常绿阔叶林（Evergreen broad-leaf forest）为研究对象，通过单因素和 Duncan 方差分析，揭示不同林地类型在 0~20 cm、20~40 cm 及 40~60 cm 土层土壤有机碳含量分布特征及差异性；在回归分析基础上，利用冗余分析（RDA）探讨 3 种林地类型在 0~60 cm 土层深度土壤有机碳与土壤理化指标、环境及地形因子的相关性，揭示影响不同林地类型土壤有机碳的主要因素及影响程度，以期在当地双碳目标的实现和生态效益评估提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区位于云南省普洱市澜沧拉祜族自治县（99°29′~100°35′ E，22°31′~23°16′ N），地处澜沧江以西，总面积为 8 807 km²，年平均气温 19.1℃，年均降雨量 1 626.5 mm，属亚热带山地季风气候（图 1）。境内海拔高差达 1 936 m，水系纵横交织，均属澜沧江水系，土壤类型以赤红壤

和红壤为主。立体气候明显，干湿季分明。植被类型多样，水平地带性植被属季风常绿阔叶林，垂直地带性植被主要有热带季雨林、热带季风常绿阔叶林、以思茅松为代表的暖热性针叶林、半湿润常绿阔叶林和中山湿性常绿阔叶林。其中桉树人工林主要分布于研究区中部，面积达到 32 514.68 hm²，占县区总面积的 3.73%^[31]。

1.2 实验设计与样品采集

在综合考察植被类型和地形地貌分布的基础上，依据代表性和典型性原则，于 2021 年 3 月在澜沧县选取勐朗镇、东回乡、酒井乡、惠民乡、谦六乡和糯福乡 6 个乡镇共设置 22 块 20 m × 20 m 标准样地，对境内桉树人工林（EP）、思茅松纯林（PK）和常绿阔叶林（EB）3 种主要林地类型进行土壤样品采集（图 1、表 1）。桉树人工林主要分布于研究区中部，参照林样地点均位于桉树人工林附近，采样点土壤类型均为红壤和赤红壤。采样方法为在每块标准样地随机选取 3 个样点进行土壤剖面调查。土壤剖面分三层，即 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm，首先，用容积 100 cm³ 环刀于每个土层中部取样，当天环刀称量质量并密封保存，用于测定土壤密度和土壤孔隙度。同时，在每个环刀采样底相近位置另取土样装入有盖铝盒以供土壤含水量的测定。除此之外，在各土层中部用四分法另取 1 kg 左右的土壤混合均匀后装入布袋，0~20 cm 土层样品以“S”形布点法采集后同样用四分法混合，以避免人为扰动。将布袋土壤样品带回室内晾干后供土壤养分的测定。采样时间避开了当地的雨季，减少了降水对样品的影响。

1.3 室内分析

土壤测定参照国家标准执行。土壤密度依据 LY/T 1215—1999，土壤含水量依据重量法 HJ 613—2011，土粒密度依据 LY/T 1224—1999。pH 值测定参照 NY/T 1377—2007，有机质参照 NY/T 1121.6—2006；水解性氮参照 LY/T 1228—2015 中 4，有效磷参照 NY/T 1121.7—2014，速效钾参照 NY/T 889—2004，全氮参照 LY/T 1228—2015，全磷采用 NY/T 88—1988，全钾参照 NY/T 87—1988。所有指标由具备测试资质的公司实验室测定。

土壤有机碳密度计算公式^[16]为：

$$SOC D_i = SOC_i \times BD_i \times D_i$$

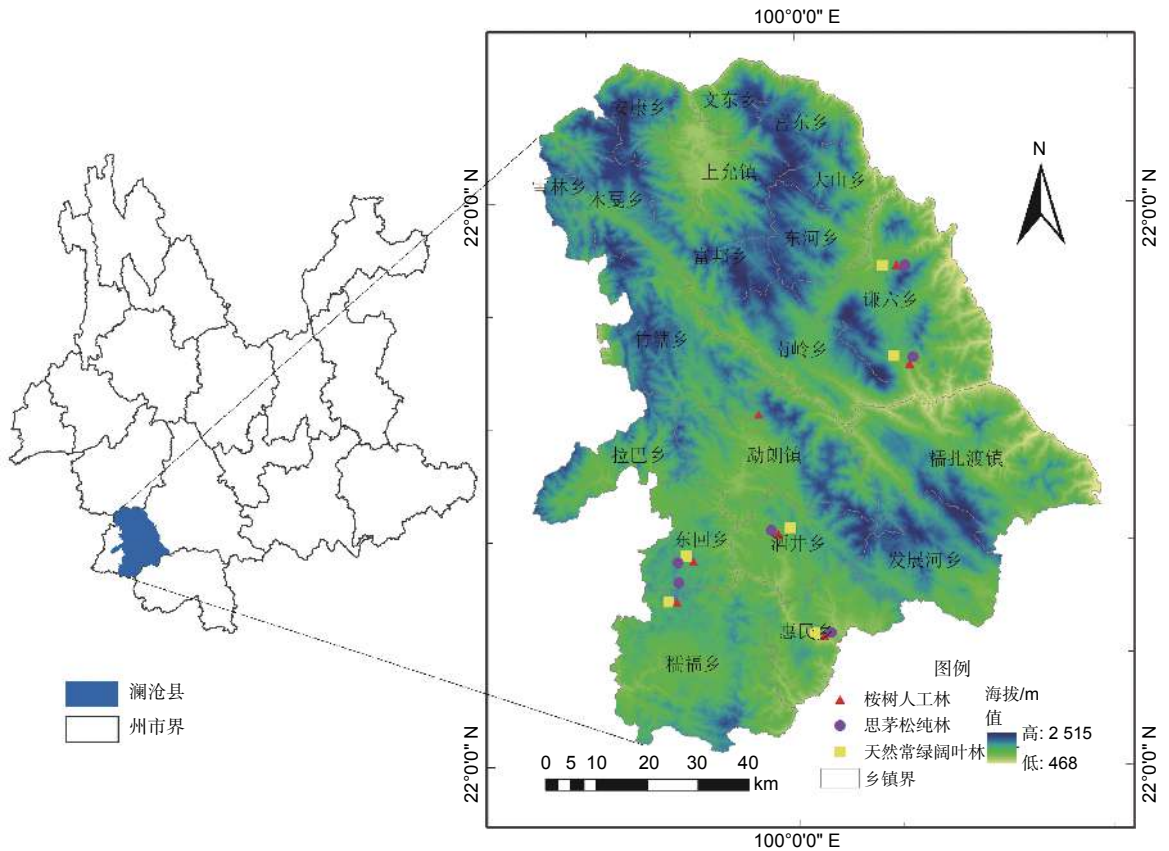


图 1 研究区概况图及采样点分布图

Fig. 1 Overview map of the study area and distribution of sampling sites

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic situation of sample plot

林地类型 Woodland type	样地编号 Sample site number	样地数 Number of sample plots/plot	海拔 Altitude/m	年均相对湿度 Annual average relative humidity/%	年均温度 Average annual temperature/°C	年降水量 Annual rainfall/mm	坡度 Slope/(°)	坡向 Slope direction
桉树人工林 <i>Eucalyptus robusta</i> Smith plantation forest	EP	7	1 236~1 617	72~79	18~20	75~127	7~23	阳坡 阴坡 半阴坡
思茅松纯林 <i>Pinus kesiya</i> var. <i>langbianensis</i> pure forest	PK	8	1 279~1 693	72~79	18~19	76~128	3~29	阴坡 半阳坡
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaf forest	EB	7	1 344~1 659	72~79	18~20	75~128	11~24	阳坡 半阳坡 半阴坡

式中: $SOCD_i$ 和 SOC_i 分别代表第 i 层土壤有机碳密度 $/(kg \cdot m^{-2})$ 和含量 $/(g \cdot kg^{-1})$; BD_i 为第 i 层的土壤密度 $/(g \cdot cm^{-3})$; D_i 为第 i 层的土层厚度 $/m$, 实验设置土层厚度均为 $0.2 m$ 。

1.4 数据处理

所有数据经 Excel 2016 预处理后, 运用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析 (one-way ANOVA) 及

Duncan 法显著性检验 ($\alpha=0.05$), 采用 Canoco 5.0 进行前向选择和冗余分析, 采用 ArcMap 10.5 和 Origin 2022 进行作图。

2 结果分析

2.1 不同林地类型土壤有机碳分布特征

从水平层面看, $0 \sim 60 cm$ 土层, EB 分别与

EP 和 PK 土壤有机碳含量具有显著差异性 ($P < 0.05$)。3 种林地类型土壤有机碳含量变化范围为 14.89~22.05 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 2), 有机碳含量表现为 EB (22.05 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > EP (17.72 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > PK (14.89 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。其中, EB 土壤有机碳含量分别高出 EP 和 PK 土壤有机碳含量的 24% 和 48%。3 种林地类型土壤有机碳含量空间变异系数介于

55.58%~72.97%, 均属中等程度变异^[32], 表现为 EP (72.97%) > PK (62.87%) > EB (55.58%), 说明 EP 林下土壤有机碳空间异质性较强。经偏度、峰度计算和 K-S 检验, P 值接近 0.05, 但在峰度和偏度绝对值分别小于 10 和 3 的情况下, 3 种林地类型土壤有机碳含量基本服从正态分布。

表 2 不同林地类型土壤有机碳含量统计特征

Table 2 Statistical characteristics of soil organic carbon content in different forest land types

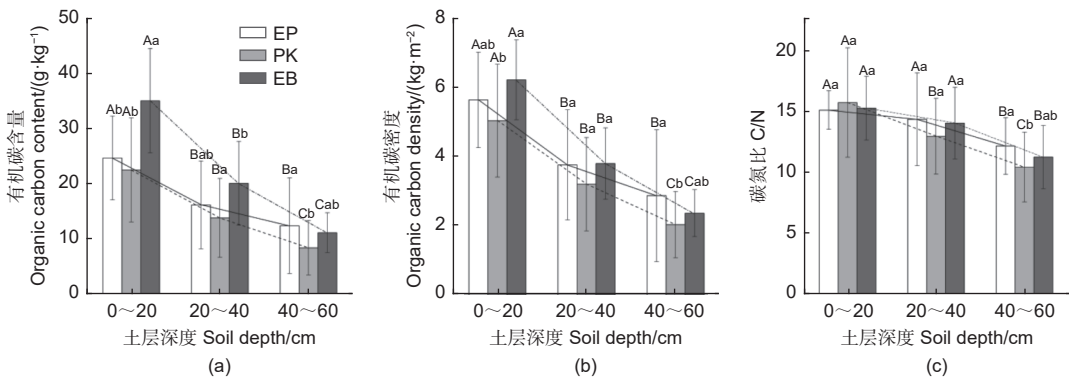
林地类型 Woodland type	平均值 Mean value/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准差 Standard deviation	最大值 Max value/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	最小值 Min. value/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变异系数 Variation Coefficient /%	峰度 Kurtosis	偏度 Skewness	P_{K-S}
EP	17.72b	9.49	25.63	7.35	72.97	0.81	1.03	0.074
PK	14.89b	9.36	41.54	2.86	62.87	0.14	0.83	0.000
EB	22.05a	12.25	55.28	4.29	55.58	0.21	0.88	0.005

注: 表中不同小写字母表示不同林地类型土壤有机碳含量差异显著 ($P < 0.05$)

Notes: different letters indicate significant differences in soil organic carbon content of varied vegetation types ($P < 0.05$)

从垂直剖面看, 3 种林地类型土壤有机碳含量垂直分布特征明显 (图 2a)。EP 在 0~20 cm 土层分别与 20~40 cm 和 40~60 cm 土层土壤有机碳含量具有显著差异性, 而 PK 和 EB 在 3 种土层间均具有显著差异性。分土层看, 0~20 cm 土层, EB 分别与 EP 和 PK 土壤有机碳含量具有显著差异性, 而 EP 和 PK 间不具有显著差异性; 20~40 cm 土层, 仅 PK 与 EB 土壤有机碳含量具有显著差异性, 而 EP 与这两种林地类型均差异不显著; 40~60 cm 土层, EP 仅与 PK 土壤有机碳含量差异性显著, 而 EB 与这两种林地类型均差异

不显著。3 种林地类型土壤有机碳含量在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层均表现为 EB > EP > PK, 在 40~60 cm 土层表现为 EP > EB > PK。0~20 cm 土层土壤有机碳含量分别占整个采样土壤剖面的 40%、50% 和 53%, 占比最高, 呈现明显的表层聚集特征, 以 EB 最为显著。随着土壤深度增加, 3 种林地类型土壤有机碳含量均呈下降趋势, 从表层 0~20 cm 到中层 20~40 cm 下降速度较快, 而中层 20~40 cm 到深层 40~60 cm 下降速度变缓, 以 EB 下降最快, 其表层土壤有机碳含量约是深层的 3.15 倍, 极差达 23.88 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 而 EP 下



注: 图中不同大写字母表示同一林地类型不同土层之间差异显著, 不同小写字母表示同一土层不同林地类型之间差异显著 ($P < 0.05$)

Notes: Different capital letters in the graph indicate significant differences between different soil layers of the same stand type, and different lowercase letters indicate significant differences between different stand types of the same soil layer ($P < 0.05$)

图 2 不同林地类型不同土层深度土壤碳特征

Fig. 2 Soil carbon characteristics at different soil depths in different forest land types

降最慢, 表层和深层土壤有机碳含量的极差仅为 $12.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.2 不同林地类型土壤有机碳密度分布特征

从水平层面看, $0 \sim 60 \text{ cm}$ 土层, 3 种林地类型土壤有机碳密度整体表现为 EB (平均 $4.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) $>$ EP (平均 $4.09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) $>$ PK (平均 $3.42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$), EB 有机碳密度均值分别高出 EP 0.73% 和 PK 20.47% (图 2b)。从垂直剖面看, EP 土壤有机碳密度在 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 分别与 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 和 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层具有显著差异性, 而 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 和 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层之间不具有显著差异性。 PK 和 EB 土壤有机碳密度 3 个土层间均具有显著性差异 ($P < 0.05$), 表明 3 种林地类型土壤有机碳密度垂直分布差异较大。分土层看, $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层, PK 与 EB 土壤有机碳密度具有显著差异性, 而 EP 与其他两种林地类型差异均不显著; $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层, 3 种林地类型之间土壤有机碳密度差异均不显著; $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层, EP 与 PK 土壤有机碳密度差异性显著, 而 EB 与其他两种林地类型差异均不显著 ($P < 0.05$), 表明同一土层之间各林地类型土壤有机碳密度差异较小。在 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层, 3 种林地类型土壤有机碳密度与有机碳含量表现出一致的表层聚集现象, 分别占整个土壤剖面的 46% 、 49% 、 50% 。随着土壤深度增加, 3 种林地类型土壤有机碳密度均逐渐降低。其中, 以 EB 下降幅度最大, 表层约是深层的 2.63 倍, 极差达 $3.85 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; 而 EP 变化幅度最小, 极差为 $2.76 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2.3 不同林地类型土壤 C/N 分布特征

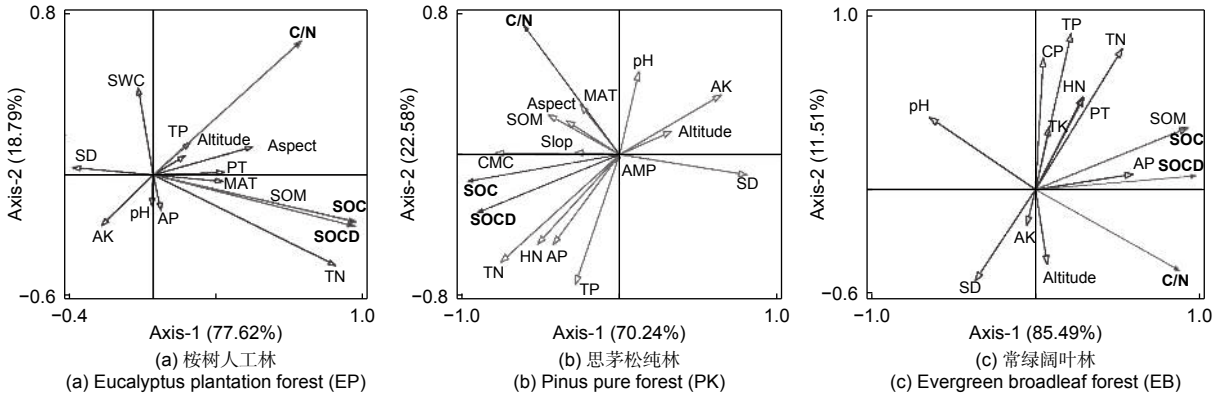
从水平层面看, $0 \sim 60 \text{ cm}$ 土层, 3 种林地类型土壤 C/N 整体表现为 EP (平均 13.82) $>$ EB (平均 13.47) $>$ PK (平均 12.99), 以 EP 最高, 分别高出 EB 和 PK 2.60% 和 6.39% 。而 PK 土壤 C/N 最低, 表明思茅松林土壤有机质矿化速率高, 可为土壤提供氮素的能力优于其他两种林地类型, 而土壤碳储量低于其他两种林地类型。从垂直剖面看, PK 不同土层间土壤 C/N 差异显著; EP 和 EB 土壤 C/N 在 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层分别与 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 和 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层差异显著, 而 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 和 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层之间不具有显著差异性, 表明 PK 土壤 C/N 垂直分异规律较明显。分土层看, $0 \sim 20 \text{ cm}$ 和 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层, 3 种林地类型土壤 C/N 差异均不显著; $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层, EP 和 PK 土壤

C/N 差异显著, 但均与 EB 不具有显著差异性, 表明两种人工林深层土壤 C/N 差异性较大。随着土壤深度增加, 3 种林地类型土壤 C/N 呈降低趋势, 变化幅度均表现为 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 到 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层下降平缓, $20 \sim 40 \text{ cm}$ 到 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层下降速度加快。

2.4 不同林地类型土壤碳特征影响因素分析

以 3 种林地类型有机碳 (SOC)、有机碳密度 (SOCD) 及碳氮比 (C/N) 作为响应变量, 以土壤理化指标、环境及地形因子作为解释变量, 最终选取了 21 个影响因子。其中土壤理化指标包括土壤含水量、毛管持水量、土壤密度、总孔隙度、毛管孔隙度、pH、有机质、水解性氮、全氮、速效钾、全钾、速效磷及全磷; 环境因子包括年降雨量、年均温度和年均相对湿度; 地形因子包括经度、纬度、海拔、坡度和坡向。在进行冗余分析 (RDA) 之前, 首先通过 SPSS 26.0 共线性检验删除了强烈共线性因子和因子贡献率小于等于 0.1 的因子, EP 、 PK 、 EB 土壤碳特征的影响因子最终分别保留 12、14 和 12 个, 如图 3 所示。进行前向选择后, 3 种林地类型所保留的因子分别解释了 96.41% 、 92.82% 和 97.00% 的数据变异, 数据可信性较高。RDA 结果示意图表示: 因子箭头在排序轴上投影的长度反映该因子对响应变量的解释量, 投影长度越长, 解释率越高, 反之则越低; 箭头夹角可以反映出该因子与土壤有机碳特征的相关性, 夹角小于 90° 为正相关, 反之为负相关, 夹角越小相关性越强^[33]。

EP 的轴 1 的解释率为 77.62% , 轴 2 的解释率为 18.79% (图 3a)。土壤有机质、全氮、坡向和土壤密度在 EP 土壤有机碳含量和密度的投影长度最长, 说明对 EP 土壤有机碳含量和密度的解释力较强。其中, 土壤密度与有机碳含量和密度箭头连线方向相反, 因此与 EP 土壤有机碳含量和密度呈负相关关系, 即随着土壤密度的增大, 土壤有机碳含量和密度降低; 而土壤有机质、全氮和坡向与土壤有机碳含量和密度的夹角小于 90° , 呈正相关关系。其中以有机质夹角最小, 表明其与 EP 土壤有机质含量和密度相关性最大; 影响因子在土壤 C/N 上投影最长的为土壤含水量、有机质、速效钾和坡向, 表明其对 EP 土壤 C/N 解释性较高。其中, C/N 与速效钾夹角大于 90° 呈负相关关系, 与土壤含水量、有机质和坡向夹角小于 90° 呈正相关关系, 以坡向夹角最小, 表明坡向与 EP 土壤



注：土壤因子包括土壤含水量（SWC）、毛管持水量（CMC）、土壤密度（SD）、总孔隙度（PT）、毛管孔隙度（CP）、pH、有机质（SOM）、水解性氮（HN）、全氮（TN）、速效钾（AK）、全钾（TK）、速效磷（AP）及全磷（TP），环境因子包括年降雨量（AR）、年均温度（MAT）和年均相对湿度（MRH），地形因子包括经度（Longitude）、纬度（Latitude）、海拔（Altitude）、坡度（Slope）和坡向（Aspect）

Notes: Soil factors include soil water content (SWC), capillary water holding capacity (CMC), soil density (SD), total porosity (PT), capillary porosity (CP), pH, organic matter (SOM), hydrolytic nitrogen (HN), total nitrogen (TN), fast-acting potassium (AK), total potassium (TK), fast-acting phosphorus (AP), and total phosphorus (TP), and environmental factors include annual rainfall (AR), mean annual temperature (MAT), and mean annual relative humidity (MRH), and the topographic factors include longitude, latitude, altitude, slope and aspect

图 3 不同林地类型冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis of different forest land types

C/N 变化相关性最大。

PK 的轴 1 解释率为 70.24%，轴 2 的解释率为 22.58%（图 3b）。在 PK 有机碳含量和密度上投影最长的影响因子依次为土壤毛管持水量、全氮、水解性氮、有效磷、全磷、土壤密度、速效钾，表明以上 7 个因子对 PK 土壤有机碳含量和密度解释能力较强。其中，土壤密度和速效钾与 PK 有机碳含量和密度夹角大于 90° ，因此，二者与有机碳含量和密度呈负相关关系。而土壤毛管持水量、全氮、水解性氮、有效磷和全磷与有机碳含量和密度夹角小于 90° ，呈正相关关系。以毛管持水量夹角最小，表明其与 PK 土壤有机碳含量和密度相关性最大。在土壤 C/N 上投影最长的解释因子依次为土壤有机质、pH、毛管持水量、土壤密度、坡向和年均温度，说明上述 6 个因子对 PK 土壤有机碳含量和密度解释性较强。土壤密度与 C/N 箭头连线方向夹角大于 90° ，呈负相关关系；而土壤有机质、pH、毛管持水量、坡向和年均温度与 C/N 夹角均小于 90° ，呈正相关关系，以年均温度夹角最小，说明其与土壤 C/N 相关性最大。

EB 的轴 1 解释率为 85.49%，轴 2 的解释率为 11.51%（图 3c）。土壤有机质、全氮、水解性氮、全磷、有效磷、总孔隙度、pH 和土壤密度在 EB 土壤有机碳含量和密度方向上的投影最大，说明对 EB 土壤有机碳含量和密度解释能力较强。其中，土壤 pH 和土壤密度与 EB 土壤有机碳含量和

密度夹角大于 90° ，说明二者与土壤有机碳含量和密度呈负相关关系。而土壤有机质、全氮、水解性氮、全磷、有效磷、总孔隙度与有机碳含量和密度夹角小于 90° ，表明与土壤有机碳含量和密度呈正相关关系，以土壤有机质与有机碳含量、有效磷与土壤有机碳密度夹角最小。土壤有机质、有效磷、pH 和海拔在土壤 C/N 上投影最长，表明 4 个因子能很好解释土壤 C/N 变化情况。其中，土壤 C/N 与 pH 的夹角大于 90° 呈负相关关系，与土壤有机质、有效磷和海拔夹角小于 90° ，呈正相关关系，以海拔与 C/N 夹角最小，表明两者相关性最大。

总之，土壤有机质、全氮、全磷、水解性氮和土壤密度是 3 种林地类型土壤有机碳含量和密度的主要影响因子，而环境和地形因子对其产生的影响较小。土壤 C/N 的主要影响因素为土壤有机质、pH 和坡向，环境因子对其影响较小。

3 讨论

3.1 桉树引种区不同林地类型土壤碳变化

森林土壤碳库是森林生态系统碳库的主体，其含量的高低是表征土壤质量状况的重要因子^[15,34]。有机碳密度是衡量单位面积内一定深度土壤中有机碳储量大小的指标^[35]。3 种林地类型土壤碳含量和密度在 0~60 cm 土层深度差异显著（ $P < 0.05$ ），碳含量处于 $14.89 \sim 22.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围，有机碳含量均高于全国森林土壤有机碳含量（ $11.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）^[36]；

有机碳密度处于 $3.42\sim 4.12\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间, 以思茅松纯林最低, 表明常绿阔叶林和桉树人工林土壤在碳汇方面具有优势, 而思茅松纯林碳汇功能较弱。经实地考察和其他学者研究表明, 思茅松纯林相较于常绿阔叶林的林下植被多样性丰富度小^[37], 而土壤有机碳主要来源于林下植被的凋落物^[38], 这是造成该地区常绿阔叶林比思茅松纯林土壤有机碳含量高的主要原因。桉树人工林土壤有机碳含量和密度介于两者之间, 说明桉树人工林比思茅松纯林林下植物多样性丰富度高, 这与实地考察结果一致。从垂直角度看, 不同林地类型土壤有机碳含量和密度呈现出明显的表层聚集现象且差异显著 ($P<0.05$)。出现该现象的一个主要原因是植被类型的根系垂直分布格局和光合产物的分配共同决定着土壤有机碳的垂直分布特征。根系的分布深度决定了各土层有机碳含量^[23], 土壤表层主要分布细根, 其自身不仅可以存储有机碳还可以将死亡根系中的有机碳转移到土壤中^[39]; 另一个是在表层土壤中有大量的植物凋落物归还土壤使得有机质增多^[40], 而且表层土壤微生物数量多, 土壤透水透气性好, 为凋落物提供了适宜的分解环境, 进而丰富了表层土壤碳源^[11], 这与李帅锋^[21]、滕秋梅^[41]等结果一致。相比于表层土壤, 深层土壤接收到植物凋落物分解的有机质较少, 环境较封闭, 因而有机碳含量和密度降低。

土壤有机碳氮含量的比值 (C/N) 指示植被凋落物对土壤有机碳氮的积累贡献, 表征土壤有机质分解或积累的状态, 碳氮比越小, 土壤有机质分解的越快^[42-43]。研究区 3 种林地类型在 0~60 cm 土层深度 C/N 平均值分别为桉树人工林 (13.82)、常绿阔叶林 (13.47)、思茅松纯林 (12.99), 均高于中国土壤碳氮均值 (12.01)^[44], 表明该地区 3 种林地类型有机质分解及矿化程度较低^[43], 有利于为土壤累积氮元素^[45]。

3.2 桉树引种区不同林地类型土壤碳变化影响因素

土壤理化因子直接影响土壤碳含量。地形和气候因素能够影响水热和物质的再分配, 进而影响土壤碳含量的空间分布^[44]。从冗余分析结果来看, 不同林地类型 0~60 cm 林下土壤有机碳含量和密度影响因素基本一致。桉树人工林地土壤有机碳含量和密度与有机质、全氮和坡向呈正相关关系, 与土壤密度呈负相关关系。碳氮循环之间存在耦合关系, 有机质中富含丰富的微生物, 全氮含量较高会降低土壤微生物的活性, 加之坡度大的区域人为干

扰较少, 有利于有机碳的积累^[46-47]。而土壤密度较大的土壤质地相对紧实, 通气透水性能较差, 有机质分解活动受到抑制, 有机碳含量相对较低, 这与杜雪^[11]等研究结果一致。思茅松纯林有机碳含量和密度与毛管持水量、全氮、水解性氮、有效磷和全磷呈正相关关系, 与土壤密度和速效钾呈负相关关系。毛管持水量是衡量土壤通透性和水分的重要指标, 也是影响微生物活动的主要因素, 进而影响土壤有机碳积累^[25]。氮和磷元素通过增加合成有机质底物的输入和土壤微生物的活性增加土壤碳含量^[48]。杜雪^[11]等表明钾元素与土壤碳含量关联较弱, 这与本研究不一致, 可能是思茅松林地的特殊性导致, 还需进一步深入研究。天然常绿阔叶林有机碳含量和密度与有机质、全氮、水解性氮、全磷、有效磷和总孔隙度呈正相关关系, 与 pH 和土壤密度呈负相关关系。总孔隙度大的土壤结构更疏松, 有利于雨水下渗^[49], 微生物活动更强烈进而增加有机碳积累。土壤 pH 值过大或过小都会抑制土壤微生物的活性从而降低有机碳的转化速率^[50], 与陈心桐^[51]等在研究北方自然生态系统时得出 pH 与有机碳呈负相关关系的结论一致。不同林地类型 C/N 的主要影响因素除了上述的坡向和土壤理化性质之外, 还受到了地形因子海拔和环境因子年均温的影响。随着海拔的升高, 气温和土温降低, 微生物分解速率减缓更有利于土壤碳氮的积累, 这与吕文强^[52]、钱琦^[53]等研究结果一致。因此, 在进行小范围森林土壤有机碳影响研究时, 应主要考虑土壤理化性质指标。

4 结论

(1) 0~60 cm 土层 3 林地类型土壤有机碳含量和密度差异显著, 而土壤 C/N 差异不显著。EB 土壤有机碳含量最高, 分别高出 EP 和 PK 林地类型的 24% 和 48%; EB 土壤有机碳密度最高, 分别高出 EP 和 PK 林地类型的 0.73% 和 20.47%。EP 土壤 C/N 最高, EP 分别高出 EB 和 PK 林地类型的 2.60% 和 6.39%。

(2) 3 种林地类型有机碳含量和密度在表土层占比均最高, 以 EB 最显著; 土壤 C/N 以 EP 最大。土壤有机碳含量、密度和 C/N 均随着土壤深度的增加均呈现下降趋势。

(3) 本文选取的影响因子可以解释 3 种林地类型土壤碳特征的 96.41%、92.82% 和 97.00%

的数据变异。土壤有机质、全氮、水解性氮、全磷及土壤密度是 3 种林地类型有机碳含量和密度的主要影响因子, 环境和地形因子对其产生的影响较小。C/N 的主要影响因子为土壤有机质、pH 和坡向, 环境因素对其影响较小。

参考文献:

- [1] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗[R]. 北京: 人民大会堂, 2022.
- [2] CHEN S, WANG W, XU W T, *et al.* Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(16): 4027-4032.
- [3] MAYER M, PRESCOTT C E., ABAKER W E A, *et al.* Tamm review: influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: a knowledge synthesis[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 466: 118127.
- [4] DIXON R K, SOLOMO A M, BROWN S, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [5] 程 琨, 潘根兴. “千分之四全球土壤增碳计划”对中国的挑战与应对策略[J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12 (5): 457-464.
- [6] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [7] 王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算[J]. *地理研究*, 1998, 18 (4): 349-356.
- [8] YANG Y, MOHAMMAT A, FENG J, *et al.* Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 84(2): 131-141.
- [9] 徐耀文, 姜仲茂, 武 锋, 等. 翠亨湿地无瓣海桑人工林土壤有机碳分布特征及与土壤理化指标相关性[J]. *林业科学研究*, 2020, 33 (5): 62-68.
- [10] 聂浩亮, 薄慧娟, 张润哲, 等. 北京海坨山典型林分土壤有机碳含量及有机碳密度垂直分布特征[J]. *林业科学研究*, 2020, 33 (6): 155-162.
- [11] 杜 雪, 王海燕, 邹佳何, 等. 长白山北坡冷杉阔叶混交林土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2022, 31 (4): 663-669.
- [12] 丁金梅, 王维珍, 米文宝, 等. 宁夏草地土壤有机碳空间特征及其影响因素分析[J]. *生态学报*, 2023, 43 (5): 1913-1922.
- [13] 简尊吉, 倪妍妍, 徐 瑾, 等. 马尾松人工林土壤碳氮磷生态化学计量学特征的纬度变化[J]. *林业科学研究*, 2022, 35 (2): 1-8.
- [14] 王 越, 栾亚宁, 王 丹, 等. 油松林土壤有机碳储量变化及其影响因素[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, 38 (5): 1023-1032.
- [15] 马姜明, 梁士楚, 杨栋林, 等. 桂北地区桉树林及其他三种森林类型土壤有机碳含量及密度特征[J]. *生态环境学报*, 2013, 22 (8): 1282-1287.
- [16] 曹琪琪, 肖辉杰, 刘 涛, 等. 乌兰布和沙漠东北部不同耕作年限农田土壤有机碳密度及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2022, 33 (10): 2628-2634.
- [17] 徐海东, 苑海静, 熊 静, 等. 杉阔异龄复层林对土壤团聚体稳定性和有机碳及养分储量的影响[J]. *林业科学研究*, 2020, 33 (3): 107-115.
- [18] 刘玉林, 朱广宇, 邓 蕾, 等. 黄土高原植被自然恢复和人工造林对土壤碳氮储量的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29 (7): 2163-2172.
- [19] 唐国勇, 李 昆, 孙永玉, 等. 土地利用方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. *林业科学研究*, 2011, 24 (6): 754-759.
- [20] 张雨洁, 王 斌, 李正才, 等. 施肥措施对古香榉林地土壤活性有机碳和养分的影响[J]. *林业科学研究*, 2019, 32 (2): 87-93.
- [21] 李帅锋, 苏建荣, 刘万德, 等. 思茅松人工林土壤有机碳和氮储量变化[J]. *林业科学研究*, 2015, 28 (6): 810-817.
- [22] CROWTHER T W, TODD-BROWN K E, ROWE C W, *et al.* Quantifying global soil carbon losses in response to warming[J]. *Nature*, 2016, 540(7631): 104-108.
- [23] 周 莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20 (1): 99-105.
- [24] LI D J, NIU S L, LUO Y Q. Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: a meta-analysis[J]. *New Phytol*, 2012, 195(1): 172-181.
- [25] 刘姝媛, 刘月秀, 叶金盛, 等. 广东省桉树人工林土壤有机碳密度及其影响因子[J]. *应用生态学报*, 2010, 21 (8): 1981-1985.
- [26] COOLS N, LARS V, BRUNO D V, *et al.* Tree species is the major factor explaining C: N ratios in european forest soils[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 311: 3-16.
- [27] GOYDARAGH M G, RUHOLLAH T M, ALI A J, *et al.* Using environmental variables and fourier transform infrared spectroscopy to predict soil organic carbon[J]. *Catena*, 2021, 202: 105280.
- [28] 潘嘉雯, 林 娜, 何 茜, 等. 我国3个桉树人工林种植区生产力影响因素[J]. *生态学报*, 2018, 38 (19): 6932-6940.
- [29] 云南省林业厅. 云南省森林资源调查报告(2016年)[M]. 昆明: 云南省科技出版社, 2017.
- [30] 梁关锋, 王纪杰, 俞元春, 等. 不同林龄桉树人工林土壤有机碳的变化[J]. *贵州农业科学*, 2011, 39 (9): 92-95.
- [31] 赵筱青, 易 琦. 人工林的生态环境效应与景观生态安全格局——以云南桉树引种区为例[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [32] 赵筱青, 和春兰, 许新惠. 云南山地尾叶桉类林引种对土壤物理性质的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, 21 (11): 1810-1816.
- [33] LEPS J, SMILAUER P. Multivariate analysis of ecological data using canoco[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 50-51.
- [34] 刘林馨, 王 健, 杨晓杰, 等. 大兴安岭不同森林群落植被多样性对土壤有机碳密度的影响[J]. *生态环境学报*, 2018, 27 (9): 1610-1616.
- [35] WEI R, BANGER K, TAO B, *et al.* Global pattern and change of cropland soil organic carbon during 1901-2010: roles of climate, atmospheric chemistry, land use and management[J].

- Geography and Sustainability, 2020, 1(1): 59-69.
- [36] 王亚东, 魏江生, 周梅, 等. 大兴安岭南段杨桦次生林土壤化学计量特征[J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1056-1064.
- [37] 涂丹丹, 刘蔚漪, 李娟, 等. 哀牢山西坡6种典型森林群落及物种多样性研究[J]. 西部林业科学, 2020, 49(6): 76-84.
- [38] 王光州, 贾吉玉, 张俊伶. 植物-土壤反馈理论及其在自然和农田生态系统中的应用研究进展[J]. 生态学报, 2021, 41(23): 9130-9143.
- [39] FINER L, OHASHI M, NOGUCHI K, *et al.* Factors causing variation in fine root biomass in forest ecosystems[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261(2): 265-277.
- [40] 赵俊勇, 孙向阳, 李素艳, 等. 辽宁省老秃顶子不同林分类型土壤有机碳储量和碳氮垂直分布特征[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(10): 65-68 + 78.
- [41] 滕秋梅, 沈育伊, 徐广平, 等. 桂北不同林龄桉树人工林土壤碳库管理指数和碳组分的变化特征[J]. 广西植物, 2020, 40(8): 1111-1122.
- [42] 张彦军, 郭胜, 南雅芳, 等. 黄土丘陵区小流域土壤碳氮比的变化及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1214-1223.
- [43] 刘进, 李娟, 龙健, 等. 西南喀斯特区土壤生态化学计量与酶活性的海拔特征[J]. 森林与环境学报, 2022, 42(2): 113-122.
- [44] 罗艳, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木河上游荒漠区4种灌木植物叶片与土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8326-8335.
- [45] 张智勇, 王瑜, 艾宁, 等. 陕北黄土区不同植被类型土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(11): 56-63.
- [46] LU X K, MAO Q G, WANG Z H, *et al.* Long-term nitrogen addition decreases soil carbon mineralization in an N-rich primary tropical forest[J]. Forests, 2021, 12(6): 734.
- [47] 刘潘伟, 高鹏, 刘晓华, 等. 大岗山流域土壤碳氮要素空间分布特征及影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(2): 73-79.
- [48] 方华军, 耿静, 程淑兰, 等. 氮磷富集对森林土壤碳截存的影响研究进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 1-11.
- [49] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 等. 南亚热带不同植被恢复模式下土壤理化性质[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2479-2486.
- [50] 张鹏, 张涛, 陈年来. 祁连山北麓山体垂直带土壤碳氮分布特征及影响因素[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 518-524.
- [51] 陈心桐, 徐天乐, 李雪静, 等. 中国北方自然生态系统土壤有机碳含量及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1133-1140.
- [52] 吕文强, 周传艳, 闫俊华, 等. 贵州省主要森林类型土壤有机碳密度特征及其影响因素[J]. 地球与环境, 2016, 44(2): 147-153.
- [53] 钱琦, 钱壮壮, 葛晓敏, 等. 武夷山不同海拔森林土壤碳氮特征[J]. 森林与环境学报, 2022, 42(3): 225-234.

Soil Carbon Changes and Its Influencing Factors in Major Forest Types in the Subtropical Area of Yunnan Province

ZHAO Qiao-qiao¹, ZHAO Xiao-qing², HUANG Pei¹, PU Jun-wei¹, ZHOU Shi-jie², FENG Yan²,
GU Ze-xian^{1,3}, SHI Xiao-qian⁴, CHU Bo-cheng⁵

(1. Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China; 2. College of Earth Science, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China; 3. Nujiang Forestry and Grassland Administration, Lushui 673100, Yunnan, China; 4. Yunnan Land and Resources Vocational College, Yuxi 652500, Yunnan, China; 5. Yunnan Fenglan Group, Kunming 650206, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] As the largest carbon pool in terrestrial ecosystems, changes in forest soil organic carbon (SOC) have a significant impact on the global carbon cycle. By exploring the differences in SOC in different forest types and its influencing factors, we aim to provide a theoretical basis for forest carbon sink management. [Method] *Eucalyptus* plantation forest (EP), *Pinus* pure forest (PK) and evergreen broadleaf forest (EB) in Lancang County were used in this study. ANOVA and redundancy analysis were used to analyze SOC, soil organic carbon density (SOCD) and carbon to nitrogen ratio (C/N) levels and vertical distribution patterns of the three forest land types at different depths of 0~20 cm, 20~40 cm and 40~60cm and reveal their main influencing factors. [Result] (1) There were significant differences in SOC among the three forest types in the 0-60 cm soil layer. Its variation range was 14.89~22.05 g·kg⁻¹, which was higher than the national forest soil organic carbon level, with EB forest having the highest (22.05 g·kg⁻¹); The SOCD ranged from 3.42 to 4.12 kg·m⁻², with the highest in EB forests (4.12 kg·m⁻²); The soil C/N ranged from 12.99 to 13.82, with EP forests being the highest (13.82); (2) As the soil layer deepens, the SOC, SOCD, and C/N of the three types of forest land showed a downward trend, with the EB soil organic carbon content and density showing the most obvious downward trend; (3) The organic carbon content and density of the three types of forest land were mainly affected by soil density, organic matter, total nitrogen, hydrolytic nitrogen, and total phosphorus, with little impact from environmental and topographical factors; The main influencing factors of soil C/N were organic matter, pH, and aspect, while environmental factors had a relatively small impact on it. [Conclusion] The soil of EP and EB have advantages in carbon sink, while the carbon sink function of PK is weaker. Soil carbon content is more influenced by soil physico-chemical indexes and less influenced by environmental and topographic factors.

Keywords: Yunnan *Eucalyptus* introduction area; forestland type; soil carbon; influencing factors; redundancy analysis.

(责任编辑: 张 研)