

DOI: 10.20103/j.stxb.202501070053

肖晓悦, 林松, 支裕优, 童根平, 傅伟军. 浙江省常绿阔叶林碳密度空间变异特征及其驱动因子. 生态学报, 2025, 45(19): - .
Xiao X Y, Lin S, Zhi Y Y, Tong G P, Fu W J. Space variation characteristics and driving factors of carbon density of evergreen broad-leaved forests in Zhejiang Province. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(19): - .

浙江省常绿阔叶林碳密度空间变异特征及其驱动因子

肖晓悦¹, 林松², 支裕优¹, 童根平³, 傅伟军^{1,*}

¹ 浙江农林大学环境与资源学院, 杭州 311300

² 浙江省公益林和国有林场管理总站, 杭州 310020

³ 浙江清凉峰国家级自然保护区管理局, 临安 311321

摘要: 森林生态系统在全球碳循环中发挥着关键作用, 而森林固碳被认为是减缓全球变暖的重要途径。通过对浙江省 156 个常绿阔叶林森林样地进行采样分析, 结合植被、土壤等自然因子和社会经济因子, 基于地统计学、Pearson 相关性、RF、SEM 方法, 揭示浙江省常绿阔叶林的地上植被碳密度、枯落物碳密度和土壤有机碳密度的分配特征与驱动因子。浙江省常绿阔叶林生态系统地上植被碳密度的平均值为 39.60 tC/hm², 枯落物碳密度平均值为 2.18 tC/hm², 土壤有机碳密度(0—30cm)的平均值为 85.81 tC/hm², 碳密度较全国及同纬度省份平均水平偏低。半方差变异函数揭示三者的块基比分别为 73.14%、32.14%、58.91%, 均呈现中等程度空间变异, 受到随机因素和结构性因素的双重影响; 浙江省地上植被碳密度由西向东逐渐降低, 枯落物碳密度由北向南递减, 中部过渡较为平缓, 土壤有机碳密度由西南向东北递减, 西南地区 and 东北地区差异显著。通过量化驱动因素的影响效应, 发现地上植被碳密度的主要驱动因素为郁闭度、平均林龄和海拔, 枯落物碳密度的主要驱动因素为速效钾和枯枝叶厚度, 土壤有机碳密度的主要驱动因素为土壤速效氮、容重和海拔; 社会经济因素对所有组分碳密度均有负影响。本研究结果为维持和提升浙江省常绿阔叶林碳汇功能提供了理论依据。

关键词: 碳密度; 森林样地数据; 驱动因子; 地统计学分析; 亚热带常绿阔叶林

Space variation characteristics and driving factors of carbon density of evergreen broad-leaved forests in Zhejiang Province

XIAO Xiaoyue¹, LIN Song², ZHI Yuyou¹, TONG Genping³, FU Weijun^{1,*}

¹ College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang Agriculture & Forestry University, Hangzhou 311300, China

² Zhejiang Public Welfare Forest and State Forest Farm Management Station, Hangzhou 310020, China

³ Management Office, Qingliangfeng National Nature Reserve of Zhejiang, Lin'an 311321, China

Abstract: The forest ecosystem plays an important role in the global carbon cycle and is the largest carbon pool in terrestrial systems. Due to the escalating greenhouse effect, forest carbon sequestration is increasingly recognized as a vital strategy to mitigate the climate crisis. Distribution and driving factors of carbon density were examined in 156 evergreen broad-leaved forest sites in Zhejiang Province, China, employing a suite of analytical methods including Geostatistical analysis, Pearson Correlation, RF (Random Forest) and SEM (Structural Equation Modeling). Carbon density data consisted of aboveground live tree biomass carbon density, plant litter carbon density and the soil organic carbon(0—30cm) density, while driving factors consisted of both environmental and socio-economic factors. The results revealed that the average carbon density of the above-ground vegetation in the evergreen broad-leaved forest ecosystem in Zhejiang was 39.60 tC/hm², with litter carbon density and soil organic carbon density averaging 2.18 tC/hm² and 85.81 tC/hm², respectively. These figures are

基金项目: 亚热带森林培育国家重点实验室开放基金项目(SKLSS-KF2022-07)

收稿日期: 2025-01-07; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fuweijun@zafu.edu.cn

comparatively lower than average level of China and those of other provinces at similar latitudes. Spatial analysis revealed that the Nugget/Sill ratios of the three carbon densities were 73.14%, 32.14%, and 58.91%, respectively, indicating moderate spatial variation and dual influence from both random and structural factors. The carbon density of the above-ground vegetation exhibited a gradual decline from west to east, while the plant litter carbon density decreased from north to south, with a smooth transition in the middle. The soil organic carbon density decreased from southwest to northeast, with marked disparities between these two regions. The main driving factors for aboveground live tree biomass carbon included canopy density, forest age and altitude. For plant litter carbon, the main driving factors were available potassium and litter thickness. And for soil organic carbon density, the main driving factors were soil available nitrogen, bulk density and altitude. Socio-economic factors had a negative impact on nearly all the carbon density components. This study provides a theoretical foundation for the conservation and enhancement of carbon sequestration capabilities for the evergreen broad-leaved forests in Zhejiang.

Key Words: carbon density; forest plot data; driving factors; geostatistical analyst; subtropical evergreen broad-leaved forest

森林是重要的碳汇资源库,在陆地生态系统碳循环中扮演着重要角色。森林虽仅占全球陆地面积的31%,但其储存了陆地生态系80%的地上部分碳库和40%的地下部分碳库^[1-2]。森林作为自然的碳汇机制,通过光合作用这一生物学过程,将大气中的CO₂转化为生物量,固定在森林植被和土壤中。这种自然的碳封存方式环境友好且经济高效,在降低大气中CO₂浓度、减缓全球气候变化方面发挥着重要作用^[3]。目前,关于森林生态系统碳储量的研究多倾向于对整个研究区进行系统分析,所得到的结果往往忽略了特定林分的重要性和变异特征,从而限制了对森林碳储量机制的全面理解。森林生态系统中,不同优势树种林分的地上植被碳密度、枯落物碳密度和土壤有机碳密度可能存在显著性差异^[4-6],对特定优势树种展开针对性研究可提高区域碳储量的认知。常绿阔叶林是亚热带湿润地区由常绿阔叶树种组成的地带性森林类型,是森林生态系统的一个重要组成部分^[7]。在我国,常绿阔叶林分布范围、面积和生物多样性均为我国森林植被类型之首,占据了我国国土面积的近四分之一^[8]。常绿阔叶林不仅对于维护生态平衡、保持水土资源具有至关重要的作用,同时也为生物多样性保护和区域碳汇功能提升提供了宝贵的生态资源^[9]。

空间分析方法,如地统计学等,由于具备量化特性并能有效减少抽样过程中的不确定性,同时在降低调查成本方面展现出显著优势,已被广泛应用于研究森林碳储量空间分布格局^[10]。先后有学者利用地统计学结合其他分析方法,对中国亚热带森林碳储量、碳密度开展了研究。基于全国森林资源清查数据和高精度曲面建模方法(HASM),全国尺度的森林碳储量研究显示,我国亚热带森林碳储量的分布趋势为西南>中部>东部,2004—2008年间,东部森林碳储量出现了显著提升,具有较大碳汇潜力^[11]。也有学者展开省域尺度的亚热带森林碳储量、碳密度研究。Li等^[12]和Li等^[13]利用全国森林资源清查数据结合森林生物量回归模型,分别研究了云南省和四川省为代表的西南亚热带森林碳储量状况,结果显示与全国平均水平相比,这些地区的碳储量和碳密度均呈现较高水平;Li等^[14]和刘曦乔等^[15]结合当地森林资源调查资料和样地采样,利用地统计学绘制碳储量分布图,分别研究了广东省和湖南省为代表的中南部亚热带森林碳储量状况,结果显示当地碳储量近年来呈现增长趋势。

上述研究均以亚热带森林所处省份进行整体分析,缺少对亚热带常绿阔叶林生态系统各组分碳密度特征及驱动因子的深入研究。浙江省位于中国东南部,是典型的亚热带季风区。为提升浙江省区域碳汇功能和应对气候问题,推动生态文明建设,实现社会、经济、生态的协同发展,本研究以浙江省常绿阔叶林的地上植被碳密度(Aboveground live tree biomass Carbon Density, AGC)、枯落物碳密度(Plant Litter Carbon Density, PLC)和土壤有机碳密度(Soil Organic Carbon Density, SOC)为研究对象,利用地统计学和多元统计方法,揭示浙江省常绿阔叶林碳密度空间变异特征,量化驱动因素的影响效应,评估浙江省常绿阔叶林森林生态系统碳汇水平。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区(图 1)位于中国东南沿海的浙江省,北纬 27°06′—31°01′N 东经 118°01′—123°10′E。浙江省的地势呈现西南高,东北低,由西南向东北倾斜,并呈阶梯式下降情况。浙江省地处亚热带季风湿润气候区,年平均气温 15.3—18.5℃,平均年降水量约 1000—2000 mm,年平均日照时数 1800—2300 h。在《中国土壤分类法》中,全省土壤类型以红壤、黄壤和水稻土为主。浙江省的森林类型包括常绿阔叶林、针叶林、混合针叶林阔叶林和竹林。根据《2020 年浙江省森林资源及其生态功能价值公告》,阔叶林占浙江省森林总面积的 45%。

基于国家森林资源连续清查,按照系统抽样的方法,在浙江省森林覆盖范围内,根据 6 km × 4 km 网格系统选取了具有代表性的 156 块常绿阔叶林样地(包括常绿阔叶混林、常绿栎属、木荷等),样地面积为 0.08 hm²。于 2020 年由 GPS 定位并记录样地优势树种、海拔、坡度、坡向、植被覆盖度、郁闭度等因子;对其地上部分植被层、枯落物层、土壤层进行取样和指标测定。

1.2 数据获取

1.2.1 植被碳密度

对上述选定的森林样地进行采样,测定乔木林每木检尺数据。利用袁位高等^[16]构建的生物量模型计算样地生物量。模型依据浙江省重点生态公益林布设的典型样地并结合林分类型、树龄、群落结构等条件构建硬阔叶树种(Ⅰ类)、硬阔叶树种(Ⅱ类)、软阔叶树种、松类、杉木、竹类等单株生物量模型,具有较好的适用性,其建模样本涵盖了浙江省各地。根据样地的优势树种,选择对应的硬阔叶树种(Ⅰ类)、硬阔叶树种(Ⅱ类)和软阔叶树种的生物量模型以及相应的含碳系数^[17](表 1),将各样地生物量与相应含碳率的乘积即得到样地的碳储量总和,根据样地面积计算植被单位面积碳储量,即植被碳密度。通过 ArcGIS 10.5 绘制森林植被生物量碳密度的空间分布图。

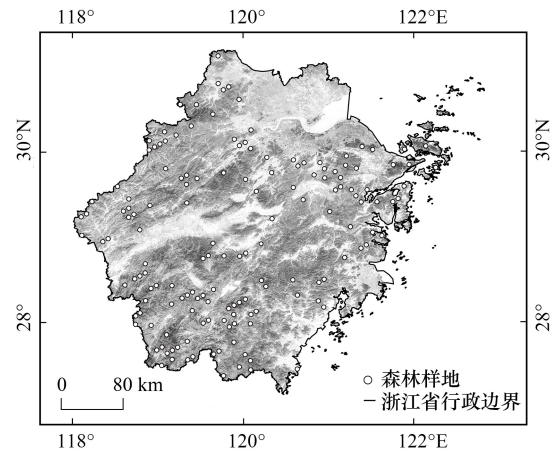


图 1 研究区样点分布图

Fig.1 Study area and sampling sites

表 1 样地优势树种含碳系数

Table 1 Carbon content coefficient of dominant species in the sampling sites

树种 Tree species	含碳系数 Carbon content coefficient	树种 Tree species	含碳系数 Carbon content coefficient
樟树 <i>Camphora officinarum</i>	0.4916	硬阔叶树种 Hard broad-leaved tree species	0.4834
楠木 <i>Phoebe zhennan</i>	0.5030	软阔叶树种 Soft broad-leaved tree species	0.4956
栎类 <i>Quercus</i> spp.	0.5004	阔叶混交 Mixed broad-leaved forest	0.4900
桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>	0.5253		

$$W_{\text{硬阔叶树种(Ⅰ类)}} = 0.0560 H^{0.8099} D^{1.8140} + 0.0980 D^{1.6481} L^{0.4610} + 0.0549 H^{0.1068} D^{2.0953} \quad (1)$$

$$W_{\text{硬阔叶树种(Ⅱ类)}} = 0.0803 H^{0.7815} D^{1.8056} + 0.2860 D^{1.0968} L^{0.9450} + 0.2470 H^{0.1745} D^{1.7954} \quad (2)$$

$$W_{\text{软阔叶树种}} = 0.0444 H^{0.7197} D^{1.7095} + 0.085 D^{1.22657} L^{0.3970} + 0.0459 H^{0.1067} D^{2.0247} \quad (3)$$

$$AGC = W \times C / S \quad (4)$$

式中, W 为总生物量(t), D 为胸径(cm), H 为高度(m), L 为冠长(m), AGC 为地上植被碳密度(tC/hm²), C 为对应植被的含碳系数, S 为样地面积(hm²)。

1.2.2 土壤碳密度

采集所选森林样地的土壤样品。由于森林主要分布于山地,受成土环境限制,土层有效深度存在区域差异性,因此,本研究选取的土层深度为 0—30 cm。在每块样地采用“梅花法”取样,使用 5 mm 孔径的尼龙筛分离出较大砾石后,将每个点采集的土壤样品均匀混合,采用“四分法”保留 1 kg 重量的土壤样品。将采集的土壤样品直接带回实验室,在室温下风干,磨碎,过筛(2 mm 和 0.25 mm 筛)后进行土壤指标的测定。土壤容重采用环刀法测定,土壤 pH 采用 5:1 水土比-酸度计测定,速效氮采用碱解扩散法测定,速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾采用乙酸铵交换-火焰光度法测定,土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定^[18]。

土壤有机碳密度计算公式如下^[19]:

$$\text{SOC} = T \times C \times P \times (1 - q\%) / 100 \quad (5)$$

式中, SOC 为样地土壤有机碳密度 (tC/hm^2), T 为土壤厚度 (cm), C 为土壤碳含量 (g/kg), P 为土壤容重 (g/cm^3), q 为砾石含量 (砾石直径大于 2 mm)。

1.2.3 枯落物层碳密度

在研究区每块森林样地中采用“梅花法”设置 5 个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的小样方,在小样方内利用钢尺测量并记录枯枝叶厚度和腐殖层厚度;收集枯落物样品,将其均匀混合后带回实验室称量湿重。随后,将这些样品放入烘箱进行 105°C 烘干至恒重后,测定样品含水率,根据含水率计算各样地凋落物的干重和估算凋落物层现存量。对烘干后的凋落物进行研磨粉碎、过筛(0.15 mm 筛),采用重铬酸钾外加热法测定枯落物碳含量^[20]。得到样地枯落物碳含量,将其转换为样地枯落物碳密度,计算过程同森林植被碳储量。

1.2.4 其他数据

本研究中,人口密度数据来自于 2020 年第七次全国人口普查数据,GDP 增长率来源于《中国县域统计年鉴(县市卷)》。人口密度与 GDP 增长率均选取 2020 年各县(市、区)域尺度。高程数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>)提供的航天雷达地形测绘计划 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数据,水平分辨率为 $90 \text{ m} \times 90 \text{ m}$ 。

1.3 数据处理方法

1.3.1 地统计学分析

地统计学是以区域化变量理论为基础,以变异函数为主要工具,研究那些在空间分布上即有随机性又有结构性,或空间相关性和依耐性的自然现象的科学^[21]。普通克里金插值法是目前地统计学中应用较为广泛且成熟的空间插值算法,准确度较高,能够客观准确反映空间分布规律。协同克里金插值法(Co-Kriging)是普通克里金算法的扩展,在普通克里金算法基础之上,引入一个或者多个相应的辅助变量,引入的辅助变量与主变量之间存在相互关系,预测值将会更加准确^[22]。本研究利用 GS+ 9.0 进行半方差函数模型拟合,利用 ArcMap 10.5 对 PLC 进行普通克里金插值法,选择海拔作为 AGC 和 SOC 的辅助变量进行协同克里金插值法。

半方差函数是克里金插值法研究土壤变异性的基础函数。半方差函数(semi-variance)的表达式为^[23]:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (6)$$

式中, h 为样点空间间隔距离,即为步长; $N(h)$ 为当间隔距离为 h 时的所有成对样点的数量;变量 $Z(x)$ 在样点 x_i 和 x_i+h 的实测值分别为 $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 。

普通克里金空间插值方法的表达式为^[24]:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (7)$$

式中, $Z(x_0)$ 为位置 x_0 的值, X_i 为估计值点 x_0 周围 n 个点中,第 i 个位置点的值, λ_i 为对应的权重因素。

协同克里金的协变异函数为:

$$\gamma_{12}(h) = \frac{1}{2N} \cdot \sum_{i=1}^N [Z_1(x_i) - Z_1(x_i + h)] \cdot [Z_2(x_i) - Z_2(x_i + h)] \quad (8)$$

式中, h 为两点间的距离; N 是由 h 分开的成对样本点的数量; Z_1 是点关于变量 1 的属性值; Z_2 是点关于变量 2 的属性值。

协同克里金插值方法的表达式为:

$$Z_1(x_0) = \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_i Z_1(x_i) + \sum_{i=1}^{n_2} \mu_i Z_2(x_i) \quad (9)$$

式中, $Z_1(x_0)$ 为位置 x_0 的值, $Z_1(x_i)$ 为初始变量 x_i 的真实值, $Z_2(x_i)$ 为同位二级变量 x_i 的真实值, λ_i 为与 $Z_1(x_i)$ 相关的权重; μ_i 为与 $Z_2(x_i)$ 相关的权重, n_1 和 n_2 分别为 Z_1 和 Z_2 的邻域个数。

1.3.2 随机森林

随机森林(Random Forest, RF)算法是一种广泛使用的基于集成学习的机器学习方法,能够将多个决策树集中在一起,由于其具有高效性和灵活性的特点,在分类和回归方面表现出独特优势^[25],RF 分析已广泛应用于生态学研究^[26]。本研究利用 R 软件中的“randomForest”包进行随机森林分析,评估各影响因素对研究对象的贡献度。RF 分析中,树节点预选的变量个数(mtry)采取默认值;当 ntree ≥ 200 时,RF 分析结果已稳定,故取 ntree = 500。

1.3.3 结构方程模型

结构方程模型(Structural Equation Modeling, SEM)基于变量的协方差矩阵来分析观测变量与潜变量、潜变量与潜变量之间的关系^[27]。本研究使用 IBM AMOS 28.0 运行结构方程模型,探究浙江省常绿阔叶林不同层次碳密度与影响因素之间的直接、间接的关系,并进一步评价驱动因子的直接和间接标准化总效应。采用 χ^2 检验(Chi-square test)、拟合良好度指数(GFI)和近似误差均方根(RMSEA)来检验模型的拟合优度。

本研究采用 Excel 和 SPSS 27.0 进行数据描述性统计;采用 Origin 2021 中 Pearson 相关分析法对碳密度及其影响因子进行相关性分析与热图制作。

2 结果

2.1 浙江省常绿阔叶林碳密度统计学特征

如表 2 所示,研究区地上植被碳密度的范围在 1.44—121.23 tC/hm² 范围内,平均值为 39.60 tC/hm²;枯落物碳密度平均值为 2.18 tC/hm²;土壤有机碳密度(0—30cm)的范围在 16.40—290.79 tC/hm²,平均值为 85.81 tC/hm²。变异系数(CV)用于描述所研究变量的变异程度,CV < 10% 表明低变异性,10%—90% 表明中等变异性,CV > 90% 表明高变异性^[28]。研究区中,地上植被、枯落物和土壤有机碳密度的变异系数分别为 59.33%、64.07%、50.12%,表现为中等变异。

表 2 浙江省常绿阔叶林地上植被碳密度、枯落物碳密度和土壤有机碳密度描述性统计分析/(tC/hm²)

Table 2 Descriptive statistics analysis of AGC, PLC and SOC density of evergreen broad-leaved forest in Zhejiang

碳密度指标 Carbon density indicators	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
地上植被 Aboveground live tree biomass	1.44	121.23	39.60	23.50	59.33
枯落物 Plant Litter	0.20	8.84	2.18	1.40	64.07
土壤有机碳(0—30cm) Soil organic carbon	16.40	290.79	85.81	43.00	50.12

2.2 浙江省常绿阔叶林碳密度空间变异特征

利用 GS+软件的半方差变异函数探究浙江省常绿阔叶林碳密度空间分布特征。如表 2 所示,AGC 和 PLC 结果符合高斯模型,SOC 结果符合球状模型。块基比 $C_0/(C_0+C)$ 反映了碳密度的空间异质性程度,块基比大说明随机因素(实验误差和人为活动等)引起的变异程度大,反之则是受到结构性因素(土壤母质、地形和气

候等)引起的变异程度大^[29]。当块基比<25%时,说明研究变量具有强烈的空间相关性;25%<块基比<75%时,表明研究变量具有中等的空间相关性;块基比>75%时,说明变量的空间相关性很弱^[30]。浙江省不同组分碳密度呈现中等程度空间变异,块基比值 AGC>SOC>PLC,说明均受到随机因素和结构性因素的双重影响,且 AGC 受到人为活动影响程度最大,PLC 受到结构性因素影响程度最大。

表 3 浙江省常绿阔叶林地上植被碳密度、枯落物碳密度和土壤有机碳密度比变异函数理论模型及其相关参数

Table 3 The semivariogram models and the corresponding parameters of AGC, PLC and SOC density of evergreen broad-leaved forest in Zhejiang

碳密度指标 Carbon density indicators	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget C_0	基台值 Sill (C_0+C)	变程 Range/km	块基比 Nugget/Sill $C_0/(C_0+C)$	R^2
地上植被 Aboveground live tree biomass	高斯模型	3.24	4.43	543.31	73.14%	0.73
枯落物 Plant Litter	高斯模型	0.36	1.12	180.48	32.14%	0.86
土壤有机碳(0—30cm) Soil organic carbon	球状模型	3.80	6.45	47.04	58.91%	0.73

利用 ArcMap 10.5 对研究区不同组分碳密度进行克里金插值。对 AGC 和 SOC 采用协同克里金插值法,选择高程作为协变量;对 PLC 采用普通克里金插值法。空间分布格局如图 2 所示,浙江省 AGC 由西向东逐渐降低,高值集中于浙江省西北部,低值集中于浙江省南部和东北部沿海群岛。PLC 空间分布特征明显,高值集中于浙江省北部,低值集中于浙江省南部的温州,整体由北向南递减,中部过渡较为平缓。SOC 由西南向东北递减,中部过渡区面积小,西南地区 and 东北地区差异显著。

2.3 浙江省常绿阔叶林碳密度相关性热图分析

为探究影响不同组分碳密度的因子,对碳密度与各因子进行 Pearson 相关性分析,图 3 为各影响因子与浙江省常绿阔叶林生态系统碳密度相关性分析热图。地上植被碳密度受到多种因子的显著影响,其中植被因子(平均林龄、植被覆盖度和郁闭度)对 AGC 相关性最强,普遍呈正相关关系。植被因子中平均年龄和郁闭度为极显著($P<0.001$),植被覆盖度为极显著($P<0.01$),同时 GDP 增长率对 AGC 也呈现负相关关系($P<0.05$);枯枝叶厚度和海拔对 AGC 也有极显著正相关关系($P<0.001$),腐殖层厚度也呈现显著正相关($P<0.01$);仅有 pH 对 AGC 呈显著负相关($P<0.05$)。PLC 仅与郁闭度呈正相关($P<0.05$),而与速效氮、钾对其呈显著负相关($P<0.05, P<0.01$),其他因子与 PLC 的相关性均不显著。SOC 与土壤因子相关性最强,土壤因子中, SOC 与速效氮呈极显著正相关($P<0.001$),与容重呈显著正相关($P<0.05$);同时海拔和坡度也表现出极显著正相关关系($P<0.001$)。

2.4 浙江省常绿阔叶林碳密度随机森林分析

为进一步明确浙江省常绿阔叶林碳密度驱动因素的驱动效应、提高预测精度,引入了随机森林(RF)分析。RF 结果如图 4 所示,预测变量对地上植被有机碳、枯落物有机碳和土壤有机碳的总解释度分别为 48.5%、20.48%和 27.1%。AGC 主要受到植被因子的驱动,郁闭度、平均林龄和枯枝叶厚度是最主要的驱动因子,呈极显著影响($P<0.01$),贡献度分别为 27.8%、19.36%、9.00%。对 PLC,速效钾和 GDP 增长率是影响程度最大的驱动因子,呈极显著影响($P<0.01$),贡献度为 11.80%和 10.70%;其次是枯枝叶厚度、海拔和腐殖层厚度,呈显著影响($P<0.05$),贡献度为 4.74%、4.63%和 3.79%;另外,坡向的影响也呈现显著性,其他因子对 PLC 的贡献度均较低。由于 RF 对 PLC 的总解释度较低,说明 PLC 还受到其他因素的综合影响。SOC 主要受到土壤因子驱动,其次是社会经济因子和地形因子。速效氮和人口密度呈极显著影响($P<0.01$),贡献度分别为 25.0%、8.7%;海拔和容重呈显著影响($P<0.05$),贡献度分别为 7.8%、7.5%。

2.5 浙江省常绿阔叶林碳密度结构方程分析

结构方程模型(SEM)进一步量化了碳密度与各驱动因子、驱动因子之间的影响路径和效应。模型 $\chi^2/df = 2.91$,范围在 1.00—3.00 区间,GFI=0.839>0.8, RMSEA=0.112,符合良好的拟合标准。如图 5, SEM 结果显

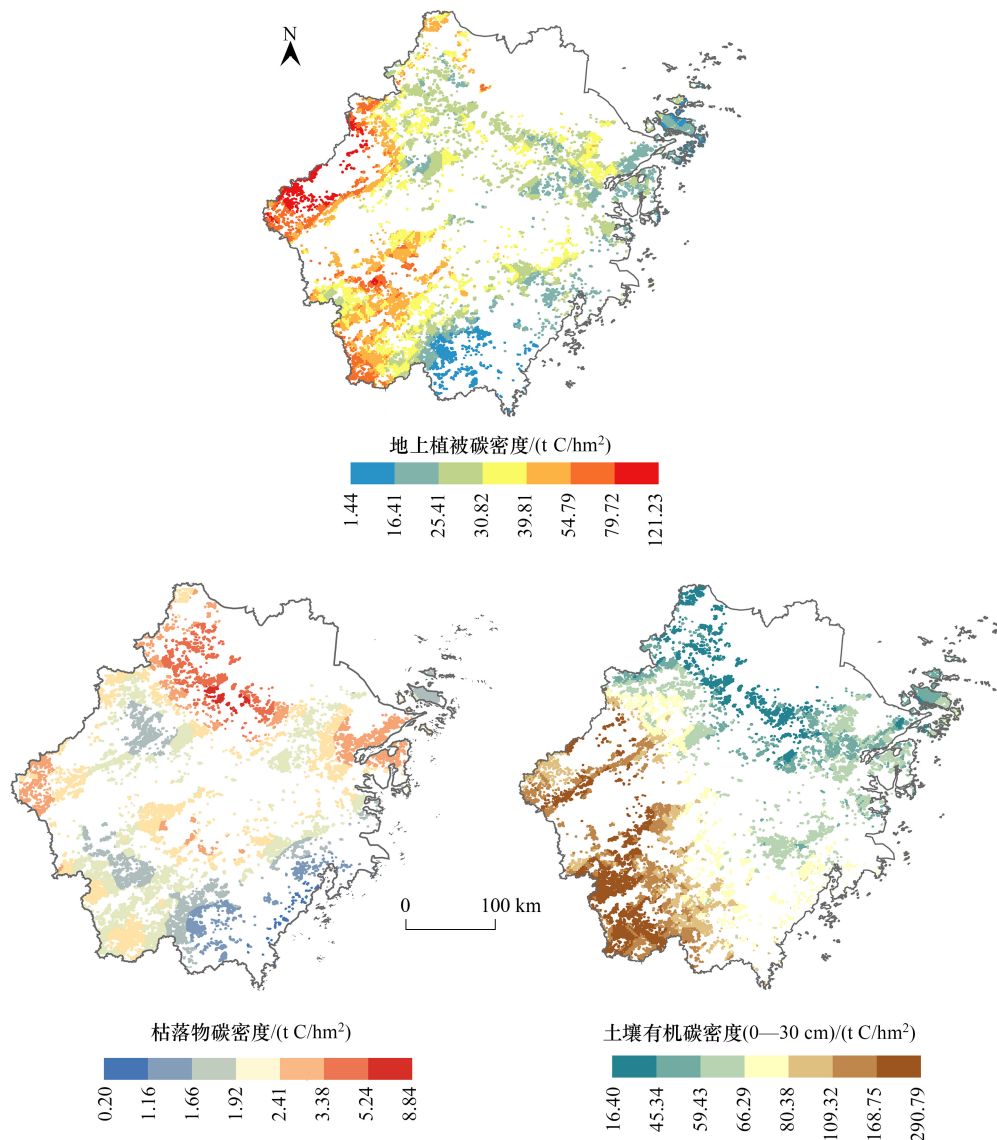


图2 浙江省常绿阔叶林地上植被碳密度、枯落物碳密度和土壤有机碳密度空间分布图

Fig.2 Spatial distribution maps of AGC, PLC and SOC density of evergreen broad-leaved forest in Zhejiang

示,模型对 AGC、PLC 和土壤有机碳的解释度分别为 59.3%、15.9%和 51.8%。PLC 的解释度较低,说明各因子对 PLC 的影响不显著,因此重点分析植被有机碳和土壤有机碳的驱动因子。

SEM 结果显示,AGC 最主要的直接驱动因素为郁闭度、平均林龄、海拔和枯枝叶厚度 ($P<0.001$),标准化影响效应分别为 0.415、0.401、0.194、0.182,而速效氮对于 AGC 为负影响效应,标准化影响效应为 0.206 ($P<0.001$)。SOC 的主要驱动因素为速效氮、容重和海拔 ($P<0.001$),标准化影响效应分别为 0.414、0.407、0.258。

需要注意的是,模型中很多因子通过间接效应调控碳密度。探明间接效应,有助于深刻理解驱动因子对碳密度的影响路径。平均林龄对郁闭度、腐殖层厚度、枯枝叶厚度呈极显著正影响,标准化影响效应分别为 0.348、0.324、0.290 ($P<0.001$),郁闭度也对植被覆盖度有极显著影响 ($P<0.001$);海拔对速效氮和速效磷呈极显著影响,标准化影响效应分别 0.423 ($P<0.001$)、-0.263 ($P<0.01$);速效氮对速效钾、速效钾对 pH 均呈极显著影响 ($P<0.001$)。

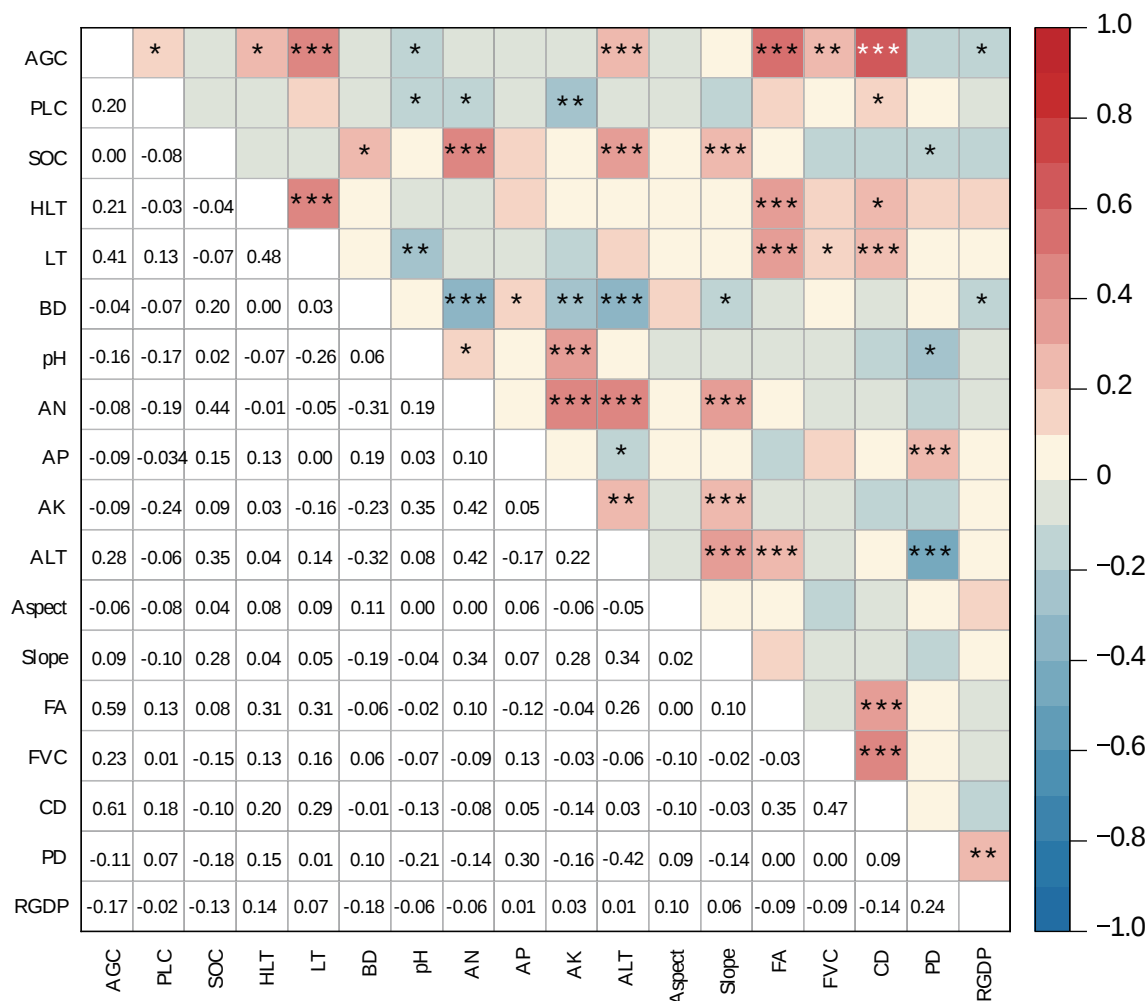


图3 浙江省常绿阔叶林地上植被碳密度、枯落物碳密度和土壤有机碳密度与其他影响因子的相关分析

Fig.3 The coefficient of Pearson relationship between AGC, PLC and SOC and influencing factors of evergreen broad-leaved forest in Zhejiang

AGC:地上植被碳密度 Aboveground live tree biomass Carbon Density; PLC:枯落物碳密度 Plant Litter Carbon Density; SOC:土壤有机碳密度 Soil Organic Carbon Density; HLT:腐殖层厚度 Humus Layer Thickness; LT:枯枝叶厚度 Litter Thickness; BD:容重 Bulk Density; AN:速效氮 Available Nitrogen; AP:速效磷 Available Phosphorus; AK:速效钾 Available Potassium; ALT:海拔 Altitude; FA:林龄 Forest Age; FVC:植被覆盖度 Fractional Vegetation Cover; CD:郁闭度 Crown Density; PD:人口密度 Population Density; RGDP:国内生产总值增长率 Gross Domestic Product Growth Rate

3 讨论

3.1 浙江省常绿阔叶林碳密度及其空间变异

浙江省常绿阔叶林 AGC 低于周玉荣等^[31]核算的全国植被乔木层碳密度,高于李银等^[32]核算的浙江省乔木碳密度;与同纬度的江西省^[33]、湖南省^[34]和四川省^[35]的阔叶林植被碳密度结果相比较低(表4)。浙江省常绿阔叶林 AGC 由西向东逐渐降低,高值集中于浙江省西北部,低值集中于浙江省南部和东北部沿海群岛,这可能是由于浙江省西北部为山地丘陵区域,海拔较高且受人干扰较小;而东北部地势平缓,受人为影响剧烈。

浙江省常绿阔叶林 PLC 平均值为 2.18 tC/hm²,该结果与李银等^[32]核算的浙江省枯落物碳密度 2.88 tC/hm²相近,高于全国和同气候带的湖南省常绿阔叶林的枯落物碳密度^[15,36](表4);浙江省 PLC 与全国

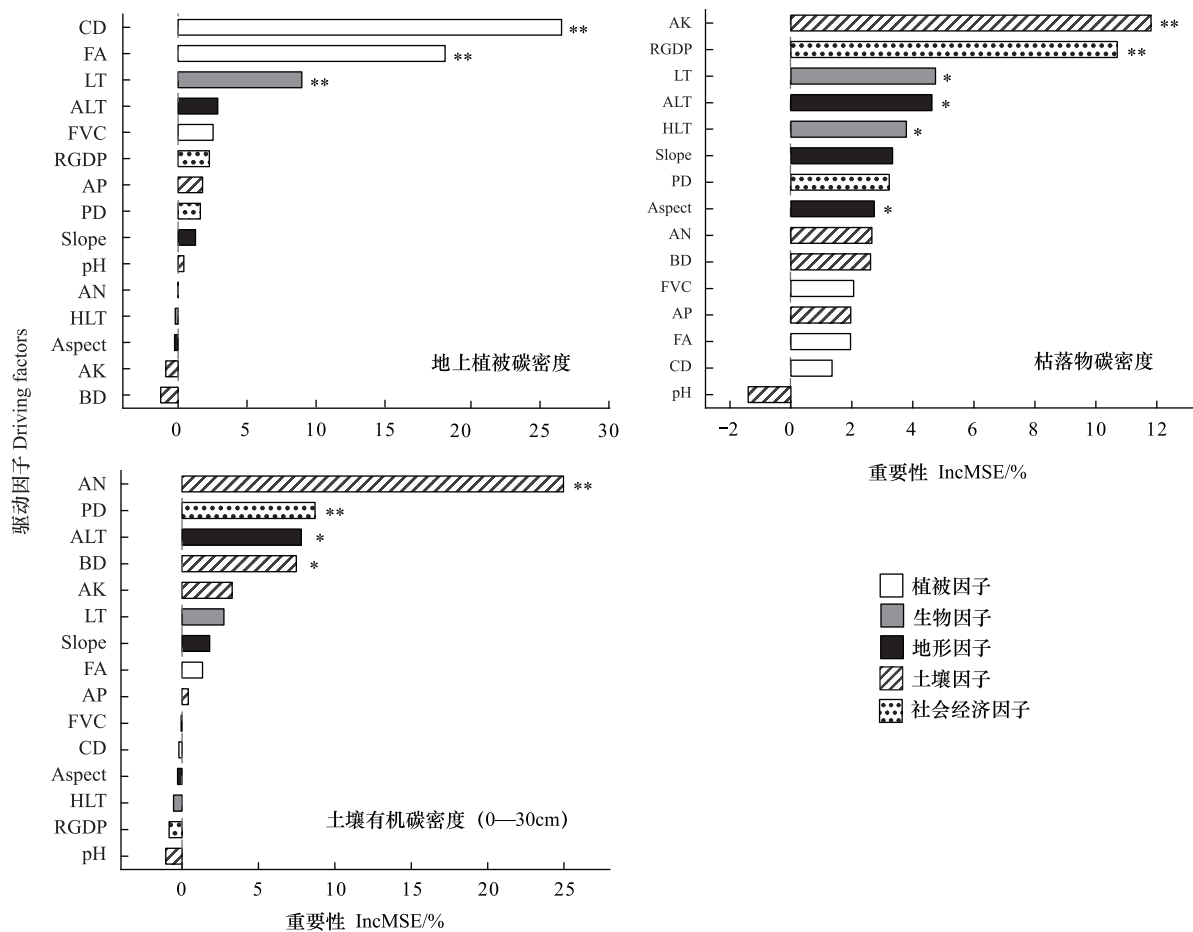


图4 浙江省常绿阔叶林地上植被碳密度、枯落物碳密度和土壤有机碳密度随机森林分析

Fig.4 Random Forest Analysis of AGC, PLC and SOC of evergreen broad-leaved forest in Zhejiang

和同纬度省份平均水平相当,其高值集中于浙江省北部,低值集中于浙江省南部的温州,整体由北向南递减,中部过渡较为平缓。同时,PLC 高值区(浙江北部)与 SOC 低值区(东北部)存在空间重合,由于枯落物是森林表层土壤有机碳的重要来源^[37],推测枯落物向土壤碳的转化效率存在区域差异。从浙江省东北到西南,枯落物碳到土壤有机碳的转化效率逐步降低。

研究区土壤有机碳密度(0—30cm)的平均值比全国和同纬度的湖南省森林土壤平均碳密度略低^[15,38—39](表4),空间上由西南向东北递减,与浙江省地形、海拔走势吻合,说明 SOC 可能受海拔、气候和人类活动共同影响。研究表明,森林 SOC 主要来自枯落物输入^[37],同时与林龄显著相关^[40]。

浙江省常绿阔叶林碳密度的梯度分布(图2)反映了景观格局对森林碳汇功能的深远影响。西南方向 AGC、SOC 的高碳密度可能与山地连通性相关,连片的森林作为稳定的森林碳库可以维持高碳汇功能^[41];而东北沿海的景观破碎化(如城市化导致的生境隔离)可能限制物种迁移和碳积累。城市化通过改变土地利用方式(如林地转建设用地)直接减少碳输入,同时通过边缘效应加剧土壤碳流失^[42—43]。

3.2 浙江省常绿阔叶林碳密度驱动因子

研究结果表明,AGC 的主要驱动因子为植被因素和海拔。地上植被碳密度主要来源于现存的树木,样地植被郁闭度越高、平均年龄越高,则样地生物量碳积累越高。而天然林的海拔越高,受到人类活动的负面影响越小,碳储量越高。这与其他学者的研究结果一致^[44—45]。值得注意的是,SEM 结果(图5)显示,速效氮对于地上植被有机碳密度存在极显著负影响效应($P < 0.01$),这与一些前人的研究结果存在差异^[46—47],本研究的结果可能与地上植被碳储量对氮含量增加的响应模式与特定的气候条件有关,其响应模式并不具有线性关

系。中国氮沉降量较世界平均水平高,过高的氮含量对根系具有负效应,通过影响初级生产力抑制碳积累^[48]。一些国内的研究也显示,增加森林植被土壤中氮含量,对林下植被生长会产生显著负效应^[49]。

表 4 研究区与其他地区碳密度比较

Table.4 Comparison of carbon density between the study area and other regions

碳密度指标 Carbon density indicators	碳密度/(tC/hm ²) Carbon density	地区 Region	文献来源 Source
地上植被 Aboveground live tree	39.60	浙江省	本研究
	57.07	全国	我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡 ^[31]
	25.10	浙江省	浙江省森林生态系统碳储量及其分布特征 ^[32]
	56.36	江西省	江西铜鼓县森林植被碳储量及碳密度研究 ^[33]
	54.90	湖南省	湖南省 1999—2013 年森林植被碳储量变化研究 ^[34]
	50.69	四川省	四川省森林植被碳储量及碳密度估算 ^[35]
枯落物 Plant Litter	2.18	浙江省	本研究
	1.77	全国	1982—2020 年 NDVI 数据驱动随机森林模型模拟中国森林凋落物碳密度的研究 ^[36]
	2.88	浙江省	浙江省森林生态系统碳储量及其分布特征 ^[32]
	1.51	湖南省	湖南省森林生态系统碳储量、碳密度及其空间分布 ^[15]
土壤有机碳(0—30cm) Soil organic carbon	85.81	浙江省	本研究
	105.30	全国	中国土壤有机碳库及空间分布特征分析 ^[38]
	44—150	全国	中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展 ^[39]
	118.16	湖南省	湖南省森林生态系统碳储量、碳密度及其空间分布 ^[15]

PLC 的各项驱动因子的驱动效应较为均匀,最主要的驱动因子为速效钾和枯枝叶厚度。对 PLC 的驱动因子量化研究得出的解释度均较低,PLC 受到枯落物的物化性质、土壤动物、土壤微生物、酶活性和研究区地形气候条件等多尺度生态过程的调控^[50]。例如,木质素/N 比值较高的凋落物会抑制分解,而高氮输入可能通过降低木质素/N 比值促进分解^[51];速效钾(AK)可能通过增强土壤酶活性进一步加速分解,导致 PLC 向 SOC 的快速转移^[52];微生物群落的调节作用同样不可忽视,本研究中未量化的微生物因子可能是 PLC 的关键驱动因子^[53]。

SOC 的主要驱动因子为土壤速效氮、容重和海拔。土壤速效氮是土壤肥力的重要体现,海拔通过间接影响气候条件、植被生长、微生物活性等因素影响土壤碳库。本研究中海拔升高有利于土壤碳积累,该结果与其他地区研究结果一致^[54]。而研究发现容重对于 SOC 有正效应,即容重越高,越有利于土壤有机碳积累,这与前人研究成果相悖^[55]。简尊吉等^[56]的研究指出,土壤砾石会导致 SOC 被高估 4.9%—11.8%,实验前如果没有完全剔除砾石可能会使土壤有机碳测量值偏高,本研究得出的结论可能与采集的土壤样品中含有小直径砾石有关。

社会经济因子(人口密度和 GDP 增长率)也共同作用于碳密度。社会经济因子对不同组分碳密度都有一定负面影响,但不呈现明显显著性;同时,一些难以量化的因素,例如林业政策(造林补贴、森林限伐等)也在其中发挥作用^[57]。根据国务院关于年森林采伐限额的审批,浙江省在“十四五”时期的森林采伐限额较“十二五”时期和“十三五”时期总体降低 24%和 5%,其中天然林限额减少 56%和 19%,采伐限额的提升有效保护了当地森林生态系统^[58]。

自然因子通过影响树木和微生物的生理机制调控碳循环,社会经济因素通过加剧景观破碎化削弱碳汇功能。研究深化了对浙江省常绿阔叶林碳密度驱动因子的理解,填补了区域尺度下特定林分碳密度研究的空白,为浙江省森林管理提供了科学依据:通过优化采伐政策(如延长轮伐周期)、在浙江省西南地区建立“碳汇-生物多样性优先保护区”、建设生态廊道增强景观连通性、限制东北沿海城市化扩张,为浙江省碳储量和碳汇功能带来积极影响;研究结果不仅服务于浙江省“碳中和”目标的实现,也为全球亚热带森林的可持续管理提供了可借鉴的范式。

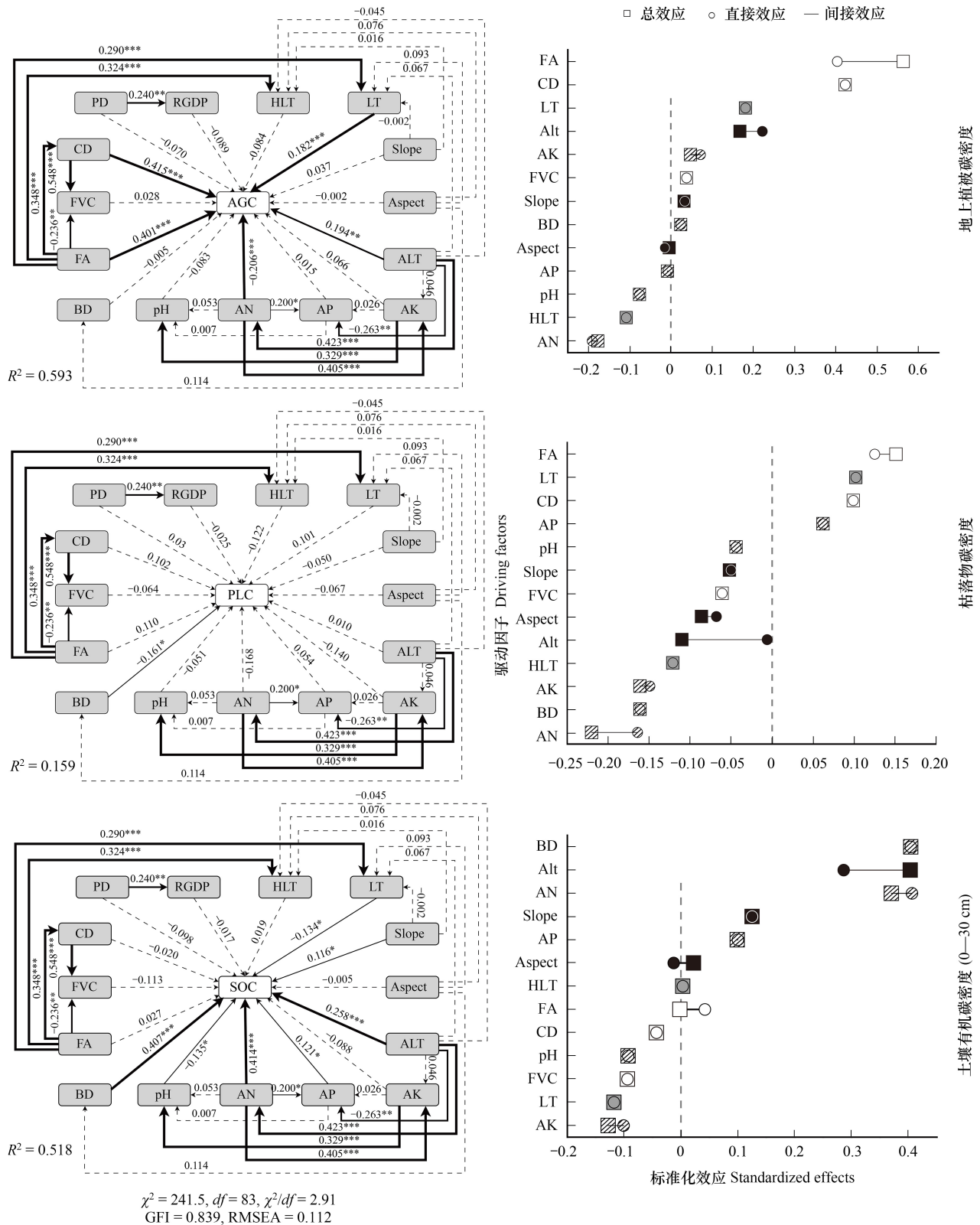


图5 浙江省常绿阔叶林评估影响因素变量对地上植被碳密度、枯落物碳密度和土壤有机碳密度的最佳结构方程模型和基于 SEM 的影响因素的标准化总效应

Fig.5 Best-supported Structural equation models (SEMs) assessing causalities among influencing factors variables on AGC, PLC and SOC and total standardized effects of influencing factors based on the SEMs of evergreen broad-leaved forest in Zhejiang

4 结论

浙江省常绿阔叶林地上植被碳密度的平均值为 39.60 tC/hm^2 , 枯落物碳密度平均值为 2.18 tC/hm^2 ; 土壤有机碳密度(0—30cm)的平均值为 85.81 tC/hm^2 。研究区各组分碳密度低于全国及同纬度省份平均碳密度水平。浙江省地上、枯落物和土壤有机碳密度均呈现中等程度空间变异, 地上植被碳密度由西向东逐渐降低, 枯落物碳密度由北向南递减, 土壤有机碳密度由西南向东北递减; 基于 Pearson 相关性、RF、SEM 等方法分析, 植被碳密度的主要驱动因素为郁闭度, 平均林龄和海拔; 枯落物碳密度的主要驱动因素为速效钾和枯枝叶厚度; 土壤有机碳密度的主要驱动因素为土壤速效氮、容重和海拔。社会经济因素对所有组分碳密度均有负影响。本研究总结了浙江省常绿阔叶林碳密度空间变异特征, 量化了驱动因素的影响效应, 评估了系统碳汇水平, 为维持和提升浙江省常绿阔叶林碳汇功能提供了理论依据。

参考文献(References):

- [1] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [2] Tang X, Zhao X, Bai Y, Tang Z, Wang W, Zhao Y, Wan H, Xie Z, Shi X, Wu B, Wang G, Yan J, Ma K, Du S, Li S, Han S, Ma Y, Hu H, He N, Yang Y, Han W, He H, Yu G, Fang J, Zhou G. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [3] Grace J. Role of forest biomes in the global carbon balance. *SEB experimental biology series*, 2005: 19-45.
- [4] Angst G, Mueller K E, Eissenstat D M, Trumbore S, Freeman K H, Hobbie S E, Chorover J, Oleksyn J, Reich P B, Mueller C W. Soil organic carbon stability in forests: Distinct effects of tree species identity and traits. *Global Change Biology*, 2019, 25(4): 1529-1546.
- [5] 王鹏程, 邢乐杰, 肖文发, 黄志霖, 潘磊, 曾立雄. 三峡库区森林生态系统有机碳密度及碳储量. *生态学报*, 2009, 29(1): 97-107.
- [6] 黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵, 赵安玖. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态. *生态学报*, 2008(3): 966-975.
- [7] 包维楷, 刘照光, 刘朝禄, 袁亚夫, 刘仁东. 中亚热带湿性常绿阔叶次生林自然恢复 15 年来群落乔木层的动态变化. *植物生态学报*, 2000(6): 702-709.
- [8] 张田田, 王璇, 任海保, 余建平, 金毅, 钱海源, 宋小友, 马克平, 于明坚. 浙江古田山次生与老龄常绿阔叶林群落特征比较. *生物多样性*(10): 1069-1080.
- [9] Chen L, Swenson N G, Ji N, Mi X, Ren H, Guo L, Ma K. Differential soil fungus accumulation and density dependence of trees in a subtropical forest. *Science*, 2019, 366(6461): 124-128.
- [10] 谭万能, 李志安, 邹碧, 丁永祯. 地统计学方法在土壤学中的应用. *热带地理*, 2005(4): 307-311.
- [11] 赵明伟, 岳天祥, 赵娜, 孙晓芳. 基于 HASM 的中国森林植被碳储量空间分布模拟. *地理学报*, 2013, 68(09): 1212-1224.
- [12] Li L, Fu W, Luo M, Chen J, Li Z. Estimation of forest carbon storage and carbon sink potential in Yunnan Province under the goal of "carbon peaking and carbon neutrality". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, 1087(1): 012066.
- [13] Li R, Zhao S, Zhao H, Xu M, Zhang L, Wen H, Sheng Q. Spatiotemporal assessment of forest biomass carbon sinks: The relative roles of forest expansion and growth in Sichuan Province, China. *Journal of Environmental Quality*, 2017, 46(1): 64-71.
- [14] Li T, Li M Y, Tian L. Dynamics of carbon storage and its drivers in Guangdong province from 1979 to 2012. *Forests*, 2021, 12(11): 1482.
- [15] 刘曦乔, 梁萌杰, 陈龙池, 汪思龙, 郑文辉, 余鑫, 李仁山, 张广杰, 王福生, 杨海军. 湖南省森林生态系统碳储量、碳密度及其空间分布. *生态学杂志*, 2017, 36(09): 2385-2393.
- [16] 袁位高, 江波, 葛永金, 朱锦茹, 沈爱华. 浙江省重点公益林生物量模型研究. *浙江林业科技*, 2009, 29(2): 1-5.
- [17] 陶吉兴, 杜群, 季碧勇, 张国江, 傅伟军. 浙江森林碳汇功能监测. 北京: 中国林业出版社, 2014.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩, 李安波. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. *土壤学报*, 2004(1): 35-43.
- [20] 刘刚, 朱剑云, 叶永昌, 刘颂颂, 苏志尧. 东莞主要森林群落凋落物碳储量及其空间分布. *山地学报*, 2010, 28(1): 69-75.
- [21] 张慧文, 马剑英, 张自文, 孙涛, 吕光辉. 地统计学在土壤科学中的应用. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(6): 14-20+27.
- [22] 周友锋, 谢秉楼, 李明诗. 基于随机森林协同克里金法的区域森林地上生物量制图——以粤北森林为例. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(1): 169-178.
- [23] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999.
- [24] 史文娇, 岳天祥, 石晓丽, 宋伟. 土壤连续属性空间插值方法及其精度的研究进展. *自然资源学报*, 2012, 27(1): 163-175.
- [25] 段兰兰, 刘菊, 贺丽, 王琰, 严俊霞. 中条山森林碳密度时空变化及其驱动因素分析. *水土保持学报*, 2023, 37(4): 158-165.
- [26] Xu L, Shi Y, Fang H, Zhou G, Xu X, Zhou Y, Tao J, Ji B, Xu J, Li C, Chen L. Vegetation carbon stocks driven by canopy density and forest age in subtropical forest ecosystems. *Science of The Total Environment*, 2018, 631-632: 619-626.
- [27] 王西石, 储诚进. 结构方程模型及其在生态学中的应用. *植物生态学报*, 2011, 35(3): 337-344.
- [28] Zhang X Y, Sui Y Y, Zhang X D, Meng K, Herbert S J. Spatial Variability of Nutrient Properties in Black Soil of Northeast China. *Pedosphere*,

- 2007, 17(1): 19-29.
- [29] 赵科理. 土壤-水稻系统重金属空间对应关系和定量模型研究. 浙江大学, 2011.
- [30] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征——变异函数与 Kriging 插值分析. 地理学报, 2000(5): 555-566.
- [31] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, 2000(5): 518-522.
- [32] 李银, 陈国科, 林敦梅, 陈彬, 高雷明, 简兴, 杨波, 徐武兵, 苏宏新, 赖江山, 王希华, 杨海波, 马克平. 浙江省森林生态系统碳储量及其分布特征. 植物生态学报, 2016, 40(04): 354-363.
- [33] 杨杰, 黄国贤, 田立新, 邓清华. 江西铜鼓县森林植被碳储量及碳密度研究. 温带林业研究, 2023, 6(02): 17-23.
- [34] 夏栗, 王福生, 刘大逵. 湖南省 1999—2013 年森林植被碳储量变化研究. 湖南林业科技, 2017, 44(06): 64-69.
- [35] 邵波, 燕腾. 四川省森林植被碳储量及碳密度估算. 西南林业大学学报(自然科学), 2017, 37(02): 179-183.
- [36] 王昭生. 1982—2020 年 NDVI 数据驱动随机森林模型模拟中国森林凋落物碳密度的研究. 遥感技术与应用, 2023, 38(06): 1381-1389.
- [37] Zhang Y, Tang Z, You Y, Guo X, Wu C, Liu S, Sun O J. Differential effects of forest-floor litter and roots on soil organic carbon formation in a temperate oak forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 180: 109017.
- [38] 王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松丽, 黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. 地理学报, 2000(05): 533-544.
- [39] 刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展. 生态学报, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [40] 李思瑶, 夏晓莹, 王杰, 马小龙, 米尔扎提·柯尼加里木, 阿丽耶·麦麦提, 王卫霞. 天山云杉林土壤有机碳密度及影响因素研究. 防护林科技, 2023(03): 48-51.
- [41] Tong X, Brandt M, Yue Y, Ciaia P, Rudbeck Jepsen M, Penuelas J, Wigneron J P, Xiao X, Song X P, Horion S, Rasmussen K, Saatchi S, Fan L, Wang K, Zhang B, Chen Z, Wang Y, Li X, Fensholt R. Forest management in southern China generates short term extensive carbon sequestration. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 129.
- [42] Chen X, Zhang X, Liu M, Xu Z, Wei H. Urbanization induced changes in the accumulation mode of organic carbon in the surface soil of subtropical forests. *Catena*, 2022, 214: 106264.
- [43] Shaheen H, Awan S N, Khan R W A, Khalid A R, Ahmed W, Chughtai F M. Variations in Soil Organic Carbon Stocks under Different Land-Use Categories in Subtropical Ecosystems of Kashmir. *Forest Science*, 2021, 67(5): 525-536.
- [44] Wei Y, Li M, Chen H, Lewis B J, Yu D, Zhou L, Zhou W, Fang X, Zhao W, Dai L. Variation in carbon storage and its distribution by stand age and forest type in boreal and temperate forests in northeastern China. *PloS One*, 2013, 8(8): e72201.
- [45] Ge Z, Wen W, Xu L, Chen G, Zhou G, Ji B, Zhou Y, Zhu G, Shi Y. Vegetation Carbon Accumulation Driven by Stand Characteristics and Climatic Factors in Subtropical Forests of Southeastern China. *Journal of Sustainable Forestry*, 2022, 41(10): 941-958.
- [46] Chen H, Li D, Gurnesa G A, Yu G, Li L, Zhang W, Fang H, Mo J. Effects of nitrogen deposition on carbon cycle in terrestrial ecosystems of China: A meta-analysis. *Environmental Pollution*, 2015, 206: 352-360.
- [47] Yue K, Peng Y, Peng C, Yang W, Peng X, Wu F. Stimulation of terrestrial ecosystem carbon storage by nitrogen addition: a meta-analysis. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 19895.
- [48] 鲁显楷, 莫江明, 张伟, 毛庆功, 刘荣臻, 王聪, 王森浩, 郑棉海, MORI Taiki, 毛晋花, 张勇群, 王玉芳, 黄娟. 模拟大气氮沉降对中国森林生态系统影响的研究进展. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(5): 500-522.
- [49] Huang Y, Kang R, Mulder J, Zhang T, Duan L. Nitrogen saturation, soil acidification, and ecological effects in a subtropical pine forest on acid soil in southwest China. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(11): 2457-2472.
- [50] 贾丙瑞. 凋落物分解及其影响机制. 植物生态学报, 2019, 43(8): 648-657.
- [51] 唐仕姗, 杨万勤, 殷睿, 熊莉, 王海鹏, 王滨, 张艳, 彭艳君, 陈青松, 徐振锋. 中国森林生态系统凋落叶分解速率的分布特征及其控制因子. 植物生态学报, 2014, 38(6): 529-539.
- [52] 李昌骏, 李婷, 李露露, 缪利, 魏巍, 王芝奥. 生物质炭负载解钾菌对土壤酶活性与微生物群落结构的影响. 土壤学报, 2023, 60(05): 1531-1542.
- [53] Shigyo N, Umeki K, Hirao T. Soil microbial identity explains home-field advantage for litter decomposition. *The New Phytologist*, 2024, 243(6): 2146-2156.
- [54] 赵青, 刘爽, 陈凯, 王世君, 吴承祯, 李键, 林勇明. 武夷山自然保护区不同海拔甜槠天然林土壤有机碳变化特征及影响因素. 生态学报, 2021, 41(13): 5328-5339.
- [55] 柴华, 何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳储量估算的意义. 生态学报, 2016, 36(13): 3903-3910.
- [56] 简尊吉, 雷蕾, 倪妍妍, 朱建华, 曾立雄, 肖文发. 砾石对马尾松人工林土壤有机碳密度评估的影响. 应用生态学报, 2023, 34(08): 2073-2081.
- [57] Liu J, Li S, Ouyang Z, Tam C, Chen X. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(28): 9477-9482.
- [58] Zhang Z, He J, Huang M, Zhou W. Is Regulation Protection? Forest Logging Quota Impact on Forest Carbon Sinks in China. *Sustainability*, 2023, 15(18): 13740.