

亚热带森林碳储量与固碳量的构成及影响因素 ——以武宁县为例

朱锦奇^{1,2,3}, 熊媛巧^{1,2}, 易扬⁵, 王玉杰⁴, 刘敏⁶,
张桂莲⁵, 徐淑蕾^{1,2}, 张娜^{1,2}, 郑博福^{1,2,3}

(1. 南昌大学资源与环境学院, 南昌 330031; 2. 南昌大学江西生态文明研究院, 南昌 330031;
3. 南昌大学流域碳中和教育部工程研究中心, 南昌 330031; 4. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083;
5. 上海市园林科学规划研究院, 上海 200232; 6. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 成都 610057)

摘要: [目的] 准确评估区域森林碳储量和固碳量的数值、分布特点、构成和影响因素, 是科学制定森林管理及相应调控政策的重要依据。[方法] 选择隶属于亚热带典型森林区域的生态型县域作为研究对象, 选取97个不同树种及不同龄组的样地开展地上、地下碳储量和固碳量的实测, 分析碳储量的构成及其与立地因子的相互关系, 并将实测固碳量值与CASA模型计算值比较, 以期亚热带森林碳储量和固碳量评估提供参考。[结果] 1) 2020年研究区森林平均碳密度、总碳储量、植被层总固碳量分别为158.05 t/hm²、4.07×10⁷ t、28.41×10⁵ t/a。其中碳密度最大的为桦树, 碳储量和植被固碳量最高的均为硬阔类栲属及其他常绿阔叶林, 碳储量最高的龄组为幼龄林。碳密度总体分布规律为土壤层(56.19%)>植被层(42.94%)>枯落物层(0.87%)。2) 立地因子中土层厚度与土壤碳密度呈显著正相关, 与枯落物密度呈显著负相关。3) 除灌木林外, CASA模型估算固碳量值与样地实测测算出的固碳值差异大, 样地实测值高出96.49%以上。[结论] 在典型亚热带森林中, 桦树在植被碳密度上具有显著优势, 土壤层的碳储量是森林碳储量占比最大的部分, 土层厚度是影响土壤碳密度和枯落物碳密度最主要的驱动因素。同时, 除灌木林外, 模型计算值低估研究区的森林固碳量。

关键词: 亚热带森林; 碳储量; 固碳量; CASA

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0256-12

Composition and Influencing Factors of Carbon Storage and Sequestration in Subtropical Forests ——A Case Study of Wuning County

ZHU Jinqi^{1,2,3}, XIONG Yuanqiao^{1,2}, YI Yang⁵, WANG Yujie⁴, LIU Min⁶,
ZHANG Guilian⁵, XU Shulei^{1,2}, ZHANG Na^{1,2}, ZHENG Bofu^{1,2,3}

(1. School of Resources and Environmental Science, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Jiangxi Institute of Ecological Civilization, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 3. Engineering Research Center of Watershed Carbon Neutralization, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 4. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 100083 Beijing, China; 5. Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Shanghai 200232, China; 6. Southwest Electric Power Design Institute CO., LTD. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610057, China)

Abstract: [Objective] Accurate assessment of the value, distribution characteristics, composition and influencing factors of regional forest carbon storage and sequestration is an important basis for scientific formulation of forest management and corresponding regulation policies. [Methods] Ecotype counties belonging to typical subtropical

收稿日期: 2024-10-29

修回日期: 2025-01-02

录用日期: 2025-01-09

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-04-01

资助项目: 国家自然科学基金项目(32201626); 江西省重点研发专项(20223BBG74S01, 20223BBG71013); 上海市自然科学基金面上项目(23ZR1459700); 上海市软科学研究青年项目(23692120300)

第一作者: 朱锦奇(1991—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水土保持、生态修复、生态文明建设研究。E-mail: zhujq@ncu.edu.cn

通信作者: 郑博福(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事环境规划与管理、生态系统服务研究。E-mail: bfzhen@ncu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

forest areas were selected as the study area. A total of 97 sample plots with different tree species and age groups were selected to carry out field measurement of above-ground and below-ground carbon storage and sequestration, analyze the composition of carbon storage and the relationship between carbon storage and site factors, and compare the measured carbon sequestration values with those calculated by the CASA model. The aim was to provide a reference for the assessment of carbon storage and sequestration in typical subtropical forests. [Results] 1) In 2020, the average forest carbon density, total carbon storage, and total carbon sequestration of vegetation layer in the study area were 158.05 t/hm^2 , $4.07 \times 10^7 \text{ t}$ and $28.41 \times 10^5 \text{ t/a}$, respectively. *Betula* forests had the highest forest carbon density, Hardwood forests and other evergreen broadleaf forests had the highest forest carbon storage and vegetation carbon sequestration. Among age groups, young forests had the highest carbon storage. The overall distribution of carbon density was ranked in the order of soil layer (56.19%) > vegetation layer (42.94%) > litter layer (0.87%). 2) Among the site factors, soil thickness was significantly positively correlated with soil carbon density and negatively correlated with litter density. 3) Except for shrublands, the CASA model significantly underestimated carbon sequestration compared to the measured values from the sample plots, with the measured values being 96.49% higher than the model estimates. [Conclusion] In typical subtropical forests, *Betula* has a significant advantage in vegetation carbon density. Soil layer carbon storage is the largest part of forest carbon storage, and soil layer thickness is the most important driving factor affecting soil carbon density and litter carbon density. Additionally, except for shrublands, the model calculations underestimated the forest carbon sequestration in the study area.

Keywords: subtropical forest; carbon storage; carbon sequestration amount; CASA model

Received: 2024-10-29

Revised: 2025-01-02

Accepted: 2025-01-09

Online(www.cnki.net): 2025-04-01

气候变化已成为世界热点问题,为应对气候变化,我国在2020年第七十五届联合国大会上提出“双碳”目标,在实现“双碳”目标过程中,陆地碳汇被广泛关注^[1]。陆地生态系统中森林生态系统是最重要的碳汇来源之一^[2-3],森林生态系统储存陆地生态系统中地上和地下碳库的80%和40%以上^[4],是人类生存和发展的重要保障。因此,森林生态系统在实现碳中和目标过程中和人类发展进程上发挥着重要作用,准确评估森林碳储量和固碳量对于研究森林碳循环意义重大。

近年来,已有学者^[5-8]针对不同区域尺度上不同类型森林碳储量进行大量研究。在现有的森林生态系统碳储量和碳汇功能研究中,大多数学者^[9-10]选择模型模拟法和遥感估算法来估算某一区域碳储量,但通过对李晓悦等^[11]、胡芳等^[12]的研究比较发现,尽管对同一地区进行碳储量估算,所选择的评估方法不同,其估算结果不同。模型估算法存在模型构建复杂和不确定性较高的问题,后续应进一步提高模型的精度和应用范围^[13]。样地清查法是森林生态系统碳储量估算方法中最为准确的方法^[14],虽其耗费的时间和精力都较多,采用的学者较少,但其可实现对估算模型的验证和校准,修正部分模型的假设,依然是现阶段碳汇研究重要的方法之一。

森林碳密度的大小和森林类型、林龄、立地条件

等因素有关^[15],目前已有不少学者^[16-17]对此展开大量研究。森林碳储量包括植被碳储量、土壤碳储量及枯落物碳储量,在以往的研究中,学者们^[18-19]多集中于森林植被层的碳储量与碳密度。随后也有部分学者^[20-21]将枯落物层和土壤层纳入考虑,高述超等^[20]基于森林资源二调数据和InVEST模型发现,土壤是森林生态系统中最大的碳库;ZHAO等^[21]则发现,土壤碳储量甚至是植被碳储量的2.87倍,证实土壤层在森林生态系统的碳储量中占据重要部分(占比高达70%)。然而,目前针对森林碳储量在地上、地下部分的分布特征及其影响因素的研究依然稀缺。

亚热带森林在全球森林生态系统具有重要地位,其面积约为全球森林面积的8%^[22],作为热带和温带之间的过渡带,在气候、海拔、地形等方面的过渡属性导致明显的植被分异现象,致使该区域各类型森林碳储量和固碳量的评估一直是现阶段研究的难点^[23]。因此,本文选择江西省武宁县作为研究区域,该县属于亚热带森林生态类型。通过选取97个不同树种和不同年龄组的样地进行研究,开展地上、地下碳储量、固碳量及立地条件相关指标的测定,并将模型固碳量计算值与实测值对比,以期完成相关研究目标:1)亚热带典型森林不同树种、不同龄组及不同层次碳储量、碳密度的分布和构成。2)研究影响碳储量指标的

主要立地因子。3)对比并评估 CASA 模型在亚热带典型森林固碳量估算的适用性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

武宁县(28°52′35″~29°34′29″N, 114°28′17″~115°26′34″E)隶属于江西省九江市,位于江西省西北部,县域总面积为 3 507 km²(图 1)。武宁县多山地丘陵,地势由南北向中部渐缓,呈两山一谷之势。属亚热带季风气候区,年平均气温为 16.6℃,年平均降水量为 1 488.3 mm,年平均日照时间 1 700 h。由于受地形影响,山区云雾较多。武宁县山区以黄壤为主,在高山地区,大部分是花岗岩或者变质岩的地区。县域内森林面积占比达到 78.12%,面积为 2.74×10⁵ hm²,活立木蓄积量为 7.73×10⁶ cm³。武宁县森林生态系统丰富,属于典型的亚热带森林,动植物种类繁多,具有重要的生态价值,植被在水平上主要分布在九岭山脉和幕阜山脉,垂直上主要分布在海拔 600~1 000 m 的区域,森林类型多为阔叶林,是生物多样性保护的重要区域,同时也是江西省重点林业县之一。

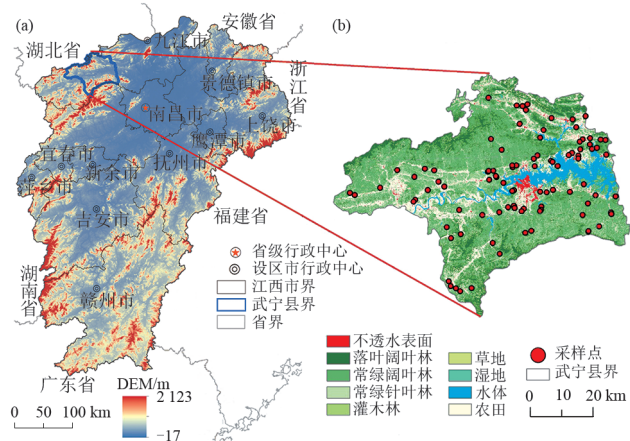


图 1 研究区位置及样点分布

Fig. 1 Location of the study area and distribution of the sampling points

1.2 数据来源

1.2.1 样方数据 为调查该地区林冠层、枯枝落叶层和土壤层的碳储量情况,研究团队于 2020 年,针对该区域所有的典型森林类型,初步选定 120 个具有不同生态系统类型的样地,最终根据实际森林类型和可达性,筛选出 97 个样方进行调查和采样,并记录相关数据(图 1)。主要样地类型有湿地松林、马尾松林、杉木林、桦树林、枫香树林、栎树林、硬阔及其他常绿阔叶林、甜槠林、灌木林、竹林、其他软阔林、经济林、针阔混交林和阔叶混交林。对所有的采样点选取 10 m×10 m 的固定样地,对样地内的乔木层(胸径>5.0 cm)采用每木调查,主要调查树木的种类、胸

径、树高、东西冠幅、南北冠幅等。采用收获法来估算灌草层和枯落物层的生物量^[24]。在每块样地的对角线上设置 5 个 1 m×1 m 的小样方,记录灌草的株数、种类、高度、鲜重等指标并取样,将样品带回实验室烘干至恒重,并根据含水率计算灌草层的生物量。枯落物层则在每块样地内设置 1 个 1 m×1 m 的小样方,按照森林生态系统长期定位观测方法对全分解层、半分解层和未分解层的标准物进行称重后取样。将枯落物样品带回实验室并在 65℃ 下烘干至恒重后,称重并计算出枯落物生物量。土壤调查采用典型抽样法,在样地内挖取 3 个土壤剖面,深度为 60 cm,在 0~20、20~40、40~60 cm 土层采集土壤样品。将采集到的土样风干后带回实验室,研磨过筛后用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法测量有机碳^[25],采用环刀法测定土壤体积质量^[25]。

1.2.2 其他数据 本研究涉及的数据包括高程数据、归一化植被指数(NDVI)、气象数据(月降水、月平均气温和月平均辐射数据)、植被类型空间分布数据、坡度数据、坡向数据和土层厚度数据,具体数据来源见表 1。

1.3 数据处理

1.3.1 森林生物量 森林生物量包括地上生物量和地下生物量,本研究根据样地实测数据,通过生物量回归模型估算法,分别计算出地上生物量与地下生物量。基于样地每木调查数据,湿地松、马尾松、杉木、桦树、枫香树和栎树按照相关行业标准^[26-31],竹子、其他硬阔类和其他软阔根据《中国森林植被生物量和碳储量评估》^[32],甜槠则根据《中国主要林木生物量模型手册》^[33]选择树种的生物量估算模型,将计算出的地上、地下生物量合计得出植被单株生物量。灌木林和经济林生物量则采用平均生物量法,灌木林的生物量采用我国秦岭淮河以南地区的灌木林平均生物量 19.76 t/hm²,经济林则采用我国经济林的平均生物量 23.70 t/hm²^[34]。对于不区分地上地下生物量估算模型,可通过计算出的单株生物量和地上地下生物量比例关系得出地上地下生物量^[35]。

1.3.2 森林碳密度 森林碳密度主要包括植被碳密度和土壤碳密度。本研究植被碳密度通过各林分的生物量乘以各林分的含碳系数获得,含碳系数的选择与生物量模型一致,主要来自相关行业标准^[26-31],或根据《中国森林植被生物量和碳储量评估》^[32]和《中国主要林木生物量模型手册》^[33],计算公式为:

$$C_i = W_i \times c_i \quad (1)$$

式中: C_i 为某树种碳密度,t/hm²; W_i 为某树种生物量,t/hm²; c_i 为某树种含碳系数; i 为树种。

表 1 其他数据来源
Table 1 Other data sources

数据	数据来源	备注
数字高程数据	地理空间数据云 https://www.gscloud.cn/	GDEM 产品
气温数据	国家地球系统科学数据中心 https://www.geodata.cn/	1901—2022 年中国 1 km 分辨率逐月平均气温数据集
降水数据	国家地球系统科学数据中心 https://www.geodata.cn/	1901—2022 年中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集
辐射数据	国家气象科学数据中心 https://data.cma.cn/	利用太阳辐射计算公式由气象站点的日照数据计算得出
归一化植被指数	美国国家航空航天局 https://www.nasa.gov/	MOD13Q1 数据产品
植被类型数据	中国科学院 https://www.cas.ac.cn/	1985—2020 年全球 30 m 精细地表覆盖动态监测产品 (GLC_FCS30-1985_2020)
坡度、坡向、土层厚度数据	武宁县林业局	武宁县 2020 森林资源管理一张图

本研究森林土壤碳密度的计算公式^[36]:
$$SOCD = 10 \times C \times D \times E \quad (2)$$
式中:SOCD 为土壤有机碳密度, t/hm²; C 为土壤有机碳含量, g/kg; D 为土层厚度, cm; E 为土壤体积质量, g/cm³; 10 为单位转换系数。

1.3.3 森林生产力 森林植被的净生产力(net primary productivity, NPP)分为植被年生长量、年凋落量和动物采食量 3 部分, 其中动物采食量一般来说很小且难以估算, 森林净生产力为森林植被年生长量和森林植被年凋落量之和^[37], 因此本研究的森林植被净生产力主要通过计算植被年生长量和年凋落量得出。

植被年生长量(P)与生物量(B)和林龄(A)存在一定的函数关系, 森林植被年凋落量(L)与生物量(B)也存在函数关系^[38], 且已有学者^[39]通过这 2 种关系来计算中国的植被年生长量和年凋落量, 因此本研究中森林植被年生长量的计算公式为:

$$P = \frac{B}{cA + dB} \quad (3)$$

式中: P 为森林植被的年生长量, t/(hm²·a); B 为生物量, t/hm²; A 为林龄, a; c、d 为不同森林类型的常数。

森林植被年凋落量的计算公式为:

$$L = \frac{B}{e + fB} \quad (4)$$

式中: L 为森林植被年凋落量, t/(hm²·a); e、f 为不同森林类型的常数。

植被年生长量和年凋落量计算参数主要来源于余超等^[39]的研究结果。

1.3.4 植被固碳量 植被固碳量可根据化学方程式得出, 植被在积累 1 kg 的净初级生产力的过程中可以固定 1.63 kg 的二氧化碳^[40]。计算公式为:

$$C = NPP \times 1.63 \times \frac{12}{44} \quad (5)$$

式中: C 为固碳量, t/(hm²·a); NPP 为净初级生产力, t/(hm²·a); 1.63 为 NPP 转为 CO₂ 的系数, 12/44 为 CO₂ 转为碳的系数。

1.3.5 基于空间数据的碳汇能力评估 CASA 模型由于其所输入的参数较少、计算流程简单且有较好的模拟结果, 被广泛应用于估算陆地生态系统的净初级生产力, 本文利用 CASA 模型估算的武宁县 NPP 值作为估算固碳量的补充, 对固碳量的不确定性进行分析。

CASA 模型是一个基于光能利用率来计算 NPP 的遥感模型, 主要由植被吸收光合有效辐射(APAR)和光能转化率(ε)来驱动^[41]。模型表达式为:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (6)$$

式中: NPP(x, t) 为像元 x 在 t 月的净初级生产力, g/(m²·month)(以 C 计); APAR(x, t) 为像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射, MJ/(m²·month); ε(x, t) 为像元 x 在 t 月的实际光能利用率, g/MJ(以 C 计)。

2 结果与分析

2.1 森林碳储量与碳密度

研究区的 14 种森林类型中, 桦树的植被生物量最高(343.38 t/hm²), 其次为栎树和枫香树 2 个阔叶树种, 灌木林的生物量最低(20.07 t/hm²)(表 2)。森林不同林种总生物量为 0.04×10⁶~12.23×10⁶ t, 总生物量最高的为硬阔类栲属及其他常绿阔叶林(12.23×10⁶ t)和杉木(8.07×10⁶ t), 主要由于其面积占比较高。与生物量的结果类似, 植被碳密度最大的为桦树(167.30 t/hm²), 显著高于其他树种, 最小的为灌木林(10.03 t/hm²), 其次是经济林(14.17 t/hm²)。可能是因为灌木林的生长周期短, 生物量相对较小, 因而碳

密度低;而经济林因市场需要,在人为因素的干扰下,导致较低的林龄,因而碳密度低。研究区内的平均植被碳密度为 67.87 t/hm²。植被碳储量最大的为硬阔类栲属及其他常绿阔叶林(59.10×10⁵ t)和杉木(40.26×10⁵ t),植被总碳储量为 174.73×10⁵ t。由于凋落物的组成、分解条件及树种的凋落特征等因素的影响,不同森林类型的枯落物层碳密度存在差异,湿地松(5.09 t/hm²)的枯落物碳密度显著高于其他树种,说明湿地松枯落物可以储存更多的碳。

表 2 不同森林类型碳密度和碳储量

Table 2 Carbon density and carbon storage of different forest types											
森林类型	面积/ hm ²	植被 生物量/ (t·hm ⁻²)	植被 碳密度/ (t·hm ⁻²)	植被 碳储量/ (10 ⁵ t)	枯落物 碳密度/ (t·hm ⁻²)	枯落物 碳储量/ (10 ⁴ t)	土壤 碳密度/ (t·hm ⁻²)	土壤 碳储量/ (10 ⁵ t)	森林 碳密度/ (t·hm ⁻²)	森林 碳储量/ (10 ⁵ t)	土壤 碳储量 占比
湿地松	4 497.94	141.34± 42.97bc	66.94± 20.35bc	3.01	5.09± 3.36a	2.29	51.08± 26.35ab	2.30	123.10± 34.43ab	5.54	0.42
马尾松	42 957.28	166.21± 91.78b	87.29± 48.20b	37.50	4.11± 3.28ab	17.66	97.52± 69.86ab	41.89	188.92± 99.34ab	81.15	0.51
杉木	70 225.67	114.90± 53.49bc	57.33± 26.69bc	40.26	1.43± 2.28bc	10.04	99.51± 77.77ab	69.88	158.27± 79.05ab	111.15	0.62
桦树	911.26	343.38± 60.27a	167.30± 29.36a	1.52	0.35±0c	0.03	58.33± 28.22ab	0.53	225.98± 39.05a	2.06	0.26
枫香树	2 117.31	172.60	80.57	1.71	0.40	0.08	69.54	1.47	150.51	3.19	0.46
栎树	11 731.03	189.47± 260.77b	109.17± 150.25ab	12.81	0.66±0c	0.77	59.54± 60.86ab	6.98	169.37± 211.11ab	19.87	0.35
硬阔类 栲属及 其他常绿 阔叶林	87 551.64	139.65± 44.86bc	67.51± 21.69bc	59.10	0.40±0c	3.50	71.02± 47.07ab	62.18	138.93± 50.93ab	121.64	0.51
甜槠林	431.16	153.56± 89.76bc	74.23± 43.39bc	0.32	1.03± 0bc	0.04	34.47± 3.82b	0.15	109.73± 46.34ab	0.47	0.32
灌木林	1 829.43	20.07±0c	10.03±0c	0.18	0.04±0c	0.01	94.44± 44.61ab	1.73	104.51± 44.61ab	1.91	0.90
竹林	18 508.99	126.94± 116.10bc	63.47± 58.05bc	11.75	0.28±0c	0.52	117.86± 80.20ab	21.81	181.61± 96.75ab	33.61	0.65
其他 软阔林	4 378.01	83.05± 54.24bc	41.53± 27.12bc	1.80	0.00±0c	0	39.91± 0b	1.75	81.43± 27.12b	3.57	0.49
经济林	2 099.76	28.34± 4.18c	14.17± 2.09c	0.30	0.04±0c	0.01	57.57± 9.57ab	1.21	71.78± 10.54b	1.51	0.80
针阔 混交林	859.03	91.44± 83.20bc	45.52± 43.40bc	0.39	0.70± 0.30c	0.06	161.56± 104.53a	1.39	207.78± 109.86ab	1.78	0.78
阔叶 混交林	9 373.46	88.68± 40.00bc	43.36± 19.11bc	4.06	0.40±0c	0.37	164.28± 0a	15.40	208.04± 19.20ab	19.50	0.79

注:湿地松(*Pinus elliottii*);马尾松(*Pinus massoniana*);杉木(*Cunninghamia lanceolata*);桦树(*Betula*);枫香树(*Liquidambar formosana*);栎树(*Quercus L.*);硬阔类栲属及其他常绿阔叶林(hardwood forests and other evergreen broadleaf forests);甜槠林(*Castanopsis eyrei*);灌木林(shrublands);竹林(bamboo);其他软阔林(other softwood forest);经济林(non-wood product forest);针阔混交林(mixed conifer and broadleaf forest);阔叶混交林(mixed broadleaf forest);表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同树种之间差异显著;由于枫香树只有 1 个样地,因此未对其进行方差分析。下同。

森林平均土壤碳密度为 88.81 t/hm²,其中阔叶混交林土壤碳密度最高(164.28 t/hm²),甜槠最低(34.47 t/hm²)(表 2),二者之间存在显著性差异,说明在研究区阔叶混交林的土壤质量最好。土壤碳储量为 0.15×10⁵~69.88×10⁵ t,土壤碳储量占比较大,为 26%~90%,总土壤碳储量为 228.67 万 t,占森林总碳储量的 56.19%。证实土壤碳库是森林生态系统中最大的碳库,因此土壤碳储量是森林碳储量中不可忽略的一部分。

森林碳储量主要由植被碳储量和土壤碳储量组成。研究区内不同树种的碳储量差异大,为 0.47×10⁵~121.64×10⁵ t,其中硬阔类栲属及其他常绿阔叶的森林碳储量最大(121.64×10⁵ t),占研究区森林碳储量的 29.89%;其次是杉木和马尾松,分别为 111.15×10⁵ t和

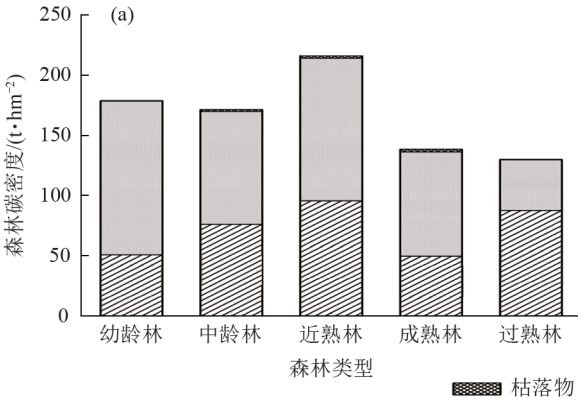
81.15×10⁵ t, 占研究区森林碳储量的 27.31% 和 19.94%。3 类树林占研究区森林碳储量的 77.14%, 说明研究区的森林以杉木、硬阔类栲属及其他常绿阔叶和马尾松为主。

碳储量的大小与立地因子密切相关。研究区样地主要分布在半阴坡和半阳坡, 坡度上主要分布在 6°~35° 的坡度梯度上, 海拔主要分布在 60~500 m。利用各个样点的立地因子与碳密度绘制相关性图 (图 2), 结果表明, 研究区内植被碳密度与生物量显著相关; 在立地因子中, 土层厚度与土壤碳密度显著正相关, 说明土层厚度越大, 土壤碳密度越高, 更厚的土层储存更多的碳。土层厚度与枯落物密度呈显著负相关, 说明越厚的土层中枯落物的碳密度越少。虽然其中坡向、坡度、土层厚度和海拔与地上生物量不显著, 但也有一定的相关性。

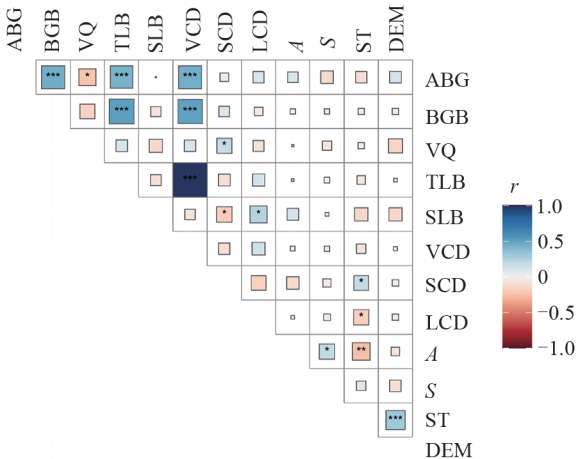
2.2 不同龄组森林碳密度与碳储量

森林碳密度和碳储量与林龄有关, 一般来说, 森林碳密度和碳储量随着林龄的增加而增加, 但也受到其他因素的影响, 如当地的林分抚育措施等。从植被碳密度来看, 整体上研究区内不同龄组植被碳密度并没有随着树龄的增加而增加, 植被碳密度最大的是近熟林 (95.62 t/hm²) (图 3a), 可能是由于成熟林中针叶林的占比大, 阔叶林的占比小。从土壤碳密度来看, 土壤碳密度在前 3 种龄组中的分布大于后 2 种, 幼龄林的土壤碳密度在幼龄林森林碳密度中的占比高达 71.37%。

在研究区内不同龄组的植被碳储量中, 中龄林、近熟林和幼龄林这 3 个龄组的植被碳储量较大, 分别



为 376.31×10⁴、347.59×10⁴、318.49×10⁴ t, 而成熟林和过熟林的植被碳储量相对较小, 分别为 85.52×10⁴、28.71×10⁴ t (图 3b)。在总的森林碳储量中, 森林碳储量随着林龄的增加而减少。在不同龄组的碳储量分布中, 森林碳储量的分布规律与土壤碳储量的分布规律一致, 皆在幼龄林中碳储量最大, 过熟林中碳储量最小。前 3 龄组的森林碳储量远大于后 2 组, 说明研究区内幼龄林、中龄林和成熟林的比重大, 因此, 如果未来该地区能够抚育好这些树种, 该地区的碳汇功能将进一步提升。



注: 图中 AGB 为地上生物量; BGB 为地下生物量; VQ 为植被数量; TLB 为乔木层生物量; SLB 为灌木层生物量; VCD 为植被碳密度; SCD 为土壤碳密度; LCD 为枯落物碳密度; A 为坡向; S 为坡度; ST 为土层厚度; DEM 为海拔高度; 95% 置信区间; **p*<0.05, ***p*<0.01, ****p*<0.001。

图 2 碳储量指标与立地因子相关性
Fig. 2 Correlation graph between carbon storage indices and site factors

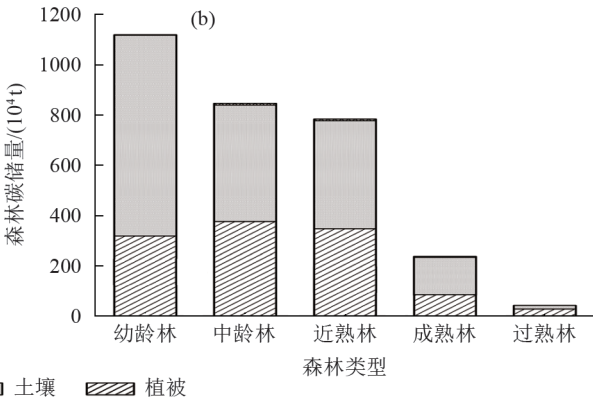


图 3 不同龄组森林碳密度和碳储量

Fig. 3 Carbon density and carbon storage of different age groups of forests

2.3 森林固碳(碳汇)能力

不同植被类型的净生产力大小顺序为桦树>马尾松>枫香树>硬阔类栲属及其他常绿阔叶林>甜槠林>竹林>杉木>其他软阔林>湿地松>阔叶混交林>栎树>针阔混交林>经济林>灌木林(表 3)。通过与植被生物量比较发现, 虽然净生产力与植被生

物量密切相关, 但不同植被类型净生产力的大小顺序与植被生物量的大小顺序并不完全相同, 植被生物量大的树种净生产力不一定大。研究区平均植被固碳量为 11.04 t/(hm²·a), 桦树与其他树种的固碳量有显著性差异, 植被层总固碳量为 28.41×10⁵ t/a, 固碳量最少的为灌木林 (0.04×10⁵ t/a), 而固碳量最大的为

硬阔类栲属及其他常绿阔叶林(11.42×10^5 t/a),占森林总固碳量的 40.18%,与其较大的面积占比(占总面积的 34.00%)有关;其次为杉木(6.56×10^5 t/a)和马尾松(5.75×10^5 t/a),占森林固碳量的 23.08% 和

20.24%,该 3 种树种是该地区森林生态系统碳固定的主要贡献者,说明乔木树种在固碳能力上占有主导地位。因此,未来亚热带地区可对这几类森林加以抚育管理,进而有望提升该地区森林地的碳汇功能。

表 3 不同森林类型植被固碳量

Table 3 Carbon sequestration of different forest types

森林类型	植被年生长量/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	年凋落量/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	净生产力/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	植被单位 面积固碳量/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	植被层 固碳量/ ($10^5\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)
湿地松	$11.13\pm 2.46\text{bc}$	$5.61\pm 1.28\text{bcd}$	$16.74\pm 3.29\text{bc}$	$7.44\pm 1.46\text{bc}$	0.33
马尾松	$21.86\pm 14.88\text{ab}$	$8.27\pm 3.91\text{ab}$	$30.13\pm 18.10\text{ab}$	$13.39\pm 8.05\text{ab}$	5.75
杉木	$15.52\pm 12.76\text{bc}$	$5.49\pm 1.51\text{bcd}$	$21.01\pm 13.60\text{bc}$	$9.34\pm 6.05\text{bc}$	6.56
栎树	$37.85\pm 7.14\text{a}$	$12.26\pm 1.27\text{a}$	$50.11\pm 8.30\text{a}$	$22.27\pm 3.69\text{a}$	0.20
枫香树	21.16	7.74	28.90	12.85	0.27
栎树	$8.37\pm 10.64\text{bc}$	$5.99\pm 8.08\text{bc}$	$14.36\pm 18.72\text{bc}$	$6.38\pm 8.32\text{bc}$	0.75
硬阔类栲属及其他常绿阔叶林	$22.84\pm 6.17\text{ab}$	$5.33\pm 1.33\text{bcd}$	$28.17\pm 7.32\text{ab}$	$13.04\pm 3.36\text{ab}$	11.42
甜槠林	$18.21\pm 9.14\text{bc}$	$5.56\pm 2.68\text{bcd}$	$23.77\pm 11.79\text{bc}$	$11.10\pm 5.49\text{bc}$	0.05
灌木林	$3.89\pm 0.47\text{c}$	$1.16\pm 0\text{d}$	$5.05\pm 0.47\text{c}$	$2.24\pm 2.24\text{c}$	0.04
竹林	$17.52\pm 11.79\text{bc}$	$4.95\pm 4.85\text{bcd}$	$22.47\pm 16.02\text{bc}$	$10.46\pm 6.12\text{bc}$	1.94
其他软阔林	$13.96\pm 7.74\text{bc}$	$3.42\pm 1.99\text{cd}$	$17.38\pm 9.73\text{bc}$	$8.06\pm 4.51\text{bc}$	0.35
经济林	$7.57\pm 4.17\text{bc}$	$1.31\pm 0\text{cd}$	$8.88\pm 4.17\text{bc}$	$3.52\pm 1.65\text{bc}$	0.07
针阔混交林	$8.61\pm 4.20\text{bc}$	$3.45\pm 3.15\text{cd}$	$12.06\pm 7.01\text{bc}$	$5.94\pm 3.55\text{bc}$	0.05
阔叶混交林	$10.52\pm 0\text{bc}$	$4.51\pm 0\text{bcd}$	$15.03\pm 0\text{bc}$	$6.68\pm 0\text{bc}$	0.63

本研究将 CASA 模型估算的 NPP 作为补充(图 4),NPP 估算值换算成固碳量后与样地实测固碳量进行对比分析。由 CASA 模型估算出的固碳量为 $0\sim 800.36\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ (以 C 计),整体上呈现出由中部向四周递增的趋势,大部分区域固碳量为 $225.00\sim 675.00\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ (以 C 计),面积占比为 80% 以上,平均固碳量为 $531.83\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ (以 C 计),与样地实测测算出的固碳值差异大[样地实测固碳量为 $1\,103.60\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ (以 C 计)]。从不同森林类型而言,除灌木林外,其他森林类型的 CASA 模型估算结果均与样地实测结果存在很大差异,样地实测值高出模型估算值的 96.49% 以上,说明不同方法对同一地区的固碳量评估存在较大差异。

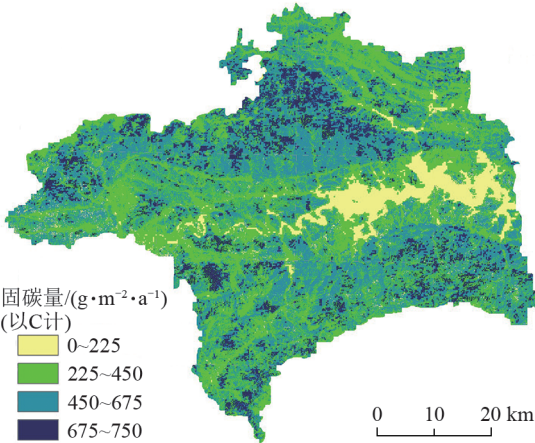


图 4 CASA 模型估算值

Fig. 4 Values estimated by the CASA model

3 讨论

3.1 亚热带森林生态系统碳密度和碳储量

本研究利用样地实测数据,对研究区森林碳密度和碳储量进行分析表明,区域内森林总碳储量为 406.95 万 t,其中土壤碳储量为 228.67 万 t,占森林碳储量的 56.19%(表 1),略高于印度的 52.73%^[42]。结果证实土壤碳库的重要作用,土壤碳库是研究森林碳储量中不可忽略的一部分。同时,本研究发现,亚热带森林土壤碳储量是植被碳储量的 1.31 倍,低于全国的 3.39 倍^[43],而内蒙古地区的森林土壤碳储量是植被碳储量的 4.47 倍^[44]。已有研究^[45]证实,温度和降水等因素可以通过控制土壤微生物和酶活性及基质可用性来直接或间接影响 SOC 分解。南方地区的年平均气温和降水量较高,更高的气温和更多的降水将会导致土壤中的有机碳更易分解^[46],降低潜在的土壤碳储量。

研究区森林碳密度分布规律为土壤层(56.19%)>植被层(42.94%)>枯落物层(0.87%),与大多数学者^[20,47-49]的研究规律一致。研究区内森林平均碳密度为 $158.05\text{ t}/\text{hm}^2$,远低于全国森林平均碳密度 $258.83\text{ t}/\text{hm}^2$ ^[40],与本研究区的林龄整体较低有关(图 3)。本研究中植被层平均碳密度为 $67.87\text{ t}/\text{hm}^2$,略高于吉林省的 $54.35\text{ t}/\text{hm}^2$ ^[50],土壤层平均碳密度为 $88.81\text{ t}/\text{hm}^2$,枯落物平均碳密度为 $1.37\text{ t}/\text{hm}^2$,与南方

其他区域的研究结果相似(土壤层为 91.95 t/hm², 枯落物层为 1.54 t/hm²)^[47], 但低于吉林省土壤层(164.67 t/hm²)和枯落物层的碳密度(5.64 t/hm²), 主要是由于南方地区的年平均气温和降水量均高于吉林省^[50]。森林生态系统具有空间异质性, 其碳储量的大小除植被因素影响外, 与立地因子及周围其他环境等因素也有一定联系^[51]。土层厚度与土壤碳密度呈正相关, 与枯落物密度呈负相关, 可能是因为土层厚度影响枯落物的分解速率, 在较厚的土层中, 土壤微生物、真菌和其他分解者的活动可能更为活跃, 有利于枯落物的分解并转换为土壤中的有机碳, 因此越厚的土层中枯落物的碳密度越少^[52]。

从不同林龄森林碳储量分布来看, 幼龄林、中龄林和近熟林碳储量之和超过总碳储量的 90.83%(图 3b)。幼龄林、中龄林和近熟林所占面积较大, 说明研究区内的森林总体还处于生长阶段, 在理论上具有巨大的固碳潜力。有研究^[16,53]表明, 森林碳密度通常随着林龄的增大而增大, 在本研究中并未呈现此规律, 主要是由于该区域在早期植树造林阶段所种植的树种多为针叶林^[54], 导致成熟林和过熟林中针叶林占比较高, 而阔叶林多分布于较小龄组, 同时阔叶林的碳密度普遍大于针叶林^[55-56], 因此该研究中的森林碳密度并未随着林龄的增大而增大。再次说明研究区森林生态系统巨大的碳汇潜力。

3.2 不同森林固碳量评估方法的比较

森林是一个复杂的生态系统, 森林数据来源的不同和估算方法的不同导致估算结果的不同^[57]。本研究基于样地实测数据, 根据估算出的生物量进一步估算植被层的年生长量和年凋落量, 从而得出植被的净生产力, 进而对研究区植被固碳量进行分析。同时辅以 CASA 模型估算结果发现, 2 种方法估算出的固碳量差异较大。因实测值的复杂和难以获取, 极少有研究能在 1 个区域内同时对比 CASA 模型的固碳计算值和实测结果, 通过尽可能地分析梳理这 2 类前人的研究结果(表 4)发现, CASA 模型对固碳量的评估普遍小于实测值, 并且同一估算方法的估算结果之间也存在一定差异。

不同评估方法各有优缺点, 样地清查法虽然准确性高, 但投入成本大, 只适合小尺度范围的估算, 针对大尺度下的固碳量估算, 应选择模型模拟法或遥感估算法^[58]。选择合适的方法通常取决于具体的研究目标、预算和地理条件。在一些情况下, 结合多种方法或许可以提高评估的准确性和可靠性。因此, 区域的固碳量的测定和评估都需要更加科学可靠和标准化的手段, 并科学地看待遥感评估的使用和结果, 持续开展相关研究对评估方法和结果进行修正, 以期实现区域森林固碳量的准确评估。

表 4 各林分固碳量

Table 4 Carbon sequestration of different forest types					g/(m ² ·a)(以 C 计)	
指标	常绿针叶林	落叶阔叶林	常绿阔叶林	灌木林	研究区	参考文献
CASA 模型估算值	271.04	346.35	321.76	240.77	重庆	[59]
	192.70	280.06	381.51	209.38	三峡库区	[60]
	173.46	278.15	—	151.23	渭河流域	[61]
	163.19	285.80	438.23	163.46	中国	[41]
	—	190.27	188.93	—	黄土高原	[62]
	221.20	283.27	588.45	—	中国	[63]
	183.51	239.39	467.26	75.57	中国	[64]
	146.87	252.46	540.49	118.42	东亚地区	[65]
实测值	—	364.50	509.40	—	中国	[39]
	—	344.97	530.30	—	中国	[66]
	—	683.20	785.50	—	青藏高原	[67]
	—	484.55	974.44	—	中国	[68]

注:表中固碳量均由文献中的 NPP 值采用与本文相同的方法转换为固碳量。

4 结 论

1) 亚热带典型森林中桦树的碳密度最大, 硬阔类栲属及其他常绿阔叶林的碳储量和固碳量最大; 在不同龄组中幼龄林为碳储量最大的龄组; 碳密度分布规律为土壤层(56.19%)> 植被层(42.94%)> 枯落物层(0.87%), 证明土壤碳库的重要地位。

2) 在主要的立地因子中, 土层厚度是土壤碳密度和枯落物碳密度的主要驱动因素, 土层厚度与土壤碳密度呈显著正相关, 与枯落物碳密度呈显著负相关; 坡向、坡度、土层厚度和海拔与地上生物量相关但差异不显著。

3) 除灌木林外, CASA 模型计算值低估研究区的

森林固碳量,样地实测值高出模型估算值的 96.49% 以上。不同固碳量评估方法的结果存在较大差异,未来针对亚热带典型森林的实测和模型修正还存在大量的工作亟待开展。

参考文献:

- [1] 朴世龙,岳超,丁金枝,等.试论陆地生态系统碳汇在"碳中和"目标中的作用[J].中国科学:地球科学,2022,52(7):1419-1426.
PIAO S L, YUE C, DING J Z, et al. Perspectives on the role of terrestrial ecosystems in the "carbon neutrality" strategy[J]. Science China Earth Sciences, 65(6): 1178-1186.
- [2] FANG J, CHEN A, PENG C, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [3] BÖTTCHER H, KURZ W A, FREIBAUER A. Accounting of forest carbon sinks and sources under a future climate protocol-factoring out past disturbance and management effects on age-class structure [J]. Environmental Science and Policy, 2008, 11(8): 669-686.
- [4] MALHI Y, BALDOCCHI D D, JARVIS P G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests[J]. Plant, Cell and Environment, 1999, 22(6): 715-740.
- [5] 付晓,张煜星,王雪军.2060年前我国森林生物量碳库及碳汇潜力预测[J].林业科学,2022,58(2):32-41.
FU X, ZHANG Y X, WANG X J. Prediction of forest biomass carbon pool and carbon sink potential in China before 2060 [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(2): 32-41.
- [6] 吴皓晴,刘子刚.吉林省生态系统碳储量影响因素分析[J].中国环境科学,2024,44(3):1706-1717.
WU H Q, LIU Z G. Influencing factors of ecosystem carbon storage in Jilin Province[J]. China Environmental Science, 2024, 44(3): 1706-1717.
- [7] CHENG K L, WU J, MA X Z, et al. Simulation of carbon sink of arbor forest vegetation in Henan Province of China based on CO2FIX model [J]. Land, 2023, 12(1): e246.
- [8] SUHERIYANTO D, MADAPURI G N, WAHYUDI D. Identification of tree species and their potential as carbon stock in three urban forests of Malang City, Indonesia[J]. Jurnal Biota, 1970, 10(1): 44-51.
- [9] 张聪,刘琪,李海奎,等.我国尺度兼容和树种分类的材积源森林碳储量模型[J].林业科学,2025,61(1):57-69.
ZHANG C, LIU Q, LI X J, et al. Scale-compatible and tree species-classified forest carbon storage model of volume-derived in China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(1): 57-69.
- [10] 王可月,王轶夫,陈馨,等.基于集成学习算法和 Optuna 调优的江西省森林碳储量遥感估测[J].生态学报,2025, 45(2): 685-700.
WANG K Y, WANG Y F, CHEN X, et al. Remote sensing estimation of forest carbon storage in Jiangxi Province based on ensemble learning algorithm and Optuna tuning [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(2): 685-700.
- [11] 李晓悦,覃盟琳,庞雅月,等.广西国土空间碳储量多情景模拟与区划管控对策研究[J].广西大学学报(自然科学版),2023,48(6):1352-1365.
LI X Y, QIN M L, PANG Y Y, et al. Study on multi-scenario modeling of carbon storage in Guangxi land space and countermeasures for zoning and control [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2023, 48(6): 1352-1365.
- [12] 胡芳,杜虎,曾馥平,等.广西不同林龄喀斯特森林生态系统碳储量及其分配格局[J].应用生态学报,2017, 28(3): 721-729.
HU F, DU H, ZENG F P, et al. Carbon storage and its allocation in karst forest at different stand ages in Guangxi, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3): 721-729.
- [13] 李开云,丁雪.基于 PLUS-InVEST-GeoDetector 模型的玉溪市碳储量时空演变及其驱动因素分析[J/OL].环境科学, 2024: 1-16. (2024-12-25). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HJKZ20241221018&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
LI K Y, DING X. Analysis of spatio-temporal evolution and driving factors of carbon storage in Yuxi city based on the PLUS-InVEST-GeoDetector model [J/OL]. China Industrial Economics, 2024: 1-16. (2024-12-25). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HJKZ20241221018&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [14] CAMPBELL M J, DENNISON P E, KERR K L, et al. Scaled biomass estimation in woodland ecosystems: Testing the individual and combined capacities of satellite multispectral and lidar data [J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 262: e112511.
- [15] 蔺佳玮,张全智,王传宽.帽儿山干扰系列次生林碳密度恢复[J].生态学报,2023,43(21):8793-8802.
LIN J W, ZHANG Q Z, WANG C K. Carbon density recovery of disturbance sequence secondary forests in Maershan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8793-8802.
- [16] 段兰兰,刘菊,贺丽,等.中条山森林碳密度时空变化及其驱动因素分析[J].水土保持学报,2023,37(4):158-165.
DUAN L L, LIU J, HE L, et al. Spatio-temporal variation and driving factors of forest carbon density in Zhongtiao Mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4): 158-165.

- [17] 马长明,赵辉,牟洪香,等.燕山山地华北落叶松人工林碳密度及分配特征[J].水土保持学报,2017,31(5):208-214.
- MA C M, ZHAO H, MU H X, et al. Carbon density and its allocation characteristics of *Larix principis-rupprechtii* plantation in Yanshan mountainous area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(5):208-214.
- [18] 王雪晴,卜元坤,魏江涛,等.黄龙山森林植被地上碳储量时空变化及驱动力[J].生态学报,2023,43(19):7896-7909.
- WANG X Q, BU Y K, WEI J T, et al. Spatio-temporal variation and driving forces of forest vegetation aboveground carbon storage in Huanglong Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(19):7896-7909.
- [19] ZHANG Y, YUAN J, YOU C M, et al. Contributions of National Key Forestry Ecology Projects to the forest vegetation carbon storage in China[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 462: e117981.
- [20] 高述超,陈毅青,陈宗铸,等.海南岛森林生态系统碳储量及其空间分布特征[J].生态学报,2023,43(9):3558-3570.
- GAO S C, CHEN Y Q, CHEN Z Z, et al. Carbon storage and its spatial distribution characteristics of forest ecosystems in Hainan Island, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9):3558-3570.
- [21] ZHAO J F, MA J Y, HOU M T, et al. Spatial-temporal variations of carbon storage of the global forest ecosystem under future climate change[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2020, 25(4):603-624.
- [22] 杨雲雲,晏斌,许勤勤,等.昆虫取食对亚热带幼树叶挥发性有机化合物释放与光合特性的影响[J].应用生态学报,2025,36(2):461-472.
- YANG Y Y, YAN B, XU Q Q, et al. Effects of insect herbivory on leaf volatile organic compound emission and photosynthetic characteristics of saplings in subtropical region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(2):461-472.
- [23] 杨永川.中国中亚热带东部低山丘陵地形梯度上植被的分异及其形成和维持机制[D].上海:华东师范大学,2005.
- YANG Y C. Vegetation differentiation and its formation and maintenance mechanism on the topographic gradient of low mountains and hills in the eastern part of central subtropical China [D]. Shanghai: East China Normal University, 2005.
- [24] 万胜,张虎国,易杭,等.不同龄级及林分密度天山云杉的碳储量及其分配特征[J].森林与环境学报,2024,44(5):521-529.
- WAN S, ZHANG H G, YI H, et al. Carbon storage and distribution characteristics of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* natural forest at different age classes and stand densities[J]. Journal of Forest and Environment, 2024, 44(5):521-529.
- [25] 杜森,高祥照.土壤分析技术规范[M].2版.北京:中国农业出版社,2006.
- DU S, GAO X Z. Technical standards for soil analysis [M]. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [26] 国家林业局调查规划设计院,国家林业局华东林业调查规划设计院,国家林业局中南林业调查规划设计院,等.立木生物量模型及碳计量参数:湿地松[Z].国家林业局,2014:1-16.
- Design Institute of Inventory and Planning of National Forest Administration, East China Forest Design Institute of Inventory and Planning of National Forest Administration, Central South Forest Design Institute of Inventory and Planning of National Forest Administration, et al. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Pinus elliottii* [Z]. National Forest Administration, 2014: 1-16.
- [27] 国家林业局调查规划设计院,国家林业局中南林业调查规划设计院,国家林业局华东林业调查规划设计院,等.立木生物量模型及碳计量参数:马尾松[Z].国家林业局,2014:1-20.
- Design Institute of Inventory and Planning of National Forest Administration, East China Forest Design Institute of Inventory and Planning of National Forest Administration, Central South Forest Design Institute of Inventory and Planning of National Forest Administration, et al. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Pinus massoniana* [Z]. National Forest Administration, 2014: 1-20.
- [28] 国家林业局调查规划设计院,国家林业局华东林业调查规划设计院,国家林业局中南林业调查规划设计院,等.立木生物量模型及碳计量参数:杉木[Z].国家林业局,2014:1-20.
- Design Institute of Inventory and Planning of National Forest Administration, East China Forest Design Institute of Inventory and Planning of National Forest Administration, Central South Forest Design Institute of Inventory and Planning of National Forest Administration, et al. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Cunninghamia lanceolata* [Z]. National Forest Administration, 2014: 1-20.
- [29] 国家林业局调查规划设计院,国家林业局西北林业调查规划设计院,国家林业局中南林业调查规划设计院,

- 等. 立木生物量模型及碳计量参数: 桦树[Z]. 国家林业局, 2016: 1-32.
- Design Institute of Inventory and Planning of National Forest Administration, East China Forest Design Institute of Inventory and Planning of National Forest Administration, Central South Forest Design Institute of Inventory and Planning of National Forest Administration, et al. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Betula*[Z]. National Forest Administration, 2014: 1-32.
- [30] 国家林业局调查规划设计院, 国家林业局华东林业调查规划设计院, 国家林业局中南林业调查规划设计院, 等. 立木生物量模型及碳计量参数: 枫香[Z]. 国家林业局, 2016: 1-16.
- Design Institute of Inventory and Planning of National Forest Administration, East China Forest Design Institute of Inventory and Planning of National Forest Administration, Central South Forest Design Institute of Inventory and Planning of National Forest Administration, et al. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Liquidambar formosana* [Z]. National Forest Administration, 2014: 1-16.
- [31] 国家林业局调查规划设计院, 国家林业局华东林业调查规划设计院, 国家林业局中南林业调查规划设计院, 等. 立木生物量模型及碳计量参数: 栎树[Z]. 国家林业局, 2016: 1-32.
- Design Institute of Inventory and Planning of National Forest Administration, East China Forest Design Institute of Inventory and Planning of National Forest Administration, Central South Forest Design Institute of Inventory and Planning of National Forest Administration, et al. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Quercus* [Z]. National Forest Administration, 2014: 1-32.
- [32] 李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- LI H K, LEI Y C. Estimation and evaluation of forest biomass carbon storage in China [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010.
- [33] 罗云建, 王效科, 逯非. 中国主要林木生物量模型手册[M]. 北京: 中国林业出版社, 2015.
- LUO Y J, WANG X K, LU F. Comprehensive database of biomass regressions for China's tree species[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2015.
- [34] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- FANG J Y, LIU G H, XU S L. Biomass and net production of forest vegetation in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 1996, 16(5): 497-508.
- [35] MOKANY K, RAISON R J, PROKUSHKIN A S. Critical analysis of root: Shoot ratios in terrestrial biomes[J]. Global Change Biology, 2006, 12(1): 84-96.
- [36] LI Y Q, CHEN Y P, WANG X Y, et al. Improvements in soil carbon and nitrogen capacities after shrub planting to stabilize sand dunes in China's horqin sandy land [J]. Sustainability, 2017, 9(4): e662.
- [37] 熊华, 于飞, 谷晓平, 等. 梵净山不同森林植被生物量、净生产量、碳储量及空间分布特征[J]. 生态环境学报, 2021, 30(2): 264-273.
- XIONG H, YU F, GU X P, et al. Biomass, net production, carbon storage and spatial distribution features of different forest vegetation in Fanjing Mountains [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(2): 264-273.
- [38] 刘建泉, 李进军, 邸华. 祁连山森林植被净生产量、碳储量和碳汇功能估算[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(2): 1-7.
- LIU J Q, LI J J, DI H. Estimation of forest vegetation net production, carbon storage and carbon sink function in Qilian Mountains [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(2): 1-7.
- [39] 余超. 基于森林资源清查数据的中国森林植被生物量和生产力动态变化分析[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2015.
- YU C. Dynamic change of the biomass and net primary production for China based on national forest inventory [D]. Heifei: Anhui Agricultural University, 2015.
- [40] 朱坤, 彭建松, 张文莉. 曲靖市森林生态系统固碳释氧的生态效益[J]. 森林工程, 2022, 38(2): 34-43.
- ZHU K, PENG J S, ZHANG W L. Ecological benefits and value evaluation of carbon fixation and oxygen release in Qujing City [J]. Forest Engineering, 2022, 38(2): 34-43.
- [41] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424.
- ZHU W Q, PAN Y Z, ZHANG J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 413-424.
- [42] AHIRWAL J, NATH A, BRAHMA B, et al. Patterns and driving factors of biomass carbon and soil organic carbon stock in the Indian Himalayan region [J]. Science of the Total Environment, 2021, 770: e145292.
- [43] 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[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): e518.
- ZHOU Y R, YU Z L, ZHAO S D. Carbon storage and carbon balance of main forest ecosystems in China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2000, 24(5): e518.
- [44] 田震, 高凡, 赛硕, 等. 清水河县森林生态系统碳储量、碳密度分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(6): 166-173.
- TIAN Z, GAO F, SAI S, et al. Distribution of carbon

- stock and carbon density of forest ecosystems in Qing Shui He County, Inner Mongolia [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2024, 38(6): 166-173.
- [45] 朱张羽, 方华军, 沈菊培, 等. 东北典型黑土区土壤有机碳结构特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2024, 44(21): 9815-9825.
- ZHU Z Y, FANG H J, SHEN J P, et al. Characteristics of soil organic carbon structure in the black soil region in northeast China and its influencing factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(21): 9815-9825.
- [46] 陈滇雄. 毛竹林土壤有机碳分解及其温度敏感性的空间分布特征及影响因素[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2024.
- CHEN Z X. Spatial distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon decomposition and its temperature sensitivity in Moso bamboo [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2024.
- [47] 雷海清, 孙高球, 郑得利. 温州市森林生态系统碳储量研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(5): 20-26.
- LEI H Q, SUN G Q, ZHENG D L. Carbon storage of forest ecosystem in Wenzhou City, Zhejiang Province, China [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2022, 46(5): 20-26.
- [48] MENEZES R S C, SALES A T, PRIMO D C, et al. Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest [J]. *Geoderma*, 2021, 390: 114943.
- [49] 许小明, 晏珊珊, 彭晓邦. 东秦岭地区典型恢复植被类型的固碳效应[J/OL]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2025 (11). DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu. 2025. 11.009.
- XU X M, YAN S S, PENG X B. Carbon sequestration effects of the typical restored vegetation types in Eastern Qinling Mountains *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2025 (11). DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu. 2025.11.009.
- [50] 王新闯, 齐光, 于大炮, 等. 吉林省森林生态系统的碳储量、碳密度及其分布[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2013-2020.
- WANG X C, QI G, YU D P, et al. Carbon storage, density, and distribution in forest ecosystems in Jilin Province of Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(8): 2013-2020.
- [51] 兰秀, 杜虎, 宋同清, 等. 广西主要森林植被碳储量及其影响因素[J]. *生态学报*, 2019, 39(6): 2043-2053.
- LAN X, DU H, SONG T Q, et al. Vegetation carbon storage in the main forest types in Guangxi and the related influencing factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(6): 2043-2053.
- [52] 李强, 周道玮, 陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J]. *生态学报*, 2014, 34(14): 3807-3819.
- LI Q, ZHOU D W, CHEN X Y. The accumulation, decomposition and ecological effects of above-ground litter in terrestrial ecosystem [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(14): 3807-3819.
- [53] QIU Z, FENG Z, SONG Y, et al. Carbon sequestration potential of forest vegetation in China from 2003 to 2050: Predicting forest vegetation growth based on climate and the environment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 252: e119715.
- [54] 《武宁县林业志》编纂委员会. 武宁县林业志[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 2009.
- Compilation Committee of Wuning County Forestry Chronicles. *Forestry chronicles of Wuning County* [M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Publishing House, 2009.
- [55] JIN X, LIN S, ZHU J, et al. Dominant tree species and their age groups drive forest carbon storage in Wuyi Mountain national park, China [J]. *Forests*, 2024, 15(3): e546.
- [56] 刘领, 王艳芳, 悦飞雪, 等. 基于森林清查资料的河南省森林植被碳储量动态变化[J]. *生态学报*, 2019, 39(3): 864-873.
- LIU L, WANG Y F, YUE F X, et al. Dynamic of forest vegetation carbon storage in He'nan Province based on forest inventory data [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 864-873.
- [57] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. *生态学报*, 2000, 20(5): 733-740.
- LIU G H, FU B J, FANG J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 733-740.
- [58] 韩泽华, 李国春, 刘丹丹, 等. 黑龙江省主要乔木林类型碳储量及碳汇能力[J]. *北京林业大学学报*, 2024, 46(11): 10-23.
- HAN Z H, LI G C, LIU D D, et al. Carbon storage and carbon sink capacity of major arbor forest types in Heilongjiang Province of northeastern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(11): 10-23.
- [59] 张锐, 罗红霞, 张茹蓓, 等. 重庆市植被净初级生产力估算及其生态服务价值评价[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2015, 37(12): 40-46.
- ZHANG R, LUO H X, ZHANG R B, et al. Estimation of vegetation net primary productivity in Chongqing and evaluation of its ecological service value [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2015, 37(12): 40-46.

(下转第277页)

- desertification in the middle reaches of Yarlung Zangbo River basin derived from Landsat data[J]. *Geography and Sustainability*, 2021, 2(1):12-21.
- [32] 生态环境部. 关于印发《生态保护红线划定技术指南》的通知[EB/OL]. [2025-03-20] (2015-04-30). https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201505/t20150518_301834.htm.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on the issuance of the 《Technical guide for ecological conservation red line delineation》[EB/OL]. [2025-03-20] (2015-04-30). https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201505/t20150518_301834.htm.
- [33] 咎国盛,王翠萍,李锋,等.第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析[J]. *林业资源管理*, 2023(1):1-7.
- ZAN G S, WANG C P, LI F, et al. Keydata results and trend analysis of the sixth national survey on desertification and sandification[J]. *Forest Resources Management*, 2023(1):1-7.
- [34] 吕振豫,王鹏翔,董义阳,等.雅鲁藏布江中上游流域土地沙化时空演变特征分析与归因识别[J]. *水土保持通报*, 2025, 45(1):105-113.
- LV Z Y, WANG P X, DONG Y Y, et al. Spatiotemporal evolution analysis and attribute identification of land desertification in middle and upper reaches of Yarlung Zangbo River[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025, 45(1):105-113.
- (上接第267页)
- [60] 陆逸. 基于MODIS数据的三峡库区净初级生产力遥感估算研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2012.
- LU Y. Estimation of vegetation net primary productivity in the three gorges reservoir region based on the MODIS data[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.
- [61] 王馨爽,吴梦月,马红利,等.渭河流域长时间序列NPP估算及时空变化特征分析[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(6):205-211.
- WANG X S, WU M Y, MA H L, et al. Estimation and spatial-temporal dynamics of long time sequenced vegetation net primary productivity in the Weihe River basin[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(6):205-211.
- [62] ZHANG J, LIU M Y, ZHANG M M, et al. Changes of vegetation carbon sequestration in the tableland of Loess Plateau and its influencing factors [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(22):22160-22172.
- [63] DU Z Q, LIU X J, WU Z T, et al. Responses of forest net primary productivity to climatic factors in China during 1982—2015[J]. *Plants*, 2022, 11(21):e2932.
- [64] CHEN Z T, CHEN J P, XU G, et al. Estimation and climate impact analysis of terrestrial vegetation net primary productivity in China from 2001 to 2020 [J]. *Land*, 2023, 12(6):e1223.
- [65] YU D Y, SHI P J, SHAO H B, et al. Modelling net primary productivity of terrestrial ecosystems in east Asia based on an improved CASA ecosystem model [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(18):4851-4866.
- [66] 王斌,刘某承,张彪.基于森林资源清查资料的森林植被净生产量及其动态变化研究[J]. *林业资源管理*, 2009(1):35-43.
- WANG B, LIU M C, ZHANG B. Dynamics of net production of Chinese forest vegetation based on forest inventory data [J]. *Forest Resources Management*, 2009(1):35-43.
- [67] LUO T X, LI W H, ZHU H Z. Estimated biomass and productivity of natural vegetation on the Tibetan Plateau [J]. *Ecological Applications*, 2002, 12(4):e980.
- [68] NI J, ZHANG X S, SCURLOCK J M O. Synthesis and analysis of biomass and net primary productivity in Chinese forests [J]. *Annals of Forest Science*, 2001, 58(4):351-384.