柳江流域柳州段人工幼龄林植被碳密度及其影响因子

李张赟[1], 吴秀芹[1], 谭 锦[2], 王 蕾[3]
(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;
2.云南农业大学 水利学院, 昆明 650201; 3.西南林业大学 水土保持学院, 昆明 650224)

摘 要: [目的] 以柳江流域柳州段人工幼龄林为对象,探究林分结构与土壤立地条件对植被碳密度的影响,识别植被碳密度关键影响因子,为该地区人工林碳汇功能的精准提升与可持续经营提供科学依据。[方法] 采用样地调查获取林分数据,利用生物量方程与含碳系数法估算5类人工幼龄林植被碳密度。在此基础上,利用随机森林模型识别关键因子,并进一步采用Pearson相关分析揭示植被碳密度与各因子之间的相关关系。[结果] ①不同森林类型植被碳密度差异显著,阔叶林最高(84.58±65.72 t/hm^2),灌木林最低(15.93±2.20 t/hm^2)。②林分结构与立地条件共同主导植被碳密度格局。胸径为最关键林分因子,其贡献率最高(39.70%);土层厚度(25.40%)、土壤类型与腐殖质层厚度是重要立地因子。植被碳密度随胸径增大和土层厚度增加显著升高($p<0.05$)。③林下物种多样性对植被碳密度无显著影响。[结论] 柳江流域人工幼龄林碳密度主要受林分结构及立地条件控制,其中胸径和土层厚度是制约碳积累的关键因子。林下多样性影响有限,少数优势树种主导碳密度格局,"选择效应"抑制了林下多样性的"互补效应"。研究结果表明,柳江流域柳州段人工林碳汇提升需优化树种结构,促进胸径生长并改善土壤条件,并通过合理配置阔叶树种比例,适时抚育间伐及保留枯落物等措施增强碳积累能力。

关键词: 生物量方程; 林分结构; 立地条件; 物种多样性; 驱动机制; 柳江流域柳州段
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0270-11 **中图分类号:** S75, F316.2

文献参数: 李张赟, 吴秀芹, 谭锦, 等.柳江流域柳州段人工幼龄林植被碳密度及其影响因子[J].水土保持通报, 2026, 46(5): 270-280. Li Zhangyun, Wu Xiuqin, Tan Jin, et al. Vegetation carbon density and influencing factors in young plantations in Liuzhou section of Liujiang River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(5): 270-280.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.007 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.007**

Vegetation carbon density and influencing factors in young plantations in Liuzhou section of Liujiang River basin

Li Zhangyun[1], Wu Xiuqin[1], Tan Jin[2], Wang Lei[3]
(1.*College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*;
2.*College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan* 650201, *China*;
3.*College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan* 650224, *China*)

Abstract: [Objective] Taking young plantations in Liuzhou section of Liujiang River basin as a research object, the effects of stand structure and site soil conditions on vegetation carbon density were investigated, and the key influencing factors were identified, in order to provide a scientific basis for accurately improving carbon sink functions and sustainable management of plantations in this region. [Methods] Stand data were obtained through field plot surveys. The vegetation carbon density of five types of young plantations was estimated using biomass equations and carbon content coefficients. Based on the identification of key factors using a random forest model, Pearson correlation analysis was further applied to reveal the relationships between vegetation carbon density and each factor. [Results] ① Vegetation carbon density differed significantly among different forest types, with broad-

收稿日期:2025-12-14 **修回日期:**2026-04-30 **采用日期:**2026-04-30
资助项目:国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目"喀斯特退化生态系统恢复过程中碳循环的生物-地质协同机制"(42361144885)
第一作者:李张赟(2001—),女(苗族),贵州省思南县人,硕士研究生,研究方向为森林碳汇估算与生态系统碳潜力。Email:1104671487@qq.com。
通信作者:吴秀芹(1974—),女(汉族),辽宁省阜新市人,博士,教授,主要从事人地系统耦合机制、生态系统服务、荒漠化演变机制方面的研究。Email:wuxq@bjfu.edu.cn。

leaved forests having the highest value (84.58±65.72 t/hm^2) and shrublands the lowest (15.93±2.20 t/hm^2). ② Stand structure and site conditions jointly determined vegetation carbon density patterns. Diameter at breast height (DBH) was the most critical stand factor with the highest contribution rate (39.70%). Soil layer thickness (25.40%), soil type, and humus layer thickness were important site factors. Vegetation carbon density increased significantly with increasing DBH and soil layer thickness ($p<0.05$). ③ High understory species diversity did not necessarily lead to high carbon storage, as its influence was limited. [Conclusion] The carbon density of young plantations in the Liujiang River basin is primarily controlled by stand structure and site conditions, with DBH and soil layer thickness being the key factors constraining carbon accumulation. The influence of understory diversity is limited, as a few dominant tree species dictate the carbon density pattern, with the "selection effect" suppressing the "complementarity effect". Enhancing carbon sink capacity in plantations in Liuzhou section of Liujiang River basin requires optimizing tree species structure, promoting DBH growth, and improving soil conditions. This can be achieved through measures such as reasonably adjusting the proportion of broad-leaved species, conducting timely tending and thinning and retaining litter.

Keywords: biomass equation; stand structure; site conditions; species diversity; driving mechanism; Liuzhou section of Liujiang River basin

森林生态系统是全球碳循环中不可或缺的组成部分,其碳汇能力对于减缓气候变暖具有重要意义[1]。中国作为全球碳排放大国,在积极推动"碳达峰碳中和"的国家战略背景下,增加森林碳汇已成为中国应对气候变化的关键路径之一。

目前,森林碳汇研究主要集中于碳储量的评估,空间分布格局及其提升路径。在方法上,基于样地清查与生物量方程的"自下而上"方法在区域适用性高,而遥感与模型模拟等"自上而下"技术则在大尺度碳汇动态模拟中展现出独特优势[2]。在研究内容上,学界普遍认识到森林碳汇能力并非由单一因子决定,而是受到植被类型、林龄、林分结构、物种多样性及立地条件等多重因素的复杂调控。例如,胡芳等[3]在广西喀斯特地区的研究表明,森林碳储量随林龄增长显著增加,且碳分配格局发生转变:乔木层碳储量随林龄从92.30%～98.70%,而土壤层碳储量所占比例则从幼龄林的66.20%下降至过熟林的33.20%。李海奎等[4]的全国尺度评估进一步指出,乔木林是中国森林植被碳储量的主体,且天然林的碳储量显著高于人工林。在诸多影响因子中,林分结构是核心主导因子,林分密度调控通过改变资源分配直接影响土壤微环境及林下植被,进而调控碳固定[5]。此外,森林碳汇功能与水土流失、水源涵养、土壤保持等多种生态系统服务相互关联,其间存在复杂的权衡与协同关系,在此背景下,明确林分结构、林下物种多样性与立地条件对人工幼龄林碳密度格局的相对贡献,是优化森林经营并实现碳汇提升与生物多样性协同发展的重要科学问题。

广西壮族自治区是中国南方重要的森林资源区[6],森林年龄结构中幼龄林占比较高。尽管幼龄林面积比例由2005年的52.69%下降至2021年的29.21%[7],但其生长迅速和生产力高,在区域短期碳汇形成中具有重要作用[8]。柳江流域柳州段位于典型喀斯特区,土层浅薄、岩溶发育、立地条件空间异质性强,受其影响人工幼龄林碳密度分布和主导因子也有较大的空间差异,系统研究仍相对不足。为此,本研究以柳江流域柳州段为研究区,通过实地调查与模型分析,旨在揭示人工幼龄林主要森林类型的植被碳密度格局,识别关键影响因子,以期为喀斯特地区人工林碳汇功能的精准提升与可持续经营提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

柳江流域柳州段位于广西壮族自治区北部(北纬24°03′—24°52′,东经109°06′—109°47′),研究区整体海拔介于1～2 101 m,地貌类型以丘陵与平原为主,具有典型的岩溶地貌特征。气候为亚热带季风气候,年均气温为20.8 ℃,年降雨量1 345～1 940 mm。该区域森林资源丰富、植被类型多样。乔木层以马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、桉树(*Eucalyptus globulus*)为主,林下植被中,常见灌木有桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、野牡丹(*Melastoma candidum*)等,草本则以五节芒(*Miscanthus floridulus*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、铁芒箕(*Dicranopteris pedata*)等为优势物种。各林型样地在研究区内分布较为均匀(图1),样地所在点位海拔介于57.88～294.41 m(表1)。

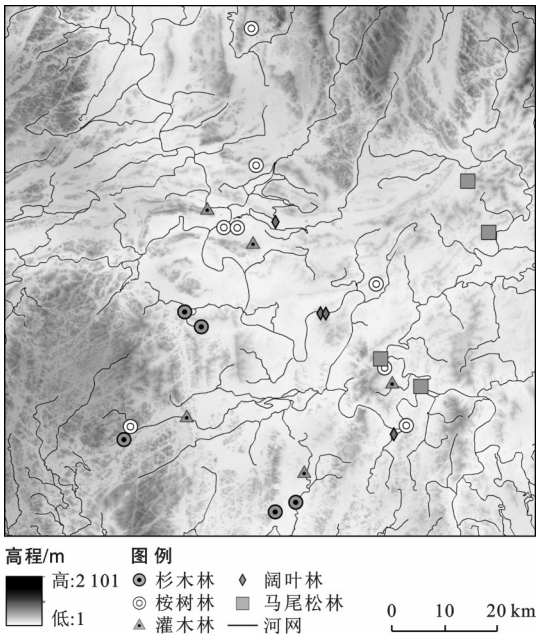


图1 柳江流域柳州段地形及采样点位置

Fig.1 Topography of Liuzhou section of Liujiang River basin and locations of sampling sites

1.2 样地设置与调查

野外调查于2023年7月在柳州周边人工林区域进行。依据柳州市2023年发布的森林资源数据，柳州市森林总面积为1.26×10^6 hm²，其中，面积比例最高的5种优势树种（杉木林、马尾松、桉树林、阔叶林、灌木林）的面积合计达1.10×10^6 hm²，约占全市森林总面积的88%。桉树虽植物学上属于阔叶树种，但因其在柳州人工林中种植面积最大、生态特征与经营模式独特，地方林业部门将其作为独立林分类型单独统计管理。因此，本研究中“阔叶林”特指以羊蹄甲（*Bauhinia purpurea*）、黄葛树（*Ficus virens*）等为代表的软阔叶林。

综合考虑各类人工林的面积比例及其在喀斯特地区的生态重要性，在比例最高的桉树林中设置较多样地，同时为全面覆盖研究区内其余主要人工林类型并增强调查结果的代表性，亦尽可能对杉木、马尾松、阔叶林及灌木林等进行了样地布设（表1）。调查区域内的人工林均处于幼龄林阶段。灌木林样地均为近年新植的龙眼（*Dimocarpus longan*）经济林，栽种年限约为1～2 a，平均株高不足1.5 m，也将其全部归为幼龄林。在每个样地内，设置3个20 m×20 m的样方，共计78个样方。调查记录（表1）包括：①每木检尺。记录每株立木的树种、胸径、树高、冠幅及树龄等。②灌草详查。记录物种名称、株（丛）数、高度与冠幅。

表1 研究样地立地状况

Table 1 Basic characteristics of sample plots in this study

项 目	杉木林	马尾松林	桉树林	阔叶林	灌木林
经度/(°)	109.10～109.40	109.55～109.79	109.11～109.59	109.36～109.57	109.21～109.57
纬度/(°)	24.06～24.17	24.27～24.62	24.19～24.88	24.18～24.55	24.12～24.82
海拔/m	72.23～251.28	70.74～145.67	70.03～294.41	57.88～95.07	95.40～104.04
样方数/个	5	4	8	4	5
胸径/cm	6.28～19.03	2.58～15.27	5.22～7.80	4.78～50.30	1.24～5.50
树高/m	4.87～13.00	2.18～14.5	3.22～10.50	3.50～15.00	0.80～1.72
林木密度/(株·hm^{-2})	1 126.00	750.00	1 000.00	750.00	225.00
林龄/a	3～7	5～9	1～5	1～5	1～3
优势种	杉木	马尾松	桉树	羊蹄甲、黄葛树、桂花等	龙眼、黄荆、大青等

注：①每个样地内设置3个20 m×20 m的样方。②3种植物及其学名分别为：桂花（*Osmanthus fragrans*）、黄荆（*Vitex negundo*）、大青（*Clerodendrum cyrtophyllum*）。

1.3 计算方法

（1）生物量估算[9-10]。乔木层生物量计算公式为

$$W=a\cdot D^b \quad (1)$$

式中：W为某一树种单位面积的生物量（kg/m²）；a，b为树种特异性参数，取值源自周国逸等[10]的文献（表2）；D为实际测量的胸径（cm）。生物量的估算基于实地胸径和文献参数，未对各器官进行单独取样。

因桉树叶生物量的模型$W=aD^b$相关系数低至0.02，现将桉树叶生物量模型优化[9]回归为

$$W=a\cdot e^{bD^2} \quad (2)$$

灌木层生物量以CH为自变量的单株生物量基本公式为[11]

$$W_{灌}=a+b(CH) \quad (3)$$

式中：$W_{灌}$为单株灌木生物量（g/m²）；a，b为特异性参数；CH为冠幅直径（m）与高度（m）的乘积（表3）。

草本层生物量以PH为自变量的单位面积生物量基本公式为[11]

$$W_{草}=a+b(PH) \quad (4)$$

式中:$W_{草}$为草本层单位面积生物量(g/m²);a,b为特异性参数;PH为盖度(%)与高度(m)的乘积(表3)。

表2　乔木层生物量回归模型

Table 2　Biomass regression models for tree layer

森林类型	公式	生物量方程参数			
		部位	a	b	R^2
马尾松林[9]	$W=aD^b$	叶	0.332	0.855	0.73
		枝	0.07	1.92	0.95
		干	0.172	2.203	0.99
		根	0.023	2.241	0.98
		全株	0.428	2.009	0.99
杉木林[10]	$W=aD^b$	叶	0.027	1.977	0.97
		枝	0.008	2.505	0.99
		干	0.032	2.552	0.98
		根	0.014	2.454	0.98
		全株	0.096	2.41	0.99
桉树林[9]	$W=ae^{bD^2}$	叶	1.182	0.003	0.76
	$W=aD^b$	枝	0.042	1.835	0.89
		干	0.028	2.996	0.98
		根	0.06	1.771	0.85
		全株	0.138	2.436	0.98
阔叶林[9]	$W=aD^b$	叶	0.022	2.185	0.86
		枝	0.036	2.303	0.87
		干	0.086	2.461	0.98
		根	0.027	2.394	0.92
		全株	0.186	2.377	0.97

注:a,b为参数;D为胸径(cm)。

受野外工作条件所限,本研究未对凋落物层进行直接取样称重,而是参照《森林生态系统碳储量计量指南》推荐的间接比例法进行估算,即以各林型地上生物量乘以对应的枯落物占比系数($DF_{枯落}$)获得,枯落物生物量计算公式为

$$W_{枯落物}=(W_{乔}+W_{灌}+W_{草})DF_{枯落} \quad (5)$$

式中:$W_{枯落物}$为枯落物生物量(t/hm²);$W_{乔}$为乔木层生物量(t/hm²);$W_{灌}$为灌木层生物量(t/hm²);$W_{草}$为草本层生物量(t/hm²);$DF_{枯落}$为枯落物生物量占地上生物量的比例(%),依据《森林生态系统碳储量计量指南》汇总不同树种枯落物的比例:杉木林0.050 86,马尾松林0.060 24,桉树林0.131 00,阔叶林0.114 14,灌木林0.320 49,灌木林比例较高,与其地表植被覆盖密集、凋落物积累量大有关。

枯死物生物量计算公式为

$$W_{枯死物}=W_{乔}\cdot DF_{枯死} \quad (6)$$

式中:$W_{枯死物}$为枯死木生物量(t/hm²);$W_{乔}$为乔木层生物量(t/hm²);$DF_{枯死}$为枯死木生物量占乔木层地上生物量的比例(%),依据《森林生态系统碳储量计量指南》汇总广西枯死木生物量占地上生物量的比例(0.022 5)。枯死木仅针对乔木层计算,与枯落物概念不同,计算基数不同,两者数量级存在差异属于正常。

(2)碳密度计算。通过测定的树种生物量乘以含碳系数的方法取得。乔木层、灌木层与草本层碳密度计算公式为

$$C=W_i\cdot C_I \quad (7)$$

式中:C为某树种碳储量(t/hm²);W_i为某一树种生物量(t/hm²);C_i为某一树种含碳系数(%);i为树种。各组分含碳系数均采用多篇已发表文献的平均值(表4—5),其含碳率均值与IPCC值(0.50)接近,表明估算结果可靠。

表3　灌木层和草本层生物量回归模型

Table 3　Biomass regression models for shrub and herb layers

公式	分类描述	生物量方程参数			
		部位	a	b	R^2
$W_{灌}=a+b(CH)$	灌木冠幅<0.8	地上	19.68	465.33	0.96
		地下	23.68	155.92	0.94
	0.8<灌木冠幅<1.8	地上	132.56	1025.14	0.97
		地下	51.23	362.33	0.93
$W_{草}=a+b(PH)$	杂草	地上	11.65	4.25	0.96
		地下	24.23	6.85	0.93

注:a,b为参数;CH为冠幅直径(m)×高度(m);PH为盖度(%)×高度(m)。本研究直接采用杨昆与管东生[11]在南亚热带森林中建立的成熟模型进行估算。

凋落物层与枯死木层碳密度计算公式为

$$C_{枯落物}=W_{枯落物}\cdot CF_{枯落} \quad (8)$$

$$C_{枯死物}=W_{枯死物}\cdot CF_{枯死} \quad (9)$$

式中:$C_{枯落物}$,$C_{枯死物}$分别为凋落物层和枯死木层碳密度(t/hm²);$W_{枯落物}$,$W_{枯死物}$为其生物量(t/hm²)由公式(4)—(5)估算];$CF_{枯落物}$,$CF_{枯死物}$为凋落物与枯死木的含碳系数,参照IPCC推荐值均取0.50。

(3)林下物种多样性。选取4个常用指数:反映

物种多样性的Shannon-Wiener指数(H)、衡量优势度的Simpson指数(D)、表征丰富度的Margalef指数(R)以及刻画分布均匀性的Pielou指数(E)。

表4 乔木层各树种含碳率

Table 4 Carbon content of tree species in tree layer

森林类型	含碳率/%					研究范围
	叶	枝	干	根	全株	
马尾松林	48.25	48.95	50.26	49.56	49.69	福建[12]
	59.59	48.28	50.29	49.19	50.52	湖南[13]
	52.80	52.80	50.70	50.80	51.43	广西[14]
平均值	53.55	50.01	50.42	49.85	50.55	
杉木林	51.58	48.75	50.44	49.32	50.02	广州[15]
	55.69	45.90	49.88	50.13	49.33	湖南[16]
	50.12	49.05	49.22	46.32	48.04	广西[17]
平均值	52.46	47.90	49.85	48.59	49.13	
桉树	50.22	49.12	49.12	45.33	52.53	广西[18]
	53.40	42.30	47.34	45.73	47.68	广西[19]
	50.00	50.00	49.30	47.60	48.96	广西[14]
平均值	51.21	47.14	48.59	46.22	49.72	
阔叶林	46.64	47.02	48.61	47.12	47.35	广州[15]
	40.42	41.28	43.21	41.47	41.60	贵州[20]
	49.12	49.44	51.28	46.86	48.85	贵州[21]
平均值	45.39	45.91	47.70	45.15	45.93	

(4)数据分析。使用SPSS 27软件进行单因素分析,检验不同森林类型间植被碳密度差异是否显著($p<0.05$)。采用随机森林模型量化林分结构及立地条件对植被碳密度的相对贡献率,在R语言(version 4.5.1)平台的randomForest包实现。利用Pearson相关分析,检验不同因子之间的相关性。

表5 灌木层与草本层含碳率

Table 5 Carbon content of shrub and herb layers

分类描述	含碳率/%		研究范围
	地上	地下	
灌木	50.53	49.02	贵州[21]
	50.22	45.62	广西[18]
	47.73	45.68	广西[17]
平均值	49.49	46.77	
杂草	47.54	29.42	贵州[21]
	47.57	40.84	广西[17]
	52.94	51.15	广西[18]
平均值	49.35	40.47	

注:含碳率均为多篇已发表文献的平均值,各文献研究区域涵盖气候条件相近的南亚热带与中亚热带地区。

2 结果与分析

2.1 森林植被碳密度分布特征

2.1.1 不同森林类型的碳密度及其分配

不同森林类型的植被碳密度存在显著差异($p<0.05$,表6),总碳密度排序为:阔叶林>马尾松林>杉木林>桉树林>灌木林。阔叶林的总碳密度显著高于其他类型,灌木林的总碳密度最低,约为阔叶林的18.83%,乔木层碳密度占植被总碳密度的比例介于64.1%~96.2%。

表6 柳江流域柳州段不同森林类型植被碳密度

Table 6 Vegetation carbon density of different forest types in Liuzhou section of Liujiang River basin

项目	组分与汇总	桉树林	阔叶林	灌木林	马尾松林	杉木林
Ⅰ植被碳密度	乔木层/(t·hm^{-2})	11.94±4.38^{c}	71.63±57.24^{a}	9.57±0.84^{c}	29.21±5.69^{b}	29.08±5.66^{b}
	灌木层/(t·hm^{-2})	0.50±0.19^{a}	0.45±0.19^{a}	0.66±0.50^{a}	0.67±0.49^{a}	1.07±0.24^{a}
	草本层/(t·hm^{-2})	2.60±1.10^{bc}	2.37±1.27^{bc}	4.7±1.24^{a}	2.50±1.36^{b}	1.44±0.77^{c}
	植被碳密度汇总/(t·hm^{-2})	15.05±4.68^{c}	74.46±57.83^{a}	14.93±1.67^{c}	32.38±7.02^{b}	31.60±5.60^{b}
Ⅱ其他碳密度	凋落物/(t·hm^{-2})	1.97±0.61^{b}	8.50±3.60^{a}	1.29±0.53^{b}	1.95±0.42^{b}	1.61±0.28^{b}
	枯死物/(t·hm^{-2})	0.27±0.10^{b}	1.61±1.29^{a}	0.22±0.02^{b}	0.66±0.13^{b}	0.65±0.13^{b}
Ⅲ森林类型碳密度汇总	总碳密度/(t·hm^{-2})	17.29±5.38^{c}	84.58±65.72^{a}	15.93±2.20^{c}	34.99±7.57^{b}	33.86±6.00^{b}
	比例/%	9.07	44.36	10.45	18.35	17.76
Ⅳ其他	根冠比	0.32±0.09^{cd}	0.20±0.05^{b}	0.44±0.05^{a}	0.19±0.02^{c}	0.18±0.05^{d}

注:①表中数据为平均值±标准差;②字母表示同列不同行之间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.1.2 各植被层碳密度组成与分配

不同森林类型乔木层各器官碳密度存在显著差异($p<0.05$,表7)。从全株水平看,阔叶林>杉木林≈马尾松林>桉树林>灌木林。从器官分配看,树干是各乔木层碳密度最主要的组成。阔叶林树干碳密度分别为杉木林、马尾松林的2.42和2.39倍,是灌

木林的8.55倍。树枝与树根为次要碳库,而叶片碳密度及占比普遍最低,这与幼龄林阶段叶片生物量积累相对有限有关。

灌木层总碳密度(地上与地下之和)在不同森林类型间无显著差异(表8),其分布格局为:杉木林>马尾松林≈灌木林>桉树林>阔叶林。草本层碳密度在不同森林类型间存在显著差异($p<0.05$,表8)。其分布格局为:灌木林>桉树林>马尾松林>阔叶林>杉木林。

不同森林类型凋落物层碳密度存在显著差异($p<0.05$,图2)。其中,阔叶林凋落物碳密度最高,达(8.50±3.60) t/hm^2,为其他类型的4~7倍。各林型枯死物碳密度表现为:阔叶林(1.61±1.29) t/hm^2>杉木林≈马尾松林>桉树林>灌木林。

表7　乔木层碳密度

Table 7　Carbon density of tree layer

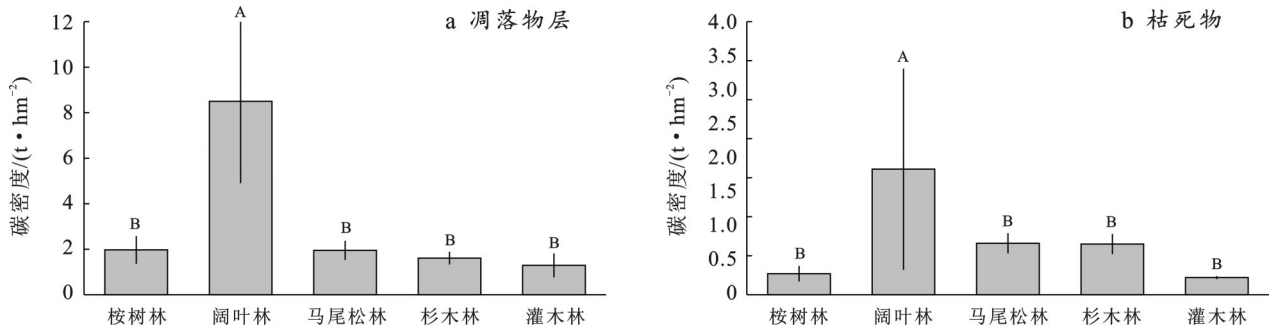
项目	乔木层	桉树林	阔叶林	马尾松林	杉木林	灌木林
叶	碳密度/(t·hm^{-2})	1.36±0.05^{b}	1.93±0.87^{a}	1.21±0.29^{b}	1.66±0.39^{a}	0.38±0.02^{c}
	比例/%	11.60	2.80	4.40	6.20	4.20
枝	碳密度/(t·hm^{-2})	1.14±0.32^{c}	11.64±8.34^{a}	3.70±0.80^{b}	2.50±0.43^{bc}	1.72±0.14^{bc}
	比例/%	9.70	16.70	13.60	9.40	19.10
干	碳密度/(t·hm^{-2})	7.71±3.47^{c}	47.12±42.37^{a}	19.70±3.86^{b}	19.45±5.70^{b}	5.51±0.54^{c}
	比例/%	65.60	67.50	71.40	73.10	61.00
根	碳密度/(t·hm^{-2})	1.54±0.42^{b}	9.09±6.06^{a}	2.89±0.58^{b}	2.98±0.63^{b}	1.42±0.11^{b}
	比例/%	13.10	13.00	10.60	11.20	15.70
全	碳密度/(t·hm^{-2})	11.94±4.38^{c}	71.63±57.24^{a}	29.21±5.69^{b}	29.08±5.66^{b}	9.57±0.84^{c}

注:碳密度比例指该器官(如叶、枝、干、根)在总碳密度中的比例。

表8　灌木层、草本层碳密度

Table 8　Carbon density of shrub and herb layers

植被层	分类描述	桉树林	阔叶林	马尾松林	杉木林	灌木林
灌木层	地上碳密度/(t·hm^{-2})	0.35±0.14^{a}	0.31±0.12^{a}	0.46±0.22^{a}	0.78±0.46^{a}	0.47±0.38^{a}
	地下碳密度/(t·hm^{-2})	0.15±0.05^{a}	0.14±0.07^{a}	0.21±0.17^{a}	0.30±0.21^{a}	0.19±0.15^{a}
	总碳密/(t·hm^{-2})	0.50±0.19^{a}	0.45±0.19^{a}	0.67±0.49^{a}	1.07±0.24^{a}	0.66±0.50^{a}
草本层	地上碳密度/(t·hm^{-2})	0.74±0.32^{bc}	0.68±0.55^{bc}	0.72±0.40^{b}	0.41±0.23^{c}	1.35±0.36^{a}
	地下碳密度/(t·hm^{-2})	1.86±0.78^{bc}	1.70±1.34^{bc}	1.79±0.97^{b}	1.03±0.55^{c}	3.35±0.88^{a}
	总碳密度/(t·hm^{-2})	2.60±1.10^{bc}	2.37±1.27^{bc}	2.50±1.36^{b}	1.44±0.77^{c}	4.7±1.24^{a}



注:柱状图上不同大写字母表示不同群落间差异显著($p<0.05$)。

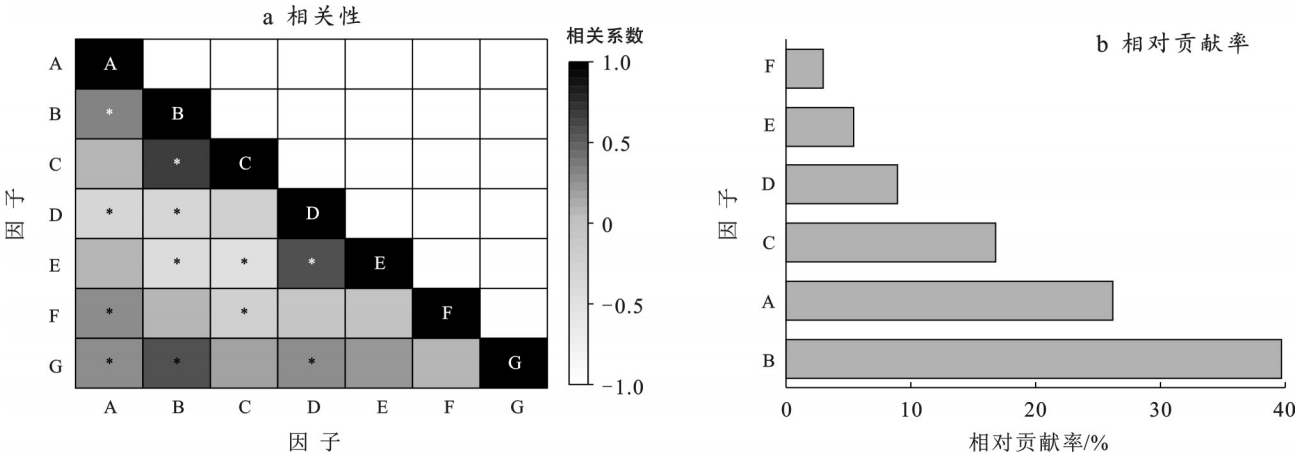
图2　不同森林类型凋落物层和枯死物的碳密度分布特征

Fig.2　Distribution characteristics of carbon density in litter layer and deadwood across different forest types

2.2　森林植被碳密度影响因素

2.2.1　林分结构的贡献

随机森林模型分析表明(图3),林分结构因子中胸径贡献率最高(39.70%);胸径、树种、林分密度与植被碳密度呈显著正相关($p<0.05$),共同构成了调控人工幼龄林植被碳密度的关键因子。



注:A为树种;B为胸径;C为树高;D为林分密度;E为郁闭度;F为平均冠幅;G为植被碳密度。

图3 森林林分结构因子贡献率及相关性

Fig.3 Contribution rates and correlations of forest stand structural factors

2.2.2 森林植被碳密度与林下物种多样性关系

研究区内共记录植物155种,马尾松林Shannon-Wiener指数最高2.62,而灌木林最低2.18。桉树林、杉木林与阔叶林的多样性水平介于二者之间(表9)。

表9 不同森林类型林下物种多样性指数

Table 9 Understory species diversity indices of different forest types

森林类型	Shannon-Wiener指数	Simpson指数	Margalef物种丰富度	Pielou均匀度指数	样地平均物种数
杉木林	2.34	0.90	2.25	0.999 5	13.00
桉树林	2.54	0.92	2.67	0.999 4	11.38
阔叶林	2.57	0.92	2.84	0.998 7	13.25
灌木林	2.18	0.87	2.12	0.999 3	10.20
马尾松林	2.62	0.92	2.93	0.999 3	17.00

注:数据为各样地平均值。

回归分析表明,所有测度的多样性指数(Shannon-Wiener,Simpson,Margalef,Pielou)与植被碳密度的回归关系均不显著,决定系数均低于0.06(图4)。

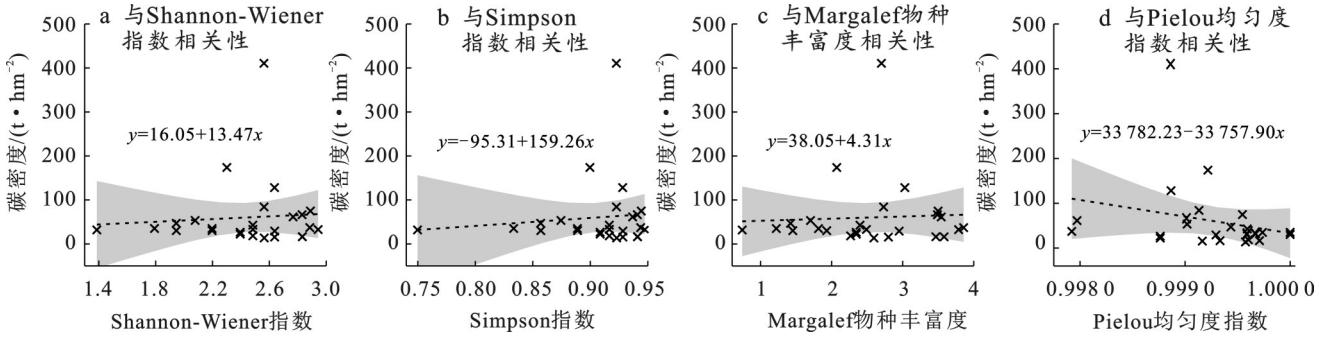


图4 森林植被碳密度与各多样性指数相关分析

Fig.4 Correlation analysis between forest vegetation carbon density and diversity index (D)

2.2.3 立地条件的贡献

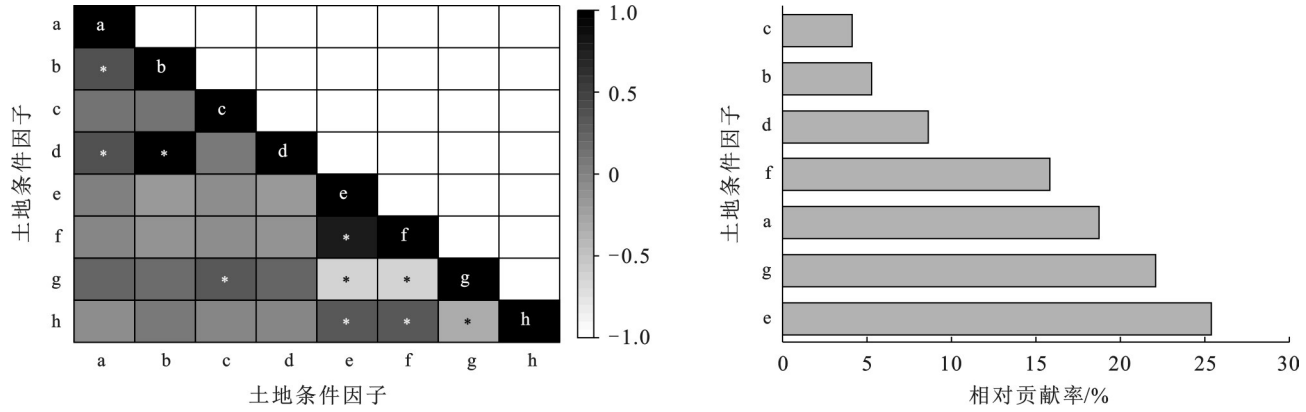
随机森林模型分析表明,立地条件对植被碳密度具有显著影响(图5):其中土层厚度的贡献率最高(25.40%),土层厚度、土壤类型与腐殖质层厚度呈现显著相关($p<0.05$)。

3 讨 论

3.1 柳江流域人工林碳密度格局及其阔叶林高碳密度成因

本研究不同林型的碳密度估算结果与广西区域

既有植被碳储量研究总体一致,表明估算结果具有较好的可靠性。然而,桉树林的碳密度(17.29 t/hm²)显著高于兰秀等[7]的结果(6.81 t/hm²)。兰秀等的研究同时包含了人工林、天然林和混交林,林分组较为复杂;此外,其研究样地桉树均采用集约化经营模式,轮伐期为4～6 a,5 a生林分年均蓄积增长量约为25.57 m³/(hm²·a),幼年期桉树林通常处于生物量快速积累阶段,固碳能力强[22]。同时,该经营模式使林木在碳积累高峰时才被采伐,从而增强了长期碳储存的稳定性。



注:a为林下植被覆盖度;b为坡度;c为坡向;d为坡位;e为土层厚度;f为腐殖质层厚度;g为土壤类型;h为林分植被碳密度。

图5　森林立地条件贡献率及相关性

Fig.5　Contribution rates and correlations of forest site condition factors

柳江流域柳州段人工幼龄林的植被碳密度以阔叶林最高,马尾松林与杉木林差异较小。主要源于两方面:①阔叶树木材密度(生材密度均值约1.10 g/cm³普遍高于针叶树[23],在相同胸径条件下阔叶树单位体积积累的碳量更多,阔叶林树干富含木质素纤维,根系发育强健,地下生物量较大,有利于光合作用及有机物质的积累[24],且通过丰富的植被覆盖和较为稳固的生态系统结构,能有效减少土壤侵蚀与碳流失,从而维持较高的碳储存[25];②林冠分层完善,有利于光照、水分和养分的充分利用,促进生物量积累[26]。从植被层级分析,森林碳密度主要集中于乔木层,碳密度比例约89%[27],本研究结果亦显示,阔叶林乔木层对碳密度的贡献最高,灌木林碳密度最低,其林分密度约为其他林型的1/5～1/7,低密度直接制约了单位面积碳积累能力[28]。

3.2　柳江流域人工林碳密度驱动机制

林分结构因子对植被碳储量具有决定性影响[26]。其中胸径是最关键的预测因子(贡献率39.70%),胸径直接决定干材体积,本研究中各树种干材碳密度占乔木层总碳密度的61%～73%,胸径与干材生物量之间的幂函数关系($W=a\cdot D^b$)使得胸径的增大对碳密度产生非线性放大效应[28];在相同胸径条件下阔叶树单位体积积累的碳储量更多,阔叶林平均胸径18.34 cm,约为马尾松林和杉木林的2倍,使阔叶林总碳密度(84.58 t/hm²)远高于其他林型的格局。尤其在幼龄林阶段,胸径的快速增长直接关联于生物量的积累;但与成熟林相比,其单位胸径增长所对应的碳增量仍较低。同时,幼树在达到检尺标准前已积累的碳储量,会在进入监测体系时显著推高统计数值。

柳江流域人工幼龄林林下物种多样性与植被碳密度之间无显著相关性,少数优势树种的生物量主导碳密度积累。这与生态学中"选择效应"理论一致,即当少数高生物量优势树种起主导作用时,会削弱林下多样性通过"互补效应"对碳密度的影响[29]。灌木林草本层碳密度(4.70 t/hm²)最高,源于其郁闭度偏低57.40%所致的透光优势促进草本植物生物量的积累[30]而非多样性驱动。此外在柳州典型喀斯特地貌背景下,土层浅薄、石砾含量高是制约植被碳积累的根本限制因素:土层厚度变异强、分布不连续导致土壤养分匮乏[31];较高石砾含量进一步限制根系发育与水肥供给[32]。土层浅薄导致蓄水保肥能力弱,是喀斯特地区植被生长和碳积累的关键制约因素。

3.3　柳江流域人工林碳汇提升策略与研究展望

柳江流域人工幼龄林碳密度的提升,可从以下3个层面推进:①在树种配置上,应适当扩大阔叶树种比例,对于现有桉树人工林,建议通过延长轮伐期、推广"桉树＋乡土阔叶树种"混交间作等方式,在维持其碳汇效果的同时改善林分生态系统稳定性[33];②在林分结构调节上,通过适时抚育间伐降低林分密度,为胸径生长释放空间,加速碳密度的积累。③在立地管理上,喀斯特地区土层浅薄、土被不

连续，建议在经营过程中保留林地枯落物，避免炼山整地方式，适当施用有机肥。同时，探索“封育＋造林”“封育＋抚育”等近自然森林经营模式以提升林分结构和生态服务功能[34]。

尽管本研究结果总体合理，但在生物量估算方法上仍存在一定不确定性。一方面，喀斯特特有的浅薄土层可能导致生物量积累规律与方程建立地存在偏差；另一方面，本研究以幼龄林为主，通用方程可能对各器官生物量产生高估或低估[35]。但所用生物量方程来源于区域已发表文献，其含碳率均值与IPCC推荐值接近，估算结果可靠。此外，本研究凋落物层生物量采用《森林生态系统碳储量计量指南》推荐的比例系数法间接估算，其含碳系数参照IPCC默认值(0.50)取值，相较于野外1 m×1 m小样方直接取样与元素分析仪实测仍存在一定偏差。受样地数量和调查时间所限，未来研究可扩大样本量，开展多时期调查，并通过该区实地取样建立本地化生物量方程、校验比例系数与含碳率，以提高碳密度尤其是凋落物与枯死木层的估算精度。

4 结 论

(1) 植被碳密度格局差异显著。阔叶林总碳密度最高(84.58±65.72 t/hm^2)，灌木林最低(15.93±2.20 t/hm^2)。乔木层为主要碳库，其中阔叶林乔木层碳密度(71.63±57.24 t/hm^2)为灌木林的8.55倍。

(2) 林分结构是植被碳密度的主导因子。林分结构中胸径(贡献率39.70%)、树种(26.20%)、林分密度(8.90%)与植被碳密度呈极显著正相关($p<0.05$)，表明在幼龄林阶段，个体生长速率对碳积累的驱动作用显著强于密度效应。

(3) 林下物种多样性对植被碳密度无显著影响。林下物种多样性较高(Shannon指数最高达2.62)，但与植被碳密度之间无显著相关性，这是因为少数优势树种的生物量积累主导了碳密度格局，林下多样性的“互补效应”受到抑制；灌木林草本层碳密度最高(4.70 t/hm^2)源于郁闭度偏低(57.40%)所致的透光优势，而非多样性驱动的结果。上述结论为人工林经营中优先关注林分结构而非多样性提供了科学依据。

(4) 立地条件对植被碳密度具有调控作用：立地条件中，土层厚度(贡献率25.40%)、土壤类型(贡献率22.10%)、腐殖质层厚度(贡献率15.80%)与植被碳密度呈极显著正相关($p<0.05$)，3者贡献率合计达63.30%，这揭示了喀斯特地区浅薄土层与不连续土被对人工幼龄林碳积累的根本性制约因素，有别于非喀斯特区域的关键立地机制。

综上所述，柳江流域人工幼龄林的碳汇功能主要受林分结构和立地条件控制，而林下多样性影响有限，为喀斯特地区人工林“以胸径促碳汇，以土壤保碳汇”的差异化经营策略提供了科学依据。

参考文献(References)

[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 Shilong, Yue Chao, Ding Jinzhi, et al. On the role of carbon sink in terrestrial ecosystem in the goal of “carbon neutrality” [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022, 52(7):1419-1426.

[2] 朴世龙，何悦，王旭辉，等.中国陆地生态系统碳汇估算：方法、进展、展望[J].中国科学(地球科学)，2022，52(6)：1010-1020.
Piao Shilong, He Yue, Wang Xuhui, et al. Carbon sequestration estimation of terrestrial ecosystem in China: Method, progress and prospect [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022,52(6):1010-1020.

[3] 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 Fang, Du Hu, Zeng Fuping, 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.

[4] 李海奎，雷渊才，曾伟生.基于森林清查资料的中国森林植被碳储量[J].林业科学，2011，47(7)：7-12.
Li Haikui, Lei Yuancai, Zeng Weisheng. Forest carbon storage in China estimated using forestry inventory data [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011,47(7):7-12.

[5] 左晓东，汪星星，许祖元，等.不同林分密度对杉木林土壤特性及林下植被的影响[J].广西师范大学学报(自然科学版)，2025，43(4)：201-212.
Zuo Xiaodong, Wang Xingxing, Xu Zuyuan, et al. Effects of different stand densities on soil properties and understory vegetation in Chinese fir plantation [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2025,43(4):201-212.

[6] 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 Xiu, Du Hu, Song Tongqing, 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.

[7] 庞正轰，于永辉，莫炯松，等.2000—2021年广西森林资源数量与质量动态分析[J].桉树科技，2023，40(4)：63-72.

Pang Zhenghong, Yu Yonghui, Mo Tongsong, et al. Dynamic analysis on forest resource quantity and quality in Guangxi from 2000 to 2021 [J]. Eucalypt Science & Technology, 2023,40(4):63-72.

[8] 李玉凤,莫燕华,秦佳双,等.广西不同林龄马尾松人工林生态系统碳储量及其分配格局[J].广西科学,2024,31(2):346-356.
Li Yufeng, Mo Yanhua, Qin Jiashuang, et al. Carbon storage and distribution pattern of *Pinus massoniana* plantations ecosystem in different forest ages in Guangxi [J]. Guangxi Sciences, 2024,31(2):346-356.

[9] 汪珍川,杜虎,宋同清,等.广西主要树种(组)异速生长模型及森林生物量特征[J].生态学报,2015,35(13):4462-4472.
Wang Zhenchuan,Du Hu,Song Tongqing, et al. Allometric models of major tree species and forest biomass in Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(13):4462-4472.

[10] 周国逸,尹光彩,唐旭利,等.中国森林生态系统碳储量-生物量方程[M].北京:科学出版社,2018.
Zhou Guoyi, Yin Guangcai, Tang Xuli. Carbon Storage-biomass Equation of Forest Ecosystem in China [M]. Beijing: Science Press, 2018.

[11] 杨昆,管东生.森林林下植被生物量收获的样方选择和模型[J].生态学报,2007,27(2):705-714.
Yang Kun, Guan Dongsheng. Selection of gaining quadrat for harvesting the undergrowth vegetation and its biomass estimation modeling in forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007,27(2):705-714.

[12] 尉海东,马祥庆.不同发育阶段马尾松人工林生态系统碳贮量研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(1):171-174.
Yu Haidong, Ma Xiangqing. Study on the carbon storage and distribution of *Pinus massoniana* Lamb plantation ecosystem at different growing stages [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2007,35(1):171-174.

[13] 郭文清,徐清乾,许忠坤,等.马尾松人工纯林不同器官含碳系数分析[J].湖南林业科技,2014,41(4):40-44.
Guo Wenqing, Xu Qingqian, Xu Zhongkun, et al. Analysis on carbon content factors of different organs of pure *Pinus massoniana* forest [J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2014,41(4):40-44.

[14] 赵瑞,孙保平,于明含,等.广西壮族自治区平果县退耕还林植被碳储量特征[J].水土保持通报,2015,35(3):350-353.
Zhao Rui, Sun Baoping, Yu Minghan, et al. Characteritics of carbon storage in forests of grain for green project in Pingguo County, Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015,35(3):350-353.

[15] 李晓曼.广州市城市森林生态系统碳循环研究[D].湖南 长沙:中南林业科技大学,2008.
Li Xiaoman. The research on carbon circulation of forest ecosystem in Guangzhou City [D]. Changsha, Hunan: Central South University of Forestry & Technology, 2008.

[16] 宋良友,何功秀.不同林龄阶段杉木人工林生物量和碳储量的分布特征[J].湖南林业科技,2021,48(1):71-75.
Song Liangyou, He Gongxiu. Distribution characteristics of biomass and carbon storage of *Cunninghamia lanceolata* plantation in different age stages [J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2021,48(1):71-75.

[17] 赵樟.南亚热带杉木、红锥人工林的生物量和碳储量[D].广西 南宁:广西大学,2017.
Zhao Zhang. Biomass and carbon storage of *Cunninghamia lanceolata* and *Castanopsis hystrix* plantations in south subtropical China [D]. Nanning, Guangxi: Guangxi University, 2017.

[18] 卢婵江.广西东门不同林龄巨尾桉人工林的生物生产力及经济效益分析[D].广西 南宁:广西大学,2017.
Lu Chanjiang. The biomass productivity and carbon storage of *E.grandis* × *E.urophylla* plantations with different age of stand in Dongmen Forest Farm [D]. Nanning, Guangxi: Guangxi University, 2017.

[19] 张琼,洪伟,吴承祯,等.巨桉碳含量的空间结构特征研究[J].广西植物,2007,27(4):585-589.
Zhang Qiong, Hong Wei, Wu Chengzhen, et al. Spatial structure character of carbon content of *Eucalypts grandis* [J]. Guihaia, 2007,27(4):585-589.

[20] 王伊琨,赵云,马智杰,等.黔东南典型林分碳储量及其分布[J].北京林业大学学报,2014,36(5):54-61.
Wang Yikun, Zhao Yun, Ma Zhijie, et al. Carbon stock and its distribution of three typical forest types in southeastern Guizhou Province, southwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(5): 54-61.

[21] 杨旭东.贵州省东南部常见森林类型含碳率分析[J].贵州林业科技,2015,43(3):9-14.
Yang Xudong. Carbon content of common forest types in southeastern Guizhou Province [J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 2015,43(3):9-14.

[22] 吴兴澳,侯满福,刘雨婷,等.桉树林种植年限对林下植物及其种间关联的影响[J].生态学杂志,2025,44(3):736-744.
Wu Xingao, Hou Manfu, Liu Yuting, et al. Effects of planting ages on understory plants and their interspecific associations in *Eucalyptus* plantations [J]. Chinese

Journal of Ecology, 2025,44(3):736-744.

[23] 徐明锋,柯娴氡,张毅,等.粤东6种阔叶树木材密度及其影响因子研究[J].华南农业大学学报,2016,37(3):100-106.
Xu Mingfeng, Ke Xiandong, Zhang Yi, et al. Wood densities of six hardwood tree species in eastern Guangdong and influencing factors [J]. Journal of South China Agricultural University, 2016,37(3):100-106.

[24] 沈浩,姜姜,周晨,等.江西石城不同起源阔叶林碳储量驱动因子分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(4):185-190.
Shen Hao, Jiang Jiang, Zhou Chen, et al. Research on factors driving carbon storage in broad-leaved forests of different origins from Shicheng, Jiangxi Province [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023,47(4):185-190.

[25] 代林利,周丽丽,伍丽华,等.不同林分密度杉木林生态系统碳密度及其垂直空间分配特征[J].生态学报,2022,42(2):710-719.
Dai Linli, Zhou Lili, Wu Lihua, et al. Carbon density and vertical spatial distribution characteristics of *Cunninghamia lanceolata* forest ecosystem with different stand density [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(2):710-719.

[26] Tan Jin, Wu Xiuqin, Wang Lei, et al. Differential specific leaf area due to different stand structures drives alterations in soil organic carbon in artificial forests of Karst areas [J]. Forest Ecology and Management, 2024,556:121719.

[27] 李伟,张翠萍,李士美.基于第8次森林资源清查数据的广西森林碳储量特征研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2017,37(3):127-133.
Li Wei, Zhang Cuiping, Li Shimei. Forest carbon storage in Guangxi Province estimated by 8th forest inventory data [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2017,37(3):127-133.

[28] 张国斌,李秀芹,徐泽鸿,等.几种不同更新的森林群落碳储量结构特征分析[J].生态环境学报,2012,21(2):206-212.
Zhang Guobin, Li Xiuqin, Xu Zehong, et al. Analysis of the carbon stock structure in forest plantations with different regeneration methods [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012,21(2):206-212.

[29] Tilman D, Isbell F, Cowles J M. Biodiversity and ecosystem functioning [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2014,45:471-493.

[30] 王瑞华,葛晓敏,唐罗忠.林下植被多样性、生物量及养分作用研究进展[J].世界林业研究,2014,27(1):43-48.
Wang Ruihua, Ge Xiaomin, Tang Luozhong. A review of diversity, biomass and nutrient effect of understory vegetation [J]. World Forestry Research, 2014,27(1):43-48.

[31] 周春衡,付智勇,吴丽萍,等.喀斯特坡地土层厚度及养分含量空间分布特征[J].农业现代化研究,2020,41(3):539-548.
Zhou Chunheng, Fu Zhiyong, Wu Liping, et al. Spatial distribution characteristics of soil thickness and soil nutrient content in Karst slopes [J]. Research of Agricultural Modernization, 2020,41(3):539-548.

[32] 丁颖蕾,周运超.喀斯特小流域土壤石砾分布特征及其影响因素[J].中国岩溶,2019,38(5):729-738.
Ding Yinglei, Zhou Yunchao. Characteristics of soil gravel distribution in Karst small watershed and its influencing factors [J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(5):729-738.

[33] 苏建欣.柳州市桉树人工林发展现状、存在问题与对策[J].科技视界,2019,9(12):225-226.
Su Jianxin. On development status, existing problems and strategies of eucalyptus plantations in Liuzhou City [J]. Science & Technology Vision, 2019, 9(12):225-226.

[34] 温远光,周晓果,王磊,等.中国岩溶森林生态保护修复的理论与技术[J].广西科学,2022,29(1):61-70.
Wen Yuanguang, Zhou Xiaoguo, Wang Lei, et al. Theory and technology of Karst forest ecological protection and restoration in China [J]. Guangxi Sciences, 2022,29(1):61-70.

[35] 付威波,彭晚霞,宋同清,等.不同林龄尾巨桉人工林的生物量及其分配特征[J].生态学报,2014,34(18):5234-5241.
Fu Weibo, Peng Wanxia, Song Tongqing, et al. Biomass and its allocation characteristics of *Eucalyptus urophylla* × *E. Grandis* plantations at different stand ages [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(18):5234-5241.