

肇庆市森林碳储量与碳密度动态变化研究*

郑峰霖¹ 古佳玮¹ 卢德浩¹ 黄华蓉² 陈红跃¹

(1. 华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642; 2. 广东省岭南院勘察设计有限公司, 广东 广州 510599)

摘要 对肇庆市不同优势树种和林龄的森林类型的面积、碳储量和碳密度进行比较分析, 结果表明: 2023年肇庆市乔木林面积共计 $70.96 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 碳储量共计 $2\,811.92 \times 10^5 \text{ tC}$; 相比于2018年乔木林面积下降了4.02%, 但总碳储量增加了11.29%。中龄到成熟林龄阶段的马尾松 *Pinus massoniana*、其他软阔林和阔叶混交林是近5年肇庆市森林乔木碳储量增长的最大贡献者。阔叶混交林、针阔混交林和针叶混交林是碳储存能力最强的森林类型; 且随着林龄的增加, 树种的碳密度普遍呈增大的趋势。中龄林和近熟林占肇庆市乔木林的54.8%, 预示着未来几十年肇庆市森林碳储量将迎来持续地增长; 其中, 近熟和成熟林龄的阔叶混交林的碳密度在2018—2023年间的增幅最大, 具有较大的碳储存潜力。此外, 肇庆市人工林的面积和碳储量都约是天然林的6倍, 但人工林在单位面积上的碳储存能力和碳密度的增速却不如天然林, 因此实行森林质量的精准提升工程来提高人工林在单位面积上的碳储存能力, 是有效提升肇庆市森林碳储量和碳汇功能的主要途径。

关键词 乔木林; 碳储量; 碳密度; 林龄

中图分类号: S757 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2023) 06-0082-07

Changes of Forest Carbon Storage and Carbon Density in Zhaoqing City

ZHENG Fenglin¹ GU Jiawei¹ LU Dehao¹HUANG Huarong² CHEN Hongyue¹

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China;

2. Guangdong Lingnanyuan Exploration and Design Co. Ltd, Guangzhou, Guangdong 510599, China)

Abstract A comparative analysis of the area, carbon storage, and carbon density of different dominant tree species and forest ages in Zhaoqing city was conducted. The results showed that the total area of arboreal forests in Zhaoqing city was $70.96 \times 10^5 \text{ hm}^2$, with a total carbon storage of $2\,811.92 \times 10^5 \text{ tC}$ in 2023. The middle-aged to mature stages of *Pinus massoniana*, other soft broad-leaved forests, and broad-leaved mixed forests were the largest contributors to the growth of forest arbor carbon storage in Zhaoqing city over the past five years. Broad-leaved mixed forests, needle-broad mixed forests, and coniferous mixed forests had the strongest carbon storage capacity; and as forest age increased, the carbon density of tree species generally showed an increasing trend. Middle-aged forests and near-mature forests accounted for 54.8% of the arboreal forests in Zhaoqing city, indicating that the forest carbon storage in Zhaoqing city would continue to grow over the next few decades. Among them, the carbon density of near-mature and mature broad-leaved mixed forests increased the most

* 基金项目: 广东省林业科技创新项目 (2023KJCX001)。

第一作者: 郑峰霖 (1995—), 男, 在读硕士, 研究方向为森林培育, E-mail: zhengfenglin-1@163.com。

通信作者: 陈红跃 (1964—), 男, 教授, 主要从事森林培育教学和研究, E-mail: chenryue@scau.edu.cn。

from 2018 to 2023, and had great potential for carbon storage. In addition, the area and carbon storage of artificial forests in Zhaoqing city were about 6 times that of natural forests, but the carbon storage capacity and carbon density growth rate of artificial forests per unit area were not as good as natural forests. Therefore, implementing precise improvement projects for forest quality to improve the carbon storage capacity of artificial forests per unit area was the main way to effectively increase the forest carbon storage and carbon sink function of Zhaoqing city.

Key words arboreal forest; carbon storage; carbon density; forest age

森林作为地球上最大的陆地生态系统,提供了一系列重要的生态系统服务,包括碳储存、水源涵养、土壤保护和生物多样性保护等^[1-2]。例如,森林能够通过光合作用吸收大气中的二氧化碳,将其转化为生物质碳并储存在植物体内,从而减少大气中的二氧化碳浓度^[3-4]。因此,森林的碳储存功能对于缓解全球气候变化具有特别重要的意义^[2,5],了解森林的碳储量和碳密度对于评估森林对全球碳循环的贡献以及制定有效的森林管理和碳汇提升策略具有重要意义。然而,森林的碳储量和碳密度受到许多因素的影响,其中包括森林类型、树种组成、森林年龄等^[6-7]。不同类型和年龄段的森林可能具有不同的生长特性和碳储存能力。例如,速生树种构成的森林类型因生长速度快、生物量大而具有较高的碳储量;但也可能因为林分结构单一,抗病虫害能力弱以及老龄化程度高而导致碳储存能力弱^[8-11]。

肇庆市作为国家森林城市,森林资源面积超105.4万 hm^2 ,森林蓄积量达6114万 m^3 ,拥有北岭山、羚羊峡古栈道等一批森林公园,森林覆盖率连年递增,达70.83%,是粤港澳大湾区森林面积最大、森林覆盖率最高的城市。因此,本文基于2018和2023年广东省肇庆市森林资源连续清查数据,统计5年间肇庆市乔木林的面积和碳储量,分析不同类型和林龄的森林在面积、碳储量和碳密度上的差异,并探讨这些差异背后可能的原因;旨在通过这项研究,能够为未来的森林管理和碳汇提升策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

肇庆市位于广东省中西部(22°47'~24°24'N, 111°21'~112°52'E),全市土地面积 $1.49 \times 10^5 \text{ km}^2$,地势西北高,南部和东部较低,以中低山丘陵为主,平原较少,呈西北往东南倾斜走向,属

南亚热带季风气候,年平均气温21.6℃,年降雨量1646.8mm,年日照时数1636.8h。肇庆市当地的自然植被多属于南亚热带常绿季雨林,以鼎湖山和封开县的黑石顶自然保护区为代表,是广东省主要林区之一。

1.2 研究方法

基于2018和2023年广东省肇庆市森林资源连续清查数据,数据包括样地优势树种、平均胸径、平均树高、林分蓄积等60多项数据;采用生物量转换因子法(Biomass equations for the biomass expansion factor; BEF)和已建立的回归方程来计算乔木林的植物生物量^[12-15]。

生物量转换因子 f_{BEF} 和林分蓄积量 V_i 之间的关系方程表达式为:

$$f_{\text{BEFi}} = a + b/V_i \quad (1)$$

式中, a 和 b 为方程参数^[14,16]。

因此,林分内单位面积的生物量 B ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)可以由蓄积量 V (m^3/hm^3)和方程参数简单计算得到,即:

$$B = aV + b \quad (2)$$

林分生物量 W (tC)则可以通过优势树种的蓄积量、面积和对应的生物量转换因子计算得出,即:

$$W = \sum_{i=1}^k A_i \times f_{\text{BEFi}} \times V_i \quad (3)$$

式中, i 为优势树种类型, A_i 、 V_i 和 f_{BEFi} 分别为优势树种 i 的林分面积、平均蓄积量和生物量转换因子。

林分碳储量 C (tC)通过林分生物量 W (tC)乘以植物含碳量 C_c (一般取0.5^[6,17])相乘得到,即:

$$C = W \times C_c \quad (4)$$

林分碳密度 C_d (tC/hm^2)即林分单位面积的碳储量,通过计算碳储量 C (tC)与面积 A (hm^2)之比得出^[18-19],即:

$$C_d = C/A \quad (5)$$

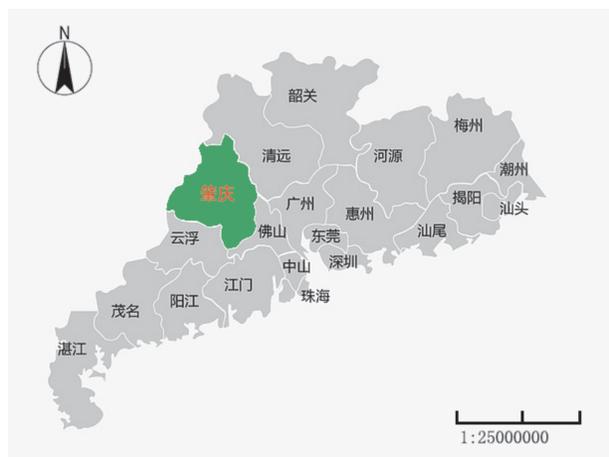


图1 肇庆市位置
Figure 1 The location of Zhaoqing city

2 结果与分析

2.1 不同森林类型的面积、碳储量与碳密度

肇庆市乔木林面积从2018年的 $73.81 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 下降到2023年的 $70.96 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，其中降低的主要是桉树林的面积（表1）。桉树林、马尾松 *Pinus massoniana* 林和其他软阔林是面积占比和碳储量最大的3种森林类型，三者之和约占肇庆市乔木林总面积和碳储量的7成。肇庆市乔木林碳储量在2018—2023年这5年间增加了11.29%，其中以马尾松林和其他软阔林的增量最大，分别为 $110.53 \times 10^5 \text{ tC}$ 和 $69.60 \times 10^5 \text{ tC}$ 。相比于桉树林、马尾松林，以及杉木林 *Cunninghamia lanceolata*、湿地松林 *Pinus elliottii* 和薰莨林 *Castanopsis fissa* 等纯林，阔叶混交林、针阔混交林和针叶混交林的碳密度更高，大于肇庆市乔木林的平均碳密度 42.44 tC/hm^2 ；且相比于2018年的碳密度均有明显增加。阔叶混交林、针阔混交林、针叶混交林和乔木林平均碳密度在5年前后分别增加了18.01%、22.18%、24.71%和12.66%。此外，马尾松林和湿地松林的碳密度也增长较快，分别为22.94%和29.25%。

2.2 不同林龄的森林类型的面积、碳储量与碳密度

表2表明2023年肇庆市乔木林不同龄组中面积最大的是中龄林，为 $25.28 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ；其次是成熟林、近熟林、幼龄林和过熟林。相比于2018年，幼龄林和中龄林的面积下降；而成熟林和过熟林的面积增加。类似的，幼龄林的碳储量5年间下降了31.59%，而成熟林和过熟林的储量增加了

74.83%和109.73%。中龄林也是碳储量最大的龄组，2018和2023年的碳储量为 $948.22 \times 10^5 \text{ tC}$ 和 $951.87 \times 10^5 \text{ tC}$ ；分别占乔木林总碳储量的37.53%和33.85%；过熟林的平均碳密度最高，分别为 48.05 tC/hm^2 和 51.22 tC/hm^2 。

其中，2023年的其他硬阔林、其他软阔林和杉木林的过熟林的碳密度更是高达 72.65 tC/hm^2 、 67.28 tC/hm^2 和 58.61 tC/hm^2 （表3）。除针叶混交林的过熟林的碳密度小于其他龄组外，各森林类型的碳密度都随着树木年龄的增大呈逐步递增的趋势。在幼龄林到成熟林阶段，阔叶混交林、针阔混交林、针叶混交林以及其他阔叶林的碳密度均大于其他类型的森林。其中，近熟和成熟林龄的阔叶混交林的碳密度在5年间的增幅最大，分别为52.51%和65.41%。

幼龄林、中龄林和近熟林阶段碳储量最大的是马尾松林和其他软阔林，其中2023年马尾松林的碳储量依次为 $86.45 \times 10^5 \text{ tC}$ 、 $313.84 \times 10^5 \text{ tC}$ 和 $143.89 \times 10^5 \text{ tC}$ ，其他软阔林的碳储量依次为 $95.58 \times 10^5 \text{ tC}$ 、 $295.75 \times 10^5 \text{ tC}$ 和 $157.42 \times 10^5 \text{ tC}$ 。相比于2018年，幼龄的马尾松和其他软阔林的碳储量分别降低了39.37%和45.07%，而近熟林龄的马尾松和其他软阔林的碳储量分别增加了31.26%和70.13%。2023年成熟林和过熟林中碳储量最大的是桉树林，分别为 $213.35 \times 10^5 \text{ tC}$ 和 $140.43 \times 10^5 \text{ tC}$ ，相比于2018年显著增加了316.46%和862.51%。

2.3 不同起源森林类型的面积、碳储量与碳密度

2023年肇庆市森林中天然林和人工林的总面积分别为 $10.16 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 和 $60.79 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，碳储量分别为 $445.51 \times 10^5 \text{ tC}$ 和 $2366.41 \times 10^5 \text{ tC}$ ，天然林与人工林的面积和碳储量的比值均约为1:6；相比于2018年没有明显变化。人工林的平均碳密度为 38.93 tC/hm^2 ，小于天然林的 43.83 tC/hm^2 ；人工林、天然林相比于2018分别增加了5.30%和8.54%。不同龄组中人工林的碳密度均小于天然林，其中2023年过熟林龄天然林的碳密度是人工林的1.35倍，差距最大。中龄林是天然林和人工林中面积最大的龄组，分别为 $4.34 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 和 $20.95 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，也是碳储量最大的龄组，分别为 $177.56 \times 10^5 \text{ tC}$ 和 $774.31 \times 10^5 \text{ tC}$ 。

表 1 不同森林类型 2018 和 2023 年的面积、碳储量与碳密度

Table 1 Area, Carbon storage, and Carbon density of different forest types and age groups at 2018 and 2023

森林类型 Forest types	面积/ ($\times 10^5$ hm ²) Area		碳储量/ ($\times 10^5$ tC) Carbon storage		碳密度/ (tC/hm ²) Carbon density	
	2018	2023	2018	2023	2018	2023
桉树林 <i>Eucalyptus</i> forest	19.47	17.35	575.91	518.31	29.57	29.87
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> forest	17.72	17.18	576.40	686.93	32.52	39.98
其他软阔林 Other malacophyll broadleaved forest	16.24	15.73	600.63	670.23	36.98	42.61
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	4.76	5.02	150.28	178.62	31.55	35.59
针阔混交林 Mixed coniferous and broadleaved forest	5.48	5.50	227.13	278.65	41.44	50.63
湿地松林 <i>Pinus elliotii</i> forest	1.99	1.92	68.47	85.18	34.39	44.45
阔叶混交林 Mixed broadleaved forest	2.73	2.75	106.72	126.77	39.09	46.13
黛菊林 <i>Castanopsis fissa</i> forest	1.91	1.96	73.29	88.50	38.43	45.24
针叶混交林 Mixed coniferous forest	2.02	1.96	91.89	111.45	45.57	56.83
其他硬阔林 Other sclerophyll broadleaved forest	1.42	1.40	52.82	61.19	37.29	43.84
其他乔木林 Other tree forests	0.07	0.19	3.15	6.08	47.56	31.64
总计 Total/均值 Mean	73.81	70.96	2 526.69	2 811.91	37.67	42.44

表 2 不同龄级森林 2018 和 2023 年的面积、碳储量与碳密度

Table 2 Area, Carbon storage, and Carbon density of different forest age groups at 2018 and 2023

龄级 Age classes	面积/ ($\times 10^5$ hm ²) Area		碳储量/ ($\times 10^5$ tC) Carbon storage		碳密度/ (tC/hm ²) Carbon density	
	2018	2023	2018	2023	2018	2023
幼龄林 Young forest	18.80	10.75	512.86	350.83	27.28	32.62
中龄林 Middle-age forest	29.05	25.28	948.22	951.87	32.64	37.65
近熟林 Near mature forest	13.92	13.61	547.64	548.19	39.34	40.29
成熟林 Mature forest	8.73	14.81	359.08	627.79	41.12	42.40
过熟林 Over-mature forest	3.31	6.51	158.89	333.24	48.05	51.22

表 3 不同森林类型各龄级 2018 和 2023 年的碳密度

Table 3 Carbon density of different forest types and age groups at 2018 and 2023

森林类型 Forest types	碳密度/ (tC/hm ²) Carbon density									
	幼龄林 Young forest		中龄林 Middle-age forest		近熟林 Near mature forest		成熟林 Mature forest		过熟林 Over-mature forest	
	2018	2023	2018	2023	2018	2023	2018	2023	2018	2023
桉树林	15.09	18.77	26.25	18.06	38.35	21.64	43.80	36.00	52.37	48.14
马尾松林	27.29	36.58	32.53	39.82	37.16	40.37	37.35	42.19	41.78	50.30
其他软阔林	31.20	35.63	36.45	40.65	42.88	45.24	50.19	47.86	65.14	67.28
杉木林	21.41	20.84	37.86	35.81	39.97	44.79	46.23	47.61	55.66	58.61
针阔混交林	35.94	46.91	41.84	49.75	44.89	52.50	46.65	51.35	45.69	54.76
湿地松林	19.30	36.12	24.91	31.25	32.47	39.18	39.72	45.89	38.80	48.34
阔叶混交林	29.52	38.83	32.41	43.42	30.91	47.14	34.84	57.63	44.66	56.82

森林类型 Forest types	碳密度/ (tC/hm ²) Carbon density									
	幼龄林 Young forest		中龄林 Middle-age forest		近熟林 Near mature forest		成熟林 Mature forest		过熟林 Over-mature forest	
	2018	2023	2018	2023	2018	2023	2018	2023	2018	2023
藜蒴林	26.34	24.48	31.30	16.52	36.69	30.33	39.53	46.43	40.43	48.43
针叶混交林	38.57	52.58	46.20	55.62	49.54	58.86	47.80	59.90	48.02	52.32
其他硬阔林	33.45	41.07	43.18	48.32	53.39	46.91	60.13	54.07	52.45	72.65
其他乔木林	56.39	16.09	41.71	26.99	46.30	62.76	44.31	22.97	49.78	55.15

表4 不同森林类型各龄级2018和2023年的碳储量

Table 4 Carbon storage of different forest types and age groups at 2018 and 2023

森林类型 Forest types	碳储量/ (×10 ⁵ tC) Carbon storage									
	幼龄林 Young forest		中龄林 Middle-age forest		近熟林 Near mature forest		成熟林 Mature forest		过熟林 Over-mature forest	
	2018	2023	2018	2023	2018	2023	2018	2023	2018	2023
桉树林	39.68	31.36	260.45	74.64	209.97	58.53	51.23	213.35	14.59	140.43
马尾松林	142.58	86.45	220.54	313.84	109.62	143.89	101.89	139.45	1.78	3.3
其他软阔林	174.01	95.58	264.43	295.75	92.53	157.42	39.95	80.68	29.70	40.79
杉木林	49.16	32.73	47.91	54.24	23.48	43.38	21.94	35.96	7.79	12.31
针阔混交林	54.88	39.6	88.15	103.84	44.72	64.92	24.29	42.73	15.10	27.56
湿地松林	1.66	1.16	8.01	3.05	17.52	13.7	32.81	41.17	8.48	26.11
阔叶混交林	1.21	17.59	6.73	49.41	9.83	30.65	27.23	22.46	61.72	6.66
藜蒴林	0.35	1.97	4.36	1.27	13.59	1.52	42.36	21.95	12.63	61.8
针叶混交林	17.74	9.03	30.52	33.94	22.28	28.67	16.23	28.49	5.12	11.32
其他硬阔林	31.53	34.74	17.04	20.96	3.78	5.33	0.24	0.09	0.23	0.07
其他乔木林	0.07	0.63	0.09	0.93	0.32	0.18	0.91	1.46	1.76	2.88

表5 不同龄级天然林与人工林2018和2023年的面积、碳储量与碳密度

Table 5 Area, Carbon storage, and Carbon density of natural forest and artificial forest of different forest age groups at 2018 and 2023

森林类型 Forest types	天然林 Natural forest						人工林 Plantation forest					
	面积/ (×10 ⁵ hm ²) Area		碳储量/ (×10 ⁵ tC) Carbon storage		碳密度/ (tC/hm ²) Carbon density		面积/ (×10 ⁵ hm ²) Area		碳储量/ (×10 ⁵ tC) Carbon storage		碳密度/ (tC/hm ²) Carbon density	
	2018	2023	2018	2023	2018	2023	2018	2023	2018	2023	2018	2023
幼龄林	2.26	1.29	66.06	47.14	29.18	36.67	16.53	9.47	446.80	303.69	27.02	32.07
中龄林	5.42	4.34	199.81	177.56	36.87	40.96	23.63	20.95	748.40	774.31	31.67	36.96
近熟林	1.61	2.67	67.23	121.52	41.63	45.50	12.31	10.94	480.41	426.67	39.03	39.01
成熟林	0.79	1.27	32.88	58.72	41.61	46.35	7.94	13.54	326.20	569.08	41.07	42.03
过熟林	1.01	0.61	53.03	40.57	52.62	66.94	2.30	5.90	105.86	292.66	46.04	49.61
总计	11.10	10.16	419.01	445.51	40.38	43.83	62.72	60.79	2 107.68	2 366.41	36.97	38.93

3 结论与讨论

3.1 肇庆市乔木林的面积在 2018 年至 2023 年间有所下降，主要是桉树林的面积减少。然而，尽管面积有所减少，但乔木林的总碳储量却在这 5 年间增加了 11.29%，这主要是因为马尾松林和其他软阔林碳储量和碳密度的增加。在肇庆市乔木林中，桉树林、马尾松林和其他软阔林是面积占比最大的 3 种森林类型。桉树和马尾松适应性强，生长速度快且具有良好的经济效应，是早期广东省林业经济活动中广泛种植的树种，广泛分布于我国的亚热带地区^[9,20-21]。尽管桉树林、马尾松林和其他软阔林拥有较大的森林面积和全市森林乔木总碳储量的三分之二，但在单位面积上的碳储存能力却不如阔叶混交林、针阔混交林和针叶混交林，这可能是由于优势树种单一的林分在生态位上重叠导致植物之间的竞争较大^[22]，且易受到病虫害、低温和台风的影响^[8,23]，因此碳储存能力普遍低于生态位分化度较高的混交林^[10,24-25]。

2023 年，中龄林和近熟林占肇庆市乔木林面积的 54.8%，预示着未来一段时间内肇庆市森林碳储量将迎来持续地增长。随着森林年龄的增长，成熟林和过熟林的碳密度达到最高^[26-27]，其中又以其他硬阔林、其他软阔林和杉木林的过熟林的碳密度最高，这可能是由于成熟林能更好适应当地的气候条件，更有利于植被生物量碳的积累，且过熟林也未达到严重老龄化阶段；但也有研究表明乔木生物量会随着林龄增加呈现先增后减的趋势^[28-29]，我们的研究结果同样表明针叶混交林的过熟林的碳密度小于其他龄组。肇庆市成过熟林的碳密度与广东其他地区基本持平，但桉树林的碳密度和碳储量要高于部分地区^[30-31]。类似地，在不同年龄段的森林中，阔叶混交林、针阔混交林、针叶混交以及其他阔叶混交等类型的森林具有较高的碳密度；其中，近熟和成熟林龄的阔叶混交林的碳密度在 5 年间的增幅最大，具有较大的碳储存潜力。中龄和近熟林龄段的马尾松和其他软阔林的面积和碳储量较大，且成熟的软阔林有着较高的碳密度，因此中龄到成熟林龄阶段的马尾松、其他软阔林和阔叶混交林是未来肇庆市森林乔木碳储量增长的主要来源，

肇庆市人工林的面积和碳储量都约是天然林的 6 倍，由此可见人工林在肇庆市森林碳汇中发

挥着主导作用。人工林的生产力在热带和亚热带地区可高达天然林的 3~7 倍^[32]，这也是我国大力实施人工造林的原因。尽管人工林的总碳储量较高，但其单位面积碳储存能力和碳密度的增速却不如天然林。这一方面可能是由于肇庆市的天然林多分布于自然保护区内，多为国家级生态公益林和水源涵养林，林分质量好，植被碳密度高^[33-34]；另一方面可能是由于人工林常受到人为干扰，尤其存在大量乔木经济林以收获木材或水果为目的而缩减林分密度，控制林体结构，因此碳密度较低。

3.2 综合肇庆市森林碳储量和碳密度在不同森林类型、林龄和森林起源上的特点，应采取不同的森林经营管理措施。在未来的森林管理和碳汇提升策略中，可以通过选择适应当地环境条件、生长速度快、碳储存能力强的树种进行林分造林^[35-36]，并且对密度过大且林分单一的林地进行合理地疏伐和改造，以此来提高森林的碳储存能力。对于天然林，要继续实施天然林保护工程以利于其自然恢复；同时加强天然林固碳增汇方面的研究，科学地管理天然林。对于过熟林龄且碳密度低下的桉树林和马尾松等单一优势树种的人工林，需要实行森林质量的精准提升工程，通过改善植被群落结构，提高其稳定性和生产力，确保林业资源的可持续高效利用^[37-38]。这些研究结果对于制定肇庆市未来的森林管理策略，以及对抗全球气候变化具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] ERB K. H., KASTNER T., PLUTZAR C., et al. Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass [J]. *Nature*, 2018, 553 (7686):73-76.
- [2] TRUMBORE S., BRANDO P., Hartmann H. Forest health and global change [J]. *Science*, 2015, 349(6250):814-818.
- [3] WALKER A., DE K M., BASTOS A., et al. Integrating the evidence for a terrestrial carbon sink caused by increasing atmospheric CO₂ [J]. *New phytol*, 2020, 229 (5):2413-2445.
- [4] FATICHI S., PAPPAS C., ZSCHEISCHLER J., et al. Modelling carbon sources and sinks in terrestrial vegetation [J]. *New phytol*, 2019, 221(2):652-668.
- [5] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981-2000 年中国陆地植

- 被碳汇的估算[J]. 中国科学(D辑:地球科学),2007(6):804-812.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 潘少杰. 松材线虫病生物防治技术研究进展[J]. 安徽大学学报(自然科学版),2023,47(4):92-99.
- [9] 季孔庶,徐立安,王登宝,等. 中国马尾松遗传改良研究历程与成就[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(6):10-22.
- [10] 焦秋燕. 中国混交林与纯林生物量差异的整合分析[D]. 咸阳:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2022.
- [11] 岳军伟,李华源. 我国天然林和人工林固碳特征差异分析[J]. 福建林业科技,2021,48(4):1-7.
- [12] FANG JINGYUN, CHEN ANPING, PENG CHANGHUI, et al. Changes in Forest Biomass Carbon Storage in China Between 1949 and 1998 [J]. Science, 2001, 292(5525):2320-2322.
- [13] SCHROEDER P, BROWN S, MO J, et al. Biomass estimation for temperate broadleaf forests of the United States using inventory data [J]. Forest sci, 1997, 43(3):424-434.
- [14] 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(5):497-508.
- [15] BROWN S, LUGO A. Aboveground biomass estimates for tropical moist forest of the Brazilian amazon [J]. Interciencia, 1992, 17:8-18.
- [16] 黄兴召,王泽夫,徐小牛. 生物量转换因子连续函数的拟合方法比较[J]. 浙江农林大学学报,2017,34(5):775-781.
- [17] 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.
- [18] 王效科,冯宗炜,欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. 应用生态学报,2001(1):13-16.
- [19] 顾凯平,张坤,张丽霞. 森林碳汇计量方法的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2008(5):105-109.
- [20] 王立景,邓永红,曾小平,等. 我国南亚热带森林群落先锋树种马尾松的水分利用特征[J]. 中南林业科技大学学报,2019,39(3):82-90.
- [21] 杨民胜,吴志华,张维耀. 我国环北部湾地区发展桉树的思考[J]. 世界林业研究,2016,29(6):64-69.
- [22] MASON N W H, DE B F, DOLEŽAL J, et al. Niche overlap reveals the effects of competition, disturbance and contrasting assembly processes in experimental grassland communities [J]. J ECOL, 2011, 99(3):788-796.
- [23] 王蕊蕊. 桉树、桉树枝瘦姬小蜂及孟氏胯姬小蜂体内细菌多样性研究[D]. 南宁:广西大学,2019.
- [24] 阮友维. 南亚热带过熟马尾松人工纯林及其混交林的生物量和碳储量特征[J]. 南宁:广西大学,2019.
- [25] 何林骏. 桉树红锥大叶栎混交林生长规律及生产力研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2019.
- [26] 王琰,刘菊,王志萍,等. 吕梁山天然林碳密度研究[J]. 山西大学学报(自然科学版),2023,46(4):989-998.
- [27] 张秋根,任超,王苏琴,等. 江西省亚热带常绿阔叶林碳储量和碳密度的影响因子[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版),2018,32(4):86-92.
- [28] 刘豪,徐冬梅. 山西省乔木林碳汇动态趋势研究[J]. 林业资源管理,2019(6):49-54.
- [29] 孙丽娜,范晓辉,王孟本. 山西森林植被碳储量空间分布格局[J]. 山西大学学报(自然科学版),2018,41(1):226-232.
- [30] 黄华蓉. 广东韶关市公益林乔木层碳密度和碳储量研究[J]. 亚热带植物科学,2022,51(4):282-287.
- [31] 刘萍,邓鉴峰,魏安世,等. 广州市森林生物量及碳储量评估[J]. 西南林业大学学报,2015,35(4):62-65.
- [32] EVANS J. Sustainability of plantation forestry: Impact of species change and successive rotations of pine in the Usutu Forest, Swaziland [J]. The Southern African Forestry Journal, 2010, 184.
- [33] 高萍,曾觉安,习灿林,等. 国有北岭山林场生态公益林碳储量和碳密度研究[J]. 林业与环境科学,2019,35(3):78-81.
- [34] 夏艳菊,张静,邹顺,等. 南亚热带森林群落演替过程中结构多样性与碳储量的变化[J]. 生态环境学报,2018,27(3):424-431.
- [35] 黄钰辉,张卫强,甘先华,等. 南亚热带杉木林分改造中不同树种组合模式评价[J]. 生态环境学报,2016(6):956-964.
- [36] 黄文明. 木麻黄海防林改造更新造林成效调查分析[D]. 长沙:中南林业科技大学,2014.
- [37] 广东省林业局广东省财政厅关于印发《广东省先造林后补助管理办法》的通知[J]. 广东省人民政府公报,2023(15):25-30.
- [38] 广东推进国家森林城市向县域发展[J]. 国土绿化,2022(11):12-17.