

广东省公益林示范区森林碳汇计量^{*}

梁泽锐 张 耕 莫玉娟 卓桂珠 赵志明 李大锋

(广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

摘要 为了解广东省公益林碳汇功能, 文章以 2021—2023 年广东省建设的 25 个公益林示范区为研究对象, 基于森林资源二类调查数据对示范区的碳汇能力进行计量, 分析不同地区、森林龄组、森林类型碳储量和碳密度的差异性。结果表明, 广东省 25 个公益林示范区的碳储量为 269.69×10^4 t, 大多集中在粤北地区, 以中龄林和阔叶混交林为主, 其占比分别为 42.6% 和 70.1%; 平均碳密度为 $53.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 近熟林和过熟林的碳密度最高, 阔叶混交林的碳密度是荔枝 *Litchi chinensis* (龙眼 *Dimocarpus longan*) 的 105.8 倍。中幼龄林约占 25 个公益林示范区森林面积的 64.66%, 随着公益林示范区继续推动重点林业生态工程造林, 全面提升森林经营管理水平, 示范区将持续发挥碳汇功能。

关键词 森林碳汇; 碳汇计量; 公益林; 生物量; 蓄积量

中图分类号: S757 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2024) 06-0059-06

DOI: 10.20221/j.cnki.2096-2053.202406008

Forest Carbon Sink Measurement in the Demonstration Area
of Public Welfare Forest in Guangdong ProvinceLIANG Zerui ZHANG Geng MO Yujuan ZHUO Guizhu
ZHAO Zhiming LI Dafeng(Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry,
Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract To understand the carbon sink function of public welfare forest in Guangdong province, this paper takes 25 demonstration areas of public welfare forest in Guangdong province from 2021 to 2023 as the research objects, measures the carbon sink capacity of the demonstration areas based on the data from the Second-Class Survey Forest Resources Inventory, and analyzes the differences of carbon storage and carbon density in different regions, forest age classes, and forest types. The results indicate that the carbon storage of 25 demonstration areas of public welfare forest in Guangdong province was 269.69×10^4 t, most of which were concentrated in northern Guangdong, mainly middle-aged forest and broad-leaved mixed forest, accounting for 42.6% and 70.1%, respectively. The average carbon density was $53.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, and the carbon density of near-mature forest and over-mature forest was 105.8 times that of *Litchi chinensis* (*Dimocarpus longan*). The young and middle-aged forests account for about 64.66% of the forest area of 25 demonstration areas of public welfare forest. As the demonstration areas of public welfare forest continue to promote key forestry ecological engineer-

^{*} 基金项目: 广东省省级公益林效益补偿资金省统筹经费项目“广东省生态公益林示范区建设成效监测评估”(2024 年度)。

第一作者: 梁泽锐 (1998—), 女, 硕士, 主要从事公益林示范区碳汇计量, E-mail: liangkaixin88888@163.com。

通信作者: 李大锋 (1977—), 男, 高级工程师, 主要从事林业信息化、公益林及碳汇工作, E-mail: Df2001@126.com。

ing afforestation and comprehensively improve the level of forest management, the demonstration area will continue to play a significant role in carbon sink function.

Key words forest carbon sink; carbon sink measurement; public welfare forest; biomass; standing volume

森林是陆地生态系统中十分重要的组成部分^[1],其碳汇功能,可缓解气候变化、维持地球碳平衡,以及应对全球变暖带来的一系列相关问题^[2]。国际对森林的碳汇功能高度重视,近些年多次开展有关森林碳汇的气候谈判会议,对今后森林碳汇发展提出新要求。同时,在新时代发展观下我国在未来发展森林碳汇也将面临更大的挑战,森林碳汇惠及领域进一步扩大^[3]。探究森林碳汇潜力,以及如何进一步挖掘森林碳汇发展空间,成为应对气候变化、加强生态文明建设的主要问题。准确估计和测绘森林蓄积量、生物量、碳储量和碳汇量有利于国家制定相关的战略来减轻大气中的碳浓度,对于生态环境可持续发展至关重要^[4]。近年来,国内外的学者们在碳汇计量研究方面取得了重要进展,其方法包括森林清查(生物量)、基于遥感的生物量估算法(生物量与土地覆盖的关系)、涡流相关方法(直接测量 CO₂ 的释放和吸收)、反比法(生物量、CO₂ 通量和 CO₂ 大气运输之间的关系)^[5],不同的方法各有优缺点,在进行碳汇计量时应根据实际情况选择合适的计量方法。

公益林是以发挥森林生态效益、保护生态环境和人类生存环境为主要目的的森林,自 20 世纪中期以来,人们对森林生态系统在维持人类社会和地球生物圈发展平衡作用的认识逐步加深,随着社会主义市场经济的建立和发展,广东省人民政府于 1994 年开始出台相关政策和规定,为公益林的建设提供了制度保障^[6],并在 2013 年开始开展公益林示范区建设工作^[7],作为展示广东省公益林建设成果的窗口、探索经营管理模式的试验田、开展森林生态效益监测的基地等,文章以 2021—2023 年建设的 25 个公益林示范区为研究对象,从森林碳汇计量研究入手,估算 25 个示范区的森林碳储量和碳密度,为今后公益林示范区制定林业应对气候变化与碳中和规划、生态系统生产总值(Gross ecosystem product, GEP)核算提供依据。

1 数据来源与方法

1.1 研究区概况

广东省位于我国大陆南部沿海区域,坐标为 20°09'~25°31'N, 109°45'~17°20'E,东西跨度约 800 km,南北跨度约为 600 km,陆地面积共 98×10^4 km²,由山地(33.7%)、丘陵(24.9%)、台地(14.2%)、平原(1.7%)、河流和湖泊(5.5%)组成。北回归线横贯中部,地势北高南低,具有热带、亚热带季风和海洋等气候。同时,光、热和水等自然资源丰富,孕育了丰富的生物多样性,在植物资源方面,广东省属亚热带常绿阔叶林区、中亚热带常绿阔叶林区域,主要植被类型包括锥属、木荷属、蕈树属等常绿阔叶林;以马尾松 *Pinus massoniana*、杉木 *Cunninghamia lanceolata* 为主的针叶林;以马尾松等针叶树和木荷 *Schima superba*、锥栗 *Castanea henryi*、广东润楠 *Machilus kwangtungensis* 等阔叶树种混交的针阔混交林^[8]。本文选取 2021—2023 年广东省建设的 25 个公益林示范区为研究对象,详见表 1。

1.2 数据来源

数据来源于 2020 年森林资源二类调查数据。森林资源二类调查每十年开展一次,采用调查时间节点的高分辨率卫星影像图在 GPS 系统中根据小班区划条件进行内业区划,外业调查时,在小班内选取具有代表性的地段设置样地进行地类、林种、优势树种(组)、小班面积、平均年龄、龄组、起源、小班蓄积量、林分蓄积量、散生木蓄积量、四旁树蓄积量、工程类别、天然更新等级等调查,主要查清各类森林面积和森林蓄积量,同时,采用机械抽样或分层抽样,检验小班蓄积调查的可靠性和调查精度。在二类调查数据中筛选出 25 个公益林示范区区域内包含的小班信息,利用 Microsoft Excel 365 软件将小班信息进行整理、汇总和计算,涉及的 25 个示范区共包含小班 6 726 个,面积 50 661.81 hm²。示范区范围内树种包括桉树 *Eucalyptus robusta*、马尾松、湿地松(国外松) *Pinus elliottii*、硬阔类、软阔类等,根

表 1 2021—2023 年广东省建设的 25 个公益林示范区
Table 1 25 demonstration areas of public welfare forest in Guangdong province from 2021 to 2023

序号 Number	地区 Areas	位置 Location	名称 Name
1	粤东	潮州市	广东潮安凤凰山省级自然保护区公益林示范区
2			饶平县黄冈河源头（麒麟岭古驿道）公益林示范区
3		梅州市	五华县天云岭森林公园生态公益林示范
4			百岁山郊野公园公益林示范区
5			大埔县五虎山森林公园公益林示范区
6	粤西	汕尾市	海丰县海城镇莲花山公益林示范区
7		云浮市	广东省云浮林场公益林示范区
8		阳江市	广东阳春鹅凰嶂省级自然保护区公益林示范区
9			阳春市东湖水库公益林示范区
10	粤北	清远市	广东连山笔架山省级自然保护区公益林示范区
11			广东连南大峒省级自然保护区公益林示范区
12		韶关市	南雄市邓坊泉水谷县级森林公园生态公益林示范区
13			仁化县锦江两岸生态公益林示范区
14	珠三角	河源市	广东乳源西京古道国家石漠公园生态公益林示范区
15			南雄市鴉子寨公益林示范区
16			始兴南山省级自然保护区公益林示范区
17			国有小坑林场公益林示范区
18			仁化县石塘上中坳公益林示范区
19		肇庆市	新丰江库区锡场公益林示范区
20			广东西江烂柯山省级自然保护区公益林示范区
21		惠州市	国有象头山林场公益林示范区
22			惠州市惠阳区生态公益林林药生态科普廊道示范区
23			国有梁化林场生态公益林林下经济（林药产业）示范区
24		广州市	惠东县乌禽嶂省级公益林示范区
25			梯面林场公益林示范区

据各优势树种的面积、蓄积、分布状况和林分结构，将优势树种归并为桉树、马尾松、杉木、荔枝 *Litchi chinensis*（龙眼 *Dimocarpus longan*）、松类和针叶树、阔叶混交林、针阔混交林等 7 个森林类型。示范区各个地区、森林龄组及森林类型的面积及蓄积见表 2~4。

表 2 广东省 25 个公益林示范区分地区统计分布面积和蓄积
Table 2 Distribution area and volume of 25 demonstration areas of public welfare forest in Guangdong province

地区 Areas	面积/hm ² Area	蓄积/m ³ Forest stock volume
粤东	12 758. 73	852 544. 00
粤西	2 601. 23	219 741. 00
粤北	19 294. 39	1 636 936. 00
珠三角	15 997. 19	1 140 539. 00
合计	50 661. 81	3 848 015. 00

表 3 广东省 25 个公益林示范区不同龄组面积和蓄积
Table 3 Area and volume of different age classes in 25 demonstration areas of public welfare forest in Guangdong province

龄组 Age group	面积/hm ² Area	蓄积/m ³ Forest stock volume
幼龄林	9 914. 33	495 362. 00
中龄林	22 843. 24	1765 712. 00
近熟林	11 358. 18	1 023 100. 00
成熟林	4 771. 18	335 470. 00
过熟林	1 774. 89	228 371. 00
合计	50 661. 81	3 848 015. 00

1.3 森林碳储量计算方法

森林生物量估算采用材积源生物量法（Volume-derived biomass），也叫生物量转换因子法（Biomass expansion factor），估算公益林示范区各个小班森林生物量，其原理是利用林分生物量与

木材材积比值的平均值，乘以该森林类型总蓄积量，得到该类型森林的总生物量的方法。

基本公式为：

式中： B_{total} 为某一树种组的总生物量； V_{total} 为某一树种组的总蓄积量； a 、 b 均为常数。

各森林类型的生物量计算参数见表 5^[9]。

$$B_{\text{total}} = aV_{\text{total}} + b$$

表 4 广东省 25 个公益林示范区不同森林类型面积和蓄积

Table 4 Area and volume of different forest types in 25 demonstration areas of public welfare forest in Guangdong province

森林类型 Forest type	面积/hm ² Area	蓄积/m ³ Forest stock volume
桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>	2 924. 00	297 632. 00
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	3 505. 57	289 964. 00
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	3 541. 80	323 219. 00
荔枝 <i>Litchi chinensis</i> (龙眼 <i>Dimocarpus longan</i>)	523. 53	613. 00
松类和针叶树 Pine and coniferous trees	1 879. 99	191 802. 00
阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest	27 375. 09	2 160 881. 00
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	9 285. 15	775 706. 00
总计 Total	50 661. 81	3 848 015. 00

表 5 不同森林类型生物量计算参数

Table 5 Biomass calculation parameters of different forest types

森林类型 Forest type	a	b
桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>	0. 887 3	4. 553 9
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	0. 510 1	1. 045 1
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	0. 399 9	22. 541 0
荔枝 <i>Litchi chinensis</i> (龙眼 <i>Dimocarpus longan</i>)	0. 797 5	0. 420 4
松类和针叶树 Pine and coniferous trees	0. 516 8	33. 237 8
阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest	0. 625 5	91. 001 3
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	0. 813 6	18. 466 0

目前，无论在森林群落或森林生态系统尺度上还是在区域、国家尺度上，IPCC 等国际组织以及世界各国对森林碳储量的估计普遍采用的方法是通过直接或间接测定森林生物量再乘以生物量中碳元素的含量（含碳系数）推算而得。

基本公式为：

$$C_t = B_{\text{total}} \times C_F$$

式中： C_t 为碳储量； B_{total} 为总生物量； C_F 为生物量含碳系数。

各森林类型的含碳系数见表 6^[10]。

2 结果与分析

2.1 不同地区的碳储量

如表 7 所示，25 个广东省公益林示范区总碳储量为 269.69×10^4 t，平均碳密度为 $53.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，其中，粤北地区的碳储量和碳密度最高，碳储量

表 6 不同森林类型含碳系数

Table 6 Carbon content coefficient of different forest types

森林类型 Forest types	含碳系数 Carbon coefficient
桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>	0. 525 3
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	0. 459 6
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	0. 520 1
荔枝 <i>Litchi chinensis</i> (龙眼 <i>Dimocarpus longan</i>)	0. 483 4
松类和针叶树 Pine and coniferous trees	0. 510 1
阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest	0. 490 0
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	0. 497 8

为 110.08×10^4 t，占总碳储量的 40.82%，碳密度为 57.05，高于平均碳密度的 7.54%。

表 7 广东省 25 个公益林示范区分地区统计碳储量

Table 7 Carbon storage in different regions of 25 public welfare forest in Guangdong province

地区 Areas	生物量/ (10 ⁴ t) Biomass	碳储量/ (10 ⁴ t) Carbon storage	碳密度/ (t · hm ⁻²) Carbon density
粤东	119. 68	59. 42	46. 58
粤西	26. 14	13. 09	50. 33
粤北	223. 53	110. 08	57. 05
珠三角	176. 75	87. 10	54. 45
总计	546. 10	269. 69	273. 59

2. 2 不同森林龄组的碳储量 量的 42. 6%；碳密度方面，近熟林和过熟林的碳密度最高，分别为 61. 95 t · hm⁻² 和 63. 99 t · hm⁻²。如表 8 所示，中龄林的碳储量最高，为总碳储

表 8 广东省 25 个公益林示范区不同森林龄组的碳储量

Table 8 Carbon storage of different forest age classes in 25 demonstration areas of public welfare forest in Guangdong province

森林龄组 Forest age classes	生物量/ (10 ⁴ t) Biomass	碳储量/ (10 ⁴ t) Carbon storage	碳密度/ (t · hm ⁻²) Carbon density
幼龄林	104. 12	51. 53	51. 75
中龄林	233. 57	114. 91	50. 31
近熟林	152. 64	70. 36	61. 95
成熟林	43. 71	21. 75	45. 59
过熟林	22. 06	11. 36	63. 99
总计	546. 10	269. 69	273. 59

2. 3 不同森林类型的碳储量 的 105. 8 倍；桉树、松类和针叶树及针阔混交林的碳密度分别位于第二、第三和第四，且数值较为接近，分别为 49. 84、43. 85 和 43. 03 t · hm⁻²。如表 9 所示，不同森林类型之间的生物量、碳储量及碳密度相差较大，其中，阔叶混交林的碳储量占总碳储量的 70. 1%，其碳密度是荔枝（龙眼）

表 9 广东省 25 个公益林示范区不同森林类型的碳储量

Table 9 Carbon storage of different forest types in 25 demonstration areas of public welfare forest in Guangdong province

森林类型 Forest type	生物量/ (10 ⁴ t) Biomass	碳储量/ (10 ⁴ t) Carbon storage	碳密度/ (t · hm ⁻²) Carbon density
桉树 <i>Eucalyptus robusta</i>	27. 74	14. 57	49. 84
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	15. 16	6. 97	19. 87
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	21. 06	10. 95	30. 70
荔枝 <i>Litchi chinensis</i> （龙眼 <i>Dimocarpus longan</i> ）	0. 07	0. 03	0. 65
松类和针叶树 Pine and coniferous trees	16. 22	8. 27	43. 85
阔叶混交林 Broad-leaved mixed forest	385. 42	188. 86	68. 78
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	80. 43	40. 04	43. 03
总计 Total	546. 10	269. 39	273. 59

3 结论与讨论

森林系统作为环境系统中的重要组成部分，在区域和全球碳循环中发挥着重要作用。实现“碳中和”目标后，人类的化石燃料使用量（即二氧化碳排放量）主要取决于森林碳汇的规模，因

此森林碳汇在实现“中和”过程中发挥着重要作用。广东省具有十分丰富的森林资源，其中公益林占比达到了 42%^[11]，在生态供给、调节、服务、支持等功能以及应对气候变化方面发挥着重要的作用。本文利用 2020 年森林资源二类调查数据，整理出广东省 25 个公益林示范区所包含的小班信

息,并对其碳汇进行计量,得出以下结论。

(1) 广东省 25 个公益林示范区的森林蓄积量为 $2\,985.71\text{ m}^3$, 生物量为 $546.10\times 10^4\text{ t}$, 碳储量为 $269.69\times 10^4\text{ t}$, 平均碳密度为 $53.23\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 高于广东省国家级公益林的平均碳密度^[12], 表明广东省公益林示范区中的植被具备较好的碳汇能力。

(2) 不同地区示范区之间的碳密度相差在 25% 以内, 超过 1/3 的示范区集中在粤北地区, 其碳储量和碳密度也位居第一, 反映出粤北地区的公益林具备较好的碳汇潜力, 可能与粤北地区参与林业碳汇项目的人工林较多有关^[13]。

(3) 广东省 25 个公益林示范区的中龄林所占面积比例为 45.09%, 处于较高状态, 但其碳密度低于近熟林和过熟林, 一定程度上反映了示范区森林质量还有较大的提升空间, 未完全释放森林的碳储能力, 在今后的森林管理工作中, 若能加大对中龄林的抚育和管理, 森林质量得到较大提高后, 吸收和储存更多的碳素, 示范区将成为一个潜力巨大的碳库^[14-15]。

(4) 阔叶混交林是广东省 25 个公益林示范区碳储量的主体, 碳储量比值达 70.1%, 56.86% 的森林面积贡献了 70.1% 的森林碳储量, 高于其余森林类型的相对比值, 表明了广东省公益林示范区建设对提高森林碳汇功能作用较为明显, 在后续的林分改造过程中, 将阔叶纯林改造为阔叶混交林, 是提升森林碳汇能力的有效途径^[16]。

本文研究结果为示范区今后制定林业应对气候变化与碳中和规划、生态系统生产总值核算提供依据, 同时为后续的公益林示范区碳储量动态研究提供基础数据。

参考文献

[1] 杨洪晓, 吴波, 张金屯, 等. 森林生态系统的固碳功能和

碳储量研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2005, 41(2): 172-177.

[2] 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.

[3] 安瑶, 张达, 朱开伟, 等. 森林碳汇发展的实践, 挑战与展望[J]. 生态经济, 2024, 40(10): 13-19.

[4] LU D, CHEN Q, WANG G, et al. A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems[J]. International journal of digital earth, 2016, 9(1): 63-105.

[5] 陈日东, 林仕全, 潘国英, 等. 天堂山林场森林地上生物量及碳储量的遥感估算模型构建[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(3): 71-77.

[6] 钟汉城, 姜丹玲. 广东省的生态公益林建设[J]. 中南林业调查规划, 1999, 18(1): 22-26.

[7] 广东省林业局. 我省部署建设公益林示范区[EB/OL]. (2013-03-07)[2024-11-19]. http://lyj.gd.gov.cn/news/forestry/content/post_1860086.html.

[8] 汪求来. 广东省针阔混交林直径分布规律研究[J]. 林业调查规划, 2014, 39(3): 28-34.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 邵一弘, 林荫. 粤连续 17 年提高公益林补偿标准[N]. 南方日报, 2024-04-01(A03).

[12] 刘金山, 张蓓, 齐建文, 等. 广东省国家级公益林植被碳汇计量研究[J]. 中南林业调查规划, 2022, 41(1): 23-26.

[13] 田惠玲, 周平, 贾朋, 等. 粤北不同经营措施对人工林年均固碳量的影响[J]. 生态科学, 2018, 37(4): 211-217.

[14] 叶金盛, 余光辉. 广东省森林植被碳储量动态研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(4): 7-12.

[15] 张亮. 韶关市森林植被碳储量与碳密度动态研究[J]. 林业与环境科学, 2024, 40(5): 88-94.

[16] 姚永华, 赵泽新, 熊安华. 基于森林资源二类调查的县域森林碳汇及其价值估算研究: 以湖北省当阳市为例[J]. 湖北林业科技, 2023, 52(1): 36-42.