

引用格式: 苏思琪, 邹冠华, 余云军, 等. 广东省红树林碳储量与碳汇潜力估算 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 63-74. SU Siqi, ZOU Guanhu, YU Yunjun, et al. Carbon reserve and carbon sink potential estimation of mangrove in Guangdong Province [J]. Southern energy construction, 2024, 11(5): 63-74. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.5.07.

# 广东省红树林碳储量与碳汇潜力估算

苏思琪, 邹冠华, 余云军<sup>✉</sup>, 文芳, 张乃文  
(生态环境部华南环境科学研究所, 广东 广州 510535)

**摘要:** [目的] 红树林生态系统具有极高的固碳能力, 是全球碳循环的重要部分。探索其碳汇潜力可促进减缓和适应气候变化, 为我国碳达峰与碳中和提供一种潜在的海洋方案。[方法] 通过研究红树林蓝碳评估的方法学, 开展广东省碳储量和碳汇潜力的估算。广东省红树林碳储量约为 3 222.035 kt C, 其中植被碳储量约为 1 094.465 kt C, 土壤碳储量约为 2 127.57 kt C。不同红树林群落中, 桐花林的植被碳储量含量最高, 约为 1 508.931 kt C, 其次依次为白骨壤、秋茄、无瓣海桑, 植被碳储量分别约为 1 508.931 kt C、859.115 kt C、193.296 kt C 和 660.693 kt C。[结果] 根据《红树林保护修复专项行动计划(2020—2025年)》, 2025年广东省营造红树林 55.00 km<sup>2</sup>, 碳汇潜力可增加 36.171 kt CO<sub>2</sub>-e ~ 99.891 kt CO<sub>2</sub>-e, 有较大的碳汇潜力。[结论] 研究可为广东省红树林碳汇造林提供科学依据, 对我国碳达峰与碳中和事业具有重要意义。

**关键词:** 红树林; 广东省; 碳储量; 碳汇潜力

中图分类号: S718; X173

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)05-0063-12

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.5.07

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

## Carbon Reserve and Carbon Sink Potential Estimation of Mangrove in Guangdong Province

SU Siqi, ZOU Guanhu, YU Yunjun<sup>✉</sup>, WEN Fang, ZHANG Naiwen

(South China Institute of Environmental Science, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510535, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] The mangrove ecosystem has a high carbon sequestration capacity and is an important part of the global carbon cycle. Exploring its carbon sink potential can promote the mitigation and adaptation to climate change, providing a potential marine solution for China's carbon peak and carbon neutralization. [Method] In this study, the methodology of mangrove blue carbon assessment was studied to estimate the carbon reserve and carbon sink potential in Guangdong Province. The carbon reserve in mangroves in Guangdong Province was about 3 222.035 kt C, of which the carbon reserve in vegetation was about 1 094.465 kt C and the carbon reserve in soil was about 2 127.57 kt C. Among different mangrove communities, the vegetation carbon reserve of *Aegiceras corniculatum* was the highest, reaching 1 508.931 kt C, followed by *Avicennia marina*, *Kandelia obovata* and *Sonneratia apetala*, with carbon reserve of 1 508.931 kt C, 859.115 kt C, 193.296 kt C and 660.693 kt C respectively. [Result] According to the "Special Action Plan for Mangrove Protection and Restoration (2020-2025)", by 2025, 55.00 km<sup>2</sup> of mangroves will be planted in Guangdong Province, and the carbon sink potential can increase by 36.171 kt CO<sub>2</sub>-e ~ 99.891 kt CO<sub>2</sub>-e, with great carbon sink potential. [Conclusion] This study can provide scientific basis for the afforestation of mangrove carbon sink in Guangdong Province, and is of great significance for China's carbon peak and carbon neutrality cause.

**Key words:** mangroves; Guangdong Province; carbon reserve; carbon sink potential

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2024-01-02 修回日期: 2024-02-05 网络首发日期: 2024-05-07

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2021-CCI-01)

## 0 引言

世界海洋中生物固定的碳称之为“蓝碳”(Blue Carbon),占整个世界由光合作用所储存的“绿碳”的 55%<sup>[1]</sup>。红树林与盐沼、海草床并称为三大滨海蓝碳生态系统,由于其独特的厌氧或缺氧环境,碳吸收可被大范围长期(长达千年)封存,具有极高的固碳能力和生态资源价值。红树林是地球上最多样化的湿地生态系统<sup>[2]</sup>,主要分布在滨海滩涂、开阔海岸、浅水潟湖、溺谷湾、海湾、河口、河流三角洲等潮水涨落区域<sup>[3-4]</sup>。基于印度-太平洋地区数据显示,红树林是世界上含碳量最高的热带森林,平均含碳量 1 023 Mg/hm<sup>2[5]</sup>,土壤碳储量占河口生态系统的总碳储量 71%~98%<sup>[6]</sup>。同时,红树林生态系统平均每年还向邻近海域输出 2.1×10<sup>7</sup> t 的颗粒有机碳和 2.4×10<sup>7</sup> t 的溶解有机碳<sup>[7]</sup>。此外,红树林生态系统在应对气候变换、净化海水、防风消浪、维持生物多样性等方面发挥着极为重要的作用<sup>[8]</sup>。因此,推进红树林保护工作,积极探索建立红树林生态保护机制,发挥红树林的生态功能,具有重要意义。

红树林湿地是全球碳循环的重要部分,其碳循环过程与其他湿地类型相似,但也有它的特殊性,主要体现在高生产率、高分解率和高归还率的“三高”特性<sup>[9]</sup>。红树林湿地生态系统作为一个“开放的”生态系统,其植物光合吸收的碳,最终以植物枯枝碎屑、凋落物和死亡分解后的有机碳等形式为近海海洋生物提供丰富的饵料,而且可以通过微生物分解为促进红树林群落发展的营养物质<sup>[10]</sup>。还有一部分,以溶解性无机碳和颗粒有机碳等方式,随着潮水的流动和地下水的流动水平方向输送入海洋,之后或通过沉积生物泵机制埋藏固持于近海沉积物<sup>[11]</sup>,或通过微型生物碳泵机制,产生惰性溶解有机碳<sup>[12]</sup>,进而海水中储存数千年。因此,红树林被视为应对气候的一种基于自然的解决方案,其中快速准确估算红树林生态系统碳汇潜力成为了红树林领域的研究基础和热点。但是,由于红树林生态系统复杂性、开放性和区域差异性,目前对于不同区域的红树林生态系统碳汇潜力,仍存在认识不足。

准确估算红树林碳储量和碳汇潜力是开展红树林生态保护的重要前提之一。生态系统碳储量的评估和碳汇速率的测定已有大量的文献报道,也提出

了包括沉样方清查法、模型模拟法、遥感估算法以及生态系统碳通量收支法等<sup>[9,13-16]</sup>。吕浩<sup>[17]</sup>等总结了森林生态系统的植被、土壤和凋落物等不同碳库碳储量估算方法,为碳储量的评估和碳汇速率的测定提供技术支持。程鹏飞<sup>[18]</sup>等对比分析不同方法的研究对象、所需参数、适用范围以及优缺点情况,评估了植被碳储量和土壤碳储量估算方法的适用性。结合我国当前生态系统碳储量的评估和碳汇速率的测定方法学的研究进展,开展相关的红树林碳储量与碳汇潜力估算,可为国家参与应对气候变化政策和行动提供技术支撑。

广东省海岸线漫长,其沿岸基质适合红树植物生长,同时该省份是全国红树林资源最丰富的地区之一,也是全国红树林面积最大的省份<sup>[19-20]</sup>。据统计,广东省红树林总面积约占全国红树林总面积的 57%,红树林碳汇开发潜力巨大。本次研究基于红树林蓝碳评估的方法学,对广东省红树林的碳储量和碳汇潜力开展估算;在此基础上,结合广东省当前红树林造林和修复政策工程,评估其可能带来的碳汇增量,并给出建议与意见,促进红树林实现生态产品价值化,以达到减缓和适应气候变化,协同推进生物多样性保护、滨海湿地修复等工作,实现协同增效,为我国碳达峰与碳中和提供一种潜在的海洋方案。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域

广东省地处中国大陆最南部,全境位于北纬 20°09'~25°31'和东经 109°45'~117°20'之间,濒临南海,毗邻港澳,紧靠东南亚,东接海峡西岸经济区,南临海南国际旅游岛。全省陆地面积为 17.98 万 km<sup>2</sup>,约占全国陆地面积的 1.87%;其中岛屿面积 1 592.7 km<sup>2</sup>,约占全省陆地面积的 0.89%。全省大陆岸线长 3 368.1 km,居全国第一位<sup>[21]</sup>。

我国浙江、福建、广东、广西、海南 5 个省(自治区)分布有红树林,其中广东省红树林面积最大。采用刘叶取<sup>[22]</sup>等人的红树林矢量数据集产品计算红树林面积得,广东省现有红树林面积为 133.65 km<sup>2</sup>。广东省红树林 65.66% 分布在雷州半岛,19.45% 分布在粤西,12.28% 分布在珠江口,粤东红树林仅占 2.61%<sup>[23]</sup>,空间分布不均,且整体较为破碎,以小面积斑块居多。面积较大的连片分布红树林主要分布于湛江红树林

国家级自然保护区、珠海淇澳岛红树林自然保护区、广州南沙湿地、江门镇海湾、深圳福田红树林国家级自然保护区等<sup>[24-25]</sup>。近年来,由于红树林保护和人工培育力度加大,天然红树林和人工红树林面积整体均呈上升趋势。

## 1.2 估算方法

### 1.2.1 碳储量与固碳潜力评估范围

#### 1) 红树林碳储量评估范围

红树林生态系统的碳储量主要由植被碳储量和土壤碳储量两部分组成<sup>[26-28]</sup>,本次研究主要对植被碳储量和土壤碳储量展开评估。

植被碳储量储存于植物体内,包括地上部分植物体、地下根<sup>[29]</sup>。本研究的植被碳储量主要计算广东红树林生态系统优势种物种的植被碳储量。土壤碳储量是红树林生态系统碳储量的重要组成部分,占比49%~98%<sup>[30]</sup>。土壤碳的来源主要包括枯枝落叶等凋落物、外源有机物输入、藻类光合作用等<sup>[29,31]</sup>。本研究主要计算广东红树林生态系统土壤有机碳的储量。

#### 2) 红树林固碳潜力评估尺度

红树林生态系统固碳能力是指红树林通过植物光合作用吸收大气中的CO<sub>2</sub>,并将其固定在生物体和土壤中的活动、过程或机制<sup>[32]</sup>。红树林碳汇量可以用一定时间内上述所有碳库碳储量的变化量之和来表示。

本次研究针对现阶段广东省基准情景和项目情景2种情况开展碳汇潜力评估<sup>[33]</sup>。基准线情景指在没有红树林生态修复活动时,最能合理地代表项目边界内红树林自然发育状态演变的情景,能有效反映当前红树林的碳汇潜力现状,本研究以2020年广东省红树林情况作为基准情景。项目情景指拟议的红树林生态修复项目活动(造林和营林)下的情景,本研究根据《红树林保护修复专项行动计划(2020—2025年)》<sup>[34]</sup>项目,确定广东红树林项目情景下项目边界内所选碳库中的碳储量变化量。根据《红树林保护修复专项行动计划(2020—2025年)》中计划营造红树林面积来确定未来广东省宜林面积和时间尺度,最后评估2025年广东省红树林的固碳潜力(CSp)。

### 1.2.2 碳储量与固碳潜力估算方法

#### 1) 红树林植被碳储量估算方法

#### (1) 单株生物量估算

异速生长方程是红树林物种单株生物量估算的基础方法,即根据实地调查数据建立的植被结构参数与生物量之间的经验模型,已有研究表明异速生长方程在红树林生物量估算研究中较为便捷且精度较高。一般计算公式如下:

$$\lg C_{Bi} = \sum_1^j (a + b \lg(D^2 H)) \quad (1)$$

式中:

$C_{Bi}$  ——红树林物种*i*的单株生物量;

$a$  ——经验参数;

$b$  ——经验参数;

$D$  ——红树林物种*i*的平均胸径;

$H$  ——红树林物种*i*的平均树高;

$j$  ——红树林物种*i*主要的器官数。

#### (2) 植被碳储量估算

植被碳储量的估算方法采用样地清查法和遥感算法相结合进行碳储量估算,样地清查法选用生物量清单法,具体计算公式<sup>[35-37]</sup>如下:

$$C_{RB} = \sum_i^m C_{Bi} \times D_i \times A_i \times D_{P_i} \quad (2)$$

式中:

$C_{RB}$  ——植被碳储量;

$C_{Bi}$  ——第*i*物种的单株生物量;

$D_i$  ——第*i*物种的单株碳密度;

$A_i$  ——广东区域内的第*i*物种的平均种植面积;

$D_{P_i}$  ——广东区域内的第*i*物种的平均种植密度;

$i$  ——区域内的主要红树林种类数。

#### 2) 红树林土壤碳储量估算方法

本研究通过土壤类型法估算广东红树林土壤碳储量,是通过土壤剖面数据计算分类单元的碳含量,根据各种分类层次聚合土壤剖面数据,再按照区域或国家尺度土壤图上的面积得到碳蓄积总量。此方法原理简单,数据较易获取,是目前国内外土壤碳储量估算的最常用方法。

通过收集相关文献资料获得广东省各类红树林平均土壤碳密度,乘以各类红树林面积后计算得红树林土壤碳储量。具体计算公式如下:

$$C_{RS} = \sum_i^m C_{si} \times A_i \quad (3)$$

式中:

$C_{RS}$  ——土壤碳储量;

$C_{si}$  ——第*i*物种的土壤碳密度。

### 3) 红树林固碳潜力估算方法

广东省红树林固碳潜力估算方法采用《广东省红树林碳普惠方法学(2023年版)》中的方法对碳汇潜力进行计算。主要分为 2 种情形:(1)基准线情景;(2)项目情景。2 种的碳汇量计算公式如下<sup>[33]</sup>:

红树林土壤基准碳汇量计算公式如下:

$$B_{SOIL} = \sum_{li} \Delta C_{S,l,BSL} \times A_{li} \quad (4)$$

式中:

$B_{SOIL}$  ——红树林土壤基准碳汇量( $t CO_2-e$ );

$\Delta C_{S,l,BSL}$  ——群落类型*l*的单位面积土壤碳储量变化量基准值( $t CO_2-e \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ );

$A_{li}$  ——第*i*个核算周期,核算边界内群落类型*l*的红树林面积( $hm^2$ );

*l* ——群落类型。

红树林植被基准碳汇量计算公式如下:

$$B_{TREE} = \sum_{li} \Delta C_{T,l,BSL} \times A_{li} \quad (5)$$

式中:

$B_{TREE}$  ——红树林植被基准碳汇量( $t CO_2-e$ );

$\Delta C_{T,l,BSL}$  ——群落类型*l*的单位面积植被碳储量变化量基准值( $t CO_2-e \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ )。

项目情景红树林土壤碳汇量计算公式如下:

$$P_{SOIL} = \sum_{li} R_L \times A_{li} \quad (6)$$

式中:

$P_{SOIL}$  ——红树林土壤碳汇量( $t CO_2-e$ );

$R_L$  ——项目核算边界内,群落类型*l*的平均土壤有机碳累积速率( $t CO_2-e \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ )。

项目情景红树林植被碳汇量计算公式如下:

$$P_{TREE} = \sum_{li} P_{SOIL,l} \times K_l \quad (7)$$

式中:

$P_{TREE}$  ——红树林植被碳汇量( $t CO_2-e$ );

$P_{SOIL,l}$  ——核算边界内群落类型*l*的土壤碳汇( $t CO_2-e \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ );

$K_l$  ——核算边界内群落类型*l*植被/土壤碳储量的比值,无量纲。

## 2 结果

### 2.1 广东省红树林碳储量估算结果

#### 2.1.1 广东省红树林面积和群落结构特征

广东省现有红树林面积为 133.65  $km^2$ ,红树林主要集中在粤西和雷州半岛区域,在空间特征上呈现出极不均匀分布的特征。根据杨加志<sup>[23]</sup>等开展的广东省红树林物种组成和分布现状调查,广东省红树林群落的主要树种有 14 种,包括秋茄、红海榄、木榄、老鼠筋、白骨壤、海漆、桐花树、无瓣海桑、拉关木、银叶树、海芒果、卤蕨、黄槿、水黄皮。其中,以白骨壤、桐花树、无瓣海桑和秋茄为主,树种面积占比高达 96.72%,详见表 1。

表 1 广东省红树林树种加权面积统计<sup>[23]</sup>

Tab. 1 Weighted area statistics of mangrove tree species in Guangdong Province<sup>[23]</sup>

树种	面积/ $km^2$	比例/%
白骨壤	50.03	37.43
桐花树	46.74	34.97
无瓣海桑	23.12	17.30
秋茄	9.38	7.02
拉关木	1.88	1.41
老鼠筋	1.07	0.80
红海榄	0.70	0.52
木榄	0.36	0.27
海漆	0.16	0.12
卤蕨	0.07	0.05
银叶树	0.07	0.05
黄槿	0.07	0.05
水黄皮	0.01	0.01
海芒果	0.01	0.01
合计	133.65	100

#### 2.1.2 广东省红树林植被碳储量估算

##### 1) 红树林单株生物量估算

本研究考虑到白骨壤、桐花树、无瓣海桑和秋茄树种面积占广东省红树林面积的 96.72%<sup>[23]</sup>,因此,本次研究选取以此 4 种红树林物种进行植被碳储量估算。白骨壤、桐花树、无瓣海桑和秋茄这 4 种植物生物量估算异速生长方程详见表 2。白骨壤、桐花树、无瓣海桑和秋茄这 4 种植物的均树高和平均胸径特征通过文献调研的方法,详细情况见表 3。最



终经计算的, 各红树林物种的器官部位和单株生物量如表 4 所示, 秋茄的单株生物量为 27.90 kg; 无瓣海桑单株生物量为 76.03 kg; 白骨壤单株生物量为 3.23 kg; 桐花树的单株生物量为 6.48 kg。

2) 红树林单株碳储量估算

通过测定异速生长方程法植被生物量, 在生物量的基础上乘以植被含碳转化系数来计算单株生物碳储量。本研究植被碳转化含量系数参考《广东省

表 2 各类红树林生物量估算异速生长方程  
Tab. 2 Allometric growth equation for estimating biomass of various mangroves

种类	生物量	备注	参考文献
秋茄树	$\lg W_{\text{stem}} = 2.162 + 0.869 \lg(D^2 H)$	*	[38]
	$\lg W_{\text{branch}} = 2.741 + 1.253 \lg(D^2 H)$		
	$\lg W_{\text{leaf}} = 1.706 + 0.943 \lg(D^2 H)$		
	$\lg W_{\text{root}} = 2.162 + 0.869 \lg(D^2 H)$		
白骨壤	$\lg W_{\text{stem}} = 1.643 + 0.544 \lg(D^2 H)$	*	[38]
	$\lg W_{\text{branch}} = 1.897 + 0.567 \lg(D^2 H)$		
	$\lg W_{\text{leaf}} = 0.690 + 0.287 \lg(D^2 H)$		
	$\lg W_{\text{root}} = 1.361 + 0.615 \lg(D^2 H)$		
桐花树	$\lg W_{\text{stem}} = 1.198 + 0.464 \lg(D^2 H)$	**	[35, 39]
	$\lg W_{\text{branch}} = 1.110 + 0.463 \lg(D^2 H)$		
	$\lg W_{\text{leaf}} = 0.393 + 0.475 \lg(D^2 H)$		
	$\lg W_{\text{root}} = 0.967 + 0.303 \lg(D^2 H)$		
无瓣海桑	$\lg W_{\text{stem}} = 0.361 + 0.330 \lg(D^2 H)$	***	[38, 40]
	$\lg W_{\text{branch}} = 0.159 + 0.388 \lg(D^2 H)$		
	$\lg W_{\text{leaf}} = -0.756 + 0.436 \lg(D^2 H)$		
	$\lg W_{\text{bark}} = -0.379 + 0.356 \lg(D^2 H)$		
	$\lg W_{\text{flower}} = -2.346 + 0.379 \lg(D^2 H)$		
	$\lg W_{\text{root}} = -0.039 + 0.421 \lg(D^2 H)$		

注:  $W_{\text{stem}}$ —树干生物量(kg);  $W_{\text{branch}}$ —树枝生物量(kg);  $W_{\text{leaf}}$ —树叶生物量(kg);  $W_{\text{bark}}$ —树皮生物量(kg);  $W_{\text{flower}}$ —花果生物量(kg);  $W_{\text{root}}$ —树根生物量(kg, \*\*公式中单位为t);  $D$ —胸径(\*公式中单位为m, \*\*\*公式中单位为cm);  $D_0$ —基径(cm);  $H$ —树高(m)。

表 3 各类红树林平均树高和平均胸径表

Tab. 3 Average tree height and average diameter breast height of various mangroves

物种	平均树高	平均胸径	参考文献
秋茄	6.08	*0.091	[28]
无瓣海桑	9.36	**11.86	[36]
白骨壤	0.90	*0.03	[41]
桐花树	2.37	**7.2	[35]

注: 平均树高单位为m; 胸径单位为cm(\*单位为m, \*\*为基径cm)。

表 4 各类红树林各部位和单株生物量估算表

Tab. 4 Estimation of biomass of each part and individual plant of various mangroves

树种	$W_{\text{stem}}$	$W_{\text{branch}}$	$W_{\text{leaf}}$	$W_{\text{root}}$	$W_{\text{bark}}$	$W_{\text{flower}}$	单株生物量/kg
秋茄	10.81	13.02	3.03	1.03	—	—	27.90
无瓣海桑	24.57	23.41	4.02	18.81	5.39	0.07	76.26
白骨壤	0.91	1.39	0.63	0.29	—	—	3.23
桐花树	2.05	1.68	0.31	2.44	—	—	6.48

林业碳汇碳普惠方法学(2020年修订版)》, 取 0.523 2, 算得各类红树林各部位碳储量和单株碳储量详见表 5。

表 5 各类红树林各部位碳储量和单株碳储量估算表

Tab. 5 Estimation of carbon reserve in each part and individual plant of various mangroves

树种	碳转化系数	树干	树根	树枝	树叶	树皮	花果	单株碳储量
秋茄	0.532	5.75	6.93	1.61	0.55	—	—	14.84
无瓣海桑	0.532	13.07	12.45	2.14	2.87	0.04	10.00	40.57
白骨壤	0.532	0.49	0.74	0.34	0.15	—	—	1.72
桐花树	0.532	1.09	0.89	0.16	1.30	—	—	3.45

注: 碳密度单位为(g/g), 碳储量单位为(kg C)。

3) 红树林植被总碳储量估算

本研究白骨壤、秋茄、桐花树和无瓣海桑植株密度分别取 0.1 棵/m<sup>2</sup>、0.58 棵/m<sup>2</sup>[38]、4.43 棵/m<sup>2</sup>[35] 和 0.31 棵/m<sup>2</sup>[36]。最终估算可得, 广东省红树林生态系统植被总碳储量为 1 094.465 kt C, 其中桐花树林的植被碳储量最高为 714.351 kt C, 白骨壤林、无瓣海桑林和秋茄林分别为 8.605 kt C、290.773 kt C 和 80.736 kt C。单位面积碳储量中桐花树林最高 15.284 kt C/km<sup>2</sup>, 其次为无瓣海桑林 12.577 kt C/km<sup>2</sup>, 秋茄林和白骨壤林分别为 8.607 kt C/km<sup>2</sup> 和 172.00 t C/km<sup>2</sup>, 详见表 6。

2.1.3 广东省红树林土壤碳储量估算

根据实地调研和文献综述得, 广东地区各类红树林土壤有机碳含量及碳密度如表 7 所示, 土壤平均碳密度为(0.16±0.02)Gg C·hm<sup>-2</sup>, 土壤平均有机碳密度为(1.97±0.29)%。秋茄、无瓣海桑、白骨壤、桐花树主要类群碳密度分别为(0.12±0.02)Gg C·hm<sup>-2</sup>、(0.16±0.02)Gg C·hm<sup>-2</sup>、(0.17±0.02)Gg C·hm<sup>-2</sup> 和(0.17±0.02)Gg C·hm<sup>-2</sup>。秋茄土壤有机碳含量较高, 但其容重较低, 所以碳密度相对较低。无瓣海桑作

表 6 广东省红树林碳储量信息表

Tab. 6 Information of mangrove carbon reserve in Guangdong Province

树种	密度/ (棵·m <sup>-2</sup> )	面积/ km <sup>2</sup>	单株生物 量/kg	单株碳储 量/(kg C)	植被碳储 量/(kt C)	单位碳储量/ (kt C·km <sup>-2</sup> )
白骨壤	0.10	50.03	3.23	1.72	8.605	0.172
桐花树	4.43	46.74	6.48	3.45	714.351	15.284
无瓣海桑	0.31	23.12	76.18	40.57	290.773	12.577
秋茄	0.58	9.38	27.90	14.84	80.736	8.607
合计	—	—	—	—	1 094.465	8.467

表 7 各类红树林土壤有机碳含量及碳密度

Tab. 7 Soil organic carbon content and carbon density of various mangrove forests

物种	有机碳 含量/%	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	碳密度/ (Gg C·hm <sup>-2</sup> )	参考文献
秋茄	2.59±0.28	0.78±0.04	0.12±0.02	[29, 36, 42-47]
无瓣海桑	1.60±0.12	0.82±0.02	0.16±0.02	[29, 36, 42-44, 47-52]
白骨壤	1.59±0.42	1.04±0.05	0.17±0.02	[42, 45, 49, 52-54]
桐花树	2.10±0.37	0.97±0.03	0.17±0.02	[42, 45, 49, 52-54]
平均	1.97±0.29	0.92±0.03	0.16±0.02	—

为广东省红树林恢复的主要造林树种,其土壤有机碳含量均低于其他红树林树植,与其林龄较小有关。结合当前广东省红树林面积可估算得土壤总碳储量为 2 127.57 kt C,白骨壤、桐花树、无瓣海桑和秋茄土壤碳储量分别为 850.51 kt C、794.58 kt C、369.92 kt C 和 112.56 kt C,详见表 8。

#### 2.1.4 广东省红树林总碳储量估算

广东红树林总碳储量估算结果如表 9 所示,总碳储量为 3 222.035 kt C,桐花树林的碳储量最高为 1 508.931 kt C,其他依次为白骨壤、秋茄和无瓣海桑,碳储量分别为 859.115 kt C、193.296 kt C 和 660.693 kt C。广东省红树林总碳密度为 24.925 kt C/km<sup>2</sup>,其中桐花

表 8 广东省红树林土壤碳储量信息表

Tab. 8 Information of mangrove soil carbon reserve in Guangdong Province

树种	面积/km <sup>2</sup>	碳密度/(Gg C·hm <sup>-2</sup> )	土壤碳储量/(kt C)
白骨壤	50.03	0.17	850.51
桐花树	46.74	0.17	794.58
无瓣海桑	23.12	0.16	369.92
秋茄	9.38	0.12	112.56
合计	—	—	2 127.57

林的碳密度最高,为 32.284 kt C/km<sup>2</sup>,其余依次为无瓣海桑、秋茄和白骨壤,分别为 28.577 kt C/km<sup>2</sup>、20.607 kt C/km<sup>2</sup> 和 17.172 kt C/km<sup>2</sup>。

## 2.2 广东省红树林碳汇潜力估算结果

### 2.2.1 广东省红树林基准碳汇量估算

基准线情景指在没有红树林生态修复活动时,最能合理地代表项目边界内红树林自然发育状态演变的情景。本研究以 2020 年度广东省红树林作为基准线情景进行估算,见表 10。

参考《广东省红树林碳普惠方法学(2023 年版)》<sup>[33]</sup>,白骨壤、桐花树、无瓣海桑和秋茄群落类型的红树林种植林的平均土壤有机碳累积速率分别为 559 t CO<sub>2</sub>-e·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>、978 t CO<sub>2</sub>-e·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>、839 t CO<sub>2</sub>-e·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 和 1 684 t CO<sub>2</sub>-e·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。经计算得,白骨壤、桐花树、无瓣海桑和秋茄群落类型的红树林种植林基准情境下的土壤碳汇量分别为 84.251 kt CO<sub>2</sub>-e、39.215 kt CO<sub>2</sub>-e、12.924 kt CO<sub>2</sub>-e、9.174 kt CO<sub>2</sub>-e,总碳汇量为 145.563 kt CO<sub>2</sub>-e。

白骨壤、桐花树、无瓣海桑和秋茄群落类型的红树林种植林的植被/土壤碳储量的比值分别为 0.176 5、0.080 8、0.385 7 和 0.078 5<sup>[33]</sup>。计算得,白骨壤、桐花树、无瓣海桑和秋茄群落类型的红树林种植林基准情境下植被碳汇量分别为 6.614 kt CO<sub>2</sub>-e、

表 9 广东省红树林碳储量信息表

Tab. 9 Information of mangrove carbon reserve in Guangdong Province

树种	面积/km <sup>2</sup>	植被碳密度/ (kt C·km <sup>-2</sup> )	土壤碳密度/ (Gg C·hm <sup>-2</sup> )	生物碳储量/(kt C)	土壤碳储量/(kt C)	平均碳密度/ (kt C·km <sup>-2</sup> )	总碳储量/(kt C)
白骨壤	50.03	0.172	0.17	8.605	850.51	17.172	859.115
桐花树	46.74	15.284	0.17	714.351	794.58	32.284	1 508.931
无瓣海桑	23.12	12.577	0.16	290.773	369.92	28.577	660.693
秋茄	9.38	8.607	0.12	80.736	112.56	20.607	193.296
合计	129.27	—	—	1 094.465	2 127.57	24.925	3 222.035

表 10 广东省红树林基准情景植被碳汇量信息表

Tab. 10 Information of vegetation carbon sink in mangrove benchmark scenario in Guangdong Province

物种	面积/km <sup>2</sup>	平均土壤有机碳累积/ (kt CO <sub>2</sub> -e·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	土壤碳汇量/(kt CO <sub>2</sub> -e)	植被/土壤碳比值	植被碳汇量/(kt CO <sub>2</sub> -e)	总碳汇量/(kt CO <sub>2</sub> -e)
秋茄	50.03	1 684	84.251	0.078 5	6.614	90.864
无瓣海桑	46.74	839	39.215	0.385 7	15.125	54.340
白骨壤	23.12	559	12.924	0.176 5	2.281	15.205
桐花树	9.38	978	9.174	0.080 8	0.741	9.915
合计	129.27	—	145.563	—	24.761	170.324

15.125 kt CO<sub>2</sub>-e、2.281 kt CO<sub>2</sub>-e、0.741 kt CO<sub>2</sub>-e, 总碳汇量为 24.761 kt CO<sub>2</sub>-e。

总碳汇量为土壤碳汇量与植被碳汇量之和, 白骨壤、桐花树、无瓣海桑和秋茄群落类型的红树林种植林基准情境下的植被碳汇量为 90.864 kt CO<sub>2</sub>-e、54.340 kt CO<sub>2</sub>-e、15.205 kt CO<sub>2</sub>-e、9.915 kt CO<sub>2</sub>-e, 总碳汇量为 170.324 kt CO<sub>2</sub>-e, 其中土壤碳汇量为 145.563 kt CO<sub>2</sub>-e, 占总碳汇量的 85.46%。

### 2.2.2 广东省红树林项目情景碳汇量估算

本研究根据 2020 年自然资源部等部门联合发布的《红树林保护修复专项行动计划(2020—2025 年)》, 到 2025 年广东省营造红树林 55.00 km<sup>2</sup><sup>[34]</sup>。根据固碳速率的不同, 可以设置 3 种项目情景, 具体情境见表 11。

根据设置不同情境可知, 广东省通过营造红树林面积, 提高红树林碳汇量 36.171 kt CO<sub>2</sub>-e~99.891 kt CO<sub>2</sub>-e。营造红树林以白骨壤种植为主时候, 碳汇速率最小, 约为 657.66 t CO<sub>2</sub>-e·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 土壤新增碳汇量约为 30.745 kt CO<sub>2</sub>-e, 植被新增碳汇量约为 5.426 kt CO<sub>2</sub>-e, 总新增碳汇量约 36.171 kt CO<sub>2</sub>-e。营造红树林以秋茄种植为主时候, 碳汇速率最大, 约为 1 816.20 t CO<sub>2</sub>-e·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 土壤新增碳汇量约为 92.62 kt CO<sub>2</sub>-e, 植被新增碳汇量约为 7.271 kt CO<sub>2</sub>-e,

总新增碳汇量约 99.891 kt CO<sub>2</sub>-e。保持红树林物种组成不变, 碳汇速率约为 1 317.59 t CO<sub>2</sub>-e·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 土壤新增碳汇量约为 61.932 kt CO<sub>2</sub>-e, 植被新增碳汇量约为 10.535 kt CO<sub>2</sub>-e, 总新增碳汇量约 72.467 kt CO<sub>2</sub>-e。

## 3 讨论

红树林位于海洋与陆地的交界处, 其碳储量情况易受多方面因素的影响。广东省红树林总碳储量约为 3 222.035 kt C, 其中土壤碳储量约为 1 094.465 kt C, 植被碳储量约为 2 127.57 kt C, 平均碳密度约为 24.925 kt C/km<sup>2</sup>, 略高于全国红树林碳密度的平均水平 19.694 kt C/km<sup>2</sup><sup>[39]</sup>, 但比低于低纬度的海南省东寨港红树林碳密度 41.256 kt C/km<sup>2</sup><sup>[31]</sup>。该结果说明红树林碳储量受纬度影响显著。纬度通过影响温度从而影响植被类型分布、植被生物量大小从而影响植被碳储量, 还将通过土壤微生物的活性而影响土壤碳储量<sup>[55]</sup>。广东省红树林中桐花林的碳储量最高, 其他依次为白骨壤、秋茄和无瓣海桑。不同树种对红树林碳储量的影响主要为 2 方面: (1) 植物自身生长量不同; (2) 不同树种对土壤影响明显不同, 继而导致碳储量不同。桐花林泌盐型红树植物, 通过调

表 11 广东省不同情境红树林碳汇量情况和碳储量增量

Tab. 11 Carbon sink and carbon reserve increment of mangroves in different scenarios in Guangdong Province

情景	碳汇速率/ (t CO <sub>2</sub> -e·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	土壤新增碳 汇量/(kt CO <sub>2</sub> -e)	植被新增碳 汇量/(kt CO <sub>2</sub> -e)	总新增碳 汇量/(kt CO <sub>2</sub> -e)
情景一 红树林面积达到最大潜力面积, 新增种植红树林以白骨壤为主, 碳汇速率最小。	657.66	30.745	5.426	36.171
情景二 红树林面积达到最大潜力面积, 新增种植红树林物种组成保持不变, 碳汇速率保持不变。	1 317.59	61.932	10.535	72.467
情景三 红树林面积达到最大潜力面积, 新增种植红树林以秋茄为主, 新增碳汇速率达到最大。	1 816.20	92.620	7.271	99.891

节自身细胞膜的通透性和分泌渗透调节物质等生理响应来适应含盐度较高的水体<sup>[56]</sup>, 相比于红树种类耐淹能力更强, 这种高耐盐性使其广泛分布在近岸海域中, 进而影响了红树林的碳储量情况。树种间的光合效率和生长特性的差异可直接引起红树群落固碳能力以及碳分配格局的变化。在自然光照条件下, 桐花树日净固碳量<白骨壤, 而桐花树群落的生物量>白骨壤群落<sup>[57]</sup>, 说明红树林树种固碳能力的衡量指标不仅要考虑叶片光合特性, 还要包括不同树种的生长形态和植株密度等因素。

红树林在应对全球气候变化中扮演着重要角色, 既可以是温室气体的储藏库和吸收源, 又可能成为温室气体的排放源。以广东省 2020 年红树林作为基准情景, 红树林总碳汇量约为 170.324 kt CO<sub>2</sub>-e, 其中土壤碳汇量约为 145.563 kt CO<sub>2</sub>-e, 占据总碳汇量的 85.46%, 植被碳汇量约为 24.761 kt CO<sub>2</sub>-e, 占据总碳汇量的 14.56%。该结果说明红树林生态系统中, 植物通过光合作用, 吸收大气中 CO<sub>2</sub>, 主要把碳固持在其自身系统垂直方向沉积物/土壤的碳埋藏。这些埋藏在土壤的碳在未分解成 DOC、POC、DIC 并封存到近岸海域沉积物前, 容易矿化为 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub>, 排放至大气。近年来, 由于人类活动的干扰, 例如滨海开发、排水、围垦、水产养殖、环境污染等, 红树林生态系统已经严重衰退和大规模丧失。相关研究表明, 滨海植被的退化和消失有可能扰动到 1m 深度的土壤碳, 使其矿化为 CO<sub>2</sub>, 释放到大气, 加剧温室效应<sup>[58]</sup>。

红树林蓝碳交易是当前一片有待开发的蓝海。广东省通过营造红树林面积, 可提高红树林碳汇量 36.171 kt CO<sub>2</sub>-e~99.891 kt CO<sub>2</sub>-e, 相当于 2020 年广东省碳排放配额总量 4.65 亿 t 的 0.07%~0.21%。根据张颖<sup>[59]</sup> 等的研究成果, 当前我国森林碳汇最优价格为 10.11 美元/t~15.17 美元/t。广东省营造红树林的红树林价值生态为 36.56 万美元~151.53 万美元。合理开发红树林碳汇市场对于促使企业减少温室气体的排放, 降低碳排放成本, 同时推动清洁技术和可持续发展具有重要意义。“双碳”目标下, 红树林等生态系统仍是吸碳固碳、推动碳达峰碳中和的重要载体。但当前, 我国红树林总面积依然偏小的问题仍较为突出, 制约着我国红树林生态功能和经济价值的发挥。因此, 未来可以通过完善红树林碳汇开

发交易流程机制, 通过市场化经济价值激励的方式推进红树林保护和修复工作。

## 4 结论

1) 广东红树林总碳储量约为 3 222.035 kt C, 其中土壤碳储量约为 2 127.57 kt C, 植被碳储量约为 1 094.465 kt C。其中, 桐花树的总碳储量最高约为 1 508.931 kt C, 其他依次为白骨壤、秋茄和无瓣海桑, 总碳储量分别约为 859.115 kt C、193.296 kt C 和 660.693 kt C。广东省红树林平均碳密度为 24.925 kt C/km<sup>2</sup>, 略高于全国红树林碳密度的平均水平, 但略低于海南省东寨港等低纬度区域红树林碳密度。

2) 在红树林碳汇量估算方面, 以广东省 2020 年红树林作为基准情景, 红树林总碳汇量约为 170.324 kt CO<sub>2</sub>-e, 土壤碳汇量约为 145.563 kt CO<sub>2</sub>-e, 占据总碳汇量的 85.46%, 植被碳汇量约为 24.761 kt CO<sub>2</sub>-e, 占据总碳汇量的 14.56%。广东省通过营造红树林面积, 可提高红树林碳汇量 36.171 kt CO<sub>2</sub>-e~99.891 kt CO<sub>2</sub>-e。营造红树林以白骨壤种植为主时候, 碳汇速率最小, 约为 657.66 t CO<sub>2</sub>-e·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。营造红树林以秋茄种植为主时候, 碳汇速率最大, 约为 1 816.20 t CO<sub>2</sub>-e·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

3) 在未来的一段时间内, 从测算数据来看, 广东省红树林具有一定的碳汇潜力; 综合红树林碳汇供给渠道、市场认可和政策扶持方面考虑, 广东省红树林蓝碳项目有较大的开发潜力。总的来说, 广东省红树林蓝碳市场正处于初步开发阶段, 具有较高的市场价值潜力, 通过不断完善红树林碳汇开发交易流程机制, 可更大程度地发挥广东省碳汇潜力。

## 参考文献:

- [1] 王珊珊, 徐明伟, 韩宇, 等. 杭州湾南岸滩涂湿地多年蓝碳分析及情景预测 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(9): 4380-4388. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2022.0160.  
WANG S S, XU M W, HAN Y, et al. Analysis and scenario prediction of multi-year blue carbon in intertidal wetland on the south bank of Hangzhou Bay [J]. *China environmental science*, 2022, 42(9): 4380-4388. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2022.0160.
- [2] 谈思泳. 华南红树林湿地表层土壤有机碳分布特征及其影响因素 [D]. 南宁: 广西师范学院, 2017.  
TAN S Y. The organic carbon distribution characteristics of



- surface soil in southern China's mangrove wetlands and their influence factors [D]. Nanning: Guangxi Teachers Education University, 2017.
- [3] DREXLER J Z. Blue carbon [M]//KENNISH M J. Encyclopedia of Estuaries. Dordrecht: Springer, 2016: 109. DOI: [10.1007/978-94-017-8801-4\\_371](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8801-4_371).
- [4] EID E M, SHALTOU K H. Distribution of soil organic carbon in the mangrove *Avicennia marina* (Forssk.) Vierh. along the Egyptian Red Sea Coast [J]. *Regional studies in marine science*, 2016, 3: 76-82. DOI: [10.1016/j.rsma.2015.05.006](https://doi.org/10.1016/j.rsma.2015.05.006).
- [5] DONATO D C, KAUFFMAN J B, MURDIYARSO D, et al. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics [J]. *Nature geoscience*, 2011, 4(5): 293-297. DOI: [10.1038/ngeo1123](https://doi.org/10.1038/ngeo1123).
- [6] EZCURRA P, EZCURRA E, GARCILLÁN P P, et al. Coastal landforms and accumulation of mangrove peat increase carbon sequestration and storage [J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2016, 113(16): 4404-4409. DOI: [10.1073/pnas.1519774113](https://doi.org/10.1073/pnas.1519774113).
- [7] BOUILLON S, BORGES A V, CASTAÑEDA-MOYA E, et al. Mangrove production and carbon sinks: a revision of global budget estimates [J]. *Global biogeochemical cycles*, 2008, 22(2): GB2013. DOI: [10.1029/2007GB003052](https://doi.org/10.1029/2007GB003052).
- [8] 张涛, 何芸, 尤淑撑, 等. 卫星遥感监测服务中国红树林生态系统保护与修复 [J]. *卫星应用*, 2023(11): 14-19. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9030.2023.11.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9030.2023.11.005).
- ZHANG T, HE Y, YOU S C, et al. Satellite remote sensing monitoring services for mangrove ecosystem conservation and restoration in China [J]. *Satellite application*, 2023(11): 14-19. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9030.2023.11.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9030.2023.11.005).
- [9] 陈小刚, 李凌, 杜金洲. 红树林和盐沼湿地间隙水交换过程及其碳汇潜力 [J]. *地球科学进展*, 2022, 37(9): 881-898. DOI: [10.11867/j.issn.1001-8166.2022.066](https://doi.org/10.11867/j.issn.1001-8166.2022.066).
- CHEN X G, LI L, DU J Z. Porewater exchange and the related carbon sink potential in mangroves and saltmarshes [J]. *Advances in earth science*, 2022, 37(9): 881-898. DOI: [10.11867/j.issn.1001-8166.2022.066](https://doi.org/10.11867/j.issn.1001-8166.2022.066).
- [10] ARTIGAS F, SHIN J Y, HOBBLE C, et al. Long term carbon storage potential and CO<sub>2</sub> sink strength of a restored salt marsh in new jersey [J]. *Agricultural and forest meteorology*, 2015, 200: 313-321. DOI: [10.1016/j.agrformet.2014.09.012](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.09.012).
- [11] 焦念志, 张传伦, 李超, 等. 海洋微生物碳泵储碳机制及气候效应 [J]. *中国科学:地球科学*, 2013, 43(1): 1-18. DOI: [10.1360/zd-2013-43-1-1](https://doi.org/10.1360/zd-2013-43-1-1).
- JIAO N Z, ZHANG C L, LI C, et al. Controlling mechanisms and climate effects of microbial carbon pump in the ocean [J]. *Scientia sinica terrae*, 2013, 43(1): 1-18. DOI: [10.1360/zd-2013-43-1-1](https://doi.org/10.1360/zd-2013-43-1-1).
- [12] DENNIS H, CRAIG C, DANIEL R, et al. Dissolved organic matter in the ocean: a controversy stimulates new insights [J]. *Oceanography*, 2009, 22(4): 202-211. DOI: [10.5670/oceanog](https://doi.org/10.5670/oceanog).
- 2009.109.
- [13] 吴乐知. 土壤有机碳储量的估算研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(25): 13780-13781, 13783. DOI: [10.3969/j.issn.0517-6611.2010.25.089](https://doi.org/10.3969/j.issn.0517-6611.2010.25.089).
- WU L Z. Research progress on the estimation of soil organic carbon storage [J]. *Journal of Anhui agricultural sciences*, 2010, 38(25): 13780-13781, 13783. DOI: [10.3969/j.issn.0517-6611.2010.25.089](https://doi.org/10.3969/j.issn.0517-6611.2010.25.089).
- [14] 唐春云, 罗丽. 森林生态系统碳储量及方法研究进展 [J]. *绿色科技*, 2016(4): 22-26. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9944.2016.04.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9944.2016.04.008).
- TANG C Y, LUO L. Research progress on carbon reserve of forest ecosystem and detecting method [J]. *Journal of green science and technology*, 2016(4): 22-26. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9944.2016.04.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9944.2016.04.008).
- [15] 孙清芳, 贾立明, 刘玉龙, 等. 中国森林植被与土壤碳储量估算研究进展 [J]. *环境化学*, 2016, 35(8): 1741-1744.
- SUN Q F, JIA L M, LIU Y L, et al. Research progress of forest vegetation and soil carbon storage in China [J]. *Environmental chemistry*, 2016, 35(8): 1741-1744.
- [16] 路秋玲, 王国兵, 杨平, 等. 森林生态系统不同碳库碳储量估算方法的评价 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(5): 155-160. DOI: [10.3969/j.issn.1000-2006.2012.05.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2006.2012.05.030).
- LU Q L, WANG G B, YANG P, et al. A review on the estimation methods of carbon pools of forest ecosystems [J]. *Journal of Nanjing Forestry University:natural sciences edition*, 2012, 36(5): 155-160. DOI: [10.3969/j.issn.1000-2006.2012.05.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2006.2012.05.030).
- [17] 吕浩, 彭春良, 吴惠俐, 等. 森林生态系统不同碳库碳储量估算方法综述 [J]. *湖南林业科技*, 2022, 49(6): 90-98. DOI: [10.3969/j.issn.1003-5710.2022.06.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-5710.2022.06.015).
- LÜ H, PENG C L, WU H L, et al. A review of methods to estimate carbon storage of forest ecosystems [J]. *Hunan forestry science & technology*, 2022, 49(6): 90-98. DOI: [10.3969/j.issn.1003-5710.2022.06.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-5710.2022.06.015).
- [18] 程鹏飞, 王金亮, 王雪梅, 等. 森林生态系统碳储量估算方法研究进展 [J]. *林业调查规划*, 2009, 34(6): 39-45. DOI: [10.3969/j.issn.1671-3168.2009.06.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-3168.2009.06.011).
- CHENG P F, WANG J L, WANG X M, et al. Research progress in estimating carbon storage of forest ecosystem [J]. *Forest inventory and planning*, 2009, 34(6): 39-45. DOI: [10.3969/j.issn.1671-3168.2009.06.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-3168.2009.06.011).
- [19] 黄灵玉. 广东红树林土壤有机碳分布特征及其影响因素研究 [D]. 南宁: 广西师范学院, 2015.
- HUANG L Y. Distribution characteristics and influential factors of soil organic carbon in mangrove wetlands in Guangdong Province [D]. Nanning: Guangxi Teachers Education University, 2015.
- [20] 赵玉灵. 广东省海岸线与红树林现状遥感调查与保护建议 [J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(增刊1): 114-120. DOI: [10.6046/gtzyyg.2017.s1.19](https://doi.org/10.6046/gtzyyg.2017.s1.19).

- ZHAO Y L. Remote sensing survey and proposal for protection of the shoreline and the mangrove wetland in Guangdong Province [J]. *Remote sensing for land and resources*, 2017, 29(Suppl.1): 114-120. DOI: [10.6046/gtzyyg.2017.s1.19](https://doi.org/10.6046/gtzyyg.2017.s1.19).
- [21] WASSON K, JEPPESEN R, ENDRIS C, et al. Eutrophication decreases salt marsh resilience through proliferation of algal mats [J]. *Biological conservation*, 2017, 212: 1-11. DOI: [10.1016/j.biocon.2017.05.019](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.05.019).
- [22] 刘叶取, 张立, 郭康丽, 等. 2015-2020 年广东省沿岸红树林矢量数据集 [J]. *中国科学数据 (中英文网络版)*, 2022, 7(1): 250-257. DOI: [10.11922/csdata.2020.0108.zh](https://doi.org/10.11922/csdata.2020.0108.zh).
- LIU Y Q, ZHANG L, GUO K L, et al. A dataset of mangrove vector along the coast of Guangdong Province during 2015-2020 [J]. *China scientific data*, 2022, 7(1): 250-257. DOI: [10.11922/csdata.2020.0108.zh](https://doi.org/10.11922/csdata.2020.0108.zh).
- [23] 杨加志, 胡喻华, 罗勇, 等. 广东省红树林分布现状与动态变化研究 [J]. *林业与环境科学*, 2018, 34(5): 24-27. DOI: [10.3969/j.issn.1006-4427.2018.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4427.2018.05.005).
- YANG J Z, HU Y H, LUO Y, et al. Study on the distribution and dynamic change of mangrove in Guangdong [J]. *Forestry and environmental science*, 2018, 34(5): 24-27. DOI: [10.3969/j.issn.1006-4427.2018.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4427.2018.05.005).
- [24] 陈忠. 广东省红树林生态系统净化功能及其价值评估 [D]. 广州: 华南师范大学, 2007.
- CHEN Z. Guangdong Province mangrove forest ecosystem purification function and its value appraisal [D]. Guangzhou: South China Normal University, 2007.
- [25] 何凯琪. 广东自然保护区空间分布特征与保护地群构建研究 [D]. 广州: 广州大学, 2022. DOI: [10.27040/d.cnki.ggzdu.2022.001189](https://doi.org/10.27040/d.cnki.ggzdu.2022.001189).
- HE K Q. Study on spatial distribution characteristics and construction of protected areas groups in Guangdong [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022. DOI: [10.27040/d.cnki.ggzdu.2022.001189](https://doi.org/10.27040/d.cnki.ggzdu.2022.001189).
- [26] 张莉, 郭志华, 李志勇. 红树林湿地碳储量及碳汇研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 1153-1159. DOI: [10.13287/j.1001-9332.2013.0272](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2013.0272).
- ZHANG L, GUO Z H, LI Z Y. Carbon storage and carbon sink of mangrove wetland: research progress [J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2013, 24(4): 1153-1159. DOI: [10.13287/j.1001-9332.2013.0272](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2013.0272).
- [27] 陈孟晨, 陈义, 姜刘志, 等. 红树林生态系统固碳功能和潜力研究进展 [J]. *山东林业科技*, 2018, 48(2): 127-131. DOI: [10.3969/j.issn.1002-2724.2018.02.034](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-2724.2018.02.034).
- CHEN M C, CHEN Y, JIANG L Z, et al. Review on carbon fixation and sequestration potential of mangroves ecosystems [J]. *Journal of Shandong forestry science and technology*, 2018, 48(2): 127-131. DOI: [10.3969/j.issn.1002-2724.2018.02.034](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-2724.2018.02.034).
- [28] 毛子龙, 杨小毛, 赵振业, 等. 深圳福田秋茄红树林生态系统碳循环的初步研究 [J]. *生态环境学报*, 2012, 21(7): 1189-1199. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2012.07.011](https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2012.07.011).
- MAO Z L, YANG X M, ZHAO Z Y, et al. Preliminary study on mangrove ecosystem carbon cycle of *Kandelia candel* in Futian nature reserve, Shenzhen, China [J]. *Ecology and environmental sciences*, 2012, 21(7): 1189-1199. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2012.07.011](https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2012.07.011).
- [29] 高天伦, 管伟, 毛静, 等. 广东省雷州附城主要红树林群落碳储量及其影响因子 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(6): 985-990. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.06.011](https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.06.011).
- GAO T L, GUAN W, MAO J, et al. Carbon storage and influence factors of major mangrove communities in Fucheng, Leizhou Peninsula, Guangdong Province [J]. *Ecology and environmental sciences*, 2017, 26(6): 985-990. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.06.011](https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.06.011).
- [30] WU M, HE Z, FUNG S, et al. Species choice in mangrove reforestation may influence the quantity and quality of long-term carbon sequestration and storage [J]. *The Science of the total environment*, 2020, 714(Apr.20): 136742.1-136742.9. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.136742](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136742).
- [31] 李翠华, 蔡榕硕, 颜秀花. 2010—2018 年海南东寨港红树林湿地碳收支的变化分析 [J]. *海洋通报*, 2020, 39(4): 488-497. DOI: [10.11840/j.issn.1001-6392.2020.04.012](https://doi.org/10.11840/j.issn.1001-6392.2020.04.012).
- LI C H, CAI R S, YAN X H. Analysis on the changes of carbon budget of mangrove wetland in Hainan Dongzhaigang during 2010-2018 [J]. *Marine science bulletin*, 2020, 39(4): 488-497. DOI: [10.11840/j.issn.1001-6392.2020.04.012](https://doi.org/10.11840/j.issn.1001-6392.2020.04.012).
- [32] 全川, 罗敏, 陈鹭真, 等. 滨海蓝碳湿地碳汇速率测定方法及中国的研究现状和挑战 [J]. *生态学报*, 2023, 43(17): 6937-6950. DOI: [10.20103/j.stxb.202208162357](https://doi.org/10.20103/j.stxb.202208162357).
- TONG C, LUO M, CHEN L Z, et al. Methods of carbon sink rate measurement of coastal blue carbon wetland ecosystems, current situation and challenges in China [J]. *Acta ecologica sinica*, 2023, 43(17): 6937-6950. DOI: [10.20103/j.stxb.202208162357](https://doi.org/10.20103/j.stxb.202208162357).
- [33] 广东省生态环境厅. 关于印发《广东省红树林碳普惠方法学(2023 年版)》的通知(粤环函〔2023〕119 号) [R]. 广州: 广东省生态环境厅, 2023.
- Guangdong Department of Ecology and Environment. Notice on the issuance of "Guangdong Province mangrove carbon inclusive methodology (2023 edition)" (Yuehuan Letter [2023] No. 119) [R]. Guangzhou: Guangdong Department of Ecology and Environment, 2023.
- [34] 自然资源部, 国家林业和草原局. 关于印发《红树林保护修复专项行动计划(2020—2025 年)》的通知(自然资发〔2020〕135 号) [R]. 北京: 自然资源部, 2020.
- National Forestry and Grassland Administration, Ministry of Natural Resources. Notice on issuing the special action plan for the protection and restoration of mangroves (2020-2025) (Natural resources development [2020] No. 135) [R]. Beijing: National Forestry and Grassland Administration, 2020.
- [35] 卢伟志, 林广旋, 王参谋, 等. 广东湛江次生与原生红树林群落

- 碳储量与掉落物动态研究 [J]. *海洋环境科学*, 2014, 33(6): 913-919. DOI: [10.13634/j.cnki.mes.2014.06.017](https://doi.org/10.13634/j.cnki.mes.2014.06.017).
- LU W Z, LIN G X, WANG C M, et al. Comparative studies on carbon storage and litterfall dynamics between secondary and primary mangrove communities in Zhanjiang, Guangdong Provinces, China [J]. *Marine environmental science*, 2014, 33(6): 913-919. DOI: [10.13634/j.cnki.mes.2014.06.017](https://doi.org/10.13634/j.cnki.mes.2014.06.017).
- [36] 胡懿凯, 徐耀文, 薛春泉, 等. 广东省无瓣海桑和林地土壤碳储量研究 [J]. *华南农业大学学报*, 2019, 40(6): 95-103. DOI: [10.7671/j.issn.1001-411X.201810008](https://doi.org/10.7671/j.issn.1001-411X.201810008).
- HU Y K, XU Y W, XUE C Q, et al. Studies on carbon storages of *Sonneratia apetala* forest vegetation and soil in Guangdong Province [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2019, 40(6): 95-103. DOI: [10.7671/j.issn.1001-411X.201810008](https://doi.org/10.7671/j.issn.1001-411X.201810008).
- [37] 黄妃本, 陈纯秀, 罗勇. 碳汇监测与计量技术在广东红树林生态系统的应用研究 [J]. *广东林业科技*, 2015, 31(4): 101-105. DOI: [10.3969/j.issn.1006-4427.2015.04.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4427.2015.04.019).
- HUANG F B, CHEN C X, LUO Y. Study on monitoring and calculation of mangrove ecosystem carbon sinks in Guangdong [J]. *Guangdong forestry science and technology*, 2015, 31(4): 101-105. DOI: [10.3969/j.issn.1006-4427.2015.04.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4427.2015.04.019).
- [38] 彭聪姣, 钱家炜, 郭旭东, 等. 深圳福田红树林植被碳储量和净初级生产力 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2059-2065. DOI: [10.13287/j.1001-9332.201607.029](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201607.029).
- PENG C J, QIAN J W, GUO X D, et al. Vegetation carbon stocks and net primary productivity of the mangrove forests in Shenzhen, China [J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2016, 27(7): 2059-2065. DOI: [10.13287/j.1001-9332.201607.029](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201607.029).
- [39] 江小芳. 中国红树林植被和土壤碳储量及其影响因子 [D]. 厦门: 厦门大学, 2020. DOI: [10.27424/d.cnki.gxmd.2020.004262](https://doi.org/10.27424/d.cnki.gxmd.2020.004262).
- JIANG X F. The biomass and soil carbon stocks and their influencing factors of mangrove forests in China [D]. Xiamen: Xiamen University, 2020. DOI: [10.27424/d.cnki.gxmd.2020.004262](https://doi.org/10.27424/d.cnki.gxmd.2020.004262).
- [40] 笕启杰, 王勇军, 廖宝文, 等. 无瓣海桑、海桑人工林的生物量及生产力研究 [J]. *武汉植物学研究*, 2001, 19(5): 391-396. DOI: [10.3969/j.issn.2095-0837.2001.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-0837.2001.05.007).
- JIU Q J, WANG Y J, LIAO B W, et al. Biomass and net productivity of *Sonneratia apetala*, *S. caseolaris* mangrove man-made forest [J]. *Plant science journal*, 2001, 19(5): 391-396. DOI: [10.3969/j.issn.2095-0837.2001.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-0837.2001.05.007).
- [41] 许方宏, 张进平, 张倩媚, 等. 广东湛江高桥三个天然红树林的土壤碳库 [J]. *价值工程*, 2012, 31(15): 5-6. DOI: [10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2012.15.101](https://doi.org/10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2012.15.101).
- XU F H, ZHANG J P, ZHANG Q M, et al. Carbon storage of three natural mangrove forests in Gaoqiao, Zhanjiang [J]. *Value engineering*, 2012, 31(15): 5-6. DOI: [10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2012.15.101](https://doi.org/10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2012.15.101).
- [42] 华国栋, 庄礼凤, 李家祥, 等. 广东台山镇海湾红树林国家湿地公园土壤有机碳含量及其影响因素分析 [J]. *林业与环境科学*, 2021, 37(6): 118-123. DOI: [10.3969/j.issn.1006-4427.2021.06.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4427.2021.06.017).
- HUA G D, ZHUANG L F, LI J X, et al. Contents of soil organic carbon of mangrove in Haiwan Mangrove National Wetland Park, Taishan Town, Guangdong and their influencing factors [J]. *Forestry and environmental science*, 2021, 37(6): 118-123. DOI: [10.3969/j.issn.1006-4427.2021.06.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4427.2021.06.017).
- [43] HE Z Y, PENG Y S, GUAN D S, et al. Appearance can be deceptive: shrubby native mangrove species contributes more to soil carbon sequestration than fast-growing exotic species [J]. *Plant and soil*, 2018, 432(1): 425-436. DOI: [10.1007/s11104-018-3821-4](https://doi.org/10.1007/s11104-018-3821-4).
- [44] LUNSTRUM A, CHEN L Z. Soil carbon stocks and accumulation in young mangrove forests [J]. *Soil biology and biochemistry*, 2014, 75: 223-232. DOI: [10.1016/j.soilbio.2014.04.008](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.04.008).
- [45] WANG G, GUAN D S, XIAO L, et al. Ecosystem carbon storage affected by intertidal locations and climatic factors in three estuarine mangrove forests of South China [J]. *Regional environmental change*, 2019, 19(6): 1701-1712. DOI: [10.1007/s10113-019-01515-6](https://doi.org/10.1007/s10113-019-01515-6).
- [46] GAO Y, ZHOU J, WANG L M, et al. Distribution patterns and controlling factors for the soil organic carbon in four mangrove forests of China [J]. *Global ecology and conservation*, 2019, 17: e00575. DOI: [10.1016/j.gecco.2019.e00575](https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00575).
- [47] YU C X, FENG J X, LIU K, et al. Changes of ecosystem carbon stock following the plantation of exotic mangrove *Sonneratia apetala* in Qi'ao Island, China [J]. *Science of the total environment*, 2020, 717: 137142. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.137142](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137142).
- [48] 徐耀文, 姜仲茂, 武锋, 等. 翠亨湿地无瓣海桑人工林土壤有机碳分布特征及与土壤理化指标相关性 [J]. *林业科学研究*, 2020, 33(1): 62-68. DOI: [10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.01.008](https://doi.org/10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.01.008).
- XU Y W, JIANG Z M, WU F, et al. Soil organic carbon distribution and its correlation with soil physical and chemical indexes of *Sonneratia apetala* plantation at Cuiheng Wetland [J]. *Forest research*, 2020, 33(1): 62-68. DOI: [10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.01.008](https://doi.org/10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.01.008).
- [49] 覃国铭, 张靖凡, 周金戈, 等. 广东省红树林土壤碳储量及固碳潜力研究 [J]. *热带地理*, 2023, 43(1): 23-30. DOI: [10.13284/j.cnki.rddl.003606](https://doi.org/10.13284/j.cnki.rddl.003606).
- QIN G M, ZHANG J F, ZHOU J G, et al. Soil carbon stock and potential carbon storage in the mangrove forests of Guangdong [J]. *Tropical geography*, 2023, 43(1): 23-30. DOI: [10.13284/j.cnki.rddl.003606](https://doi.org/10.13284/j.cnki.rddl.003606).
- [50] WANG G, GUAN D S, PEART M R, et al. Ecosystem carbon stocks of mangrove forest in Yingluo Bay, Guangdong Province of South China [J]. *Forest ecology and management*, 2013, 310: 539-546. DOI: [10.1016/j.foreco.2013.08.045](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.08.045).
- [51] WU Q H, LEUNG J Y S, TAM N F Y, et al. Biological risk and

- pollution history of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Nansha mangrove, South China [J]. *Marine pollution bulletin*, 2014, 85(1): 92-98. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2014.06.014](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.014).
- [52] FU C C, LI Y, ZENG L, et al. Stocks and losses of soil organic carbon from chinese vegetated coastal habitats [J]. *Global change biology*, 2021, 27(1): 202-214. DOI: [10.1111/gcb.15348](https://doi.org/10.1111/gcb.15348).
- [53] 朱耀军, 赵峰, 郭菊兰, 等. 湛江高桥红树林湿地有机碳分布及埋藏特征 [J]. *生态学报*, 2016, 36(23): 7841-7849. DOI: [10.5846/stxb201511102276](https://doi.org/10.5846/stxb201511102276).  
ZHU Y J, ZHAO F, GUO J L, et al. Below-ground organic carbon distribution and burial characteristics of the Gaoqiao mangrove area in Zhanjiang, Guangdong, Southern China [J]. *Acta ecologica sinica*, 2016, 36(23): 7841-7849. DOI: [10.5846/stxb201511102276](https://doi.org/10.5846/stxb201511102276).
- [54] FENG J X, CUI X W, ZHOU J, et al. Effects of exotic and native mangrove forests plantation on soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus contents and pools in Leizhou, China [J]. *Catena*, 2019, 180: 1-7. DOI: [10.1016/j.catena.2019.04.018](https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.018).
- [55] 毛子龙, 赖梅东, 赵振业, 等. 薇甘菊入侵对深圳湾红树林生态系统碳储量的影响 [J]. *生态环境学报*, 2011, 20(12): 1813-1818. DOI: [10.3969/j.issn.1674-5906.2011.12.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-5906.2011.12.006).  
MAO Z L, LAI M D, ZHAO Z Y, et al. Effect of invasion plants (*Mikania micrantha* H. B. K.) on carbon stock of mangrove ecosystem in Shenzhen Bay [J]. *Ecology and environmental sciences*, 2011, 20(12): 1813-1818. DOI: [10.3969/j.issn.1674-5906.2011.12.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-5906.2011.12.006).
- [56] 冯立辉, 徐扬帆, 陈文峰, 等. 盐胁迫对桐花树生长及生理的响应 [J]. *湖北农业科学*, 2022, 61(22): 34-36, 61. DOI: [10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2022.22.006](https://doi.org/10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2022.22.006).  
FENG L H, XU Y F, CHEN W F, et al. Growth and physiological response of *Aegiceras corniculata* to salinity stress [J]. *Hubei agricultural sciences*, 2022, 61(22): 34-36, 61. DOI: [10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2022.22.006](https://doi.org/10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2022.22.006).
- [57] 胡懿凯. 淇澳岛不同恢复类型红树林碳密度和固碳速率比较研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- HU Y K. Comparative studies on carbon density and carbon fixation of mangroves of different recovery types on Qi'ao Island [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2019.
- [58] ATWOOD T B, CONNOLLY R M, ALMAHASHEER H, et al. Global patterns in mangrove soil carbon stocks and losses [J]. *Nature climate change*, 2017, 7(7): 523-528. DOI: [10.1038/NCLIMATE3326](https://doi.org/10.1038/NCLIMATE3326).
- [59] 张颖, 张子璇. 中国森林碳汇生产总值核算及分析 [J]. *中国国土资源经济*, 2023, 36(8): 28-34, 41. DOI: [10.19676/j.cnki.1672-6995.000928](https://doi.org/10.19676/j.cnki.1672-6995.000928).  
ZHANG Y, ZHANG Z X. Accounting and analysis of gross forest carbon sink production in China [J]. *Natural resource economics of China*, 2023, 36(8): 28-34, 41. DOI: [10.19676/j.cnki.1672-6995.000928](https://doi.org/10.19676/j.cnki.1672-6995.000928).

---

 作者简介:


苏思琪

苏思琪(第一作者)

1993-, 女, 壮族, 工程师, 环境影响评价与管理硕士, 主要从事环境规划与管理、海洋环境保护、蓝碳研究的工作(e-mail) [susiqi@scies.org](mailto:susiqi@scies.org)。



余云军

余云军(通信作者)

1980-, 男, 高级工程师, 环境规划与管理博士, 主要从事海洋生态环境保护的工作(e-mail) [yuyunjun@scies.org](mailto:yuyunjun@scies.org)。

(编辑 赵琪)