

# 树种选择和滩地高程对红树林修复早期 系统碳储量的影响\*

彭逸生<sup>1</sup>, 庄雪茵<sup>1</sup>, 赵丽丽<sup>1</sup>, 王梓豪<sup>1</sup>, 高均超<sup>2</sup>, 王炳新<sup>3</sup>, 何姿莹<sup>1,4</sup>

1. 中山大学环境科学与工程学院 / 广东省环境污染控制与修复技术重点实验室 / 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 广州 510006
2. 江门市地质与海洋防災监测站, 广东 江门 529000
3. 广东省台山市林业局, 广东 江门 529000
4. 中山大学海洋科学学院, 广东 珠海 519082

**摘要:** 发展红树林生态系统的高效碳汇能力是我国实现碳中和的有效方法之一, 而红树林的固碳效率受多方面因素的影响。本研究探究了树种及滩地高程条件对红树林生态修复工程早期的固碳效果的影响, 为基于碳汇功能的红树林生态修复工程选址、选种提供参考。选取广东省汕头市牛田洋红树林生态修复工程中 3 个种植块为研究对象, 分别为高潮位区桐花树 (HAc, high-intertidal *Aegiceras corniculatum*)、低潮位区无瓣海桑 (LSa, low-intertidal *Sonneratia apetala*) 和高潮位区无瓣海桑 (HSa, high-intertidal *S. apetala*)。在造林 2, 3 a 后, 分别测定及估算植物生长指标、生物量、碳储量以及表层土壤 (0~60 cm) 的理化性质指标及碳储量等参数, 分析树种与滩地高程对红树林群落储碳功能的影响。结果表明, 红树林定植发育过程带来了土壤的酸化、盐化及养分 (TOC、TN、TP) 积累, 同时碳的外源供给比例随着造林时间增加而增加。造林 3 a 后, 在相同潮位条件下, 相比外来树种无瓣海桑 [植物碳密度 ( $16.00 \pm 3.76$ )  $t \cdot hm^{-2}$ ; 系统碳密度 ( $48.54 \pm 2.38$ )  $t \cdot hm^{-2}$ ], 乡土树种桐花树凭借较高的植株密度获得了更高的单位面积碳储量 [植物碳密度 ( $36.16 \pm 2.35$ )  $t \cdot hm^{-2}$ ; 系统碳密度 ( $70.14 \pm 3.15$ )  $t \cdot hm^{-2}$ ]。而淹水胁迫促进了无瓣海桑幼苗生物量及碳储量的积累, 长时间的潮汐冲刷则降低了土壤有机碳的数量和稳定性。因此, 低潮位无瓣海桑群落的碳密度 [植物碳密度 ( $34.59 \pm 8.85$ )  $t \cdot hm^{-2}$ ; 系统碳密度 ( $61.03 \pm 2.57$ )  $t \cdot hm^{-2}$ ] 显著高于高潮位, 但土壤总有机碳含量及颗粒态碳含量较低。

**关键词:** 生态修复; 碳储量; 红树林; 树种选择; 滩地高程

中图分类号: S171.4 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(2023)02-0037-10

## Influence of species choice and tidal flat elevation on the carbon sequestration of early mangrove restoration

PENG Yisheng<sup>1</sup>, ZHUANG Xueyin<sup>1</sup>, ZHAO Lili<sup>1</sup>, WANG Zihao<sup>1</sup>, GAO Junchao<sup>2</sup>, WANG Bingxin<sup>3</sup>, HE Ziyi<sup>1,4</sup>

1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University / Guangdong Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Remediation Technology / Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Guangzhou 510006, China

\* 收稿日期: 2022-12-31

录用日期: 2023-02-07

网络首发日期: 2023-03-02

基金项目: 广东省自然资源厅海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目(GDNRC[2022]50); 广东省林业局林业科技创新项目(2021KJCX012, 2022KJCX019); 台山市红树林保护与修复建设项目(XKJHT20222145); 国家自然科学基金(42106159, 41771095)

作者简介: 彭逸生(1979年生), 男; 研究方向: 红树林生态功能及其修复、外来红树植物监测和控制;

E-mail: pyish@mail.sysu.edu.cn;

庄雪茵(1999年生), 女; 研究方向: 红树林恢复及碳汇功能; E-mail: zhuangxy7@mail2.sysu.edu.cn

(彭逸生、庄雪茵并列第一作者)

通信作者: 何姿莹(1988年生), 女; 研究方向: 红树林根系生物学及地下水碳循环动态;

E-mail: heziying3@mail.sysu.edu.cn

2. Jiangmen Geological and Marine Disaster Prevention Monitoring Station, Jiangmen 529000, China

3. Taishan Forestry Bureau of Guangdong, Jiangmen 529000, China

4. School of Marine Science, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

**Abstract:** Developing the efficient carbon sequestration capability of the mangrove ecosystem is one of the fundamental methods for realizing carbon neutralization in China. However, the efficiency of mangrove carbon sequestration is determined by various factors. This study investigated the effects of species choice and tidal flat elevation on carbon sequestration in the early stage of the mangrove ecological restoration program. It provided a certain reference for the site selection and species choice of mangrove ecological restoration based on carbon sink function. In this study, three mangrove plantations including high-intertidal *Aegiceras corniculatum* (HAc), low-intertidal *Sonneratia apetala* (LSa) and high-intertidal *S. apetala* (HSa) were selected from the ecological restoration program in Niutianyang, Shantou City, Guangdong Province. The plant growth, biomass, carbon storage as well as surface soils (0–60 cm) physical-chemical features were measured and estimated in the second and third years after afforestation to analyze the effects of species choice and tidal flat elevation on mangrove carbon storage. The results showed that the colonization of mangroves led to acidification and salinization as well as nutrient accumulation in soil, while the proportion of exogenous organic carbon supply increased with the extension of afforestation time. After 3 years of afforestation, the native species plantation HAc obtained higher carbon storage per unit area [plant carbon density ( $36.16 \pm 2.35$ )  $t \cdot hm^{-2}$ ; system carbon density ( $70.14 \pm 3.15$ )  $t \cdot hm^{-2}$ ] by virtue of higher plant density, compared to the exotic species plantation HSa [plant carbon density ( $16.00 \pm 3.76$ )  $t \cdot hm^{-2}$ ; system carbon density ( $48.54 \pm 2.38$ )  $t \cdot hm^{-2}$ ]. While inundation stress promoted the accumulation of biomass and carbon stock in *S. apetala* seedlings, prolonged tidal flushing reduced the quantity and stability of soil organic carbon. Therefore, the carbon density of LSa plantation [plant carbon density ( $34.59 \pm 8.85$ )  $t \cdot hm^{-2}$ ; system carbon density ( $61.03 \pm 2.57$ )  $t \cdot hm^{-2}$ ] was significantly higher than the HSa plantation, but the soil TOC and POC content were lower in deep tidal flat elevation zone.

**Key words:** ecological restoration; carbon sequestration; mangrove; species choice; tidal flat elevation

应对气候变化的主要途径包括限制碳排放和增加生态系统碳汇(Duarte et al., 2013; Edenhofer et al., 2014)。红树林分布于热带和亚热带潮间带、河口和海岸(Polidoro et al., 2010), 具有极高的初级生产力和较短的碳循环周期(Atwood et al., 2017), 是滨海蓝碳的重要组成部分, 其单位面积有机碳含量是其他陆地森林生态系统的 4 倍(Donato et al., 2011)。截至 2014 年, 我国红树林碳储量为( $355.25 \pm 82.19$ )  $Mg \cdot hm^{-2}$ , 储存在表层 1 m 土壤的碳为植被生物量中的 4.84 倍左右(Liu et al., 2014)。因此, 红树林修复被认为是增加碳汇、抵御自然灾害“基于自然的解决方案”的重要内容(Cohen-Shacham et al., 2019)。自 21 世纪以来, 我国沿海地区红树林修复工程陆续开展, 红树林面积稳步上升(Wang et al., 2021; 王文卿等, 2021<sup>6-11</sup>)。

红树林的固碳效果受树种组成、气温、降雨、

滩地高程、水土盐度等多种因素的影响(Breithaupt et al., 2012; Sanders et al., 2016; Rahman et al., 2021)。不同树种光合效率的差异使红树植物群落固碳能力存在较大幅度的变化(Alongi, 2012)。我国现有 26 种天然分布以及 2 种大规模引种的外来红树植物(王文卿等, 2021)<sup>6-11</sup>, 不同树种的生长特性和碳分配格局差异较大(Zhang et al., 2021)。树种的选择和搭配将直接影响红树林修复工程的固碳功能(Wu et al., 2020)。环境因子方面, 立地的土壤容重、水文状况和滩地高程也是影响红树林碳汇能力的重要因素。其中, 滩地高程导致林地淹没时间的差异可能影响红树林在潮滩上的天然分布状况及结构(张乔民等, 1997), 并影响幼苗的存活率和生长速率(Jiang et al., 2019), 滩地高程的设定决定了红树林生态修复的成功率和碳汇能力(Lewis, 2005)。

在目前我国大规模实施《红树林保护修复专项

行动计划(2020—2025年)》的背景下, 探讨树种选择和滩地高程对红树林种植工程碳汇功能的影响, 可以为红树林生态修复提供科学参考。本研究以广东韩江三角洲牛田洋区域的红树林生态修复工程为对象, 研究树种和滩地高程因素对修复早期红树林群落的生长及碳积累功能的影响。研究结果能够为我国红树林生态修复工程的树种选取和选址提供技术支持, 提升人工红树林的碳汇生态功能。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域

研究区域位于广东省汕头市金平区西南部(116.56°~116.66° E, 23.47°~23.34° N), 属亚热带海洋性气候, 年降雨量 1 300~1 800 mm, 年平均气温 18~22 °C。区域内河流水位和流量变化较大, 潮汐为半日混合潮, 受季风影响较大, 每年的最

高潮位在 9~11 月份, 最低潮位在 6~7 月份(陈妙纯, 2007)。

### 1.2 样地选取

在汕头市牛田洋大堤沿岸滩涂红树林修复工程选取样点。该区域红树林于 2019 年 1 月完成种植, 呈带状分布, 长 10.7 km, 总面积约 24 hm<sup>2</sup>, 分为 56 个树种组成、高程、水文条件有差别的种植板块。本研究根据树种组成和滩地高程特征选择编号为 5、28、56 的种植板块为研究对象设置样地(表 1, 图 1)。本研究在牛田洋红树林生态修复工程树苗栽种完成 2 a 后进行, 在户外进行两次采样, 收集植物与土壤样本。每次采样间隔 1 a, 分别于 2021 年 1 月、2022 年 1 月对取样板块进行调查并对比上述 3 个取样点的植物生长、植物碳密度差异、土壤碳密度及相关指标, 研究树种和滩地高程对生态系统碳密度产生的影响。

表 1 牛田洋红树林取样点基本信息<sup>1)</sup>

Table 1 The general features of sampling sites in mangrove of Niutianyang

样地序号及编号	所属滩地高程区域	种植树种	幼苗规格/cm	滩地高程/m
5, HAc	高潮位区	桐花树( <i>Aegiceras corniculatum</i> )	$H_{平均}=70, D_{平均}=3.0$	1.48
28, LSa	低潮位区	无瓣海桑( <i>Sonneratia apetala</i> )	$H_{平均}=150, D_{平均}=2.5$	1.05
56, HSa	高潮位区	无瓣海桑( <i>Sonneratia apetala</i> )	$H_{平均}=150, D_{平均}=2.5$	1.69

1)  $H_{平均}$ 是指种植幼苗平均高度,  $D_{平均}$ 是指种植幼苗平均地径, 滩地高程以潮位仪测量数据参考汕头港潮汐表测算所得。

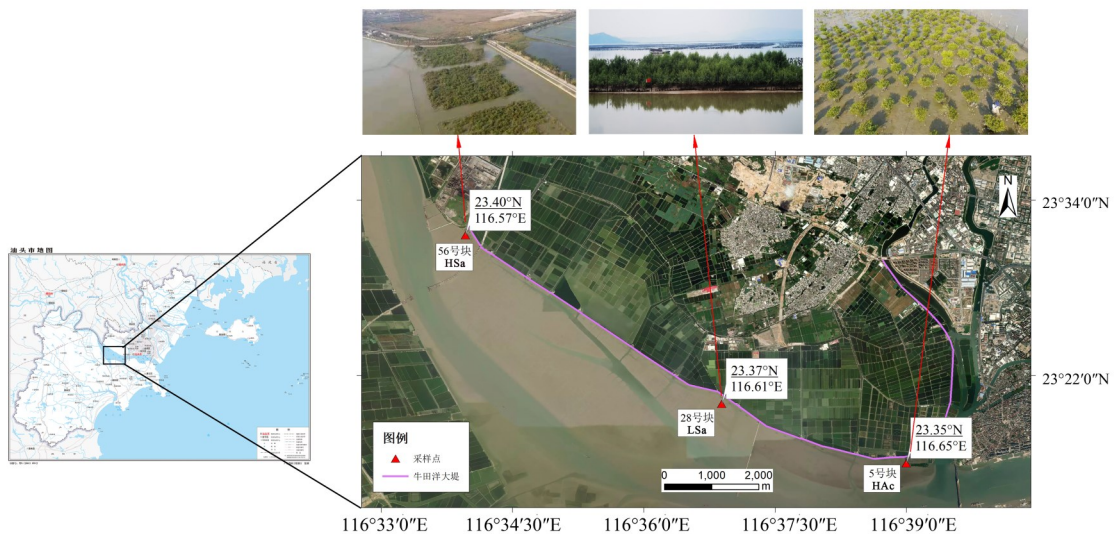


图 1 广东省汕头市牛田洋红树林样地分布示意图

Fig. 1 Distribution map of sampling sites in mangrove of Niutianyang, Shantou, Guangdong Province

### 1.3 外业调查与实验室分析

牛田洋红树林群落属于种植后 3 a 内的养护期, 本研究仅计算植被和土壤碳储量。在每个样地内

设置 3 个 10 m×10 m 的固定样方, 记录每个样方内苗木的种类、数量、株高和胸径。利用气候条件相近区域红树林研究获得的异速生长模型方程估

算红树植物全植株的地上及地下生物量(表2),并最终汇总计算得到群落单位面积生物量。将固定样地中植株抽样收集的叶、枝、干、根样品带回实验室,经干燥、粉碎、筛选后,使用元素分析仪(Vario EL, Elementar, 德国)测定碳含量,代入植物生物量与植株密度计算植物群落碳密度。

本研究的样地为新造林地,植物根系影响深

度未达到 100 cm,因此以 60 cm 作为最大取样深度。在每个固定样方内随机选 3 个点,按深度依次取 0~20、20~40 和 40~60 cm 的土壤,装入自封袋带回实验室。每袋土壤分为两部分,一部分自然风干后测定各理化性质,另一部分测定土壤容重(表3)。

表2 红树植物生物量估算采用的异速生长方程<sup>1)</sup>

Table 2 The allometric growth equation for evaluation of biomass of mangrove studied in this research

树种	地上生物量模型	地下生物量模型	参考文献
桐花树( <i>Aegiceras corniculatum</i> )	$\lg B_{AC} = 1.496 + 0.465 \lg(D_{AC}^2 H)$	$\lg B_{BC} = 0.967 + 0.303 \lg(D_{AC}^2 H)$	Tam et al., 1995
无瓣海桑( <i>Sonneratia apetala</i> )	$B_{AC} = 0.280(D_{SA}^2 H)^{0.693}$	$B_{BC} = 0.038(D_{SA}^2 H)^{0.759}$	Ren et al., 2010

1)  $B_{AC}$ : 地上生物量(kg);  $B_{BC}$ : 地下生物量(kg);  $D_{SA}$ : 无瓣海桑胸径(cm);  $D_{AC}$ : 桐花树胸径(cm);  $H$ : 树高(m)。

表3 牛田洋红树林土壤测试参数及其方法

Table 3 The soil test parameters and methods in mangrove of Niutianyang

参数	分析方法	参考文献
盐度	电导法	中华人民共和国农业部,2006
pH值	电位法	中国林业科学研究院林业研究所,1999a
容重	环刀法	江胜国,2019
总有机碳(TOC)	重铬酸钾氧化-外加热法	中国林业科学研究院林业研究所,1999b
总氮(TN)	凯氏法	国家林业局,2016a
总磷(TP)	碱熔-钼锑抗分光光度法	国家林业局,2016b
易氧化有机碳(ROOC)	高锰酸钾氧化法	胡慧蓉等,2010
颗粒态有机碳(POC)	六偏磷酸钠分离法	Fazle Rabbi et al., 2014
土壤碳储量	以土壤容重、总有机碳含量、按深度计算	高天伦等, 2017

#### 1.4 数据处理

数据处理和图表绘制采用 SPSS (v 23.0)、Origin (v2018 Pro) 和 R (4.2.1) 进行。对不满足正态分布的数据进行对数转换,采用单因素方差分析,检验 3 个取样点之间红树植物幼苗的生长形态、土壤理化性质、植物和土壤碳储量等参数的差异性,事后多重比较采用 S-N-K 法,显著度统一设定为  $P=0.05$ 。对红树植物的形态参数、土壤理化性质、碳储量数据进行相关性分析。

## 2 结果

### 2.1 土壤理化性质

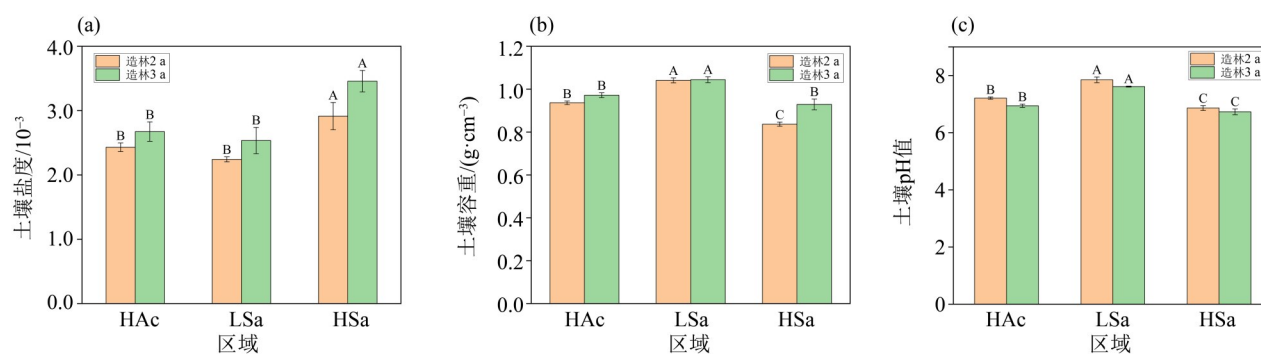
在牛田洋红树林修复 2,3 a 后,各样地土壤盐度以 HSa 最高,HAac 与 LSa 之间差异不显著(图 2a)。土壤容重以潮位较低的 LSa 最高,HAac 与

HSa 的差异随时间增加而缩小(图 2b)。各采样点土壤 pH 值之间差异显著,呈 LSa>HAac>HSa 的规律(图 2c)。总体上,3 个造林地的土壤盐度及容重均随着时间增加而升高,而 pH 值则相反,红树林恢复早期土壤已出现压实、盐化和酸化的特征。

土壤 TOC、TN 和 TP 含量方面,在造林 2 a 后,HAac 与 HSa 的 TOC 含量差异不显著,但均显著高于 LSa; 而 TN 含量和 TP 含量均按 HSa>HAac>LSa 次序排列。造林 3 a 后,3 个参数均表现为 HAac=HSa>LSa(图 3a~c)。总体上,各样地土壤 CNP 含量均随着造林时间的增加而上升。HAac 及 LSa 的土壤 C/N 在造林 2, 3 a 后均显著高于 HSa。随着造林时间推移,各样地的土壤 C/N 降低,且 HAac 与 LSa 之间出现了差异(图 3d)。土壤 ROOC 和 POC 含量可以评估土壤碳的质量和稳定性。3 个样地的

ROOC 含量仅在造林 2 a 后存在显著差异, 其中 HAC 与 LSa 无显著差异, 但均显著高于 HSa(图 3e)。

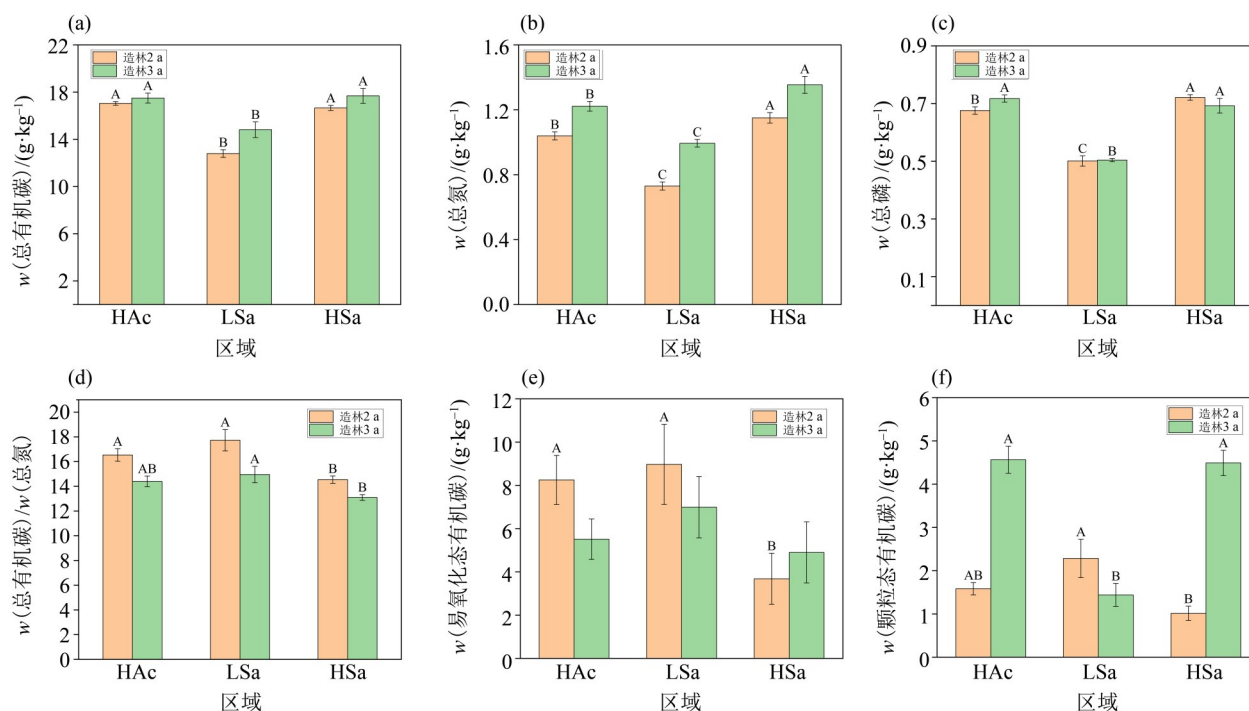
而土壤 POC 含量在造林 2 a 后的排序为 LSa>HAc>HSa; 造林 3 a 后则为 HAC=HSa>LSa(图 3f)。



不同大写字母表示同一时期不同样地差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图2 牛田洋红树林造林2,3 a后各样地的土壤盐度(a)、容重(b)和pH值(c)

Fig. 2 Soil salinity (a), bulk density (b) and pH value (c) of sampling sites after 2 and 3 years of mangrove afforestation in Niutianyang



不同大写字母表示同一时期不同样地差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图3 牛田洋红树林造林2,3 a后各样地的土壤总有机碳含量(a)、总氮含量(b)、总磷含量(c)、碳氮比(d)、易氧化态有机碳含量(e)和颗粒态有机碳含量(f)

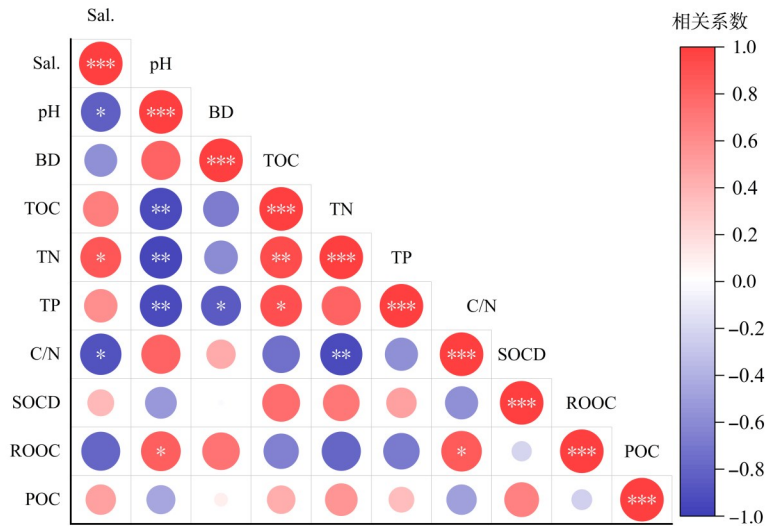
Fig. 3 Soil TOC content (a), TN content (b), TP content (c), C/N ratio (d), ROOC content (e) and POC content (f) of sampling sites after 2 and 3 years of mangrove afforestation in Niutianyang

牛田洋红树林土壤的 TOC、TN、TP 含量相互呈显著正相关。土壤盐度与 pH 值和 C/N 显著负相关, 而与 TN 含量呈显著正相关。pH 值则与土壤 TOC、TN、TP 含量显著负相关, 但与 ROOC 则为显著正相关(图 4)。总体上, 随时间推移, 红树林定植发育使土壤发生盐分积累、酸化的同时, 也带来了 CNP 的积累, 并伴随 ROOC 含量下降, 碳

库趋于稳定。

## 2.2 植物形态参数及生物量分配格局

3 个样地的植株密度以 HAC 最高, 其后依次为 LSa 和 HSa; HSa 及 LSa 的平均株高与平均胸径均显著高于 HAC(表 4)。总体上, 种植桐花树的样地密度更高但植株更低矮和细小; 而种植无瓣海桑样地则更稀疏、高大和粗壮。



\*、\*\*和\*\*\*分别表示在 $P=0.05$ 、 $0.01$ 和 $0.001$ 水平上显著相关; Sal.: 土壤盐度; pH: 土壤pH值; BD: 土壤容重; TOC: 土壤总有机碳含量; TN: 土壤总氮含量; TP: 土壤总磷含量; C/N: 土壤碳氮比; SOCD: 土壤有机碳密度; ROOC: 土壤易氧化碳含量; POC为土壤颗粒态碳含量。

图4 牛田洋红树林土壤理化指标的皮尔逊相关性

Fig. 4 Pearson's correlation diagram of physical and chemical properties of soil in mangrove of Niutianyang ( $n=18$ )

表4 牛田洋红树林样地植物群落的林分结构特征<sup>1)</sup>(均值±标准误,  $n=93$ )

Table 4 Stand structure of sampling sites in mangrove of Niutianyang (mean±SE,  $n=93$ )

造林时间/a	样地	植株密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	株高/m	胸径/cm
2	HAc	4 666.67	0.88±0.022 <sup>b</sup>	0.23±0.028 <sup>c</sup>
	LSa	2 933.33	2.87±0.349 <sup>a</sup>	12.40±1.848 <sup>b</sup>
	HSa	1 133.33	2.48±0.150 <sup>a</sup>	18.26±2.116 <sup>a</sup>
3	HAc	3 600	1.22±0.034 <sup>b</sup>	0.50±0.040 <sup>b</sup>
	LSa	1 900	3.04±0.212 <sup>a</sup>	14.30±2.429 <sup>a</sup>
	HSa	1 000	3.38±0.199 <sup>a</sup>	13.17±2.048 <sup>a</sup>

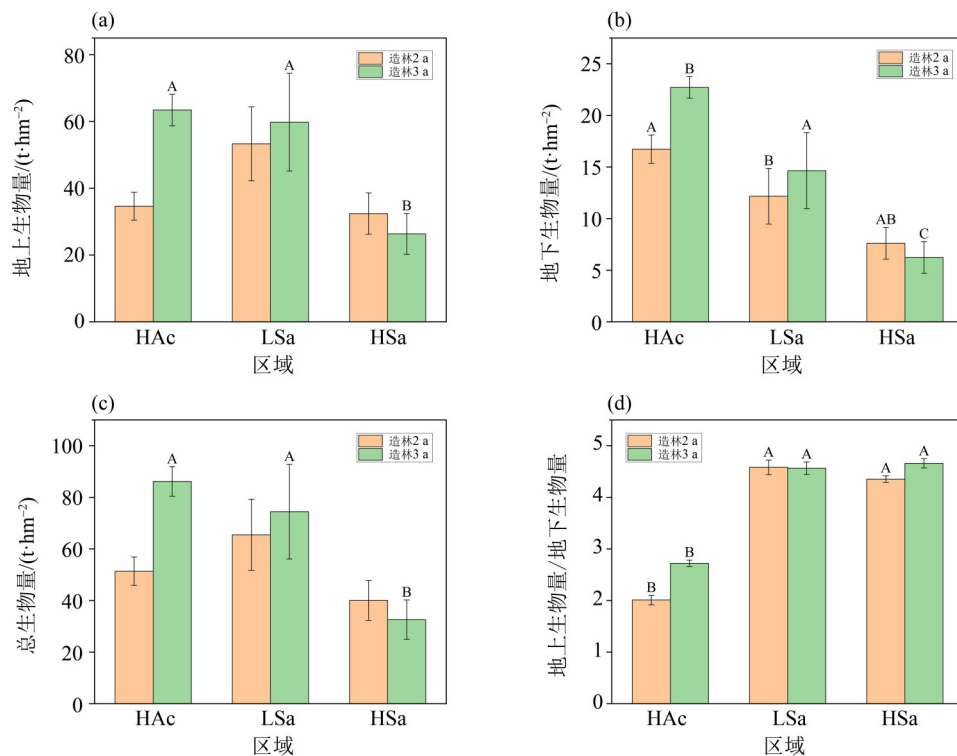
1) 同一年份同列的不同字母表示不同样地间存在显著差异 ( $P<0.05$ )。

在植物生物量方面, 3个样地的地上生物量仅在造林3 a后存在显著差异, HAc和LSa的地上生物量约为HSa的2.40倍和2.27倍(图5a)。而各样地间地下生物量的排列格局均为HAc>LSa>HSa(图5b)。因此, 在造林3 a后, HSa的总生物量也显著低于HAc和LSa(图5c)。在分配格局上, 种植无瓣海桑的LSa和HSa的地上/地下生物量比值均显著高于种植桐花树的HAc(图5d)。

### 2.3 生态系统的碳储量分配格局

造林2 a后, 3个样地间的地上碳密度存在显著差异, 表现为LSa>HSa>HAc; 在1 a后, HAc增长较快达到LSa水平, 均显著高于HSa(图6a)。相对地, 在造林2 a和3 a后, 3个样地间的地下碳

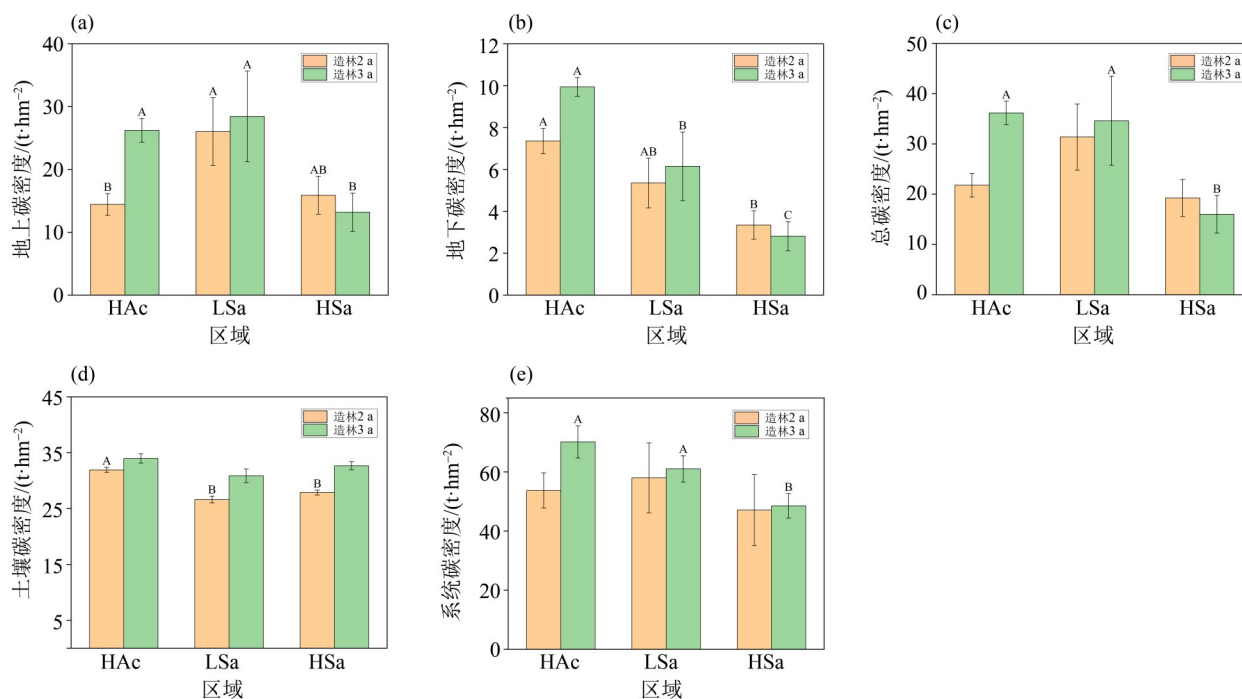
密度均存在显著差异, HAc最高, LSa其次, HSa最低(图6b)。因此, 在造林3 a后, HSa的植株总碳密度在3个样地中最低, 显著低于HAc和LSa(图6c)。红树林的系统碳密度为植物、土壤两部分碳密度的总和。造林2 a后, 3个样地之间的植物及系统碳密度差异不显著(图6c和6e), 但种植桐花树样地的土壤碳密度显著高于两个种植无瓣海桑的样地(图6d)。在造林3 a后, HAc和LSa的系统碳密度显著高于HSa(图6e), 这与3个样地植物碳密度的格局一致, 但3个样地的土壤碳密度不存在显著差异(图6d)。分析植物与土壤碳密度的比值发现, HAc及LSa的植物-土壤碳密度比值约为HSa的两倍。



不同大写字母表示同一时期不同样地差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 5 牛田洋红树林造林 2, 3 a 后各样地的植物 (a) 地上生物量、(b) 地下生物量、(c) 总生物量和 (d) 地上生物量/地下生物量

Fig. 5 Aboveground biomass (a), belowground biomass (b), total biomass (c) and aboveground biomass / belowground biomass ratio (d) of sampling sites after 2 and 3 years of mangrove afforestation in Niutianyang



不同大写字母表示同一时期不同样地差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 6 牛田洋红树林造林 2, 3 a 后各样地的植物地上碳密度 (a)、地下碳密度 (b)、总碳密度 (c)、土壤碳密度 (d) 和系统碳密度 (e)

Fig. 6 Mangrove aboveground carbon density (a), belowground carbon density (b), total carbon density (c), soil carbon density (d) and system carbon density (e) of sampling sites after 2 and 3 years of mangrove afforestation in Niutianyang

### 3 讨论与结论

红树植物的定居与发育会对土壤性质、水文特征产生影响(Xiao et al., 2019; 陈玉军等, 2022)。本研究中, 红树林修复 2~3 a 后土壤即出现明显的盐渍化、酸化和养分积累现象(乐易迅等, 2022)。在林龄数十年的天然红树林中, 伴随土壤 pH 值降低而产生 CNP 等营养元素增加的格局在红树林修复早期亦有所体现(陈小花等, 2022), 这表明红树林对立地条件的改造作用是一个较快的过程。牛田洋人工红树林土壤的 C/N 均值为 15.2, 说明在修复早期土壤碳积累以植物内源性供给为主, 随着造林时间的增加, 各样地土壤的 C/N 值呈下降趋势, 说明外源沉积的贡献有所增加(王绍强等, 2008; 陶玉华等, 2020)。

树种组成也是影响红树林碳汇功能的因素之一, 不同树种由于对土壤条件、水文特征的适应状况不同, 在固碳方面的特征也存在差异(Duke et al., 1998; Wu et al., 2020)。因此, 不同优势树种组成的红树林在固定 CO<sub>2</sub> 的速率上的差异决定了红树林的碳汇功能(Atwood et al., 2017)。本研究中的引进树种无瓣海桑生长迅速, 其固碳速率高于如秋茄树(*Kandelia obovata*)等华南地区乡土红树植物(Zhang et al., 2022)。然而, 由于无瓣海桑速生、高大的特性, 其群落密度常因资源竞争和个体自疏而普遍低于慢生、低矮的乡土红树植物。因此在人工红树林中, 拥有更高植株密度的乡土树种群落具有更高的单位面积碳储量(He et al., 2020), 这也体现在牛田洋红树林修复工程的早期阶段。在本研究中, 种植桐花树的群落的地上/地下生物量、碳密度的比值显著小于种植无瓣海桑的群落, 生物量与碳密度分配格局的差异, 说明了树种选择可以影响红树林生态修复碳汇功能的空间分布状况。此外, 不同树种的生长特性差异, 会影响根系及凋落物分解输入的碳累积过程格局(Kristensen et al., 2008)。无瓣海桑群落土壤的 C/N 值比桐花树群落更低, 归因于无瓣海桑发达的呼吸根能够促进土壤微生物的有氧呼吸作用, 提高土壤碳的矿化速率(高春等, 2017)。

红树植物对潮汐周期性淹没的适应, 反映在生长速度和成活率上, 这也导致天然红树林出现植物群落的分带现象(Hogarth, 2007)。种植于低潮滩的 11 a 生秋茄树人工林, 其生长速率、根系生物量均普遍低于在高潮滩的人工林, 地下部碳储量最高下降 70%(Chen et al., 2022a; Chen et al.,

2022b)。在牛田洋红树林修复工程中, 两个种植无瓣海桑的样地的生长和碳储量也存在差异: 在造林 2~3 a 内, 低潮位区样地植株密度减少了 35.2%, 而高潮位区仅下降了 11.8%, 滩地高程的提升有助于提高造林的植株存活率。相对地, 一定程度延长淹没时间对红树植物的生长具有促进效果。如秋茄树在淹没时间小于 4 h·d<sup>-1</sup> 时, 延长淹水时间可以增加地下部生物量(陈鹭真等, 2005)。淹水胁迫促进了白骨壤(*Avicennia marina*)和桐花树茎的生长, 并提升植株的全株生物量(何斌源等, 2007)。在本研究中, 低潮位区的 LSa 样地地上及地下生物量比高潮位区 HSa 更高, 体现了幼苗对淹水胁迫在形态和碳储量上的响应。此外, LSa 样地植株的叶生物量也较高, 说明植株通过增加叶面积来克服由于周期性淹没对光合作用造成的限制(Chen et al., 2013)。同时, 光合作用器官的增加, 也有助于无瓣海桑积累更多的碳(Misra et al., 1984)。

滩地高程也对红树林立地潮汐冲刷的状况产生影响, 高潮位区的土壤因受海水影响频率更低, 有利于营养物质的积累, 因此盐渍化、酸化程度更高。红树林位于向海前缘低潮带的土壤相比高潮带受潮汐冲刷更频繁, 水动力侵蚀作用更为强烈, 土壤表层积累的碳氮磷元素含量更低(Yuan et al., 2014)。红树植物产生的新鲜凋落物碎屑为颗粒态有机碳, 主要成分为难以酶解的木质素等(Cragg et al., 2015), 其在红树植物根际不断积累形成了红树林生态系统独特的碳组分(Robertson et al., 2016; Trevathan-Tackett et al., 2017)。本研究中, 高潮位区 HSa 样地受潮汐冲刷的时间较短, 植物的凋落物归还量更高, 因此颗粒态碳含量显著高于低潮位区 LSa 样地(江森华等, 2018)。总体上, 在生态修复早期, 低潮位的无瓣海桑群落土壤有机碳在数量和稳定性上均低于高潮位的无瓣海桑群落。

牛田洋红树林修复工程造林 2~3 a 后显著地改变了潮间带土壤的理化性质。在修复早期阶段土壤的碳储量无明显差异, 但碳的矿化速率有所不同。树种组成的差异会影响系统碳的密度和空间分配格局; 滩地高程则通过影响碳的植物固定、归还过程, 对系统的碳储量和稳定性进行调控。当前红树林生态修复工程的效果评估从单纯的面积数量指标, 逐渐向综合的面积-功能指标过渡, 工程评价周期也延长至 3 a。研究牛田洋红树林修

复工程3 a的碳储量状况及主要影响因子, 可以为

红树林修复工程验收的效果评价提供参考。

### 参考文献:

- 陈鹭真, 王文卿, 林鹏, 2005. 潮汐淹水时间对秋茄幼苗生长的影响[J]. 海洋学报, 27(2): 141-147.
- 陈妙纯, 2007. 汕头市水文水环境特性分析[J]. 水利科技与经济, 13(8): 556-558.
- 陈小花, 陈宗铸, 雷金睿, 等, 2022. 东寨港红树林中不同群落区表层土壤有机碳及其活性组分含量[J]. 湿地科学, 20(4): 499-506.
- 陈玉军, 李婷, 朱立安, 等, 2022. 湛江红树林湿地不同淹水梯度下土壤养分及其化学计量特征[J/OL]. 西北林学院学报, 1-11. (2022-10-09). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1202.S.20221008.1107.002.html>.
- 高春, 胡杰龙, 颜葵, 等, 2017. 海南东寨港红树林土壤二氧化碳和甲烷排放通量研究[J]. 湿地科学, 15(3): 351-357.
- 高天伦, 管伟, 毛静, 等, 2017. 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, 26(6): 985-990.
- 国家林业局, 2016a. 森林土壤磷的测定: LY/T 1232—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- 国家林业局, 2016b. 森林土壤氮的测定: LY/T 1228—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- 何斌源, 赖廷和, 陈剑锋, 等, 2007. 两种红树植物白骨壤(*Avicennia marina*)和桐花树(*Aegiceras corniculatum*)的耐淹性[J]. 生态学报, 27(3): 1130-1138.
- 胡慧蓉, 马焕成, 罗承德, 等, 2010. 森林土壤有机碳分组及其测定方法[J]. 土壤通报, 41(4): 1018-1024.
- 江森华, 吕茂奎, 林伟盛, 等, 2018. 生态恢复对红壤侵蚀地土壤有机碳组成及稳定性的影响[J]. 生态学报, 38(13): 4861-4868.
- 江胜国, 2019. 国内土壤容重测定方法综述[J]. 湖北农业科学, 58(S2): 82-86, 91.
- 乐易迅, 胡敏杰, 肖琳, 等, 2022. 河口湿地红树林植被恢复对土壤养分动态的影响[J]. 水土保持学报, 36(3): 333-337.
- 陶玉华, 黄星, 王薛平, 等, 2020. 广西珍珠湾三种红树林分土壤碳氮储量的研究[J]. 广西植物, 40(3): 285-292.
- 王绍强, 于贵瑞, 2008. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 28(8): 3937-3947.
- 王文卿, 石建斌, 陈鹭真, 2021. 中国红树林湿地保护与恢复战略研究[M]. 北京: 中国环境出版社: 6-11.
- 张乔民, 于红兵, 陈欣树, 等, 1997. 红树林生长带与潮汐水位关系的研究[J]. 生态学报, 17(3): 258-265.
- 中国林业科学研究院林业研究所, 1999a. 森林土壤pH值的测定: LY/T 1239—1999[S].
- 中国林业科学研究院林业研究所, 1999b. 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算: LY/T 1237—1999[S].
- 中华人民共和国农业部, 2006. 土壤检测 第16部分: 土壤水溶性盐总量的测定: NY/T 1121.16—2006[S].
- ALONGI D M, 2012. Carbon sequestration in mangrove forests[J]. Carbon Manag, 3(3): 313-322.
- ATWOOD T B, CONNOLLY R M, ALMAHASHEER H, et al, 2017. Global patterns in mangrove soil carbon stocks and losses[J]. Nat Clim Change, 7(7): 523-528.
- BREITHAUP T J L, SMOAK J M, SMITH T J, et al, 2012. Organic carbon burial rates in mangrove sediments: Strengthening the global budget[J]. Global Biogeochem Cycles, 26(3): 1-11.
- CHEN J, GAO M, CHEN G, et al, 2022a. Biomass accumulation and organic carbon stocks of *Kandelia obovata* mangrove vegetation under different simulated sea levels[J]. Acta Oceanol Sin, 41(8): 78-86.
- CHEN J, HUANG Y, CHEN G, et al, 2022b. Effect of site elevation and soil depth on the biomass and carbon, nitrogen, and phosphorus stocks of roots in planted *Kandelia obovata* mangrove forests[J/OL]. Restor Ecol, [2022-04-25]. <https://doi.org/10.1111/rec.13712>.
- CHEN L, TAM N F Y, WANG W, et al, 2013. Significant niche overlap between native and exotic *Sonneratia* mangrove species along a continuum of varying inundation periods[J]. Estuar Coast Shelf Sci, 117: 22-28.
- COHEN-SHACHAM E, ANDRADE A, DALTON J, et al, 2019. Core principles for successfully implementing and upscaling nature-based solutions[J]. Environ Sci Policy, 98: 20-29.
- CRAGG S M, BECKHAM G T, BRUCE N C, et al, 2015. Lignocellulose degradation mechanisms across the tree of life[J]. Curr Opin Chem Biol, 29: 108-119.
- DONATO D C, KAUFFMAN J B, MURDIYARSO D, et al, 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics[J]. Nat Geosci, 4(5): 293-297.
- DUARTE C M, LOSADA I J, HENDRIKS I E, et al, 2013. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation[J]. Nat Clim Change, 3(11): 961-968.
- DUKE N C, BALL M C, ELLISON J C, 1998. Factors influencing biodiversity and distributional gradients in mangroves[J]. Glob Ecol Biogeogr Lett, 7(1): 27-47.
- EDENHOFER O, PICHES-MADRUGA R, SOKONA Y, et al, 2014. IPCC, 2014: Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental

- Panel on Climate Change [R]. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- FAZLE RABBI S M, TIGHE M, COWIE A, et al, 2014. The relationships between land uses, soil management practices, and soil carbon fractions in South Eastern Australia[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 197: 41–52.
- HE Z, SUN H, PENG Y, et al, 2020. Colonization by native species enhances the carbon storage capacity of exotic mangrove monocultures[J]. *Carbon Balance Manag*, 15(1): 28.
- HOGARTH P J, 2007. The biology of mangroves and seagrasses[M]. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press.
- JIANG Z, GUAN W, XIONG Y, et al, 2019. Interactive effects of intertidal elevation and light level on early growth of five mangrove species under *Sonneratia apetala* Buch. Ham plantation canopy: Turning monocultures to mixed forests[J]. *Forests*, 10(2): 83.
- KRISTENSEN E, BOUILLON S, DITTMAR T, et al, 2008. Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review[J]. *Aquat Bot*, 89(2): 201–219.
- LEWIS R R, 2005. Ecological engineering for successful management and restoration of mangrove forests [J]. *Ecol Eng*, 24(4): 403–418.
- LIU H, REN H, HUI D, et al, 2014. Carbon stocks and potential carbon storage in the mangrove forests of China [J]. *J Environ Manag*, 133: 86–93.
- MISRA S, CHOUDHURY A, GHOSH A, et al, 1984. The role of hydrophobic substances in leaves in adaptation of plants to periodic submersion by tidal water in a mangrove ecosystem[J]. *J Ecol*, 72(2): 621.
- POLIDORO B A, CARPENTER K E, COLLINS L, et al, 2010. The loss of species: Mangrove extinction risk and geographic areas of global concern[J]. *PLoS One*, 5(4): e10095.
- RAHMAN M M, ZIMMER M, AHMED I, et al, 2021. Co-benefits of protecting mangroves for biodiversity conservation and carbon storage [J]. *Nat Commun*, 12(1): 3875.
- REN H, CHEN H, LI Z, et al, 2010. Biomass accumulation and carbon storage of four different aged *Sonneratia apetala* plantations in Southern China[J]. *Plant and Soil*, 327(1): 279–291.
- ROBERTSON A I, ALONGI D M, 2016. Massive turnover rates of fine root detrital carbon in tropical Australian mangroves[J]. *Oecologia*, 180(3): 841–851.
- SANDERS C J, MAHER D T, TAIT D R, et al, 2016. Are global mangrove carbon stocks driven by rainfall? [J]. *J Geophys Res Biogeosci*, 121(10): 2600–2609.
- TAM N F Y, WONG Y S, LAN C Y, et al, 1995. Community structure and standing crop biomass of a mangrove forest in Futian Nature Reserve, Shenzhen, China [J]. *Hydrobiologia*, 295: 193–201.
- TREVATHAN–TACKETT S M, SEYMOUR J R, NIELSEN D A, et al, 2017. Sediment anoxia limits microbial-driven seagrass carbon remineralization under warming conditions[J]. *FEMS Microbiol Ecol*, 93(6): 10.1093/femsec/fix033.
- WANG X, XIAO X, XU X, 2021. Rebound in China's coastal wetlands following conservation and restoration [J]. *Nat Sustain*, 4(12): 1076–1083.
- WU M, HE Z, FUNG S, et al, 2020. Species choice in mangrove reforestation may influence the quantity and quality of long-term carbon sequestration and storage [J]. *Sci Total Environ*, 714: 136742.
- XIAO K, LI H, SHANANAN M, et al, 2019. Coastal water quality assessment and groundwater transport in a subtropical mangrove swamp in Daya Bay, China [J]. *Sci Total Environ*, 646: 1419–1432.
- YUAN L, ZHANG J, SHEN C, et al, 2014. Quantification of soil organic carbon storage and turnover in two mangrove forests using dual carbon isotopic measurements [M]// *Mangrove Ecosystems of Asia*. New York: Springer: 257–271.
- ZHANG Y, YU C, XIE J, et al, 2021. Comparison of fine root biomass and soil organic carbon stock between exotic and native mangrove[J]. *CATENA*, 204: 105423.
- ZHANG Z, WANG Y, ZHU Y, et al, 2022. Carbon sequestration in soil and biomass under native and non-native mangrove ecosystems[J]. *Plant Soil*, 479(1): 61–76.

(责任编辑 张冰)