

养殖池塘退塘还林初期土壤有机碳及活性组分特征

李玲云^{1,2}, 韩婷婷², 张黄琛³, 史荣君², 齐占会², 李俊伟², 刘华雪², 熊兰兰³, 黄洪辉²

1. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306

2. 中国水产科学研究院南海水产研究所/广东省渔业生态环境重点实验室/农业农村部外海渔业开发重点实验室, 广东 广州 510300

3. 广东省海洋发展规划研究中心, 广东 广州 510220

摘要: 海水养殖池塘退出养殖种植红树植物(退塘还林)是恢复红树林湿地及其生态系统碳汇功能的重要手段。为揭示退塘还林初期土壤有机碳库特征及其影响因素, 阐明红树林湿地恢复过程中土壤碳库的动态变化, 以广东省惠东县考洲洋海域退塘还林初期(红树种植 2 年)的池塘为研究对象, 采集塘内红树种植岛、裸岛和水道 3 类样地 0~100 cm 的土壤柱状样品, 比较分析了不同深度土壤有机碳(SOC)、活性有机碳[易氧化有机碳(EOC)、微生物有机碳(MBC)和可溶性有机碳(DOC)]含量差异及其与土壤因子间的相关性。结果表明: 裸岛、红树种植岛和水道 3 类样地土壤 0~100 cm SOC 的质量分数分别为 (7.92 ± 0.43) 、 (7.72 ± 0.35) 和 (7.48 ± 0.69) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, SOC 密度分别为 (84.56 ± 3.65) 、 (72.01 ± 3.20) 和 (70.12 ± 1.44) $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 种植岛和裸岛土壤 SOC 峰值均出现在 40~60 cm 土层, 深于水道样地(峰值出现在 0~20 cm)。3 类样地土壤活性有机碳组分 EOC、MBC 和 DOC 质量分数均为种植岛>水道>裸岛, 种植岛土壤 EOC 和 MBC 峰值分别在 40~60 cm 和 80~100 cm 土层, 深于水道和裸岛。土壤容重、总氮(TN)和总磷(TP)是活性有机碳含量及其垂直分布的关键影响因子, EOC 和 DOC 与土壤容重和 TP, 以及 MBC 与 TN 间均呈极显著负相关($p < 0.05$)。研究表明, 考洲洋退塘还林初期土壤活性有机碳组分占 SOC 比例较高, 土壤碳库处于较活跃的状态; 红树种植使土壤中下土层 SOC 活性组分含量增加, 促进了有机碳向土壤深层迁移, 随着红树植株的生长, 其对土壤碳库和湿地碳汇的影响也将更加显著。

关键词: 退塘还林; 土壤有机碳; 活性有机碳; 土壤因子

中图分类号: S 151.9; S 154.1

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Characteristics of soil organic carbon and labile components at early stage of reforestation of aquaculture pond

LI Lingyun^{1,2}, HAN Tingting², ZHANG Huangchen³, SHI Rongjun², QI Zhanhui², LI Junwei², LIU Huaxue², XIONG Lanlan³, HUANG Honghui²

1. College of Fisheries and Life, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

2. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment/Key Laboratory of Open-Sea Fishery Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510300, China

3. Guangdong Center for Marine Development Research, Guangzhou 510220, China

收稿日期: 2024-04-30; 修回日期: 2024-05-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41106088, 31900094); 广东省自然资源厅科技项目生态修复项目“广东省红树林种植-养殖生态耦合技术研究”; 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(2023TD15)

作者简介: 李玲云(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋生态。E-mail: lingyun0407@163.com

通信作者: 齐占会(1980—), 男, 研究员, 博士, 研究方向为浅海养殖生态。E-mail: qizhanhui@scsfri.ac.cn

Abstract: Reforest mangrove in aquaculture pond is considered to be an effective way to restore mangrove wetlands and their carbon sink function. In order to reveal the characteristics of soil organic carbon pools and their influencing factors at the early stage of reforest mangrove in aquaculture pond, and to elucidate the dynamic changes of soil carbon pools in the process of mangrove wetland restoration, we collected soil samples from a mangrove reforest aquaculture pond located in the northwest coast of Kaozhou Bay, Huidong County, Guangdong Province, southern China. The mangroves *Rhizophora stylosa* and *Avicennia marina* were planted in 2021. Cylindrical soil samples with 0–100 cm in length were collected in three areas: the mangrove plantation island (PI), bare island (BI), and the soil under the water channel (WC) in the pond. The soil sub-samples were compared for the soil organic carbon (SOC), as well as active organic carbon [Easily oxidizable organic carbon (EOC), microbial organic carbon (MBC) and soluble organic carbon (DOC)] mass fractions among different sampling areas and depths, as well as the relationship with soil physicochemical parameters. The results show that the average SOC mass fraction for the 0–100 cm soil depth followed a descending order: BI [(7.92±0.43) g·kg⁻¹]>PI [(7.72±0.35) g·kg⁻¹]>WC [(7.48±0.69) g·kg⁻¹]. Similarly, the average SOC density followed a descending order: BI [(84.56±3.65) Mg·hm⁻²]>PI [(72.01±3.20) Mg·hm⁻²]>WC [(70.12±1.44) Mg·hm⁻²]. The highest SOC mass fraction and density were observed at the 40–60 cm depth in PI and BI areas, and at the 0–20 cm depth in WC area. The EOC, MBC and DOC mass fractions were highest in PI area, followed by WC and BI areas. The highest EOC and MBC in PI area were found at depths of 40–60 and 80–100 cm, respectively, which were deeper than those in WC and BI areas. Soil bulk density, total nitrogen and total phosphorus were identified as key factors influencing the distribution patterns of labile organic carbon. The EOC and DOC contents showed a significantly negative correlation with soil bulk density and total phosphorus, while the MBC content showed a significantly negative correlation with total nitrogen ($p<0.05$). The relatively high proportion of labile organic carbon components within SOC indicates that the soil carbon pool is still in an active state. The ratio of labile carbon of SOC is relatively high at the middle and deeper soil depth, indicating that the mangrove has promoted presence of labile organic carbon at middle and deeper soil depths, and mangrove facilitate the migration of organic carbon in the deeper soil layers. As the mangrove plants continue to grow, their effects on the carbon sequestration become more significant.

Keywords: Mangrove reforested aquaculture pond; Soil organic carbon; Labile organic carbon; Soil factors

红树林是滨海地区生产力最高的生态系统之一, 覆盖了地球表面约 0.1% 的面积, 却吸收了大气中约 5% 的二氧化碳 (CO₂)^[1], 将碳储存在植株体内并对土壤碳库产生影响^[2-3]。红树林土壤环境受周期性潮汐浸淹影响, 具有高盐、厌氧的特征, 抑制了土壤中有机碳的分解, 促进了有机碳向土壤深层迁移, 使土壤中储存的碳丰富且稳定。据估计, 红树林湿地表层 1 m 土壤中的碳储量约为植被生物碳量的 5 倍^[4], 红树林土壤储碳量占海岸生态系统总有机碳的 10%~15%^[2], 是海岸带蓝碳的重要组成。然而, 在气候变化和海岸带开发的双重压力下, 红树林湿地受到严重威胁^[5], 1980—2005 年全球红树林面积减少了近 20%^[6], 其中近 50% 是因开挖养殖围塘所造成的^[7-8]。1980—2000 年我国红树林转变为养殖塘的比例为 97.6%^[9]。“退塘还林”是目前恢复红树林生态系统的主要方式^[10]。

土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 是由多种形态的有机碳经过多个分解和再生阶段形成的^[11]。有机碳中的活性有机碳[如易氧化有机碳 (Easily oxidizable carbon, EOC)、微生物有机碳 (Microbial biomass carbon, MBC) 和可溶性有机碳 (Dissolved

organic carbon, DOC) 等] 具有对外界干扰敏感、生物活性高、易分解矿化等特点, 对土壤碳累积产生重要影响, 是表征土壤 SOC 变化和稳定程度的重要指标^[12]。红树林湿地土壤活性有机碳受红树根系和凋落物所输入的生物碳影响, 幼龄红树林的数量和化学成分与成林存在很大差异, 对土壤 SOC 输入尤其是活性有机碳的影响也会随红树的生长和系统发育而变化^[13]。红树种植初期是土壤碳库变化最快和最活跃的时期, 揭示这一时期土壤碳库的特征及影响因素对系统了解其发育演变过程至关重要。然而目前有关红树林成林阶段的相关报道较多, 而有关退塘还林初期土壤 SOC 库、活性组分及其影响因素的研究还相对较少。

本研究选取广东省惠东县考洲洋水域退塘还林养殖塘作为研究对象。该养殖塘于 2021 年退出养殖, 在塘内堆积岛种植了红海榄 (*Rhizophora stylosa*) 和白骨壤 (*Avicennia marina*) 等红树种类 (称为“种植岛”)。本研究探究了塘内红树种植区域土壤碳库特征, 并以未种植区域为对照, 比较分析了红树种植对土壤有机碳和活性组分特征的影响, 旨在为揭示退塘还林湿地恢复过程中土壤碳库的动

态变化和碳汇形成机制提供基础数据。

1 研究区域与方法

1.1 采样区域与样地设置

考洲洋位于广东省惠东县南部,地处稔平半岛,是红海湾向内陆延伸的典型半封闭性海湾。本研究选取考洲洋湾底西北部的一口退塘还林的池塘(114°52'E, 22°45'N)为研究对象,该池塘面积约10.67 hm² (160 亩),退塘前养殖凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)和锯缘青蟹(*Scylla serrata*)等种类,于2021年由政府征收并在塘内堆填堆积岛6.67 hm²,在其中4.67 hm²上种植了红海榄和白骨壤等红树树种(“种植岛”),2 hm²是未种植红树而自然生长出草本植物的“裸岛”,另有4 hm²未堆填的区域形成塘内“水道”。本研究于2023年12月采集了种植岛样地(PI1—PI3)的土壤样品,同时采集了裸岛样地(BI1—BI3)和水道样地(WC1—WC3)的样品作为种植岛样地的对照,每个样地随机设3个采样点,位置如图1所示。

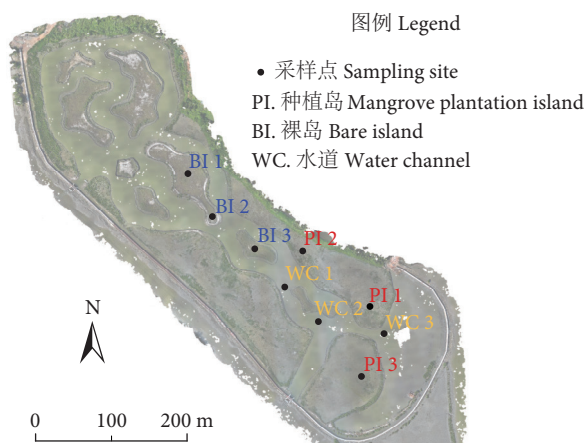


图1 退塘还林池塘采样点
Fig. 1 Sampling sites in mangrove reforested aquaculture pond

1.2 样品采集与分析

通常土壤中的碳集中在100 cm深的土层,有机碳的输入主要发生在0~20 cm土层,并且受植物根系分布的影响,在约50 cm深的土层有较高的碳储量,因此本研究采集100 cm深的土壤样品,按20 cm为一层进行分割,获得5层土样。每个土层用环刀平行采样2次,分别放入2个铝盒内带回实验室。在实验室内剔除碎石、植物残根等杂物后,一个铝盒为鲜土样品,4℃保存,用于测定土壤MBC和DOC质量分数;另一个铝盒的土壤样品称湿质

量,冷冻干燥后称干质量,再研磨过筛后干燥保存,用于计算土壤容重、含水量,以及测定盐度、pH、总氮(TN)、总磷(TP)、SOC、EOC质量分数,以及碳/氮比(C/N)。

土壤pH采用电极法测定(水土质量比为2.5:1),土壤盐度采用电导率法测定(水土质量比为5:1),土壤容重和土壤含水量采用烘干法测定;土壤SOC和TN质量分数采用元素自动分析仪测定,C/N根据碳氮质量分数计算;TP质量分数采用酸熔-钼锑抗比色法测定^[14];土壤EOC、MBC和DOC的质量分数分别采用高锰酸钾氧化法、氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法和去离子水浸提法测定,具体提取和测定步骤参考陈小花等^[15]和胡慧蓉等^[16]的方法。0~100 cm深度的SOC密度(SOCD, Mg·hm⁻²)计算公式为:

$$SOCD = \sum_{i=1}^5 SOC_i \times BD_i \times D_i / 10 \quad (1)$$

式中: SOC_i为第i层土壤SOC质量分数(g·kg⁻¹); BD_i为第i层土壤容重(g·cm⁻³); D_i为第i层的厚度(cm)。

1.3 数据处理

应用单因素方差分析法(One-way ANOVA)比较不同样地及不同深度的SOC、EOC、MBC和DOC质量分数, SOC密度以及活性有机碳各组分占比的差异性,采用LSD法进行显著性多重比较。所有数值在统计前先进行正态分布和方差齐性检验。通过计算皮尔逊相关系数检验SOC、活性有机碳各组分质量分数和SOC密度与土壤因子之间的相关性。采用IBM SPSS 25.0软件进行统计分析,冗余分析(Redundancy analysis, RDA)采用Canoco 5.0软件进行,显著性和极显著性水平分别为0.05和0.01。

2 结果

2.1 土壤理化特征

考洲洋退塘还林区域土壤理化特征如图2所示。在0~100 cm土层,3类样地土壤的盐度介于13.14‰~14.38‰,种植岛显著高于裸岛和水道($p < 0.05$),种植岛和裸岛各土层间差异不显著;土壤pH介于7.59~7.80,各样地间和土层间均无显著性差异;土壤容重介于0.93~1.07 g·cm⁻³,裸岛显著高于种植岛和水道($p < 0.05$),种植岛20~60 cm土层容重最低,裸岛和水道土壤容重的最低值出现

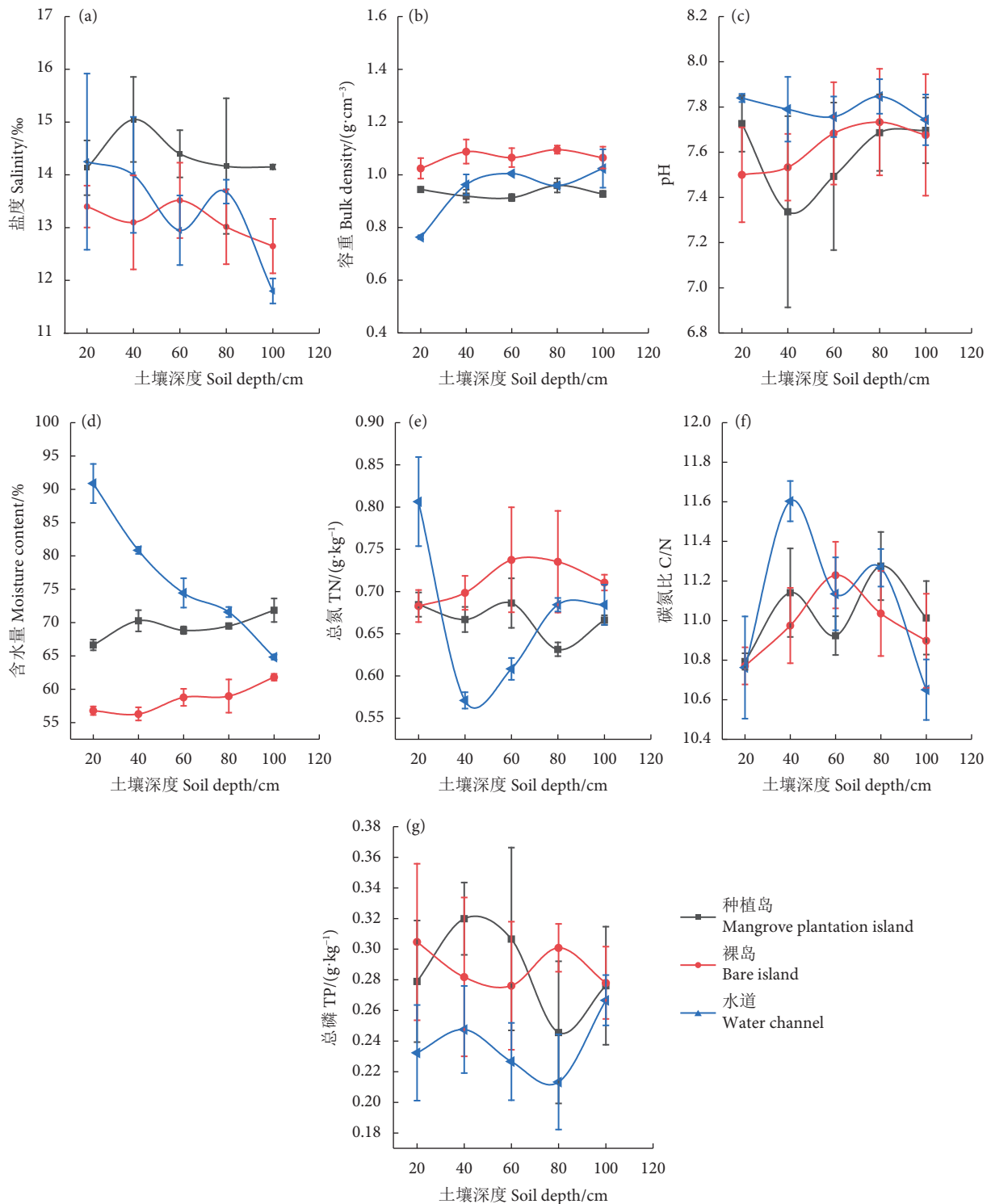


图2 考洲洋退塘还林区域不同类型样地的土壤因子

Fig. 2 Soil factors of soil from three sampling plots in mangrove reforested aquaculture pond of Kaozhou Bay

在 0~20 cm 土层; 土壤含水量为 58.53%~76.52%, 分布特征与土壤容重相反; 土壤 TN 质量分数介于 0.66~0.71 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 裸岛显著高于种植岛和水道 ($p<0.05$), 种植岛样地 60~80 cm 土层显著低于其他土层, 裸岛样地各土层间无显著性差异, 水道样地土壤 TN 质量分数随深度的增加先下降后上升, 最

低值出现在 20~40 cm 土层; 土壤 C/N 均值介于 10.98~11.08, 3 类样地间无显著性差异, 最低值均分布在 0~20 cm 土层; 土壤 TP 质量分数均值介于 0.23~0.29 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 水道显著高于种植岛和裸岛, 种植岛 20~40 cm 土层显著高于 60~80 cm 土层 ($p<0.05$), 裸岛 0~100 cm 和水道 0~80 cm 各土层

间无显著性差异 ($p>0.05$)。

2.2 土壤 SOC 质量分数及其垂直分布

3 类样地 100 cm 以内土层的 SOC 质量分数从高到低依次为裸岛 $[(7.92\pm0.43) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 、种植岛 $[(7.72\pm0.35) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 和水道 $[(7.48\pm0.69) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ ，种植岛和裸岛样地土壤 SOC 质量分数均随土壤深度

的增加呈先上升后下降趋势，最高值均出现在 40~60 cm 土层 (图 3-a)；而水道样地则以 0~20 cm 土层的 SOC 质量分数最高，显著高于种植岛样地和裸岛样地相同土层 ($p<0.05$) (图 3-a)，而后随着深度的增加而降低，在 20~40 cm 和 40~60 cm 土层的质量分数显著低于其他 2 个样地 ($p<0.05$)。

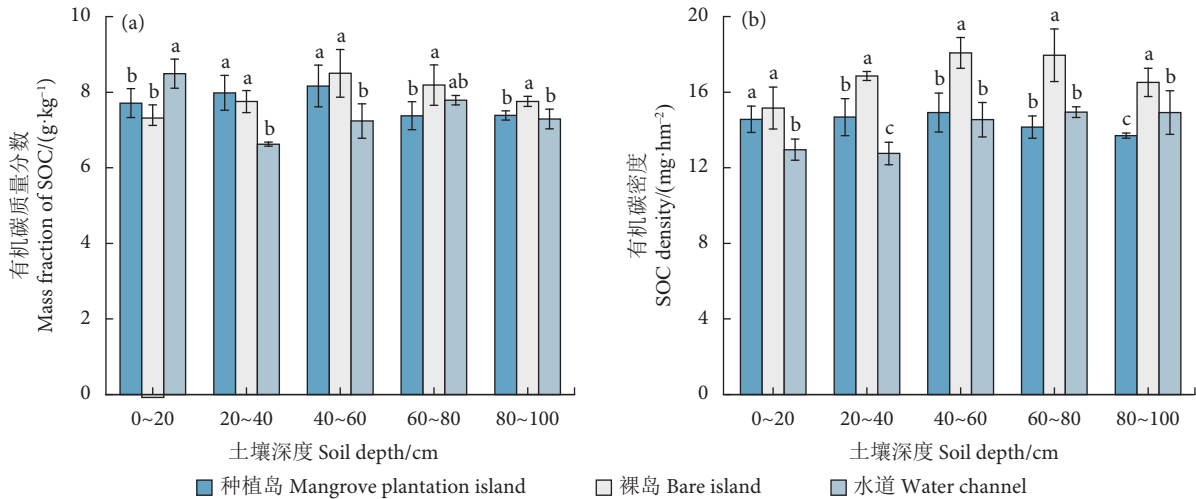


图3 考洲洋退塘还林区域不同样地土壤有机碳 (SOC) 质量分数和密度

注：不同字母表示相同土层不同样地间存在显著差异性 ($p<0.05$)。

Fig. 3 Soil organic carbon mass fraction and density in different sampling plots of mangrove reforested aquaculture pond of Kaozhou Bay

Note: Values with different letters have significant differences among sampling plots in the same soil layer ($p<0.05$).

3 类样地 100 cm 以内土层的 SOC 密度从高到低依次为裸岛 $[(84.56\pm3.65) \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}]$ 、种植岛 $[(72.01\pm3.20) \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}]$ 和水道 $[(70.12\pm1.44) \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}]$ 。种植岛样地和裸岛样地 SOC 密度的垂直变化趋势与其质量分数一致，但水道样地 SOC 密度随土壤深度的增加呈升高趋势，0~20 cm 和 20~40 cm 土层显著低于更深层 ($p<0.05$)。除 0~20 cm 外，裸岛各土层的 SOC 密度均显著高于种植岛和水道 ($p<0.05$) (图 3-b)。

2.3 土壤 SOC 活性组分质量分数及垂直分布特征

3 类样地 0~100 cm 土壤易氧化有机碳 (EOC) 的质量分数从高到低依次为种植岛样地 $(4.65\pm0.78) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、水道样地 $(4.61\pm0.76) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、裸岛样地 $(3.92\pm0.74) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，种植岛 0~80 cm 各土层 EOC 质量分数均高于裸岛 (图 4)。在垂直分布方面，种植岛和裸岛样地土壤 EOC 质量分数均随深度的增加呈上升趋势，峰值均出现在 40~60 cm 土层，而水道土壤 EOC 则随土壤深度的增加呈下降趋势，并在 0~20 cm 土层显著高于种植岛，而在 40~60 cm 土层则显著低于种植岛 ($p<0.05$) (图 4-a)。

3 类样地土壤微生物有机碳 (MBC) 质量分数依次为种植岛 $[(1.33\pm0.64) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}] >$ 水道 $[(1.13\pm0.22) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}] >$ 裸岛 $[(0.95\pm0.18) \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 。种植岛土壤 MBC 质量分数随土壤深度的增加呈先增加后减少再增加的趋势，峰值分别出现在 20~40 cm 和 80~100 cm 土层，显著高于其他土层 ($p<0.05$)，并显著高于裸岛样地同土层。裸岛和水道土壤 MBC 质量分数在各土层间的差异不显著 ($p>0.05$) (图 4-b)。

3 类样地土壤可溶性有机碳 (DOC) 质量分数依次为种植岛 $[(46.57\pm9.02) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}] >$ 水道 $[(22.19\pm3.13) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}] >$ 裸岛 $[(21.11\pm3.34) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$ ，种植岛样地各深度层的 DOC 质量分数均显著高于裸岛和水道 ($p<0.05$)，并随土壤深度的增加呈下降趋势；裸岛和水道样地各深度层之间的差异不显著，随土壤深度的增加呈波动性变化，最高值出现在 20~40 cm 土层 (图 4-c)。

3 类样地的 EOC、MBC 和 DOC 占 SOC 的比例以 EOC 最高，DOC 最低，3 者的比例分别为 $(49.69\pm8.86)\% \sim (61.84\pm9.33)\%$ 、 $(12.20\pm2.79)\% \sim$

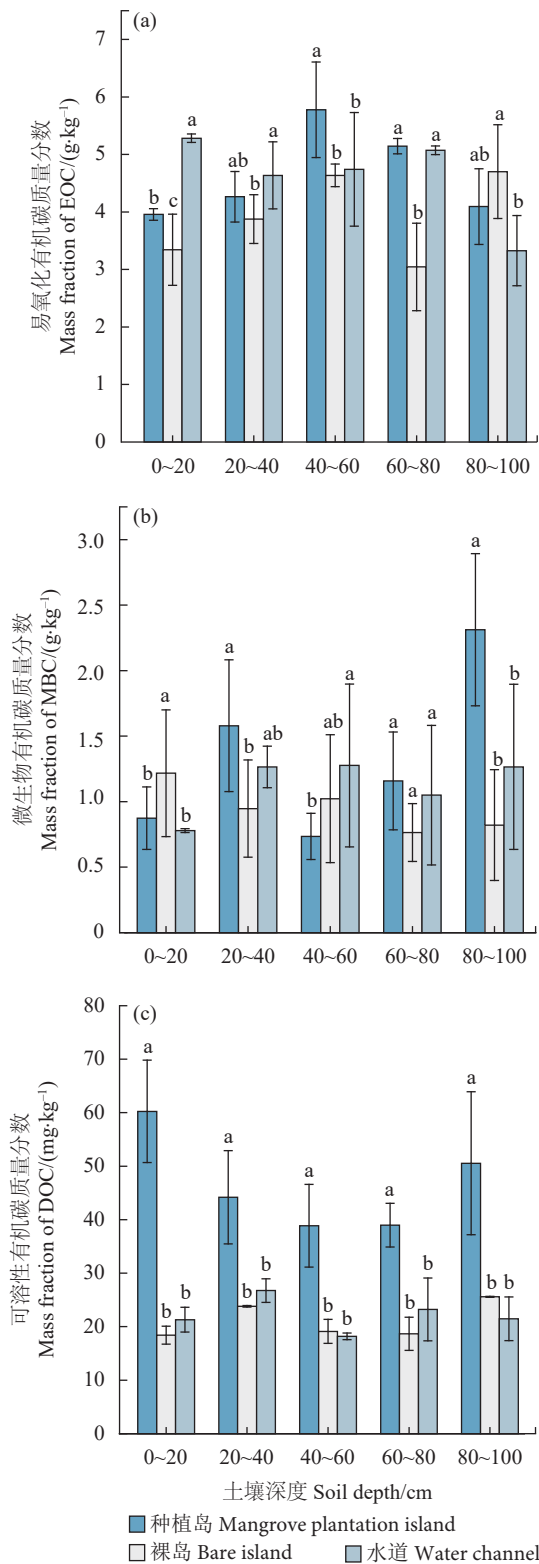


图4 考洲洋退塘还林区域不同深度土壤活性有机碳、微生物有机碳和可溶性有机碳质量分数

注: 不同字母表示相同土层不同样地间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

Fig. 4 Mass fractions of soil easily oxidizable carbon, microbial biomass carbon and dissolved organic carbon of different soil layers in mangrove reforested aquaculture pond of Kaozhou Bay

Note: Values with different letters have significant differences among sampling plots in the same soil layer ($p < 0.05$).

(17.60 ± 8.99)% 和 (0.26 ± 0.05)%~(0.61 ± 0.12)% (图5)。在 0~100 cm 土壤 EOC、MBC、DOC 占 SOC 的比例均值在不同样地间存在差异, EOC 占比依次为水道>种植岛>裸岛, 裸岛显著低于种植岛和水道 ($p < 0.05$); MBC 和 DOC 占比均为种植岛>水道>裸岛, 种植岛显著高于水道和裸岛 ($p < 0.05$)。

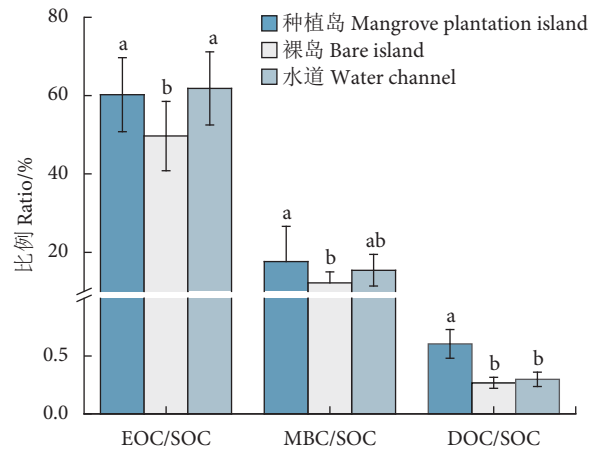


图5 土壤活性有机碳各组分占总有机碳的比例
注: EOC/SOC、MBC/SOC 和 DOC/SOC 分别表示易氧化有机碳、微生物有机碳和可溶性有机碳质量分数占土壤总有机碳质量分数的比例。不同字母表示相同土层不同样地间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

Fig. 5 Proportions of components of labile organic carbon to soil organic carbon

Note: EOC/SOC, MBC/SOC and DOC/SOC represent the ratios of mass fractions of EOC, MBC and DOC to mass fractions of soil total organic carbon, respectively. Values with different letters have significant differences among sampling plots in the same soil layer ($p < 0.05$).

2.4 土壤 SOC 与理化因子间的相关性

土壤 SOC 及其活性组分与土壤因子间的相关关系见表 1。考洲洋退塘还林区域 3 类样地的 SOC 受 MBC、TN 和 C/N 的影响显著 ($p < 0.05$) 或极显著 ($p < 0.01$)。EOC 和 DOC 与盐度呈极显著正相关, 与容重呈极显著负相关, 而且 EOC 与含水量、TP 呈极显著负相关, SOC 与 DOC 呈显著负相关; MBC 与土壤 TN 呈极显著负相关。

在冗余分析中, 以剖面土壤中的 EOC、MBC 和 DOC 3 种活性有机碳质量分数为响应变量, 以剖面土壤盐度、pH、容重、含水量、TN、C/N、TP 和 SOC 等 8 种土壤因子为解释变量。RDA 分析结果显示, 第一排序轴和第二排序轴可以解释土壤活性有机碳与土壤因子总体变异的 88.90%; 其中, 第一排序轴和第二排序轴的解释率分别为 59.57% 和 29.33%(图 6), 说明这 2 个排序轴可以在一定程度上反映土壤活性有机碳的分布特征随土壤因子的变化趋势。在排序轴上, 因子箭头投影的长

表1 土壤有机碳及其活性组分质量分数与土壤因子间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between mass fraction of soil organic carbon and its labile components and soil factors

项目 Item	盐度 S	pH	容重 BD	含水量 MC	总氮 TN	碳氮比 C/N	总磷 TP	有机碳 SOC	易氧化 有机碳 EOC	微生物 量碳 MBC	可溶性 有机碳 DOC
盐度 S	1										
pH	-0.338**	1									
容重 BD/(kg·m ⁻³)	-0.391**	-0.130	1								
含水量 MC/%	0.331**	0.273**	-0.804**	1							
总氮 TN/(g·kg ⁻¹)	-0.015	0.078	-0.142	-0.059	1						
碳氮比 C/N	0.142	-0.010	0.070	0.155	-0.551**	1					
总磷 TP/(g·kg ⁻¹)	0.126	-0.546**	0.176	-0.384**	0.175	-0.173	1				
有机碳 SOC/(g·kg ⁻¹)	0.086	-0.036	-0.133	-0.085	0.774**	-0.213*	0.198	1			
易氧化有机碳 EOC/(g·kg ⁻¹)	0.310**	0.207	-0.496**	0.502**	-0.051	0.190	-0.373**	0.092	1		
微生物量碳 MBC/(g·kg ⁻¹)	0.126	-0.095	-0.038	0.067	-0.323**	-0.001	-0.039	-0.376**	-0.172	1	
可溶性有机碳 DOC/(mg·kg ⁻¹)	0.409**	-0.146	-0.343**	0.128	-0.168	-0.009	0.154	-0.038	0.125	0.215*	1

注：* 表示存在显著相关性 ($p<0.05$)；** 表示存在极显著相关性 ($p<0.01$)。

Note: * and ** represent significant ($p<0.05$) and extremely significant ($p<0.01$) correlation, respectively; S. Salinity; BD. Bulk density; MC. Moisture concent.

度反映该因子对响应变量的解释量，投影越长，解释率越高，反之则越低。从图 6 可见，各解释变量对土壤活性碳的独立解释率从高到低依次为容重、TN、TP、SOC、盐度、含水量、C/N、pH。在这些因子中，容重、TN 和 TP 对土壤活性有机碳的解释率达到了极显著性水平，对土壤活性有机碳的解释贡献率占绝对优势。

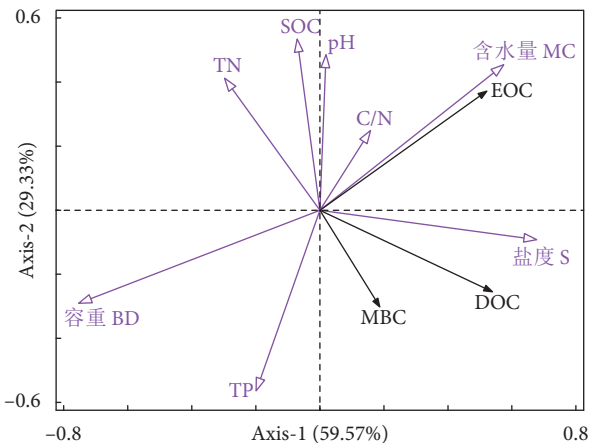


图6 土壤活性有机碳与土壤因子的冗余分析(RDA)排序图
Fig. 6 Redundancy analysis (RDA) ranking of soil labile organic carbon and soil factors

3 讨论

3.1 不同样地土壤 SOC 分布特征

本研究中考洲洋退塘还林区域 0~100 cm 土层的 SOC 质量分数均值为 (7.71 ± 0.60) g·kg⁻¹，与湛江太平镇退塘还林区域土壤 SOC 质量分数 $[(7.60\sim$

$8.49)$ g·kg⁻¹] 接近^[17]，但低于广东省 $(22.4$ g·kg⁻¹)^[18] 和海南省 $[(30.5\pm0.7)$ g·kg⁻¹]^[19] 红树林土壤 SOC 的平均值，这可能是由于土壤 SOC 主要来源于植物凋落物和动植物残体的分解^[20]。考洲洋退塘还林区域的红树种植仅 2 年，尚处于快速生长的幼龄期，产生的凋落物数量较少，进而碳归还量也较低^[21]。另外，在红树林区域开挖养殖塘的毁林造塘过程中，围垦和排干水体等活动会导致土壤 SOC 的损失，损失量甚至可高达 82%^[22]，这可能是本研究区域土壤 SOC 质量分数较低的重要原因。

本研究中虽然退塘还林仅 2 年，但红树种植已对土壤 SOC 的含量和密度产生了一定影响。本研究中水道样地 0~20 cm 土层 SOC 高于种植岛和裸岛样地，其中重要原因是种植红树恢复了池塘与外海的水文连通，种植岛和裸岛土壤样地处于周期性浸淹和干露，土壤间隙水中的溶解氧含量较高，红树的根系泌氧效应也向土壤深层释放氧气，有利于碳的氧化分解；而相比之下水道样地则长期处于淹水状态，其土壤处于持续的厌氧状态，一定程度上对有机碳的分解产生了抑制，从而有利于有机质的保持与储存^[23]。但本研究中种植岛和裸岛在 100 cm 以内土层的 SOC 质量分数和密度均高于水道，这显示了红树植物和草本植物根系及树叶等凋落物向土壤中输入生物有机碳的作用。在土壤 SOC 的垂直分布上也可以观察到红树种植的影响，种植岛土壤 0~20 cm 和 20~40 cm 深度的 SOC 质量分数均高于裸岛，表明红树植株对土壤 SOC 的影响高于裸

岛表面的草本植物,也进一步表明在40 cm以浅的土壤,红树根系对SOC的影响高于凋落物,这与已有的研究发现^[24]一致。

3.2 不同样地土壤活性有机碳组分的分布特征

相对于SOC,土壤活性有机碳能更敏感地反映土壤SOC库的动态循环与转化^[20,25],其中EOC是土壤微生物的重要碳源,是土壤SOC库动态变化的敏感指标^[26]。本研究结果显示,3类样地土壤EOC均与SOC呈正相关关系。种植岛0~80 cm土层中的EOC含量高于裸岛,与种植岛SOC含量高于裸岛的结果一致,这主要因为EOC是SOC的分解产物,红树根系、凋落物和土壤理化性质等影响土壤有机质返还的因素也会影响到EOC的含量和垂直分布特征^[27-28]。除了有机碳输入的差别外,红树根系泌氧效应向土壤释放氧气也会促进SOC的氧化分解从而增加土壤中EOC含量。

MBC是预测土壤质量变化的早期指标^[29],MBC/SOC称为微生物熵,反映了土壤中MBC的形成速率以及有机碳库的周转变化速率^[30]。土壤微生物活性不仅受水分变化的限制,还受到有机碳输入的影响^[31]。本研究的3类样地中种植岛0~100 cm土壤的MBC含量和MBC/SOC比例最高,这可能是由于种植红树后,红树的根系泌氧、凋落物输入等效应改善了土壤的通透性和厌氧状况以及营养物质的数量,促进了微生物的生长,使MBC含量上升。反之水道在长期淹水环境下,微生物活性受到厌氧环境的抑制,对土壤有机质的分解效率降低,因此土壤MBC的含量最低。周雅心等^[32]也发现土壤过干或过湿均不利于土壤MBC积累,干湿交替的条件更有利于微生物的生长、活动和MBC的积累。红树种植为微生物提供了有利的生存与生长条件^[33],种植岛相对于水道和裸岛样地具有更高的微生物活性,这是种植岛样地20~40 cm土层MBC含量较高的重要原因。

DOC是土壤微生物可直接利用的有机碳源,易于在氧化条件下释放到大气或溶解到水体中而随之流失^[34]。3类样地DOC/SOC均小于1%,表明土壤中有机碳分解程度较低而保持程度较高,碳库总量具有一定的稳定性^[15]。周期性水淹可促进土壤团聚体分散,增加土壤SOC的溶解量和DOC的含量^[26],但同时长期淹水的厌氧环境又会抑制土壤微生物活性,降低有机碳的分解速率和DOC的累积效率^[35]。这些可能是本研究中种植岛土壤

DOC含量显著高于水道的重要原因,也说明堆岛抬升高程可以降低土壤SOC的易氧化性,增加土壤SOC的稳定性和积累。种植岛土壤的DOC含量高于裸岛,这与种植岛土壤的MBC含量高于裸岛的结果相一致,可能由于DOC主要来源于有机质的淋溶和微生物对有机质的分解^[36],反映了微生物的分解作用。此外,种植岛土壤含水量高于裸岛,有利于红树树叶等凋落物有机质淋溶,产生的DOC向土壤深层迁移和累积也是可能的原因^[37-38]。

3.3 不同样地土壤活性碳组分与土壤理化性质的相关性

土壤活性碳组分的含量不仅受有机物输入量的影响,也受土壤因子的影响。本研究发现土壤容重、TN和TP是考洲洋退塘还林区域土壤活性碳积累的关键影响因子,且不同样地土壤的活性碳组分对土壤因子的响应敏感度存在差异。土壤容重是红树种植初期土壤碳储存最重要的影响因子,反映土壤的孔隙度结构,较低的土壤容重有助于红树根系伸展和碳的渗透^[39],但对有机碳的吸附能力较低^[40]。本研究中退塘还林恢复了池塘与外海水文的连通性,周期性潮汐浸淹增加了土壤含水量,降低了土壤容重和对有机碳的吸附能力,使EOC和DOC解离逸散出来,这与它们和土壤容重呈极显著负相关的结果相一致。

氮(N)、磷(P)等营养元素对湿地土壤活性有机碳库的形成和维持具有重要影响^[35]。本研究中,种植岛样地的EOC和MBC含量高于裸岛,而TN和TP含量低于裸岛,使得EOC与TP、MBC与TN均呈极显著负相关。红树植物根系除直接吸收土壤N、P元素导致其含量降低外,根系泌氧还会增加间隙水中的溶解氧,从而抑制铁结合P的释放,这两方面均会导致土壤养分含量降低。此外,土壤的N、P也会影响微生物对有机质的分解速度^[41],在N、P水平较高的情况下,有机质更易被微生物分解,转化速度也更快,土壤活性有机碳含量升高。因此,退塘还林初期土壤碳储量和稳定性在一定程度上也受到土壤物理性质和N、P供应的调控。

4 结论

考洲洋退塘还林的红树植物目前处于快速生长的幼龄期,植株碳归还量和土壤SOC输入量均相对较低。红树植物根系可以通过影响土壤容重、

TN 与 TP 含量, 间接促进土壤活性有机碳的积累, 推动有机碳向土壤深层迁移。目前, 考洲洋退塘还林区域土壤碳库尚不稳定, 随着红树植株的生长, 对湿地土壤固碳储碳的影响也将逐渐增大, 建议开展持续监测以系统揭示其演变过程和碳汇形成机制。

参考文献:

- [1] 李林峰, 吴小凤, 刘素青. 湛江 5 种红树林树种光合作用特性及光合固碳能力研究[J]. *广西植物*, 2015, 35(6): 825-832.
- [2] ALONGI D M. Carbon cycling and storage in mangrove forests[J]. *Annu Rrv Mar Sci*, 2014, 6(1): 195-219.
- [3] ARNAUD M, KRAUSE S, NORBY R J, et al. Global mangrove root production, its controls and roles in the blue carbon budget of mangroves[J]. *Global Change Biol*, 2023, 29(12): 3256-3270.
- [4] LIU H X, REN H, HUI D F, et al. Carbon stocks and potential carbon storage in the mangrove forests of China[J]. *J Environ Manage*, 2014, 133(1): 86-93.
- [5] 林秋莲, 顾肖璇, 陈昕韩, 等. 红树植物秋茄替代互花米草的生态修复评估: 以浙江温州为例[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(6): 1761-1768.
- [6] Food and Agriculture Organization. The world's mangroves 1980-2005[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007: 9-13.
- [7] RICHARDS D R, FRIESS D A. Rates and drivers of mangrove deforestation in Southeast Asia, 2000-2012[J]. *PNAS*, 2016, 113(2): 344-349.
- [8] LUO Y Y, NOT C, CANNICCI S. Mangroves as unique but understudied traps for anthropogenic marine debris: a review of present information and the way forward[J]. *Environ Pollut*, 2021, 271(1): 116291-116299.
- [9] 王文卿, 张林, 张雅棉, 等. 红树林退塘还林研究进展[J]. *厦门大学学报 (自然科学版)*, 2021, 60(2): 348-354.
- [10] 范航清, 莫竹承. 广西红树林恢复历史、成效及经验教训[J]. *广西科学*, 2018, 25(4): 363-371, 387.
- [11] YANG Y, YU K, FENG H. Effects of straw mulching and plastic film mulching on improving soil organic carbon and nitrogen fractions, crop yield and water use efficiency in the Loess Plateau, China[J]. *Agr Water Manage*, 2018, 201(1): 133-143.
- [12] MANDAL A, MAJUMDER A, DHALIWAL S S, et al. Impact of agricultural management practices on soil carbon sequestration and its monitoring through simulation models and remote sensing techniques: a review[J]. *EST*, 2022, 52(1): 1-49.
- [13] YU C X, FENG J X, YUE W Z, et al. The role of blue carbon stocks becomes more labile with mangrove development[J]. *Ecol Indic*, 2023, 154(1): 110634-110643.
- [14] 鲁如坤. 土壤化学农业分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 166-169.
- [15] 陈小花, 陈宗铸, 雷金睿, 等. 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浓度[J]. *湿地科学*, 2022, 20(4): 499-507.
- [16] 胡慧蓉, 马焕成, 罗承德, 等. 森林土壤有机碳分组及其测定方法[J]. *土壤通报*, 2010, 41(4): 1018-1024.
- [17] 熊燕梅, 吴晓东, 陈玉军, 等. 退塘还林中地形和植被恢复方式对红树林恢复效果影响[J]. *广东海洋大学学报*, 2023, 43(4): 122-128.
- [18] 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.
- [19] 李燕, 赵志忠, 王鸿平, 等. 海南东寨港红树林湿地沉积物有机碳的分布特征[J]. *安徽农业大学学报*, 2018, 45(2): 268-273.
- [20] 张耀鸿, 王艳玲, 李仁英, 等. 互花米草入侵对潮滩土壤活性有机碳组分的影响[J]. *土壤通报*, 2012, 43(1): 102-106.
- [21] 陈顺洋, 安文硕, 陈彬, 等. 红树林生态修复固碳效果的主要影响因素分析[J]. *应用海洋学学报*, 2021, 40(1): 34-42.
- [22] KAUFFMAN J B, BERNARDINO A F, FERREIRA T O, et al. Shrimp ponds lead to massive loss of soil carbon and greenhouse gas emissions in northeastern Brazilian mangroves[J]. *Ecol Evol*, 2018, 8(11): 5530-5540.
- [23] HANKE A, CERLI C, MUHR J, et al. Redox control on carbon mineralization and dissolved organic matter along a chronosequence of paddy soils[J]. *Eur J Soil Sci*, 2013, 64(4): 476-487.
- [24] 赵泽阳, 赵志忠, 付博, 等. 海南岛北部地区红树林湿地土壤有机碳分布规律及影响因素[J]. *广东农业科学*, 2018, 45(12): 49-55.
- [25] 许延昭, 马维伟, 李广, 等. 尕斯库勒湖湿地植被退化过程中土壤轻重组有机碳动态变化特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 205-211.
- [26] 张哲, 王邵军, 李霁航, 等. 土壤易氧化有机碳对西双版纳热带森林群落演替的响应[J]. *生态学报*, 2019, 39(17): 6257-6263.
- [27] 许梦璐, 吴炜, 颜铮明, 等. 滨海滩涂不同土地利用类型土壤活性有机碳浓度与垂直分布[J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2020, 44(4): 167-175.
- [28] 徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 等. 桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征[J]. *环境科学*, 2019, 40(3): 1491-1503.
- [29] JANDL R, SOLLINS P. Water-extractable soil carbon in relation to the belowground carbon cycle[J]. *Biol Fert Soils*, 1997, 25: 196-201.
- [30] 张金波, 宋长春. 土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标[J]. *生态环境*, 2003, 12(4): 500-504.
- [31] LIPSON D A, SCHMIDT S K, MONSON R K. Carbon availability and temperature control the post-snowmelt decline in alpine soil microbial biomass[J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32(4): 441-448.
- [32] 周雅心, 陈钰, 郑毅, 等. 中国典型滨海湿地转变为养殖塘对土壤细菌多样性及群落结构的影响[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(6): 2402-2413.
- [33] 辛琨, 颜葵, 李真, 等. 海南岛红树林湿地土壤有机碳分布规律及影响因素研究[J]. *土壤学报*, 2014, 51(5): 1078-1086.
- [34] SHAO X X, YANG W Y, WU M. Seasonal dynamics of soil labile organic carbon and enzyme activities in relation to vegetation

- types in Hangzhou Bay tidal flat wetland[J]. *PLoS One*, 2015, 10(11): e0142677.
- [35] 刘亚男, 郗敏, 张希丽, 等. 中国湿地碳储量分布特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(7): 2481-2489.
- [36] 刘江伟, 徐海东, 林同岳, 等. 海涂围垦区不同林分土壤活性有机碳垂直变化特征[J]. *林业科学研究*, 2022, 35(3): 18-26.
- [37] 肖烨, 黄志刚, 武海涛, 等. 三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及浓度差异[J]. *生态学报*, 2015, 35(23): 7625-7633.
- [38] 章琪, 袁旭音, 韩磊, 等. 不同类型河岸带土壤活性有机碳空间分布及影响因素[J]. *环境科技*, 2017, 30(5): 12-17.
- [39] 高宇. 中国典型红树林湿地沉积物碳库分布特征及控制因子研究[D]. 北京: 清华大学, 2019: 78-79.
- [40] 徐薇薇, 乔木. 干旱区土壤有机碳浓度与土壤理化性质相关分析[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(6): 1558-1561.
- [41] 徐侠, 陈月琴, 汪家社, 等. 武夷山不同海拔高度土壤活性有机碳变化[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 539-544.