

DOI: 10.5846/stxb202105081203

陈小华, 陈宗铸, 雷金睿, 吴庭天, 李苑菱. 清澜港红树林湿地典型群落类型沉积物活性有机碳组分分布特征. 生态学报, 2022, 42(11): 4572-4581.
Chen X H, Chen Z Z, Lei J R, Wu T T, Li Y L. Distribution characteristics of active organic carbon components in sediments of typical community types of mangrove wetland in Qinglan Port. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4572-4581.

清澜港红树林湿地典型群落类型沉积物活性有机碳组分分布特征

陈小华^{1,2,3}, 陈宗铸^{1,2,3,*}, 雷金睿^{1,2,3}, 吴庭天^{1,2,3}, 李苑菱^{1,2,3}

1 海南省林业科学研究院(海南省红树林研究院), 海口 571100

2 海南省热带林业资源监测与应用重点实验室(筹), 海口 571100

3 海口市湿地保护工程技术研究开发中心, 海口 571100

摘要: 滩涂海岸红树林生态系统通常具有较高的土壤养分, 尤其是沉积物有机碳含量。海南岛红树林种类丰富且生长较好, 通过对红树林沉积物有机碳组分的基础研究有利于提高对红树林湿地固碳能力的评估精度, 加深对海洋蓝碳的认识。以清澜港红树林 5 种典型群落类型为对象, 比较分析表层土壤(0—10 cm) 总有机碳(TOC)、微生物生物量碳(MBC)、易氧化有机碳(EOC)、可溶性有机碳(DOC) 含量差异及其与土壤因子之间的相关性。结果表明: (1) 不同群落类型间, 土壤 TOC、MBC、DOC 和 EOC 含量均值分别为 66.76 g/kg、177.08 mg/kg、25.49 mg/kg 和 2.34 g/kg。对比发现, 土壤 TOC 在角果木群落中含量最高, 但各群落间无显著差异; 土壤 MBC 在不同群落间存在显著差异, 其中角果木群落和杯萼海桑群落显著高于榄李群落; 土壤 DOC 在不同群落间存在显著差异, 其中海莲群落和角果木群落显著高于其余群落; 土壤 EOC 在不同群落间存在显著差异, 其中角果木群落显著高于海莲群落和正红树群落。(2) 活性有机碳各个组分占总有机碳的比例均值大小依次为 EOC>MBC>DOC。土壤 EOC、MBC、DOC 的分配比例分别介于 3.23%—4.02%、0.22%—0.36%、0.02%—0.08% 之间。(3) 冗余分析表明, 土壤 TN 对土壤有机碳组分含量的单独解释率最高。土壤 pH 在土壤的单独解释率最低, 其对土壤有机碳组分含量影响较小。(4) 土壤 TOC、MBC、DOC、EOC 与土壤 TN、含水量(SWC) 呈极显著正相关。综上所述, 潮位以及不同群系类型引起的土壤理化性质共同影响着土壤活性有机碳组分的浓度。

关键词: 沉积物; 土壤因子; 微生物生物量碳; 易氧化有机碳; 可溶性有机碳

Distribution characteristics of active organic carbon components in sediments of typical community types of mangrove wetland in Qinglan Port

CHEN Xiaohua^{1,2,3}, CHEN Zongzhu^{1,2,3,*}, LEI Jinrui^{1,2,3}, WU Tingtian^{1,2,3}, LI Yuanling^{1,2,3}

1 Hainan Academy of Forestry(Hainan Academy of Mangrove), Haikou 571100, China

2 Hainan Key Laboratory of Monitoring and Application of Tropical Forestry Resources(Plan), Haikou 571100, China

3 Haikou Wetland Protection Engineering Technology Research and Development Center, Haikou 571100, China

Abstract: Mangrove ecosystems in tidal flats usually contain a large proportion of soil nutrients, especially organic carbon content in sediments. The basic research on organic carbon components of the sediments in the large variety of luxuriant mangrove forests in Hainan Island can help more accurately evaluate the carbon sequestration capacity of mangrove wetlands and improve the knowledge about marine blue carbon. This paper comparatively analyzes the different contents of total organic carbon (TOC), microbial biomass carbon (MBC), easily oxidized organic carbon (EOC), and dissolved organic

基金项目: 省属科研院所技术创新专项项目(jscx202023); 海南省科研院所技术创新专项基础性科研工作(jcxk202003)

收稿日期: 2021-05-08; **网络出版日期:** 2022-02-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenzongzhu@126.com

carbon (DOC) in the topsoil (0—10 cm) in five typical populations of mangrove in Qinglan Port and their correlation with soil factors. The result shows that (1) the average contents of TOC, MBC, DOC and EOC in the surface soils in different populations of mangrove are 66.76 g/kg, 177.08 mg/kg, 25.49 mg/kg, and 2.34 g/kg, respectively. According to the comparative analysis, the content of TOC is the highest in the soil in the *Ceriops tagal* community, but it is not significantly different among all the communities; The content of MBC in the soil is significantly different among all flora communities, where the content of MBC in the soil in *Ceriops tagal* community and *Sonneratia alba* community is much higher than that in *Lumnitzera racemosa* community. The content of DOC in the soil in all communities is significantly different, where the content of DOC in the soil in *Bruguiera sexangula* community and *Ceriops tagal* community is much higher than that in other communities. The content of EOC in the soil in all communities is significantly different, where the content of EOC in the soil in *Ceriops tagal* community is much higher than that in *Bruguiera sexangula* community and *Rhizophora Apiculata* community. (2) The average ratio of active organic carbon components to total organic carbon in MBC is higher than in DOC, and that in EOC is the highest. The distribution ratios of EOC, MBC and DOC in soil are between 3.23% and 4.02%, 0.22% and 0.36%, and 0.02% and 0.08% respectively. (3) Redundancy analysis shows that total nitrogen (TN) in soil is more justified to exclusively prove organic carbon components in the soil. Soil pH is less justified to exclusively prove the organic carbon component in the soil. (4) TOC, MBC, DOC and EOC in soil are positively correlated with soil TN and soil water content (SWC). In conclusion, tidal level soil physical and chemical properties caused by different biotic communities jointly affect the concentration of soil active organic carbon components.

Key Words: sediment; edaphic factor; microbial biomass carbon; readily oxidized organic carbon; dissolved organic carbon

红树林是最具生产力的生态系统之一,它们主要生长在热带和亚热带低洼潮间带的缺氧和含盐基质中^[1-2]。红树林通过物理、生化和生物活动与邻近的生态系统(例如海草床、珊瑚礁和河口)共存,同时保持孤立状态^[3]。据统计,这些生态系统具有为物种创造栖息地、防风消浪、护堤固滩、促淤造陆、净化海水等一系列重要服务^[4],同时红树林固碳能力强,被认为是富含碳的生态系统之一,其碳储量是陆地森林的4—8倍^[5]。海南岛拥有我国植物种类最丰富、生态系统结构最完整的红树林生态系统,经调查和文献查阅^[6-7],海南的红树林植物种类丰富,适宜红树林生长的环境多样复杂,形成的红树林群落类型也多样复杂,主要集中在东北部沿海市县。海南省还进一步计划到2025年,新增红树林面积2000hm²。因此,能够实现准确评估红树林湿地的碳储存能力,对于保护和恢复海洋蓝色碳汇以及气候治理工作具有重要的意义。

随着气候变化和海平面上升,已经进行了许多研究来量化气候、潮汐、群落组成等因素对红树林土壤碳储量的影响^[8-9]。然而,关于红树林土壤有机碳的组成和稳定机制研究较少。土壤有机碳由功能不同的组分在不同分解和再形成条件下构成,根据不同的稳定性和周转时间,可将土壤有机碳库划分为活性碳库、慢性碳库和惰性碳库^[10]。其中,土壤活性有机碳是土壤碳库中较为活跃的那部分^[11],通常可用土壤微生物生物量碳(MBC, microbial biomass carbon)、可溶性有机碳(DOC, dissolved organic carbon)、易氧化有机碳(EOC, easily oxidized organic carbon)和轻组有机碳(LFOC, light fraction organic carbon)等进行表征^[12-13],其中土壤微生物生物量碳是土壤有机碳的重要组成部分,可用于反映土壤肥力状况^[14];土壤可溶性有机碳具有可溶于水的特性,能直接被土壤微生物所利用^[15];土壤易氧化有机碳是土壤有机碳的主要组成部分,对环境变化比较敏感,可用于反映土壤的稳定性^[16]。相较于土壤总有机碳,土壤活性有机碳更能及时反映土壤碳库的变化,对了解土壤碳动态和指示全球气候变化具有重要意义^[17]。近年来,国内外学者先后对福建漳江口红树林^[18-20]、盐城滩涂和滨海湿地^[21-22]、亚热带张江河口红树林^[23]、黄河三角洲盐沼^[24]等不同湿地类型土壤活性有机碳组分进行了研究,这些研究表明土壤活性有机碳组分的含量不仅受到植物群落类型影响,还与土壤pH、含水量、土壤氮磷养分等关系密切,且不同活性有机碳组分对土壤理化性质响应的敏感程度也存在差异。

海南省清澜港红树林湿地是海南岛面积第二大的滩涂海岸湿地,该区红树林分布面积较大且集中连片,树种资源及其丰富,主要的优势树种有海莲 (*Bruguiera sexangula*)、榄李 (*Lumnitzera racemosa*)、红海榄 (*Rhizophora stylosa*)、正红树 (*Rhizophora Apiculata*) 等,其中榄李为高潮位植物,是常见的其它红树林植物群落的主要伴生植物,以小面积单优群落方式存在,生长良好;海莲是海南东海岸较常见的高潮位红树林代表种,该植物群落在清澜港发育良好;正红树在海南文昌清澜港、三亚青梅港、三亚河和儋州新盈等均有分布,该种群在清澜港发育较好;角果木是海南较常见的中偏高潮位红树林代表种,该植物种群在清澜港发育良好;杯萼海桑为中偏低潮位植物,在清澜港发育较好。以上 5 种群落类型均为真红树类型。本文以清澜港红树林湿地 5 种群落类型(榄李、海莲、正红树、角果木 (*Ceriops tagal*)、杯萼海桑 (*Sonneratia alba*)) 为研究对象,通过对清澜港红树林湿地生态系统中 5 个群落表层土壤有机碳组分和基本理化因子的分析,阐明红树林湿地不同群落土壤碳库及其组分的分布特征,并分析影响土壤有机碳活性碳库的影响因子,以期后续清澜港红树林湿地土壤固碳能力评估研究提供基础数据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地概况

研究区位于海南岛文昌清澜港红树林自然保护区 (110°40′—110°48′E, 19°22′—19°35′N)。该保护区由文昌江和文教河汇入湾内,呈口窄内宽的漏斗状形态,形成的潮间带较宽,风浪微弱,平均径流量小,有利于淤泥的堆积。另外,该区潮汐现象呈现出不规则的半日潮特点,最高和最低潮位分别为 2.38 m、0.01 m,平均潮差 0.75 m,以上条件形成的微环境为红树林提供了优越的生长条件,是典型的河口湿地生态系统。保护区处于热带季风气候地带,年平均气温为 23.9℃,年均降雨量 1799.4 mm 左右。研究地内由海向陆分别生长着海莲(尖瓣海莲)、红树+海桑-白骨壤、海桑(杯萼、大叶、海南海桑)、榄李(红榄李)等群落,本次研究范围内高程值介于 1.45—7.01 m 之间。

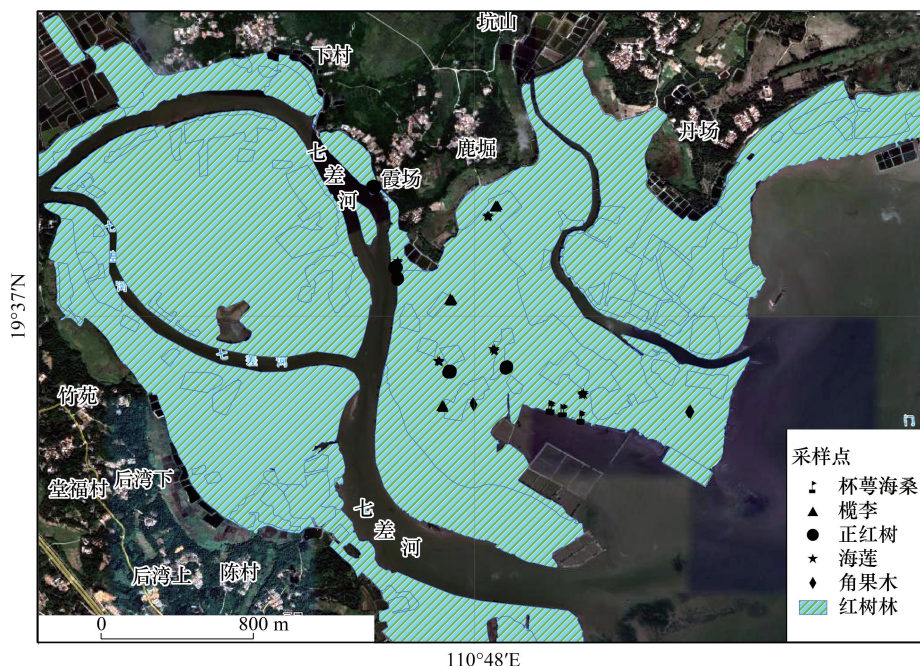


图 1 清澜港红树林湿地采样点分布示意图

Fig.1 Distribution of sampling points of Mangrove Wetlands in Qinglan Port

1.2 采样点设置与样品采集

2021 年 3 月在研究地的 5 种植物群落进行了采样,采样点基本信息如表 1 所示。在 5 个植物群落中随机

设置 10 m×10 m 样方 18 个。在每个样方中记录物种、胸径、位置等信息。分别在土壤 0—10 cm(表层)深度以多点混合采样方式采集土壤样品,共采集 54 份土样,装入塑料密封袋带回实验室。样品带回后剔除可见的动植物残体和石块,四分法取出适量土壤样品分成两部分,一部分鲜土放在 4℃ 冰箱中保存,用于测量土壤可溶性有机碳(DOC, dissolved organic carbon)、微生物生物量碳(MBC, microbial biomass carbon);另一部分经风干、磨碎,过筛后装密封袋保存,用于测定土壤 pH、全氮(TN, total nitrogen)、全磷(TP, total phosphorus)、全钾(TK, total kalium)、土壤总有机碳(TOC, total organic carbon)、易氧化有机碳(EOC, easily oxidized organic carbon)等。采样点分布情况详见图 1。

表 1 采样点基本信息
Table1 Basic information of the sampling points

群落类型 Community types	样方数 Number of samples	平均株数 Mean Trees/100m ²	平均胸径(标准差)/cm Mean DBH (Standard deviation)	树种组成 Species composition
海莲(BS)	5	32	10.25(2.41)	以海莲占绝对优势,伴生种有海漆(<i>Excoecaria agallocha</i>)和榄李
正红树(RA)	5	39	8.96(1.41)	以正红树为主,伴生种有海莲、木果楝(<i>Xylocarpus granatum</i>)、海漆、角果木、榄李、杯萼海桑
杯萼海桑(SA)	3	35	9.85(0.88)	杯萼海桑
榄李(LR)	3	91	4.86(0.61)	以榄李占绝对优势,伴生种有角果木、海莲
角果木(CT)	2	92	4.40(0.61)	以角果木为主,其次是海莲,伴生种有榄李、正红树和白骨壤(<i>Avicennia marina</i>)

DBH:胸径 Diameter at breast height;BS:海莲 *Bruguiera sexangula*;RA:正红树 *Rhizophora Apiculata*;SA:杯萼海桑 *Sonneratia alba*;LR:榄李 *Lumnitzera racemosa*;CT:角果木 *Ceriops tagal*

1.3 样品指标测定

土壤 pH 值采用酸度计法测定;土壤含水量采用烘干法测定(105℃);土壤 TN 含量采用凯氏定氮法测定;土壤 TP 含量采用钼锑抗比色法测定;土壤 TK 含量采用凯氏定氮仪测定;土壤 TOC 含量采用 Elementar TOC 总有机碳分析仪(德国)测定;土壤 MBC 含量采用氯仿熏蒸浸提法测定;土壤 DOC 含量用 K₂SO₄提取后置于总有机碳分析仪中测定;土壤 EOC 含量采用 KMnO₄氧化法测定。

1.4 数据处理

图中数据均取平均值,以便进一步分析。为检验不同群落类型土壤 TN、TP、TK 含量、土壤 pH 以及土壤 TOC、DOC、EOC、MBC 含量的差异,在剔除异常值之后采用邓肯多重比较法进行单因素方差分析(ANOVA),在 0.05 显著水平下进行。通过 Pearson 相关分析,确定了土壤理化因子与土壤活性有机碳各组分含量的相关性。所有数据统计分析在 SPSS 20.0 支持下完成。冗余分析(RDA)在 Canoco 4.5 中完成,显著性水平设定为 α=0.05。

2 结果与分析

2.1 不同群落类型土壤 TOC 及活性有机碳组分的分布特征

如图 2 所示,不同群落类型间土壤 TOC 含量介于 55.57—81.21 g/kg,均值排序为:角果木群落>榄李群落>杯萼海桑群落>正红树群落>海莲群落,不同群落类型间无显著差异。土壤 MBC 含量介于 109.16—225.89 mg/kg,均值排序为:角果木群落>杯萼海桑群落>海莲群落>正红树群落>榄李群落,其中角果木群落和杯萼海桑群落土壤 MBC 含量显著高于榄李群落($P<0.05$)。土壤 DOC 含量介于 12.91—45.47 mg/kg,均值排序为:海莲群落>角果木群落>榄李群落>杯萼海桑群落>正红树群落,其中角果木群落和海莲群落的 DOC 含量显著高于其他 3 种群落类型($P<0.05$)。土壤 EOC 含量介于 1.80—3.18 g/kg,均值排序为:角果木群落>杯萼海桑群落>榄李群落>正红树群落>海莲群落,其中角果木群落的 EOC 含量显著高于海莲群落和正红树群落($P<0.05$)。

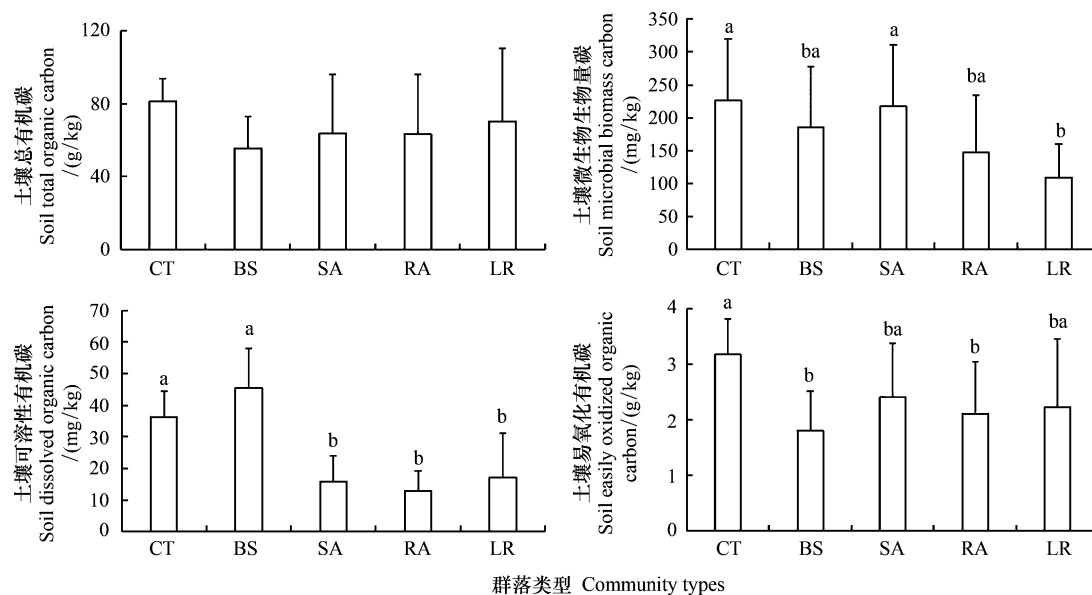


图2 清澜港红树林湿地不同植物群落土壤总有机碳及活性有机碳组分

Fig.2 Soil total organic carbon content and the content of active organic carbon components of different plant communities of Mangrove Wetlands in Qinglan Port

BS:海莲 *Bruguiera sexangula*; RA:正红树 *Rhizophora apiculata*; SA:杯萼海桑 *Sonneratia alba*; LR:榄李 *Lumnitzera racemosa*; CT:角果木 *Ceriops tagal*; 不同小写字母表示不同植物群落间存在显著差异 ($P < 0.05$)

2.2 不同群落类型土壤活性有机碳分配比例特征

5 种群落类型 MBC 占 TOC 比例均值范围为 0.22%—0.36%, 均值为 0.29%; DOC 占 TOC 比例均值范围为 0.02%—0.08%, 均值为 0.04%; EOC 占 TOC 比例均值范围为 3.23%—4.02%, 均值为 3.60%。

比较不同群落类型 3 种活性碳组分含量占土壤 TOC 含量的比例发现, EOC 占比最高, MBC 次之, DOC 最低(图3)。MBC、DOC、EOC 占 TOC 的比例在不同群落类型间存在差异, 但变化规律较不一致, 其中 MBC 占比均值从高到低依次为杯萼海桑群落>海莲群落>角果木群落>正红树群落>榄李群落, 其中杯萼海桑群落

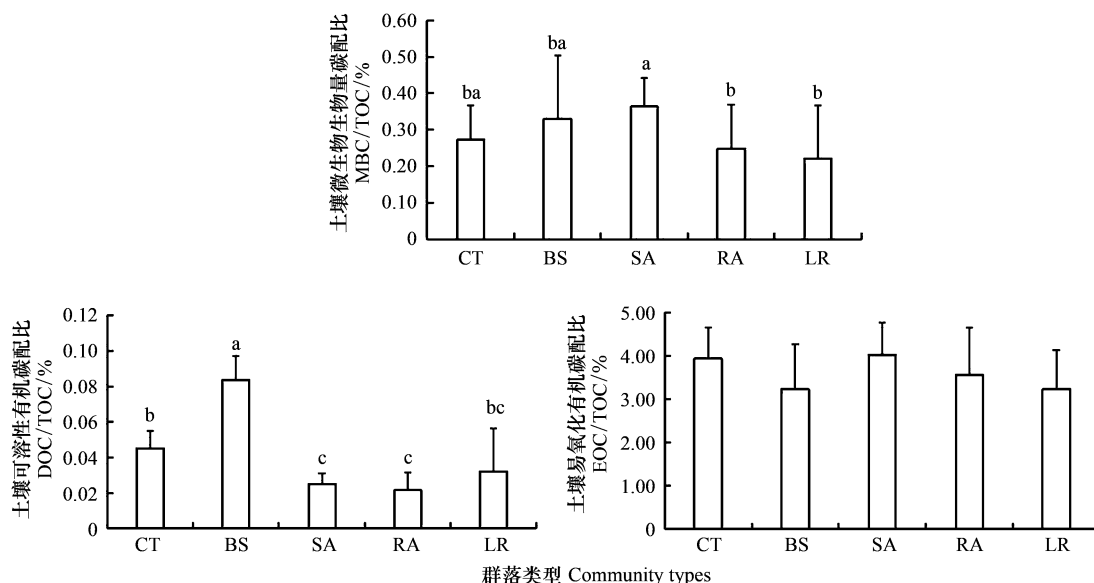


图3 不同活性有机碳组分占土壤总有机碳的比例/%

Fig.3 Percentage of different active organic carbon components of TOC

MBC 占比显著高于正红树群落和榄李群落;DOC 占比均值从高到低依次为海莲群落>角果木群落>榄李群落>杯萼海桑群落>正红树群落,其中海莲群落 DOC 占比显著高于其余群落;EOC 占比均值从高到低依次为杯萼海桑群落>角果木群落>正红树群落>海莲群落>榄李群落,群落间不存在显著差异。

2.3 不同群落类型土壤理化指标

比较 5 种群落类型表层土壤理化指标发现(图 4),土壤 pH 在不同群落类型均表现为酸性,均值介于 4.70—5.57 之间,其中海莲群落土壤 pH 显著高于角果木群落、正红树群落和榄李群落。土壤 TN 含量均值介于 3.06—4.14 g/kg 之间,群落间无显著差异。土壤 TP 含量均值介于 0.43—2.13 g/kg 之间,其中海莲群落土壤 TP 含量最高,且显著高于角果木群落、杯萼海桑群落和正红树群落。土壤 TK 含量均值介于 10.77—14.57 g/kg 之间,其中角果木群落土壤 TK 含量最高,其次是海莲群落,两者均显著高于正红树群落。土壤 SWC 含量均值介于 7.00%—16.15%之间,其中角果木群落土壤 SWC 显著高于其余群落类型。

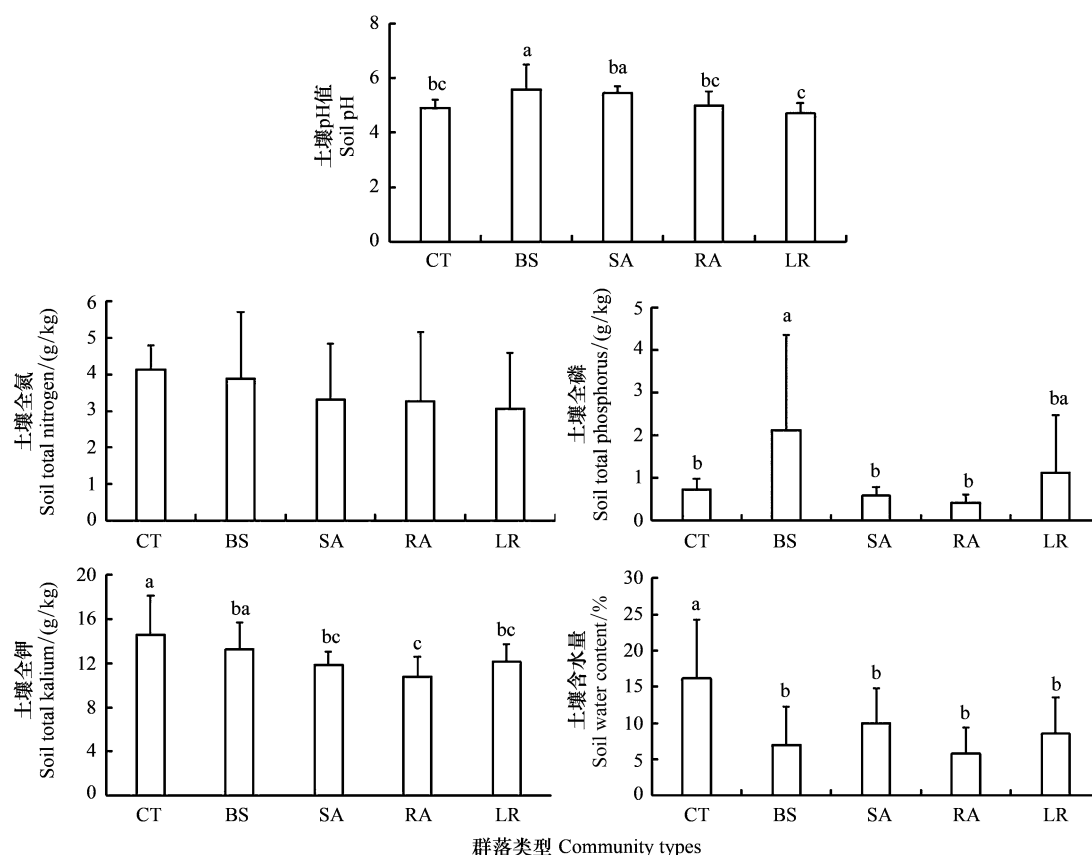


图 4 清澜港红树林湿地不同植物群落土壤理化指标

Fig.4 Soil physicochemical properties in different plant communities of Mangrove Wetlands in Qinglan Port

2.4 土壤有机碳组分与土壤因子的关系

对表层土壤应用冗余分析(RDA),分析土壤 TOC 及活性有机碳组分与对应土壤因子的相关性。TN、TP、TK、SWC、pH 作解释变量,土壤 TOC、EOC、DOC、MBC 作响应变量,进行 RDA 分析。

RDA 分析结果显示,表层土第一、第二主轴对土壤有机碳组分和土壤因子之间关系的累积解释量为 97.8%(表 2、图 5)。表层土壤中各解释变量的独立解释率大小依次为 TN、SWC、TP、TK、pH,解释率分别为 46.0%、35.1%、9.8%、5.1%、1%,其中 TN、SWC 对土壤有机碳组分含量的解释率达到了显著水平。

由表 3 可知,土壤 TOC 与土壤 TN、土壤 SWC、土壤 MBC、土壤 DOC 和土壤 EOC 呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)正相关关系,与土壤 TP、土壤 TK 呈不显著正相关($P>0.05$),与土壤 pH 值呈不显著负相关($P>$

表 2 清澜港红树林湿地土壤有机碳组分含量的解释变量冗余分析

参数 Parameter	第 1 轴 Axis 1	第 2 轴 Axis 2
特征值 Eigenvalues	0.559	0.052
有机碳组分-环境相关性 Pseudo-canonical correlation	0.892	0.570
有机碳组分累积解释量 Explained variation (cumulative)/%	55.9	61.1
有机碳组分-环境累积解释量 Explained fitted variation (cumulative)/%	89.5	97.8

0.05)。土壤 MBC 与土壤 TN、土壤 SWC、土壤 TK 呈显著 ($P<0.05$) 及极显著 ($P<0.01$) 正相关,与土壤 TP、pH 值呈正相关关系,但相关性不显著 ($P>0.05$)。土壤 DOC 与土壤 TN、土壤 SWC、土壤 TP、土壤 TK 呈显著 ($P<0.05$) 及极显著正相关 ($P<0.01$),与土壤 pH 呈不显著正相关 ($P>0.05$)。土壤 EOC 与土壤 SWC、土壤 TN 呈极显著正相关 ($P<0.01$),与土壤 pH、土壤 TP、土壤 TK 呈不显著正相关 ($P>0.05$)。因此认为,土壤 TN 和含水量对土壤活性有机碳库组分含量具有显著影响作用;同时,土壤 MBC、EOC、DOC 也可作为红树林湿地土壤有机碳含量变化的敏感性指标。

3 讨论

3.1 红树林湿地土壤总有机碳含量差异

红树林土壤有机碳主要来源于红树林凋落物的分解或邻近的波浪、潮汐和河流^[25],且土壤有机碳的输入主要发生在表层(0—20 cm)。有研究也指出,红树林恢复对土壤有机碳含量和储量的影响在上层土壤中更为显著^[26]。因此,不同的植被群落所形成的地表凋落物种类、数量、质量和分解速率等存在差异,从而改变土壤碳来源和碳输出的方式,表层土壤总有机碳含量差异尤为凸显^[14]。

本研究中,不同红树林群落类型的土壤有机碳含量介于 55.57—81.21 g/kg 之间,Gao 等^[27]研究的福建、广东、东寨港和文昌 1 m 深土壤有机碳含量介于 12.1—49.0 g/kg 之间,对比而言,本研究 5 种群落类型表层土壤有机碳含量均较高,同时也明显高于福建九龙江河口表层土壤(0—10 cm)有机碳含量(16.31 g/kg)^[28]。分析以上差异性原因,一方面与有机碳含量研究的土层存在差异有关,另一方面主要考虑不同水热条件引起的地上植被对有机碳的输入和输出方式不同。本研究 5 种红树林群落类型的土壤有机碳含量存在差异但不显著,由此看出,在清澜港红树林群落生长好、群落类型多样且复杂以及生态系统结构完整条件下所形成的区域土壤母质基本一致。

3.2 红树林湿地土壤活性有机碳组差异性分析

土壤活性有机碳是土壤碳库中较为活跃的那部分,具有有效性高、稳定性差、易周转易氧化等特点^[11],可作为土壤碳库动态变化的重要敏感性指标^[29]。其中土壤 EOC 是有机碳中最先被氧化的部分,是土壤有机碳中周转最快的组分,可作为评估土壤碳库稳定的敏感性指标^[30]。土壤 DOC 是土壤有机碳中最活跃的部分,具有可溶解性且转移速度较快,同时也是土壤微生物可直接利用的有机碳源^[31]。土壤 MBC 可以反映土壤微

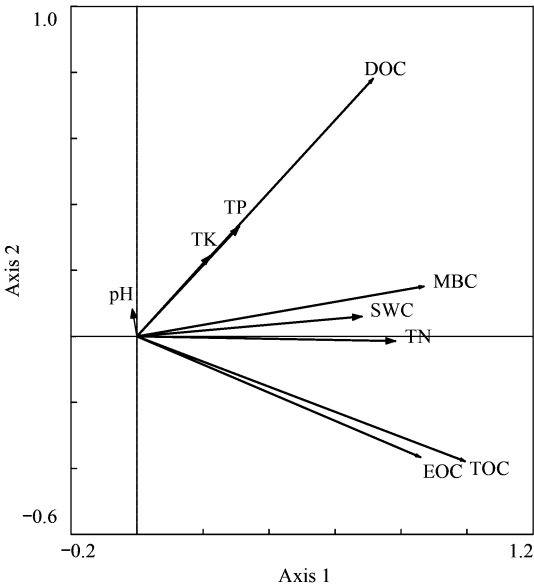


图 5 清澜港红树林湿表层土壤有机碳组分与土壤因子的 RDA 分析

Fig.5 RDA of soil organic carbon components and soil factors in surface soil of Mangrove Wetlands in Qinglan Port

pH: 土壤 pH 值; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; TK: 全钾 Total kalium; SWC: 土壤含水量 Soil water content; TOC: 总有机碳 Total organic carbon; EOC: 易氧化有机碳 Easily oxidized organic carbon; DOC: 可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; MBC: 微生物生物量碳 Microbial biomass carbon; RDA: 冗余分析 Redundancy analysis

生物量的大小,对森林生态系统碳循环作用及其重要^[32],主要受凋落物的种类和数量的影响^[14]。

表 3 土壤有机碳及其活性组分与土壤养分、pH 值相关性

Table 3 Correlation coefficient between soil organic carbon and active organic carbon fractions and soil nutrients and pH value

指标 Indicators	TOC	MBC	DOC	EOC	pH	SWC	TN	TP
MBC	0.491 **	1						
DOC	0.361 *	0.463 **	1					
EOC	0.822 **	0.561 **	0.381 **	1				
pH	-0.268	0.055	0.083	0.010	1			
SWC	0.585 **	0.683 **	0.533 **	0.611 **	0.059	1		
TN	0.855 **	0.636 **	0.536 **	0.625 **	-0.368 **	0.550 **	1	
TP	0.240	0.259	0.623 **	0.093	-0.323 *	0.275	0.504 **	1
TK	0.091	0.313 *	0.360 *	0.159	0.211	0.406 **	0.089	0.041

MBC: 微生物生物量碳 Microbial biomass carbon; DOC: 土壤可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; EOC: 易氧化有机碳 Easily oxidized organic carbon; SWC: 土壤含水量 Soil water content; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; TK: 全钾 Total kalium; * 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$

本研究中,不同红树林群落类型土壤 EOC、MBC 和 DOC 含量均值均表现为:EOC>MBC>DOC,变化范围分别为 1.80—3.18 g/kg、109.16—225.89 mg/kg、12.91—45.47 mg/kg。不同群落间土壤活性有机碳含量存在显著差异,土壤 MBC 在不同群落间表现为角果木群落最高,其次是杯萼海桑,均显著高于榄李群落;土壤 DOC 在不同群落间表现为海莲最高,其次是角果木群落,均显著高于其余群落;土壤 EOC 在不同群落间表现为角果木群落最高,显著高于海莲群落和正红树群落。由此看出,不同群落类型间土壤活性有机碳含量变化规律不一致。在土壤有机碳含量差异不显著情况下,5 种群落类型间土壤活性有机碳含量存在显著差异,说明土壤活性有机碳(MBC、EOC、DOC)更能反映出土壤性质的微小变化,与大多数学者研究结论一致^[12—16]。总结分析不同群落类型间表层土壤活性有机碳含量的差异,原因在于表层土壤养分来源于植被凋落物分解和植物根系分泌物,而湿地表层土壤又受到潮汐作用堆积碳源物,形成土壤上层适宜的微生物生境^[33]。本研究结论主要来源于两个方面(图 1 和表 1),一是树种生长特性不同,各群落优势树种适宜生长潮位不一致,不同潮位条件下存在土壤水分、养分特征的差异;二是群落组成不同,除了杯萼海桑群落,其余群落均有伴生植物,群落结构组成不同会引起地表凋落物数量和质量的差异。以上因素均影响了土壤有机质的输入和输出。

3.3 红树林湿地土壤活性有机碳分配比

土壤活性有机碳分配特征更能反映植被类型对土壤碳转化的影响^[33]。红树林湿地不同植物群落的生境条件因分布位置不同而存在差异,会形成各自独特的土壤有机质动态变化过程,以及活性碳组分的相对含量也会发生改变。有研究认为,土壤 EOC 占 TOC 的比例越高,土壤有机碳活度越强,土壤有机质的积累能力越弱^[33—34]。本研究中,5 种植被群落土壤 EOC 占 TOC 的比例在 3.23%—4.02%,表现为杯萼海桑群落>角果木群落>正红树群落>海莲群落>榄李群落。结果显示距离河口更近的杯萼海桑群落土壤群落土壤活性大,土壤有机碳碳库的生物可利用性高。

土壤 DOC 占 TOC 的比例可反映土壤有机碳的稳定性及淋溶情况,当土壤 DOC 占比越大,说明土壤有机碳的活性越大,被淋溶、风蚀的强度越大。本研究认为:5 种红树林植被群落可溶性有机碳分配比在 0.021%—0.084%,分配比值均低于 0.1%,不同群落间表现为海莲群落>角果木群落>榄李群落>杯萼海桑群落>正红树群落,其中海莲群落显著高于其余群落。总体认为该研究区红树林生态系统土壤有机碳的稳定性较高,相比较而言,海莲群落土壤有机碳稳定性较其他群落类型差,容易受雨水淋溶和潮水冲刷的影响。

土壤 MBC 占 TOC 的比例可以反映土壤活性有机碳库的周转速率^[34]。本研究中 5 种红树林群落土壤微生物生物量碳分配比例在 0.22%—0.36%,明显低于其他学者研究结论(1%—5%)^[35]。分析原因,可能是由于采取红树林修复与保护措施后,植被在恢复过程中,土壤微生物生物量碳的增量远小于土壤有机碳的累计

速率所致。可以认为该研究区红树林群落土壤有机碳正处于快速积累阶段。

3.4 红树林湿地土壤活性有机碳组分含量的影响因子

红树林湿地土壤有机碳及活性有机碳含量的变化受多方因素的共同影响^[36],且不同活性有机碳组分对土壤理化性质响应的敏感程度也存在差异^[37]。例如,陈志杰等^[19]在福建漳江口红树林是的研究发现,土壤 MBC、LFOC、HFOC、FPOC 与土壤速效 K 显著相关。徐耀文等^[38]研究认为,土壤 TN、TP 含量、pH 值与土壤 SOC 极显著相关。习盼等^[21]的研究认为,与土壤 SWC 指标相比,地上生物量、土壤 pH 对土壤有机碳组分含量的单独解释最高。本研究中,土壤 EOC、MBC、DOC 与土壤 TN、土壤 SWC 呈极显著正相关。

RDA 分析发现,土壤 TN 和土壤 WSC 对土壤有机碳组分含量的单独解释率最高,土壤 TN、土壤 WSC 与土壤 TOC 和 3 种活性有机碳含量为显著正相关。总体上,土壤 TN 和土壤 WSC 对清澜港红树林湿地土壤有机碳组分含量影响较大,较高的土壤 TN 和土壤 WSC 有利于增加土壤有机碳组分含量。土壤 pH 对土壤的单独解释率最低,与土壤 TN、SWC 和 TP 相比,土壤 pH 对土壤有机碳组分含量影响较小。本研究中土壤 TOC 与土壤 pH 呈负相关,这与其他研究结果一致^[39]。当土壤 pH 值介于 6—8 时,有利于促进土壤有机碳的分解,原因是微生物在该 pH 范围内活性增强^[40—41]。Li 等^[25]指出,分解对红树林沉积物碳埋藏速率的决定起着关键作用,分解速度越快,碳埋藏速率越低。Gao 等^[27]指出,当土壤 pH 呈现出相对酸性时,可能会对土壤微生物生长有抑制作用,造成微生物对土壤有机碳含量的分解减少。Sun 等^[23]研究还指出,较低的土壤 pH 值会促使铝/腐植酸络合物量的增加,进而加速土壤 C 的积累。结合前人研究结论推测,本研究土壤 pH 值介于 4.90—5.49 之间,认为对土壤 C 的积累有促进作用。为进一步验证土壤 pH 值或土壤含水量与土壤碳的分解或积累的关系,需要对土壤微生物活性对土壤理化因子的响应进行深入研究。

4 结论

本研究只针对表层土壤的总有机碳及其活性碳组分进行分析,研究结论为:(1)相对于红树林湿地不同群落类型土壤总有机碳含量,土壤活性有机碳含量差异性更为凸显,说明红树林沉积物活性有机碳组分的浓度是评估红树林湿地固碳潜力关键因子。(2)相关性分析表明,红树林湿地土壤有机碳各组分间存在显著相关性,且 3 种土壤活性碳组分的最大影响因素是土壤总氮(TN)和土壤含水量(SWC)。

参考文献(References):

- [1] De Albuquerque Ribeiro R, Rovai A S, Twilley R R, Castañeda-Moya E. Spatial variability of mangrove primary productivity in the neotropics. *Ecosphere*, 2019, 10(8): e02841.
- [2] Ellison A M, Felson A J, Friess D A. Mangrove rehabilitation and restoration as experimental adaptive management. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 327.
- [3] Gillis L G, Bouma T J, Jones C G, Van Katwijk M M, Nagelkerken I, Jeuken C J L, Herman P M J, Ziegler A D. Potential for landscape-scale positive interactions among tropical marine ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*, 2014, 503: 289-303.
- [4] Carugati L, Gatto B, Rastelli E, Lo Martire M, Coral C, Greco S, Danovaro R. Impact of mangrove forests degradation on biodiversity and ecosystem functioning. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 13298.
- [5] Gress S K, Huxham M, Kairo J G, Mugi L M, Briers R A. Evaluating, predicting and mapping belowground carbon stores in Kenyan mangroves. *Global Change Biology*, 2017, 23(1): 224-234.
- [6] 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. *海洋通报*, 2020, 39(4): 488-497.
- [7] 张丽,廖静娟,袁鑫,穆晓东,宋茜茜,毕京鹏. 1987—2017 年海南岛海岸线变化特征遥感分析. *热带地理*, 2020, 40(4): 659-674.
- [8] Wang G, Singh M, Wang J Q, Xiao L, Guan D S. Effects of marine pollution, climate, and tidal range on biomass and sediment organic carbon in Chinese mangrove forests. *CATENA*, 2021, 202: 105270.
- [9] Feng J X, Cui X W, Zhou J, Wang L M, Zhu X S, Lin G H. Effects of exotic and native mangrove forests plantation on soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus contents and pools in Leizhou, China. *CATENA*, 2019, 180: 1-7.
- [10] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, Ojima D S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5): 1173-1179.
- [11] 肖烨,黄志刚,武海涛,吕宪国. 三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及含量差异. *生态学报*, 2015, 35(23): 7625-7633.
- [12] 张玲. 中国温带阔叶红松林不同演替系列土壤有机碳各组分特征与维持机制[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2018.

- [13] 许延昭, 马维伟, 李广, 吴江琪, 孙文颖. 沼海湿地植被退化过程中土壤轻重组有机碳动态变化特征. 水土保持学报, 2018, 32(3): 205-211.
- [14] 林建美. 塞罕坝不同林分类型土壤活性有机碳特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [15] 卫东, 戴万宏, 汤佳. 不同利用方式下土壤溶解性有机碳含量研究. 中国农学通报, 2011, 27(18): 121-124.
- [16] 袁知洋, 邓邦良, 刘宇新, 李志, 牛德奎, 郭晓敏. 武功山草甸植被小群落土壤活性有机碳与土壤养分的典型相关分析. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(2): 84-90.
- [17] Cao L, Song J M, Wang Q D, Li X G, Yuan H M, Li N, Duan L Q. Characterization of labile organic carbon in different coastal wetland Soils of Laizhou Bay, Bohai Sea. Wetlands, 2017, 37(1): 163-175.
- [18] 张祥霖, 石盛莉, 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 李志鹏. 互花米草入侵下福建漳江口红树林湿地土壤生态化学变化. 地球科学进展, 2008, 23(9): 974-981.
- [19] 陈志杰, 韩士杰, 张军辉. 土地利用变化对漳江口红树林土壤有机碳组分的影响. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2379-2385.
- [20] 孙慧敏. 漳江口红树林与互花米草土壤有机碳库及稳定性特征研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2019.
- [21] 习盼, 董倩, 张亚楠, 李想, 夏雯雯, 徐驰, 刘茂松. 盐城滩涂湿地典型植物群落土壤活性有机碳组分分布特征. 生态学杂志, 2020, 39(11): 3623-3632.
- [22] 金宝石, 闫鸿远, 张林海, 曾从盛. 中国滨海互花米草湿地土壤有机碳时空变化及其影响因素. 生态环境学报, 2016, 25(12): 2021-2027.
- [23] Sun H M, Jiang J, Cui L N, Feng W T, Wang Y G, Zhang J C. Soil organic carbon stabilization mechanisms in a subtropical mangrove and salt marsh ecosystems. Science of the Total Environment, 2019, 673: 502-510.
- [24] 李哲, 张仲胜, 李敏, 张红日, 宋晓林, 武海涛. 黄河三角洲盐沼表层土壤有机碳含量、可溶性有机碳含量及其官能团结构特征. 湿地科学, 2019, 17(6): 645-650.
- [25] Li S B, Chen P H, Huang J S, Hsueh M L, Hsieh L Y, Lee C L, Lin H J. Factors regulating carbon sinks in mangrove ecosystems. Global Change Biology, 2018, 24(9): 4195-4210.
- [26] Chen G C, Gao M, Pang B P, Chen S Y, Ye Y. Top-meter soil organic carbon stocks and sources in restored mangrove forests of different ages. Forest Ecology and Management, 2018, 422: 87-94.
- [27] Gao Y, Zhou J, Wang L M, Guo J M, Feng J X, Wu H, Lin G H. Distribution patterns and controlling factors for the soil organic carbon in four mangrove forests of China. Global Ecology and Conservation, 2019, 17: e00575.
- [28] Tian Y, Chen G C, Lu H L, Zhu H, Ye Y. Effects of shrimp pond effluents on stocks of organic carbon, nitrogen and phosphorus in soils of *Kandelia obovata* forests along Jiulong River Estuary. Marine Pollution Bulletin, 2019, 149: 110657.
- [29] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应. 生态学杂志, 1999, 18(3): 32-38.
- [30] 张哲, 王邵军, 李霁航, 曹润, 陈闽昆, 李少辉. 土壤易氧化有机碳对西双版纳热带森林群落演替的响应. 生态学报, 2019, 39(17): 6257-6263.
- [31] 李梦寻, 王冬梅, 任远, 汪西林. 不同干湿交替频率对土壤速效养分、水溶性有机碳的影响. 生态学报, 2018, 38(5): 1542-1549.
- [32] Wang M H, Wan X H, Yu Z P, Hu Z H, He Z M, Huang Z Q. Effects of tree species transition on soil microbial biomass and community structure in subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(6): 417-423.
- [33] 张文敏, 吴明, 王蒙, 邵学新, 姜小三, 周斌. 杭州湾湿地不同植被类型下土壤有机碳及其组分分布特征. 土壤学报, 2014, 51(6): 1351-1360.
- [34] 许梦璐, 吴炜, 颜铮明, 曹国华, 沈彩芹, 阮宏华. 滨海滩涂不同土地利用类型土壤活性有机碳含量与垂直分布. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2020, 44(4): 167-175.
- [35] 唐国勇, 黄道友, 童成立, 张文菊, 肖和艾, 苏以荣, 吴金水. 红壤丘陵景观单元土壤有机碳和微生物生物量碳含量特征. 应用生态学报, 2006, 17(3): 429-433.
- [36] 赵泽阳, 赵志忠, 付博, 邢瑶丽. 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. 广东农业科学, 2018, 45(12): 49-55.
- [37] 习盼. 滩涂湿地典型植物群落土壤活性有机碳组分及酶活性特征[D]. 南京: 南京大学, 2020.
- [38] 徐耀文, 姜仲茂, 武锋, 杨倩梨, 廖宝文. 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. 林业科学研究, 2020, 33(1): 62-68.
- [39] Huang X, Wang X P, Li X Z, Xin K, Yan Z Z, Sun Y G, Bellerby R. Distribution pattern and influencing factors for soil organic carbon (SOC) in mangrove communities at Dongzhaigang, China. Journal of Coastal Research, 2018, 34(2): 434-442.
- [40] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.
- [41] Zhang S P, Wang L, Hu J J, Zhang W Q, Fu X H, Le Y Q, Jin F M. Organic carbon accumulation capability of two typical tidal wetland soils in Chongming Dongtan, China. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(1): 87-94.