

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*

华国栋¹ 庄礼凤² 李家祥³ 张雪娜³
王丹枫⁴ 吴林芳²

(1. 广东省林业调查规划院, 广东 广州 510520; 2. 广州林芳生态科技有限公司, 广东 广州 510520; 3. 广东台山镇海湾红树林国家湿地公园管理中心, 广东 江门 529200; 4. 中国科学院华南植物园, 广东 广州 510650)

摘要 通过对比广东台山不同红树林群落土壤有机碳含量及其分布规律, 研究了不同红树林群落土壤有机碳含量与土壤理化指标之间的关系。以桐花树 *Aegiceras corniculatum* 群落、秋茄 *Kandelia candel* 群落、海榄雌 *Avicennia marina* 群落、无瓣海桑 *Sonneratia apetala* 群落、卤蕨 *Acrostichum aureum* 群落和老鼠簕 *Acanthus ilicifolius* 群落为研究对象, 通过采集 0~10 cm, 10~20 cm 和 20~40 cm 层次的土壤, 测定其土壤有机碳含量, 分析其主要影响因素。研究表明, 在表层土壤 0~10 cm 中, 秋茄群落和海榄雌群落的有机碳含量显著高于其他群落, 分别为 3.18% 和 3.13%; 红树林群落 0~40 cm 平均土壤有机碳密度从大到小排列顺序分别为海榄雌>秋茄群落>无瓣海桑>桐花树>老鼠簕>卤蕨。土壤有机碳含量与电导率和含水率显著正相关, 与土壤容重显著负相关。

关键词 红树林; 土壤; 有机碳; 广东台山

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2021) 06-0118-06

Contents of Soil Organic Carbon of Mangrove in Haiwan Mangrove National Wetland Park, Taishan Town, Guangdong and Their Influencing Factors

HUA Guodong¹ ZHUANG Lifeng² LI Jiexiang³ ZHANG Xuena³
WANG Danfeng⁴ WU Linfang²

(1. Guangdong Forestry Survey and Planning Institute, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 2. Guangzhou Linfang Ecology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510520, China; 3. Zhenhai Bay Mangrove National Wetland Park Management Center, Jiangmen, Guangdong 529200, China; 4. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510650, China)

Abstract This study compared the soil organic carbon content and distribution of different mangrove plantations in Taishan Town (Guangdong province) to reveal the relationship between the soil organic and soil physical and chemical properties indexes. Six different mangrove plantations, including *Aegiceras corniculatum*, *Kandelia candel*, *Avicennia marina*, *Sonneratia apetala*, *Acrostichum aureum* and *Acanthus ilicifolius* were selected in this study. Samples in the top 40 cm of the soil were sampled and then the soil physical and chemical properties were measured. The results showed that in the surface soil of 0-10 cm, the soil organic carbon of *K.*

* 基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA13020601)。

第一作者: 华国栋 (1965—), 男, 高级工程师, 主要从事林业调查、规划、监测与评价工作, E-mail: 1478055290@qq.com。

candel plantation and *A. marina* plantation was significantly higher than that of others; the carbon storage of different plantations ranked as: *A. marina*>*K. candel*>*S. apetala*>*A. corniculatum*>*A. ilicifolius*>*A. aureum*. Soil organic carbon was significantly negatively correlated with soil density, and positively correlated with the soil conductivity and water content.

Key words mangrove; soil; organic carbon; Taishan, Guangdong

海岸带“蓝碳”是指固定在海岸带湿地生态系统中的碳^[1]，它们对缓解气候变暖以及温室气体的排放具有重要作用^[2-3]。由于红树林具有生产力高和储碳量大的特点，其在全球的碳循环中具有重要位置^[4]。在全球的范围内，尽管红树林占海洋面积不足2%，但它们却贡献了10%~15%的沉积物碳^[5]。红树林群落中土壤碳储量通常占生态系统中一半以上（49%~90%）^[6]，这部分土壤中的碳主要来源于凋落物和根系的分解^[7]，因此植物群落的组成将极大地影响土壤碳库。

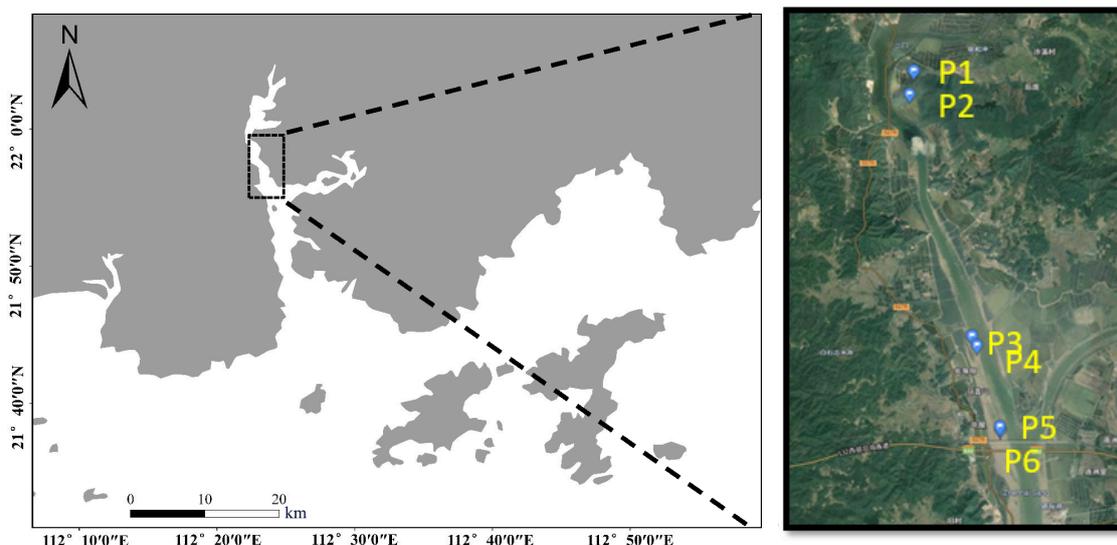
本研究以广东省江门红树林为研究区，对该区域内桐花树 *Aegiceras corniculatum* 群落、秋茄 *Kandelia candel* 群落、海榄雌 *Avicennia marina* 群落、无瓣海桑 *Sonneratia apetala* 群落、卤蕨 *Acrostichum aureum* 群落及老鼠筋 *Acanthus ilicifolius* 群落 0~40 cm 的土壤碳储量进行分析，研究不同群落与土壤碳含量之间的关系，为进一步研究红树林碳循环和有机碳储量提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究位于广东台山镇海湾红树林国家湿地公园（21°54′~21°59′ N，112°22′~112°24′ E），位于江门市西南部，琴溪河与深井河入海口河段，沿河道呈条带状分布。公园总面积 5.492 km²，其中湿地面积 5.154 km²，湿地率为 93.8%。江门市红树林资源在广东省地级市排名第二^[8]，台山镇海湾红树林是珠三角非常珍贵的“海上森林”，对维持沿海地区生态平衡、保持生物多样性等起着重要作用。

该区域属于亚热带海洋性季风气候，降雨充沛，气候常年温和且湿润，平均温度为 21.8 ℃，年平均降水量为 1 963 mm，年日照时间达 2 006 h，无霜期 333~363 d^[9]。区域地貌包括盆地、平原、丘陵、高山和滩涂等^[10]。潮汐为不规则半日潮，平均潮差 1.24 m。台山红树林的主要群落类型包括桐花树群落、秋茄群落、海榄雌群落、无瓣海



注：P1-P6 分别为桐花树、秋茄、老鼠筋、海榄雌、卤蕨和无瓣海桑群落。

Note: P1-P6 were the communities of *A. corniculatum*, *K. candel*, *A. ilicifolius*, *A. marina*, *A. aureum*, *S. apetala*, respectively.

图 1 广东台山红树林采样图

Fig. 1 Map of the study sites in Taishan, Guangdong

桑群落、卤蕨群落及老鼠筋群落等。该区域红树林以天然红树林树种为主,其中,天然红树林主要树种为海榄雌、桐花树、秋茄;人工栽培的树种是无瓣海桑、桐花树等^[1]。

1.2 研究方法

1.2.1 采样地设置 在该湿地公园内,选择桐花树、秋茄、海榄雌、无瓣海桑、卤蕨及老鼠筋等6种具有代表性人工种植群落类型设置样地,在每个类型植被内设置3个10 m × 10 m固定样方作为重复,具体样地信息见表1。采样地分布情况如图1所示。

1.2.2 样品采集及测定 在每个样方内,随机设置3个采样点。采样前,移除土壤表层的凋落物层,用内径为5 cm的采样器分别采集0~10 cm, 10~20 cm和20~40 cm层的土壤样品,共采集了162份土壤样品。将土壤混合均匀后,带回实验室。在实验室内挑出根系、石粒等杂物,风干后研磨过筛待测。采用电位法,测定土壤的pH。采用重铬酸钾外加测法测定土壤内有机碳含量。采用DDS-307电导率仪测定电导率。土壤含水量采用烘干法测定;土壤容重采用土壤环刀法现场测定。

1.2.3 数据处理 采用单因素方差分析和LSD多重比较的方法,分析各群落有机碳含量及其他指标之间的差异,并采用Pearson相关性分析方法,分析各群落有机碳含量与其它理化性质的关系。利用SPSS 13.0进行单因素方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同群落有机碳含量与土壤理化特征

不同红树林群落下0~10 cm层土壤有机碳含

量差异显著($P < 0.05$) (表2),秋茄群落和海榄雌群落下土壤有机碳含量显著高于桐花群落、无瓣海桑群落和卤蕨群落($P < 0.05$),秋茄群落有机碳含量最大,为3.18%;而在10~20 cm层土层,海榄雌群落下土壤有机碳含量最大,为3.08%,秋茄群落、老鼠筋群落、桐花树群落、无瓣海桑群落和卤蕨群落土壤有机碳含量依次减少(表2);在20~40 cm层土层中,各群落土壤有机碳含量与10~20 cm层基本一致。

土壤理化性质方面,海榄雌群落土壤含水率显著高于大部分群落($P < 0.05$)。对于土壤容重,结果显示其与土壤含水率呈显著负相关($P < 0.05$) (表3)。无瓣海桑和卤蕨群落仅在0~10 cm的土层中容重显著高于其余群落($P < 0.05$),其余土层不同群落容重差异性均不显著。不同群落土壤pH值随土壤层变化差异不大;在0~10 cm土层中,海榄雌和无瓣海桑群落的pH值显著高于其他群落($P < 0.05$);在10~20 cm土层各群落间pH值差异不显著,但在20~40 cm层土层中,无瓣海桑的pH值显著高于其他群落($P < 0.05$),为7.4。对于土壤电导率,桐花树和秋茄群落在0~10 cm和10~20 cm的土层显著高于其他群落($P < 0.05$)。

2.2 不同群落土壤有机碳密度

如图2所示,海榄雌群落土壤有机碳密度最高,为103.875 mg·hm⁻²,并显著高于除秋茄外所有群落($P < 0.05$)。其中,桐花树群落、无瓣海桑群落、卤蕨以及老鼠筋群落土壤有机碳密度分别为75.299、78.457、70.472、63.716 mg·hm⁻²。

表1 采样地基本信息

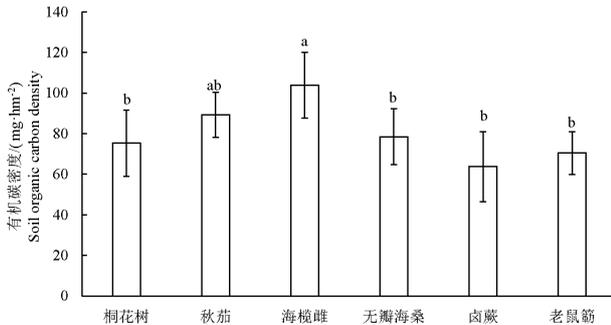
Table 1 Basic information of the sampling sites

采样地编号 Sampling site number	群落 Community	地理位置 Coordinate	种植时间 Year of plant	主要植物 Main plant type
1	桐花树群落	21°59'48"N,112°22'42"E	2010年	桐花树和老鼠筋
2	秋茄群落	21°59'25"N,112°22'38"E	2010年	秋茄、老鼠筋和卤蕨
3	海榄雌群落	21°59'19"N,112°23'45"E	2010年	海榄雌和老鼠筋
4	无瓣海桑群落	21°53'56"N,112°24'09"E	2010年	无瓣海桑和老鼠筋
5	卤蕨群落	21°53'59"N,112°24'08"E	2010年	卤蕨和互花米草 <i>Spartina alterniflora</i>
6	老鼠筋群落	21°55'28"N,112°23'40"E	2010年	老鼠筋

表 2 不同群落土壤理化特征
Table 2 Variation of soil physicochemical characteristics at different sites

指标 Index	层 /cm Layer	桐花树群落 <i>Aegiceras corniculatum</i>	秋茄群落 <i>Kandelia candel</i>	海榄雌群落 <i>Avicennia marina</i>	无瓣海桑群落 <i>Sonneratia apetala</i>	卤蕨群落 <i>Acrostichum aureum</i>	老鼠筋群落 <i>Acanthus ilicifolius</i>
碳含量 /% Carbon content	0~10	1.81 ± 0.20b	3.18 ± 0.19a	3.13 ± 0.14a	1.71 ± 0.25b	1.99 ± 0.65b	2.16 ± 0.17ab
	10~20	2.14 ± 0.46ab	3.03 ± 0.65a	3.08 ± 0.15a	2.03 ± 0.37ab	1.42 ± 0.10b	2.33 ± 0.16ab
	20~40	1.91 ± 0.23b	2.58 ± 0.35ab	3.07 ± 0.33a	2.03 ± 0.31b	1.42 ± 0.11b	2.00 ± 0.28b
含水率 /% Moisture content	0~10	50.99 ± 2.19b	51.22 ± 2.19b	57.23 ± 0.85a	40.57 ± 0.84c	38.06 ± 1.68c	55.08 ± 0.71ab
	10~20	51.34 ± 2.16b	51.82 ± 2.37b	58.06 ± 1.49a	42.28 ± 1.96c	38.86 ± 1.40c	55.07 ± 1.67a
	20~40	50.45 ± 1.69a	50.34 ± 1.52a	55.50 ± 1.92a	39.94 ± 2.29b	39.48 ± 1.86b	53.74 ± 0.97a
容重 / (g · cm ⁻³) Bulk density	0~10	0.90 ± 0.06b	0.79 ± 0.02c	0.82 ± 0.02c	0.99 ± 0.06a	1.02 ± 0.02a	0.82 ± 0.01c
	10~20	0.93 ± 0.05a	0.79 ± 0.14a	0.83 ± 0.04a	0.96 ± 0.17a	0.99 ± 0.02a	0.83 ± 0.05a
	20~40	1.02 ± 0.06a	0.78 ± 0.08a	0.85 ± 0.03a	1.06 ± 0.16a	1.02 ± 0.03a	0.83 ± 0.03a
pH	0~10	6.55 ± 0.07ab	5.99 ± 0.38b	6.81 ± 0.08a	7.07 ± 0.30a	6.37 ± 0.29ab	5.91 ± 0.06b
	10~20	6.58 ± 0.11a	6.00 ± 0.36a	6.80 ± 0.04a	6.89 ± 0.41a	6.11 ± 0.21a	5.93 ± 0.05a
	20~40	6.64 ± 0.11bc	5.99 ± 0.22c	6.74 ± 0.06b	7.4 ± 0.09a	6.06 ± 0.34c	5.95 ± 0.08c
电导率 / (ms · cm ⁻¹) Conductivity	0~10	11.0 ± 1.65a	11.1 ± 0.87a	8.16 ± 0.19ab	6.92 ± 0.49b	5.3 ± 1.00b	10.3 ± 1.04a
	10~20	10.7 ± 2.31a	11.4 ± 0.62a	8.23 ± 0.17ab	7.33 ± 0.43b	5.82 ± 1.00b	10.2 ± 0.35ab
	20~40	10.6 ± 1.68ab	11.2 ± 0.34a	8.6 ± 0.11ab	8.46 ± 0.45b	6.22 ± 1.15b	9.94 ± 0.09ab

注：表为均值 ± 标准差；不同小写字母代表不同群落同一土层数据间存在显著差异 ($P < 0.05$)。
Note: the data are mean ± standard error; different letters indicate significant differences at the same soil layer at different sites ($P < 0.05$).



注：图为均值 ± 标准差；不同小写字母代表群落间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: the data are mean ± standard error; different lowercases mean significant differences among sites at 0.05 level.

图 2 不同群落 40 cm 层土壤有机碳密度

Fig. 2 Total soil organic carbon density down to 40 cm at different sites

2.3 不同群落土壤有机碳含量与其它理化指标的关系

不同群落地 0~40 cm 层土壤有机碳与土壤电导率和含水率显著正相关 ($P < 0.05$)，与土壤容重显著负相关 ($P < 0.05$) (表 3)。土壤有机碳与 pH 值不相关。

3 结论与讨论

桐花树群落、秋茄群落、海榄雌群落、无瓣海桑群落、卤蕨和老鼠筋群落的 0~40 cm 层土壤有机碳密度分别为 75.299, 89.320, 103.875, 63.717, 70.472 mg·hm⁻²，其中海榄雌群落土壤的有机碳密度最大，卤蕨群落土壤的最小。土壤容重、电导率、含水率是影响红树林群落 0~40 cm 层土壤有机碳的主要因素。

红树林中的土壤有机碳主要来源于植被地上凋落物，地下部分根系以及海水中悬浮的有机质^[12]。在本研究中，秋茄群落和无瓣海桑的有机碳平均含量分别为 2.93% 和 1.92%，高于广西壮族自治区珍珠湾和福建九龙江口红树林秋茄和其他类型的红树林^[13-14]。秋茄林群落有机碳含量在土壤表层 (0~10 cm) 含量最高，而无瓣海桑的有机碳含量在土壤层 20~40 cm 层最高，造成这样的原因可能是红树林的根系主要分布在 20~40 cm 土壤层^[12, 15]，而且作为较高大乔木的无瓣海桑具有

表3 土壤有机碳与其它土壤理化指标的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between organic carbon contents and other physical and chemical indexes of the soil

因子 Factor	土壤有机碳 Soil organic carbon	容重 Bulk density	pH 值 pH value	电导率 Electrical conductivity
容重 Bulk density	-0.602**			
pH 值 pH value	0.007	0.352**		
电导率 Electrical conductivity	0.451**	-0.417**	-0.209	
含水率 Soil moisture content	0.582**	-0.703**	-0.113	0.499**

注: * 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关, ** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关。

Note: * indicates significant correlation at $P < 0.05$ level, ** indicates significant correlation at $P < 0.01$ level.

更深层次的根系。本研究中其他群落如海榄雌的土壤有机碳平均含量与刘美龄^[16]在海南东南港同类型群落有机碳含量相似。

台山红树林群落下土壤有机碳储量均稍低于同纬度地区下红树林群落土壤有机碳含量^[17]。除无瓣海桑外,其余群落的土壤有机碳储量呈现随土壤层深度增加而降低的趋势,这与辛琨等^[12]对海南红树林群落的研究相类似,原因可能是这两个地方土壤质地粘重,土壤表层的有机质通过淋溶作用转移到下层的速度较慢^[12]。

不同土层红树林群落土壤有机碳含量的差异不仅来源于植物种类的差异,也受到其他因素例如潮汐升降、降雨和河流等外界条件影响。区别于陆地森林,红树林生长于海陆交接的滩涂区域,在此环境中生物因素和非生物(环境)因素较为复杂,这些条件共同影响土壤有机碳的输入与输出,从而导致红树林土壤有机碳含量具有一定的不确定性^[19-20]。因此,不同研究区域,不同植物群落和不同土壤层都导致红树林土壤有机碳密度差异。周慧杰^[21]对广西壮族自治区钦州湾桐花群落研究发现,有机碳在0~10 cm达到最大值,而在海南省文昌市,桐花群落却在20~40 cm达到最大值^[12],此外还有研究者发现红树林群落中土壤层3 m的有机碳含量还是很丰富^[22]。

土壤理化性质主要通过影响土壤内部的微观环境,从而影响其有机碳固定速率,同时土壤有机碳的积累也会对土壤理化性质产生影响^[12]。一般地,土壤盐度和土壤电导率呈现显著正相关关系^[23]。在本研究中使用电导率代替盐度进行分析发现,土壤有机碳含量与电导率呈显著正相关关

系,主要原因可能是较高的土壤盐度可以抑制土壤有机碳的降解,从而促进土壤有机碳的保存^[24]。土壤有机碳与含水率成显著正相关关系,与前人之前的研究相一致^[25-26]。同时,土壤有机碳含量与土壤容重呈显著负相关,与王丽红等^[27]对崇明岛湿地土壤有机碳和土壤含水率关系分析的结果相似,主要原因可能是随着土壤容重的变大,土壤的水分和空气等发生变化,从而导致土壤孔隙度降低,结构性下降,导致土壤变得紧实,最终影响土壤有机碳含量。

本研究仅对台山红树林40 cm层的土壤有机碳含量的分布情况及理化指标进行分析,但是除了群落类型,潮位、温度和纬度等都会对红树林土壤有机碳含量产生影响,这些因素对无瓣海桑群落下土壤有机碳含量的影响还需要深入研究。

参考文献

- [1] MCLEOD E, CHMURA G L, BOUILLON S, et al. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(10): 552-560.
- [2] 王法明, 唐剑武, 叶思源, 等. 中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(3): 241-251.
- [3] 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.
- [4] 廖宝文, 张乔民. 中国红树林的分布、面积和树种组

- 成[J]. 湿地科学, 2014, 12(4): 435-440.
- [5] ALONGI D M. Carbon cycling and storage in mangrove Forests[J]. Annual Review of Marine Science, 2014, 6: 195-219.
- [6] DUARTE C M, LOSADA I J, HENDRIKS I E, et al. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(11): 961-968.
- [7] ALONGI D M. Impact of global change on nutrient dynamics in mangrove forests[J]. Forests, 2018, 9(10): 596.
- [8] 华国栋, 胡喻华, 张春霞, 等. 广东省红树林资源和适宜恢复地专项调查报告[R]. 广东省自然资源厅, 广东省林业局, 2019.
- [9] 杜鹏, 杨蕾. 2001~2006年广东省江门地区森林生态系统服务功能的经济价值评估[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(16): 7756-7758.
- [10] 李矿明, 邓小飞, 韩维栋. 广东江门沿海红树林及其它湿地植被[J]. 中南林业调查规划, 2006(1): 35-38.
- [11] 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(10): 24-27.
- [12] 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.
- [13] 于宇, 李学刚, 袁华茂. 九龙江口红树林湿地沉积物中有机碳和氮的分布特征及来源辨析[J]. 广西科学院学报, 2017, 33(2): 75-81; 86.
- [14] 詹绍芬, 黄勃, 陈玉军, 等. 不同红树林群落土壤环境有机碳比较[J]. 热带生物学报, 2015, 6(4): 397-402.
- [15] 陶玉华, 黄星, 王薛平, 等. 广西珍珠湾三种红树林林分土壤碳氮储量的研究[J]. 广西植物, 2020, 40(3): 285-292.
- [16] 刘美龄, 叶勇, 曹长青, 等. 海南东寨港红树林土壤粒径分布的分形特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2008(9): 1557-1561.
- [17] 徐耀文, 廖宝文, 姜仲茂, 等. 珠海淇澳岛红树林, 互花米草沼泽和光滩土壤有机碳含量及其影响因素[J]. 湿地科学, 2020, 18(1): 87-92.
- [18] XIONG Y, LIAO B, WANG F. Mangrove vegetation enhances soil carbon storage primarily through in situ inputs rather than increasing allochthonous sediments[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 131: 378-385.
- [19] GIRI C, OCHIENG E, TIESZEN L L, et al. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data[J]. Global Ecology Biogeography, 2011, 20(1): 154-159.
- [20] LOVELOCK C E, REEF R. Variable impacts of climate change on blue carbon[J]. One Earth, 2020, 3(2): 195-211.
- [21] 周慧杰, 莫莉萍, 刘云东, 等. 广西钦州湾红树林湿地土壤有机碳密度与土壤理化性质相关性分析[J]. 安徽农业科学, 2015(17): 120-123.
- [22] HOWARD J. 滨海蓝碳[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2018.
- [23] 刘洋, 常晓燕, 李海妮, 等. 苏北典型滨海滩涂草滩土壤盐度、电导率与含水率的关系[J]. 节水灌溉, 2015(8): 4-7.
- [24] QU W, LI J, HAN G. et al. Effect of salinity on the decomposition of soil organic carbon in a tidal wetland[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 19: 609-617.
- [25] 黄敏慧. 围垦对崇明东滩土壤有机碳组分的影响及其红外光谱学特征研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2020.
- [26] 高灯州, 曾从盛, 章文龙, 等. 闽江口湿地土壤有机碳及其活性组分沿水文梯度分布特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 216-221; 227.
- [27] 王红丽, 肖春玲, 李朝君, 等. 崇明东滩湿地土壤有机碳空间分异特征及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1522-1528.