

珠江口淇澳岛红树林湿地沉积物碳、氮分布研究

江 睿¹, 吴云超², 陈丕茂¹

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所/农业农村部南海渔业资源环境科学观测实验站/广东省渔业生态环境重点实验室, 广东 广州 510300; 2. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋生物资源与生态重点实验室, 广东 广州 510301)

摘要: 为了对珠江口红树林湿地沉积物有机质有更为全面、深入的认识, 以珠江口淇澳岛红树林湿地为对象, 对其沉积物有机碳 (TOC) 和总氮 (TN) 的含量分布、储量及来源进行了研究。结果表明, 淇澳岛 7 种主要红树 [秋茄 (*Kandelia candel*)、无瓣海桑 (*Sonneratia opetala*)、桐花 (*Aegiceras corniculatum*)、木榄 (*Bruguiera gymnorhiza*)、卤蕨 (*Acrostichum aureum*)、老鼠簕 (*Acanthus ilicifolius*)、海漆 (*Excoecaria agallocha*)] 群落表层沉积物 TOC 质量分数介于 1.125%~1.969%, TN 质量分数介于 0.058%~0.136%。其中秋茄林内 TOC 含量最高, 无瓣海桑林缘 TOC 含量最高, 而木榄林内、林缘 TOC 含量均最低, 且各红树群落 TOC 含量均呈林内大于林缘的特征。表层沉积物碳氮比 (C/N) 为 12.032~26.690, 显示出高等植物对其有机质组成具有较高的贡献率, 其中植被内源有机碳的平均贡献率约为 70.21%。受土地利用变化等因素的影响, 0~30 cm 层沉积物的 TOC 和 TN 含量均呈现出波动变化的趋势。0~30 cm 层沉积物有机碳储量 (SOC) 介于 56.83~69.54 t·hm⁻², 显示出淇澳岛红树林湿地较强的有机碳埋藏能力。

关键词: 红树林; 沉积物; 碳氮储量; 淇澳岛

中图分类号: X 171.1

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Study on distribution of sediment carbon and nitrogen in mangrove wetland of Qi'ao Island, Pearl River Estuary

JIANG Rui¹, WU Yunchao², CHEN Pimao¹

(1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resources and Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangzhou 510300, China; 2. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences/Key Laboratory of Tropical Marine Bio-resources and Ecology, Guangzhou 510301, China)

Abstract: In order to have a deep and thorough understanding of sediment organic matter in mangrove wetland of the Pearl River Estuary, we analyzed the distribution, stocks and source of soil organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) of the mangrove wetland in Qi'ao Island. The results show that the TOC content in the surficial sediment of seven main mangrove communities (*Kandelia candel*, *Sonneratia opetala*, *Aegiceras corniculatum*, *Bruguiera gymnorhiza*, *Acrostichum aureum*, *Acanthus ilicifolius*, *Excoecaria agallocha*) was 1.125%–1.969%, and the TN content was 0.058%–0.136%. Among the seven main mangrove communities, *K. candel* had the highest TOC content of inner forest, while *S. opetala* had the highest TOC content of forest edge. The lowest TOC

收稿日期: 2020-07-15; 修回日期: 2020-08-31

资助项目: 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助 (2018YB03); 中国科学院热带海洋生物资源与生态重点实验室、广东省海洋药物重点实验室、广东省应用海洋生物学重点实验室联合资助开放基金课题 (LMB20191003)

作者简介: 江 睿 (1989—), 女, 博士, 助理研究员, 从事海洋生态学研究。E-mail: jr1017241007@126.com

通信作者: 陈丕茂 (1969—), 男, 研究员, 从事渔业资源保护与利用研究。E-mail: chenpm@scsfri.ac.cn

contents of inner and edge both appeared in *B. gymnorhiza* communities. Moreover, the TOC content of inner forest was always higher than that of edge. The C/N of the surficial sediment was 12.032–26.690, showing that higher plants have a higher contribution rate to its organic matter composition. According to the C/N bivariate mixture model, about 70.21% of TOC input came from endogenous input of vegetation. Affected by factors such as land use change, TOC and TN content fluctuated in 0–30 cm soil layer. The storage of organic carbon (SOC) was 56.83–69.54 t·hm⁻², showing the strong TOC storage ability of this mangrove wetland in Qi'ao Island.

Key words: Mangrove forest; Sediment; Storage of TOC and TN; Qi'ao Island

红树林是生长在热带、亚热带潮间带的木本植物群落^[1],是介于陆地和海洋生态系统动态交界处的一种复杂的湿地生态系统^[2]。红树林是近岸海域生产力极高的生态系统,支持着沿岸区域水生生物的栖息和觅食,具有重要的生态服务功能^[3-4]。随着二氧化碳(CO₂)浓度升高,全球变暖成为 21 世纪的重大环境问题之一,沿岸生态系统中的“蓝碳”因此得到关注^[5-6]。作为 3 个重要的海岸带“蓝碳”生态系统(海草床、红树林、盐沼)之一,红树林占全球海岸带面积比例虽不足 0.5%,但每年为海岸带有机碳埋藏的贡献率却高达 10%~15% (24 Tg·Cy⁻¹,埋藏量单位,每立方码百万吨)^[7],在热带沿岸生态系统的碳平衡中发挥着重要作用^[8]。近年来,关于红树林沉积物有机碳存储量、埋藏速率及功能的研究逐渐增多^[7,9-11]。研究表明,红树林沉积物的碳储量可占其总碳储量的 50%~90%^[6]。红树林沉积物碳埋藏量受其分布区域和根系深度的影响,热带红树林沉积物碳储量明显高于亚热带^[9-10],且根系深度越大的储碳量越高^[11]。碳埋藏速率则主要受沉积速率控制,较高的沉积速率有利于有机质被迅速埋藏,进而降低其分解率^[12]。

受人类活动及全球变化的共同影响,在过去的半个世纪全球红树林湿地面积缩小了 30%~50%^[13-15];从 20 世纪 50—90 年代,中国红树林湿地面积锐减了 63.8%,广东省红树林面积也从 2.13×10⁴ hm² 减少至 1.01×10⁴ hm²^[16]。有研究表明,红树林面积缩小可造成每年 0.02~0.12 Pg (碳储量单位,10¹⁵ g) 碳释放量的增加,而红树林湿地的恢复和保护可有效抵消人类活动向大气排放的 CO₂^[17];为此,世界各地采取了一系列的红树林恢复措施以减缓并抑制其退化^[18-21]。

有关红树林沉积物的储碳研究,可为全球的碳汇研究工作提供参考资料,但由于红树林种类多样且结构复杂,对其沉积物中碳、氮有机质的研究仍相对薄弱^[22]。广东省沿海红树林资源丰富,是中国

红树林面积最大的省份^[16]。本文以珠江口区域典型红树林湿地(淇澳岛滨海湿地)为研究对象,对其沉积物碳、氮含量、储量及来源进行深入探讨,可为我国红树林沉积物储碳机制的研究提供借鉴,并可为未来的气候谈判和碳排放交易提供一定的科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

调查地点淇澳岛位于珠江口内西岸的横门河口(113°36'40"E—113°23'40"E, 22°23'40"N—22°27'38"N),属南亚热带季风气候,年均气温 24.5℃,年均空气相对湿度 79%,降水主要集中于 4—9 月,年均海水盐度 18.44,潮汐表现为不规则半日潮属性,属滨海盐渍草甸沼泽土壤^[22]。据已有调查,淇澳岛滨海湿地是目前珠江三角洲地区红树林分布最为集中且面积最大的区域^[23],红树林群落结构相对简单,以秋茄(*Kandelia candel*)和无瓣海桑(*Sonneratia opetala*)群落为主,还包括桐花(*Aegiceras corniculatum*)、木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)、卤蕨(*Acrostichum aureum*)、老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*)、海漆(*Excoecaria agallocha*),且以次生林为主。

1.2 样品采集与测定

本研究于 2019 年 3 月 16—17 日在珠海淇澳岛北侧的滨海湿地进行表层沉积物和柱状沉积物的采集(图 1)。分别在秋茄、桐花、木榄、卤蕨、无瓣海桑、老鼠簕、海漆纯林或占绝对优势的林分内各设置林内(距林缘 10~15 m 的密林内)和林缘(距林边缘约 0~5 m)两个采样点,采集表层沉积物样品(0~3 cm,移去表层约 0.5 cm 的氧化层)。柱状沉积物样品取自秋茄群落,在 5 m×5 m 范围内随机进行 3 次重复采样(T1、T2 和 T3),采集设备为 PVC 管(长度 50 cm,直径 7.5 cm),取柱状沉积物 30 cm 切割为 3 cm 每层共 10 层的柱状沉积物样

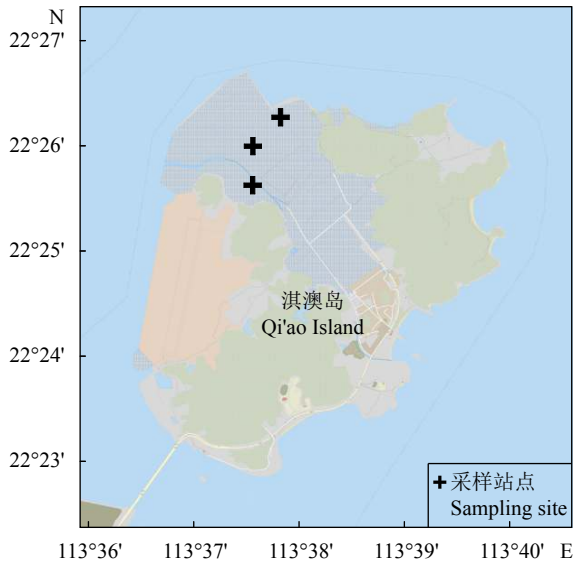


图1 采样站点分布
Figure 1 Sampling site

品, 分别装入聚乙烯封口袋中密封保存。

沉积物总有机碳 (TOC) 和总氮 (TN) 质量分数 (%) 测定: 沉积物样品经真空冷冻干燥机 (CoolSafe 55-4) 风干, 剔除其中的动植物残体, 用研钵和研杵将其研磨粉碎后过 100 目筛, 装入新的封口袋中贴标签, 于干燥处保存待测。将沉积物样品用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐酸酸化过夜, 以去除无机碳对 TOC 含量测定的影响, 然后用超纯水冲洗至溶液 pH 为中性后, 将沉积物样品于 40°C 烘干, 取处理完成的沉积物样品 10 mg 用元素分析仪 (Flash EA 3000 Thermo Scientific, 意大利) 进行测定。

1.3 分析方法

1.3.1 有机碳和总氮储量估算 依据下述公式对淇澳岛不同红树群落沉积物有机碳储量 (SOC) 和总氮储量 (STN) 进行估算^[24]:

$$\text{SOC}_i = \sum_i C_i \times D_i \times E_i \times 0.1 \quad (1)$$

$$\text{STN}_i = \sum_i N_i \times D_i \times E_i \times 0.1 \quad (2)$$

其中 SOC_i 表示沉积物有机碳储量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$), STN_i 表示沉积物总氮储量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$), C_i 表示沉积物有机碳质量分数 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), N_i 表示沉积物总氮质量分数 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), D_i 表示沉积物容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), E_i 表示沉积物厚度 (cm), V_i 表示沉积物烘干前的体积 (cm^3), i 表示沉积物层次。

沉积物容重采用环刀法进行测定^[24]: $D_i = g_i \cdot 100 / V_i \cdot (100 + W_i)$, 其中 D_i 为沉积物容重

($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), g_i 为沉积物湿质量 (g), V_i 为环刀容积 (100 cm^3), W_i 为土壤含水率 (%). 结果均以 “平均值 \pm 标准差 ($\bar{X} \pm \text{SD}$)” 表示。

1.3.2 沉积物有机质来源分析 利用有机质 C/N 二元混合模型^[25] 具体估算淇澳岛红树林湿地沉积物有机质来源所占的比例, 其公式为:

$$C(i) = C_{\text{allo}}(i) + C_{\text{auto}}(i) \quad (3)$$

$$N(i) = N_{\text{allo}}(i) + N_{\text{auto}}(i) \quad (4)$$

$$R_{\text{allo}}(i) = C_{\text{allo}}(i) / N_{\text{allo}}(i) \quad (5)$$

$$R_{\text{auto}}(i) = C_{\text{auto}}(i) / N_{\text{auto}}(i) \quad (6)$$

其中 $C(i)$ 、 $C_{\text{allo}}(i)$ 和 $C_{\text{auto}}(i)$ 分别为沉积物中的有机碳、外源有机碳和植被内源有机碳浓度; $N(i)$ 、 $N_{\text{allo}}(i)$ 、 $N_{\text{auto}}(i)$ 分别为沉积物中的氮、外源氮和植被内源氮浓度; $R_{\text{allo}}(i)$ 和 $R_{\text{auto}}(i)$ 分别为外源和植被内源的 C/N。参考已有研究, 将 $R_{\text{allo}}(i)$ 和 $R_{\text{auto}}(i)$ 分别设定为 7 和 37^[26]。

1.4 数据处理

采用 SPSS 22.0 和 Excel 2010 软件对实验结果进行统计分析。采用单一样本 t 检验法分析样本数据在 95% 置信区间上差异是否显著 ($P < 0.05$), 采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 研究不同林分沉积物 TOC 和 TN 的含量差异, 以 $P < 0.05$ 作为差异显著水平, 采用 Pearson 分析法研究 TOC 和 TN 间的相关性。并将分析结果绘制成图。

2 结果

2.1 淇澳岛红树林湿地沉积物碳、氮含量平面分布

珠江口淇澳岛分布的 7 种主要红树群落表层沉积物中的 TOC 和 TN 含量变化见图 2。TOC 质量分数介于 1.125%~1.969%, 平均值为 1.560%。7 种不同红树沉积物表层的 TOC 含量均呈现出林内高于林缘的特征, 其中林内 TOC 含量最高的是秋茄, 林缘含量最高的是无瓣海桑, 而林内、林缘 TOC 含量最低的均为木榄 (图 3-a)。将各红树群落表层沉积物中 TOC 含量的平均值进行对比研究, 发现秋茄 > 无瓣海桑 > 桐花 > 老鼠簕 > 海漆 > 卤蕨 > 木榄 (图 2)。One-way ANOVA 分析结果显示, 秋茄、无瓣海桑、桐花、老鼠簕表层沉积物中的 TOC 含量均与海漆、卤蕨、木榄表现出显著差异 ($P < 0.05$), 单样本 t 检验结果显示, TOC 平均含量最高的秋茄与其余 6 种红树间存在显著差异 ($P < 0.01$), 无瓣海桑、桐花和老鼠簕的 TOC 含量

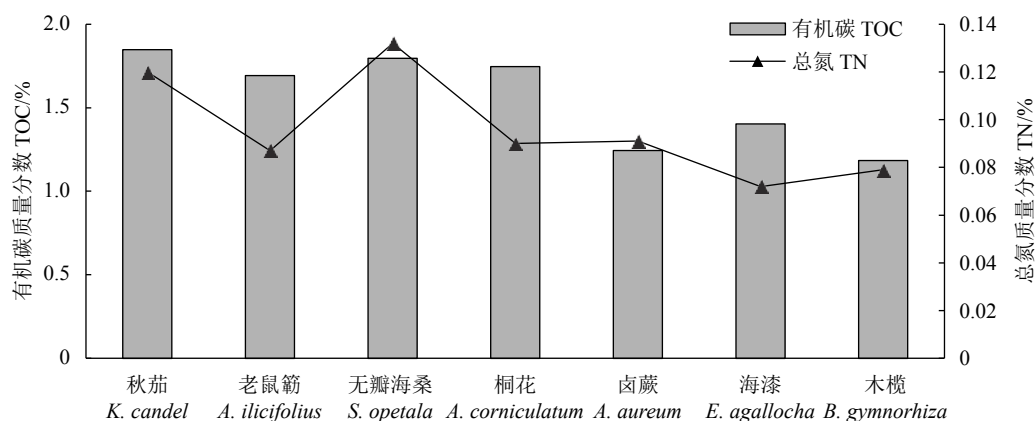


图2 7种红树群落表层沉积物有机碳、氮平均含量

Figure 2 Average contents of TOC and TN in surface sediments of seven mangrove communities

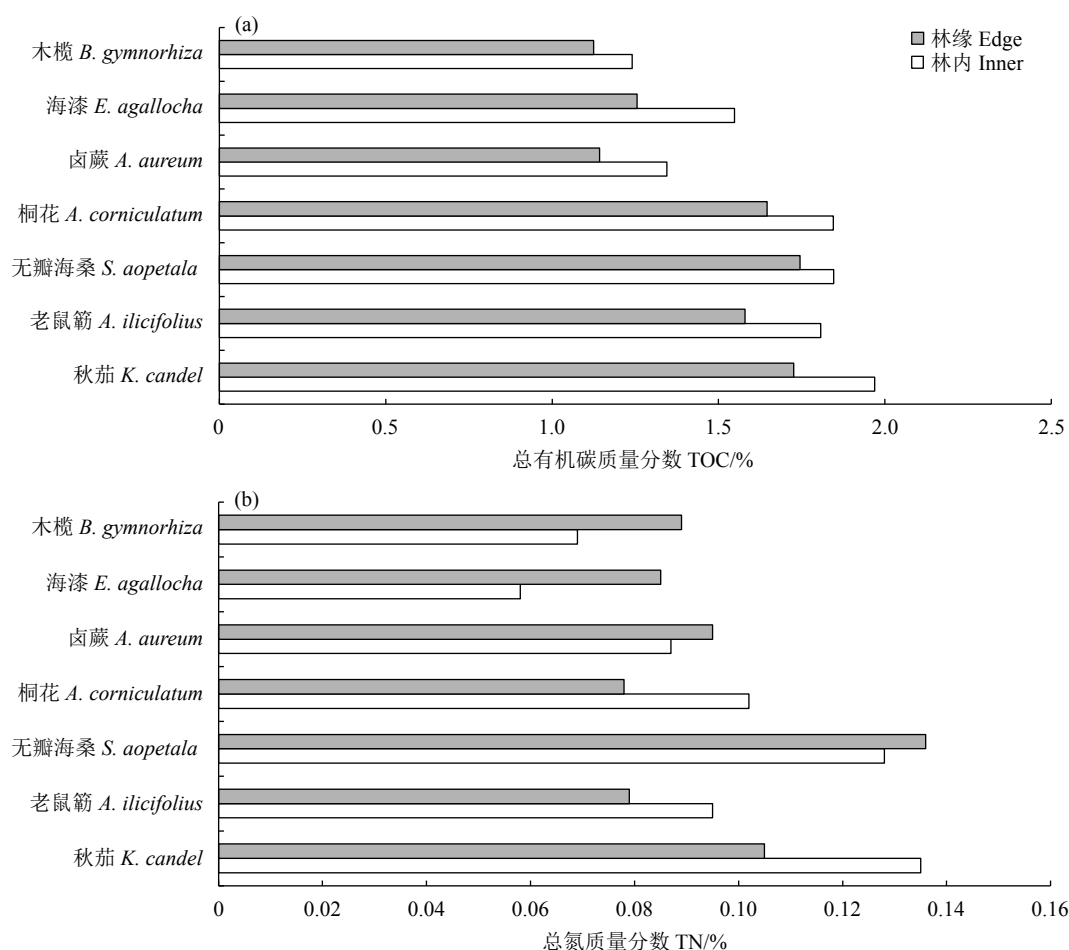


图3 7种红树群落表层沉积物有机碳、总氮含量分布

Figure 3 Distribution of TOC and TN contents in surface sediments of seven mangrove communities

较为接近, 显著高于海漆、卤蕨和木榄 ($P < 0.05$)。

7种主要红树群落表层中的TN质量分数介于0.058%~0.136%, 平均值为0.096%。与TOC的分布情况不同, 表层沉积物中的TN含量分布并非均呈现为林内大于林缘的变化趋势, 秋茄、老鼠簕、

桐花的TN含量林内大于林缘, 而其余4种则表现为林内小于林缘, 林内和林缘TN含量最高的分别为秋茄和无瓣海桑(图3-b)。One-way ANOVA分析结果显示, 无瓣海桑的TN含量与除秋茄外的其余5种红树均存在显著差异 ($P < 0.05$), 秋茄与海漆

和木榄表现出显著差异 ($P<0.05$), 而老鼠簕、桐花和卤蕨与除无瓣海桑外的其余红树均无显著差异 ($P>0.05$)。将各红树群落表层沉积物中 TN 含量的平均值进行对比研究发现, 无瓣海桑>秋茄>卤蕨>桐花>老鼠簕>木榄>海漆; 单样本 t 检验结果显示, TN 平均含量最高的无瓣海桑与其余 6 种红树间均存在显著差异 ($P<0.05$)。

7 种主要红树群落林缘和林内表层沉积物中 TOC 含量的变异系数 (CV) 分别为 17.5% 和 15.7%, 说明不同红树群落表层沉积物中的 TOC 含量变化林缘较林内更明显。而与 TOC 情况相反, 不同红树群落表层沉积物中的 TN 含量变化林内 (27.3%) 较林缘 (19.7%) 更为明显。综合比较 TOC 和 TN 的 CV 可知, 不同红树林群落表层沉积物中 TOC 和 TN 的含量变化均较大 ($CV>15\%$), 且 TN 较 TOC 的变化程度更大。相关性分析结果显示, 不同红树群落林内表层沉积物中的 TOC 和 TN 含量表现出显著的正相关性 ($P<0.05$, $R=0.781$), 而林缘 TOC 和 TN 含量的相关性不显著 ($P>0.05$)。

2.2 淇澳岛红树林湿地沉积物碳、氮垂直分布

淇澳岛红树林湿地沉积物中 TOC 质量分数在垂向上的变化介于 0.920%~2.265%, T1、T2 和 T3 的 TOC 平均质量分数分别为 1.463%、1.673% 和 1.904%, CV 分别为 18.7%、19.5% 和 13.1%; 说明除 T2 断面外, 其余断面沉积物中 TOC 含量随深度变化较为明显。TOC 含量的最大值均出现在 21~27 cm 沉积物层, 最小值均出现在 9~12 cm 层; 整体上看, TOC 含量在 0~12 cm 层呈下降趋势, 然后随着深度的增加波动上升, 在 21~27 cm 层达到最大值后开始下降 (图 4-a)。独立样本 t 检验结果显示, 3~9 cm 层与 24~27 cm 层的 TOC 含量存在显著差异 ($P<0.05$), 其余各层间差异不显著。

沉积物中 TN 质量分数在垂向上的变化介于 0.060%~0.143%, 总体呈波动下降趋势, 3 个断面 TN 平均质量分数分别为 0.099%、0.118% 和 0.079%, CV 分别为 15.95%、13.8% 和 15.94%; 说明除 T2 断面外, 其余断面沉积物中 TN 含量随深度变化较为明显。TN 含量的最大值均出现在表层, 最小值均出现在 21~24 cm 层; 0~9 cm 层, 随着深度增加 TN 含量持续降低; 9~21 cm 层, 随着深度增加 TN 含量波动升高; 21~27 cm 层, 随着

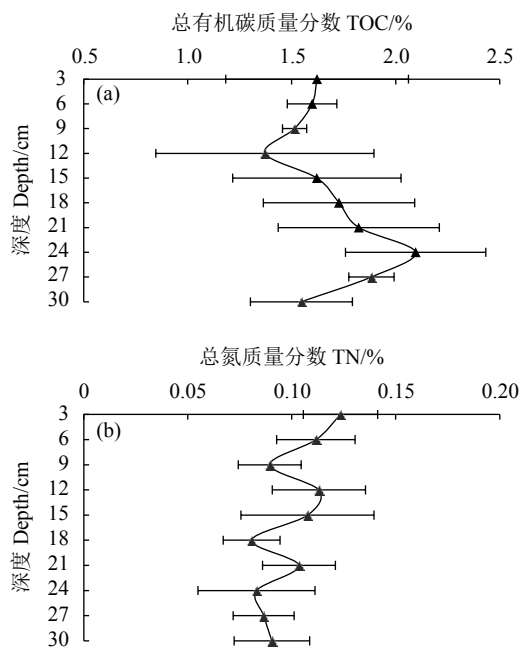


图4 淇澳岛红树林湿地沉积物中有机碳、总氮含量垂直分布图

Figure 4 Vertical distribution of TOC and TN contents in sediment of mangrove wetland of Qi'ao Island

深度增加 TN 含量波动下降; 21~30 cm 层, 随深度变化 TN 含量基本保持不变 (图 4-b)。独立样本 t 检验结果显示, 0~3 cm 层与 15~18 cm 层的 TN 含量存在显著差异 ($P<0.05$), 其余各层间差异不显著。对不同层的 TOC 和 TN 含量进行相关性分析发现, 两者相关性不显著 ($P>0.05$)。

2.3 淇澳岛红树林湿地沉积物碳氮比 (C/N) 变化

C/N 是判断沉积物有机质来源进而对其进行来源解析的重要指标^[27]。淇澳岛红树林湿地表层沉积物中 C/N 均值约为 16.25, 7 种主要红树群落表层沉积物中 C/N 介于 12.032~26.690; 林内 C/N 表现为海漆>老鼠簕>桐花>木榄>卤蕨>秋茄>无瓣海桑, 其中最高的为海漆 (26.690), 最低的为无瓣海桑 (14.422); 林缘 C/N 表现为桐花>老鼠簕>秋茄>海漆>无瓣海桑>木榄>卤蕨, 最高的为桐花 (21.103), 最低的为卤蕨 (12.032)。相关性分析结果显示, 不同红树群落林内和林缘的表层沉积物 C/N 相关性不显著 ($P>0.05$), 且同种红树群落林内和林缘的 C/N 与 TOC 和 TN 含量的相关性均不显著 ($P>0.05$)。垂向上 C/N 在 0~30 cm 沉积物层的变化范围为 12.133~25.253 (图 5), 随深度增加整体呈波动上升趋势, 最低值出现在 9~12 cm 层, 最高值出现在 21~24 cm 层。相关性分析结果显示, 垂向

上 C/N 大小与 TOC 含量表现出显著正相关性 ($P<0.01$), 与 TN 含量表现出显著负相关性 ($P<0.01$)。

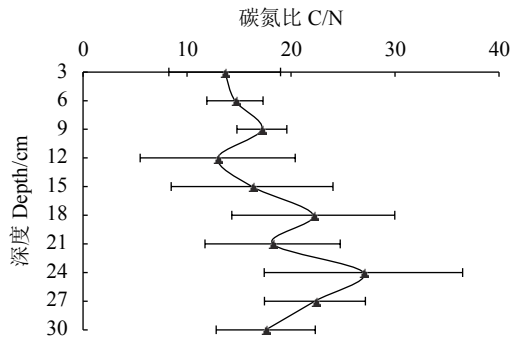


图5 淇澳岛红树林湿地沉积物中碳氮比垂直分布图

Figure 5 Vertical distribution of C/N in sediment of mangrove wetland of Qi'ao Island

2.4 淇澳岛红树林沉积物有机碳、总氮储量估算

根据淇澳岛红树林湿地沉积物含水率和容重(表 1、表 2), 依据 1.3.2 的公式计算出淇澳岛 7 种红树群落表层沉积物 SOC 介于 $4.33\sim6.87\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 均值为 $5.67\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, SOC 排序为秋茄>无瓣海桑>桐花>老鼠簕>海漆>卤蕨>木榄; 表层 STN 介于 $0.289\sim0.499\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 均值为 $0.350\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 排序为无瓣海桑>秋茄>桐花>卤蕨>老鼠簕>木榄>海漆(图 6)。

0~30 cm 层的沉积物容重介于 $1.04\sim1.42\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, SOC 介于 $56.83\sim69.54\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, STN 介于 $2.94\sim4.48\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 高于同一深度广西红树林沉积物 SOC 和 STN 储量(分别约为 $47.25\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $3.32\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$), 但低于海口和深圳湾^[28], 已有研究显示广西红树林沉积物 SOC 明显高于我国森林土壤平均碳储量, 由此推知淇澳岛红树林沉积物 SOC 亦然, 并高于人工林土壤平均 SOC^[29]。已有研究发现, 天然林

表1 淇澳岛红树林湿表层沉积物理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of surface sediment in mangrove wetland of Qi'ao Island

红树种类 Mangrove species	含水率 Moisture content/%	容重 Bulkdensity/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
秋茄 <i>K. candel</i>	64.14±1.8	1.24±0.089
老鼠簕 <i>A. ilicifolius</i>	70.39±2.2	1.26±0.046
无瓣海桑 <i>S. opetala</i>	69.94±6.8	1.23±0.130
桐花 <i>A. corniculatum</i>	75.21±12.9	1.13±0.184
卤蕨 <i>A. aureum</i>	70.76±1.6	1.26±0.046
海漆 <i>E. agallocha</i>	65.97±5.4	1.13±0.097

表2 淇澳岛红树林湿地垂直分层沉积物理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of sediment core in mangrove wetland of Qi'ao Island

柱状样 Sediment core/cm	含水率 Moisture content/%	容重 Bulkdensity/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
0~3	64.43±4.6	1.34±0.067
3~6	64.73±6.9	1.30±0.065
6~9	63.65±8.9	1.25±0.077
9~12	66.40±4.4	1.26±0.055
12~15	63.93±12.6	1.27±0.124
15~18	62.76±14.0	1.27±0.147
18~21	67.08±2.3	1.25±0.080
21~24	68.35±6.2	1.23±0.169
24~27	73.89±1.3	1.17±0.121
27~30	68.90±9.6	1.27±0.129

土壤 SOC 一般高于天然次生林和人工林, 森林土壤含碳量与林龄呈正相关^[29-30]。受大量人为因素影响, 珠海淇澳岛红树林原生林已遭到了较为严重的破坏, 现存红树林多为恢复措施实施后的次生林和人工林, 秋茄和桐花群落是淇澳岛少数保存下来的本地群落^[23], 林龄也相对较高, 与上述研究一致, 这两种红树沉积物的 SOC 也相对较高; 此外据已有研究, 秋茄群落是淇澳岛几种主要红树群落中固碳速率最快的^[31], 这也可作为秋茄群落表层沉积物中 SOC 高于其他群落提供合理解释。

3 讨论

3.1 淇澳岛沉积物 TOC 和 TN 含量与国内外其他湿地对比

相较于国外的一些河口、湖泊湿地(法国 Alberta 湖泊湿地、美国 Massachusetts 湿地和荷兰西谢尔德河口)沉积物的 TOC 和 TN 含量, 淇澳岛红树林湿地的含量相对较低, 但接近并略高于我国的长江口湿地、苏北潮滩湿地和漳江口湿地(表 3), 说明淇澳岛红树林湿地沉积物中有机质含量相较于我国其他类型湿地较高, 印证了红树林生态系统生产力较高的特点。与国内外其他红树林湿地相比, 淇澳岛红树林湿地沉积物 TOC 和 TN 含量处在中等水平, 略高于法国 Guniana 红树林湿地, 与福建九龙江口、漳江口、广西珍珠湾红树林湿地接近, 低于深圳福田、广西大冠沙红树林湿地, 显著低于

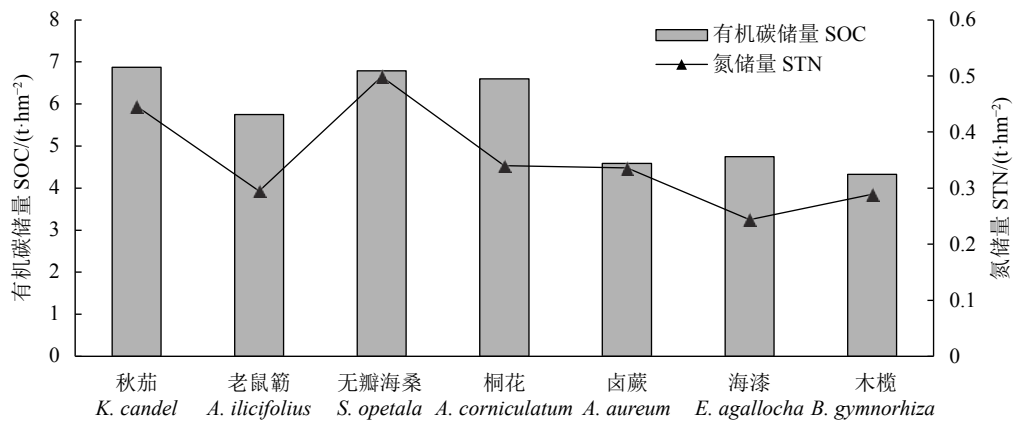


图6 7种红树群落表层沉积物有机碳、氮储量

Figure 6 SOC and STN of surface sediments of seven mangrove communities

表3 不同区域湿地沉积物中有机质含量对比

Table 3 Comparison of organic matter in wetland sediments in different regions

研究区域 Survey area	有机碳质量分数 TOC/%	总氮质量分数 TN/(mg·g ⁻¹)	数据来源 Data source
淇澳岛红树林湿地 Mangrove wetland in Qi'ao Island	0.92~2.26	0.60~1.43	本研究
深圳福田红树林湿地 Futian Mangrove wetland of Shenzhen	约1.42	1.40~1.60	[2]
广西珍珠湾红树林湿地 Mangrove wetland in Zhenzhu Gulf, Guangxi	1.43~2.21	0.62~1.03	[24]
九龙江口红树林湿地 Mangrove wetland in Jiulong River Estuary	1.24~3.81	1.19~2.05	[26]
法国Albert湖泊 Lake Albert, French	4.33~5.31	—	[32]
巴西南部红树林湿地 Mangrove wetland, South Brazil	2.7~6.1	—	[32]
美国Massachusetts湿地 Massachusetts wetland in America	5.6~36.7	0.80~1.80	[33]
长江口湿地 Yangtze River Estuary	0.1~0.7	0.14~0.78	[34]
苏北潮滩湿地 Tidal flat in northern Jiangsu Province	0.16~0.9	0.19~2.68	[34]
漳江口红树林湿地 Mangrove wetland in Zhangjiang Estuary	0.91~2.86	0.25~2.21	[35]
法国Guiana红树林湿地 Guiana mangrove wetland, French	0.70~1.90	0.10~1.30	[36]
荷兰西谢尔德河口 Westerschelde Estuary	1.19~2.33	0.8~0.15	[37]
广西大冠沙红树林湿地 Daguansha mangrove wetland, Guangxi	2.26±1.84	0.45±0.34	[38]

巴西东南部红树林湿地 (表 3)。根据已有研究^[38], 树龄、树种、栽种模式、潮位等因素都会对红树林湿地沉积物的储碳量造成影响, 故而不同红树林湿地沉积物的有机质含量存在差异。已有研究证实, 成林后的沉积物储碳量会随树龄持续增加^[35], 而淇澳岛等我国大部分红树林湿地的林龄远低于巴西东南部红树林湿地, 故其有机质含量也显著低于巴西东南部红树林湿。

3.2 淇澳岛红树林湿地沉积物有机质来源分析

C/N 是判断沉积物有机质来源进而对其进行来源解析的重要指标, 是区分有机质来源的常用方法之一, 被大量用于沉积物有机质的植被内源性和外

源性判断。海洋浮游植物的 C/N 通常介于 4~10, 因其蛋白质含量较高故而 C/N 相较于体内含有大量纤维素成分的陆地植物 (C/N>20) 偏低^[27]。已有研究认为^[39], 若沉积物中 C/N 小于 8 则为典型的外源性来源, 大于 12 则为典型的植被内源性来源。淇澳岛各红树林群落表层沉积物的 C/N 介于 12.032~26.690, 林内平均值为 18.036, 林缘平均值为 15.685, 均表现出相对较高的 C/N, 根据已有研究可知红树植物碎屑的 C/N 约为 37, 海洋浮游植物的 C/N 约为 7^[37], 显示出研究区域内有机质的组成并不主要由最初的外源有机质摄入决定, 高等植物对其有机质组成也具有较高的贡献率; 这也就

意味着淇澳岛红树林湿地内快速积累的大量有机质来自于红树植物的贡献率极高,且最高值出现在 21~24 cm 层,这与陶玉华等^[24]的研究结果一致,说明中层有机碳的植被内源成分高于表层。

利用 1.3.2 的有机质 C/N 二元混合模型^[25]来具体估算两种来源分别所占的比例,结果显示,植被内源有机碳的平均贡献率约为 70.21%,外源有机碳的平均贡献率约为 29.79%。综上所述,红树植物碎屑对淇澳岛湿地表层沉积物有机质的贡献率要显著高于海洋浮游植物。这与于宇等^[26]对九龙江口红树林湿地的研究结果基本一致。

3.3 土地利用变化对淇澳岛沉积物有机质组分和含量的影响

土地利用方式会对沉积物有机质的储量及组分产生显著影响^[40-42]。叶翔等^[22]对淇澳岛沉积物年代框架和沉积速率的研究显示,其沉积物表层至 101 cm 层的沉积速率约为 $3.80 \text{ cm} \cdot \text{年}^{-1}$;因此本研究所采集的沉积物样本可大致反映淇澳岛近 10 年的沉积物变化特征。本研究发现,淇澳岛红树林湿地 0~30 cm 层沉积物 TOC 含量呈波动变化趋势,但除 3~9 cm 层与 24~27 cm 层的 TOC 含量存在显著差异 ($P < 0.05$) 外,其余各层间差异不显著,说明研究土层沉积物 TOC 含量变化并不显著。淇澳岛西部红树林湿地在经历了围海造陆、人工种植以及自然灾害等各类影响后,近 10 年来其土地利用格局逐渐趋于稳定^[43]。陈志杰等^[44]研究发现,红树林沉积物 TOC 含量高于旱地和水田土壤,红树林湿地经人为垦殖后会造成 TOC 的显著流失,该结果可为淇澳岛红树林湿地 TOC 和 TN 含量的波动变化提供合理依据。本研究中 TOC 含量在 27~30 cm 层呈显著上升趋势(图 3-a),对应的年份约为 2010 年前后,根据已有研究^[39]可知这段时间恰为淇澳岛开始调整产业结构,开发旅游业的初期,大量滩涂、裸地、养殖池塘等被逐渐转为红树林林地,故而对沉积物中 TOC 的积累产生了促进作用,而后林地规模基本稳定,TOC 含量波动逐渐变小,整体上呈增加趋势。

4 结论

淇澳岛 7 种主要红树群落表层沉积物 TOC 质量分数介于 1.125%~1.969%,TN 质量分数介于 0.058%~0.136%。其中秋茄群落的林内 TOC 含量

最高,无瓣海桑群落的林缘含量最高,而木榄的林内、林缘 TOC 含量均最低,且 7 种主要红树群落表层沉积物 TOC 含量均呈林内大于林缘的特征。受淇澳岛土地利用变化的影响,TOC 和 TN 含量在 0~30 cm 层均呈现出波动变化的趋势。淇澳岛各红树林群落表层沉积物的 C/N 介于 12.032~26.690,显示出高等植物对淇澳岛红树林湿地有机质组成具有较高的贡献率,根据 C/N 二元混合模型得出红树植物碎屑对淇澳岛湿地表层沉积物有机质的贡献率要显著高于海洋浮游植物。淇澳岛红树群落 0~30 cm 沉积物 SOC 介于 56.83~69.54 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,表现出淇澳岛红树林湿地较强的有机碳埋藏能力;此外,秋茄群落表层沉积物中的 SOC 为 7 种主要红树群落中最高。

参考文献:

- [1] 刘逸玲,覃盈盈,郑海雷. 红树植物耐水淹和高盐适应性研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2017, 56(3): 314-322.
- [2] 乔永民,谭键滨,马舒欣,等. 深圳红树林湿地沉积物氮磷分布与来源分析[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(2): 34-40.
- [3] MANSON F J, LONERAGAN N R, SKILLETER G A, et al. An evaluation of the evidence for linkages between mangroves and fisheries: a synthesis of the literature and identification of research directions[J]. *Oceanogr Mar Biol*, 2005, 43: 483-513.
- [4] 李亚芳,杜飞雁,王亮根,等. 基于生物性状分析方法的不同恢复阶段无瓣海桑人工林湿地大型底栖动物生态功能研究[J]. 南方水产科学, 2018, 14(3): 10-18.
- [5] 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 CO_2 [J]. *Front Ecol Environ*, 2011, 9(10): 552-560.
- [6] HOPKINSON C S, CAI W J, HU X. Carbon sequestration in wetland dominated coastal systems: a global sink of rapidly diminishing magnitude[J]. *Curr Opin Env Sust*, 2012, 4(2): 186-194.
- [7] ALONGI D M. Carbon cycling and storage in mangrove forests[J]. *Annu Rev Mar Sci*, 2014, 6(1): 195-219.
- [8] BOUILLON S, CONNOLLY R M, LEE S Y. Organic matter exchange and cycling in mangrove ecosystems: recent insights from stable isotope studies[J]. *J Sea Res*, 2008, 59(1/2): 44-58.
- [9] ALONGI D M. Carbon sequestration in mangrove forests[J]. *Carbon Manag*, 2012, 3(3): 313-322.
- [10] LIU H, REN H, HUI D, et al. Carbon stocks and potential carbon storage in the mangrove forests of China[J]. *J Environ Manag*, 2014, 133: 86-93.
- [11] MURDIYARSO D. Carbon storage in mangrove and peatland ecosystems: a preliminary account from plots in Indonesia[J]. *Ecol Appl*, 2010, 14(4): 232-246.

- [12] 徐慧鹏, 刘涛, 张建兵. 红树林碳埋藏过程对海平面上升、气候变化和人类活动的响应 [J]. 广西科学, 2020, 27(1): 84-90.
- [13] DUKE N C, MEYNECKE O J, DITTMANN S, et al. A world without mangroves? [J]. Science, 2007, 317: 41.
- [14] POLIDORO B A, CARPENTER K E, DUCKE N C, et al. The loss of species: mangrove extinction risk and geographic areas of global concern [J]. PLoS One, 2010, 5(4): e10095.
- [15] ALONGI D M. Present state and future of the world's mangrove forests [J]. Environ Conserv, 2002, 29(3): 331-349.
- [16] 何克军, 林寿明, 林中大. 广东红树林资源调查及其分析 [J]. 广东林业科技, 2006(2): 89-93.
- [17] DONATO D C, KAUFFMAN J B, MURDIYARSO D, et al. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics [J]. Nat Geosci, 2011, 4(5): 293-297.
- [18] SAENGER P, SIDDIQI N A. Land from the sea: the mangrove afforestation program of Bangladesh [J]. Ocean Coast Manag, 1993, 20: 23-29.
- [19] BROCKMEYER R, REY J R, VIRNSTEIN R W, et al. Rehabilitation of impounded estuarine wetlands by hydrologic reconnection to the Indian River Lagoon, Florida (USA) [J]. Wetl Ecol Manag, 1996, 4(2): 93-109.
- [20] MILANO G R. Restoration of coastal wetlands in southeastern Florida [J]. Wetl J, 1999, 11(2): 15-24.
- [21] LEWIS R R. Ecologically based goal setting in mangrove forest and tidal marsh restoration in Florida [J]. Ecol Eng, 2000, 15(3/4): 191-198.
- [22] 叶翔, 李靖, 王爱军. 珠江口淇澳岛滨海湿地沉积环境演化及其对人类活动的响应 [J]. 海洋学报, 2018, 40(7): 79-89.
- [23] 王震, 陈卫军, 管伟, 等. 珠海市淇澳岛主要红树林群落特征研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(4): 86-91.
- [24] 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.
- [25] QIAN J L, WANG S M, XUE B, et al. A method of quantitatively calculating amount of allochthonous organic carbon in lake sediments [J]. Chin Sci Bull, 1997, 42(21): 1821-1823.
- [26] 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.
- [27] TALBOT M R. A review of the palaeohydrological interpretation of carbon and oxygen isotopic ratios in primary lacustrine carbonates [J]. Chem Geol, 1990, 80(4): 261-279.
- [28] 莫莉萍, 周慧杰, 刘云东, 等. 广西红树林湿地土壤有机碳储量估算 [J]. 安徽农业科学, 2015(15): 91-94.
- [29] 刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展 [J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [30] YANG Y S, GUO J F, CHEN G H, et al. Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China [J]. Plant Soil, 2009, 323(1/2): 153-162.
- [31] 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: 46.
- [32] WHITE J S, BAYLEY S E, CURTIS P J. Sediment storage of phosphorus in a northern prairie wetland receiving municipal and agro-industrial wastewater [J]. Ecol Eng, 2000, 14: 127-138.
- [33] ZHOU J, WU Y, KANG Q, et al. Spatial variations of carbon, nitrogen, phosphorous and sulfur in the salt marsh sediments of the Yangtze Estuary in China [J]. Estuar Coast Shelf S, 2007, 71(1/2): 47-59.
- [34] 高建华, 欧维新, 杨桂山. 潮滩湿地 N、P 生物地球化学过程研究 [J]. 湿地科学, 2004(3): 220-227.
- [35] 薛博. 漳江口红树林湿地沉积物有机质来源追溯 [D]. 厦门: 厦门大学, 2007: 51.
- [36] MARHANDA C, LALLIER-VERGÈS E, BALTZER F. The composition of sedimentary organic matter in relation to the dynamic features of a mangrove-fringed coast in French Guiana [J]. Estuar Coast Shelf S, 2003, 56(1): 119-130.
- [37] MIDDELBURG J J, NIEUWENHUIZE J, LUBBERTS R K, et al. Organic carbon isotope systematics of coastal marshes [J]. Estuar Coast Shelf S, 1997, 45(5): 681-687.
- [38] 袁彦婷, 丁振华, 张玲, 等. 土地利用方式改变对红树林沉积物中营养元素含量的影响 [J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 385-390.
- [39] THORNTON S F, MCMANUS J. Application of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: evidence from the Tay Estuary, Scotland [J]. Estuar Coast Shelf S, 1994, 38(3): 219-233.
- [40] 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(4): 500-504.
- [41] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 三江平原沼泽湿地开垦对表土有机碳组分的影响 [J]. 土壤学报, 2005(5): 155-157.
- [42] 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 S Sci, 2013, 64(4): 476-487.
- [43] 马姣娇, 牛安逸, 徐颂军, 等. 基于地学信息图谱的珠海淇澳岛土地利用格局分析 [J]. 华南师范大学学报 (自然科学版), 2018, 50(2): 77-85.
- [44] 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 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2379-2385.