

DOI: 10.5846/stxb201511102276

朱耀军, 赵峰, 郭菊兰, 武高洁, 林广旋. 湛江高桥红树林湿地有机碳分布及埋藏特征. 生态学报, 2016, 36(23): 7841-7849.

Zhu Y J, Zhao F, Guo J L, Wu G J, Lin G X. Below-ground organic carbon distribution and burial characteristics of the Gaoqiao mangrove area in Zhanjiang, Guangdong, Southern China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7841-7849.

## 湛江高桥红树林湿地有机碳分布及埋藏特征

朱耀军<sup>1</sup>, 赵峰<sup>2,\*</sup>, 郭菊兰<sup>1</sup>, 武高洁<sup>1</sup>, 林广旋<sup>3</sup>

1 中国林业科学研究院湿地研究所, 国家林业局湿地研究中心, 北京 100091

2 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091

3 广东湛江国家级红树林自然保护区管理局, 湛江 524033

**摘要:**红树林是世界上单位生产力最高的生态系统之一, 其能够持续地固定有机碳, 对全球碳平衡和生物地球化学循环有着深远影响。以广东湛江国家级红树林自然保护区高桥核心区为研究区, 旨在分析我国典型红树林湿地的固碳潜力, 为红树林湿地碳计量提供依据。在垂直于海岸线的两条样线上选取 6 个不同潮位的样点进行沉积柱取样分析, 通过重铬酸钾氧化-外加热法测定有机碳含量, 基于放射性同位素<sup>210</sup>Pb 定年推演沉积率, 并对湿地有机碳密度和埋藏率进行计算。结果表明: 研究区红树林湿地有机碳含量 2.14—36.94 g/kg, 平均(12.79±9.91) g/kg。红树林湿地有机碳密度为(0.0100±0.0056) g/cm<sup>3</sup>, 空间上差异显著, 水平方向上两条样线均以中带样点的有机碳密度最大, 近陆侧(内带)样点的有机碳密度高于近海侧(外带); 垂直方向上, 内带和外带样柱的有机碳密度均以表层最高, 而且随深度增加而减小。研究区红树林湿地百年尺度上沉积率为 6.5—11mm/a, 且外带样点沉积速率显著快于内带样点。有机碳埋藏率空间差异大, 外带样点为(34.58±7.67) g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 而中带样点可达 150.56 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。红树林湿地有机碳的分布受潮位的影响大, 更高潮位点和表层的有机碳含量和密度更高, 而处于低潮位的外带样点的有机碳沉积更快。研究区红树林湿地有机碳含量和密度比更低纬度带低, 但均高于地带性陆地植被, 且其能够通过持续的沉积过程来捕捉和固定有机碳, 固碳潜力大。

**关键词:**红树林; 有机碳; <sup>210</sup>Pb; 沉积; 埋藏率

## Below-ground organic carbon distribution and burial characteristics of the Gaoqiao mangrove area in Zhanjiang, Guangdong, Southern China

ZHU Yaojun<sup>1</sup>, ZHAO Feng<sup>2,\*</sup>, GUO Julan<sup>1</sup>, WU Gaojie<sup>1</sup>, LIN Guangxuan<sup>3</sup>

1 Research Institute of Wetland, Chinese Academy of Forestry, Wetland Research Centre of State Forestry Administration, Beijing 100091, China

2 Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 Zhanjiang Mangrove National Nature Reserve, Zhanjiang 524033, China

**Abstract:** Mangroves are one of the most productive ecosystems of the world, that continually sequester organic carbon and play an important role in global carbon cycles and biogeochemical processes. This study aimed to analyze carbon sequestration and below-ground carbon storage in mangroves, to provide a reference for carbon accounting in mangrove wetlands. The Gaoqiao mangrove area in the Zhanjiang Mangrove National Nature Reserve was chosen as the study area; 6 sediment cores were collected along two sample lines, which were perpendicular to the coastline, and the physical and chemical properties were examined. Based on the potassium dichromate oxidation-external heating method, the spatial distribution of below-ground organic carbon content in the sediment cores profile was analyzed. The burial rate of organic carbon was determined using radiometric dating <sup>210</sup>Pb of the six sediment cores, organic carbon density, and depth ratio of

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41306079, 31100413); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CAFYBB2014QB018, CAFINT2011C10)

**收稿日期:**2015-11-10; **修订日期:**2016-06-28

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaofeng@caf.ac.cn

mangrove wetlands were also analyzed. The results showed a below-ground organic carbon content of 2.14—36.94 g/kg, with an average of  $(12.79 \pm 9.91)$  g/kg. Below-ground organic carbon density in the mangroves was  $(0.0100 \pm 0.0056)$  g/cm<sup>3</sup>, and the spatial distribution of organic carbon density varied sharply. Horizontally, the peak of organic carbon density appeared at the middle zone, and organic carbon density at the landside was greater than that at the seaside. Vertically, the peak of organic carbon density appeared at the surface both at the landside and the seaside, while it was not clear at the middle zone, and that appeared stratification. In this study area, the century-scale sedimentation rate of mangroves soil was 6.5—11 mm/a, the sedimentation rate of the seaside was faster than that of the landside, and it was generally in accordance with the current rate of sea-level rise. Spatial distribution of organic carbon burial rate of the samples varied at different sites, which was affected by the tide level and plant community type. The burial rate of organic carbon at the seaside was  $(34.58 \pm 7.67)$  g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, while that at the middle zone was  $150.56$  g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>. The distribution of soil organic carbon was affected by the tidal site in the mangrove wetland; organic carbon content and carbon density were higher at the higher tide site and at the surface, while the low tide site had a faster sediment rate. Below-ground organic carbon content and density at the study site were lower than those at lower latitudes, but higher than those in zonal terrestrial vegetation; thus, its potential for carbon sequestration was huge because of the continuous deposition process.

**Key Words:** mangrove; organic carbon; <sup>210</sup>Pb; sediment; burial rate

湿地对全球碳循环有着深远影响,当前对湿地有机碳储量和影响因素的研究成为热点。红树林湿地是世界上单位生产力最高的生态系统之一,其面积占全球海岸带的 0.5%,却埋藏了海岸生态系统 10%—15% 的总有机碳<sup>[1-2]</sup>。红树林在较短的时间尺度上是碳源,支持着相邻的海洋生态系统<sup>[3]</sup>,在更长时间尺度上则是碳库,其对于全球气候变化和人类活动的扰动极为敏感<sup>[4]</sup>。红树林的固碳功能及其在陆海生态系统之间的物质交换对于海岸带生物地球化学循环具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。

世界红树林在 1980—2000 年间减少了 35%<sup>[6]</sup>,我国现有红树林仅为 20 世纪 50 年代分布面积的一半<sup>[7]</sup>,由于红树林减少或增加而导致的释放或固定的碳,尤其地下部分的变化尚不清楚。红树林通过外源沉积和根系降解持续固定有机碳,其单位面积的有机碳储量大于泥炭地<sup>[8]</sup>,其沉积深度能够达到数米<sup>[9]</sup>。与国外对于红树林湿地有机碳埋藏研究<sup>[8,10]</sup>相比,国内学者多在红树林沉积物的沉积率<sup>[11-12]</sup>、理化性质<sup>[13-14]</sup>、有机碳储量<sup>[15-17]</sup>等方面进行研究,对于有机碳埋藏的研究较少,限制了红树林的碳计量,低估了其在应对气候变化方面的重要作用。本研究选择我国红树林的典型分布区,测定不同潮位点的地下有机碳含量,并通过放射性同位素进行定年分析,研究红树林湿地沉积速率、有机碳空间分布以及埋藏率,有助于更好地理解红树林湿地的固碳潜力,为全球变化背景下我国红树林湿地生态恢复和碳计量提供参考。

## 1 研究区与研究方法

### 1.1 研究区概况

高桥红树林地处广东湛江国家级红树林保护区的核心区,位于两广界河洗米河在北部湾入口处的英罗湾内(109°45′—109°48′E,21°31′—21°35′N)。红树林植被覆盖度高,树种分布呈现明显的分带特征,主要树种包括桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、木榄(*Bruguiera gymnorrhiza*)、秋茄(*Kandelia obvolata*)、红海榄(*Rhizophora stylosa*)、白骨壤(*Avicennia marina*)、海漆(*Excoecaria agallocha*)和无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)等,岸带分布有黄槿(*Hibiscus tiliaceus*)等半红树植物。研究区属南亚热带季风型海洋性气候,年平均气温 23℃左右,极端最高气温 38℃,极端最低气温 15℃。年平均降水量 1700—1800 mm,主要集中在 5—9 月。潮汐属于不正规日潮为主的混合潮型,大潮汛期为全日潮,月平均 22 d,小潮为半日潮,月平均为 8 d;平均潮差 2.53 m,最大潮差 6.25 m。海水年均温 23.5℃。

## 1.2 材料与方法

### 1.2.1 沉积物取样

取样时间为 2011 年 7—8 月。沿陆地-海洋方向选择两条样线(A、B),在每条样线上根据与海堤的距离分别选取 3 个不同位置的样点,分别代表内带(近陆侧)、中带和外带(近海侧),并用 GPS 进行定位(图 1)。A 样线位于研究区北部,潮位比 B 样线更高,样点距离北部海堤分别为 1700、900m 和 300m,其中 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 样点由桐花(*A. corniculatum*)和木榄(*B. gymnorhiza*)群落组成,A<sub>3</sub>样点群落组成为白骨壤(*A. marina*)和桐花(*A. corniculatum*)。B 样线位于研究区南部,距离北部海堤分别为 1320m、340m 和 70m,以白骨壤(*A. marina*)纯林为主;B<sub>2</sub>样点为白骨壤与红海榄(*R. stylosa*)混交的群落类型。2015 年 8 月,通过摄影测量技术获取研究区的三维点云数据,提取了各样点的相对高程(表 1)。

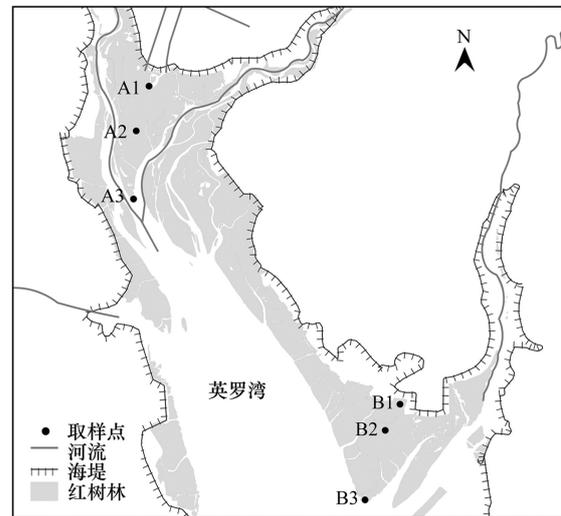


图 1 沉积柱采样位置示意图

Fig.1 Sampling locations of sediment cores in mangrove

表 1 采样点的相对高程

Table 1 The relative elevation of sampling locations

采样位置 Sampling locations	相对高程/m Relative elevation	采样位置 Sampling locations	相对高程/m Relative elevation
A1	0.5	B1	-0.8
A2	-0.6	B2	-2.1
A3	-2.7	B3	-2.5

沉积物取样采用自制重力采样器,材质为透明 PVC 管,管内直径为 4.0cm,管长 1.2m,钻头为尼龙材质。每个样点附近采集 4 个沉积柱,受采样地点沉积层厚度的限制,沉积柱的长度在 70—100cm 之间。每个样点对其中一个沉积柱分别按照 1cm(0—30cm)和 2cm(30cm 以下)间隔进行分样,在 70℃烘箱中烘干用于<sup>210</sup>Pb 定年分析,另外 3 个沉积柱按照每 10cm 进行分样,分层混合且自然风干后用于理化性质分析和有机碳测定。

### 1.2.2 样品分析指标及分析方法

粒度分析采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪(测量范围 0.02—2000 $\mu$ m,各粒级组分平行分析误差小于 5%);粒度标准参照国际制土壤粒度分级,即砂粒(Sand)>20 $\mu$ m、粉粒(Silt)20—2 $\mu$ m、粘粒(Clay)<2 $\mu$ m 的分类标准进行分析。<sup>210</sup>Pb 定年分析在湖泊与环境国家重点实验室完成,样品中<sup>210</sup>Pb、<sup>226</sup>Ra 活度采用美国 EG&G Ortec 公司生产的高纯锗井型探测器(HPGe GWL2120215)测定,测试误差小于 10%,采用恒定沉积通量模式(constant initial content, CIC)计算沉积年代<sup>[18]</sup>。pH 值采用电位法测定,沉积物有机碳(OC)测定采用重铬酸钾氧化-外加热法<sup>[19]</sup>。沉积物的容重基于采样器中单位体积样品的干重计算。

## 1.3 数据处理

数据分析基于 SPSS 18.0 软件进行,相关的图表采用 SigmaPlot 10.0 软件和 Microsoft Excel 2010 软件制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 红树林湿地沉积物理化性质

研究区红树林沉积物属于酸性硫酸盐土类型,质地为粉砂型,其中粘粒、粉粒和砂粒含量分别为(13±4)%、(39±12)%和(48±16)%。各沉积柱剖面层次之间的理化性质范围较大,其中 pH 值为 2.5—7.3,容重

(BD)0.87—1.80g/cm<sup>3</sup>。t 检验结果表明,A、B 样线之间的粒度特征、pH 值的差异不显著,而 B 样线沉积物容重显著高于 A 样线( $P<0.05$ )。各样点的砂粒含量与容重随着深度增加而增加,而 pH 值、粘粒含量和粉粒含量随深度增加而降低。

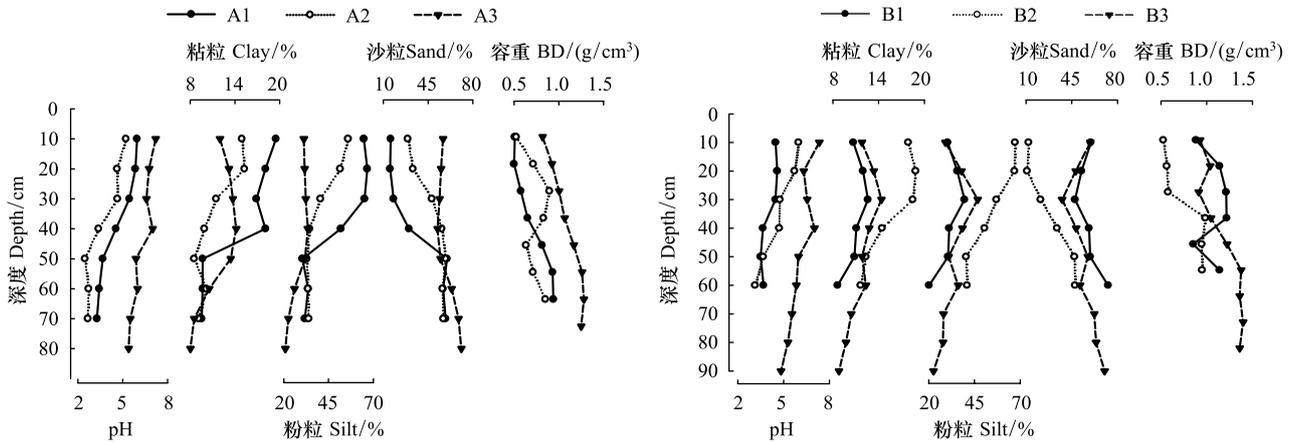


图2 沉积柱理化性质垂向变化

Fig.2 Down core variations of physicochemical properties from A and B sample lines

## 2.2 红树林沉积物的沉积速率

基于放射性同位素<sup>210</sup>Pb的定年分析计算各沉积柱的沉积速率,CIC模式是基于<sup>210</sup>Pb输入通量与沉积物堆积速率恒定条件下的年代计算方法,反映的是一段时间内的平均沉积通量。将<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>与深度进行指数拟合,拟合系数 $R^2$ 介于0.60—0.69之间(图3)。计算可知,A样线上A1、A2、A3样点的沉积速率为0.65、0.65、0.86cm/a,而B样线B1、B2、B3样点的沉积速率为1.10、1.07、1.10cm/a,A样线的沉积速率显著低于B样线( $P<0.05$ );就样点而言,更低潮位点的沉积速率更高。

## 2.3 红树林湿地有机碳密度和埋藏率

有机碳密度参照文献<sup>[9]</sup>方法,结合容重和有机碳含量进行计算,即有机碳密度=有机碳含量×沉积物容重。研究区6个沉积柱的平均有机碳密度为(0.0100±0.0056)g/cm<sup>3</sup>,A、B样柱平均有机碳密度分别为(0.0106±0.0058)g/cm<sup>3</sup>、(0.0090±0.0051)g/cm<sup>3</sup>。表2可以看出,水平方向上,A、B样线上均以中带样点的有机碳含量最大,A样线上内带样点A1的有机碳含量显著高于外带样点A3,而B样线上内带样点B1和外带样点B3的差异不显著,6个样点的有机碳含量表现为A2=A1=B2>B1=B3=A3。垂直方向上,两条样线上除了中带样点规律性不强,出现分层现象外,其它样点的有机碳含量和密度均以表层最高,受容重的影响,样点间有机碳密度差异与有机碳含量的表现存在差异(图4,图5)。

表2 A、B样线上6个样点的有机碳沉积特征

Table 2 Sediment characteristics and SOC in 6 sampling locations from A and B sample lines

样点 Sample point	容重 Bulk density/ (g/cm <sup>3</sup> )	有机碳含量 Organic carbon content/(g/kg)	有机碳密度 Organic Carbon density/(g/cm <sup>3</sup> )	沉积率 Sediment rates/ (cm/a)	有机碳埋藏率 Organic carbon burial rates/ (g m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )
A1	0.70 <sup>b</sup> ±0.19	19.75 <sup>a</sup> ±9.44	0.0124 <sup>b</sup> ±0.0031	0.65	80.47±20.44
A2	0.74 <sup>b</sup> ±0.13	23.59 <sup>a</sup> ±8.12	0.0162 <sup>a</sup> ±0.0030	0.65	105.42±19.21
A3	1.10 <sup>a</sup> ±0.17	3.86 <sup>b</sup> ±1.48	0.0040 <sup>c</sup> ±0.0009	0.86	34.58±7.67
B1	1.07 <sup>a</sup> ±0.16	7.63 <sup>b</sup> ±7.26	0.0076 <sup>c</sup> ±0.0060	1.10	83.97±66.16
B2	0.76 <sup>b</sup> ±0.22	19.50 <sup>a</sup> ±6.77	0.0141 <sup>ab</sup> ±0.0048	1.07	150.56±51.79
B3	1.18 <sup>a</sup> ±0.20	5.88 <sup>b</sup> ±2.12	0.0066 <sup>c</sup> ±0.0013	1.05	69.09±13.51

数值为平均值±标准差,同列不同小写字母表示样点之间差异显著( $P<0.05$ )

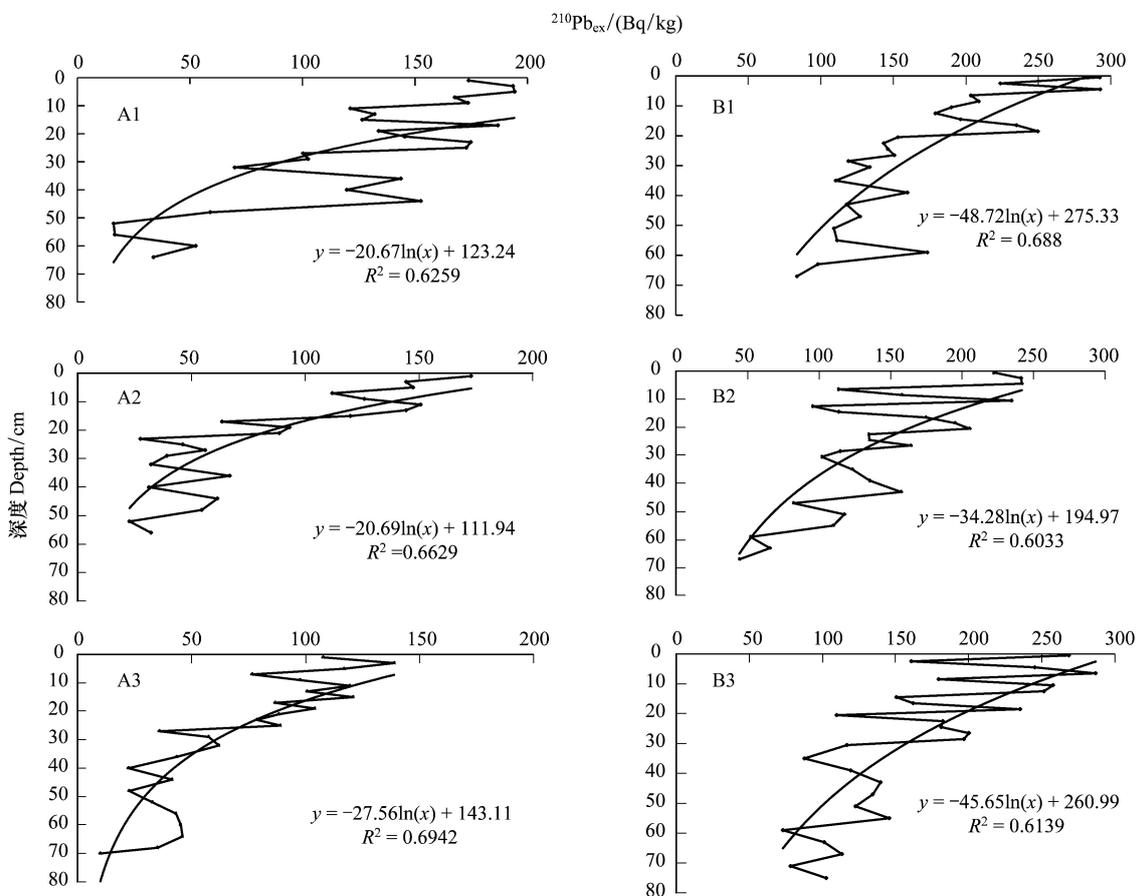


图3 A、B 样线上 6 个沉积柱中  $^{210}\text{Pb}$  比活度垂向变化

Fig.3 Variation of  $^{210}\text{Pb}$  activities versus depth profile for the six sediment cores from A and B sample lines

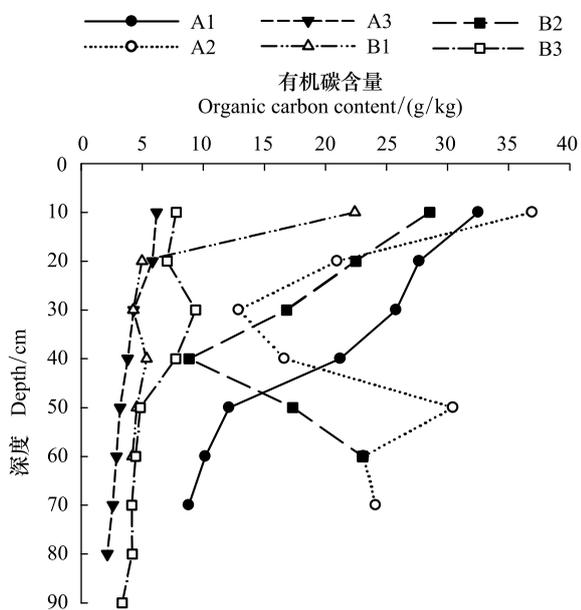


图4 沉积柱中有机碳含量垂向分布

Fig.4 Organic carbon content versus depth in sediment cores

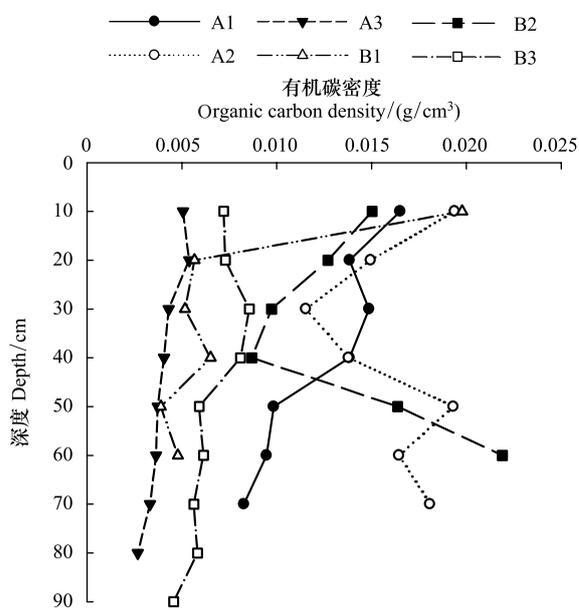


图5 沉积柱中有机碳密度垂向分布

Fig.5 Organic carbon density versus depth in sediment cores

基于年沉积率计算各样点有机碳的埋藏率,即有机碳埋藏率=有机碳密度×沉积率。表2表明,A、B样线上有机碳埋藏率均以中带样点最高,而外带样点最低。在沉积率差别不大的情况下,有机碳含量是有机碳埋藏率的决定因素。表3对砂粒含量与容重、碳含量、碳密度进行相关分析得知,碳含量与碳密度显著正相关,而与容重与砂粒含量显著负相关正相关。

表3 容重、有机碳含量、碳密度与砂粒含量的相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficients (R) among bulk density, organic carbon content, density and sand content

理化性质 Physicochemical properties	容重 Bulk density	有机碳含量 Organic carbon content	有机碳密度 Organic Carbon density	砂粒含量 Sand content
容重 Bulk density	1			
有机碳含量 Organic carbon content	-0.882 *	1		
有机碳密度 Organic carbon density	-0.714 *	0.948 *	1	
砂粒含量 Sand content	0.598 *	-0.621 *	-0.524 *	1

\* 表示相关性显著 ( $P < 0.01$ )

### 3 讨论

#### 3.1 红树林湿地有机碳分布、含量和密度的影响因素

红树林林下土壤属于酸性硫酸盐土类型,是红树植被下发育形成的一类特殊土壤。红树林湿地中的有机碳来自海洋、陆地和自身生产,其中凋落物以及根系更新是其重要来源,也有研究认为其主要来自海洋藻类、菌类以及人类活动等<sup>[20]</sup>。湿地有机碳受生物和非生物因子综合影响,其中生物因子包括来自地上、地下生产与分配等植物功能特征以及腐生生物、蟹类活动等生物活动<sup>[21]</sup>;非生物因子包括气候、地形、潮汐等<sup>[22]</sup>。

红树林湿地有机碳含量差异大,从不足 5 g/kg 到小于 400 g/kg,平均为 22 g/kg<sup>[21]</sup>,有学者认为高温带来更高的有机碳降解率,有机碳密度随着年平均温的增加而降低<sup>[8]</sup>。我国红树林沉积物有机碳含量 1.2—145.5 g/kg,平均(30.5±0.7) g/kg<sup>[17]</sup>,本研究区 6 个不同潮位样点的湿地有机碳含量为 2.14—36.94 g/kg,平均(12.79±9.91) g/kg。表4对我国红树林有机碳含量研究结果进行了比较,可见我国不同红树林区有机碳含量差异大,与更低纬度的海南省红树林湿地有机碳含量相比,本研究区沉积物的有机碳含量相对较低,仍高于地带性土壤 8.7 g/kg 的结果,与前人的研究结论一致<sup>[23-26]</sup>。有学者在该地区研究表明,湿地有机碳含量为 13—64 g/kg<sup>[27]</sup>,不同潮位带各林分间的有机碳含量差异大,红海榄 *R. stylosa* (52.44±16.12) g/kg,而白骨壤

表4 红树林湿地有机碳含量

Table 4 Organic carbon content of mangrove wetland in China

研究区 Study area	有机碳含量/(g/kg) Organic carbon content	研究区 Study area	有机碳含量/(g/kg) Organic carbon content
中国 <sup>[17]</sup>	1.2—145.5	海南 <sup>[31]</sup>	2.99—105.06
清澜港 <sup>[31]</sup>	27.36	东寨港 <sup>[31]</sup>	32.24
东寨港 <sup>[32]</sup>	19.92—87.54	漳江口 <sup>[33]</sup>	6—15
漳江口 <sup>[34]</sup>	23.55—54.17	漳江口 <sup>[35]</sup>	15—19
九龙江口 <sup>[34]</sup>	7.54—20.3	汕头榕江口 <sup>[36]</sup>	<23.2
深圳福田 <sup>[37]</sup>	17.11—61.48	香港汀角 <sup>[11]</sup>	1.68—22.74
北海大冠沙 <sup>[12]</sup>	1.91—9.28	珠江口淇澳岛 <sup>[37]</sup>	18.10—67.98
防城港 <sup>[13]</sup>	2.38—12.41	雷州半岛 <sup>[23]</sup>	3.89—28.71
英罗港 <sup>[24]</sup>	14.67—60.61	高桥 <sup>[27]</sup>	13—64
高桥 <sup>[16]</sup>	8.5—23.6	雷州附城镇 <sup>[25]</sup>	9.27—28.61
雷州湾 <sup>[26]</sup>	23.32±2.90		

*A. marina*为 $(19.93 \pm 4.20) \text{ g/kg}^{[15]}$ 。在同一地区,地形因素通过影响潮汐、水文过程差异来影响凋落物和根系生产等生态过程,进而影响有机碳积累<sup>[21]</sup>,更稳定的水能条件能固定更多有机碳<sup>[16]</sup>。根系生产是红树林湿地有机碳的重要来源,然而根际环境在理化性质、生物活性等方面与非根际环境明显不同<sup>[28]</sup>。根系分泌物及根系分解导致根际沉积物中有机碳含量更高,因此取样点代表性影响空间尺度上推演结果的差异。

本研究的有机碳密度采用文献<sup>[9]</sup>方法,将沉积物和有机碳含量相乘进行计算,可以看出碳密度受沉积物容重和有机碳含量的共同影响。低潮位点的有机碳含量低,但其砂粒含量高,容重大,一定程度上缩小了受潮位影响的差异。也有研究认为,湿地有机碳密度在同一地区的差异是由于悬浮物供给情况和潮汐状况差异造成<sup>[8]</sup>。根系降解决定了红树林湿地有机碳特性及其垂直分布<sup>[29]</sup>,红树林湿地不同深度有机碳含量取决于不同时间尺度上的有机碳埋藏和降解过程<sup>[30]</sup>,因此测定的有机碳含量是对红树林湿地有机碳当前状态的量化,而不是沉积的总量。也有研究表明红树林湿地林下剖面的有机碳含量分布没有规律性<sup>[23]</sup>,本研究的6个样点均以表层有机碳含量最高,内带和外带的样点随着深度增加而降低的现象,而中带样点的有机碳含量变化出现分层差异。

### 3.2 影响红树林湿地有机碳沉积过程的因素

红树林湿地受水动力条件和沉积环境的影响,能够记录和反映环境历史和当前状态。<sup>210</sup>Pb 被广泛用于百年尺度上红树林湿地沉积速率的计算以及其固碳能力评价研究<sup>[39]</sup>。世界红树林的沉积速率为 $0.1\text{—}10 \text{ mm/a}$ ,平均 $5 \text{ mm/a}^{[40]}$ 。基于<sup>210</sup>Pb 定年分析表明,本研究区红树林湿地沉积率在 $6.5\text{—}11.0 \text{ mm/a}$ 。国家海洋局《海平面公报》显示,1980年至2013年,中国沿海海平面上升速率为 $2.9 \text{ mm/a}$ ,南海沿海海平面2013年比常年高 $114 \text{ mm}$ ,未来30年预计将上升 $75\text{—}150 \text{ mm}$ 。可见,研究区红树林湿地的沉积能与海平面上升速率相匹配。潮汐淹没频率是控制沉积率的主要驱动因子<sup>[41]</sup>,淹没频率随着高程的增加而降低,近岸的红树林沉积减少,本研究区低潮位带的沉积率明显高于高潮位带。红树林树体大小、形状、格局<sup>[42]</sup>以及风暴潮、飓风等极端天气也干扰红树林湿地沉积过程<sup>[43-44]</sup>。

湿地中的有机碳会随时间降解和转化,红树林湿地有机碳埋藏率取决于研究的时间尺度。有机碳埋藏率可以用来量化特定时段内有机碳的现存量 and 埋藏率,有助于更好理解生态系统尺度上红树林湿地的固碳潜力。本研究表明中带样点的有机碳埋藏率更高,如B<sub>2</sub>样点有机碳埋藏率可以达到 $(150.56 \pm 51.79) \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,而外带样点A<sub>3</sub>、B<sub>3</sub>仅为 $(34.58 \pm 7.67) \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $(69.09 \pm 13.51) \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,可能与B<sub>2</sub>样点靠近潮沟,为白骨壤与红海榄混交群落类型有关,A<sub>3</sub>、B<sub>3</sub>样点地处外带,潮位低,水动力条件较强,尽管沉积速率较大,但细颗粒与有机质的沉积较少。A<sub>1</sub>、A<sub>3</sub>样点有机碳含量的差异除群落类型外,大的潮差也可能是重要因素,而B<sub>1</sub>、B<sub>3</sub>有机碳含量差异不显著可能由于潮差小。研究表明,同一地区不同地点的有机碳埋藏率也存在较大差异,如澳大利亚的Hinchinbrook Channel为 $26\text{—}336 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1[45]}$ 、九龙江口 $168\text{—}841 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1[46]}$ ;有些地区的差异较小,如Rookery Bay为 $69\text{—}99 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1[47]}$ 、Sawi Bay为 $184\text{—}281 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1[48]}$ 。不同学者对全球尺度上红树林碳埋藏率进行了标准化换算<sup>[8,10]</sup>,全球尺度上红树林有机碳埋藏率的空间差异大,从 $22 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1[49]}$ 到 $1020 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1[46]}$ ,可见全球尺度上估算红树林湿地有机碳埋藏率的标准尚未统一,红树林湿地有机碳的实际埋藏率需要在更小尺度上进行量化估算。

## 4 结论

(1) 研究区红树林湿地百年尺度上沉积物的沉积率为 $6.5\text{—}11 \text{ mm/a}$ ,且外带样点的沉积速率显著快于内带样点,能够与当前的海平面上升速率相适应。

(2) 研究区各样点的有机碳埋藏率空间差异大,受不同潮位和群落类型的影响,近海一侧的外带样点为 $(34.58 \pm 7.67) \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,而中带样点可达到 $150.56 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

(3) 研究区地下有机碳含量、碳密度分别为 $(12.79 \pm 9.91) \text{ g/kg}$ 、 $(0.0100 \pm 0.0056) \text{ g/cm}^3$ 。其空间差异显著,水平方向上以中带样点的有机碳密度最大,内带高潮位点的有机碳密度高于外带的低潮位点;垂向分布

上,除中带样柱的规律性不强、出现分层现象外,内带和外带样柱有机碳含量和密度均以表层最高、随深度增加而减小。研究区红树林湿地有机碳含量和密度比更低纬度带低,但均高于地带性陆地植被,且其能够通过持续的沉积过程来捕捉和固定有机碳,固碳潜力大。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Duarte C M, Middelburg J J, Caraco N. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences*, 2005, 2(1): 1-8.
- [ 2 ] Alongi D M. Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, 2014, 6: 195-219.
- [ 3 ] Eong O J. Mangroves-a carbon source and sink. *Chemosphere*, 1993, 27(6): 1097-1107.
- [ 4 ] Gonnesa M E, Paytan A, Herrera-Silveira J A. Tracing organic matter sources and carbon burial in mangrove sediments over the past 160 years. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 61(2): 211-227.
- [ 5 ] Dittmar T, Herkorn N, Kattner G, Lara R J. Mangroves, a major source of dissolved organic carbon to the oceans. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20():
- [ 6 ] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington: Island Press, 2005: 2.
- [ 7 ] 王文卿, 王珺. 中国红树林. 北京: 科学出版社, 2007: 67.
- [ 8 ] Chmura G L, Anisfeld S C, Cahoon D R, Lynch J C. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4):
- [ 9 ] Donato D C, Kauffman J B, Murdiyarto D, Kurnianto S, Stidham M, Kanninen M. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 2011, 4(5): 293-297.
- [ 10 ] Breithaupt J L, Smoak J M, Smith III T J, Sanders C J, Hoare A. Organic carbon burial rates in mangrove sediments: strengthening the global budget. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(3):
- [ 11 ] 隋淑珍, 张乔民. 华南沿海红树林海岸沉积物特征分析. *热带海洋*, 1999, 18(4): 17-23.
- [ 12 ] 谭晓林, 张乔民. 红树林潮滩沉积速率及海平面上升对我国红树林的影响. *海洋通报*, 1997, 16(4): 29-35.
- [ 13 ] 梁文, 李智, 范航清, 谭趣孜, 黎广钊, 农华琼. 防城港湾红树林表层沉积物粒度分形特征及与环境因子的相关性. *应用海洋学学报*, 2013, 32(2): 184-192.
- [ 14 ] 朱耀军, 郭菊兰, 武高洁, 林广旋, 吴晓东. 湛江高桥红树林沉积物理化性质与金属元素的空间分布. *北京林业大学学报*, 2014, 36(2): 1-9.
- [ 15 ] Wang G, Guan D, Peart M R, Chen Y, Peng Y. Ecosystem carbon stocks of mangrove forest in Yingluo Bay, Guangdong Province of South China. *Forest Ecology and Management*, 2013, 310: 539-546.
- [ 16 ] Yang J, Gao J, Liu B, Zhang W. Sediment deposits and organic carbon sequestration along mangrove coasts of the Leizhou Peninsula, southern China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, 136: 3-10.
- [ 17 ] Liu H, Ren H, Hui D, Wang W Q, Liao B W, Cao Q X. Carbon stocks and potential carbon storage in the mangrove forests of China. *Journal of Environmental Management*, 2014, 133: 86-93.
- [ 18 ] Zaborska A, Carroll J L, Papucci C, Pempkowiak J. Intercomparison of alpha and gamma spectrometry techniques used in  $^{210}\text{Pb}$  geochronology. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2007, 93(1): 38-50.
- [ 19 ] 张万儒, 杨光滢, 屠星南. 森林土壤分析方法. 北京: 中国标准出版社, 24.
- [ 20 ] Meziane T, Tsuchiya M. Organic matter in a subtropical mangrove-estuary subjected to wastewater discharge: origin and utilization by two macrozoobenthic species. *Journal of Sea Research*, 2002, 47(1): 1-11.
- [ 21 ] Kristensen E, Bouillon S, Dittmar T, Marchand C. Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: a review. *Aquatic Botany*, 2008, 89(2): 201-219.
- [ 22 ] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173.
- [ 23 ] 廖金凤. 雷州半岛红树林盐土的某些理化性质. *土壤*, 2004, 36(5): 561-564.
- [ 24 ] 梁士楚, 董鸣, 王伯荪, 张炜银. 英罗港红树林土壤粒径分布的分形特征. *应用生态学报*, 2003, 14(1): 11-14.
- [ 25 ] 韩维栋, 凌大炯, 李燕, 吴小凤. 人工无瓣海桑林的土壤动态研究. *南京林业大学学报自然科学版*, 2003, 27(2): 49-54.
- [ 26 ] Ren H, Jian S, Lu H, Zhang Q M, Shen W J, Han W D, Yin Z Y, Guo Q F. Restoration of mangrove plantations and colonization by native species in Lei Zhou bay, South China. *Ecological Research*, 2008, 23(2): 401-407.
- [ 27 ] Zhang J P. Quantification of sedimentary organic carbon storage and turnover of tidal mangrove stands in southern China based on carbon isotopic measurements. *Radiocarbon*, 2013, 55(2/3): 1665-674.

- [28] Pinel F, Leclerc-Cessac E, Staunton S. Relative contributions of soil chemistry, plant physiology and rhizosphere induced changes in speciation on Ni accumulation in plant shoots. *Plant and Soil*, 2003, 255(2): 619-629.
- [29] Chen R, Twilley R R. A simulation model of organic matter and nutrient accumulation in mangrove wetland soils. *Biogeochemistry*, 1999, 44(1): 93-118.
- [30] Zimmerman A R, Canuel E A. A geochemical record of eutrophication and anoxia in Chesapeake Bay sediments: anthropogenic influence on organic matter composition. *Marine Chemistry*, 2000, 69(1): 117-137.
- [31] 刘美龄. 海南东寨港和清澜港红树植物分布与土壤性质的关系. 厦门: 厦门大学, 2008: 56.
- [32] 王小青, 王健, 陈雄庭. 海南岛东寨港红树林盐土的理化性状. *热带农业科学*, 2008, 28(3): 32-37.
- [33] Xue B, Yan C, Lu H, Bai Y. Mangrove-derived organic carbon in sediment from Zhangjiang Estuary (China) mangrove wetland. *Journal of Coastal Research*, 2009, 25(4): 949-956.
- [34] 刘景春. 福建红树林湿地沉积物重金属的环境地球化学研究. 厦门: 厦门大学, 2006: 27-28.
- [35] 陈昕韡, 蔡立哲, 吴辰, 彭欣, 曹婧, 许鹏, 刘莎, 傅素晶. 福建漳江口红树林和盐沼湿地的多毛类动物群落. *应用生态学报*, 2012, 23(4): 931-938.
- [36] 周炎武. 红树林恢复对沉积物中重金属分布、累积及形态的影响. 广州: 中山大学, 2010: 30.
- [37] 林初夏, 储诚兴, 卢文洲, 龙洁, 刘勇, 徐颂军. 深圳福田自然保护区红树林土壤的化学特征. *生态科学*, 2004, 23(2): 118-123.
- [38] 张弛, 王树功, 朱远辉, 邹建明. 红树林湿地沉积物中 AVS-SEM 与重金属分布特征——以珠江口淇澳岛为例. *环境科学学报*, 2011, 31(4): 805-815.
- [39] Sanders C J, Smoak J M, Waters M N, Sanders L M, Brandini N, Patchineelam S R. Organic matter content and particle size modifications in mangrove sediments as responses to sea level rise. *Marine Environmental Research*, 2012, 77(6): 150-155.
- [40] Alongi D M. Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management*, 3(3): 313-322.
- [41] Cahoon D R. Estimating relative sea-level rise and submergence potential at a coastal wetland. *Estuaries Coasts*, 2011, 38(3): 1077-1084.
- [42] Mazda Y, Kanazawa N, Kurokawa T. Dependence of dispersion on vegetation density in a tidal creek-mangrove swamp system. *Mangroves and Salt Marshes*, 1999, 3(1): 59-66.
- [43] Whelan K R T, Smith T J, Anderson G H, Ouellette M L. Hurricane Wilma's impact on overall soil elevation and zones within the soil profile in a mangrove forest. *Wetlands*, 2009, 29(1): 16-23.
- [44] Smoak J M, Breithaupt J L, Smith T J, Sanders C J. Sediment accretion and organic carbon burial relative to sea-level rise and storm events in two mangrove forests in Everglades National Park. *CATENA*, 2013, 10: 58-66.
- [45] Brunskill G J, Zagorskis I, Pfitzner J. Carbon burial rates in sediments and a carbon mass balance for the Herbert River region of the Great Barrier Reef continental shelf, North Queensland, Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, 54(4): 677-700.
- [46] Alongi D M, Pfitzner J, Trott L A, Tirendi F, Dixon P, Klumpp D W. Rapid sediment accumulation and microbial mineralization in forests of the mangrove *Kandelia candel* in the Jiulongjiang Estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 63(4): 605-618.
- [47] Lynch J C, Meriwether J R, McKee B A, Vera-Herrera F, Twilley R R. Recent accretion in mangrove ecosystems based on  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$ . *Estuaries*, 1989, 12(4): 284-299.
- [48] Alongi D M, Wattayakorn G, Pfitzner J, Tirendi F, Zagorskis I, Brunskill G J, Davidson A, Clough B F. Organic carbon accumulation and metabolic pathways in sediments of mangrove forests in southern Thailand. *Marine Geology*, 2001, 179(1): 85-03.
- [49] Tateda Y, Nhan D D, Wattayakorn G, Toriumi H. Preliminary evaluation of organic carbon sedimentation rates in Asian mangrove coastal ecosystems estimated by  $^{210}\text{Pb}$  chronology. *Radioprotection*, 2005, 40(S1): S527-S532.