

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201909003

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.
TAO YH, HUANG X, WANG XP, et al. Soil carbon and nitrogen storages in three mangrove stands of Zhenzhu Gulf, Guangxi [J]. *Guihaia*, 2020, 40(3): 285–292.

广西珍珠湾三种红树林林分土壤碳氮储量的研究

陶玉华, 黄星, 王薛平, 钟秋平

(北部湾大学, 广西北部湾海洋灾害研究重点实验室, 广西北部湾海岸科学与工程实验室, 广西钦州 535011)

摘要: 为了探讨不同红树林林分土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)和全氮(total nitrogen, TN)储量空间的分布特征以及与C/N的相关性,该研究以广西防城珍珠湾红树林湿地为对象,通过样地调查取样和实验室分析,测定了SOC和TN的含量以及土壤碳储量的计量,揭示了广西北仑河珍珠湾秋茄、木榄和混交林三种红树林林分SOC和TN储量空间的分布特征以及C/N与SOC和TN的相关性。结果表明:(1)秋茄、木榄和混交林的SOC储量分别为140.73、124.94、144.71 t·hm⁻²,三者无显著性差异($P>0.05$);木榄和混交林垂直分布特征表现为20~40 cm>0~20 cm>40~60 cm,秋茄表现为随着土层深度的增加而递减。(2)秋茄、木榄和混交林的TN储量分别为6.49、5.01、5.87 t·hm⁻²,表现为随着土层深度的增加而减少的趋势。(3)秋茄、木榄和混交林的SOC与TN储量之间的相关性极显著($P<0.01$),相关系数分别为0.924、0.971和0.844,说明SOC与TN之间存在一定的耦合效应。(4)三种林分的C/N比值范围为16.77~24.39,表明有机质主要来源于陆地,木榄和混交林土壤的C/N值与SOC储量有显著的相关性($P<0.05$),三种林分的C/N比值与TN储量相关性均不显著。(5)三种红树林林分的土壤碳储量均高于我国森林土壤碳储量的平均值,且SOC与TN储量之间的相关性极显著。

关键词: 秋茄, 木榄, 混交林, 碳氮储量, 分布特征

中图分类号: Q948.1 文献标识码: A

文章编号: 1000-3142(2020)03-0285-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Soil carbon and nitrogen storages in three mangrove stands of Zhenzhu Gulf, Guangxi

TAO Yuhua, HUANG Xing, WANG Xueping, ZHONG Qiuping

(Guangxi Key Laboratory of Marine Disaster in the Beibu Gulf, Beibu Gulf University and the Key Laboratory of Coastal Science and Engineering, Beibu Gulf, Qinzhou 535011, Guangxi, China)

Abstract: In order to probe the storage and spatial distribution characteristics of soil organic carbon(SOC) and total nitrogen(TN) and the relationship between C/N and SOC and TN in soil of mangrove stands of different ages, SOC, TN contents and soil carbon storage were measured and analyzed, based on plot sampling investigation and laboratory analy-

收稿日期: 2019-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(31960251); 钦州学院高层次人才科研启动项目(2017KYQD203); 广西北部湾海洋灾害研究重点实验室自主项目(2018TS01) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31960251); Qinzhou University High-Level Scientific Research Start Foundation of Talent (2017KYQD203); Guangxi Key Laboratory of Marine Disaster in the Beibu Gulf (2018TS01)].

作者简介: 陶玉华(1968-), 女(达斡尔族), 黑龙江齐齐哈尔人, 博士, 教授, 从事生态学研究, (E-mail) 151782653@qq.com。

sis, and storage and spatial distribution characteristics of SOC and TN, and the relationship between C/N and SOC and TN were discovered in soils of three kinds of mangrove stands of *Kandelia candel*, *Bruguiera gymnorhiza* and mixed forests in Zhenzhu Gulf, Beilun River of Guangxi. The results were as follows: (1) The SOC storage of *Kandelia candel*, *Bruguiera gymnorhiza* and mixed forests were 140.73, 124.94, 144.71 t · hm⁻², respectively, and there was no significant differences among them ($P < 0.05$); The SOC storage of *Bruguiera gymnorhiza* and mixed forests from the highest to the lowest invetical distribution was 20–40 cm > 0–20 cm > 40–60 cm, and the SOC storage of *Kandelia candel* decreased with the increase of soil depth. (2) TN storage of *Kandelia candel*, *Bruguiera gymnorhiza* and mixed forests were 6.49, 5.01, 5.87 t · hm⁻², respectively, decreasing with the increase of soil depth. (3) There was a significant correlation between SOC and TN storage in *Kandelia candel*, *Bruguiera gymnorhiza* and mixed forests ($P < 0.01$), and correlation coefficients were 0.924, 0.971 and 0.844, respectively, which indicated that there was coupling effect between SOC and TN. (4) The C/N of three stands ranged from 16.77 to 24.39, indicating that the organic matter mainly came from land. There was a significant correlation between soil C/N and SOC storage in *Bruguiera gymnorhiza* and mixed forests ($P < 0.05$), but there was no significant correlation between C/N and TN storage in the three stands. (5) The soil carbon storage of three mangrove stands was higher than the average value of forest soil carbon storage in China, and there was extremely significant correlation between SOC and TN.

Key words: *Kandelia candel*, *Bruguiera gymnorhiza*, mixed forests, storage of SOC and TN, distribution characteristics

红树林位于海洋和陆地的动态交界处,是一种生产力和生物多样性较高的湿地生态系统类型,其土壤有机碳库和氮库在湿地生态系统的物质能量循环中起着重要的作用。在全球范围内,红树林湿地面积占海洋面积虽然不到 2%,但其固定的碳储量却占其 10% ~ 15% (Twilley et al., 1992)。尽管对红树林土壤有机碳储量的研究起步较晚(辛琨等,2014;郭志华等,2014;乔永民等,2018),但红树林作为蓝碳的重要组成部分,其碳储量的动态变化却影响着蓝碳的收支平衡。近年来,一些学者已对华南地区红树林土壤碳储量不同方向开展了研究,包括不同环境因子和土地利用形式对土壤有机碳库的影响(袁彦婷等,2012;詹绍芬等,2017),红树林土壤有机碳储量的分布特征以及红树林土壤有机碳的来源辨析等(邱广龙等,2017;于宇等,2017)等。然而,少有分树种和林分来开展对红树林湿地土壤有机碳库和氮库的研究。土壤碳氮比值(C/N)是反映土壤有机碳氮的积累和土壤质量变化的指标,氮对土壤有机碳库产生重要的影响(管启杰等,2002;赵庆庆等,2018),它的变化趋势对土壤物质循环和植株的生长发育有重要的影响。红树林湿地是承纳着来自海陆营养盐的蓄积地,是湿地沉积物中有机质输入的最主要贡献者,由于红树林种类的多样性和其结构的复杂性,对于其碳氮的物质循环的认识还不是很清晰,有必要分树种开展对红树林湿地碳氮库的研究。目前,我国对红树林土壤碳库和

氮库的研究多集中在福建、海南和广东等地,对于广西红树林湿地的相关研究还不多,不利于规律性成果的总结。

对于广西珍珠湾红树林土壤有机碳和氮储量的垂直分布特征和 C/N 比值及其来源的辨析仍缺乏深入的研究。以广西防城珍珠湾红树林湿地为研究对象,深入研究其土壤碳氮储量的分布规律、C/N 比值以及有机碳储量与氮储量的相关性,探讨其影响因素及其来源,加深认识红树林湿地碳和氮在生物地球化学循环中的相互作用,从而为红树林湿地管理提供科学依据。

1 研究区概况

研究地点位于北仑河口国家级自然保护区珍珠湾红树林区域,北仑河口国家级自然保护区位于我国大陆最西南端海岸线,处于广西东兴市和防城港市海域,东南临近北部湾,西南与越南毗邻,海岸线长为 105 km,滩涂面积为 53 km²,由东到西包括珍珠湾、江平三岛和北仑河口。珍珠湾红树林保护区分布着我国大陆海岸连片面积最大、分布相对集中、生态景观奇特的红树林,现有红树林面积约为 1 274 hm²,其中 1 081 hm²红树林集中在珍珠湾内。气候属于南亚热带海洋季风气候,日照时数大于 1 600 h,年均气温为 22.3 °C,年平均降水量为 2 220.5 mm。潮汐类型为正规全日潮,平均潮差为 2.22 m,海水年平均温度为 23.5

℃,盐度为23.1‰(范航清等,2014)。海岸带土壤主要为风沙土和冲积土,陆地土壤以红壤和黄壤为主。河漫滩的土壤主要为粉细沙和沙卵石。保护区共有红树植物 16 种,包括木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、秋茄(*Kandelia candel*)、白骨壤(*Avicennia marina*)、海漆(*Excoecaria agallocha*)、红海榄(*Rhizophora stylosa*)、榄李(*Lumnitzera racemosa*)、老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*)、小花老鼠簕(*A. ebracteatus*) (梁士楚等,2004)等。本研究的对象为秋茄、木榄和混交林,三种林分的平均树高为 2.23 m、平均胸径为 3.47 cm。

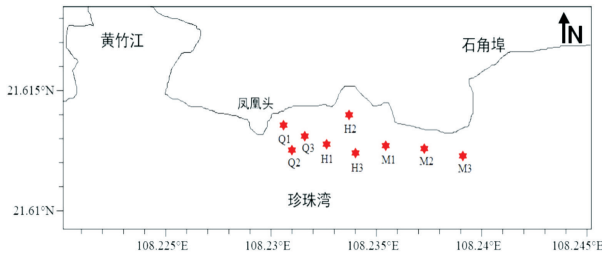


图 1 调查样点分布

Fig. 1 Sample sites in Zhenzhu Gulf

2 研究方法

2.1 土壤采集

在珍珠湾秋茄、木榄和混交林的试验区域分别设立 5 m × 10 m 的样地,共 9 个样地,用 Q、M 和 H 分别表示秋茄、木榄和混交林三种林分(图 1)。每个样地内随机选择 3 个土壤采样点,剖面深度分为 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm,利用环刀进行采样,环刀体积为 100 cm³。将采集后的土壤样品放入聚乙烯自封袋后带回实验室,测定土壤的容重和含水率,土样通过自然风干、过筛并去除杂物后用于有机碳含量 SOC 和总氮含量 TN 的测定。

2.2 实验方法

SOC 含量采用重铬酸钾外加热法测定,TN 含量采用凯氏定氮法测定。

2.3 数据分析

土壤容重 $rs = g \times 100 / v \times (100 + W)$ 。

式中: rs 为土壤容重($g \cdot cm^{-3}$); g 为环刀土鲜重(g); v 为环刀容积($100 cm^3$); W 为样品含水

率(%)。

土壤有机碳储量和氮储量的计算如下:

$$SOC = \sum_i^n D_i \times M_i \times H_i \times 0.1;$$

$$STN = \sum_i^n D_i \times TN_i \times H_i \times 0.1。$$

式中: SOC 为一定深度内土壤有机碳储量($t \cdot hm^{-2}$); STN 为一定深度内土壤全氮储量($t \cdot hm^{-2}$); D_i 为第 i 层土壤的容重($g \cdot cm^{-3}$); M_i 为第 i 层土壤有机碳的含量($g \cdot kg^{-1}$); TN_i 为第 i 层土壤全氮的含量($g \cdot kg^{-1}$); H_i 为第 i 层土壤的厚度(cm); n 为土层数。

2.4 统计分析

采用软件 Excel 2010 和 SPSS19.0 进行数据分析。采用单因素方差分析(ANOVA)($P < 0.05$)不同林分土壤有机碳储量和氮储量的差异。采用 Pearson 相关法分析 SOC、TN 与 C/N 值之间的相关关系。

3 结果与分析

3.1 土壤有机碳含量和全氮含量的变化

秋茄、木榄和混交林 SOC 和 TN 的含量,大体表现为 0~60 cm 深度内随着土层深度的增加而降低的趋势。秋茄 SOC 和 TN 的含量在 0~60 cm 的变化范围分别为 1.43%~2.21% 和 0.62~1.03 $g \cdot kg^{-1}$;木榄 SOC 和 TN 的含量在 0~60 cm 的变化范围分别为 1.01%~2.13% 和 0.43~0.87 $g \cdot kg^{-1}$;混交林 SOC 和 TN 的含量在 0~60 cm 的变化范围分别为 1.41%~2.39% 和 0.61~0.98 $g \cdot kg^{-1}$ 。混交林的 SOC 含量高于秋茄和木榄的,在 40~60 cm 土层中秋茄和木榄的 SOC 含量存在显著性差异,但均与混交林无显著差异。秋茄和混交林的 TN 含量相近,均高于木榄的,在 40~60 cm 土层中秋茄和木榄的 SOC 含量存在显著性差异,但均与混交林无显著差异。40~60 cm 土层的木榄和混交林的 SOC 含量分别与其 0~20 cm、20~40 cm 的有显著性差异。40~60 cm 土层木榄的 TN 含量分别与其 0~20 cm、20~40 cm 的有显著性差异。0~20 cm 土层混交林的 TN 含量与 40~60 cm 的有显著性差异($P < 0.05$)(表 1)。

3.2 土壤有机碳储量和全氮储量的分配

在 0~60 cm 土层的总 SOC 储量表现为混交林>秋茄>木榄,总 TN 储量为秋茄>混交林>木榄。

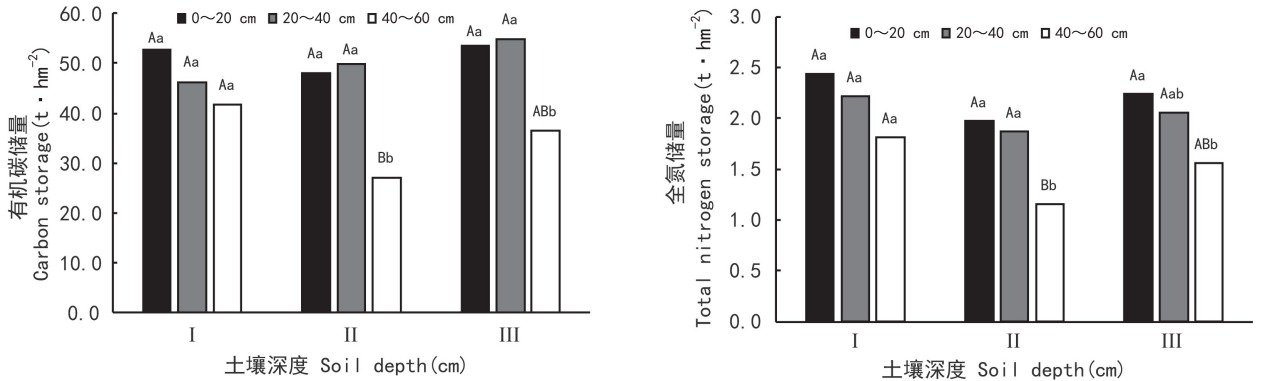
表 1 土壤有机碳和全氮的含量

Table 1 Contents of soil organic carbon and total nitrogen ($n=6$)

处理 Treatment	土壤深度 Soil depth (cm)	秋茄 <i>Kandelia candel</i>	木榄 <i>Bruguiera gymnorrhiza</i>	混交林 Mixed forests
土壤有机碳含量 Content of SOC (%)	0~20	2.21 Aa	2.13 Aa	2.39 Aa
	20~40	1.74 Aa	2.24 Aa	2.31 Aa
	40~60	1.43 Aa	1.01 Bb	1.41 ABb
	平均 Average	1.79 A	1.79 A	2.04 A
全氮含量 Content of TN ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0~20	1.03 Aa	0.87 Aa	0.98 Aa
	20~40	0.83 Aa	0.84 Aa	0.87 Aab
	40~60	0.62 Aa	0.43 Bb	0.61 ABb
	平均 Average	0.83 A	0.72 A	0.82 A

注: 同列数据后的不同小写字母表示同一树种不同土层差异显著 ($P<0.05$); 同行不同大写字母表示不同树种同一土层间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same columns indicate significant differences among the same mangrove species in different soil layer ($P<0.05$); different capital letters on the same lines indicate significant differences among the same soil layer in different mangrove species ($P<0.05$).



I. 秋茄; II. 木榄; III. 混交林。不同大写字母表示不同树种在同一土层差异显著 ($P<0.05$); 不同小写字母表示同一树种不同土层深度差异显著 ($P<0.05$)。下同。

I. *Kandelia candel*; II. *Bruguiera gymnorrhiza*; III. Mixed forests. Different capital letters indicate significant differences among different mangrove species in same soil layer ($P<0.05$); small letters indicate significant differences among the same mangrove species in different soil layers ($P<0.05$). The same below.

图 2 不同树种土壤有机碳和全氮储量

Fig. 2 Storages of soil organic carbon and total nitrogen in different mangrove species

秋茄、木榄和混交林 SOC 和 TN 储量有随着土层深度的增加而减少的趋势(木榄和混交林的 SOC 除外), 三种林分在 0~60 cm 总 SOC 和总 TN 没有显著性差异。三者 SOC 在 0~20 cm、20~40 cm 均无显著性差异, 但木榄 40~60 cm SOC 与秋茄差异显著, 与混交林无显著性差异。木榄 40~60 cm TN 与秋茄差异显著。木榄 40~60 cm 的 SOC 分别

与 0~20 cm、20~40 cm 差异显著, 混交林各土层 SOC 之间的比较关系同木榄。木榄 40~60 cm 土层的 TN 分别与 0~20 cm、20~40 cm 差异显著, 混交林的 TN 在 0~20 cm 和 40~60 cm 间存在显著差异(图 2)。

3.3 C/N 与土壤有机碳储量和全氮储量的相关性

由表 2 可知, 秋茄土壤 C/N 值分别与 SOC 储

表 2 红树林土壤有机碳、全氮储量与 C/N 的相关性

Table 2 Correlation coefficients between storage of soil organic carbon(SOC), total nitrogen(TN) and C/N in different species of mangrove

相关系数 Correlation coefficient	秋茄 <i>Kandelia candel</i>			木榄 <i>Bruguiera gymnorrhiza</i>			混交林 Mixed forests		
	土壤有机 碳储量 Storage of SOC	全氮储量 Storage of TN	C/N	土壤有机 碳储量 Storage of SOC	全氮储量 Storage of TN	C/N	土壤有机 碳储量 Storage of SOC	全氮储量 Storage of TN	C/N
土壤有机碳储量 Storage of SOC	1	0.924 **	-0.441	1	0.971 **	0.641 *	1	0.844 **	0.693 **
全氮储量 Storage of TN	0.924 **	1	-0.75	0.971 **	1	0.446	0.844 **	1	0.209
C/N	-0.441	-0.75	1	0.641 *	0.446	1	0.693 **	0.209	1

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 级别(双尾)和 0.01 级别(双尾)相关性显著。

Note: * and ** mean the correlation existing significant differences at 0.05 level (single tail) and 0.01 level (double tail), respectively.

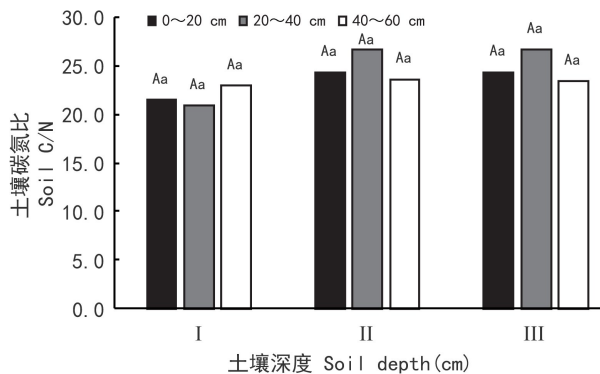


图 3 不同树种土壤 C/N 值的变化

Fig. 3 Changes of soil C/N value in different mangrove species

量和 TN 储量的相关性不显著, SOC 储量与 TN 储量之间存在极其显著的相关性 ($P < 0.01$), 相关系数为 0.924。木榄土壤 C/N 值与 SOC 储量有显著的相关性 ($P < 0.05$), 与 TN 储量相关性不显著, SOC 储量与 TN 储量之间存在极其显著的相关性 ($P < 0.01$), 相关系数为 0.971。混交林土壤 C/N 值与 SOC 储量有显著的相关性 ($P < 0.05$), 与 TN 储量相关性不显著, SOC 储量与 TN 储量之间存在极其显著的相关性 ($P < 0.01$), 相关系数为 0.844。

3.4 秋茄、木榄和混交林土壤 C/N 值的变化

秋茄、木榄和混交林土壤的 C/N 值在 0~60 cm 土层的变化范围为 20.88~26.64(图 3)。秋茄、木榄和混交林总的 C/N 值表现为木榄>混交林>秋茄。秋茄土壤的 C/N 值表现为 40~60 cm>

0~20 cm>20~40 cm, 木榄的 C/N 值表现为 20~40 cm>0~20 cm>40~60 cm, 混交林的 C/N 值为 20~40 cm>0~20 cm>40~60 cm。木榄和混交林土壤的 C/N 值变化趋势一致。

4 讨论与结论

4.1 土壤的 SOC 和 TN 变化以及碳氮相关性

本研究中, 秋茄、木榄和混交林的 SOC 含量均值分别为 1.79%、1.79% 和 2.04%, 低于海南东寨港山尾和竹山秋茄、木榄和其他种类的红树林的 SOC(詹绍芬等, 2015), 与福建九龙江口红树林接近(于宇等, 2017)。秋茄和混交林的 SOC 含量表现为表聚性, 木榄的 SOC 含量表现为 20~40 cm 土层最高。有研究表明, 红树林土壤有机碳含量与其根系的分布有关(辛琨等, 2014; 陈怀璞等, 2017)。在 20~40 cm 土层中存在大量根系, 根系及其活动是土壤深层有机碳的重要来源之一。此外, 由于湿地长期处于水淹的环境中, 造成土壤含氧量降低而促使有机碳分解减慢, 从而有利于 SOC 的积累。秋茄、木榄和混交林 TN 含量均值分别为 0.83、0.72 和 0.82 $g \cdot kg^{-1}$, 分布特征表现为表聚性, 小于福建九龙江口红树林(于宇等, 2017), 高于广西大冠沙红树林和广东湛江红树林 TN(袁彦婷等, 2012)。

本研究中, 秋茄、木榄和混交林的 SOC 储量分别为 140.73、124.94 和 144.71 $t \cdot hm^{-2}$, 均高于我

国森林土壤碳储量的平均值 $107.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (刘世荣等, 2011), 表明红树林湿地巨大的固汇能力和作为蓝碳组成部分具有的生态意义和价值。秋茄、木榄和混交林总 TN 分别为 6.49 、 5.01 和 $5.87 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 除了木榄和秋茄的 SOC 外, 秋茄、木榄和混交林的 SOC 和 TN 随着土层深度的增加呈现了减少的趋势, 与辛琨等 (2014) 研究的海南红树林的 SOC 分布特征一致, 湿地土壤有机碳来源于枯落物、植物根系、根系分泌物和动物残体以及排泄物等内源性输入, 经过土壤微生物的分解作用释放到土壤表层, 使土壤表层的有机碳储量增加。此外, 湿地土壤有机碳还来自潮汐、河水和降雨等携带的外源性有机物。

由于红树林湿地生态系统特殊的水热条件、生物和气候因素以及生境的动态性共同影响着 SOC 的输入输出, 在植被、沉积物、间隙水、海水和大气之间存在多个界面的碳交换过程, 从而导致红树林的 SOC 影响因子的多样性和复杂性, 红树林沉积物有机碳存在较大的不确定性 (Giri et al., 2011; KauffmaNet al., 2011)。因此, 不同区域、不同群落和不同取样深度 SOC 储量会有较大的差异, 海南文昌清澜港红树林不同试验地点的 SOC 储量最高值分别出现在 $15 \sim 30 \text{ cm}$ (林慧等, 2015) 和 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 处 (郭志华等, 2014), 海南东寨港山尾木榄群落 SOC 储量最大值出现在 $0 \sim 10 \text{ cm}$, 秋茄群落为 $40 \sim 50 \text{ cm}$, 竹山木榄群落为 $30 \sim 40 \text{ cm}$ (詹绍芬等, 2015), 深圳湾红树林 SOC 储量最高值却出现在 73 cm 处 (乔永民等, 2018)。

本研究中, 三种林分的 TN 储量表现为随着土层深度增加而减少的趋势, 与珠江口红树林的研究结果一致 (牛安逸等, 2019)。有研究表明, 碳氮元素主要是以枯落物形式输入土壤中 (李旭林等, 2010; Fragoso et al., 2017; Nordhaus et al., 2017)。表层的 SOC 和 TN 储量较高是因为植被地上枯落物的输入, 而深层土壤的 SOC 和 TN 储量却主要受植物根系的影响 (Yang et al., 2015)。因此, 本研究区域枯落物仍是土壤获得养分的主要来源。

本研究中, 秋茄、木榄和混交林的 SOC 与 TN 储量之间相关性极显著 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.924 、 0.971 和 0.844 , 表明 SOC 与 TN 之间存在一定的耦合效应, 这与前人 (崔静等, 2012; 吴绽蕾等, 2016; 乔永民等, 2018) 的研究结果一致。氮素的增加可促进植物的生长, 从而提高有机碳的

积累, 而有机碳的分解却可以促进氮素在土壤中的释放。有机碳在土壤中的固定在一定程度上取决于氮素的高低 (陈怀璞等, 2017), 碳的固定能引起氮的固定, 二者存在一定的消长关系。

由于 SOC 和 TN 受土壤理化性质、水文气候条件和湿地生物以及人类活动干扰等多因素的影响 (辛琨等, 2014; 张剑等, 2017), 所以讨论 SOC 和 TN 的影响因素需要多方面从外界影响因子和土壤本身特性的综合性因素去考量。本研究由于未涉及红树林沉积物的间隙水以及海水的 SOC 和 TN 的研究, 所以还不能从多个碳交换界面去全面分析与 SOC 和 TN 之间的关系。

4.3 土壤 C/N 值的变化及与 SOC 储量和 TN 储量的相关性

湿地沉积物中 C/N 值是确定其有机质来源的一个重要方法。海洋藻类因富含蛋白质而少纤维素, 其 C/N 值通常小于 10, 而陆生高等植物富含纤维素而缺乏蛋白质, C/N 值通常大于等于 20, 当沉积物中, C/N 值越大显示其来自陆源的有机质含量越高 (Krishnamurthy et al., 1986; 王爱军等, 2007)。以此判断为标准, 本研究中土壤的 C/N 值为 $20.88 \sim 26.64$, 表明三种红树林湿地有机质主要来源于陆地, 这与夏鹏等 (2015) 通过同位素示踪研究广西钦州湾红树林有机碳的来源结果一致。C/N 值最高出现在 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 或 $40 \sim 60 \text{ cm}$, 说明来自本研究取样范围的中层和深层有机碳来源于陆地成分的量高于表层。

本研究中, 木榄和混交林土壤的 C/N 值与 SOC 储量有显著的相关性 ($P < 0.05$), 与 TN 储量相关性不显著。有学者研究报道了土壤 C/N 与 SOC 分解速率呈反比, 湿地土壤 C/N 值高会使得土壤微生物活性降低, C/N 值越大, 有机碳分解速度越慢, 从而减少了有机碳的氧化和流失, 有利于土壤有机碳的积累 (王绍强等, 2000; Yang et al., 2013; Wang et al., 2014)。较高的 C/N 值表明其有机碳的积累多, 本研究三种林分红树林的 C/N 值均大于中国土壤 C/N 的均值 (王绍强等, 2008), 说明红树林湿地具有强大的碳汇能力。

参考文献:

CHENE HP, ZHANG TY, GE ZM, et al., 2017. Distribution of soil carbon and nitrogen stocks in salt marsh wetland in

- Dongtan of Chongming [J]. *J Ecol Rural Environ*, 33(3): 242-251. [陈怀璞, 张天雨, 葛振鸣, 等, 2017. 崇明东滩盐沼湿地土壤碳氮储量分布特征 [J]. *生态与农村环境学报*, 33(3):242-251.]
- CUI J, CHEN YM, HUANG JJ, et al., 2012. Soil carbon sequestration characteristics of *Caragana microphylla* plantations and influencing factors in Loess Hilly Semiarid Region [J]. *Chin J Eco-Agric*, 20(9): 1197-1203. [崔静, 陈云明, 黄佳健, 等, 2012. 黄土丘陵半干旱区人工柠条林土壤固碳特征及其影响因素 [J]. *中国生态农业学报*, 20(9):1197-1203.]
- FAN HQ, WANG X, HE BY, et al., 2014. Artificial habitat establishment and mangrove rehabilitation [M]. Beijing: China Forestry Publishing House. [范航清, 王欣, 何斌源, 等, 2014. 人工生境创立与红树林重建 [M]. 北京: 中国林业出版社.]
- FRAGOSO CP, BERNIN E, ARAUJO BF, et al., 2018. Mercury in litterfall and sediment using elemental and isotopic composition of carbon and nitrogen in the mangrove of south-eastern Brazil [J]. *Estua Coastal Shelf Sci*, 202: 30-39.
- GIRI C, OCHIENG E, TIESZEN LL, et al., 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data [J]. *Global Ecol Biogeogr*, 20(1): 154-159.
- GUO ZH, ZHANG L, GUO YR, et al., 2014. Soil carbon sequestration and its relationship with soil pH in Qinglangang mangrove wetlands in Hainan Island [J]. *Sci Silv Sin*, 50(10): 8-15. [郭志华, 张莉, 郭彦茹, 等, 2014. 海南清澜港红树林湿地土壤有机碳分布及其与 pH 的关系 [J]. *林业科学*, 50(10):8-15.]
- KAUFFMAN JB, HEIDER C, COLE TG, et al., 2011. Ecosystem carbon stocks of Micronesian mangrove forests [J]. *Wetlands*, 31(2): 343-352.
- KRISHNAMURTHY RV, BHATTACHARYA SK, KUSUMGAR S, 1986. Palaeoclimatic changes deduced from $^{13}C/^{12}C$ and C/N ratios for Karewa Lake sediments, India [J]. *Nature*, 323(6084): 150-152.
- LI H, YAN BX, LI HY, et al., 2018. Distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in soils of typical salt water-fresh water interface wetlands of the Yellow River Delta [J]. *Wetland Sci*, 16(5): 679-683. [李怀, 阎百兴, 李海彦, 等, 2018. 黄河口典型咸、淡水交互区湿地土壤氮和磷分布特征 [J]. *湿地科学*, 16(5):679-683.]
- LI XL, ZHENG KZ, ZHOU YW, et al., 2010. Effect of mangrove restoration on nitrogen of surface sediment [J]. *Acta Ecol Sin*, 30(12): 3163-3172. [李旭林, 郑康振, 周炎武, 等, 2010. 红树林恢复对潮滩表层沉积物氮素的影响 [J]. *生态学报*, 30(12):3163-3172.]
- LIANG SC, LIU JF, LIANG MZ, 2004. Ecological study on the mangrove communities in Beilun Hekou National Nature Reserve [J]. *J Guangxi Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 22(2): 70-76. [梁士楚, 刘镜法, 梁铭忠, 2004. 北仑河口国家级自然保护区红树植物群落研究 [J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 22(2):70-76.]
- LIN H, ZENG SQ, WANG GJ, et al., 2015. Carbon density and allocation of *Bruguiera sexangula* and *Hibiscus tiliaceus* mangrove ecosystem in Qinglan harbor of Wenchang City, Hainan Province [J]. *J Centr S Univ For Technol*, 35(11): 99-103. [林慧, 曾思齐, 王光军, 等, 2015. 海南文昌清澜港海莲-黄槿生态系统碳密度及分配格局 [J]. *中南林业科技大学学报*, 35(11):99-103.]
- LIU SR, WANG H, LUAN JW, 2011. A review of research progress and future prospective of forest soil carbon stock and soil carbon process in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 31(19): 5437-5448. [刘世荣, 王晖, 栾军伟, 2011. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展 [J]. *生态学报*, 31(19):5437-5448.]
- NIU AY, MA JJ, YANG WW, et al., 2019. Effects of soil physical and chemical properties on the mass fractions of nitrogen and phosphorus in soil of mangrove wetland in the Pearl River Estuary [J]. *J S Chin Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 51(2): 86-94. [牛安逸, 马姣娇, 杨文槐, 等, 2019. 土壤理化性质对珠江口红树林湿地土壤氮磷质量分数的影响 [J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 51(2): 86-94.]
- NORDHAUS I, SALEWSKI T, JENNERJAHM TC, 2017. Interspecific variations in mangrove leaf litter decomposition are related to labile nitrogenous compounds [J]. *Estuar, Coast Shelf Sci*, 192(5): 137-148.
- QIAO YM, TAN JB, MA SX, et al., 2018. The distribution pattern and sources analysis for nitrogen and phosphorus in core sediment of Shenzhen mangrove wetland [J]. *Environ Sci Technol*, 41(2): 34-40. [乔永民, 谭键滨, 马舒欣, 等, 2018. 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*, 41(2):34-40.]
- TWILLEY RR, CHEN RH, HARGIS T, 1992. Carbon sinks in mangrove forests and their implications to the carbon budget of tropical coastal ecosystems [J]. *Water Air Soil Poll*, 64: 265-288.
- WANG AJ, CHEN J, LI DY, et al., 2007. Spatial variations of carbon and nitrogen incoastal wetland sediments of Quanzhou Bay in China [J]. *Environ Sci*, 28(10): 2361-2368. [王爱军, 陈坚, 李东义, 等, 2007. 泉州湾海岸湿地沉积物 C、N 的空间变化 [J]. *环境科学*, 28(10):2361-2368.]
- WANG W, SARDANS J, ZENG C, et al., 2014. Responses of soil nutrient concentrations and stoichiometry to different humanland uses in a subtropical tidal wetland. [J]. *Geoderma*, 232-234: 459-470.
- WANG S Q, ZHOU CH, LI KR, et al., 2000. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China [J]. *Acta Geogr Sin*, 55(5): 533-541. [王绍强, 周成虎, 李克让, 等, 2000. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析 [J]. *地理学报*, 55(5): 533-541.]
- WANG SQ, YU GR, 2008. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus

- elements [J]. *Acta Ecol Sin*, (8): 3937-3947. [王绍强, 于贵瑞, 2008. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征 [J]. *生态学报*, (8): 3937-3947.]
- WU ZL, WANG DQ, LI YJ, et al., 2015. The contribution of *Scirpus mariqueter* to sediment carbon storage of Chongming east tidal flat wetland in Yangtze River Estuary [J]. *Acta Sci Circumstant*, 635(11): 3639-3646. [吴绽蕾, 王东启, 李杨杰, 等, 2015. 长江口崇明东滩海三棱草对沉积物有机碳库的贡献研究 [J]. *环境科学学报*, 635(11): 3639-3646.]
- XIA P, MENG XW, PING AP, et al., 2015. Historical retro-spection on mangrove development using stable carbon isotopes and pollen analysis, and its response to climate change and human activity [J]. *Haiyang Xuebao*, 37(3): 77-85. [夏鹏, 孟宪伟, 平爱平, 等, 2015. 广西钦州湾百年红树林演变的有机碳同位素和孢粉示踪及其影响因素 [J]. *海洋学报*, 37(3): 77-85.]
- XIN K, YANK, LI Z, et al., 2014. Distribution of soil organic carbon in mangrove wetlands of Hainan island and its influencing factors [J]. *Acta Pedol Sin*, 51(5): 1078-1086. [辛琨, 颜葵, 李真, 等, 2014. 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*, 51(5): 1078-1086.]
- YANG SL, XU KH, MILLIMAN JD, et al., 2015. Decline of Yangtze River water and sediment discharge: Impact from natural and anthropogenic changes [J]. *Sci Reports*, 5: 12581.
- YANG W, ZHAO H, CHEN XL, et al., 2013. Consequences of short-term C4 plant *Spartina alterniflora* invasions for soil organic carbon dynamics in a coastal wetland of Eastern China [J]. *Ecol Eng*, 61(12): 50-57.
- YU Y, LI XG, YUAN HM, 2017. Distributions and sources of organic carbon and nitrogen in mangrove sediments in the Jiulong River Estuary [J]. *J Guangxi Acad Sci*, 33(2): 75-81. [于宇, 李学刚, 袁华茂, 2017. 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*, 33(2): 75-81.]
- YUAN YT, DING ZH, ZHANG L, et al., 2012. Impact of different land use modes on nutrients of sediments from mangrove wetlands of China [J]. *Earth Environ*, 40(3): 385-390. [袁彦婷, 丁振华, 张玲, 等, 2012. 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*, 40(3): 385-390.]
- ZAN QJ, WANG YJ, WANG BX, 2002. Accumulation and cycle of N, P, K elements in *Sonneratia apetala* + *S. caseolaris* mangrove community at Futian of Shenzhen, China [J]. *Guihaia*, 22(4): 331-336. [詹启杰, 王勇军, 王伯荪, 2002. 深圳福田红树林无瓣海桑+海桑群落N、P、K累积和循环 [J]. *广西植物*, 22(4): 331-336.]
- ZHAN SF, HUANG B, CHEN YJ, et al., 2015. Study of soil organic carbon in different mangrove communities [J]. *J Trop Biol*, 6(4): 397-402. [詹绍芬, 黄勃, 陈玉军, 等, 2015. 不同红树林群落土壤环境有机碳比较 [J]. *热带生物学报*, 6(4): 397-402.]
- ZHANG J, WANG LP, XIE JP, et al., 2017. Distribution and influencing factors of soil organic carbon in Dunhuang Yangguan Wetland [J]. *Chin J Ecol*, 36(9): 2455-2464. [张剑, 王利平, 谢建平, 等, 2017. 敦煌阳关湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素 [J]. *生态学杂志*, 36(9): 2455-2464.]
- ZHAO QQ, BAI JH, ZHANG GL, et al., 2018. Spatial and seasonal changes in soil nitrogen stocks along a water and salinity gradient in the Yellow River Delta, China [J]. *J Beijing Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 5454(1): 56-63. [赵庆庆, 白军红, 张光亮, 等, 2018. 黄河三角洲湿地土壤氮库沿水盐梯度的时空分布特征 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 5454(1): 56-63.]

(责任编辑 蒋巧媛)