

海南岛红树林湿地土壤有机碳分布规律及影响因素研究*

辛琨[†] 颜葵 李真 胡杰龙 邱明红

(海南师范大学生命科学学院, 海口 571158)

摘要 以海南岛为例, 选择环岛东、西、南、北四个方向的典型红树林群落, 对土壤进行取样, 测定土壤有机碳含量, 计算土壤有机碳密度。通过对比群落结构、土壤理化性质、不同区域的自然条件, 探讨红树林土壤有机碳的分布规律以及影响碳储量的主要因素。研究表明, 土壤有机碳分布特征在垂直方向上差异显著, 土壤有机碳含量最大值出现在 20~40 cm, 土壤有机碳密度最大值出现在 0~20 cm; 不同群落类型土壤有机碳含量存在明显差异, 以东寨港红树林为例, 海莲群落土壤有机碳含量最高, 为 $20.89 \pm 6.75 \text{ g kg}^{-1}$, 人工无瓣海桑林最低, 为 $12.71 \pm 3.62 \text{ g kg}^{-1}$, 进一步相关分析显示, 土壤有机碳含量与群落植株胸径和基盖度呈显著正相关, 与株高无关; 在空间分布上, 表现为东方四泌湾 > 文昌清澜港 > 儋州新英湾 > 海口东寨港 > 三亚湾。最后结合海南岛红树林面积, 得出海南岛红树林土壤有机碳总储量为 $2.39 \times 10^6 \text{ t}$ 。

关键词 土壤有机碳含量; 土壤有机碳密度; 分布规律; 红树林; 海南岛

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

天然湿地是地球上固碳能力最强的生态系统^[1], 占全球陆地面积 1.4% 的天然湿地, 其碳储量约占全球陆地碳库的 12%~20%^[2]。其中湿地土壤由于长期处于淹水状态, 有机质分解缓慢, 成为湿地碳库最重要的组成部分^[3]; 同时湿地土壤碳密度极高^[4], 且对气候变化和人类活动反应敏感^[5], 因此湿地土壤碳储量研究成为湿地生态学研究的热点问题^[6]。

湿地土壤中 90% 的碳以土壤有机碳形式存在, 因此关于土壤有机碳含量、分布特征、变化趋势以及人类活动对其影响等方面的研究得到广泛关注^[7]; 国外的相关研究注重利用模型对湿地土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 的变化趋势进行预测^[5-6]; 国内关于湿地 SOC 储量和分布的研究多集中在东北三江平原^[7-10]、长江中下游湖泊^[11-13]、若尔盖高原^[14]、黑河中游淡水湿地^[15] 以及艾比湖湿地^[16], 在湿地土壤 SOC 的储量、分布规律以及影响因素等方面进行了深入研究, 从研究结果可以看出 SOC 的分布具有极高的变异性, 受到土地利用、成土母质、土壤类型、植被类型、气候条件等因素的综

合影响, 同一区域中天然湿地大于人工湿地, 高纬度、高海拔湿地环境有利于土壤有机碳的累积; 但是目前对于广泛分布于热带、亚热带海岸带的红树林湿地, 相关报道却不多。

红树林是热带、亚热带潮间海岸带的特殊植被群落^[17], 主要分布于淤泥质海岸带, 是具有重要生态功能的海岸带湿地生态系统^[18], 在我国自然分布于海南、广东、广西、福建沿海, 其中以海南岛的分布最为集中, 保存最为完整。海南岛红树植物资源丰富, 占全国红树植物总数的 95%^[19], 是重要的海岸防护林; 红树植物独特的板状根、支柱根和膝状根在防风消浪的同时, 也固持了大量土壤, 蓄积了大量土壤有机碳; 然而由于受红树林分布范围以及土壤采样困难等因素影响, 目前对红树林土壤有机碳分布特征和影响因素的研究很少^[20-21]。本研究在海南岛不同区域选取主要红树群落类型进行土壤的垂直取样, 分析海南岛红树林土壤有机碳在水平和垂直方向上的分布规律, 探讨群落组成和结构、土壤理化性质、气温和降水等因素对土壤有机碳分布产生的影响, 为进一步深入了解红树林湿地

* 国家自然科学基金项目(31260131)、科技部“十二五”支撑项目(2012BAC18B04)资助

[†] 通讯作者

作者简介: 辛琨(1974—), 女, 吉林白山人, 博士, 教授, 主要从事红树林湿地生态学研究。E-mail: xin_kun@126.com

收稿日期: 2013-04-23; 收到修改稿日期: 2013-08-15

土壤碳循环提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

海南岛地处亚热带和热带,面积约 3.4×10^4 km²,海岸带长 1.823×10^3 km,年均气温 23 ~ 25℃,年均降水量 1 500 mm。共有红树植物 38 种,其中真红树 12 科、15 属、27 种(包含一个变种和一个引进种),半红树 9 科、10 属、11 种^[22]。根据 2008 年 SPOT5 遥感卫星影像解译结果,海南岛红树林面积为 33.93 km²,集中分布在海口东寨港红树林自然保护区、文昌清澜港红树林自然保护区、儋州新英湾、三亚铁炉港和三亚河沿岸。此外临高、东方、陵水等地也有红树林分布,但面积较小。分布较为广泛的植物种类包括白骨壤(*Avicennia marina*)、海莲(*Bruguiera marina*)、角果木(*Ceriops tagal*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、红海榄(*Rhizophora stylosa*)、正红树(*Rhizophora apiculata blume*)以及从孟加拉国引种的无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)^[19]。

1.2 采样方法

在海南岛红树林分布集中区域设定采样点,包括北部东寨港红树林、南部三亚湾红树林、东部文昌清澜港红树林、西部儋州新英湾和东方四泌湾红树林,选取区域内典型群落,每个群落随机选择 3 个样方进行土壤采集,共 14 个群落 42 个样方。

由于红树林土壤为湿地土壤,且地下根系发达,1 m 深土壤原样采集有很大困难,传统的取土器均不能满足取样要求。经过多次野外试验,结合红树林土壤的特征以及对土壤样品的要求,自行设计红树林湿地原位取土器进行土样采集(已申请专利,内径 7.5 cm,长 1.15 m)。每个样方取样 3 次,采集 0 ~ 100 cm 土壤,20 cm 为一层,在取样器内,依次用环刀分层取土,5 层分别保存,每层测定 3 个平行土样。将所采集的土壤放在封口袋内,装入密闭泡沫箱带回实验室。去除动植物残体、石块等杂质后,立即测定鲜土的 pH、盐度,其余土样自然风干后,过 0.15 mm 筛,进行 SOC 以及全氮、全磷、全钾的测定。

1.3 样品测定方法

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。土壤 pH 和盐度分别采用 pH 计和奥立龙 868 型盐度计测定;土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定^[23];土壤有机碳密度根据

土壤容重和含水量进行计算^[24]。土壤全氮采用凯氏定氮法测定,全磷采用钼锑抗分光光度法测定,全钾采用火焰光度法测定^[25]。

1.4 数据分析

运用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 17.0 进行数据整理和分析。

2 结果与讨论

2.1 海南岛红树林土壤有机碳含量和土壤有机碳密度垂直分布

海南岛红树林土壤有机碳含量和土壤有机碳密度各层分布情况如表 1 所示。从表中显示数据可以看出土壤有机碳含量和土壤有机碳密度在垂直方向具有一定规律性:土壤有机碳含量在 20 ~ 40 cm 土层中最高,平均 53.27 ± 6.74 g kg⁻¹;依次 0 ~ 20 cm 为 41.85 ± 4.90 g kg⁻¹, 40 ~ 60 cm 为 28.70 ± 3.36 g kg⁻¹, 60 ~ 80 cm 为 20.77 ± 2.35 g kg⁻¹, 80 ~ 100 cm 为 19.83 ± 3.96 g kg⁻¹。数据分析显示 20 ~ 40 cm 土层土壤有机碳含量与 80 ~ 100 cm、60 ~ 80 cm 呈极显著差异($p < 0.01$),与 40 ~ 60 cm 呈显著差异($p < 0.05$),而与 0 ~ 20 cm 的 SOC 含量差异不显著($p > 0.05$)。

土壤有机碳密度最大值出现在 0 ~ 20 cm,为 4.29 ± 0.69 kg m⁻²,其次 20 ~ 40 cm 为 4.26 ± 0.99 kg m⁻², 40 ~ 60 cm 为 2.32 ± 0.64 kg m⁻², 80 ~ 100 cm 为 1.85 ± 0.56 kg m⁻²,最小值出现在 60 ~ 80 cm,其土壤碳密度值为 1.73 ± 0.46 kg m⁻²。差异性分析显示土壤有机碳密度在 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 之间差异不显著,与 40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm 之间存在显著差异($p < 0.05$),下面三层土壤之间有机碳密度差异不显著($p > 0.05$)。

以往研究表明,土壤有机碳多为表层含量最高,说明凋落物是其主要碳源;但是在红树林土壤中,有机碳含量最高层出现在 20 ~ 40 cm,分析其原因主要有两方面,其一,凋落物有机质输入后不能直接进入土壤,会随水流移动,因此不能决定土壤有机碳的空间分布规律;其二,土壤有机碳最主要的来源应该是植物根系。

2.2 海南岛红树林土壤有机碳含量空间分布差异

对比海南岛主要红树林分布区的土壤有机碳含量,可以得到如下结果:平均值排列顺序为东方四泌湾 > 文昌清澜港 > 儋州新英湾 > 海口东寨港 > 三亚湾(如图 1 所示),其中文昌清澜港和东方四

表 1 不同群落土壤有机碳含量(SOC)和土壤有机碳密度(SOCD)垂直分布规律

Table 1 Vertical distribution of soil organic carbon content (SOC) and density (SOCD) in different mangrove communities

区域 Site	群落类型 types	SOC(g kg ⁻¹)					SOCD(kg m ⁻²)				
		0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm
海口 Haikou	角果木 <i>Certops tagal</i>	51.87 ± 10.20	12.00 ± 4.09	6.15 ± 0.14	7.69 ± 1.71	7.41 ± 0.44	17.68 ± 3.47	3.71 ± 1.25	1.17 ± 0.00	2.06 ± 0.46	2.15 ± 0.13
	桐花树 <i>Aegiceras corniculatum</i>	25.5 ± 16.46	52.36 ± 37.8	3.36 ± 0.88	7.27 ± 0.10	9.78 ± 0.54	7.35 ± 4.07	16.08 ± 11.69	1.06 ± 0.27	2.14 ± 0.03	2.54 ± 0.13
	海莲 <i>Bruguiera marina</i>	16.71 ± 6.75	16.09 ± 4.44	24.24 ± 2.63	29.66 ± 2.60	17.77 ± 1.07	3.36 ± 0.94	4.05 ± 1.06	4.63 ± 0.30	5.67 ± 0.25	4.29 ± 0.07
	无瓣海桑 <i>Sonneratia apetala</i>	21.25 ± 3.62	19.10 ± 2.95	11.15 ± 5.07	7.50 ± 1.96	15.44 ± 3.28	5.59 ± 1.39	5.86 ± 1.68	2.76 ± 1.39	1.98 ± 0.41	4.40 ± 0.76
	白骨壤 <i>Avicennia marina</i>	40.68 ± 1.15	15.45 ± 2.23	9.27 ± 1.03	9.14 ± 1.47	12.17 ± 1.29	10.35 ± 0.29	4.89 ± 0.71	2.74 ± 0.30	2.98 ± 0.47	3.97 ± 0.42
文昌 Wenchang	红海榄 <i>Rhizophora stylosa</i>	44.95 ± 1.94	30.41 ± 1.26	8.14 ± 1.36	9.03 ± 0.27	8.74 ± 0.53	9.57 ± 0.43	9.11 ± 0.39	2.51 ± 0.42	2.76 ± 0.17	2.20 ± 0.130
	角果木 <i>Certops tagal</i>	223.58 ± 10.66	313.50 ± 11.48	176.72 ± 2.61	80.61 ± 1.88	43.60 ± 17.72	35.76 ± 1.71	42.28 ± 1.55	39.06 ± 0.58	19.30 ± 0.45	12.65 ± 5.14
	桐花树 <i>Aegiceras corniculatum</i>	49.33 ± 4.32	51.89 ± 5.36	29.35 ± 2.42	29.73 ± 2.30	33.53 ± 2.53	11.51 ± 1.01	11.73 ± 1.21	9.00 ± 0.74	8.65 ± 0.67	9.75 ± 0.74
	海莲 <i>Bruguiera marina</i>	35.46 ± 2.77	113.00 ± 74.00	59.74 ± 1.04	64.70 ± 2.58	64.35 ± 9.87	7.78 ± 0.61	29.07 ± 19.04	16.07 ± 0.28	16.73 ± 0.67	15.47 ± 2.37
	无瓣海桑 <i>Sonneratia apetala</i>	10.95 ± 1.05	27.23 ± 1.85	7.91 ± 0.96	8.82 ± 1.40	8.62 ± 1.22	3.38 ± 0.32	9.77 ± 0.66	2.71 ± 0.33	3.09 ± 0.49	3.00 ± 0.43
三亚 Sanya	白骨壤 <i>Avicennia marina</i>	12.73 ± 7.65	19.41 ± 5.09	14.46 ± 3.81	10.59 ± 1.26	16.48 ± 2.05	3.65 ± 1.99	5.26 ± 1.20	4.32 ± 1.51	2.89 ± 0.63	4.74 ± 0.51
	红海榄 <i>Rhizophora stylosa</i>	9.22 ± 0.36	21.18 ± 2.24	17.49 ± 3.96	10.88 ± 1.33	12.28 ± 1.25	3.00 ± 0.02	4.96 ± 0.40	5.16 ± 1.39	2.79 ± 0.30	3.21 ± 0.21
	白骨壤 <i>Avicennia marina</i>	85.00 ± 6.07	108.01 ± 1.22	117.21 ± 9.24	102.10 ± 0.91	47.67 ± 3.28	12.17 ± 0.87	18.64 ± 0.21	20.77 ± 1.64	16.19 ± 0.14	8.81 ± 0.61
	红海榄 <i>Rhizophora stylosa</i>	34.40 ± 4.90	32.95 ± 1.18	16.33 ± 2.64	4.08 ± 2.21	15.18 ± 0.52	9.58 ± 1.36	9.13 ± 0.33	4.89 ± 0.79	1.34 ± 0.72	5.26 ± 0.18
	红海榄 <i>Rhizophora stylosa</i>										

注: 平均值 ± 标准差 Note: Means ± Std

泌湾红树林各层土壤有机碳含量均极显著 ($p < 0.01$) 高于其他三个区域。对比东方四泌湾和文昌清澜港各层土壤有机碳含量可以看出, 0 ~ 40 cm 土层中文昌清澜港 > 东方四泌湾, 而在 40 ~ 100 cm 土层中, 东方四泌湾 > 文昌清澜港; 就两地的自然条件来说, 文昌纬度较东方略高, 年均温 23.9℃ 略低于东方 24.6℃, 因此土壤表层有机质分解稍慢, 表层土壤有机碳积累量略大; 而深层土壤一方面受淋溶作用影响, 另一方面受土壤母质的影响, 文昌属于玄武岩风化土壤, 质地黏重, 土壤表层物质通过淋溶作用下移速度缓慢; 东方属于花岗岩风化土壤, 土壤中粗砂较多, 土壤有机碳容易通过淋溶作用从表层运移到下层; 因此东方四泌湾下层土壤有机碳含量明显高于文昌清澜港。

儋州新英湾、海口东寨港和三亚都是受人类活动影响比较严重的区域, 在所有取样群落中, 土壤有机碳含量最低为三亚的无瓣海桑群落, 其次为三亚的红海榄群落和白骨壤群落, 分别为 $63.53 \pm 4.39 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $71.05 \pm 4.17 \text{ g kg}^{-1}$ 和 $73.67 \pm 3.82 \text{ g kg}^{-1}$, 三亚湾红树林位于三亚市中心, 面积不足 15 hm^2 , 且多为人工林, 人类活动影响频繁, 表明人类活动会降低红树林土壤的储碳能力。

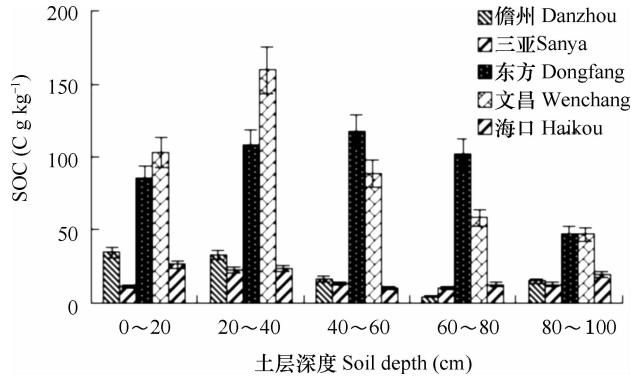
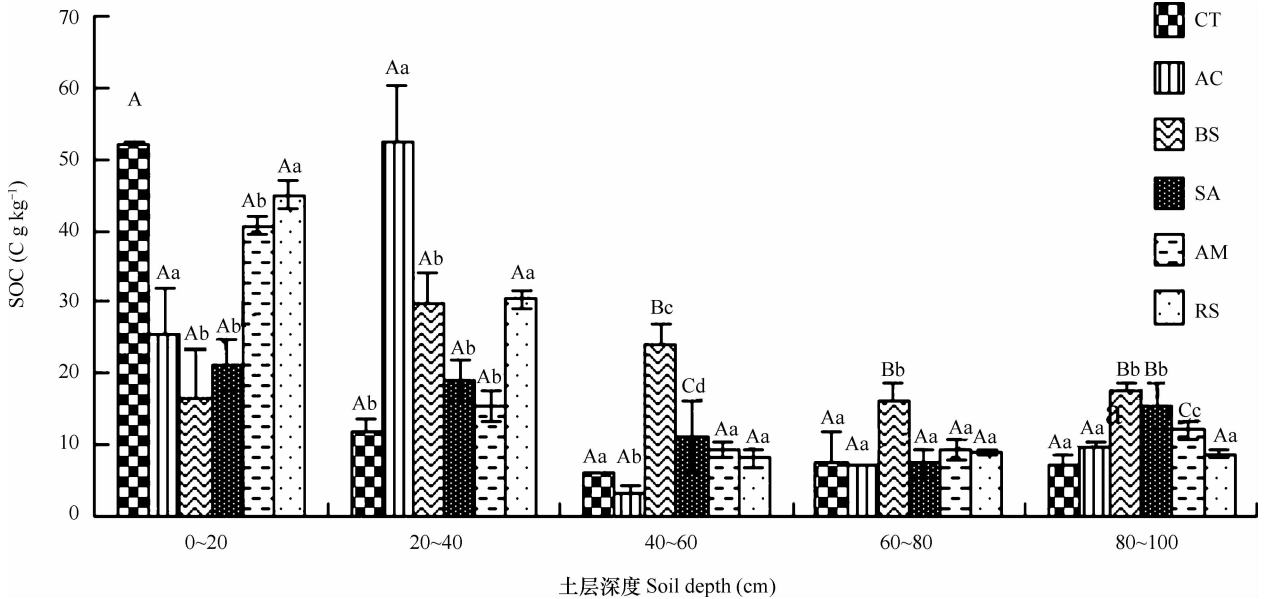


图 1 海南岛不同区域红树林土壤有机碳含量对比分析
Fig. 1 Comparative analysis of SOC content in different areas of Hainan Island

2.3 群落组成和结构对土壤有机碳含量影响分析

红树林土壤有机碳的主要来源包括三个方面, 即植物地上部分凋落物、植物地下部分根系和随水流输入的有机质。植物群落组成和结构不同, 对有机碳的输入和截留能力不同。为了避免气候、母质等因素对土壤有机碳含量的影响, 本研究中选取群落种类最为丰富的海口东寨港红树林进行研究。海口东寨港红树林的主要群落包括红海榄群落、白骨壤群落、桐花树群落、角果木群落、海莲群落以及



注: CT, 角果木; AC, 桐花树; BS, 海莲; SA, 无瓣海桑; AM, 白骨壤; RS, 红海榄。无相同小写字母表示差异显著 $p < 0.05$, 无相同大写字母表示差异极显著 $p < 0.01$ Note: CT, *Ceriops tagal*; AC, *Aegiceras corniculatum*; BS, *Bruguiera marina*; SA, *Sonneratia apetala*; AM, *Avicennia marina*; RS, *Rhizophora stylosa*. Different small letters in the same line mean significant difference at $p < 0.05$, different capital letters in the same line mean significant difference at $p < 0.01$

图 2 海南东寨港红树林不同群落土壤有机碳垂直分布特征

Fig. 2 Vertical distribution of soil organic carbon content in different mangrove communities in Dongzhai Harbor, Haikou, Hainan Island

引进种植的无瓣海桑群落。各个群落土壤有机碳含量如图 2 所示,其中海莲群落最高,为 $104.47 \pm 6.75 \text{ g kg}^{-1}$,其余依次为红海榄 $101.27 \pm 1.94 \text{ g kg}^{-1}$ 、桐花树 $98.27 \pm 6.02 \text{ g kg}^{-1}$ 、白骨壤 $86.97 \pm 2.23 \text{ g kg}^{-1}$ 、角果木 $85.12 \pm 8.34 \text{ g kg}^{-1}$ 和无瓣海桑 $74.43 \pm 3.62 \text{ g kg}^{-1}$ 。

无瓣海桑为人工引入群落,在 1999 年大面积种植,由于其生长迅速,易成活,被用做红树林恢复的主要树种。但由于其种植区曾被开垦为耕地,因此土壤有机碳的累积较其他群落少,在 0~20 cm 极显著低于其他群落(除海莲群落),至 60~80 cm 深度,与其他群落无显著差异,说明人类活动对土壤表层有机碳的破坏十分明显。

为了解群落结构与土壤有机碳储量的关系,根据群落结构调查结果,对除无瓣海桑之外的 5 种 15 个红树林群落的平均胸径、盖度、基盖度、株高进行了记录和统计分析,结果显示,土壤有机碳含量与胸径呈极显著正相关($df = 6; p < 0.01; r = 0.66$)。海莲是东寨港土壤有机碳含量最高的群落,土壤有机碳在垂直方向分布均匀,各层间均无显著差异,同时海莲群落也是胸径最大的群落,海莲群落平均胸径为 $8.2 \pm 0.12 \text{ cm}$,根系垂直延伸较深,因此根系分解在各层的土壤有机质累积中起到主要作用;表层土壤中,即 0~20 cm 土层中有机碳含量与植被基盖度呈显著正相关($df = 6; p < 0.05; r = 0.75$)。红海榄群落平均基盖度为 $95\% \pm 5\%$,0~20 cm 土壤中有机碳含量最高,但是总的有机碳含量较低,红海榄支柱根发达,但根系相对较浅,因此群落中土壤有机碳的累积主要靠根系固定的凋落物和表层根系的分解;分析还显示,土壤有机碳含量与盖度和株高无显著相关性($p > 0.05$)。

2.4 土壤理化性质与土壤有机碳密度相关分析

土壤的理化性质会影响土壤有机碳固定的微观环境,进而影响固定的速率,同时土壤有机碳的累积也会改变土壤的理化性质。对红树林土壤有机碳密度和相应的 N、P、K、C/N、含水量、土壤盐度、pH 进行相关分析,得到土壤有机碳密度和土壤主要理化指标之间的相关性,如图 3 所示。

其中土壤有机碳密度与土壤氮含量($R^2 = 0.304$)以及土壤碳氮比($R^2 = 0.044$)呈极显著正相关($p < 0.01$)。土壤全氮与有机碳是土壤肥力高低的重要指标之一,也是评价湿地土壤碳库功能的重要指示^[24]。土壤中的碳氮主要来源于植物的有机质归还,因此有机碳密度和土壤氮含量的变化趋于

一致,呈极显著正相关。其他湿地研究也得到了相同结论^[11,25]。土壤碳氮比是衡量土壤 C、N 营养平衡状况的指标,相关研究显示土壤中 C、N 的累积并非完全同步,本研究中海南岛红树林土壤 C/N 平均值为 33.27,高于其他类型土壤^[26-27],一方面说明红树林群落碳归还量较大,同时也反映 SOC 的矿化速率较土壤中氮的矿化速率低,进一步说明红树林土壤储碳作用明显。

相关分析结果显示土壤含水量、土壤钾含量和土壤盐度与有机碳密度呈极显著负相关。海南红树林土壤含水率差异较大,范围在 0.381~0.833 之间,土壤水分条件是影响湿地土壤有机碳矿化的因素之一,水分条件充足导致厌氧微生物分解迅速,有机碳矿化速率提高,从而降低土壤中有机碳密度;同时土壤含水量增加,土壤容重降低,也会降低土壤有机碳密度,因此红树林土壤有机碳密度与土壤含水量呈显著负相关($R^2 = 0.358, p < 0.01$);热带、亚热带土壤母岩以高岭类矿物和三水铝矿物为主,这类矿物中钾含量较低;同时土壤有机碳的累积促进了土壤酸性的形成,酸性土壤的强淋溶作用将土壤中的速效钾淋失,因此土壤有机碳密度越大,土壤钾含量越低,体现为红树林有机碳密度和土壤钾含量呈负相关($R^2 = 0.117, p < 0.01$);以往湿地土壤盐分与有机质含量的研究表明^[26],土壤分形维数越高,土壤结构越紧实,其土壤颗粒表面积越大,吸附盐离子量越大,相应的对有机质等的固定作用就会减小,因此盐度往往与土壤有机质呈负相关($R^2 = 0.070, p < 0.01$)。

海南岛红树林土壤的 pH 在 4.60~8.07 之间,在此范围内,土壤有机碳密度与 pH 呈极显著负相关($p < 0.01, R^2 = 0.039$)。这与土壤微生物在不同酸碱条件下的活性有关,通常当土壤 pH 在中性范围内时各类微生物活性最强,在强酸性或强碱性范围内其活性受到限制,从而抑制有机质的分解转化,因此土壤酸性越强,即 pH 越低,土壤有机碳含量越高,二者呈现极显著负相关。

2.5 海南岛红树林土壤有机碳总储量

ArcGIS 遥感解译结果显示,海南岛红树林总面积为 33.93 km^2 ,根据土壤有机碳平均密度和海南红树林湿地面积,可以估算海南岛红树林有机碳储量为 $2.39 \times 10^6 \text{ t}$ 。通过与其他湿地类型的土壤碳储量对比(表 2),可以看出海南岛红树林湿地土壤具有较高的固碳功能(仅低于三江平原沼泽湿地)。

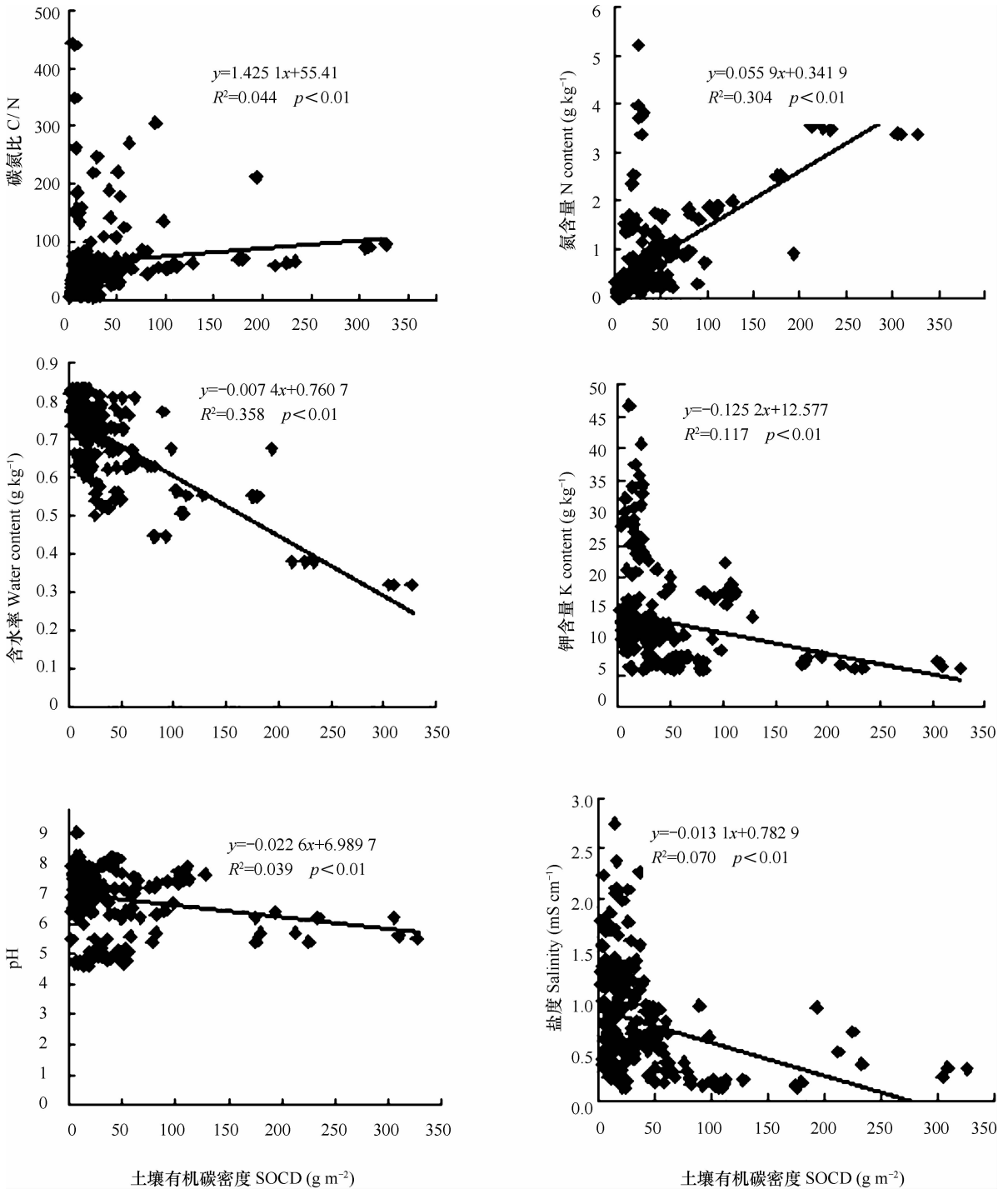


图3 土壤有机碳密度与土壤理化指标相关分析

Fig. 3 Correlation between SOC density and soil physical and chemical properties

3 结 论

研究表明,海南岛红树林土壤有机碳在分布上呈现一定的规律性:在垂直方向上,有机碳含量最大值出现在 20~40cm 土层,为 $53.27 \pm 6.74 \text{ g kg}^{-1}$;有机碳密度最大值出现在 0~20cm,为 4.29 ± 0.69

kg m^{-2} ;在空间分布上,平均值排序结果为东方四泌湾 > 文昌清澜港 > 儋州新英湾 > 海口东寨港 > 三亚湾。相关分析结果显示,群落结构、土壤母质、人类活动类型对其产生明显影响;全岛红树林土壤固碳量总为 $2.39 \times 10^6 \text{ t}$ 。单位面积固碳能力仅低于三江平原湿地,大于其他类型的滨海湿地及其他区域的红树林湿地。海南红树林土壤碳储量巨大。

表 2 不同类型湿地土壤有机碳含量比较

Table 2 Organic carbon content of different kinds of wetlands

湿地位置 Location of wetlands	湿地类型 Wetland type	土壤有机碳含量 SOC content(g kg^{-1})	土壤有机碳密度 SOC density(kg m^{-2})
海南岛 Hainan Island	红树林湿地 Mangrove wetlands	12.71 ~ 167.6	3.82 ~ 29.81
雷州半岛 ^[21] Leizhou Peninsula	红树林湿地 Mangrove wetlands	7.12 ~ 21.46	
鄱阳湖 ^[12] Poyang Lake	淡水湿地 Freshwater wetlands		3.02 ~ 10.19
闽东 ^[28] 湿地 Eastern Fujian Wetlands	红树林湿地 Mangrove wetlands	5.34 ~ 12.94	
三江平原 ^[7] Three River Plain	沼泽湿地 Marsh wetlands		10.4 ~ 42.2

参 考 文 献

- [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] 陈宜瑜, 吕宪国. 湿地功能与湿地科学的研究方向. *湿地科学*, 2003, 1(1): 7—11. Chen Y Y, Lü X G. The function and development of wetlands research (In Chinese). *Wetlands Science*, 2003, 1(1): 7—11
- [3] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. *地理学报*, 2000, 55(5): 533—544. Wang S Q, Zhou C H, Li K R, et al. Spatial distribution characters of soil organic carbon in China(In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 533—544
- [4] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, 440: 165—173
- [5] Ise T, Dunn A L, Wofsy S C, et al. High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback. *NatureGeo science*, 2008, 1(11): 763—766
- [6] Weindorf D C, Zhu Y. Spatial variability of soil properties at Capulin Volcano, New Mexico, USA: Implications for sampling strategy. *Pedosphere*, 2010, 20(2): 185—197
- [7] 殷书柏, 杨青, 吕宪国. 三江平原典型环型湿地土壤有机碳剖面分布及碳贮量. *土壤通报*, 2006, 37(4): 659—661. Yin S B, Yang Q, Lü X G. Soil nutrient distribution of annular wetlands in Sanjiang Plain (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(4): 659—661
- [8] 刘景双, 杨继松, 于君宝, 等. 三江平原沼泽湿地土壤有机碳的垂直分布特征研究. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 5—8. Liu J S, Yang J S, Yu J B, et al. Study on vertical distributon of soil organic carbon in wetlands Sanjiang Plain (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 5—8
- [9] 刘吉平, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原环型湿地土壤养分的空间分布规律. *土壤学报*, 2006, 43(2): 247—256. Liu J P, Lü X G, Yang Q, et al. Soil nutrient distribution of annular wetlands in Sanjiang Plain(In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(2): 247—256
- [10] 江长胜, 王跃思, 郝庆菊, 等. 土地利用对沼泽湿地土壤碳影响的研究. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 249—252. Jiang C S, Wang Y S, Hao Q J, et al. Effects of land use change on carbon contents of Marsh soil in the Sanjiang Plain (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(5): 249—252
- [11] 董凯凯, 王惠, 杨丽原, 等. 人工恢复黄河三角洲湿地土壤碳氮含量变化特征. *生态学报*, 2011, 31(16): 4778—4782. Dong K K, Wang H, Yang L Y, et al. Change characteristics of soil carbon and nitrogen contents in the Yellow River Delta soil after artificial restoration (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16): 4778—4782
- [12] 吴琴, 尧波, 幸瑞新, 等. 鄱阳湖典型湿地土壤有机碳分布及影响因素. *生态学杂志*, 2012, 31(2): 313—318. Wu Q, Rao B, Xing R X, et al. Distribution pattern of soil organic carbon in Poyang Lake wetland and related affecting factors (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(2): 313—318
- [13] 李艳丽, 肖春玲, 王磊, 等. 上海崇明东滩两种典型湿地土壤有机碳汇聚能力差异及成因. *应用生态学报*, 2009, 20(6): 1310—1316. Li Y L, Xiao C L, Wang L, et al. Difference and its formation cause in soil organic carbon accumulation capability of two typical tidal wetlands at Dongtan of Chongming Island in Shanghai (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(6): 1310—1316
- [14] 田应兵, 熊明彪, 熊晓山, 等. 若尔盖高原湿地土壤-植物系统有机碳的分布与流动. *植物生态学报*, 2003, 27(4): 490—495. Tian Y B, Xiong M B, Xiong X S, et al. The organic carbon distribution and flow in wetlands soil plant system in Ruergai Plateau (In Chinese). *Acta Phytoecologia Sinica*, 2003, 27(4): 490—495
- [15] 赵锐锋, 张丽华, 赵海莉, 等. 黑河中游湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素. *地理科学*, 2013, 33(3): 2—8. Zhao R

- F, Zhang L H, Zhao H L, et al. Distribution of soil organic carbon of wetlands in the middle reaches of the Heihe River and its influencing factors (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(3): 2—8
- [16] 徐欢欢, 曾从盛, 王维奇, 等. 艾比湖湿地土壤有机碳垂直分布特征及其影响因子分析. *福建师范大学学报*, 2010, 26(5): 86—91 Xu H H, Zeng C S, Wang W Q, et al. Study on vertical distribution and the influencing factors of soil organic carbon in Ebinur Lake Wetland (In Chinese). *Journal of Fujian Normal University*, 2010, 26(5): 86—91
- [17] 林鹏. 中国红树林研究. *厦门大学学报*, 2001, 40(2): 592—603. Lin P. A review on the mangrove research in China (In Chinese). *Journal of Xiamen University*, 2001, 40(2): 592—603
- [18] 林益明, 林鹏. 中国红树林生态系统的植物种类、多样性、功能及其保护. *海洋湖沼通报*, 2001(3): 8—12. Lin Y M, Lin P. Species, diversities, functions and protections of plants in mangrove ecosystem in China (In Chinese). *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2001(3): 8—12
- [19] 林鹏. 中国红树林生态系. 北京: 科学出版社, 1997. Lin P. *Mangrove ecosystem in China* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1997
- [20] 杨娟, Jay G, 刘宝林, 等. 雷州半岛红树林边缘效应及其对海岸有机碳库的影响. *海洋学报*, 2012, 34(5): 162—168. Yang J, Jay G, Liu B L, et al. Edge effects of mangrove boundaries and their impact on organic carbon pool along the coast of Leizhou Peninsula (In Chinese). *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(5): 162—168
- [21] 刘美玲, 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. *生态学杂志*, 2008, 27(9): 1557—1561. Liu M L, Ye Y, Cao C Q, et al. Fractal characteristics and related affecting factors of particle size distribution in mangrove soils in Dongzhai Harbor of Hainan (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(9): 1557—1561
- [22] 李玫, 廖宝文. 无瓣海桑的引入和生态影响研究. *防护林科技*, 2008(5): 100—104. Li M, Liao B W. Introduction and ecological impact of *Sonneratia apetala* (In Chinese). *Protection Forest Science and Technology*, 2008(5): 100—104
- [23] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. *土壤学报*, 2004, 41(1): 35—43. Xie X L, Sun B, Zhou H Z, et al. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 35—43
- [24] 郭丽俊, 李毅, 李敏, 等. 盐渍化农田土壤斥水性与理化性质的空间变异性. *土壤学报*, 2011, 48(2): 278—285. Guo L J, Li Y, Li M, et al. Spatial variability of soil water repellency and soil physical-chemical properties in saline-alkaline field (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2): 278—285
- [25] 王琳, 欧阳华, 周才平, 等. 贡嘎山东坡土壤有机质及氮素分布特征. *地理学报*, 2005, 59(6): 1012—1019. Wang L, Ouyang H, Zhou C P, et al. Distribution characteristics of soil organic matter and nitrogen on the eastern slope of Mt. Gongga (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2005, 59(6): 1012—1019
- [26] 白红军, 邓伟, 朱颜明, 等. 湿地土壤有机质和全氮含量分布特征对比研究——以向海与科尔沁自然保护区为例. *地理科学*, 2002, 22(2): 232—237. Bai H J, Deng W, Zhu Y M, et al. Comparative study on the distribution characteristics of soil organic matter and total nitrogen in wetlands—A case study of Xianghai and Horqin Nature Reserve (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(2): 232—237
- [27] 张彦军, 郭胜利, 南雅芳, 等. 黄土丘陵区小流域土壤碳氮比的变化及其影响因素. *自然资源学报*, 2012, 27(7): 1214—1223. Zhang Y J, Guo S L, Nan Y F, et al. The changes and influencing factors of soil C:N ratio in small water shed of hilly region of Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(7): 1214—1223
- [28] 廖小娟, 何东进, 王韧, 等. 闽东滨海湿地土壤有机碳含量分布格局. *湿地科学*, 2013, 11(2): 192—197. Liao X J, He D J, Wang R, et al. Distribution pattern of soil organic carbon contents in the coastal wetlands in Eastern Fujian (In Chinese). *Wetlands Science*, 2013, 11(2): 192—197

DISTRIBUTION OF SOIL ORGANIC CARBON IN MANGROVE WETLANDS OF HAINAN ISLAND AND ITS INFLUENCING FACTORS

Xin Kun[†] Yan Kui Li Zhen Hu Jielong Qiu Minghong

(Biology School of Hainan Normal University, Haikou 571158, China)

Abstract Mangrove wetlands, typical of wetlands in subtropic and tropic area, are considered as a huge carbon pool along the coast. In this study, typical mangrove wetlands in the north, east, south and west coasts of the Hainan Island were selected for soil sampling. A total of 630 soil samples were collected from 126 sites, five soil samples each site from 5 soil layers, 20 cm each, in 42 quadrats scattered in 14 mangrove communities. The samples were analyzed for soil organic carbon (SOC) contents with the potassium dichromate external heating method and SOC density was worked out based on soil bulk density. Through comparison between the sites in community structure, soil physical and chemical

properties and natural conditions, exploration was done of regularities of the distribution of SOC in the mangrove wetlands and major factors affecting the SOC stock therein. Results show that the distribution of SOC content and density varied sharply with soil depth; the peak of SOC content appeared in 20 ~ 40 cm, while that of SOC density did in 0 ~ 20 cm; SOC content also varied with mangrove community; in the Dongzhai Harbor area, the *Bruguiera sexangula* community was the highest in SOC content ($20.89 \pm 6.75 \text{ g kg}^{-1}$), while the artificial *Sonneratia apetala* community was the lowest ($12.71 \pm 3.62 \text{ g kg}^{-1}$). Further correlation analysis shows that SOC content was positively related with DBH (diameter at breast height) of the mangrove trees and coverage of the community, but not with plant height. As to spatial distribution, a decreasing order of Simi Bay Dongfang > Qinglan Harbor Wenchang > Xinying Bay Danzhou > Dongzhai Harbor Haikou > Sanya Bay Sanya was observed. Finally, based on the area of the mangrove forests in Hainan Island, the mangrove forest soil in Hainan Island possesses a total stock of $2.39 \times 10^6 \text{ t}$ organic carbon.

Key words Soil organic carbon content; Soil organic carbon density; Distribution pattern; Mangrove forest; Hainan Island

(责任编辑:卢 萍)