

不同植被类型对滨海盐碱土壤有机碳库的影响^①

康健, 孟宪法, 许妍妍, 栾婧, 隆小华*, 刘兆普

(南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏省海洋生物学重点实验室, 南京 210095)

摘要: 对江苏滨海盐碱地 5 种不同植被类型土壤 (0~40 cm) 有机碳 (SOC) 含量、密度和表层 (0~20 cm) 土壤微生物量碳 (SMBC)、可溶性有机碳 (DOC) 含量及其占总有机碳 (TOC) 的比例进行了分析。结果显示, 随土层深度的增加, SOC 含量降低, 表层 SOC 密度占整个剖面的 54.6%~75.8%。表层 SOC 含量和密度分别介于 2.02~9.61 g/kg 和 5.87~21.54 t/hm², 平均值分别为 4.77 g/kg 和 12.56 t/hm²。随着原生植被群落的演替 (光滩→盐蒿→茅草), SOC、SMBC 和 DOC 含量均依次增加。茅草荒地围垦后, 稻-油轮作地和菊芋地表层 SOC 密度分别比茅草地的增加了 55% (5.77 t/hm²) 和 107% (11.15 t/hm²); 稻-油轮作地的 SMBC 含量及 SMBC/TOC 比值下降, 而菊芋地的上升; 围垦后土壤 DOC 含量及 DOC/TOC 比值都明显下降。结果表明, 滨海盐碱地 SOC 主要分布在表层, 原生植被群落的顺行演替使 SOC 库容增加且活性增强, 在盐荒地围垦初期 (3 年), SOC 库容增加但活性有所减弱。经估算, 滨海盐碱非耕地具有较大的固碳潜力, 但需要合理的耕作管理措施来保证农业生产的可持续发展并实现增汇减排的目标。

关键词: 滨海盐碱地; 土壤有机碳; 微生物量碳; 可溶性有机碳; 植被类型

中图分类号: S156.4

大气 CO₂ 浓度升高引起的全球气候变暖是目前国际社会广泛关注的热点问题, “增汇减排” 成为了缓解全球变暖的主要途径^[1-2]。土壤碳固定 (carbon sequestration) 被 IPCC 认为是目前经济可行和环境友好的减缓大气 CO₂ 浓度升高的方法^[1]。因此, 增加土壤有机碳 (SOC) 库容并揭示其动态变化过程和影响因素成为了当今的重要研究课题。

SOC 库一般分为易分解的活性碳库和较稳定的惰性碳库^[3]。土壤活性有机碳库的变化能及时反映 SOC 库的周转和动态变化过程, 并能反映土地利用方式与管理措施等对土壤质量的影响, 对于正确评价土壤的固碳效应和保证农业的可持续生产具有重要意义。表征活性碳的主要指标为颗粒碳、微生物量碳 (MBC)、可溶性有机碳 (DOC) 和易氧化碳^[4]。SOC 库容受气候、植被、土壤属性以及人类活动等诸多物理、生物和人为因素的影响, 并存在各种因子间的相互作用^[5-6]。不同地区、不同生态系统中影响 SOC 储量的主导因子可能各不相同, 在干旱半干旱地区, 降水变化引起的干湿交替对土壤中 SOC 的蓄积有重要

影响^[7]; 农田生态系统土壤碳库受到强烈的人为干扰, 同时又可以在较短的时间尺度上进行人为调节^[8]; 在近海生态系统, SOC 主要受气候、土壤理化特性和人类活动的综合影响^[9]。

我国滨海盐碱非耕地面积达 200 万 hm², 每年仍以 1.33 万~2.00 万 hm² 的速度在递增^[10]。而滨海盐土表层 (0~20 cm) 碳密度为 13.64 t/hm², 只分别相当于农田、林地和草地表层碳密度的 42% (32.30 t/hm²)、19% (71.94 t/hm²) 和 21% (65.82 t/hm²)^[11], 因此, 广泛分布的盐碱地很可能是一个不容忽视的潜在碳汇 (potential carbon sink)^[12]。然而, 滨海盐土盐分高、熟化程度低, 作物不能生长或生长不良, 限制了 SOC 的输入和积累。种植耐盐作物和降低滨海盐土盐分含量是提高滨海盐土植物生物量和增加碳输入的根本方法^[10]。近年来, 本课题组成功培育了耐盐能源植物菊芋新品种, 在江苏、山东和河北等滨海地区推广种植, 明显提高了盐碱地的植被生物量^[13-14]。但其 SOC 库的变化情况仍不清楚, 而国内外通过盐碱地固碳增汇来分担温室气体减排的相关研究报道也很少见。本试验

①基金项目: 国家重大支撑项目 (2011BAD13B09)、江苏省科技支撑项目 (BE2011368 和 BE2010305)、教育部博士点基金项目 (20100097120016)、中央高校基本业务费项目 (Y0201100249)、国家科技支撑项目 (2008BAD95B05、2009BADA3B04-8 和 2009BADA8B01) 和公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (200903001-05) 资助。

* 通讯作者 (longxiaohua@njau.edu.cn)

作者简介: 康健 (1987—), 男, 湖南新化人, 硕士研究生, 主要从事近海资源与生态研究。E-mail: 2009103001@njau.edu.cn

拟通过研究滨海盐碱地不同植被类型 SOC 库的特征与差异, 初步探讨滨海盐碱地在植被演替过程中 SOC 库的变化, 特别是盐碱荒地种植耐盐作物后 SOC 库的动态变化, 为滨海盐碱地资源的农业高效利用和促进固碳增汇提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况及样品采集

研究区域选在位于江苏省大丰市境内的南京农业大学 863 试验基地进行, 地理位置介于 32°59′ ~ 33°00′N、120°49′ ~ 120°51′E。该区东距黄海约 4 km, 属海洋性季风气候区, 四季分明, 年平均气温 14.0℃, 年平均降水量 1 064.0 mm, 主要集中在 6—8 月份, 无霜期 230 天左右。区内东部近海区为大面积的天然沿海滩涂, 原生植被群落基本呈海岸带生态演替序列, 由海向陆依次为: 光滩→盐蒿滩→茅草滩。西部

为海涂围垦区(金海农场), 围垦年限为 3~10 年, 主要种植水稻、油菜、棉花、大麦以及能源经济作物菊芋。

本研究样地设在试验基地的天然海涂区和围垦区。根据典型植被、土壤类型、土地利用状况等共设 5 种具有代表性的试验样地。天然海涂区样地为光滩(bare saline soil, BS)、盐蒿荒地(artemisia wasteland, AW)和茅草荒地(grass wasteland, GW)。围垦区为水稻-油菜轮作地(rice-rape rotation, RR)和菊芋连作地(continuous cropping of Jerusalem artichoke, CJ), 这两块地开垦前为同一片茅草荒地, 耕作年限为 3 年; 稻-油轮作地冬春季为油菜, 夏秋季为水稻, 一年两茬, 每茬作物收获后进行机械翻耕; 菊芋连作地连续种植菊芋 3 年, 每年 10 月份收获一次, 收获后都会留下块茎作为繁殖种子而不进行翻耕; 两者均进行常规施肥管理。样地概况见表 1。

表 1 试验样地概况

Table 1 Basic status of sampling plots

样地	典型植被	总盐量 (g/kg)	地理位置	土壤类型	利用状况
光滩对照	-	15.63	32°59'N, 120°51'E	潮滩盐土	-
盐蒿荒地	盐地碱蓬	7.41	33°00'N, 120°51'E	滨海草甸盐土	抛荒
茅草荒地	獐茅、白茅	3.11	33°00'N, 120°51'E	滨海草甸盐土	抛荒、割草
稻油轮作	水稻、油菜	2.83	33°00'N, 120°50'E	滨海盐渍化土	水稻-油菜轮作 3 年
菊芋连作	菊芋	2.71	32°59'N, 120°49'E	滨海盐渍化土	菊芋连作 3 年

2010 年 1 月, 在每种植被类型选择 3 块 10 m × 10 m 的重复样地。采用 S 型布点法, 在每块样地内布设 5~10 个采样点, 每个样点均按 0~5、5~10、10~20、20~40 cm 深度分层采集土样, 每块样地分层混合各点土样。同时, 每层取 3 个 100 cm³ 环刀用于测定土壤体积质量。所得土样用四分法分为 2 部分, 一部分新鲜土样过 2 mm 筛后于 4℃ 保存, 立即测定土壤含水量、MBC 和 DOC。另一部分风干磨细, 分别过 2 mm 和 0.25 mm 筛后储存备用, 用于分析 SOC 等指标。

1.2 分析方法

土壤有机碳(SOC)的测定采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法, 土壤体积质量测定用环刀法^[15]。

土壤微生物量碳(SMBC)用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法测定^[15]。熏蒸和未熏蒸的新鲜土壤(12.5 g, 土水比为 1:4)分别用 0.5 mol/L 的 K₂SO₄ 溶液(50 ml)于 25℃ 下 200 r/min 浸提 30 min 后过滤, 滤液中的 SOC 浓度用德国产 Elementar Liqui TOC 仪测定。SMBC 以

熏蒸和未熏蒸土样提取液中碳含量的差值 E_c 除以转换系数 0.45 而得到, 即: $SMBC (mg/kg) = E_c/0.45^{[16]}$ 。

土壤可溶性有机碳(DOC)^[17]: 称取一定量的新鲜土壤(相当于 15 g 干土重)放入盛有 60 ml 去离子水的三角瓶中, 25℃ 下 180 r/min 震荡浸提 30 min, 4 000 r/min 离心 20 min, 上清液过 0.45 μm 微孔滤膜(水系), 用 TOC 仪测定浸提液有机碳浓度, 得到 DOC 含量。

土壤有机碳密度计算: 土壤剖面各土层 SOC 密度 (t/hm^2) = SOC 含量 (g/kg) × 土壤体积质量 (g/cm³) × 采样厚度 (cm) × (1-石砾含量) / 10。若 >2 mm 的石砾含量(体积, %) 低于 10%, 可以忽略不计。土壤 TOC 密度为各层 SOC 密度的累加之和。

1.3 数据统计分析

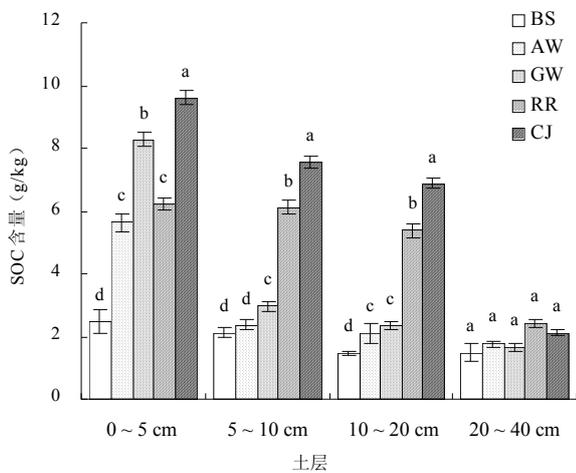
所有数据采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 16.0 软件进行统计分析, Duncan 法进行显著性检验, 用 Pearson 相关性系数分析土壤活性有机碳各组分与土

壤有机碳总量的相关性。

2 结果与分析

2.1 滨海盐碱地不同植被类型土壤剖面 SOC 含量情况

如图 1 所示,除光滩外,各植被类型 SOC 含量的剖面分布是随土层深度的增加而减少,但减少的程度各异。盐蒿、茅草 2 种原生植被地表层 0~5 cm SOC 含量显著高于 5~10、10~20 和 20~40 cm 土层,后 3 层差异不显著;稻-油轮作地 0~20 cm 耕作层 SOC 含量分布较为均匀并显著高于 20~40 cm 犁底层;菊芋地 SOC 含量呈逐层减少的趋势。



(同一土层数据字母不同表示不同植被类型间差异显著($P < 0.05$),下同)

图 1 滨海盐碱地不同植被类型土壤剖面 SOC 含量

Fig. 1 Soil organic carbon distribution with depth in the coastal saline-alkali soils under different vegetations

由图 1 可知,各植被类型土壤剖面 SOC 含量的差异主要表现在 0~20 cm 土层,变化范围为 2.02~9.61 g/kg,总平均值为 4.77 g/kg,20~40 cm 土层差异不显著。随着原生植被群落的演替(BS→AW→GW),0~5、5~10 和 10~20 cm 3 个土层,SOC 含量均呈增加趋势,0~5 cm 土层差异显著。茅草荒地围垦 3 年后,0~5 cm 土层,稻-油轮作地 SOC 含量显著下降,菊芋地 SOC 含量显著上升;在 5~10 cm 和 10~20 cm 土层,稻-油轮作地和菊芋地 SOC 含量均显著升高,0~20 cm 耕作层 SOC 含量的平均值分别比茅草地的增加了 30% (1.37 g/kg) 和 77% (3.48 g/kg),菊芋地增幅较大。

2.2 滨海盐碱地不同植被类型土壤剖面 SOC 密度情况

根据图 2 可知,不同植被类型土壤 0~10 cm 层的 SOC 密度占整个剖面(0~40 cm)的 32.3%~46.7%;

0~20 cm 土层的 SOC 密度占整个剖面的 54.6%~75.8%。由此可知,滨海盐碱土壤 SOC 储量主要集中在土壤表层(0~20 cm)。土壤表层和整个剖面的 SOC 密度变化范围分别为 5.87~21.54 t/hm² 和 10.74~28.42 t/hm²,总平均值分别为 12.56 t/hm² 和 18.34 t/hm²。

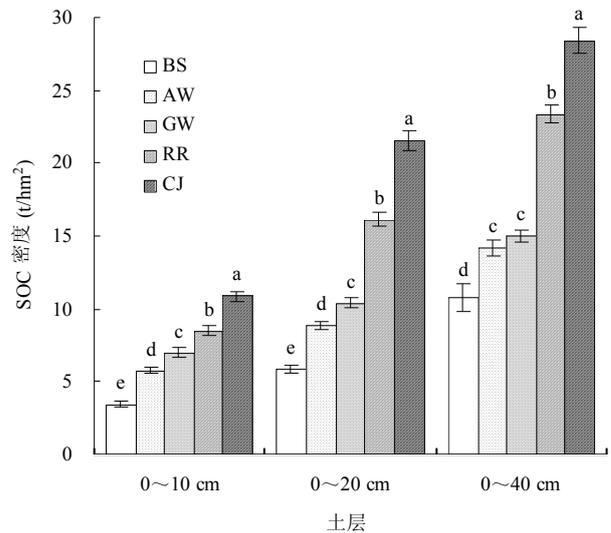


图 2 滨海盐碱地不同植被类型土壤剖面有机碳密度

Fig. 2 Soil organic carbon density distribution with depth in the coastal saline-alkali soils under different vegetation types

随着原生植被群落的演替,表层 SOC 密度呈显著上升趋势;在 0~40 cm 土壤剖面,盐蒿地与茅草地的 TOC 密度差异不显著,但均显著高于光滩。茅草荒地围垦 3 年后,土壤表层和整个剖面的 SOC 密度均显著增加;在表层土,稻-油轮作地和菊芋地 SOC 密度分别比茅草地的增加了 55% (5.77 t/hm²) 和 107% (11.15 t/hm²),而整个剖面的 SOC 密度则分别比茅草地的增加了 56% (8.36 t/hm²) 和 89% (13.42 t/hm²),菊芋地的增幅都较大。

2.3 滨海盐碱地不同植被类型表层 SMBC 和 DOC 含量情况

由表 2 可知,滨海盐碱地表层(0~20 cm) SMBC 的剖面分布与 SOC 相似,随着土层深度的增加,各植被类型 SMBC 含量减少。盐蒿、茅草、菊芋地 0~10 cm 土层 SMBC 含量分别占 0~20 cm 土层的 81%、88%、83%,说明其 SMBC 主要分布在 0~10 cm 土层,而稻-油轮作地在 0~20 cm 土层内的分布较为均匀。在同一土层,SMBC 含量的变化表现为:在 0~5 cm 和 5~10 cm 土层,SMBC 含量随原生植被群落的演替依次

表 2 滨海盐碱地不同植被类型表层土壤 SMBC 和 DOC 含量的差异

Table 2 Differences in SMBC and DOC contents in costal saline-alkali topsoil under different vegetation types

植被类型	SMBC (mg/kg)			DOC (mg/kg)		
	0~5 cm	5~10 cm	10~20 cm	0~5 cm	5~10 cm	10~20 cm
BS	27.73 ± 1.10 d	22.22 ± 1.28 d	23.65 ± 1.85 d	12.37 ± 1.46 d	12.59 ± 2.21 c	10.79 ± 1.96 e
AW	70.65 ± 2.10 c	23.73 ± 1.57 d	21.70 ± 2.06 d	23.11 ± 1.65 c	23.38 ± 1.68 b	18.65 ± 2.64 d
GW	160.15 ± 3.25 b	100.29 ± 2.25 b	37.01 ± 1.72 c	43.74 ± 2.17 a	41.27 ± 3.45 a	26.91 ± 1.23 b
RR	86.88 ± 3.26 c	69.16 ± 1.27 c	58.77 ± 2.82 b	20.60 ± 2.22 c	22.40 ± 3.69 b	22.66 ± 1.34 c
CJ	449.10 ± 14.65 a	412.91 ± 23.72 a	178.49 ± 1.09 a	34.75 ± 2.71 b	27.60 ± 2.37 b	37.64 ± 0.88 a

注: 同列不同小写字母表示不同植被间差异显著 ($P < 0.05$), 下表同。

升高, 茅草地围垦后, 稻-油轮作地的 SMBC 含量显著下降, 菊芋地 SMBC 含量显著升高; 在 10~20 cm 土层, $AW < BS < GW < RR < CJ$, 围垦区 SMBC 含量显著高于天然海涂区。

如表 2 所示, 滨海盐碱地表层 (0~20 cm) 土壤 DOC 含量随着土层深度的增加, 各植被类型的变化规律不一致。原生植被类型 (AW、GW) 土壤 0~5 cm 和 5~10 cm 层的 DOC 含量显著高于其 10~20 cm 层的。稻-油轮作地与光滩各土层 DOC 含量差异不显著, 分布较均匀。菊芋地的 DOC 含量则表现为: 10~20 cm $> 0~5 cm > 5~10 cm$, 差异显著。在同一土层, 随着原生植被群落的演替, 各层土壤 DOC 含量均呈显著增加趋势。茅草荒地围垦后, 在 0~5 cm 与 5~10 cm 土

层, 稻-油轮作地和菊芋地的 DOC 含量显著减少; 在 10~20 cm 土层, 稻-油轮作地 DOC 含量显著减少, 菊芋地 DOC 含量显著增加。

2.4 滨海盐碱地不同植被类型 SMBC 和 DOC 占 TOC 的比例情况

本研究中 SMBC 占 TOC 的比例介于 1.00%~5.45% (表 3)。各植被类型 SMBC/TOC 值随剖面深度变化的规律不一致, 茅草荒地和菊芋地为 5~10 cm $> 0~5 cm > 10~20 cm$, 光滩、盐蒿地和稻-油轮作地各土层比值差异不大。在同一土层, 不同植被类型 SMBC/TOC 值的差异特征与 SMBC 含量类似, 随着原生植被群落的演替, 土壤 SMBC/TOC 值呈增加趋势; 茅草荒地开垦耕作后, SMBC/TOC 值为 $CJ > GW > RR$ 。

表 3 滨海盐碱地不同植被类型土壤 SMBC 和 DOC 占 TOC 的比例

Table 3 Differences in ratios of MBC and DOC contents to TOC contents in costal saline-alkali soils under different plant types

植被类型	SMBC/TOC (%)			DOC/TOC (%)		
	0~5 cm	5~10 cm	10~20 cm	0~5 cm	5~10 cm	10~20 cm
BS	1.11	1.05	1.62	0.50	0.59	0.74
AW	1.25	1.00	1.04	0.41	0.98	0.90
GW	1.93	3.38	1.57	0.53	1.39	1.14
RR	1.40	1.13	1.09	0.33	0.37	0.42
CJ	4.67	5.45	2.59	0.36	0.36	0.55

土壤 DOC 占 TOC 的比例介于 0.33%~1.39% (表 3)。各植被类型土壤 DOC/TOC 值随土层深度的增加总体上有上升趋势。在同一土层, 不同植被类型土壤 DOC/TOC 值的差异特征与 DOC 含量相似, 随着原生植被群落的演替, 土壤 DOC/TOC 值总体上呈增加趋势, 茅草荒地各土层的 DOC/TOC 值都为

最高; 茅草荒地开垦耕作后, 土壤 DOC/TOC 值明显下降。

在有机碳组分相关性方面 (表 4), 滨海盐碱土壤 SMBC 与 TOC、SMBC 与 SMBC/TOC 均呈极显著正相关 ($P < 0.01$); DOC 与 TOC 呈显著正相关 ($P < 0.05$), DOC/TOC 与 TOC 呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。

表 4 滨海盐碱土壤 SMBC、DOC 与 TOC 的相关系数
Table 4 Correlative coefficients between TOC and DOC and SMBC

	TOC	SMBC	DOC	SMBC/TOC	DOC/TOC
TOC	1				
SMBC	0.788**	1			
DOC	0.604*	0.511	1		
SMBC/TOC	0.568*	0.923**	0.532*	1	
DOC/TOC	-0.649**	-0.388	0.178	-0.094	1

注: * 表示达到 $P < 0.05$ 显著性水平, ** 表示达到 $P < 0.01$ 显著性水平。

3 讨论与结论

研究表明, 植被类型会显著影响其 SOC 的垂直分布, 植被变化及其 SOC 库容对碳固定具有重要的潜在影响^[18], 土地利用变化和耕作措施也会影响 SOC 库的变化^[19-20]。森林、灌丛和草地 0~20 cm 表层 SOC 分别是其 0~100 cm 土层的 54%、46% 和 39%^[11], 而森林砍伐造田、草原放牧等人类活动会明显改变其 SOC 的分布与平衡^[6]。本研究中, 滨海盐碱地不同植被类型 SOC 的垂直分布有显著差异。原生植被荒地 SOC 主要分布在表土 0~5 cm 层, 表明其土壤熟化程度低。而围垦区植被 SOC 主要分布在 0~20 cm 层, 其中稻-油轮作地 0~20 cm 层 SOC 含量分布较为均匀。究其原因, 可能是荒地长期处于免耕状态而会导致土壤出现层化 (stratification) 现象, 从长远看, 这种层化现象可能会减慢或限制 SOC 的长期积累, 植物的凋落物只增加表层 5 cm SOC 含量而未能进入深层土壤^[20]。稻-油轮作地的翻耕措施使其耕作层 (0~20 cm) 土壤重新分配而 SOC 分布较均匀。

值得提出的是, 菊芋地 SOC 含量和密度均为最高, 菊芋的地上和地下部分生物量大可能是其显著增加 SOC 储量的主要原因。经试验, 海涂耐盐能源植物—菊芋地上部鲜重可达 37 t/hm² 以上, 地下块茎鲜重可达 50 t/hm² 左右^[13, 21], 利用 CO₂ 光合生产如此大的生物量将有一定的比例留在盐土里, 被固定成 SOC。Lal^[22] 的研究也表明, 种植地下生物量大的作物更有利于提高 SOC 在深层的分布。

SMBC 是土壤中最活跃和最易变化的部分, 能快速地指示土壤质量的变化趋势^[23]。土壤 DOC 的主要来源是土壤有机质中的腐殖质, 是土壤微生物可以直接利用的有机碳源, DOC 占 TOC 的百分比是表征土壤活性有机碳库周转的较好指标^[4]。本研究中, 随着原生植被演替的进行, 表层 (0~20 cm) 土壤活性有机碳含量及其占 TOC 的比例都呈增加趋势, 这可能是顺

行演替使土壤肥力提高且未受扰动的结果^[24]。茅草荒地垦殖后, 菊芋地表层土 SMBC 含量及 SMBC/TOC 比值升高, 其原因可能是菊芋有生物量大的地下块茎, 而且有相对较发达的根系, 根的残茬及大量的低分子量的根系分泌物加剧了土壤微生物的繁殖, 使其生命活动旺盛。研究表明, 免耕、间歇性耕作等保护性耕作措施有利于土壤微生物活性的增强^[20]。徐阳春等^[25] 的研究表明, 长期免耕并施有机肥可提高稻麦轮作 SMBC、SMBN、SMBP 含量。菊芋种植地为一次播种多年收获的间歇性耕作方式, 减少了翻耕, 所以其表层土 SMBC 含量较高。然而, 稻-油轮作地表层土 SMBC 含量及 SMBC/TOC 比值均明显下降, 这可能是常规翻耕与免耕相比 SMBC 含量会明显减少的原因。所以, 在滨海盐碱荒地围垦初期, 植被类型和耕作方式都会影响 SMBC 含量, 种植地上/地下生物量大的植被 (菊芋), 并结合保护性的耕作措施有利于 SMBC 含量及比例的增加。本研究中, 表层土 SMBC/TOC 平均值为 2.02%, 低于一般稻田土壤的 5.07%^[26], 这可能与滨海盐碱土壤熟化程度低、植被覆盖少、SMBC 含量低有关。研究表明, 土地开垦耕作可能是导致土壤 DOC 含量降低的主要原因^[27]。本研究结果也表明, 稻-油轮作地和菊芋地表层土壤 DOC 含量和 DOC/TOC 比值都明显低于围垦前的茅草荒地, 且两者 DOC/TOC 比值差异不显著, 其原因可能是影响土壤 DOC 的主要因素是土地利用变化 (荒地围垦耕作), 而受植被类型的影响相对较小。但是, 稻-油轮作地和菊芋地的 SOC 储量却高于茅草荒地, 而且 DOC/TOC 比值与 TOC 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 说明在围垦初期, 稻-油轮作地和菊芋地 SOC 易分解组分比例较小, 有机碳较稳定, 有利于 SOC 的积累。

本研究中, 滨海盐碱地 SOC 主要积累在表层 (0~20 cm), 表层 SOC 含量和密度的平均值分别为 4.77 g/kg 和 12.56 t/hm², 明显低于江苏地区的平均值 10.95 g/kg 和 28.25 t/hm²^[28]。茅草荒地围垦 3 年后, 表层 SOC

储量增加, 稻-油轮作地平均固碳速率为 $1.92 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 菊芋地平均固碳速率为 $3.72 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 远远高于江苏地区过去 20 年 (1982—2004 年) 的平均固碳速率 $0.16 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ [28], 由此说明, 虽然滨海盐碱荒地初始 SOC 密度低, 但通过种植耐盐作物增加植被覆盖后, 使其在围垦初期具有较大的固碳速率。据统计^[10, 29], 我国目前近岸及海岸湿地面积为 $5.94 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 而滨海盐碱非耕地面积达 $2.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。若按此非耕地面积估算, 在一定时期内, 通过增加植被生物量将我国滨海盐碱地土壤 0 ~ 20 cm 的 SOC 密度由平均值 ($13.64 \text{ t}/\text{hm}^2$) 提高至本试验中菊芋地的水平 ($21.54 \text{ t}/\text{hm}^2$), 则可增加 $1.6 \times 10^7 \text{ t}$ 碳储量。因此, 滨海盐碱土壤碳库具有较大的提升潜力。但由于存在地域差异、土地可利用状况各异等许多不定因素, 这只是保守的估计参考值。

本研究表明, 滨海盐碱地原生植被群落的顺行演替使 SOC 储量和活性碳组分均依次增加。而在围垦初期, SOC 储量增加但活性碳组分减少, 翻耕可能是使其活性碳组分减少的主要原因。菊芋发达的地下块茎和间歇性的耕作方式使其土壤微生物活性增强, 土壤质量朝良性方向发展。所以, 在农业利用滨海盐碱荒地增加 SOC 储量的同时, 还应采取适当的措施防止土地的再次退化, 如利用盐碱非耕地种植生物量大的耐盐作物 (菊芋), 对土地采取保护性的耕作措施等。随着围垦年限的增加, 其 SOC 库的动态变化如何? 还有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 12-14
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304: 1 623-1 627
- [3] 潘根兴, 周萍, 李恋卿, 张旭辉. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展. *土壤学报*, 2007, 44(2): 327-337
- [4] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应. *生态学杂志*, 1999, 18(3): 32-38
- [5] Sollins P, Homann P, Caldwell B. Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls. *Geoderma*, 1996, 74: 65-105
- [6] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 99-105
- [7] 黄昌勇主编. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [8] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家安全. *地球科学进展*, 2005, 20(4): 384-393
- [9] 黄耀. 中国陆地和近海生态系统碳收支研究. *中国科学院院刊*, 2002(2): 104-107
- [10] 刘兆普, 沈其荣, 尹金来. 滨海盐土农业. 北京: 中国农业科技出版社, 1998: 1-3
- [11] Wang SL, Huang M, Shao XM, Mickler RA, Li KR, Ji JJ. Vertical distribution of soil organic carbon in China. *Environmental Management*, 2004, 33: 200-209
- [12] Xie JX, Li Y, Zhai CX, Li CH, Lan ZD. CO₂ absorption by alkaline soils and its implication to the global carbon cycle. *Environmental Geology*, 2009, 56: 953-961
- [13] 刘兆普, 隆小华, 刘玲, 赵耕毛. 海岸带滨海盐土资源发展能源植物资源的研究. *自然资源学报*, 2008, 23(1): 9-14
- [14] Long XH, Huang ZR, Huang YL, Kang J, Zhang ZH, Liu ZP. Response of two Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*) cultivars differing in tolerance to salt treatment. *Pedosphere*, 2010, 20(4): 515-524
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 106-271
- [16] Wu J, Joergensen RG, Pommerening B, Chaussod R, Brookes PC. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation extraction-an automated procedure. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22: 1 167-1 169
- [17] Ghani A, Dexter M, Perrott KW. Hot water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35: 1 231-1 243
- [18] Jobbágy EG, Jackson RB. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436
- [19] Guo LB, Gifford RM. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345-360
- [20] Quincke JA, Wortmann CS, Mamo M, Franti T, Drijber RA. Occasional tillage of no-till systems: Carbon dioxide flux and changes in total and labile soil organic carbon. *Agronomy Journal*, 2007, 99(4): 1 158-1 168
- [21] Stanley JK, Stephen FN. *Biology and Chemistry of Jerusalem Artichoke*. New York: CRC Press, 2008: 127-142
- [22] Lal R. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. *Soil and Tillage Research*, 1997, 43: 81-107
- [23] 任天志, Grego S. 持续农业中的土壤生物指标研究. *中国农业科学*, 2000, 33(1): 68-75
- [24] 沈永明, 曾华, 王辉, 刘咏梅, 陈子玉. 江苏典型淤长岸段潮滩盐生植被及其土壤肥力特征. *生态学报*, 2005, 25(1): 1-6

- [25] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响. 土壤学报, 2002, 39(1): 89-96
- [26] 刘守龙, 苏以荣, 黄道友, 肖和艾, 吴金水. 微生物商对亚热带地区土地利用及施肥制度的响应. 中国农业科学, 2006, 39(7): 1411-1418
- [27] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 赵鑫. 土壤溶解性有机碳(DOC)的影响因子及生态效应. 土壤通报, 2007, 38(4): 758-764
- [28] Liao QL, Zhang XH, Li ZP, Pan GX, Smith P, Jin Y, Wu XM. Increase in soil organic carbon stock over the last two decades in China's Jiangsu Province. *Global Change Biology*, 2009, 15: 861-875
- [29] 国家海洋局. 中国海洋统计年鉴. 北京: 海洋出版社, 2008

Effects of Different Vegetation Types on Soil Organic Carbon Pool in Costal Saline-alkali Soils of Jiangsu Province

KANG Jian, MENG Xian-fa, XU Yan-yan, LUAN Jing, LONG Xiao-hua, LIU Zhao-pu
(*Key Laboratory of Marine Biology of Jiangsu Province, College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*)

Abstract: The content of soil organic carbon (SOC) and SOC density (0 ~ 40 cm) in the costal saline-alkali soils of Jiangsu Province under five vegetation types (Bare saline soil, BS; Artemisia wasteland, AW; Grass wasteland, GW; Rice-rape rotation, RR; and Continuous cropping of Jerusalem artichoke, CJ) were determined, and soil microbial biomass carbon (SMBC), dissolved organic carbon(DOC) and the ratio of SMBC, DOC to TOC in topsoil (0 - 20 cm) were also analyzed. The results showed that: (1) the content of organic carbon decreased with the increase of soil depth. SOC content and stock in the topsoil was 2.02 - 9.61 g/kg and 5.87 - 21.54 t/hm², respectively. Topsoil SOC content and stock increased as the process of succession (BS→AW→GW) and significantly increased after three years farming in the GW soil, compared to GW, topsoil SOC stock of the RR and CJ increased by 55% (5.77 t/hm²) and by 107% (11.15 t/hm²), respectively. (2) The contents of SMBC and DOC in the topsoil were 21.7 - 449.1 mg/kg and 10.8 - 43.7 mg/kg respectively. SMBC was mainly in the depth of 0 ~ 10 cm. SMBC and SMBC/TOC were highest in CJ, the followed by GW, RR, AW and BS. The DOC and DOC/TOC decreased significantly after farming. Our results suggested that, the organic carbon pool and active organic carbon component successively increased with the wild vegetation succession, SOC stock in the costal saline-alkali soils increased after agricultural use for three years, while the ratio of the active organic carbon decreased. The main reason for the variation of the active soil organic carbon pool might be the land use change. Therefore, the increase of total SOC pool in China saline-alkali lands will be significantly important to reduce CO₂ emission, however, it is worth mentioning that to take measures to improve the soil quality for ensuring sustainable productivity.

Key words: Costal saline-alkali soils, Soil organic carbon, Microbial biomass carbon, Dissolved organic carbon, Vegetation types