

耕作方式对滨海盐渍土有机碳含量及团聚体特性的影响^①

候晓静¹, 杨劲松^{1,2*}, 赵曼¹, 金雯晖¹, 李芙蓉¹,
姚荣江^{1,2}, 余世鹏^{1,2}, 王相平¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 中国科学院南京分院东台滩涂研究院, 江苏东台 224200)

摘要: 为探明不同耕作措施对滨海盐渍土耕层土壤有机碳含量和团聚体特征的影响, 本研究在江苏省东台市滨海滩涂农区开展田间试验, 选择玉米-大麦的旱-旱轮作方式, 采用传统翻耕、深翻、少耕和免耕 4 种耕作方式, 分别对耕层土壤的有机碳含量、土壤体积质量(容重)、水稳性团聚体含量和稳定性进行测定。结果表明: 与传统翻耕相比, 免耕措施利于促进土壤有机碳的积累, 免耕能使土壤有机碳含量增加 18%~32%; 少、免耕措施能使 0~10 cm 土层 >0.25 mm 团聚体增加 10%~31%, 并且能显著增加 0~20 cm 土层土壤平均重量直径和几何平均直径值; 团聚体中有机碳含量表现为, 除 0.25~0.5 mm 团聚体外, 在 >5 mm 至 0.5~1 mm 粒径之间, 粒径愈小, 有机碳含量愈高。

关键词: 耕作措施; 土壤有机碳; 团聚体特征; 苏北滩涂; 盐渍土

中图分类号: S153.6; S152.4

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)对表征土壤质量的物理、化学和生物学指标均有一定的影响, 因此被认为是反映土壤质量和农业可持续性的一个重要指标^[1], 而团聚体是土壤结构的基本单位, 也是土壤有机质保持的场所, 对土壤碳的固持和肥力影响重大^[2]。SOC 库储量与水稳性团聚体关系密切^[3], 已有研究结果表明, 土壤团聚体形成与 SOC 含量间存在正相关关系^[4], 但也有研究表明不同粒径团聚体 SOC 含量不同, SOC 含量随团聚体粒径的增大而增加, 并且大团聚体比微团聚体含有更多不稳定的初期的新成有机物质^[5]。在人为利用方式下, 对 SOC 含量和团聚体特征影响较大的因素有施肥制度、土地利用方式和耕作制度等。其中, 耕作措施变化的影响是非常重要的, 而且是主要的^[6]。目前, 国内外学者关于耕作措施对 SOC 含量影响的研究已经有很多。Al-kaisi 和 Yin^[7]研究发现, 常规耕作转变为免耕后的前 3 年, SOC 含量并没有显著增加。Ben 等^[8]对 2 个点进行短期(4 年)的定位试验后则得出, 在免耕条件下 2 个点的 SOC 含量均比翻耕有所增加, 增加幅度为 10%~22%。徐胜祥等^[6]

利用 DNDC 模型进行研究发现, 采用少免耕可明显增加 SOC 的积累。梁爱珍等^[9]对进行 5 年免耕的黑土总 SOC 和水稳性团聚体中 SOC 分配发现, 免耕处理仅能使 0~5 cm 土层 SOC 含量显著增加。Fernandez 等^[10]研究显示在 0~18 cm 土层中, 免耕和翻耕措施下 4 mm 团聚体比例最高, 其次为 1~4 mm 和 1 mm 团聚体, 并且免耕措施 4 mm 的团聚体比例高于翻耕措施。采用免耕方式还有利于平均重量直径(mean weight diameter, MWD)和几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)的增加^[11-12], 并且 0~10 cm 土层的 MWD 和 GMD 与土 SOC 含量呈极显著正相关^[13]。周虎等^[14]研究也表明, 免耕能显著提高 0~10 cm 土层内 >0.25 mm 团聚体的数量和团聚体稳定性。

尽管国内关于耕作方式对 SOC 和团聚体特征的研究已经有很多, 但是对于滩涂农田等障碍性土壤的相关研究目前尚不多见, 而耕作对 SOC 的短期影响(10 年)又会因土壤质地、气候、生物量以及采样时间等因素的不同而不同^[8], 因此本研究将研究区域设在苏北滩涂地区农田土壤, 主要探讨不同耕作措施对

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171181、51109204)、江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2013062)和江苏省自然科学基金项目(BK2011425)资助。

* 通讯作者(jsyang@issas.ac.cn)

作者简介: 候晓静(1987—), 女, 河南鹤壁人, 博士研究生, 研究方向为土壤退化及其环境效应。E-mail: xjhou@issas.ac.cn

滨海典型盐渍区土壤有机碳和团聚体分布规律的短期影响,以期选择有效的管理措施来促进滨海盐渍土的固碳提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

本试验地点位于江苏省东台市黄海原种场(32°38'N, 120°50'E),该地区属于亚热带和暖温带季风气候的过

渡区,年平均降水量 1 058.4 mm,主要集中在 6—8 月,年平均蒸发量 1 417 mm,年平均气温 14.6℃,无霜期 213 天左右。试验地属于滨海新围垦的滩涂土壤(围垦时间 2005 年),由于前茬作物为水稻,因此土壤盐分含量有所下降,但土壤肥力水平仍较低。土壤类型为冲积盐土类,潮盐土亚类,是典型的淤泥质海岸带盐渍土。试验前耕层土壤(0~20 cm)基本理化性质见表 1。

表 1 试验前耕层土壤基本理化性质
Table 1 Basic physico-chemical properties of tested soil

pH	EC _{1:5} (dS/m)	有机碳 (g/kg)	全氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
8.79~9.13	0.367~0.701	3.19~4.76	250~404	300~750	140~300

1.2 试验设计

试验采用玉米-大麦的旱-旱轮作方式,共设 4 种不同耕作方式作为处理,每个处理设 3 次重复,随机区组排列,各处理详细操作方式见表 2。

供试作物为玉米和大麦。玉米品种为“苏玉 21 号”,大麦品种为“苏啤 4 号”,播种量 375 kg/hm²,行距 25 cm。试验期间各作物施肥量和施肥方式均相同,施肥量为纯 N 300 kg/hm²,P₂O₅ 60 kg/hm²,施肥方式为基肥+追肥,基追比为 6:2:2,所有处理其他田间管理措施均相同,收获时间为 2013 年 10 月下旬。

表 2 各试验处理细节描述
Table 2 Description of experiment treatments

处理	缩写	操作方式
传统耕作	CT	与当地常规耕作方式相同,即在前茬作物收获后人工耕翻约 10 cm,耙平后进行播种
深耕	DT	耕作方式同 CT,但翻耕深度调整至 30 cm
少耕	MT	前茬作物收获后不耕翻,仅在种植前浅翻 5 cm,随即进行穴播种植,保证前茬作物根茬残留度在 30%~50%
免耕	NT	全年无耕翻,每季作物采取穴播种植方式,保证前茬作物根茬残留度>70%

1.3 测定项目和方 法

试验开始前,对各小区 100 cm 土层内土样以“S”型路线选择 3 点取样,分层方法为 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm,对所测得的土壤盐分含量和 pH 进行统计分析。作物收获后,在各小区取 0~10、10~20、20~30 cm 土层的土样,取样方法仍为按“S”型路线选择 3 点取样,将各个小区同一土层 3 点样品混于 1 袋,拣去作物残根和石砾后置于室内阴凉通风处自然风干,磨碎,过 2 mm 筛后备用。

土壤体积质量(容重)采用环刀法测定;土壤有机

碳(SOC)采用重铬酸钾容量法-外加热法测定^[15]。

SOC 密度依据以下公式^[16]:

$$TOC_s = \sum_{i=1}^n (C_i \times \rho_i \times T_i) / 100$$

式中:TOC_s为特定深度的 SOC 密度(kg/m³);C_i为第 i 层 SOC 含量(g/kg);ρ_i为第 i 层土壤体积质量(g/cm³);T_i为第 i 层土壤厚度(cm),n 为土层数。

土壤水稳性团聚体采集及测定:采集表层 0~10、10~20 cm 原状土样,置于密封保鲜盒中,样品在采集和运输途中尽量减少对土样的扰动,以免破坏团聚体。土样带回实验室后,小心剔除作物残根落叶等,将其沿土块自然裂缝掰成 10 mm 左右的小块,混匀并于室温下风干。水稳性团聚体参照 Haynes^[17]的方法做适当改进后进行,具体为:将 100 g 风干土样(1~10 mm)置于由孔径分别为 5、3、2、1、0.5、0.25 mm 筛组成的套筛的最上一层;调整桶内水面的高度,使套筛移动到最高位置时最上一层筛中的团聚体刚好淹没在水面以下;待团聚体在水面下浸泡 5 min 后,以每分钟 30 次的速度上下震荡 2 min,将每一层筛上的团聚体分别洗入铝盒烘干称重,即得每粒级团聚体重量。

平均重量直径(mean weight diameter, MWD):一定粒级团聚体的重量百分比 W_i乘以这一粒级的平均直径 X_i,所有所测粒级的上述乘积之和,即为平均重量直径(MWD),公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (1)$$

几何平均直径(geometric mean diameter, GMD):一定粒级团粒的重量百分比 W_i乘以这一粒级平均直径 X_i的对数,所有上述乘积之和除以样品的总质量 m,即为几何平均直径(GMD),公式为:

$$GWD = \exp \left[\frac{\sum \log X_i W_i}{m} \right] \quad (2)$$

1.4 数据统计与分析

数据处理、统计分析均采用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 统计软件，不同处理间的差异显著性水平采用 LSD 法进行检验。

2 结果与分析

2.1 滨海典型盐渍区农田土壤的盐分和 pH 分布特征

由表 3 可以看出，试验区土壤 0~100 cm 深度 pH 概况为：随着土层深度的增加，pH 呈增加的趋势，pH 变化范围 8.74~10.01。土壤 0~60 cm 剖面土壤盐分含量在 0.40~1.47 g/kg，均值 0.89 g/kg，属于非盐化到轻度盐渍化程度^[18]。苏北滩涂农田土壤是在盐渍淤泥上发育而成，围垦初期土体盐分重，采取合理利用和适当排盐方法后，能有效降低土壤

盐分。但是苏北滩涂区地处北亚热带地区，有着显著的海洋性季风气候特征，降水时间和空间变异性强，这也使得滩涂土壤盐分含量随季节而呈现积盐-脱盐-返盐等不同周期。本次采样时间为 6 月份，该时期为苏北滩涂区的雨季，雨量充沛，对土壤盐分有一定的淋洗作用，因此土壤盐分含量有一定降低。

本课题组张建兵等^[19]，已在前期对该区域围垦农田 6.7 hm² 的范围内，22 个典型剖面(分为 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm)，110 个土壤样品进行分析，其结果表明，滩涂围垦农田土壤盐分离子以 Cl⁻ 和 Na⁺ 为主，两者分别占阴、阳离子含量的 61.79%、72.48%，对全盐的贡献率达 65.5%；SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 所占比例分别为 20.48%、13.90%、3.83%、11.41%、8.23%、7.88% (图 1)。可以看出，滩涂盐渍区围垦农田以氯化物占绝对优势，这是由于滨海盐渍土盐分主要来源于海水，因此以 Cl⁻ 和 Na⁺ 含量最高^[18]。

表 3 滨海典型盐渍区农田土壤盐分和 pH 统计特征分析
Table 3 Statistical characteristics of soil salt contents and pH values of soil in studied region

项目	土层(cm)	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数(%)
pH	0~10	8.74	9.04	8.87	0.10	1.13
	10~20	8.78	9.15	8.97	0.12	1.34
	20~40	9.01	9.46	9.26	0.14	1.51
	40~60	9.12	9.77	9.43	0.17	1.80
	60~80	9.30	9.79	9.57	0.13	1.36
	80~100	9.51	10.01	9.79	0.14	1.43
土壤盐分含量 (g/kg)	0~10	0.92	1.47	1.15	0.06	4.95
	10~20	0.62	1.42	0.90	0.07	8.00
	20~40	0.64	0.77	0.57	0.03	5.06
	40~60	0.40	1.08	0.59	0.06	10.54
	60~80	0.46	1.42	0.76	0.10	12.73
	80~100	0.44	1.95	1.04	0.12	11.30

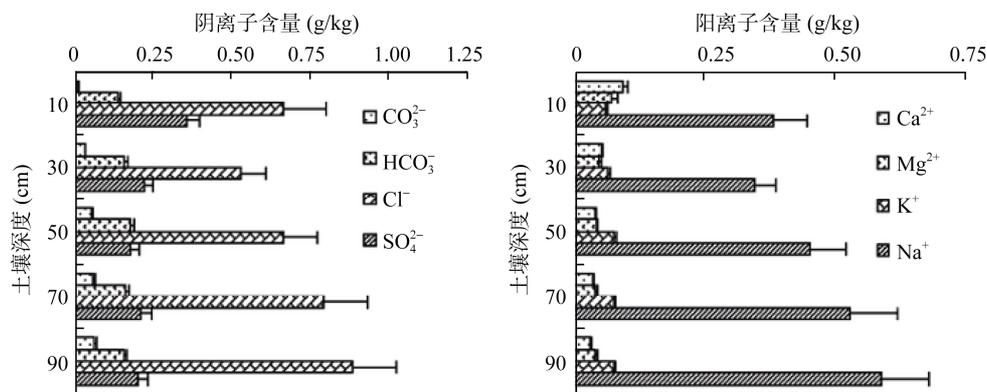
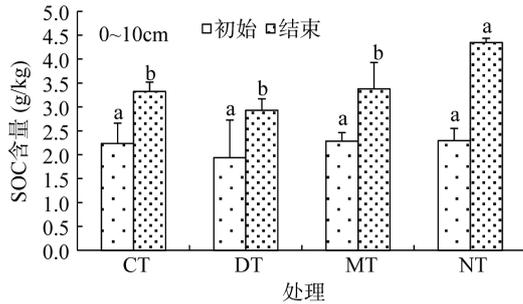


图 1 滩涂围垦区农田土壤离子组成及其剖面特征^[19]
Fig. 1 Ionic compositions and their profile distribution characteristics of mudflat farmland

2.2 不同耕作措施对耕层 SOC 含量及密度的影响

为了消除土壤本底值的影响,本文中采用试验初始与结束时 SOC 含量的变化值来表征 SOC 对不同耕作措施的响应。由结果可以看出(图 2),在试验初始阶段各处理 SOC 含量较为均一,没有明显差别。但在试验结束阶段, SOC 含量随耕作措施的不同差异较大。在 0~10 cm 土层,不同耕作措施处理 SOC 含量次序为 NT>MT>CT>DT, NT 处理 SOC 含量显著



(图中不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著($P<0.05$))

图 2 不同耕作措施下的 SOC 含量

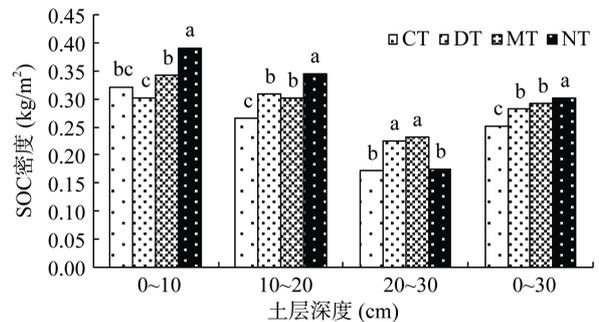
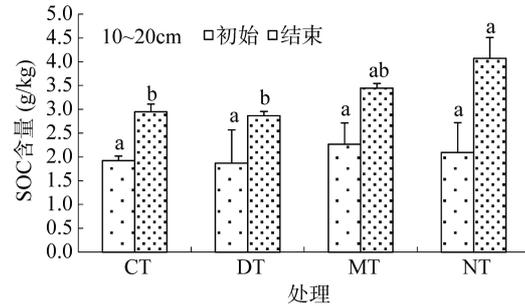
Fig. 2 SOC concentrations under different tillage treatments

大多数情况下, SOC 储量确实随着含量的增加而升高,但一些研究的定量估算却表明,每单位土地面积或体积 SOC 储量不但取决于 SOC 含量,还取决于土壤体积质量和土壤体积^[20]。因此,本研究增加 SOC 密度来表征各调控措施对 SOC 储量的影响(图 3)。由于 SOC 密度与含量间存在密切关系,因此影响 SOC 在剖面中迁移和分解转化的因素,最终都会影响 SOC 的密度^[21]。由结果可以看出, 0~10 cm 土层 CT、DT、MT 和 NT 处理 SOC 密度分别为 0.32、0.30、0.34、0.39 kg/m², 即 NT>MT>CT>DT, NT 处理与 CT、DT、MT 处理相比 SOC 密度分别增加了 18%、23%、13%; 10~20 cm 土层, CT、DT、MT 和 NT 处理的 SOC 密度有所降低,分别为 0.26、0.31、0.30、0.34 kg/m², NT 处理与 CT、DT、MT 处理相比 SOC 密度分别增加了 24%、9%、12%; 20~30 cm 土层,各处理 SOC 密度明显下降,且 CT、NT 处理均低于 DT 和 MT,表明免耕措施对 SOC 密度的影响在 0~20 cm 土层更加明显。随着深度逐渐加深, SOC 密度受外界环境的影响逐渐减小。0~30 cm 土层中, CT、DT、MT 和 NT 处理的 SOC 密度分别为 0.25、0.28、0.29、0.30 kg/m², NT 处理 SOC 密度显著高于其他处理($P<0.05$),即免耕措施能显著增加 0~30 cm 土壤的 SOC 密度。

2.3 耕作方式对土壤不同粒径水稳性团聚体总量及分布特征的影响

图 4 和图 5 是不同耕作措施下 0~20 cm 土层各

大于 CT、MT 及 NT 措施($P<0.05$), CT、DT、MT、NT 处理试验期间 SOC 含量的增加值分别为 1.09、1.00、1.10、2.05 g/kg; 10~20 cm 土层,各处理 SOC 含量略有下降,含量依次为 NT>MT>DT>CT, CT、DT、MT、NT 处理试验期间 SOC 含量的增加值分别为 1.03、1.00、1.18、1.97 g/kg。可以看出,与其他措施相比,免耕措施明显促进了 0~20 cm 土层 SOC 含量的积累。

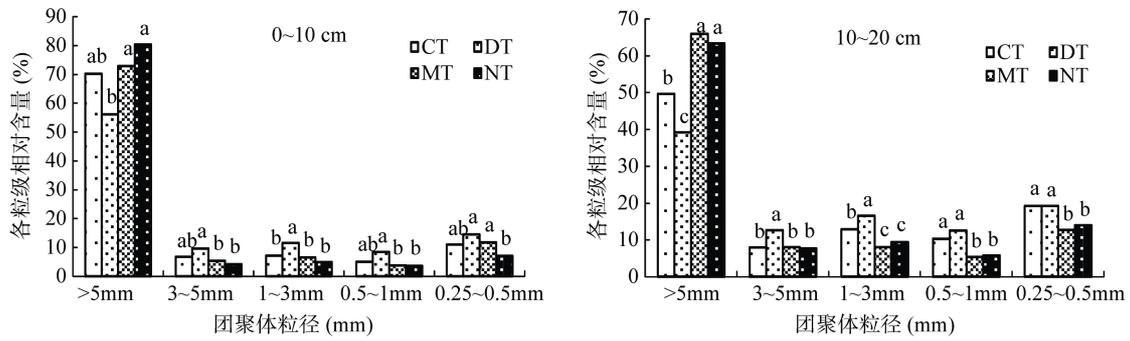


(图中不同小写字母表示相同土层不同处理间差异显著($P<0.05$))

图 3 不同耕作措施下的 SOC 密度

Fig. 3 SOC densities under different tillage treatments

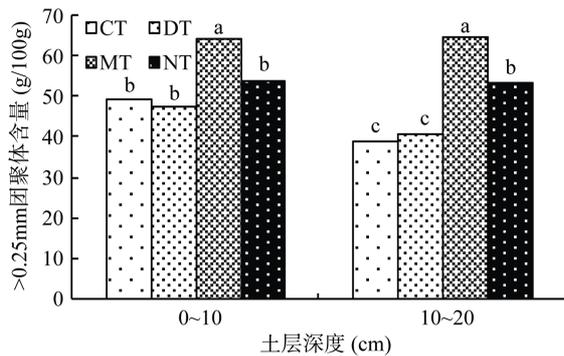
粒径团聚体所占的相对含量及团聚体总量的结果。由图可以看出,各处理 0~20 cm 耕层土壤中以>5 mm 粒径的团聚体为主(图 4),所占含量平均值为 62%。在 0~10 cm 土层中, NT 处理>5 mm 粒径团聚体含量最高,为 80%,含量最低的是 DT 处理,为 56%; 0.25~5 mm 粒径的团聚体含量则是 DT 处理含量最高,与含量最低的 NT 处理相比增幅达 55%。由方差分析可知,在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层, MT 和 NT 处理>5 mm 粒径的团聚体含量都显著高于 CT、DT 两组处理($P<0.05$),而 MT 和 NT 处理 0.25~5 mm 粒径之间的团聚体含量则均略低于或显著低于 DT 和 CT 处理。此外, MT 和 NT 处理>5 mm 粒径团聚体含量深度增加含量有所降低,但 0.25~5 mm 粒径的团聚体含量则随深度增加而增加。



(图中不同小写字母表示同一粒级不同处理间差异显著($P < 0.05$))

图 4 不同耕作措施下水稳性团聚体各粒级分布特征

Fig. 4 Water-stable aggregate distributions under different tillage treatments



(不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著($P < 0.05$))

图 5 不同耕作措施下 >0.25mm 水稳性团聚体含量

Fig. 5 Water-stable macro-aggregate contents under different tillage treatments

团聚体是土壤结构的基本单位,也是土壤有机质保持的场所,对土壤碳的固持和肥力影响重大。土壤结构的好坏主要决定于 >0.25 mm 的大团聚体含量,其数量与土壤的结构和肥力水平呈正相关^[22]。由图 5 可以看出,耕层土壤在不同耕作措施下 >0.25 mm 水稳性团聚体含量最多的均为 MT,其次是 NT。0~10 cm 土层,各处理 >0.25 mm 团聚体含量顺序为 MT>NT>CT>DT, MT 和 NT 处理大团聚体含量分别比对照

CT 处理高出 15 g/100 kg 和 5 g/100 kg,增幅分别为 31% 和 10%;经过方差分析可知,MT 和 NT 处理之间差异不显著($P > 0.05$),但显著高于 DT 和 CT 处理($P < 0.05$)。10~20 cm 土层,各处理 >0.25 mm 团聚体含量顺序为 MT>NT>DT>CT, MT 处理大团聚体含量分别比 CT、DT、NT 处理高出 26、24、12 g/100 g,并且差异达到显著水平($P < 0.05$)。

平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)是反映团聚体分布和稳定性的指标,MWD 和 GMD 的值越大,表明大团聚体的百分比越高,土壤结构越稳定^[14]。由表 4 可知,0~10 cm 土层 MWD 值和 GMD 值最高的均为 NT 处理,CT、DT、MT、NT 处理的 MWD 值分别为 5.75、4.91、5.87、6.33 mm,NT 处理 MWD 值分别比 CT 和 DT 处理增高 9% 和 22%;在 10~20 cm 土层,CT、DT、MT、NT 处理的 MWD 值分别为 4.42、3.91、5.50、5.33 mm,MT 处理 MWD 值分别比其他 3 个处理增加了 20%、29% 和 3%,并且 MT 和 NT 处理 MWD 和 GMD 显著高于 DT 和 CT 处理($P < 0.05$),说明少耕和免耕处理下团聚体稳定性优于深翻和传统翻耕,有利于改善团聚体的状况。

表 4 不同耕作措施下土壤团聚体的 MWD 和 GMD(mm)
Table 4 MWD and GMD of soil aggregates under different tillage treatments

指标	深度(cm)	处理			
		CT	DT	MT	NT
MWD	0~10	5.75 ab	4.91 b	5.87 ab	6.33 a
	10~20	4.42 b	3.91 c	5.50 a	5.33 a
GMD	0~10	4.20 ab	3.21 b	4.29 ab	5.07 a
	10~20	2.63 b	2.31 b	3.84 a	3.62 a

注：同行不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

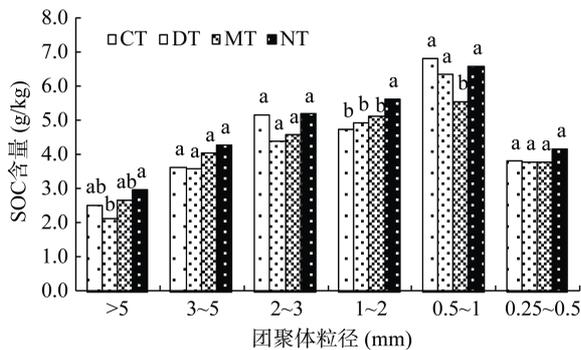
2.4 耕作方式对团聚体 SOC 含量的影响

耕作对团聚体的影响主要是能够改变 SOC 的分布和微生物的生活环境,为土壤有机质的分解转化提

供了条件,从而使团聚体发生变化^[23],不同的耕作方式对土壤团聚体 SOC 的分布影响不同。从图 6 中可以看出,在 >5 mm 至 0.5~1 mm 粒径之间,随着

团聚体粒径的减小, SOC 含量均表现为逐渐增大的趋势,但在 0.25 ~ 0.5 mm 粒径之间, SOC 含量不随粒径的减小而增加,在 4 种耕作措施中均表现为此趋势。

对于同一粒径来说,除 0.5 ~ 1 mm 粒级团聚体之外,其他团聚体粒级中 NT 处理 SOC 含量均高于 CT、DT、MT 处理。与 CT、DT、MT 处理相比,在 >5 mm 粒级团聚体中,NT 处理团聚体 SOC 含量分别增加了 15.2%、29%、10.4%,3 ~ 5 mm 粒级团聚体 NT 处理 SOC 增幅分别为 14%、16%、5.3%,2 ~ 3 mm 团聚体增幅分别为 0.1%、15%、11.7%,1 ~ 2 mm 团聚体增幅分别为 15.6%、12.2%、9.2%,0.5 ~ 1 mm 团聚体增幅分别为 -3.4%、4%、15%,0.25 ~ 0.5 mm 团聚体增幅分别为 8.7%、9%、9.3%。



(不同小写字母表示同一粒级不同处理间差异显著($P < 0.05$))

图 6 不同耕作措施对团聚体 SOC 含量的影响

Fig. 6 SOC concentrations in different aggregate-size fractions under different tillage treatments

3 讨论

3.1 耕作方式对 SOC 积累的影响

免耕等保护性耕作可以减少对土壤大团聚体的破坏并促进微团聚体向大团聚体团聚,降低团聚体的周转速率,促进细颗粒态有机质(particulate organic matter, POM)的固定,从而利于碳的固定和积累^[24]。而梁爱珍等^[25]研究发现,不同耕作处理对黑土耕层 SOC 的影响无显著性差异,3 年免耕处理使 0 ~ 5 cm 表层 SOC 含量仅增加了 0.18%,而 5 ~ 20 cm 土层 SOC 含量则明显降低,并且发现在质地重、排水不良的土壤上实施免耕并不能明显增加 SOC 含量。本试验结果表明,在滨海盐渍区农田土壤中实行 3 季免耕措施后,0 ~ 10 cm 土层 SOC 含量的次序为 NT > MT > CT > DT,10 ~ 20 cm 土层为 NT > MT > DT > CT。在不同措施下,试验阶段 0 ~ 20 cm 土层的 SOC 含量增加值顺序为 NT > MT > CT > DT,即免耕措施能明显促进 0 ~ 20 cm 土层 SOC 的积累量。进一步测定 0 ~

30 cm 土层 SOC 密度发现,免耕措施下 0 ~ 20 cm 土层 SOC 密度显著高于其他处理,并且能显著增加 0 ~ 30 cm 整个土壤剖面的 SOC 密度,但是免耕措施对 20 ~ 30 cm 土层 SOC 没有明显的促进作用。这主要是由于在土壤 35 cm 以下, SOC 含量主要受到成土过程的影响,而耕作对 SOC 含量的分布影响逐渐减小,因此,耕作方式间的差异就逐渐变小^[26]。同时,本研究还发现,0 ~ 20 cm 土层 SOC 含量与 >0.25 mm 水稳性团聚体含量呈显著正相关,皮尔逊相关系数为 0.416 ($P < 0.05$, $n = 24$),即大团聚体数量与 SOC 含量呈正相关,这与大多数研究结果相一致。一方面,这是因为在土壤受扰动小的情况下,大团聚体得以形成,而大团聚的形成能够对 SOC 起到一定的保护作用,使 SOC 的分解和矿化速率下降,进而使大团聚体中 SOC 含量更高^[22];另一方面,则主要是由于有机质把微团聚体胶结成大团聚体,以及在大团聚体中处于分解状态的根系和菌丝极大地增加了 SOC 的浓度^[27]。

对于团聚体不同粒径 SOC 含量高低的研究,目前并未取得较为一致的结论。Jastrow^[28]研究表明,2 ~ 3 mm 团聚体 SOC 含量是 <0.05 mm 团聚体 SOC 含量的 2 倍,且活性较高;Buyanovsky 等^[29]、Puget 等^[30]研究认为,大团聚体比小团聚体含有更多的碳、氮、颗粒有机质和不稳定有机质;文倩等^[31]研究也表明, SOC 和微生物生物量碳在大团聚体(>2 mm)中的含量相对都高于小团聚体;但也有研究者认为有机碳和全氮主要分布于小粒径微团聚体中^[32],或者有机碳在团聚体中呈 V 型分布,即 <0.002 mm 和 >2 mm 的团聚体中有机碳含量都较高^[33]。本研究表明,在 >5 mm 至 0.5 ~ 1 mm 粒径之间,随着团聚体粒径的减小, SOC 含量均表现为逐渐增大的趋势,而在 0.25 ~ 0.5 mm 粒径之间, SOC 含量不随粒径的减小而增加,即 SOC 含量在 0.5 ~ 1 mm 粒级团聚体中最高,这与安韶山等^[34]、赵世伟等^[35]研究结果相似。这可能是由于土壤有机质很少以游离形态存在于土壤中,而是被细小的矿物质颗粒吸附,与之结合在一起形成有机-无机复合体。因此,当团聚体粒径越小时,其比表面积越大,吸附的有机物质越多,所以小粒径的团聚体中的 SOC 含量也就越高^[36]。但是,在本试验所有处理中, <0.5 mm 粒级的团聚体 SOC 含量不随粒级的减小而增大。此前曾有研究报道,在 <0.25 mm 的土壤团聚体中 SOC 的分布比较特殊,它不随团聚体粒级的减小而增大^[34],但产生这一现象的原因目前尚未明确。

3.2 耕作方式对水稳性团聚体分布及其稳定性的影响

团聚体是土壤结构的基本单位,其数量和性质决定土壤的性质和肥力,关于土壤团聚体的形成机制,目前尚未有统一的结论。Tisdall 和 Oades^[37]认为 50~250 μm 的微团聚体首先胶结形成,后胶结成大团聚体(>250 μm); Elliott 和 Coleman^[38]则认为大团聚体首先形成,小团聚体再形成于大团聚体内部的有机质颗粒周围,或由于有机质分解,大团聚体破碎成小团聚体。土壤水稳性团聚体稳定性是表征土壤物理性状的重要指标^[39],土壤有机质能够减少团聚体的分散率,有利于水稳性团聚体的形成,随着有机质含量的增加,土壤团聚体的稳定性显著增加^[40]。不同的耕作措施对团聚体的形成和稳定性都有显著的影响。一般来说,传统的耕作方式能破坏土壤的团聚体结构^[41],使团聚体稳定性降低,大团聚体减少,微团聚体的比例增加^[42],免耕则能够使土壤团聚体的数量和稳定性增加^[43]。本研究发现,采取少免耕措施后,0~10 cm 土层土壤水稳性团聚体含量有明显改善效果,相比传统翻耕分别增加了 30.2%、9.3%,即少耕措施较传统翻耕能明显增加 0~10 cm 土层大团聚体含量,这是由于经常翻动搅动了土壤结构,使团聚体被挤压破碎^[22]。

MWD 和 GMD 是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标^[28],>2 mm 水稳性团聚体比例对 MWD 有十分重要的影响,MWD 值随>2 mm 水稳性团聚体比例增加而显著增加,而在免耕条件下明显高于翻耕^[44]。本研究发现,在滨海盐渍区农田土壤中采取少免耕措施后,MWD 和 GMD 显著高于传统翻耕,增幅分别为 9% 和 17%。相关性分析还表明,0~10 cm 土层 MWD 值和>2 mm 水稳性团聚体含量呈极显著正相关,皮尔逊相关系数为 0.997($P<0.01$, $n=12$),这与上述研究结果相似。

4 结论

1) 研究区表层 SOC 含量随耕作措施的不同呈现不同规律。免耕措施利于促进 0~20 cm 土层 SOC 的积累,能使 SOC 含量增加 18%~32%,并且能明显增加 0~30 cm 土层 SOC 的密度,增加幅度为 6%~14%。

2) 与传统翻耕相比,少免耕措施使 0~10 cm 土层>0.25 mm 团聚体含量增加,增幅分别达为 31% 和 10%,并且能显著增加 0~20 cm 土层土壤团聚体 MWD 和 GMD 值。

3) 不同耕作措施下,团聚体 SOC 含量均表现为,除 0.25~0.5 mm 粒径之外,在>5 mm 至 0.5~1 mm 粒径之间,团聚体粒径愈小,SOC 含量愈高。

参考文献:

- [1] Reeves DW. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems[J]. Soil and Tillage Research, 1997, 43: 131-167
- [2] 窦森,李凯,关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 412-418
- [3] 刘恩科,赵秉强,梅旭荣, Bing-So HWAT, 李秀英,李娟. 不同施肥处理对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 1 035-1 041
- [4] Barthes B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion validation at several levels[J]. Catena, 2002, 47: 133-149
- [5] Six J, Elliott ET, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099-2103
- [6] 徐胜祥,史学正,赵永存,于东升,王世航,辛景树,任意. 不同耕作措施下江苏省稻田土壤固碳潜力的模拟研究[J]. 土壤, 2012, 44(2): 253-259
- [7] Al-Kaisi MM, Yin XH. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn-soybean rotations[J]. Journal of Environmental Quality, 2005, 34: 437-445
- [8] Ben Moussa-Machraoui S, Errouissi F, Ben-Hammouda M, Noura S. Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soil properties under Mediterranean semi-arid conditions in northwestern Tunisia[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 106(2): 247-253
- [9] 梁爱珍,杨学明,张晓平,申艳,时秀焕,范如芹,方华军. 免耕对东北黑土水稳性团聚体中有机碳分配的短期效应[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2801-2808
- [10] Fernandez R, Quiroga A, Zorati C, Noellemeyer E. Carbon contents and respiration rates of aggregate size fractions under no-till and conventional tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 109(2): 103-109
- [11] Green VS, Stott DE, Cruz J C, Curi N. Tillage impacts on soil biological activity and aggregation in a Brazilian Cerrado Oxisol[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 92(1/2): 114-121
- [12] Obalum SE, Obi ME. Physical properties of a sandy loam Ultisol as affected by tillage-mulch management practices and cropping systems[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 108(1/2): 30-36
- [13] Abid M, Lal R. Tillage and drainage impact on soil quality: Aggregate stability, carbon and nitrogen pools[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 100(1/2): 89-98
- [14] 周虎,吕贻忠,杨志臣,李保国. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1 973-1 979

- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 30-34
- [16] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 闻大中. 潮棕壤不同利用方式有机碳剖面分布及碳储量[J]. 中国农业科学, 2005, 38(3): 544-550
- [17] Haynes RJ. Effect of sample pretreatment on aggregate stability measured by wetting sieving or turbidity on soils of different cropping history[J]. *European Journal of Soil Science*, 1993, 44(2): 261-270
- [18] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 333-335
- [19] 张建兵, 杨劲松, 姚荣江, 余世鹏, 曲长凤, 李芙蓉. 苏北典型新围垦海涂农田盐碱障碍因子特征分析[J]. 土壤, 2013, 45(3): 548-553
- [20] Ellert BH, Bettany JR. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, 75: 529-538
- [21] 李忠, 孙波, 林心雄. 我国东部土壤有机碳的密度及转化的控制因素[J]. 地理科学, 2001, 21(4): 301-307
- [22] 张四海, 曹志平, 张国, 胡婵娟. 保护性耕作对农田土壤有机碳的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 199-205
- [23] 赵如浪, 冯佰利, 蒋树怀, 张小东, 屈洋, 蔡晓青, 朱瑞祥. 黄土高原旱地保护性耕作农田土壤团聚体特性变化研究[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(4): 74-79
- [24] 陈建国, 田大伦, 闫文德, 项文化, 方晰. 土壤团聚体固碳研究进展[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(5): 74-80
- [25] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, Drury CF. 耕作方式对耕层黑土有机碳储量的短期影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(6): 1 287-1 293
- [26] 张军科, 江长胜, 郝庆菊, 吴艳, 谢得休. 耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(14): 4 379-4 387
- [27] 张曼夏, 季猛, 李伟, 刘华存, 王彦杰, 张林, 潘开文. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其结合有机碳的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19(4): 598-604
- [28] Jastrow JD. Soil aggregate formation and accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 8(4/5): 665-676
- [29] Buyanovsky GA, Aslam M, Wanger GH. Carbon turnover in soil physical fraction[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 8: 1 167-1 173
- [30] Puget P, Angers DA, Chenu C. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(1): 55-63
- [31] 文倩, 赵小蓉, 陈焕伟, 妥德宝, 林启美. 半干旱地区不同土壤团聚体中微生物量碳的分布特征[J]. 中国农业科学, 2004, 37(10): 1504-1509
- [32] Christensen BT. Straw incorporation and soil organic matter in macro-aggregations and particle size separates[J]. *Journal of Soil Science*, 1986, 37: 125-135
- [33] 李恋卿, 张旭辉, 潘根兴. 退化土壤植被恢复中表层土壤微团聚体及其有机碳的储备变化[J]. 土壤通报, 2000, 31(5): 193-195
- [34] 安韶山, 张玄, 张扬, 郑粉莉. 黄土丘陵区植被恢复中不同粒级土壤团聚体有机碳分布特征[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 109-113
- [35] 赵世伟, 苏静, 吴金水, 杨永辉, 刘娜娜. 子午岭植被恢复过程中土壤团聚体有机碳含量的变化[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 114-117
- [36] 黄丹丹, 刘淑霞, 张晓平, 许继平, 吴立君, 姜玉杰. 保护性耕作下土壤团聚体组成及其有机碳分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(8): 1 560-1 565
- [37] Tisdall JM, Oades JM. Organic matter and water-stable aggregate in soil[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141-163
- [38] Elliott ET, Coleman DC. Let the soil work for us[J]. *Ecology Bulletin*, 1988, 39: 23-32
- [39] 杨长明, 欧阳竹, 董玉红. 不同施肥模式对潮土有机碳组分及团聚体稳定性的影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(8): 887-892
- [40] 李爱宗. 耕作方式对土壤有机碳库和团聚体稳定性的影响[D]. 甘肃农业大学, 2007
- [41] 刘广深, 许中坚, 徐冬梅. 酸沉降对土壤团聚体及土壤可蚀性的影响[J]. 水土保持通报, 2001, 21(4): 70-74
- [42] Elliott ET. Aggregate structure and carbon nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50: 627-633
- [43] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 89-96
- [44] Jiao Y, Whalen JK, Hendershot WH. No-tillage and manure applications increase aggregation and improve nutrient retention in a sandy-loam soil[J]. *Geoderma*, 2006, 134(1/2): 24-33

Effects of Tillage on Soil Organic Carbon and Stability of Soil Aggregates in Costal Saline Soil Region

HOU Xiao-jing¹, YANG Jin-song^{1,2*}, ZHAO Man¹, JIN Wen-hui¹, LI Fu-rong¹,
YAO Rong-jiang^{1,2}, YU Shi-peng^{1,2}, WANG Xiang-ping¹

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*; 2 *Dongtai Institute of Tidal Flat Research, Nanjing Branch of the Chinese Academy of Sciences, Dongtai, Jiangsu 224200, China*)

Abstract: To disclose the effects of different tillage systems on the contents of soil organic carbon and aggregate properties, a field experiment was conducted in the costal saline soil region, Dongtai City of Jiangsu Province. Four tillage systems were adopted: conventional tillage (CT), deep tillage (DT), minimum tillage (MT) and no tillage (NT), soil organic carbon, bulk density and water-stable aggregates were measured. The results showed that compared with CT, NT treatment had significant effects on SOC content, the range was 18% – 32%. Water-state macro-aggregate contents of MT and NT were higher than other treatments by 10% – 31%, the MWD and GMD values of soil aggregates at 0 – 20 cm layer of MT and NT were significantly improved. Distribution of the soil organic carbon in aggregates was found to be that in aggregates varying from 0.5–1 mm to > 5 mm in particle size, the smaller the aggregates, the higher the soil organic carbon content therein.

Key words: Tillage systems; Soil organic carbon; Aggregate properties; Mudflat soil; Saline soil