

# 轮作模式对滩涂土壤有机碳及团聚体的影响<sup>①</sup>

金雯晖, 杨劲松\*, 侯晓静, 姚荣江, 余世鹏, 王相平, 谢文萍

(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)

**摘要:** 通过 3 年的田间试验, 对比研究了在不施肥及施等量氮肥处理下, 水旱轮作、旱旱轮作方式对苏北滩涂轻度盐渍化农田土壤脱盐、土壤有机碳、土壤团聚体的影响。结果表明: 相同盐分背景条件下, 水旱轮作、旱旱轮作两种利用方式下土壤盐分平均分别下降 30% 和 10%, pH 分别下降 3% 和 0, 水旱轮作更有利于滨海滩涂轻度盐渍化土壤的快速脱盐及降碱。两种轮作模式下土壤有机碳及大团聚体(>2.0 mm)含量均随耕作年限而增长, 且在不施肥和施肥的情况下, 水旱轮作 0~10 cm 土层的土壤有机碳增长分别高于旱旱轮作约 83% 和 75%; 而大团聚体含量相比旱旱轮作分别高出 11% 和 26%。水旱轮作模式对滨海滩涂盐渍化土壤的脱盐、增碳以及结构改良上均显著好于旱旱轮作模式。

**关键词:** 水旱轮作; 旱旱轮作; 苏北滩涂; 滨海盐渍土; 土壤有机碳; 团聚体

**中图分类号:** S156

在巨大的人口及资源压力下, 我国滨海地区围垦了大面积的滩涂作为农业及工业用地。自 1995 年至 2008 年, 仅江苏一省即围垦了 10 万  $\text{hm}^2$  的新滩涂。2009 年《江苏沿海地区发展规划》提出至 2020 年, 再新增 18 万  $\text{hm}^2$  滩涂, 其中 60% 用于农业。滨海滩涂土壤一般会经历水下堆积盐渍时期、地质积盐时期、自然成土时期以及耕种成土时期<sup>[1]</sup>。滩涂围垦初期因土体盐分含量高、有机质含量低、土壤结构性差、生产力低下、快速的土地扩张也面临着滩涂土壤地力提升的重要问题。

水旱轮作和旱旱轮作是滨海滩涂两种主要的种植模式, 在该两种模式下, 滨海盐土会分别演化为滨海耕种草甸土和滨海水稻土<sup>[1]</sup>。因而两种利用方式对滨海土壤的发展存在重大的差异。土壤有机碳和土壤团聚体作为衡量土壤质量的重要指标<sup>[2]</sup>, 对评价土壤发展具有重要意义。土壤有机碳作为主要的连接介质, 是土壤团聚体形成的重要基础<sup>[3]</sup>; 后者作为土壤的结构单元, 其稳定性对土壤肥力、土壤养分循环和土壤的可持续利用有很大的影响<sup>[4]</sup>。

本文研究两种轮作方式下滨海农业土壤中有机碳和团聚体的变化, 以反映耕作方式对滨海盐渍化农

田土壤质量的影响, 对了解滨海滩涂土壤演化、盐渍农田土壤有机碳积累具有现实意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于江苏省东台市黄海原种场 (32°38'42.01"N, 120°54'8.04"E), 东距黄海 3 km, 试验地为 2004 年围垦滩涂。该地地处北亚热带季风气候区, 海洋性季风气候特征明显, 气候温暖湿润。年平均气温 14.6°C, 常年平均降水量为 1 042 mm, 年平均蒸发量 1 417 mm, 平均相对湿度为 81%。土壤为潮盐土亚类, 是典型的淤泥质海岸带盐渍土, 以粉砂壤土为主<sup>[5]</sup>。在滩涂土壤的早期农业利用中, 以旱作种植耐盐作物玉米-小麦为主。由于淡水资源短缺, 水稻-小麦的水旱轮作种植方式目前只有有限的国有农场在有限区域内进行。

### 1.2 试验设计与管理

本研究选取黄海原种场围垦于 2004 年、并自 2005 年开始水旱轮作种植的一均匀田块, 在 2012 年 6 月小麦收获后, 将田块分为南北两块, 中间用宽 0.5 m 的高垄分隔。南边实施玉米-大麦的旱旱轮作种植, 北

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200303、2016YFC0501309), 中国科学院科技服务网络计划(STS 计划)项目(KFJ-SW-ST5-141-2)和江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(15)1005)资助。

\* 通讯作者(jsyang@issas.ac.cn)

作者简介: 金雯晖(1988—), 女, 安徽黄山人, 博士研究生, 主要从事盐碱土碳循环方面的研究。E-mail: whjin@issas.ac.cn

边实施水稻-小麦的水旱轮作种植。试验微区的面积为 1.5 m × 1.5 m, 水旱轮作微区的四周垄埂用薄膜包裹。试验主要设置对照(不施肥)及施化肥处理(表 1), 即水旱轮作对照 (RCK)、水旱轮作氮肥处理 (RN, N 300 kg/hm<sup>2</sup>)、旱旱轮作对照 (CCK) 及旱旱轮作氮肥处理 (CN, N 300 kg/hm<sup>2</sup>) 等 4 个处理, 每个处理 5

个重复, 随机分布。水旱轮作和旱旱轮作的每季作物肥料总用量相同 (除去追肥次数因作物而异, 追肥为尿素, 基肥为磷酸一铵)。耕作方式均为人工耙耕, 深度为 20 cm 左右。水旱轮作在稻季采用地下水漫灌, 旱旱轮作无灌溉处理。其余管理措施, 如除草、病虫害防治等均在需要时进行, 且同当地常规管理模式。

表 1 水旱轮作及旱旱轮作的具体处理  
Table 1 Setting of the fertilizer in both cropping systems

轮作方式	试验处理	具体处理	基肥	追肥
水稻-小麦	对照(RCK)	不施任何肥料	无	无
	化肥(RN)	施用化肥, 每季 N 300 kg/hm <sup>2</sup>	磷酸一铵	尿素
玉米-大麦	对照(CCK)	不施任何肥料	无	无
	化肥(CN)	施用化肥, 每季 N 300 kg/hm <sup>2</sup>	磷酸一铵	尿素

### 1.3 样品采集与分析

在作物收获后, 土壤翻耕前, 在每个微区内随机选点, 用土钻采集 0 ~ 100 cm 土壤样品 (0 ~ 10, 10 ~ 20, 20 ~ 30, 30 ~ 40, 40 ~ 60, 60 ~ 80, 80 ~ 100 cm), 0 ~ 40 cm 样品采取 3 点混合采样法。样品带回后在室内自然风干, 磨碎, 过 20 目筛后制备 1 : 5 水土比浸提液, 然后分别采用电导法和电极法测定土壤电导率 (EC<sub>1:5</sub>) 和 pH。由于土壤盐分在土体中的分布与蒸降比有显著关联, 0 ~ 20 cm 土层盐分变化尤其易受降雨及蒸发影响<sup>[6]</sup>, 因而本文中以 0 ~ 100 cm 土体盐分状况判断土壤盐渍化情况。当前研究区内已有研究<sup>[7]</sup>表明, 1 m 土体内全盐含量与土壤电导率之间存在着极显著的线性关系:  $TS = 2.47 EC_{1:5} + 0.26$  ( $n = 110$ ,  $R^2 = 0.96$ ,  $P < 0.0001$ ), 式中, TS 为土壤全盐量 (g/kg), EC<sub>1:5</sub> 为土壤电导率 (dS/m)。因而本研究中以土壤电导率 (EC<sub>1:5</sub>) 反映土壤含盐量。另将过 20 目筛的样品再磨碎过 100 目筛, 采用重铬酸钾氧化法测定土壤有机碳含量。土壤体积质量及田间持水量采用环刀法采集和测定。

采集 0 ~ 10 cm 土层的原状土壤样品, 置于塑料盒内, 轻拿轻放, 勿挤压, 用于测定土壤团聚体。样品风干至半干后, 小心沿土壤裂隙掰成 0.5 ~ 1.0 cm 见方的小团块, 再至完全风干后, 采用湿筛法<sup>[4]</sup>将样品分离出 >2.0 mm 粗大团聚体、0.25 ~ 2.0 mm 的细大团聚体、0.053 ~ 0.25 mm 的微团聚体及 <0.053 mm 的粉-黏团聚体。分离出的各部分在 50℃ 烘干后称重计量在全部样品中的含量, 计为团聚体含量 (g/kg)。

土壤团聚体平均重量直径 (The mean weight diameter, MWD) 是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标。平均重量直径越大, 表示团聚体的平均粒径团聚度越高, 稳定性及抗侵蚀性越强<sup>[8]</sup>, 其计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n F_i \cdot D_i$$

式中: MWD 为团粒平均重量直径 (mm);  $F_i$  为每一级内团聚体的含量,  $D_i$  为每一级范围内团聚体的平均直径 (mm), >2 mm 团聚体直径上限为 10 mm。

### 1.4 数据统计与分析

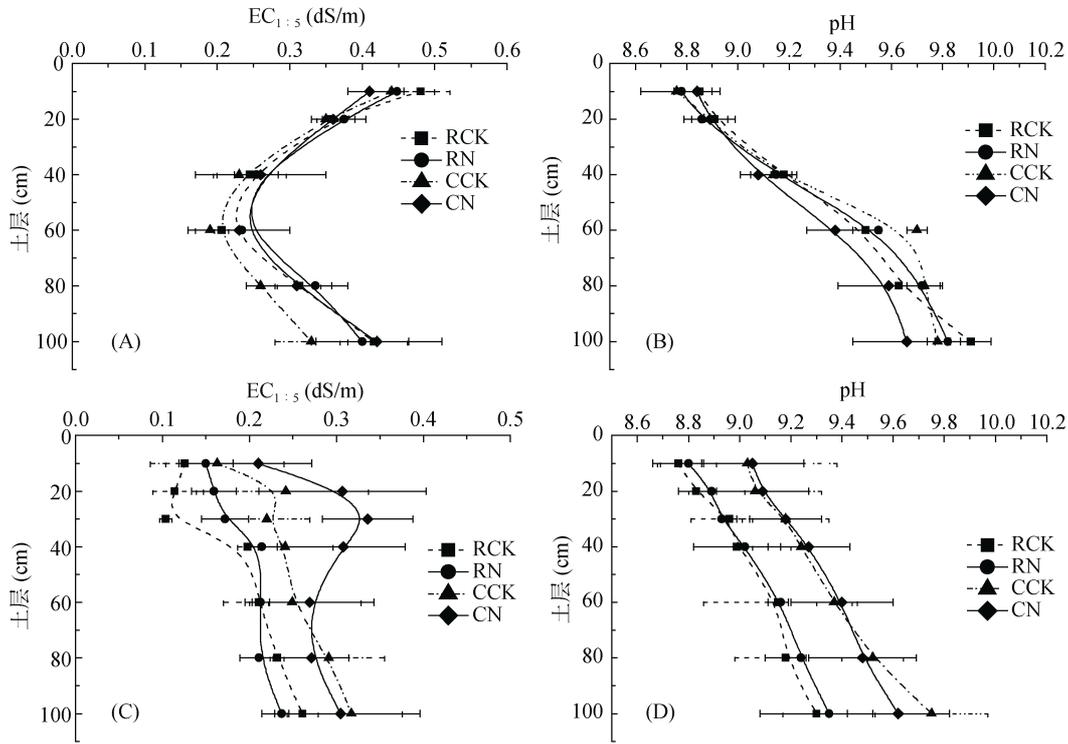
数据统计与分析软件采用 Excel 和 SPSS 16.0, 处理间的差异分析采用方差分析法, 并用 LSD 法检验其显著性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 轮作方式对土壤盐碱变化的影响

由于土壤盐离子易随土壤水分变化, 因而表现出很强的季节特征<sup>[1]</sup>。图 1A、1B 显示了研究区土壤在 2012 年 6 月种植前的土壤电导率和 pH 的本底状况。总体来说, 所选研究区的土壤本底盐碱状况较为均匀, 变化规律相对统一。经过 7 年 (2005—2012 年) 的水旱轮作后, 1 m 土体土壤含盐量 (均值) 为 0.7 ~ 1.6 g/kg, 处于轻度盐渍化土及脱盐土之间。由于苏北滨海盐土为氯化物型盐土, 且研究区地下水中 Na<sup>+</sup> 及 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量较高, 随着土壤反复的积盐、脱盐过程, Na<sup>+</sup> 及 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 在土体中频繁移动, 因而增加了土壤胶体的吸附量, 使土壤碱化<sup>[1]</sup>, 且易呈现 pH 从表层到深层逐渐增大的趋势。本研究中土壤 pH 为 8.58 ~ 10.4, 属于典型的碱化土壤。

图 1C、1D 分别为 2015 年 6 月作物收获后各处理的土壤电导率和 pH。对 2015 年 6 月土壤的盐碱化分析表明, 两种轮作方式下, 土壤盐分相对本底值均有降低。0 ~ 40 cm 土体土壤盐分为 CN > CCK > RN > RCK, 且两两之间差异显著 (除 0 ~ 10 cm), 40 cm 以下土层旱作处理 (CCK、CN) 土壤盐分显著高于水旱轮作



(A、B：2012年；C、D：2015年)

图 1 两种轮作方式下土壤电导率及 pH

Fig. 1 Soil electric conductivity and pH of two cropping-systems

处理(RCK、RN)。水旱轮作方式下 (RCK、RN)，盐分降低幅度更大。比较 RCK 和 CCK 0~100 cm 土体的电导率(均值), RCK 由 0.336 dS/m 下降到 0.178 dS/m, 平均下降了 30%, 差异显著, 而 CCK 仅由 0.299 dS/m 降到 0.246 dS/m, 平均下降 10%, 差异不明显。20~30 cm 土层盐分在两种轮作方式中, 氮肥处理(RN、CN)均显著高于对照处理, 且在 CN 方式下, 盐分明显在该层积聚。原因可能是在氮肥处理下, 作物生长较对照处理旺盛, 由于植物的蒸腾作用, 根系吸水能力较强, 使得盐分积聚。

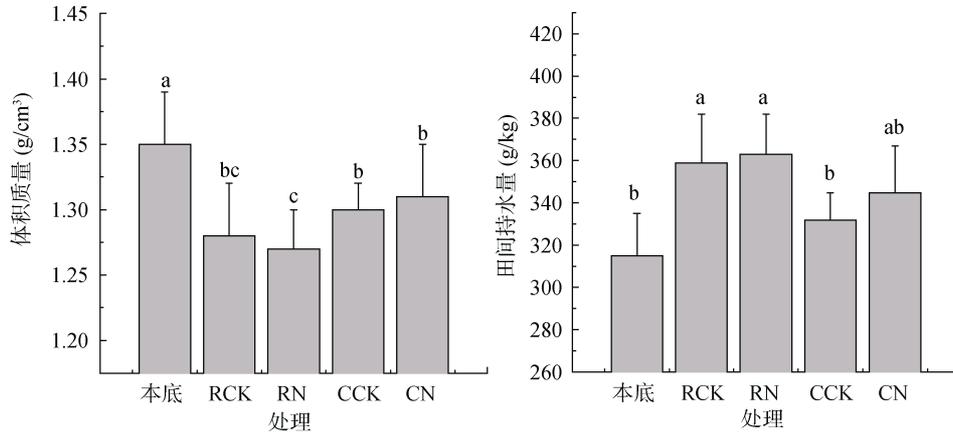
相比 2012 年, 2015 年 RCK、RN 的土体 pH 下降较为明显, 0~100 cm 土体 pH 均值变化范围由 8.85~9.91 降至 8.76~9.21。而 CCK 及 CN 处理下, 0~20 cm 土层 pH 由 8.76~8.89 增加到 9.03~9.18(图 1B、1D)。水旱方式下土壤碱化程度得到缓解, 可能的原因是长期淹水状况阻止了地下水在土壤毛管中的频繁移动从而减少了胶体吸附的  $\text{Na}^+$  及  $\text{HCO}_3^-$  含量, 而旱作模式下, 土壤仍朝碱化加重的趋势发展。

图 2 分析了 2014 年 10 月土壤体积质量和田间持水量相对 2012 年本底值的变化情况。两种轮作方式下土壤体积质量相对 2012 年本底体积质量( $1.35 \text{ g/cm}^3$ )均有显著降低(图 2), 体积质量大小遵循  $\text{RN} < \text{RCK} < \text{CCK} < \text{CN}$ , 但 RCK、CCK 与 CN 三者无显著差异, RN 处理下体积质量显著低于 CCK 与 CN。同时,

RCK、RN 处理下田间持水量相对 2012 年本底值显著增加, 增幅分别为  $44 \text{ g/kg}$  和  $48 \text{ g/kg}$ ; CCK、RN 处理下增幅分别为  $17 \text{ g/kg}$  和  $30 \text{ g/kg}$ , 但差异并不显著。土壤体积质量的降低和田间持水量的增加反映了土壤物理结构性的改善, 可以增加土壤的入渗率, 加速土壤的脱盐进程<sup>[9]</sup>。综上所述可知, 水旱轮作相对旱旱轮作对改善土壤板结, 同时在灌溉处理下促进土壤洗盐、缓解土壤碱化具有更积极的作用。

### 2.2 轮作方式对土壤有机碳的影响

试验前土壤有机碳本底值分析表明, 所选研究区土壤有机碳变异度较低, 且变化趋势相近(图 3)。0~10 cm 土壤有机碳均值为  $2.55 \sim 2.62 \text{ g/kg}$ (有机质含量  $4.34 \sim 4.52 \text{ g/kg}$ ), 0~40 cm 土壤有机碳逐渐降低, 40~100 cm 深度土壤有机碳均在  $1.0 \text{ g/kg}$  左右。根据二次土壤普查有机质含量分级标准, 该区土壤处于六级标准 ( $< 6.0 \text{ g/kg}$ ), 也反映了土壤整体质量偏低。经过 3 年的试验处理后, 土壤 0~100 cm 有机碳的增加量如图 4 所示。总体而言, 土壤有机碳的增加量随土层加深而减少。0~10 cm 土壤有机碳增加量为  $\text{RN} > \text{CN} > \text{RCK} > \text{CCK}$ , 相互之间差异显著。其中, RN 的有机碳增量为  $1.24 \text{ g/kg}$ , 高出 CN 的有机碳增量( $0.71 \text{ g/kg}$ )约 75%; RCK 和 CCK 的有机碳增量分别为  $0.42 \text{ g/kg}$  和  $0.23 \text{ g/kg}$ , 前者比后者高出 83%。10~20 cm 土壤有机碳增量为  $\text{CN}、\text{RN} > \text{RCK} >$



(图中“本底”标记的是2012年6月种植前的均值；图中小写字母不同表示处理间差异达到  $P < 0.05$  显著水平)

图2 两种轮作方式下0~10 cm 土层土壤体积质量、持水量变化(2014年10月)

Fig. 2 Variations of bulk density and field water capacity in 0~10 cm soil depth of two cropping systems

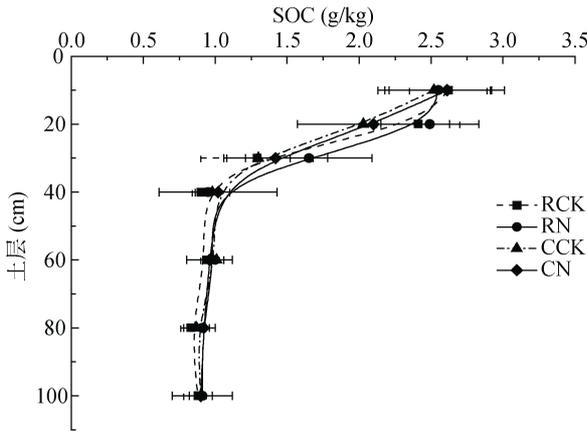
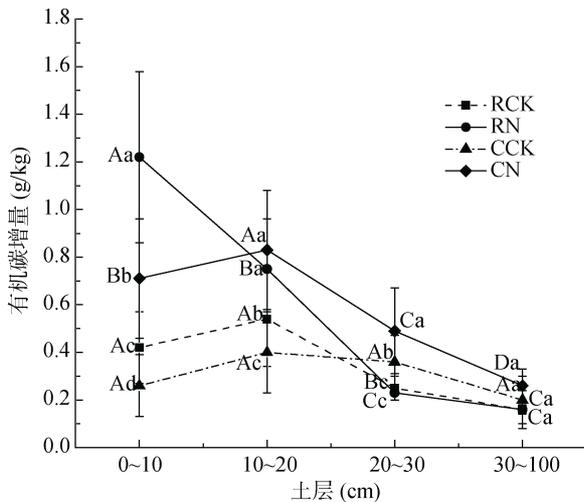


图3 2012年6月试验前土壤有机碳本底状况

Fig. 3 Background values of SOC before treatment in June, 2012



(图中小写字母不同表示同一土层不同处理间差异达到  $P < 0.05$  显著水平，大写字母不同表示同一处理不同土层间差异达到  $P < 0.05$  显著水平)

图4 两种轮作方式下0~100 cm 土层土壤有机碳增量(2015年6月)

Fig. 4 Increments of SOC in 0~100 cm soil depth of two cropping systems

CCK, CN 与 RN 间差异不显著; 20~30 cm 为 CN > CCK > RN、RCK, 30~100 cm 土壤有机碳增量在 4 个处理间均无显著差异, 但相对而言, CN、CCK > RN、RCK。旱旱轮作下深层土壤有机碳增量高于水旱轮作的一个主要原因可能是旱作种植的玉米根系深度 (> 80 cm)<sup>[10]</sup> 大于水稻根系深度 (约 30 cm 左右), 从而为旱作深层土壤提供了有机碳来源。尽管如此, 20~100 cm 土壤有机碳的增加幅度显著低于 0~20 cm 土层, 主要由于该层中更密集的作物根系作为外源碳的输入。

土壤有机碳存贮量取决于外源有机质的输入与土壤有机质分解两个过程的平衡<sup>[11]</sup>。前者主要受到气候条件、植被生产力以及土壤肥力的影响, 后者即土壤呼吸过程, 主要受到土壤温度和湿度的影响<sup>[12]</sup>。在本试验中, 由于气候及土壤肥力的一致性, 因有无灌溉而导致的土壤水热状况的不同而影响土壤呼吸过程的差异, 是导致水旱轮作土壤有机碳增量高于旱旱轮作土壤的主要原因。在玉米及水稻生长的 6—10 月间, 是全年中气温最高的时段。在土壤水分含量不成为限制因素的条件下土壤呼吸与土壤温度呈正相关<sup>[13]</sup>。在旱旱轮作的玉米生长季, 是全年中土壤呼吸最强烈的季节, 尤其在表层(0~10 cm)土壤中。与此同时, 水稻季在淹水情况下, 一方面抑制了温度对土壤呼吸的促进作用, 另一方面也限制了土壤中 O<sub>2</sub> 的浓度, 抑制了土壤微生物活动, 从而导致呼吸强度减弱<sup>[14]</sup>。因而在该阶段, 旱旱轮作地的表层土壤有机碳输出高于水旱轮作地。在同一轮作方式内的不同处理间导致的有机碳增长的差异应主要源于由肥力因素差异导致的有机碳输入的差异。氮肥处理(RN、CN)相对对照处理(RCK、CCK)的有机碳增长主要归因于充足的养分为植物根系的生长提供更有利的条

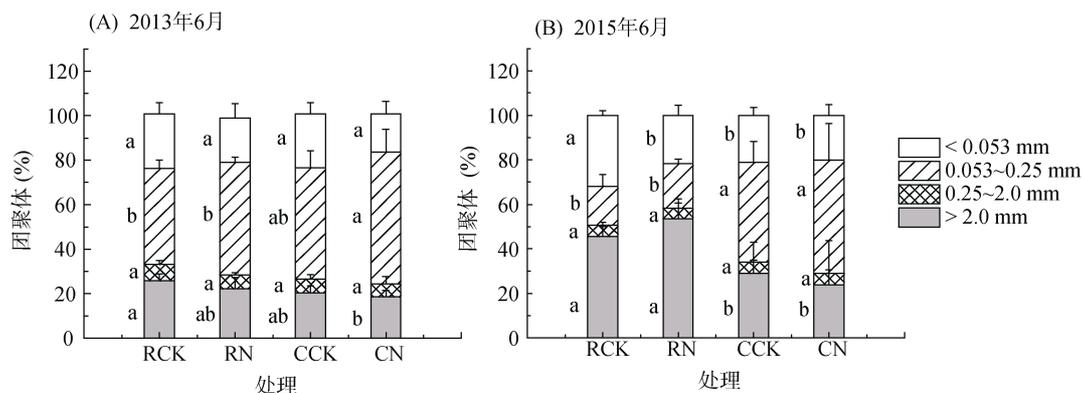
件从而增加了碳的输入。

值得注意的是,虽然在处理间有机碳的增量存在差异,但是4种处理下,有机碳相对本底值均有显著增加,说明在滩涂土壤中,耕作会促进土壤有机碳的增长,改善土壤质量。而相当多的研究表明,农业土壤自开垦以来通常是大气CO<sub>2</sub>的“源”,耕作会加速土壤有机质的分解,导致有机碳降低,同时增加土壤CO<sub>2</sub>的排放<sup>[15]</sup>。本研究得出的不同结果,原因主要是因为不同研究中所选土壤的类型及碳本底值不同。在土壤有机碳达到一定值时,传统耕作因秸秆不还田而带走了部分碳源,又因翻耕而促进了土壤碳的矿化,从而使有机碳含量降低<sup>[16-17]</sup>。而滨海滩涂土壤有机碳本底值很低,土壤板结不利于排水降盐及根系生长。耕作使得土壤疏松、孔隙增大,从而促进了盐分的淋洗,同时还有利于作物根系的生长以及增加养分利用效率<sup>[10]</sup>,增加了碳的输入。

### 2.3 轮作方式对土壤团聚体的影响

研究分析了2013年6月和2015年6月的试验区土壤团聚体的分布情况,结果如图5所示。从图5A可见,2013年6月两种轮作方式下,均以微团聚体含量(0.053~0.25 mm)最多,占团聚体总量的40%以上;而以0.25~2.0 mm的细大团聚体含量最低,4种处理下均小于100 g/kg;粗大团聚体(>2.0 mm)含量均在200 g/kg左右。而在2015年6月的分析结果中,RCK和RN处理下,土壤>2.0 mm的粗大团聚体含量较2013年分别增加了197 g/kg和312 g/kg,CCK和CN分别增加了86 g/kg和52 g/kg。在水旱轮

作方式下,随着>2.0 mm的粗大团聚体含量的大幅增加,土壤0.053~0.25 mm的微团聚体含量明显降低,降幅分别为257 g/kg、305 g/kg,而CCK和CN处理下仅降低了53 g/kg和81 g/kg。土壤大团聚体(>0.25 mm)是由土壤微团聚体(<0.25 mm)通过有机质胶结而成,其形成会降低有机质的暴露从而阻碍微生物的分解,从而达到碳保护的能力<sup>[3]</sup>。而大团聚体(>0.25 mm)是不稳定的,极易因翻耕等人为干扰而分散。袁俊吉等<sup>[18]</sup>研究表明水旱轮作下传统的耕作使稻田土壤受长期渍水及经常在软烂的条件下耕耙的影响,土壤大团聚体物理性破碎,团聚程度会降低;而更多研究都表明旱旱轮作方式下团聚体稳定性降低,大团聚体的比例减少,微团聚体的比例增加<sup>[19]</sup>。本研究中的结果与上述结论相反,两种轮作方式下>0.25 mm的大团聚体含量都随着耕作年限的增加而增多,同时,土壤的平均重量直径(MWD)均随耕作年限而显著增加(图6),表明土壤的抗侵蚀能力增强,说明滨海滩涂土壤不同于成熟耕作土壤,在其成土早期土壤结构性较差,耕作对滩涂土壤结构改善、团聚体的形成具有促进作用。而相比旱旱轮作,水旱轮作的水耕熟化过程中,有机质在淹水条件下进行嫌气分解,分解过程较慢,腐殖质形成和转化较明显<sup>[20]</sup>,土壤有机质及大团聚体的含量也相应增加。另一方面,土壤中高的盐离子浓度易因离子分散作用而导致土壤团聚体的难以聚合<sup>[21]</sup>,而水旱轮作模式下,土壤盐分相对旱旱轮作较低,因盐离子产生的负影响力也相应较小,更有利于土壤团聚作用发生。



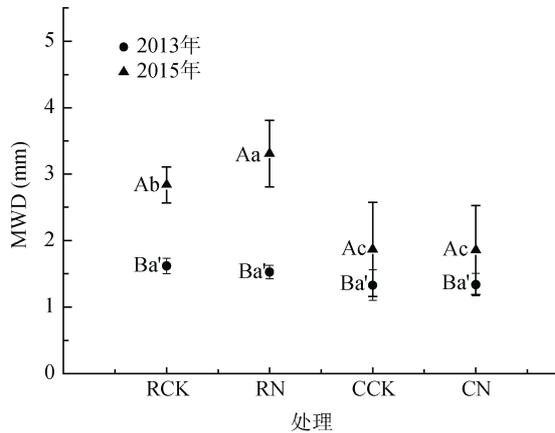
(图中小写字母不同表示同一级团聚体在不同处理间差异达到  $P < 0.05$  显著水平)

图5 两种轮作方式下0~10 cm土层土壤团聚体

Fig. 5 Aggregates fractions in 0-10 cm soil depth of two cropping systems

根据土壤碳饱和赤字(土壤有机碳理论饱和值和土壤现有有机碳含量之差)理论<sup>[22]</sup>,滨海盐渍土围垦初期有机碳含量极低,在水耕熟化和旱耕熟化作用下能够脱盐熟化发展成滨海水稻土和滨海耕种草甸土,其碳饱和赤字是很大的,因而具有巨大的固碳潜

力。在全球变暖的大背景下,滨海滩涂土壤作为一种面积不断增长的土壤,提升其碳汇功能,增加土壤有机碳储量,对减缓温室效应具有重大意义。而水旱轮作模式相对旱旱轮作模式,对加速滨海土壤的固碳速率具有相当大的优势。



(图中小写字母不同表示同一年份不同处理间差异达到  $P < 0.05$  显著水平;大写字母不同表示同一处理不同年份间差异达到  $P < 0.05$  显著水平)

图 6 两种轮作方式下 0~10 cm 土层土壤平均重量直径 (MWD)

Fig. 6 Mean weight diameters (MWD) of soil aggregates in 0-10 cm soil depth of two cropping systems

### 3 结论

三年的同步试验研究表明,水旱轮作相比旱旱轮作更有利于滨海滩涂轻度盐渍化土壤的快速脱盐及降碱。两种轮作模式下土壤有机碳和大团聚体( $> 2.0$  mm)含量均有显著增高,在施等量氮肥的情况下,水旱轮作 0~10 cm 土层的有机碳增长高于旱旱轮作约 75%,而在不施肥的情况下,水旱轮作高出约 83%。旱旱轮作方式对 30~100 cm 土层的有机碳增加要高于水稻-小麦的轮作方式,但增加的幅度远低于 0~10 cm 土层。此外,两种轮作方式下 0~10 cm 土层  $> 2.0$  mm 大团聚含量及土壤平均重量直径均随着耕作年限增加而增长,且在不施肥和施肥的情况下水旱轮作大团聚体含量相比旱旱轮作分别高出 11% 和 26%。水旱轮作方式对滨海滩涂盐渍土壤的脱盐、增碳以及结构改良上具有显著效应;然而在水资源紧缺、水旱轮作难以大面积推广的情况下,旱旱轮作对于改良滨海滩涂盐渍化土壤结构和增加土壤有机碳积累也有积极作用。

#### 参考文献:

[1] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 130-161

[2] Dungait J A J, Hopkins D W, Gregory A, et al. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(6): 1 781-1 796

[3] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1 367-1 377

[4] Kong A Y Y, Six J, Bryant D C, et al. The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(4): 1 078-1 085

[5] 张建兵, 杨劲松, 李芙蓉, 等. 有机肥与覆盖对苏北滩涂重度盐渍土壤水盐调控效应分析[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1): 184-188

[6] 李芙蓉, 杨劲松, 吴亚坤, 等. 不同秸秆埋深对苏北滩涂盐渍土壤水盐动态变化的影响[J]. *土壤*, 2013, 45(6): 1 101-1 107

[7] 张建兵, 杨劲松, 姚荣江, 等. 田块尺度下的苏北滩涂新垦农田土壤盐分空间变异性分析[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(1): 39-42

[8] Hbirkou C, Martius C, Khamzina A, et al. Reducing topsoil salinity and raising carbon stocks through afforestation in Khorezm[J]. *Uzbekistan. Journal of Arid Environments*, 2011, 75(2): 146-155

[9] 郑存德, 依艳丽, 张大庚, 等. 土壤容重对高产玉米根系生长的影响及调控研究[J]. *华北农业学报*, 2012, 27(3): 142-149

[10] 张玉, 秦华东, 伍龙梅, 等. 玉米根系生长特性及氮肥运筹对根系生长的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2014, 19(6): 62-70

[11] Post W M. Organic carbon in soil and the global carbon cycle // Heimann M. The global carbon cycle, NATO ASI Series, Vol I (15)[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1993: 277-302

[12] Liu S, Yan C R, He W Q, et al. Soil respiration and its affected factors under different tillage systems in dryland production systems[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2010, 30(11): 2 919-2 914

[13] 代快, 蔡典熊, 王燕, 等. 不同耕作措施对旱作春玉米农田土壤呼吸影响的研究——土壤温度对土壤呼吸速率的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2010(6): 64-69

[14] 周萍, 刘国彬, 薛蕙. 草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展[J]. *草业学报*, 2009, 18(8): 184-193

[15] Bayer C, Mielniczuk J, Amado T J C, et al. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2000, 54(1-2): 101-109

[16] 马玉芳, 蔡立群, 张仁陟. 不同耕作措施下土壤有机碳含量的模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(9): 1 546-1 554

[17] 张明园, 魏燕华, 孔凡磊, 等. 耕作方式对华北农田土壤有机碳储量及温室气体排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 203-209

[18] 袁俊吉, 彭思利, 蒋先军, 等. 稻田垄作免耕对土壤团聚体和有机质的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 153-160

[19] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 旱地施有机肥对土壤有机质和水稳性团聚体的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 159-165

[20] 李天杰. 土壤地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004:

247–250

[21] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. *Geoderma*, 2005, 124: 3–22

[22] Stewart C E, Paustian K, Six J, et al. Soil C saturation: Concept, evidence and evaluation[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 86(1): 19–31

## Effects of Rotation Systems on Soil Organic Carbon and Aggregates in Light Salinized Farmland in North Jiangsu Province

JIN Wenhui, YANG Jinsong\*, HOU Xiaojing, YAO Rongjiang, YU Shipeng,  
WANG Xiangping, XIE Wenping

(*State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*)

**Abstract:** Three years of field experiment was conducted to study the effects of rice-wheat rotation and maize-wheat rotation on soil desalination, soil organic carbon (SOC) and aggregates of light salinized farmland in the coastal flat of north Jiangsu Province. The results showed that rice-wheat rotation mode was more beneficial for the soil desalination in 1 m soil depth. Under the treatment of no-fertilizer application and equivalent nitrogen application, SOC in 0–10 cm of rice-wheat rotation mode were increased by about 83% and 75% compared with those of maize-wheat rotation mode, respectively. The macro-aggregates (>2.0 mm) and the mean wheat diameter were both increased with the cultivated years in two rotation systems, especially in rice-wheat rotation land, the macro-aggregates under the treatment of no-fertilizer application and equivalent nitrogen application were about 11% and 26% higher than those of maize-wheat rotation mode, respectively. The study indicated that rice-wheat rotation mode played a more effective role than maize-wheat rotation mode in soil desalination, SOC accumulation and the improvement of soil instruction in the coastal saline soils.

**Key words:** Rice-wheat rotation; Maize-wheat rotation; Coastal flat of north Jiangsu Province; Coastal saline soil; Soil organic carbon; Aggregates