

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.01.005

马栗炎, 姚荣江, 杨劲松. 氮肥及黄腐酸对盐渍土有机碳和团聚体特征的调控作用. 土壤, 2020, 52(1): 33–39

氮肥及黄腐酸对盐渍土有机碳和团聚体特征的调控作用^①

马栗炎^{1,2}, 姚荣江¹, 杨劲松^{1*}

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏扬州 225000)

摘要: 为了探明不同氮肥水平下黄腐酸对盐碱障碍土壤的改良及培肥效应, 本研究以滨海滩涂新垦轻中度盐碱障碍土壤为研究对象开展田间试验, 采用水稻-小麦轮作种植模式, 通过测定土壤电导率、pH、有机碳和土壤团聚体含量及其稳定性, 研究黄腐酸与不同氮肥水平对土壤盐分消减调控和土壤地力提升效应。结果表明: 黄腐酸能有效降低耕层土壤盐分, 在氮水平 300 kg/hm² 条件下黄腐酸处理对耕层 0~20 cm 土壤电导率与 pH 降低效果最好; 黄腐酸可以有效改善土壤结构及稳定性, 小麦季与水稻季, 在氮水平 300 kg/hm² 条件下黄腐酸处理土壤 >2 mm 水稳性大团聚体含量相较于不施肥对照分别增加 18.6% 和 13.8%, 土壤团聚体平均重量直径与当地常规施肥相比增加 38%; 围垦初期, 氮水平处理相较于黄腐酸处理对耕层土壤有机碳含量的影响更大, 氮水平 300 kg/hm² 处理相较于低氮(225 kg/hm²)与高氮(325 kg/hm²)处理, 两季土壤总有机碳积累量分别增加 31.0% 和 120.0%。综合考虑土壤改良效应, 黄腐酸处理土壤表层盐分降低、水稳性大团聚体含量增加且稳定性增强、有机碳含量提升, 因此黄腐酸结合适宜用量氮肥是一条轻中度盐碱障碍土壤的优化施肥措施。

关键词: 盐渍土; 黄腐酸; 水稳性团聚体; 有机碳

中图分类号: S156.4 **文献标志码:** A

Regulation of Nitrogen and Fulvic Acid on Soil Organic Carbon and Aggregates in Saline Soil

MA Liyan^{1,2}, YAO Rongjiang¹, YANG Jinsong^{1*}

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225000, China)

Abstract: In order to disclose the improvement effects of fulvic acid on soil with saline-alkaline disturbance and fertilizer effects under different nitrogenous fertilizer levels, a field experiment was conducted with the newly-reclaimed soil in the coastal tidal flat under rice-wheat cropping rotation. The effects of fulvic acid and different nitrogen levels on soil salinity control and soil fertility improvement were studied by measuring soil electric conductivity, pH value, organic carbon and the content and stability of soil aggregates. The results showed that fulvic acid could effectively reduce salt content in topsoil. When the nitrogen level was 300 kg/hm², the effect of fulvic acid were best on decreasing soil electric conductivity and pH value of topsoil (0–20 cm). Fulvic acid could effectively improve soil structure, compared with the nofertilizer control, water-stable macro-aggregates (>2mm) under the nitrogen level of 300 kg/hm² increased by 18.6% in wheat season and 13.8% in rice season, and the mean weight diameter of aggregates increased by 38% compared with the conventional fertilization treatment. In the initial stage of reclamation, the nitrogen level had a greater impact on organic carbon content of topsoil than fulvic acid. Compared with low nitrogen (225 kg/hm²) and high nitrogen (325 kg/hm²), the moderate nitrogen (300 kg/hm²) increased total organic carbon accumulation in two seasons increased by 31.0% and 120.0% respectively. By comprehensively considering the effects of soil improvement, decrease of soil salinity, increase of water-stable macro-aggregates content, its stability and organic carbon content, fulvic acid combined with the appropriate amount of nitrogen is recommended as the optimal fertilization for the slight and moderate saline-alkali soil.

Key words: Saline soil; Fulvic acid; Water-stable aggregates; Organic carbon

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200303)、国家自然科学基金委员会—山东联合基金重点支持项目(U1806215), 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-112-03-02)和中国科学院 STS 项目(KFJ-STZ-ZDTP-053, KFJ-STZ-ZDTP-049)资助。

* 通讯作者(jsyang@issas.ac.cn)

作者简介: 马栗炎(1992—), 男, 河南通许人, 硕士研究生, 主要从事盐碱地治理改良相关研究。E-mail: 906230807@qq.com

我国滨海地区有丰富的滩涂资源^[1], 土壤质量低下是制约苏北海涂土壤开发利用的重要障碍因子^[2]。为加速滨海盐碱地脱盐、增肥和提升地力, 多种改良措施如物理、化学、生物、工程及其综合调控手段已被广泛应用并验证^[2-3]。王守纯和穆从如^[4]及陈恩凤等^[5]先后提出在盐渍土区建立“淡化肥沃层”、“治水是基础, 培肥是根本”的观点, 通过提高土壤肥力, 以肥对土壤盐分进行时、空、形的调控, 在农作物主要根系活动层建立一个良好的肥、水、盐生态环境, 达到农作物持续高产稳产。但是传统的施肥措施导致肥料利用率低且土壤次生盐渍化危害等弊端也暴露出来。有研究发现, 苏北滩涂围垦土壤单施有机肥虽能增加土壤含水量、降低土壤 pH, 但其土壤电导率升高了 11.56%^[6]; 尿素的转化可积累大量的 NH_4^+ , 引起土壤 pH 增加 2~3 个单位^[7]。同时我国土壤氮素平衡问题陷入困境, 氮肥投入量大而利用率低下^[8-9]。研究认为有机无机配施有增产、提高当季肥料利用率的作用^[10]。黄腐酸作为一种新型改良剂, 其在农业生产上的作用主要表现在两个方面^[11-14]: 一方面减少作物叶片蒸腾速率; 一方面促进根系发育, 增强根系活力, 使作物吸收较多水分和养料, 在滩涂土壤改良中具有重要的应用价值。在盐碱地的施肥改良应用中, 以传统肥料的施肥水平处理、调理剂和调控措施^[15-16]的研究居多, 黄腐酸肥料对滩涂土壤盐碱消减和土壤团聚体及有机碳影响的研究尚不多见。

本文以滨海新垦滩涂轻度盐渍土为研究对象, 通过田间试验的方式重点研究了水稻-小麦轮作下, 黄

腐酸肥料应用对土壤盐分消减、有机碳和团聚体含量提升的作用, 分析了不同种植模式和不同肥料氮水平下土壤盐分和养分的变化规律, 探讨了有机肥料对轻度盐渍化农田土壤改良及地力提升效应, 研究结果对滨海盐渍土养分优化管理具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省东台市弶港镇条子泥垦区, 地处北亚热带和暖温带季风气候区^[17]。该区年平均降水量 1 000 mm, 年均蒸发量 1 417 mm, 且降水量季节波动性较大, 降水主要集中在 6—9 月份的雨季, 非雨季农田灌溉一般采用当地微咸水。试验区 2015 年围垦, 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, 表层土壤以黏壤为主, 深层土壤以粉砂壤为主, 表层、心土层与底土层含盐量均较高, 盐分组成与海水基本一致, 以氯化物占绝对优势。剖面 40~60 cm 深度以下一般呈现灰褐色、青褐色的潜育层, 是长期淹水条件下的典型特点。地下水埋深整体较浅, 总体分布在 0.8~1.6 m, 矿化度高且有较大波动, 地下水盐分与土壤盐分组成也表现出较高的一致性。试验地土壤结构差, 紧实度高, 养分含量较低, 表层 0~20 cm 土壤基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

本试验采用水稻-小麦轮作方式, 共设置 3 个氮水平及有、无黄腐酸共 5 个处理, 每个处理设置 3 次重复, 完全随机排列, 具体处理见表 2。

表 1 试验地土壤基本特征
Table 1 Basic soil properties of study area

土壤类型	电导率(dS/m)	容重(g/cm ³)	pH	有机碳(g/kg)	全氮(g/kg)	有效磷(mg/kg)	碱解氮(mg/kg)
淤泥质海岸带盐渍土	0.52	1.37	9.20	3.52	0.54	17.20	11.11

表 2 试验处理
Table 2 Treatments of experiment

处理描述	处理代码	肥料用量
不施肥	CK0	不施用任何肥料
常规施肥	CK1	纯氮 300 kg/hm ² , 磷 120 kg/hm ² ; 钾 30 kg/hm ²
黄腐酸+低氮肥量	F1N1	纯氮 225 kg/hm ² ; 磷 120 kg/hm ² ; 钾 30 kg/hm ²
黄腐酸+常规氮量	F1N2	纯氮 300 kg/hm ² ; 磷 120 kg/hm ² ; 钾 30 kg/hm ²
黄腐酸+高氮肥量	F1N3	纯氮 375 kg/hm ² ; 磷 120 kg/hm ² ; 钾 30 kg/hm ²

试验肥料分基肥和追肥, 基肥为复混肥料和尿

素。复混肥料主要成分为黄腐酸、有机质和 N-P-K 复合肥, 按照 20%、30% 和 50% 比例掺混制成。追肥肥料只使用尿素。低、中、高氮水平处理的复混肥料施用量均为 600 kg/hm², 不同氮水平通过尿素用量调整来实现。

供试作物为水稻和小麦。水稻品种为‘淮稻 5 号’, 为育苗后移栽, 水稻各种植微区的面积为 2 m × 2 m, 各微区种植规格为 6 行, 每行 12 穴, 每穴 5 株; 小麦品种为‘扬麦 22’, 播种量为 375 kg/hm², 行距 25 cm。水稻和小麦均采用 60% 氮肥作基肥, 种植前随翻耕施入, 40% 为追肥, 均分两次追施尿素; 磷肥和钾肥随基肥一次性施入。试验开始于 2016 年 5 月,

至 2017 年 5 月底结束。试验期间的田间管理如病虫害防治等按照当地传统方式进行。

1.3 样品采集与分析方法

水稻和小麦收获后均进行产量测定并进行土壤样品采集分析。水稻和小麦从出苗后每隔 15 ~ 30 d 分别于对应的生育期,用土钻法在每个试验小区进行分层(0 ~ 20 和 20 ~ 40cm)土壤样品采集,并用四分法取样。土壤样品带回实验室自然风干,磨碎,过筛后进行相关指标测定。土壤电导率、pH 采用水土比 5 : 1 制备浸提液,分别用电导法和电极法测定;表层土样的土壤有机碳含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定^[18],土壤水稳性团聚体采用湿筛法测定^[19-21],并根据不同粒径团聚体含量分布计算团聚体平均重量直径(MWD),具体公式为: $MWD = \sum_{i=1}^n F_i \cdot D_i$, 式中, F_i 为每一级内团聚体含量, D_i 为每一级范围内团聚体的平均直径(mm),其中 >2 mm 团聚体直径上限是 10 mm。

1.4 数据统计与分析

数据的作图用 SPSS 18.0 统计软件,各处理间差异的显著性对比应用最小显著性差异法(LSD 法)检验。

2 结果与分析

2.1 土壤电导率与 pH 的变化特征

土壤盐分的时间波动性随着土壤深度的增加有减小的趋势,旱季表层土壤电导率变化随季节降水波动明显。试验的管理与施肥措施对土壤盐分调控作用显著,本试验的轮作模式和施肥处理对土壤电导率的影响随时间波动以表层 0 ~ 20 cm 最为显著(图 1)。从图 1 中可以看出,水稻季各处理 0 ~ 40 cm 土壤电导率均有显著降低,CK0、CK1、F1N1、F1N2、F1N3 处理土壤电导率分别降低 37.6%、36.4%、25%、51.3%

和 38.9%,其中 F1N2 处理较 CK0 与 CK1 分别降低 13.7% 和 14.9%,差异达显著水平($P < 0.05$)。小麦季表层土壤则表现出积盐现象,这与旱季水分的大量蒸发及作物的蒸腾旺盛有关;其中 F1N2 处理在小麦生育期内除施肥初期外的土壤电导率均最低,相较于 CK0 电导率降低 25.8%; 20 ~ 40 cm 土壤电导率变化差异不显著,随着氮水平增加,电导率表现出升高趋势。

滨海滩涂围垦土壤 pH 整体偏高(图 2),在两季试验期内土壤 pH 具有一定程度的波动性,其变化范围在 9.00 ~ 9.62,具有明显的碱化特征。从图 2 可以看出,水稻季土壤 pH 介于 CK0 与 CK1 之间,其中 CK0、F1N2、F1N3 处理均有所升高,且 F1N2 > F1N3 > F1N1,表明常规施肥处理对水稻季土壤 pH 降低效果最好,不同氮水平处理下, F1N1 处理效果优于 F1N2 和 F1N3 处理。小麦季土壤 pH 随时间表现出先升高后降低的趋势, pH 升高主要原因是种植初期氮肥转化引起的,且由水田土壤脱水引起的胶体对土壤 Na^+ 和 HCO_3^- 的吸附增加,土壤碱化进一步增强。整个小麦季土壤 pH 结果表明,常规施肥处理 pH 升高,黄腐酸各处理 pH 均降低, F1N1、F1N2 和 F1N3 处理分别降低 0.2、0.38 和 0.22 个单位,其中 F1N2 处理相较于 CK1 降低 0.5 个单位,表明黄腐酸在氮肥用量为 300 kg/hm² 时对旱作土壤 pH 降低效果最好。

2.2 土壤团聚体组成

从连续两季土壤团聚体含量(以质量分数计)变化结果(图 3)可以看出,滩涂土壤团聚体含量的主要粒径分布为 >2 mm 与 <0.053 mm;其次为 0.053 ~ 0.25 mm 团聚体,约占总量的 15%; 0.25 ~ 2 mm 团聚体含量最少,约占总量的 5%。(在一季水旱轮作后土壤 >2 mm 团聚体含量显著增加,与不施肥处理相比,3 种含黄腐酸施肥处理土壤中三种含黄腐酸施肥

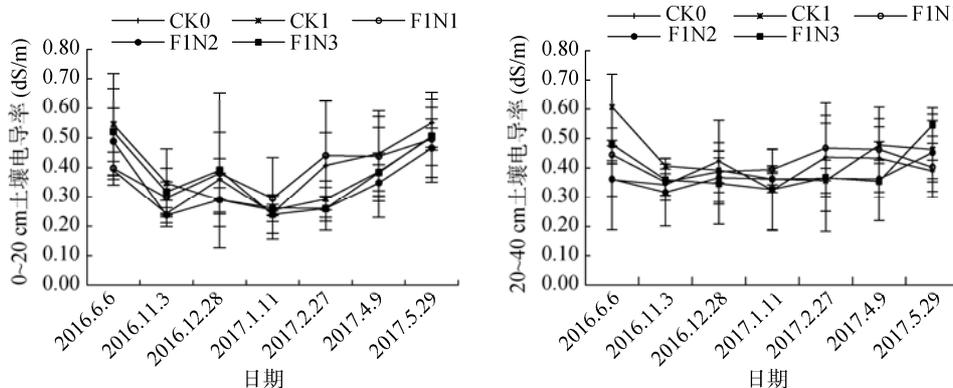


图 1 水稻-小麦轮作体系下 0 ~ 40 cm 土壤电导率的时间变化规律

Fig. 1 Changes of soil electric conductivity in 0 - 40 cm depths under different treatments

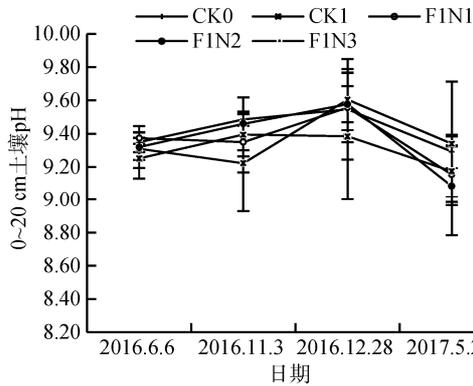
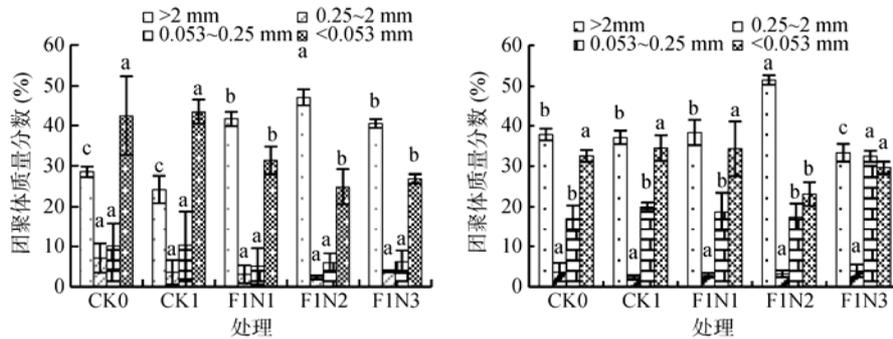


图 2 水稻-小麦轮作体系下 0~20 cm 土壤 pH 的变化
Fig. 2 Changes of soil pH in 0-20 cm depth under different treatments

处理土壤中 <0.053 mm 团聚体含量显著降低。)水稻季,与 CK0 与 CK1 相比,黄腐酸各不同氮水平处理均显著增加 >2 mm 团聚体含量,其中 FIN2 处理分别增加 18.6% 和 22.9%;显著降低 <0.053 mm 团聚体含量,其中 FIN2 处理分别降低 17.7% 和 18.7%;各处理间 $0.053 \sim 2$ mm 团聚体含量变化差异不显著。小麦季,FIN2 处理显著促进 >2 mm 团聚体含量增加和 <0.053 mm 团聚体含量的降低,与 CK0 和 CK1

相比, >2 mm 团聚体含量分别增加 13.8% 和 14.5%;与水稻季相比,各处理 $0.053 \sim 0.25$ mm 团聚体含量均增加,表明在微团聚体结构(<0.25 mm)分布上整体有从 <0.053 mm 向 $0.053 \sim 0.25$ mm 缓慢转化的趋势。

土壤团聚体平均重量直径(MWD)是反映土壤团聚体稳定性的重要指标,MWD 越大表明土壤大团聚体含量越多,土壤抗侵蚀能力越强,稳定性越高^[22]。从图 4 可以看出,CK0 与 CK1 小麦季 MWD 高于水稻季,表明旱作更利于团聚作用的发生;水稻季与小麦季 FIN2 处理 MWD 均最高,且小麦季 MWD 较水稻季增加 10.3%,而 FIN1 与 FIN3 处理小麦季较水稻季分别降低 7.1% 和 15.7%,表明旱季低氮与高氮处理均不利于土壤团聚体稳定性的增加,原因可能是由于新垦滩涂土壤结构性性质较差,土壤高盐分含量使土壤的聚合作用因表层盐分离子浓度的升高而降低,从而导致大团聚体含量降低^[19,22]。随着氮素水平的增加,MWD 在两季均呈现出先增加后减少的趋势,FIN2 处理 MWD 增加 73.6%。因此,FIN2 处理对促进滩涂水稻-小麦轮作体系土壤结构改善、团聚体形成效果最显著。



(不同小写字母表示同一粒径团聚体含量在不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同)

图 3 表层土壤团聚体各粒径分布特征

Fig. 3 Size distribution of aggregates in topsoils under different treatments

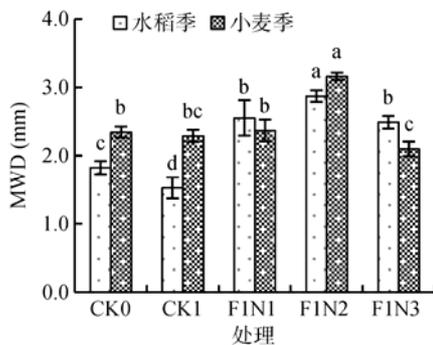


图 4 两种肥料不同处理表层(0~20cm)的 MWD

Fig. 4 MWD of soil aggregates in 0~20 cm depth under different treatments

2.3 土壤有机碳含量

土壤有机碳含量是表征土壤潜在肥力的重要指

标。为消除本底差异,通过试验初始与当季作物收获后有机碳含量的变化来表征有机碳对不同处理的响应。由图 5 结果可以看出,种植前各处理有机碳差异不显著,两季试验结束后各处理土壤有机碳含量差异显著,水稻季有机碳积累显著高于小麦季,主要原因可能是新垦土壤由于种植导致土壤微生物活性增加^[24],从而大幅增加土壤微生物生物量碳。CK0 有机碳含量呈少量积累,第二季共增加 0.25 g/kg,表明滨海新垦滩涂土壤发育程度低,农业种植增加碳输入,有利于土壤有机碳缓慢积累。由于水田土壤厌氧环境一定程度抑制微生物呼吸代谢^[23]及短期试验条件等,土壤有机碳含量变化不明显。与 CK0 相比,FIN2 处理水稻季有机碳含量增加 0.49 g/kg,有机碳

积累率达到 14.6%。水稻季, F1N2 与 F1N3 处理有机碳含量均显著高于 CK0 ($P < 0.05$), 但 F1N1 处理水稻季有机碳含量降低 3.6%, 旱季则增加 16.7%, 表明低氮处理不利于水田有机碳的积累, 旱作促进有机碳积累。小麦季, F1N2 处理有机碳含量较 F1N1 与 F1N3 处理分别增加 ($P < 0.05$), F1N3 处理有机碳基本无积累, 主要原因可能是土壤微生物的活性增强, 高氮水平促进有机碳矿化过程, 以及作物根系反馈给土壤根际环境的分泌物及团聚作用减弱^[25], 从而减少有机碳的形成。CK1 与 F1N2 处理氮水平相同, 有机碳均表现出积累现象, 且积累量基本相同; F1N2 处理较 F1N1 与 F1N3 处理两季总有机碳积累量分别增加 31.0% 和 120.0%, 表明氮水平较黄腐酸处理对土壤有机碳含量的影响更大, 常规氮水平 300 kg/hm² 效果最好。

从图 6 可以看出, 黄腐酸各处理可以显著提高土壤大团聚体有机碳含量, 与表层土壤总有机碳趋势相同, 随着施氮量的增加, 水稳性团聚体有机碳含量先增加后降低, F1N2 处理含量最高; 与 CK0 相比, F1N1、F1N2 和 F1N3 处理有机碳含量分别增加 12.8%、15.6% 和 6.0%, 差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

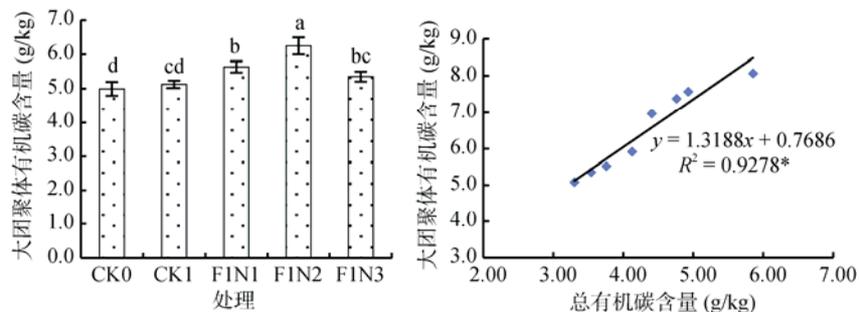


图 6 小麦季土壤水稳性大团聚体有机碳含量(A)及其与土壤总有机碳含量(B)的相关性

Fig. 6 SOC content in water-stable macro-aggregates in wheat season and its correlation between total organic carbon content

3 讨论

3.1 氮肥及黄腐酸对土壤电导率、pH 的作用

从土壤电导率及 pH 变化来看, 黄腐酸的低、高氮肥处理都不利于土壤盐分的降低。肥料中黄腐酸是能够有效降低土壤盐分的主要原因^[26], 一方面是黄腐酸及肥料中的有机质对土壤结构有一定的改善作用^[27], 通过形成团粒结构破坏盐分沿土壤毛管孔隙随水分上升的条件, 降低土壤耕层的盐分积累。另一方面, 黄腐酸与有机质络合、螯合土壤中的金属阳离子形成的胶体结构以及其多孔性(比表面大)可吸附土壤溶液中的盐分离子^[28], 从而降低

CK1 与 CK0 有机碳含量差异不显著, 表明常规施肥短期内对促进团聚体有机碳的含量效果不明显。土壤大团聚体中有机碳含量高于表层 0 ~ 20 cm 土壤均值, 表明土壤有机碳主要在大团聚体中汇集, 碳密度高于其他各粒径团聚体。不同肥料处理通过改变土壤结构以及土壤有机碳的分布影响团聚体的形成和分布, 因此土壤有机碳与团聚体有机碳表现出显著的正相关关系, 表明土壤有机碳能够促进大团聚体的形成, 提高团聚体稳定性, 进一步改善土壤结构组成。

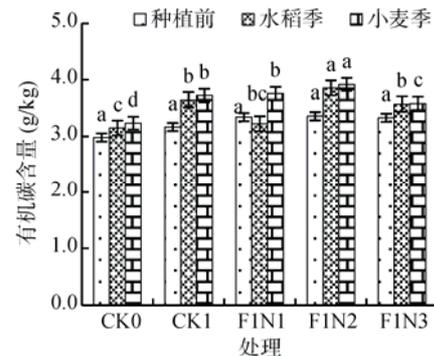


图 5 不同施肥处理土壤有机碳含量

Fig. 5 SOC contents under different fertilization treatments

土壤中盐含量。同时由于降雨等条件也加速土壤表层盐分离子淋洗, 促进盐分含量降低。前人研究表明^[1], 随着土壤脱盐, Na⁺及 HCO₃⁻在土体中的移动增加了土壤胶体的吸附量, 使土壤碱化, pH 升高。而本研究表明, 氮肥配施黄腐酸对表层 0 ~ 20 cm 土壤 pH 降低具有促进作用。肥料的水旱轮作试验能够有效降低土壤 pH, 一方面体现在黄腐酸对土壤 pH 的缓冲作用上; 另一方面, 水田在淹水条件下土壤毛管孔隙封闭减少了对 Na⁺及 HCO₃⁻的吸附^[22], 在旱季施肥后黄腐酸减缓了尿素在土壤中转化的速率, 放缓了尿素分解引起的 pH 增加, 降低小麦初期碱害威胁。

3.2 氮肥及黄腐酸对土壤有机碳含量的作用

黄腐酸对表层 0 ~ 20 cm 土壤有机碳积累有显著促进作用,在氮肥用量为 300 kg/hm² 时效果最好。在耕作初期,土壤盐分较高且结构性差,土壤中微生物多样性与活性相对较低,不同的氮水平处理影响土壤中碳氮比,对微生物代谢过程具有较高的影响,进而影响有机质积累和转化。同时,土壤大团聚体与有机碳有密切关系^[29],土壤中有有机碳与微生物分泌的各种胶结剂如球囊霉素等可以有效促进大团聚体的形成且有较高稳定性^[29]。因此氮肥及黄腐酸处理通过对土壤表层盐分和土壤结构的调控作用直接影响土壤中微生物代谢和有机质转化过程,通过降低表层盐分含量和提高土壤团粒结构含量促进土壤有机碳含量的增加。梁雷等^[24]研究认为,入侵植物对土壤总有机碳含量无显著影响,但降低了土壤易氧化碳和可溶性碳含量,增加了土壤微生物生物量碳含量。但在本试验中表现为有机碳含量的增加,主要因为有机碳本底值较低且土壤结构性差导致的微生物活性低。水稻季有机碳积累量高于小麦季,主要原因与土壤水分和盐分有关,旱季土壤蒸发及植物蒸腾作用强烈,土壤盐分随水分在表层聚集,对根际微生物的活动有一定的抑制作用^[25]。

土壤大团聚体有机碳含量与表层土壤 0 ~ 20 cm 土壤总有机碳含量变化表现出显著正相关,这与前人研究认为土壤有机碳在 0.5 ~ 1 mm 粒级团聚体中含量最高且与水稳性大团聚体含量的变化呈正相关^[19,30]相一致。表明在滨海滩涂围垦地区,盐渍土壤有机碳含量的增加能够显著促进土壤大团聚体的形成,改善土壤结构与稳定性,提高滩涂土壤地力与可耕性。

3.3 氮肥及黄腐酸对土壤团聚体含量的作用

滨海滩涂土壤开垦初期,土壤以黏壤与粉砂壤为主,土壤结构性质差、肥力水平低且保水保肥能力差^[3],导致土壤以小粒径微团聚体为主,且存在较大分布差异,土壤在熟化过程中通过降低盐分改善土壤物理结构,从而形成更利于土壤团聚作用进行的条件,促进土壤有机碳形成,而有机碳含量的增加,也进一步促进土壤活性有机碳分解和微生物生物量碳含量增加^[24]以及土壤大团聚体的形成。与成熟土壤不同,滩涂土壤稳定性随着耕作年限的提高而逐渐增加^[25],水旱轮作模式对土壤盐分的显著抑制效果更利于土壤团聚体的形成。土壤在水耕熟化过程中,土壤有机质在淹水条件下经微生物厌氧分解过程较慢,相应的腐殖质形成有一定程度的积累^[31-34],土壤有机碳及大团聚体的含量也相应增加。随着氮肥用量的增

加,土壤大团聚体含量先增后减且在常规氮用量达到最高,差异达最高差异达显著水平,说明在滩涂土壤培肥与地力提升过程中优化施肥及用量对土壤结构形成具有显著的促进与调控作用。

4 结论

1)氮肥及黄腐酸处理能够显著降低表层土壤电导率和 pH,有利于滨海轻中度盐渍土壤快速脱盐碱。黄腐酸在氮肥用量 300 kg/hm² 时有效降低表层 0 ~ 20 cm 土壤盐分,与不施肥和当地常规施肥处理相比,土壤电导率分别降低 13.7% 和 14.9%,差异达显著水平($P < 0.05$)。经一季水旱轮作,常规施肥处理土壤 pH 升高,黄腐酸各处理的土壤表层 pH 均降低,且氮水平 300 kg/hm² 处理效果最好。

2)氮肥及黄腐酸处理能显著增加土壤有机碳含量,氮水平 300 kg/hm² 显著提高表层 0 ~ 20 cm 土壤有机碳积累量和水稳性大团聚体中有机碳含量,且水田更利于有机碳的积累,相较于低氮(225 kg/hm²)与高氮(325 kg/hm²)处理,两季土壤总有机碳积累量分别增加 31.0% 和 120.0%,加速调控滨海滩涂土壤的碳汇效应,有效培肥土壤地力。

3)氮肥及黄腐酸处理能改善土壤结构,氮水平 300 kg/hm² 有效促进土壤水稳性团聚体含量的积累并提高团聚体稳定性,与不施肥和当地常规施肥处理相比,>2 mm 团聚体含量分别增加 13.8% 和 14.5%,与不施肥处理相比,团聚体 MWD 增加 73.6%。黄腐酸配施适量氮肥可显著提高土壤可耕性,促进滨海滩涂土壤熟化,在加速滨海盐渍化土壤农业开发利用上具有广阔应用前景。

参考文献:

- [1] 王遵亲,祝寿泉,余仁培,等. 中国盐渍土[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [2] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报,2008,45(5): 837-845.
- [3] 杨劲松,姚荣江. 苏北海涂围垦区土壤质量综合评价研究[J]. 中国生态农业学报,2009,17(3): 410-415.
- [4] 王守纯,穆从如. 豫北灌区盐碱土的特征和棉麦保苗技术[J]. 中国农业科学,1964,5(4): 7-13.
- [5] 陈恩凤,王汝镛,王春裕. 有机质改良盐碱土的作用[J]. 土壤通报,1984(5): 193-196.
- [6] 张建兵,杨劲松,姚荣江,等. 有机肥与覆盖方式对滩涂围垦农田水盐与作物产量的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(15): 116-125.
- [7] 孟庆峰,杨劲松,姚荣江,等. 施用氮磷肥对苏北海涂围垦土壤盐渍化水平的影响[J]. 灌溉排水学报,2012,31(4): 16-20.

- [8] 巨晓棠. 理论施氮量的改进及验证——兼论确定作物氮肥推荐量的方法[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 249–261.
- [9] Liu X, Ying Z, Han W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature, 2013, 494(7438): 459.
- [10] Yan X, Ti C, Vitousek P, et al. Fertilizer nitrogen recovery efficiencies in crop production systems of China with and without consideration of the residual effect of nitrogen[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(9): 095002.
- [11] 李捷, 杨小鹏, 冯建军. 不同条件下黄腐酸对春小麦生长和水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(2): 52–55.
- [12] 韩玉竹, 李阳春, 刘晓静. 黄腐酸对紫花苜蓿种子活力的影响[J]. 种子, 2009(7): 50–52.
- [13] 回振龙, 李朝周, 史文煊, 等. 黄腐酸改善连作马铃薯生长发育及抗性生理的研究[J]. 草业学报, 2013, 22(4): 130–136.
- [14] 陆力光, 杨正申. 黄腐酸在旱地烤烟上的应用研究[J]. 中国烟草科学, 1994(4): 12–20.
- [15] 刘广明, 杨劲松, 吕真真, 等. 不同调控措施对轻中度盐碱土壤的改良增产效应[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 164–169.
- [16] 余世鹏, 杨劲松, 刘广明. 不同水肥盐调控措施对盐碱耕地综合质量的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(4): 942–947.
- [17] 姚荣江, 杨劲松, 曲长凤, 等. 海涂围垦区土壤质量综合评价的指标体系研究[J]. 土壤, 2013, 45(1): 159–165.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [19] 侯晓静, 杨劲松, 赵曼, 等. 耕作方式对滨海盐渍土有机碳含量及团聚体特性的影响[J]. 土壤, 2015, 47(4): 781–789.
- [20] 王晓洋. 抑盐专用肥和改良与调理剂对滨海盐渍土的改良效果研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [21] 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): 1367–1377.
- [22] 金雯晖, 杨劲松, 侯晓静, 等. 轮作模式对滩涂土壤有机碳及团聚体的影响[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1195–1201.
- [23] 李天杰. 土壤地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [24] 梁雷, 叶小齐, 吴明, 等. 加拿大一枝黄花入侵对杭州湾湿地围垦区土壤养分及活性有机碳组分的影响[J]. 土壤, 2016, 48(4): 680–685.
- [25] 周萍, 刘国彬, 薛莲. 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(2): 184–193.
- [26] 黄强, 殷志刚, 田长彦, 等. 施有机肥条件下的土壤溶液盐分变化动态[J]. 干旱区研究, 2001, 18(1): 53–56.
- [27] 米迎宾, 杨劲松, 姚荣江, 等. 不同措施对滨海盐渍土壤呼吸、电导率和有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 612–620.
- [28] 周花香. 普洱茶茶褐素与褐煤黄腐酸对金属离子络合作用的对比研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
- [29] 钟思远, 张静, 褚国伟, 等. 沿海侵蚀台地不同恢复阶段土壤团聚体组成及其与丛枝菌根真菌的关系[J]. 生态环境学报, 2017, 26(2): 219–226.
- [30] 安韶山, 张玄, 张扬, 等. 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.
- [31] 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.
- [32] Mikha M M, Rice C W. Tillage and manure effects on soil and aggregate associated carbon and nitrogen [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(3): 809–816.
- [33] Aoyama M, Angers D A, N'Dayegamiye A. Particulate and mineral-associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1999, 79(2): 295–302.
- [34] Hbirkou C, Martius C, Khamzina A, et al. Reducing topsoil salinity and raising carbon stocks through afforestation in Khorezm, Uzbekistan[J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75(2): 146–155.