

改良剂作用下滨海盐化潮土团聚体分布、稳定性及有机碳分布特征

马 征, 王学君, 董晓霞, 刘 苹, 郑福丽, 沈玉文

(山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业农村部黄淮海平原农业环境重点实验室,
农业农村部废弃物基质化利用重点实验室, 山东省植物营养与肥料重点实验室, 济南 250100)

摘要: 通过对滨海盐化潮土小麦—玉米轮作 2 年田间定位试验, 研究不同改良剂施用对土壤团聚体分布、稳定性及土壤团聚体中有机碳含量、各级团聚体有机碳对总有机碳贡献率的影响。试验共设置 3 个处理: 对照(CK)、有机土壤改良剂(OSA)和有机—无机土壤改良剂(CSA), 分析土壤团聚体分布、水稳性大团聚体($R_{0.25}$)、平均重量直径(mean weight diameter, MWD)、几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)、分形维数(D)、有机碳储量(soil organic carbon storage, SOCS)和有机碳贡献率(contribution rate of organic carbon)。结果表明, 滨海盐化潮土水稳性团聚体组成主要以 <0.25 mm 粒径为主, 改良剂施用后土壤 $R_{0.25}$ 显著提高, 其影响主要集中在 >5 mm 和 2~5 mm 粒径级, OSA 处理 2 个粒级团聚体含量较 CK 分别显著增加 167.38% 和 59.00%, CSA 处理分别显著增加 89.17% 和 100.66%。施用 OSA 与 CSA 同时显著提高了土壤团聚体 MWD 和 GMD 值, 说明 2 种改良剂的施用均有利于提高大团聚体数量及稳定性。施用改良剂 2 年处理土壤各粒级团聚体中有机碳含量均有所提高, OSA 处理以 1~2 mm 粒级提高最多, CSA 以 2~5 mm 粒级提高最多, 且前者达显著水平。与 CK 相比, 改良剂可促使土壤有机碳向大团聚体富集, 显著提高 $>1\sim 2$ mm 粒级团聚体对土壤总有机碳的贡献率 93.62%~109.76%, 降低或显著降低 $<1\sim 2$ mm 粒级团聚体对土壤总有机碳的贡献率 20.55%~24.92%。在小麦—玉米轮作模式下, 改良剂施用不仅可以显著提高滨海盐化潮土水稳性大团聚体含量和稳定性, 还可显著增加水稳性大团聚体有机碳含量与储量, 是加强盐碱土壤有机碳库积累的有效措施。

关键词: 土壤改良剂; 滨海盐化潮土; 土壤团聚体; 有机碳; 碳储量

中图分类号: S156.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)04-0327-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.047

Effects of Soil Amendments on Distribution and Stability of Soil Aggregates and Organic Carbon Content in Coastal Salinized Fluvo-aquic Soil

MA Zheng, WANG Xuejun, DONG Xiaoxia, LIU Ping, ZHENG Fuli, SHEN Yuwen

(Agricultural Resources and Environment Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences,
Key Laboratory of Agro-Environment of Huang-Huai-Hai Plain, Ministry of Agriculture and
Rural Affairs, P.R.China, Key Laboratory of Wastes Matrix Utilization, Ministry of Agriculture and
Rural Affairs, P.R.China, Shandong Provincial Plant Nutrition and Fertilizer, Jinan 250100)

Abstract: Based on two-year wheat/maize rotation field experiment on coastal salinized Fluvo-aquic soil, the effects of different soil amendments on soil aggregates distribution and stability, organic carbon content and the contribution rates of different size class aggregates to total organic carbon had been studied. The field experiment consisted of 3 treatments, no soil amendments (CK), organic soil amendments (OSA), and organic-inorganic compound soil amendments (CSA). Soil samples were collected for analysis of soil aggregates distribution, water-stable macro-aggregates ($R_{0.25}$), mean weight diameters (MWD), geometric mean diameters (GMD), fractal dimension (D), soil organic carbon storage (SOCS) and its distribution in aggregates. The results showed that the composition of soil aggregates in the coastal salinized Fluvo-aquic soil was dominated by <0.25 mm water-stable aggregates. The application of soil amendments significantly

收稿日期: 2019-12-02

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD080602, 2016YFD0200103); 山东省重点研发计划项目(2017cxgc0311); 山东省农科院科技创新工程项目(CXGC2016A05)

第一作者: 马征(1982—), 女, 硕士研究生, 助理研究员, 主要从事土壤改良与修复研究。E-mail: mazheng15@163.com

通信作者: 沈玉文(1982—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事新型肥料研发、作物施肥技术研究。E-mail: wendy_yws @163.com

increased the number of large aggregates (>0.25 mm), and the effects on >5 mm and $2\sim 5$ mm aggregates were the highest among different aggregates. Compared with CK, the numbers of >5 mm and $2\sim 5$ mm aggregates under OSA treatment significantly increased by 167.38% and 59.00%, while those under CSA treatment significantly increased by 89.17% and 100.66%. The MWD and GMD were significantly increased under the OSA and CSA treatments, which suggested that the application of OSA and CSA increased the number and stability of large aggregates. The SOC content of all aggregates fractions under OSA and CSA treatments were higher than those under CK after two-year located trials, and the effects on $1\sim 2$ mm and $2\sim 5$ mm aggregates were the highest under the OSA and CSA treatment, respectively. As the application of soil amendments, SOC accumulated within macroaggregates, which has a relatively faster turnover rate. Compared with CK, the application of soil amendments significantly increased the contribution rate to the total SOC in >2 mm size of aggregate by 93.62%~109.76%, while it reduced or significantly reduced in <1 mm size aggregate by 20.55%~24.92%. Therefore, the application of soil amendments is the effective method to improve the stability of soil water-stable aggregates and increase the SOC content of macro-aggregates, as well as further promote the sequestration of organic carbon in wheat/maize rotation system.

Keywords: soil amendments; coastal salinized fluvo-aquic soil; soil aggregate; organic carbon; carbon storage

黄河三角洲是近百年来黄河淤积所形成的新生陆地,是我国重要的盐碱地分布区之一,面积达 80 万 hm^2 ,且黄河口以每年 2.2 km 的速度向浅海推进,年新增淤地 2 000 hm^2 ,是我国造陆速度最快的河口三角洲^[1-2]。在土壤退化严重、土地资源紧缺的形势下,改良利用滨海盐碱地资源,提高盐碱地利用率,使之成为山东乃至全国重要的后备土地资源,是解决我国耕地资源日趋短缺及粮食需求日益高涨的重要途径之一^[3-4]。

与工程改良措施和生物改良相比,施用土壤改良剂是一种既经济又简便的改良盐渍土的方法。针对滨海盐碱地土壤结构性差、有机质匮乏、基础地力低下等特点,研究人员围绕“控盐、改碱、增碳”开展了大量不同种类改良剂的研究。有研究^[5-7]表明,有机肥和脱硫石膏混施能提高盐碱土壤有机质,改善土壤理化性状;腐殖酸类物质可以提高土壤碳含量,促进土壤团粒结构,还可活化土壤磷素,提高作物产量^[8];人工合成高分子有机聚合物,如聚丙烯酸(PAA)、聚丙烯酰胺(PAM)可使土壤大团聚体数目增加,团聚体水稳性提高,增加土壤导水性和含水量^[9-10]。综合来看,现有改良措施多注重单一成分的运用,而基于实地情况将各类改良剂综合应用的成果较少。土壤结构在土壤有机碳的固存和分配方面起着关键作用,土壤团聚体是有机碳转化和累积的关键场所,团聚体的物理保护是土壤有机碳主要的稳定机制之一^[11],大量试验^[12-14]证明,提高土壤有机碳含量及土壤团聚体含量对滨海盐化潮土的改良具有重要意义。但目前尚缺乏改良剂施用后如何影响滨海盐化潮土团聚体分布及有机碳组分的研究。

本研究以黄河三角洲典型滨海盐化潮土为供试土壤,应用新型土壤改良剂,兼具控盐、增碳和改善土壤

结构功能,通过对比 2 种改良剂施用后土壤水稳性团聚体分布、稳定性及各级团聚体有机碳含量变化,探讨不同改良剂对滨海盐化潮土小麦/玉米轮作体系各级团聚体数量组成及其有机碳库的分布特征,以期对滨海盐化潮土的改良提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2017 年 11 月至 2019 年 6 月在山东省东营市利津县汀罗镇渤海农场二分厂($37^{\circ}76'N$, $118^{\circ}69'E$)进行。该农场属于暖温带半湿润半干旱季风气候,冬春干旱,夏季多雨,晚秋偏旱。多年平均气温 12.80°C ,无霜期 206 d,多年平均降水量为 529.30 mm,试验期间具体降水见图 1。

该地区耕层土壤含有机质含量为 12.39 g/kg,水解性氮含量 44.22 mg/kg,有效磷含量 15.98 mg/kg,速效钾含量 248.30 mg/kg,pH 8.20,容重 1.56 g/cm^3 ,比重 2.65,总孔隙度 39.94%,平均含盐量 2.51 g/kg,主要土壤类型为滨海盐化潮土,土壤质地以砂壤土为主。

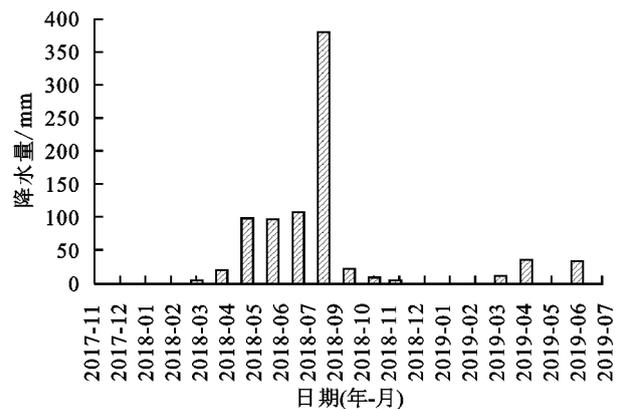


图 1 2017 年 11 月至 2019 年 7 月研究区月降水量分布情况

1.2 试验材料

供试小麦品种为“502”,玉米品种为“天塔 119”。试验采用 2 种自制土壤改良剂,分别为有机土壤改良剂(简称 OSA,主要成分为牛粪、腐殖酸类原料、改性膨润土和聚丙烯酰胺型保水剂等,其养分含量为全氮 1.49%,全磷 1.80%,全钾 0.70%,有机质 43.39%)和有机-无机复合土壤改良剂(简称 CSA,主要成分为脱石膏、菌渣和聚丙烯酰胺型保水剂等,其养分含量为全氮 0.52%,全磷 1.14%,全钾 0.49%,有机质 32.51%)。氮肥品种为尿素((NH₂)₂CO 含 N 46%),磷肥为磷酸一铵(NH₄H₂PO₄ 含 N 12%,P₂O₅ 61%),硫酸钾(K₂SO₄ 含 K₂O 52.0%)。

1.3 试验方法

试验于 2017 年 11 月开始,作物种植模式为小麦(*Triticum aestivum* L.)—玉米(*Zea mays* L.)轮作。小麦在每年 10 月 15—18 日播种,并于第 2 年 6 月 14—16 日收获;玉米于 6 月 18—25 日播种,当年 10 月 10—15 日收获。试验设 3 个处理:施肥对照处理(CK)、有机土壤改良剂处理(OSA)和有机-无机复合土壤改良剂处理(CSA)。每小区面积 30 m²(5 m×6 m),每个处理 3 个重复。改良剂施用量为 2 250 kg/hm²,于小麦季一次性施入土壤,之后不再补施。小麦播前底施氮 112.5 kg/hm²,磷 150 kg/hm²,钾 75 kg/hm²,次年各处理拔节期追施氮肥 112.5 kg/hm²。玉米季播前底施氮 105 kg/hm²,磷 105 kg/hm²,钾 60 kg/hm²,大喇叭口期追施氮肥 165 kg/hm²。小麦播种量为 300 kg/hm²,玉米播种量为 60 000 粒/hm²。小麦、玉米秸秆全部还田,其他管理同当地常规管理方式,处理间一致。

1.4 测定项目与方法

2019 年小麦收获后,按“S”型五点取 0—20 cm 土层原状土样,将土壤混合带入实验室(避免挤压),自然风干后沿自然结构掰成小土块,除去粗根及小石块,过 10 mm 筛。

土壤水稳性团聚体采用 Elliott 湿筛法测定^[15],具体方法为:将 100 g 样品放置于孔径自上而下为 5,2,1,0.5,0.25,0.053 mm 的套筛之上;将套筛缓慢放入水中,保持最顶层筛的上边缘低于水面,浸润 10 min;使用浙江上虞生产 TTF-100 型团聚体分析仪进行分析,转速 30 次/min,定时 20 min;将各级孔径筛层上团聚体转移至铝盒,烘干称重得 W_{wi} ,计算得到各级团聚体的质量百分比。

土壤团聚体有机碳采用重铬酸钾容量法—外加热法测定;采用碱解扩散法测定土壤碱解氮;采用 NaHCO₃ 浸提—钼蓝比色法测定土壤有效磷;采用 NH₄OAc 浸提—火焰光度计法测定土壤速效钾^[16]。

1.5 数据处理

不同粒级水稳性团聚体的质量百分比:

$$\omega_i = \frac{W_{wi}}{100} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ω_i 为 i 粒级团聚体质量百分比(%); W_{wi} 为 i 粒级团聚体重量(g)。

水稳性大团聚体($R_{0.25}$):

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $R_{0.25}$ 为粒径 > 0.25 mm 团聚体含量(%); $M_{r>0.25}$ 为粒径 > 0.25 mm 团聚体的重量(g); M_T 为团聚体总重量(g)。

平均重量直径(mean weight diameter, MWD):

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \omega_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (3)$$

式中: \bar{x}_i 为两筛分粒级粒径的平均直径。

几何平均直径(geometric mean diameter, GMD):

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \right] \quad (4)$$

分形维数(D)的计算国内一般沿用了杨培岭等^[17]推导的公式:

$$\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} = \left[\frac{\bar{x}_i}{\bar{x}_{\max}} \right]^{3-D} \quad (5)$$

式中: \bar{x}_{\max} 为团聚体的最大粒径的平均值; $M(r < \bar{x}_i)$ 为粒径小于 \bar{x}_i 的团聚体的重量。对上式两边取对数,即得:

$$\lg \left[\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} \right] = (3-D) \lg \left(\frac{\bar{x}_i}{\bar{x}_{\max}} \right) \quad (6)$$

分别以 $\lg(\bar{x}_i/\bar{x}_{\max})$ 和 $\lg[M(r < \bar{x}_i)/M_T]$ 为横、纵坐标,使用最小二乘法进行直线拟合,计算其斜率,最后由斜率计算出分形维数(D)。

表层团聚体的有机碳储量(soil organic carbon storage, SOCS)^[18]:

$$M_{\text{SOCS}} = \omega_i \times C_C \times \rho_b \times T \quad (7)$$

式中: M_{SOCS} 为有机碳储量(Mg C/hm²); C_C 为该团聚体中有机碳含量(g/kg); ρ_b 为土壤容重(g/cm³); T 为土壤厚度(cm)。

$$C_{\text{SOC}} = \frac{C_C \times \omega}{T_{\text{SOC}}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: C_{SOC} 为团聚体中有机碳贡献率(%); ω 为该级别团聚体含量(%); T_{SOC} 为表层土壤总有机碳含量(g/kg)。

试验所得数据采用 Excel 2010 软件进行数据整理,采用 DPS 7.05 软件进行统计分析,采用 SPSS 19.0 软件对数据进行相关性分析(Pearson correla-

tion, 双侧检验)。

2 结果与分析

2.1 改良剂作用下滨海盐化潮土基本理化性质

由表 1 可得, OSA 和 CSA 处理均可降低土壤比重和容重值, 增大土壤总孔隙度, 但与 CK 相比均未达到显著差异水平 ($P > 0.05$)。虽然土壤比重和容重的变化范围较小, 但其大小与土壤质地、结构和有

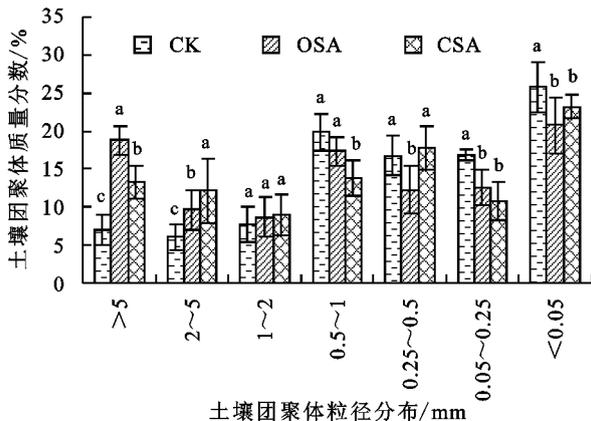
表 1 不同改良剂作用下土壤理化特征

处理	比重	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/ %	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全盐/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH
CK	2.65a	1.43a	46.04a	56.35b	17.23a	198.03b	11.93a	6.92a	1.95a	8.19a
OSA	2.63a	1.38a	47.53a	56.68b	17.52a	201.33b	13.06a	7.58a	1.69b	8.21a
CSA	2.64a	1.41a	46.59a	59.84a	18.69a	206.56ab	13.29a	7.71a	1.62b	8.18a

注: 同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.2 改良剂作用下滨海盐化潮土团聚体特征

不同改良剂施用下土壤各团聚体组成含量见图 2。经过 2 年试验得出, 改良剂的施用可显著提高大团聚体 ($> 0.25 \text{ mm}$) 中 $> 5 \text{ mm}$ 和 $2 \sim 5 \text{ mm}$ 粒径级含量, 对 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 粒径团聚体含量无显著影响 ($P > 0.05$)。对照 (CK) 大团聚体组成以 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 和 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 粒径为主, 占大团聚体含量的 63.80%。改良剂施用后对土壤大团聚体的影响主要集中在 $> 5 \text{ mm}$ 和 $2 \sim 5 \text{ mm}$ 粒径级, 与 CK 相比, OSA 处理 $> 5 \text{ mm}$ 和 $2 \sim 5 \text{ mm}$ 粒径团聚体含量分别显著增加 167.38% 和 59.00%, CSA 处理相应粒径团聚体含量分别显著增加 89.17% 和 100.66%。在改良剂的作用下, $< 0.25 \text{ mm}$ 的水稳性微团聚体所占比例显著降低 ($P < 0.05$), 说明改良剂施用有效促进了滨海盐化潮土大团聚体的形成。



注: 图中粒径相同的一组中不同小写字母表示不同处理间的差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

图 2 不同改良剂作用下土壤团聚体分布特征

土壤团聚体指数 MWD 和 GMD 是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标, MWD 和 GMD 值越大, 表示团聚体的平均粒径团聚度越高, 稳定性越强^[19]。土壤水稳性大团聚体 ($R_{0.25}$) 代表土壤团聚体

机质等均有密切关系。由于改良剂中添加了牛粪、菌渣或腐殖酸等成分, 同时含有膨润土和保水剂, 对养分蓄持能力具有积极作用, 使改良剂处理土壤养分及有机质含量较 CK 均有提高, 其中 CSA 处理碱解氮含量显著提高 6.19%。与 CK 相比, OSA 和 CSA 处理土壤全盐分别显著下降 13.33%~16.92%, 但 pH 未有明显变化 ($P > 0.05$)。

稳定率, 对保持土壤结构的稳定性有重要贡献, 是判定土壤质量好坏的重要标准^[20]。土壤分型维数 (D) 是将分形理论应用到土壤科学研究中, 不仅可比较不同土壤颗粒分布特征和质地均匀程度, 还可以反映土壤肥力、土地利用类型对质地的影响和土壤退化程度等^[21]。比较 2 年改良剂施用对滨海盐化潮土土壤团聚体的 $R_{0.25}$ 值、MWD、GMD 和 D 的影响, 由表 2 可知, OSA 和 CSA 处理的 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 值较 CK 分别显著提高 16.40%、74.32%、74.88% 和 15.25%、53.76%、49.82%。改良剂施用后 2 个处理土壤 D 较 CK 分别略有下降, 但差异不显著。说明 2 种改良剂的施用均显著提高了土壤团聚体稳定性。

表 2 不同处理土壤水稳性团聚体稳定性参数

处理	$R_{0.25}/\%$	MWD/mm	GMD/mm	D
CK	57.32b	0.92b	0.28b	2.74a
OSA	66.72a	1.60a	0.49a	2.70a
CSA	66.06a	1.42a	0.42a	2.72a

2.3 改良剂作用下不同粒径团聚体中有机碳含量及土壤碳储量的差异

由图 3 可知, 同一处理中不同粒径团聚体 SOC 含量随粒径变化呈现先升高后降低的变化规律, 其中各处理 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 粒径的 SOC 含量最高。2 种改良剂施用均可增加土壤各粒径的 SOC 含量, 其中最大增幅出现在 OSA 处理的 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 粒径, 其 SOC 含量较 CK 显著增加 20.73%。CSA 处理以 $2 \sim 5 \text{ mm}$ 粒径的 SOC 提高最多, 但较 CK 无显著差异, 表明 OSA 处理对土壤团聚体有机碳含量的影响更大。

从图 4 可以看出, 随着土壤总有机碳含量的增加, 各粒径团聚体有机碳含量亦随之增加, 两者呈正相关关系。其中 $2 \sim 5 \text{ mm}$ 和 $< 0.05 \text{ mm}$ 粒径团聚体与总有机碳呈显著正相关 ($P < 0.05$), 其他各处理均未达显著水平 ($P > 0.05$)。

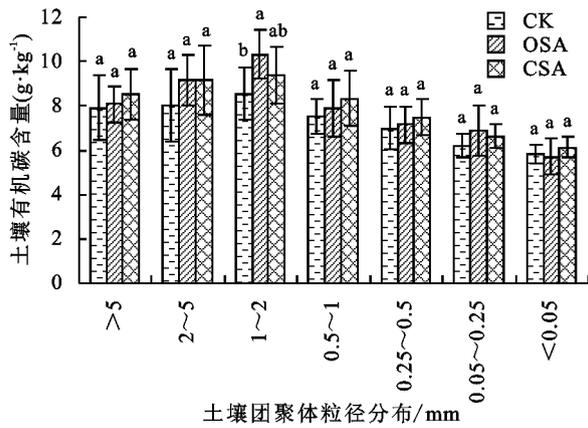


图 3 不同改良剂作用下土壤团聚体中有机碳含量
改良剂施用后滨海盐化潮土大团聚体有机碳值

量显著增加 18.82%~25.23%。由表 3 可知,对照 CK 土壤大团聚体有机碳储量峰值在 0.5~1 mm 粒径处,改良剂 OSA 大团聚体有机碳储量峰值移动到>5 mm 粒径处,且>5,2~5,1~2 mm 团聚体有机碳储量较 CK 分别显著升高 136.68%,63.86%和 20.55%。改良剂 CSA 处理>5,2~5,1~2 mm 团聚体有机碳储量较 CK 分别显著升高 88.79%,105.74%和 19.15%,说明施用改良剂可促使土壤有机碳向大团聚体富集。各处理微团聚体有机碳储量的变化趋势相同,以 0.05~0.25 mm 粒径处值较低,<0.05 mm 粒径处值较高,施用改良剂使土壤微团聚体有机碳储量显著降低 6.84%~28.95%,其中 OSA 处理在 2 个粒径处变化更为显著。

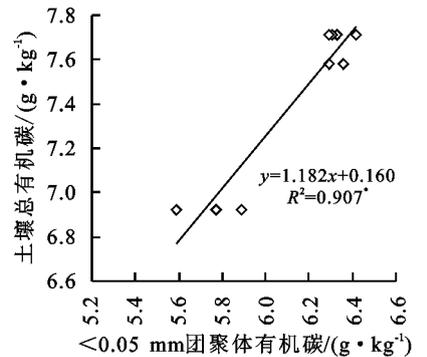
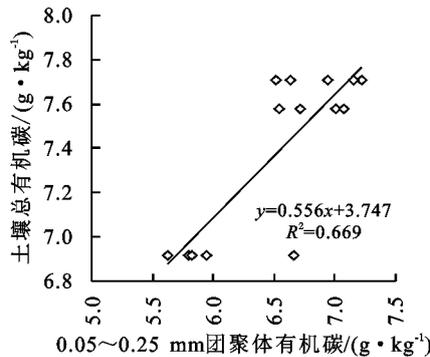
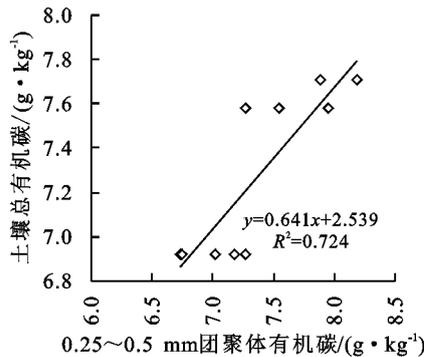
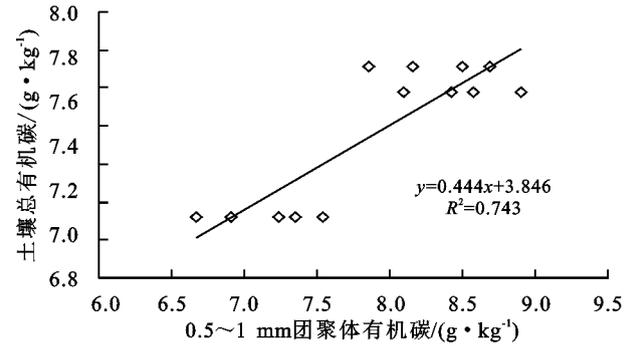
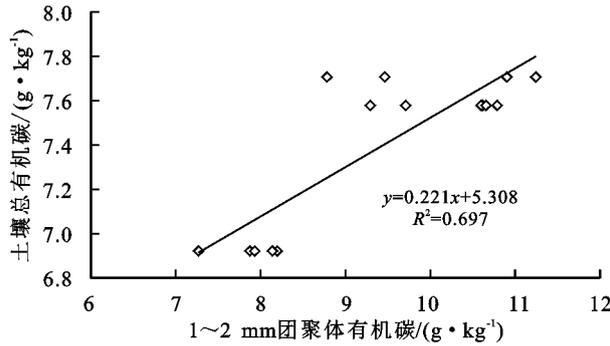
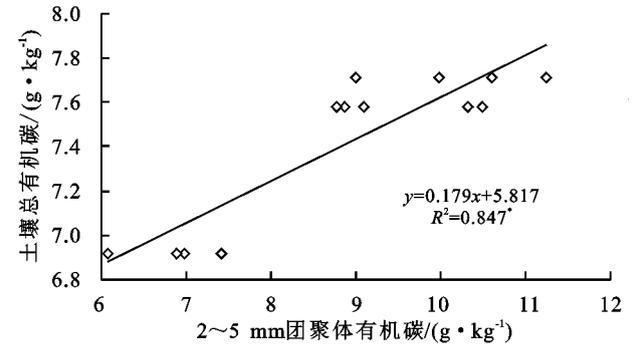
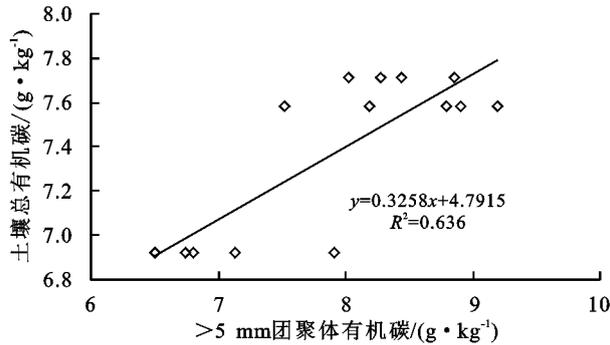


图 4 不同改良剂作用下土壤各粒径团聚体有机碳与总有机碳的关系

表 3 不同改良剂作用下滨海盐化潮土水稳性团聚体有机碳储量

单位: Mg/hm²

处理	大团聚体有机碳储量					合计	微团聚体有机碳储量		合计	土壤总有机碳储量
	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm		0.05~0.25 mm	<0.05 mm		
CK	1.73c	1.54c	2.01b	4.19a	3.34b	12.81c	2.84a	4.13a	6.98a	19.79a
OSA	4.10a	2.52b	2.42a	3.76b	2.42c	15.22b	2.37b	3.32b	5.70b	20.92a
CSA	3.27b	3.16a	2.40a	3.45c	3.78a	16.04a	2.02b	3.85a	5.85b	21.89a

2.4 改良剂作用下土壤水稳性团聚体中有机碳含量对土壤总有机碳贡献率的影响

从表 4 可以看出, >0.25 mm 大团聚体中有机碳含量对土壤总有机碳贡献率为 63.09%~72.94%, 而微团聚体中有机碳含量贡献率为 27.08%~36.91%。改良剂处理与 CK 各粒径 C_{SOC} 以 1~2 mm 为变化节点, 即施用

表 4 不同改良剂作用下滨海盐化潮土各团聚体组分有机碳对全土有机碳的贡献率 单位: %

处理	水稳性大团聚体					合计	水稳性微团聚体		
	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm		0.05~0.25 mm	<0.05 mm	合计
CK	8.03c	7.02b	9.51a	21.69a	16.84a	63.09b	15.11a	21.80a	36.91a
OSA	19.97a	11.60ab	11.81a	17.99ab	11.57a	72.94a	11.34ab	15.74a	27.08b
CSA	14.70b	14.44a	10.92a	14.98b	17.25a	72.29a	9.23b	18.48a	27.72b

3 讨论

3.1 改良剂施用对土壤团聚体组成及稳定性的影响

土壤团聚体的形成对改善土壤结构有重要意义。土壤团聚体结构是土壤肥力的物质基础, 关系到土壤养分、水分和空气的传输, 对种子发芽、根系发育、作物生长以及有机碳保护有着重要的影响^[22]。滨海盐化潮土中含有的大量 K^+ 、 Na^+ 等一价阳离子, 可降低土壤胶粒的凝聚性, 同时高盐分可改变微生物群落结构及活性, 影响土壤有机物积累, 进而不利于土壤团粒结构的形成与稳定。本研究针对滨海盐化潮土特征制备有机土壤改良剂 OSA, 一方面加入改性膨润土, 膨润土本身具有良好的吸附性、阳离子交换性和较大的比表面积, Tahir 等^[23] 施用膨润土作为改良剂可提高盐碱土阳离子交换量, 钙离子交换量增加 15.9 cmol/kg, 钠离子交换量增加 12.29 cmol/kg, 还可增加对速效氮和速效磷养分固持, 但土壤 pH 提高 2.6 个单位。而 OSA 通过对膨润土进行无机酸改性, 将结构层间的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 等阳离子用 H^+ 替代, 显著提高吸附性能和离子交换能力的同时也起到调节土壤 pH 的作用。另一方面, 膨润土与牛粪、腐殖酸等有机物料同时施用, 可以促进松结态腐殖质分解, 加速紧结态腐殖质合成^[24], 有利于增加土壤团聚体稳定性, 长期作用下可促进土壤肥力提升, 这与郑毅等^[25] 研究结果相一致。有机-无机复合土壤改良剂 CSA 将脱硫石膏与保水剂相结合, 利用 Ca^{2+} 比 Na^+ 对土壤中胶体的吸附能力强的原理, 代换土壤胶体上的交换性钠离子, 通过灌水淋洗, 减少土壤中 Na^+ 离子, 还可利用保水剂吸水-释水过程中体积的膨胀与收缩, 提高土壤孔隙度, 同时利用保水剂良好的胶结性, 可促进团粒的形成, 提高水稳性大团聚体含量, 有助于土壤结构的改善^[26-27]。

本研究表明, 滨海盐化潮土上施用 2 种改良剂均可促进土壤微团聚体向大团聚体转化, 特别是显著增加 >5, 2~5 mm 粒级团聚体含量。从土壤团聚体 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 来看, OSA 效果优于 CSA, CSA 优于 CK。

改良剂可显著提高 >1~2 mm 粒级团聚体 C_{SOC} , 其中 OSA 处理显著提高 >5 mm 团聚体 C_{SOC} 148.69%, CSA 处理分别显著提高 >5 mm 和 2~5 mm 团聚体 C_{SOC} 83.06% 和 105.70%; 降低或显著降低 <1~2 mm 粒级团聚体 C_{SOC} , 其中 CSA 处理分别显著降低 0.5~1, 0.05~0.25 mm 团聚体 C_{SOC} 30.94% 和 38.91%。

3.2 改良剂施用对不同粒级水稳性团聚体中有机碳含量和储量的影响

有机碳是土壤团聚体形成和稳定的主要胶结物质。随着改良剂的施用, 土壤总有机碳含量均增加, 且有机土壤改良剂比有机-无机土壤改良剂效果更好, 这是由于有机改良剂中所含的腐殖酸是有机质的一种组成成分, 具有胶体性的有机物质, 对增加土壤有机质含量、改善土壤团粒结构作用显著。Dawood 等^[28] 的研究也认为, 施用腐殖酸影响了土壤的空间结构, 提高了土壤液、气比例, 使得土壤通气透水性发生相应改变, 土壤更疏松。同时, 各粒级团聚体有机碳含量亦随土壤总有机碳含量的增加而增加, 各粒径土壤团聚体占总团聚体比例不同, 各粒径团聚体有机碳含量也存在明显差异^[29-30]。Six 等^[31] 研究认为, 大团聚体是由有机物质和微团聚体胶结而形成的, 有机碳含量随团聚体粒径的增大而增大。本研究发现, 施用改良剂后土壤有机碳含量均值在 2~5, 1~2 mm 粒径团聚体中达到最大, 这与李娟等^[32] 在研究喀斯特山区团聚体时发现的 1~5 mm 团聚体是该地区土壤有机碳获得积累的关键团聚体结论相一致。土壤团聚体中有机碳对土壤总有机碳的贡献率表征了土壤团聚体中有机碳储量, 可反映施肥对土壤有机碳库的作用。本研究发现, 改良剂施用显著降低了微团聚体 (<0.25 mm) 有机碳储量, 显著提高了大团聚体 (>0.25 mm) 的有机碳储量, 在改良剂 OSA 作用下, 有机碳峰值从 0.5~1 mm 粒径处移动到 >5 mm 粒径处, 说明有机土壤改良剂与化肥配施不仅可以增加土壤有机碳含量, 而且有助于土壤大团聚体形成, 提高大团聚体对土壤总有机碳的贡献。

4 结论

施用土壤改良剂显著影响 >5, 2~5 mm 粒级团聚体, 显著提高土壤团聚体稳定性。改良剂施用 2 年, OSA 处理显著提高 1~2 mm 团聚体有机碳含量, CSA 处理显著提高 2~5 mm 团聚体有机碳含量, 改良剂可促使土壤有机碳向大团聚体富集, 显著

提高 $>1\sim 2$ mm 粒级团聚体对土壤总有机碳的贡献率,降低或显著降低 $<1\sim 2$ mm 粒级团聚体有机碳贡献率。综上可得,OSA 和 CSA 2 种土壤改良剂可以促进土壤水稳性大团聚体的形成,增加土壤有机碳含量,合理施用对改善滨海盐化潮土结构具有积极意义。

参考文献:

- [1] 董红云,朱振林,李新华,等.山东省盐碱地分布、改良利用现状与治理成效潜力分析[J].山东农业科学,2017,49(5):134-139.
- [2] 刘兴华,章海波,李远.黄河三角洲滩涂—湿地—旱地土壤团聚体有机质组分变化规律[J].土壤学报,2019,56(2):374-385.
- [3] 何伟,韩飞,关瑞,等.滨海盐碱地不同施肥模式对棉花氮磷养分积累和产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):265-300.
- [4] 李贤红,陈为峰,宋希亮,等.垦殖对黄河三角洲盐渍土碳氮分布特征的影响[J].土壤学报,2018,55(4):1018-1027.
- [5] 张涛,李素艳,孙向阳,等.磷石膏、红糖等对蚯蚓改良滨海盐土的促进作用[J].土壤学报,2017,54(1):255-264.
- [6] 张盼盼,郭亚宁,王小林,等.磷石膏和有机肥对盐碱地糜子叶片光合特性的影响[J].山西农业科学,2019,47(6):1005-1010.
- [7] 沈婧丽,王彬,许兴.脱硫石膏改良盐碱地研究进展[J].农业科学研究,2016,37(1):65-69.
- [8] 王福友,王冲,刘全清,等.腐植酸、蚯蚓粪及蚯蚓蛋白肥料对滨海盐碱土壤的改良效应[J].中国农业大学学报,2015,20(5):89-94.
- [9] 陈世军,潘文杰,孟玉山,等.石灰和聚丙烯酰胺对植烟酸性土壤钾、磷吸附解析和迁移的影响[J].西南师范大学学报(自然科学版),2012,37(6):68-73.
- [10] 马征,姚海燕,张柏松,等.保水剂对粘质潮土团聚体分布、稳定性及玉米养分积累的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):221-226.
- [11] Assi A T, Blake J, Mohtar R H, et al. Soil aggregates structure-based approach for quantifying the field capacity, permanent wilting point and available water capacity[J].Irrigation Science,2019,37:511-522.
- [12] 李旭霖,刘庆花,柳新伟,等.不同改良剂对滨海盐碱地的改良效果[J].水土保持通报,2015,35(2):219-224.
- [13] 王睿彤,陆兆华,孙景宽,等.土壤改良剂对黄河三角洲滨海盐碱土的改良效应[J].水土保持学报,2012,26(4):239-244.
- [14] 张密密,陈诚,刘广明,等.适宜肥料与改良剂改善盐碱土壤理化特性并提高作物产量[J].农业工程学报,2014,30(10):91-98.
- [15] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soil[J].Soil Science Society of America Journal,1986,50(3):627-633.
- [16] 李西开.土壤农业化常规分析方法[M].北京:科学出版社,1983:15-22.
- [17] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.
- [18] 刘秀,司鹏飞,张哲,等.地膜覆盖对北方旱地土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J].生态学报,2018,38(21):7870-7877.
- [19] 刘艳,查同刚,王伊琨,等.北京地区栓皮栎和油松人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J].应用生态学报,2013,24(3):607-613.
- [20] 王小红,杨智杰,刘小飞,等.中亚热带山区土壤不同形态铁铝氧化物对团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2016,36(9):2588-2596.
- [21] 何绍浪,黄尚书,钟义军,等.耕作深度对红壤坡耕地土壤水稳性团聚体特征的影响[J].水土保持研究,2019,26(6):127-132.
- [22] 张维俊,李双异,徐英德,等.土壤孔隙结构与土壤微环境和有机碳周转关系的研究进展[J].水土保持学报,2019,33(4):1-9.
- [23] Tahir S, Marschner P. Clay addition to sandy soil-influence of clay type and size on nutrient availability in sandy soils amended with residues differing in C/N ratio[J].Pedosphere,2017,27(2):293-305.
- [24] 宋东涛,李吉进,聂俊华,等.膨润土对土壤腐殖质特性的影响[J].环境科学,2008,17(2):722-726.
- [25] 郑毅,周磊,刘景辉.膨润土—腐殖酸型改良剂对沙质土壤氮素气态损失、氮肥利用率和玉米产量的影响[J].生态学杂志,2019,38(12):
- [26] 杜社妮,耿桂俊,于健,等.保水剂施用方式对河套灌区土壤水热条件及玉米生长的影响[J].水土保持通报,2012,32(5):270-276.
- [27] 侯贤清,李荣,何文寿.保水剂施用量对旱作马铃薯产量及养分吸收的影响[J].西北农业学报,2015,24(10):56-63.
- [28] Dawood M G, Abdel-Baky Y R, El-Awadi M E, et al. Enhancement quality and quantity of faba bean plants grown under sandy soil conditions by nicotinamide and/or humic acid application[J].Bulletin of the National Research Centre,2019,43(1):1-8.
- [29] Polláková I N, Šimanský V, Kravka M. The influence of soil organic matter fractions on aggregates stabilization in agricultural and forest soils of selected Slovak and Czech hilly lands[J].Journal of Soils Sediments,2018,18:2790-2800.
- [30] 毛霞丽,陆扣萍,何丽芝,等.长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J].西北农业学报,2015,52(4):828-838.
- [31] Six J, Elliott E T, 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.
- [32] 李娟,廖洪凯,龙健,等.喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响[J].生态学报,2013,33(7):2147-2156.