



潘孟玥,张善杭,王宝,等.施用乙酸和牛粪对干旱区棉田土壤团聚体及有机碳组成的影响[J].黑龙江农业科学,2024(9):35-42.

# 施用乙酸和牛粪对干旱区棉田土壤团聚体及有机碳组成的影响

潘孟玥,张善杭,王宝,何明明,李沛锦,秦金鑫,盛建东,刘耘华

(新疆农业大学 资源与环境学院,新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:**为促进干旱区棉田土壤培肥和高效利用有机肥,在新疆维吾尔自治区塔城地区沙湾县进行了6年的田间定位试验,设置3个处理,分别为对照、施入 $40\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 乙酸以及施入 $15\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 牛粪处理,研究乙酸和牛粪对新疆干旱区棉田土壤团聚体结构组成、稳定性和团聚体内有机碳组分的影响。结果表明,在 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层中,乙酸和牛粪的施入均显著增加了大团聚体( $>2.000\text{ mm}$ )和粘粉粒( $<0.053\text{ mm}$ )的质量占比、 $\text{WR}_{0.25}$ 和几何平均质量直径(GMD),且增加了大团聚体、微团聚体( $0.053\sim 0.250\text{ mm}$ )和粘粉粒中有机碳、可溶性有机碳和微生物量碳的含量,并以粘粉粒中有机碳含量对乙酸施入的响应最为明显,增幅为 $26.94\%$ ,而微团聚体中微生物量碳含量对牛粪施入的响应最为显著,增幅为 $53.49\%$ 。在 $20\sim 40\text{ cm}$ 土层中,乙酸和牛粪的施入均显著增加了大团聚体内有机碳、可溶性有机碳和微生物量碳的含量,且粘粉粒中的微生物量碳含量对乙酸和牛粪的响应均最显著,增幅分别为 $66.15\%$ 和 $103.38\%$ 。乙酸和牛粪的施入均能增加土壤团聚体中大团聚体的质量占比,提高团聚体稳定性,并增加大团聚体和粘粉粒中的有机碳、可溶性有机碳和微生物量碳的含量。

**关键词:**棉田;乙酸;牛粪;土壤团聚体结构;活性有机碳组分

土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)为土壤碳库的重要组成部分,可作为衡量土壤质量变化的重要指标<sup>[1-2]</sup>。在农田中, SOC可以改善土壤结构、增加土壤肥力、保持土壤水分、促进微生物活动、减少土壤侵蚀和提高作物生产力<sup>[3-5]</sup>。团聚体是土壤颗粒经过胶结作用形成的个体,是土壤结构的基本单元<sup>[6]</sup>。首先,团聚体的形成和稳定性与SOC的贮存相辅相成, SOC含量也与团聚体的粒径有关<sup>[7]</sup>。大团聚( $>2.000\text{ mm}$ )内SOC量较高,一方面是由于SOC的胶结作用将小团聚体( $0.250\sim 2.000\text{ mm}$ )、微团聚体( $0.053\sim 0.250\text{ mm}$ )以及粘粉粒( $<0.053\text{ mm}$ )胶结成大团聚体,另一方面则是因为大团聚体中残留的植物根系和菌丝可以增加其中SOC的浓度<sup>[8]</sup>。谭文峰等<sup>[9]</sup>认为小团聚体、微团聚体以及粘粉粒对SOC的储存方式主要是通过吸附小分子化合物来稳定其中的SOC含量。同时,团聚体是SOC最重要的物理保存机制之一,团聚体的存在使得SOC免于被微生物快速分解,而SOC作为团聚体间的胶结剂,保证了团聚体的稳定<sup>[10-11]</sup>。

由于干旱区农田土壤中有机质匮乏,在长期耕作和加强农田管理措施下,土壤肥力水平有所提高,但土壤有机碳含量仍偏低<sup>[12]</sup>。施入有机肥是提高农田中SOC含量的有效措施<sup>[13]</sup>。牛粪的施入可以降低土壤盐渍化,从而提高土壤微生物活性,增加SOC的转化率,增大SOC含量,故常被广泛施用于盐碱地中<sup>[14]</sup>。新疆偏碱性的钙质土壤,使得磷素固持严重,而有机酸是磷较好的活化剂,因此乙酸也是农田常施入的有机物质之一<sup>[15-16]</sup>,但目前针对乙酸的施入对土壤团聚体中活性有机碳组分的相关研究较少。通过在沙湾县进行6年的田间试验,以研究乙酸和牛粪这两种有机物质的施入对干旱区棉田土壤团聚体稳定性及活性有机碳组分的影响,旨在明确乙酸和牛粪对土壤养分的贡献,为干旱区棉田土壤培肥和有机肥料的高效利用提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2017—2023年进行,试验地位于新疆沙湾市144团新疆农业大学棉花教学科研基地

收稿日期:2024-04-30

基金项目:国家自然科学基金委员会联合基金项目(U2003210);新疆棉花产业技术体系(XJARS-03)。

第一作者:潘孟玥(1999—),女,硕士研究生,从事农业资源与利用研究。E-mail:846727977@qq.com。

通信作者:盛建东(1970—),男,博士,教授,从事干旱区土壤与环境研究。E-mail:sjd@xjau.edu.cn。

(44°29′26″N,85°45′34″E)。试验区气候干燥,昼夜温差大。年平均气温 6.3~6.9℃,降水量 140~250 mm,年蒸发量 1 500~2 000 mm,年日照时数 2 800~2 870 h,≥10℃活动积温 3 400~3 600℃,无霜期 170~190 d。试验地土壤质地为壤土,土壤基础理化性质详见表 1。

表 1 土壤基础理化性质

pH	电导率/ (μS·cm <sup>-1</sup> )	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
8.14	106.89	7.68	35.50	9.50	289.00

1.2 材料

1.2.1 供试棉花 种植棉花品种为新农大 3 号,新疆农业科学院经济作物研究所、甘肃省酒泉市农业科学研究院以[(新陆早 12 号×石远 321)F<sub>1</sub>×新陆中 9 号]F<sub>1</sub>为母本,中棉所 35 为父本杂交选育而成。早熟陆地棉,抗枯萎病和黄萎病<sup>[17]</sup>。

1.2.2 供试有机质 有机肥(当地农户腐熟牛粪,采购价 180 元·t<sup>-1</sup>),有机酸(太阳牌冰乙酸,66 元·L<sup>-1</sup>),供试肥料基本性质详见表 2。

表 2 供试乙酸和牛粪的基本性质

种类	C/%	N/%	P/%	K/%
牛粪	43.85	2.55	0.20	0.14
乙酸	40.00	0.00	0.00	0.00

1.3 方法

1.3.1 试验设计 试验共设置 3 个处理,以当地农户化肥施用量为对照(CK)、加施干旱区平均有机酸施用量 40 kg·hm<sup>-2</sup>(OA)、加施当地农户平均有机肥施用量 15 000 kg·hm<sup>-2</sup>(OF)。有机肥以基施方式施入,有机酸则分 6 次随滴灌追施。同时,每个处理施用等量的化肥,其中,尿素为 220 kg·hm<sup>-2</sup>(以 N 计),重过磷酸钙为 100 kg·hm<sup>-2</sup>(以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计),硫酸钾为 90 kg·hm<sup>-2</sup>(以 K<sub>2</sub>O 计),重过磷酸钙全部基施,尿素 20%作基肥,剩余 80%尿素分 6 次滴灌追施。每个处理 3 次重复,并采用随机区组分配各试验小区,共 9 个小区,每个小区面积为 72 m<sup>2</sup>(9 m×8 m)。播种模式为宽窄行距种植模式,1 膜 6 行 3 带,宽行距 65 cm,窄行距为 12 cm,株距为 14 cm,种植密度为 19 万株·hm<sup>-2</sup>。

1.3.2 测定项目及方法 样品采集:在 2023 年 9 月棉花成熟期时,各小区采集 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的土壤样品,剔除石砾和植物残根等杂质后将部分样品在-80℃环境下保存,用于测

定微生物量碳,剩余样品风干后测定土壤团聚体稳定性等指标。

指标测定:利用干筛法<sup>[18]</sup>分离土壤团聚体,得到大团聚体(>2.000 mm)、小团聚体(0.250~2.000 mm)、微团聚体(0.053~0.250 mm)以及粘粉粒(<0.053 mm),再将各级筛网上的土样分别收集称重。各粒级团聚体中的有机质采用重铬酸钾外加热法测定<sup>[19]</sup>。各粒级团聚体中的微生物量碳用氯仿熏蒸法测定<sup>[20]</sup>。各粒级团聚体中的可溶性有机碳含量用有机碳氮分析仪(耶拿,Multi N/C 3100 型,德国)测定<sup>[21]</sup>。

土壤团聚体稳定性(W<sub>i</sub>)计算方法见公式(1)<sup>[22]</sup>。

$$W_i(\%) = \frac{W_{wi}}{M} \times 100 \tag{1}$$

大于 0.250 mm 机械稳定性团聚体(WR<sub>0.25</sub>)的含量计算方法见公式(2)。

$$WR_{0.25} = \sum_{i=1}^n W_i \tag{2}$$

土壤团聚体平均质量直径(MWD),几何平均直径(GMD)计算方法见公式(3)<sup>[23]</sup>。

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i \times W_i \tag{3}$$

$$GMD = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n X_i \times \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n X_i} \right] \tag{4}$$

式中,W<sub>i</sub>表示各粒级团聚体质量百分含量(%),w<sub>i</sub>表示特定粒径机械稳性团聚体的质量百分数(%),W<sub>wi</sub>表示该粒径机械稳性团聚体的质量(g),M土壤样品总量(g),X<sub>i</sub>表示各土壤粒级的直径(mm), $\bar{X}_i$ 表示各土壤粒级的平均直径(mm)。

1.3.3 数据分析 使用 SPSS 25 统计软件中的 Duncan's 法分别对 0~20 cm 和 20~40 cm 土层中的团聚体构成及稳定性、团聚体内有机碳、可溶性有机碳、微生物量碳进行多重比较(P<0.05)及单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 施用乙酸和牛粪对土壤团聚体构成及 WR<sub>0.25</sub>的影响

2.1.1 团聚体构成 由图 1 可知,在 0~20 cm 土层中,大团聚体、小团聚体、微团聚体以及粘粉粒的占比范围为 38.84%~42.62%、32.20%~33.20%、14.34%~21.09%和 7.23%~9.43%。与 CK 相比,OA 和 OF 施肥处理下大团聚体和粘

粉粒的占比分别显著增加 2.12%、3.16%、2.67%和 3.67%，微团聚体占比显著降低 6.47%和 5.01%，小团聚体差异不显著(图 1A)。

在 20~40 cm 土层中，乙酸的施入(OA)较 CK 显著降低了粘粉粒的占比，降幅为 11.39%，其他团聚体类型各处理间差异不显著(图 1B)。

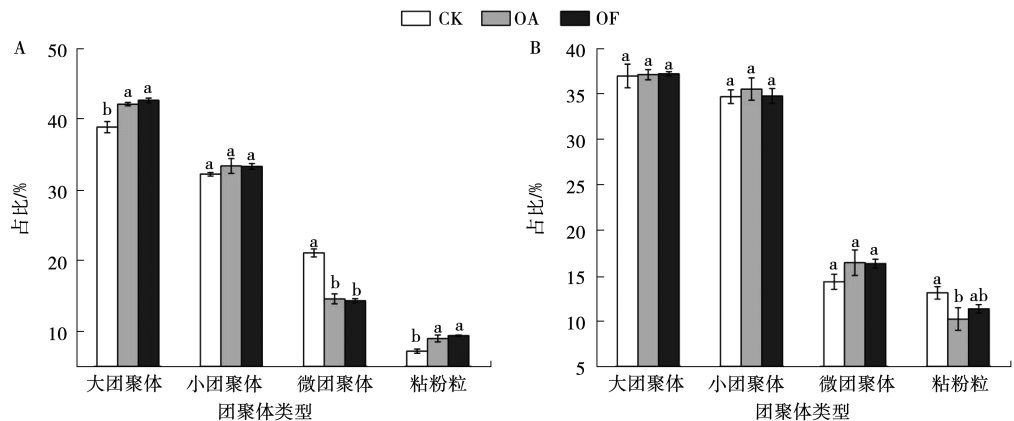


图 1 施用乙酸和牛粪对棉田 0~20 cm(A)和 20~40 cm(B)土层土壤团聚体构成的影响  
注：不同小写字母代表不同处理间差异显著(P<0.05)。同下。

2.1.2  $WR_{0.25}$  值 由图 2 可知，在 0~20 cm 土层中，各施肥处理  $WR_{0.25}$  所占比例为 70.92%~77.03%，与 CK 相比，OA 和 OF 施肥处理显著提高了  $WR_{0.25}$  值，增幅为 6.20%和 6.87%。

在 20~40 cm 土层中， $WR_{0.25}$  所占比例为 71.98%~72.57%，但各处理组间差异并不显著。

团聚体的 GWD 值在 0~20 cm 土层中的变化范围为 0.73~0.81。与 CK 相比，OA 和 OF 施肥处理显著提高了 GWD 值，增幅分别为 9.72%和 9.41%。

在 20~40 cm 土层中，GWD 值的变化范围为 1.16~1.17，但各处理组间差异不显著。

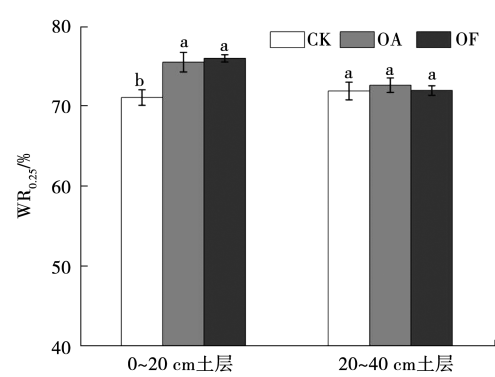


图 2 施用乙酸和牛粪对棉田土壤团聚体  $WR_{0.25}$  的影响

2.2 施用乙酸和牛粪对土壤团聚体稳定性的影响

2.2.1 平均质量直径(MWD) 由图 3 可知，在 0~20 cm 土层中，团聚体的 MWD 值的变化范围为 1.17~1.25。与 CK 相比，OA 和 OF 施肥处理下显著提高了 MWD 的值，增幅分别为 5.87%和 6.71%。

在 20~40 cm 土层中，MWD 值的变化范围为 1.16~1.17，但各处理组间差异不显著。

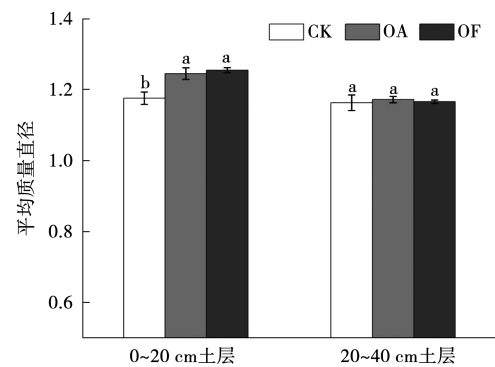


图 3 施用乙酸和牛粪对棉田土壤团聚体平均质量直径的影响

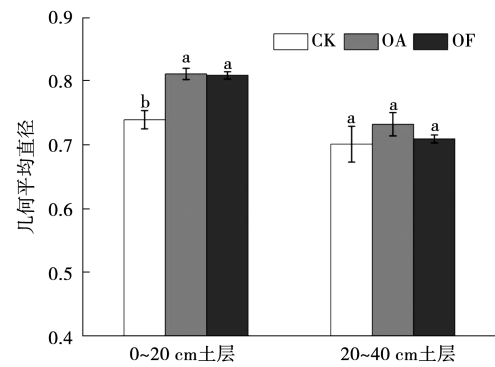


图 4 施用乙酸和牛粪对棉田土壤团聚体几何平均直径的影响

2.2.2 几何平均直径(GMD) 由图 4 可知，团

### 2.3 施用乙酸和牛粪对土壤团聚体中有机碳(SOC)含量的影响

在 0~20 cm 土层中,大团聚体、小团聚体、微团聚体以及粘粉粒中的有机碳(SOC)含量范围为 1.33~1.71  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、2.15~2.40  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、3.09~3.37  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.90~1.24  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与 CK 相比,OA 处理下显著提高了大团聚体、微团聚体和粘粉粒中的 SOC 含量,增幅分别为 17.50%、5.50% 和 26.94%,OF 处理显著提高了各粒级团聚体中 SOC 的含量,增幅分别为 28.00%、11.65%、8.95%

和 37.64%(图 5A)。

在 20~40 cm 土层中,大团聚体、小团聚体、微团聚体以及粘粉粒中的 SOC 含量范围为 1.12~1.42  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、1.22~1.32  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、2.28~2.46  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.79~1.13  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与 CK 相比,OA 和 OF 处理显著增加了大团聚体中的 SOC 含量,增幅分别为 19.68% 和 27.98%;牛粪的施入(OF)显著提高了微团聚体和粘粉粒中的 SOC 含量,增幅分别为 7.59% 和 42.62%(图 5B)。

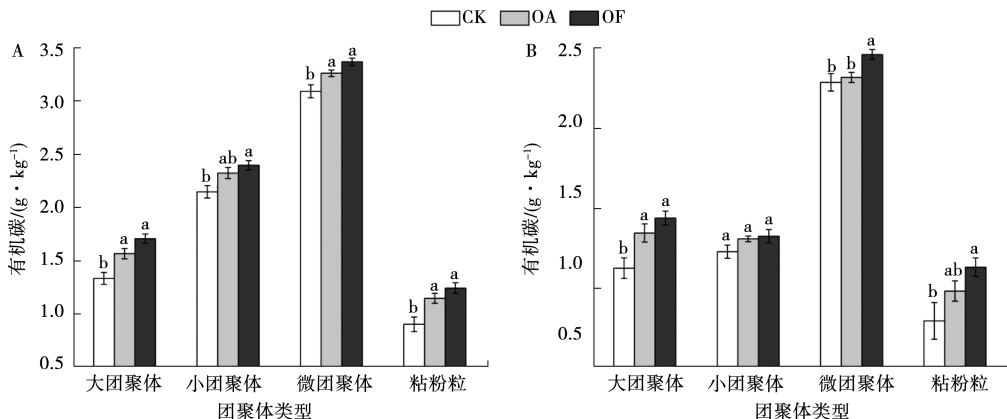


图 5 施用乙酸和牛粪对棉田 0~20 cm(A)和 20~40 cm(B)土层土壤团聚体中有机碳含量的影响

### 2.4 施用乙酸和牛粪对土壤团聚体中可溶性有机碳(DOC)含量的影响

在 0~20 cm 土层中,大团聚体、小团聚体和微团聚体以及粘粉粒中的可溶性有机碳(DOC)含量变化范围为 14.61~17.66  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、24.64~29.87  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、21.62~24.77  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 13.80~16.53  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与 CK 处理相比,OA 和 OF 处理显著提高了大团聚体内 DOC 含量,增幅分别为 18.53% 和 20.85%;牛粪的施入(OF)显著提高了小团聚体、微团聚体和粘粉粒中的 DOC 含量,增幅为 14.58%、21.21% 和 19.81%(图 6A)。

在 20~40 cm 土层中,大团聚体、小团聚体和微团聚体以及粘粉粒中 DOC 的含量变化范围为 11.34~14.47  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、23.29~29.50  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、21.26~23.50  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 12.56~13.46  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与 CK 处理相比,OA 处理显著提高了大团聚体和微团聚体中 DOC 的含量,增幅为 25.21% 和 15.45%;牛粪的施入(OF)同样提高了大团聚体、小团聚体和微团聚体中 DOC 的含量,增幅为 27.54%、10.56% 和 26.67%;各处理粘粉粒中 DOC 含量差异不显著(图 6B)。

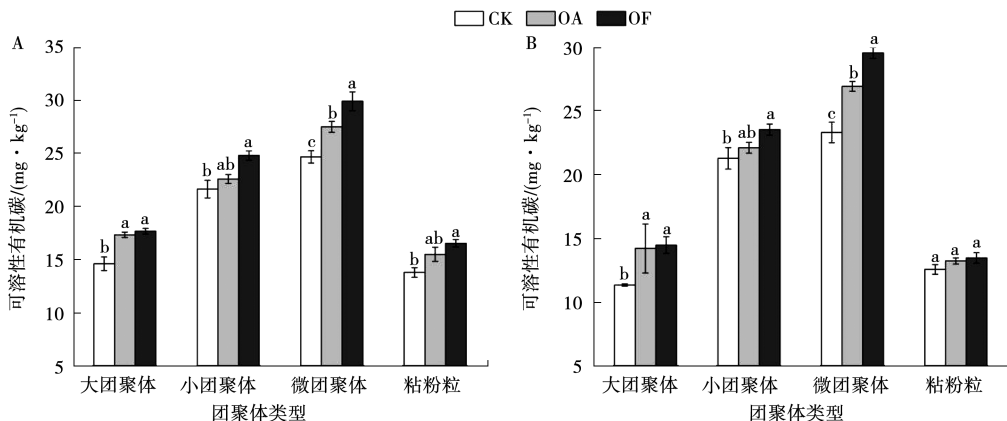


图 6 施用乙酸和牛粪对棉田 0~20 cm(A)和 20~40 cm(B)土层土壤团聚体中可溶性有机碳含量的影响



2.5 施用乙酸和牛粪对土壤团聚体中微生物量碳(MBC)含量的影响

在 0~20 cm 土层中,大团聚体、小团聚体和、微团聚体以及粘粉粒中微生物量碳(MBC)的含量变化范围为 18.31~27.84 mg·kg<sup>-1</sup>、23.05~28.98 mg·kg<sup>-1</sup>、32.43~36.61 mg·kg<sup>-1</sup>和 11.18~17.17 mg·kg<sup>-1</sup>。与 CK 处理相比,OA 施肥处理显著提高了大团聚体、小团聚体内 MBC 的含量,增幅分别为 26.32%和 19.16%,OF 处理显著增加了大团聚体、小团聚体、微团聚体和粘粉粒中的 MBC 含量,增幅分别为 52.02%、25.09%、53.49%和

28.84%(图 7A)。

在 20~40 cm 土层中,大团聚体、小团聚体和微团聚体以及粘粉粒中 MBC 的含量变化范围为 7.82~16.59 mg·kg<sup>-1</sup>、14.79~15.59 mg·kg<sup>-1</sup>、12.70~23.44 mg·kg<sup>-1</sup>和 7.08~14.40 mg·kg<sup>-1</sup>。与 CK 处理相比,乙酸的施入(OA)显著提高了各粒级团聚体中 MBC 的含量,增幅分别为 97.44%、24.81%、65.29%和 66.15%;牛粪的施入(OF)同样显著提高了各粒级团聚体中 MBC 含量,增幅为 111.94%、32.42%、84.59%和 103.38%(图 7B)。

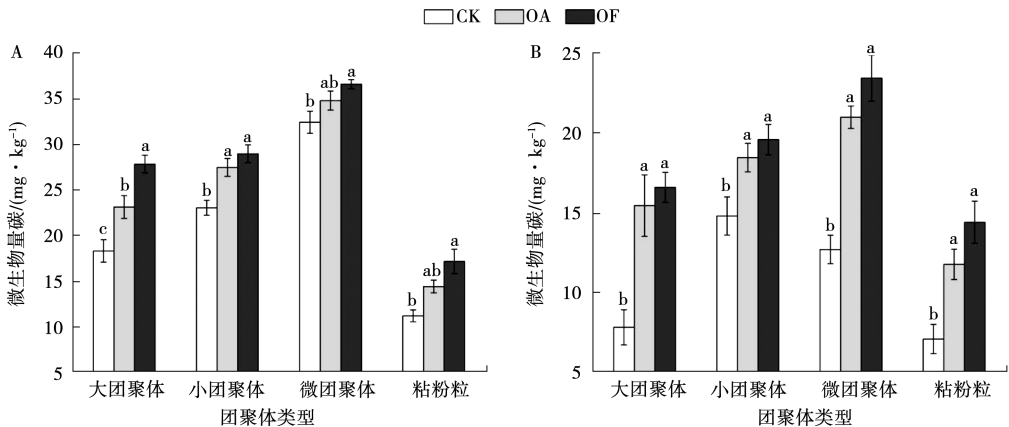


图 7 施用乙酸和牛粪对棉田 0~20 cm(A)和 20~40 cm(B)土层土壤团聚体中不同粒级微生物量碳含量的影响

3 讨论

3.1 施用乙酸和牛粪对土壤团聚体构成及 WR<sub>0.25</sub>的影响

稳定的团聚体结构是保证土壤养分可持续发展的因素,长期施肥可以改变土壤团聚体物理结构性质<sup>[24]</sup>。本研究发现,乙酸和牛粪的施入均增加了 0~20 cm 土层中大团聚体、粘粉粒的质量占比以及 WR<sub>0.25</sub> 含量,其中施入牛粪的效果最为显著,因为长期的作物种植导致土壤粘粒及粉粒的质量占比大大减少,而乙酸的施入能增加促进根系生长,增加微生物可用能源,增加微生物活性并促进其分泌多糖等团聚体胶结物质,从而为大团聚体的形成提供前提与基础;牛粪的施入为土壤提供了更全面的营养,丰富微生物群落,为微生物提供有效养料,从而增加微生物的分泌物,促进团聚体胶结物质的形成,提高大团聚体的质量占比,进而提升 WR<sub>0.25</sub> 含量,这与 Khan 等<sup>[25]</sup> 研究结果相似。由于团聚体粒径越小越稳定,所以乙酸和牛粪的施入为土壤提供的外源碳,将会被固定在粘粉粒中,其中牛粪的含碳量较大,效果较为明显。

3.2 施用乙酸和牛粪对土壤团聚体稳定性的影响

土壤团聚体的平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)可以为衡量土壤团聚体的稳定性提供依据,不同施肥方式对土壤团聚体的影响也有所不同<sup>[26]</sup>。本研究结果显示,乙酸和牛粪的施入对 0~20 cm 土层中团聚体 MWD 和 GMD 均存在显著影响,可能因为长期的作物耕种及施肥,导致土壤表层的大团聚体遭到破坏,乙酸和牛粪的施入提高了有机碳(SOC)含量,而 SOC 可作为土壤胶结物质,提高了表层团聚体 MWD 和 GMD,增加了团聚体稳定性。乙酸的施入刺激了表层土壤中植物根系生长、提高根系长度及密度并促进根系分泌物,从而提升了团聚体稳定性;牛粪的长期施入使得棉田 SOC 含量有所提高,SOC 作为胶结剂促进了团聚体的稳定,同时稳定的团聚体也为 SOC 提供了物理保护<sup>[27]</sup>。而相较于乙酸,牛粪的养分含量更为丰富,对团聚体稳定性的影响更为明显<sup>[28]</sup>。

### 3.3 施用乙酸和牛粪对土壤团聚体中有机碳(SOC)含量的影响

本研究结果显示,在表层土壤中,乙酸和牛粪的施入能显著影响 SOC 含量,这与宋红梅等<sup>[29]</sup>研究结果类似。其中,在 0~20 cm 土层中,牛粪的施入对各粒径团聚体中 SOC 均有显著影响,归因于牛粪的养分较为全面,且施入年份较长,为各粒径团聚体中 SOC 的贮存提供了条件。乙酸的施入显著提高了大团聚体、小团聚体中的 SOC 含量,这可能归因于乙酸的施入更多作用于根系密度及根系微生物,团聚体会将未被分解的根系残渣包裹并由微生物将其转化为 SOC,所以仅对粒径较大的团聚体有促进作用。在 20~40 cm 土层中,乙酸的施入对大团聚体中的 SOC 含量产生影响,其原因为土层深度的增加,根系密度及其分泌物降低,且深层土壤微生物活性的降低,使得乙酸的施入仅促进了大团聚体内 SOC 的积累;牛粪的施入对大团聚体、微团聚体以及粘粉粒中的 SOC 含量都有显著影响,可能是因为随土层深度的增加,导致土壤碳含量的减少,以至于粘粉粒将 SOC 固定形成微团聚体后,直接通过胶结物质固存在大团聚体中。所以相较于乙酸,牛粪的施入对团聚体中 SOC 含量的影响效果更为明显。

### 3.4 施用乙酸和牛粪对土壤团聚体中可溶性有机碳(DOC)含量的影响

DOC 作为土壤活性有机碳组分,在碳循环中有着重要作用<sup>[30]</sup>。本研究结果显示,0~20 cm 土层中 DOC 含量较高,这与贺美等<sup>[31]</sup>和 Yano 等<sup>[32]</sup>研究结果相同,因为表层土壤通常更容易接收到植物的残留物,包括根系分泌物、根系残留物和落叶等,这些植物残留物中含有易降解的 SOC,从而增加了 DOC 含量<sup>[33-34]</sup>。Huang 等<sup>[33]</sup>研究表明,团聚体内 DOC 的含量与团聚体粒径的质量百分比呈正相关趋势。本研究中,乙酸和牛粪的施入均显著提高了大团聚体以及粘粉粒中 DOC 含量,且二者的施入同样增加了该团聚体的质量占比,说明 DOC 含量与团聚体粒径质量占比可能存在关系。与黄诗蔚等<sup>[34]</sup>研究结果相同,有机酸的施入能提高大团聚体的质量占比,改善土壤孔隙度,为植物根系的生长提供条件,提高了根系残渣及其分泌物,稳定了土壤团聚体结构,增加了粘粉粒可吸附的化合物,从而提高了大团聚体和粘粉粒对 DOC 的物理保护;牛粪的施入可以为土壤提供更全面的养分,使得微生物作为分

解者能够有效利用这些物质作为生长和代谢的能源,产生利于有机质分解的胞外酶,从而提高 DOC 的含量<sup>[34]</sup>。贺云龙等<sup>[35]</sup>研究指出,外源碳的施入对土壤微生物的活性存在强烈的正相关趋势,外源碳的施入量越大,微生物的活性越强,对 DOC 的转化率也就越大,所以相较于乙酸而言,牛粪的含碳率更大,施入效果也更加明显。

### 3.5 施用乙酸和牛粪对土壤团聚体中微生物量碳(MBC)含量的影响

MBC 作为对土壤肥力变动最敏感的指标<sup>[36]</sup>。本研究结果显示,MBC 含量在表层土壤中的含量远大于深层土壤中 MBC 含量,这与邓仁菊等<sup>[37]</sup>研究结果相同,可能因为表层土壤中微生物的数量及活性均高于深层土壤。在 0~20 cm 土层中,乙酸和牛粪均提高了大团聚体和粘粉粒下 DOC 的含量,而 DOC 作为微生物可直接利用的能源,能够直接推动 MBC 的积累。其中,乙酸的施入能调节土壤 pH,增加了微生物群落数量,从而提高 MBC 的含量<sup>[38]</sup>。Ghosh 等<sup>[39]</sup>研究指出,长期施用牛粪更能促进作物根系分泌物和土壤中 DOC 含量的增长,其原因是牛粪的施入能为微生物提供更全面的营养,促进对有效养分的矿化,为 MBC 的储存提供条件。在 20~40 cm 土层中,乙酸和牛粪的施入对团聚体各粒级中 MBC 的含量均有显著影响,其中,乙酸的施入可能增加了深层土壤中的根系分泌物和残留物,能够为微生物提供更充足的养料,进而提高了 MBC 的转化;牛粪的施入为底层微生物群落提供了更稳定和更容易获取的营养物质,为其生长代谢提供能源,促进微生物产生 MBC,所以相较于乙酸,牛粪的施入促进效果会更加显著<sup>[26]</sup>,说明牛粪的养分含量更加全面,是土壤培肥的优质有机物料。鉴于牛粪价格便宜且施用后的效果更明显,其来源及施用方法更加便捷,相较于乙酸更适用于当地农户。由于本研究中未测定乙酸和牛粪的施入对棉田土壤中微生物群落产生的影响,所以后续可通过研究微生物群落的结构组成及其功能基因的变化,深入研究乙酸和牛粪施入对土壤团聚体结构及有机碳组分产生的影响。

## 4 结论

在 0~20 cm 土层中,乙酸和牛粪的施入显著增加了棉田土壤团聚体中大团聚体以及粘粉粒的质量占比、 $WR_{0.25}$  和 MWD,降低了微团聚体的质量占比。乙酸的施入显著提高了大团聚体和微团

聚体中 DOC 的含量,以及大团聚体和小团聚体中 MBC 的含量。牛粪的施入显著提高了大团聚体、小团聚体、微团聚体以及粘粉粒中 DOC 的含量,以及大团聚体、小团聚体、微团聚体以及粘粉粒中 MBC 的含量。在 20~40 cm 土层中,乙酸的施入显著降低了粘粉粒的质量占比。乙酸的施入显著提高了大团聚体、微团聚体中 DOC 的含量,以及大团聚体、小团聚体、微团聚体以及粘粉粒中 MBC 的含量。牛粪的施入显著提高了大团聚体、小团聚体、微团聚体中 DOC 的含量,以及大团聚体、小团聚体、微团聚体中 MBC 的含量。因此,牛粪的施入更能促进土壤大团聚体的形成,增加团聚体稳定性,提高其对 SOC 的保护作用,从而增加各团聚体内 SOC、DOC 和 MBC 的含量。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG W J, XU M G, WANG X J, et al. Effects of organic amendments on soil carbon sequestration in paddy fields of subtropical China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(4): 457-470.
- [2] TIFAFI M, GUENET B, HATTÉ C. Large differences in global and regional total soil carbon stock estimates based on soilgrids, HWSO, and NCSCD: intercomparison and evaluation based on field data from USA, England, Wales, and France [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2018, 32(1): 42-56.
- [3] RASMUSSEN C, HECKMAN K, WIEDER W R, et al. Beyond clay: towards an improved set of variables for predicting soil organic matter content [J]. *Biogeochemistry*, 2018, 137(3): 297-306.
- [4] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [5] CROW S E, LAJTHA K, FILLEY T R, et al. Sources of plant-derived carbon and stability of organic matter in soil: implications for global change [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(8): 2003-2019.
- [6] KARAMI A, HOMAEI M, AFZALINIA S, et al. Organic resource management: Impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 148: 22-28.
- [7] 张曼夏,季猛,李伟,等.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.
- [8] O'ROURKE S M, ANGERS D A, HOLDEN N M, et al. Soil organic carbon across scales [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(10): 3561-3574.
- [9] 谭文峰,朱志锋,刘凡,等.江汉平原不同土地利用方式下土壤团聚体中有机碳的分布与积累特点 [J]. *自然资源学报*, 2006, 21(6): 973-980.
- [10] PULLEMAN M M, MARINISSEN J C Y. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture

- and arable soil [J]. *Geoderma*, 2004, 120(3/4): 273-282.
- [11] SIX J, CALLEWAERT P, LENDERS S, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6): 1981-1987.
- [12] 张国娟. 干旱区农田添加有机质对土壤特性及棉花氮素利用根际过程的影响 [D]. 石河子: 石河子大学, 2020.
- [13] GUO Z L, ZHANG L C, YANG W, et al. Aggregate stability under long-term fertilization practices: the case of eroded ultisols of south-central China [J]. *Sustainability*, 2019, 11(4): 1169.
- [14] 翟车宇, 骆静梅, 刘昌杰, 等. 长期施用有机肥对松嫩平原盐碱土壤盐碱性质和化学计量比的影响 [J]. *中国农业科技导报*, 2024, 26(2): 153-161.
- [15] 贾渊. 荒漠草原植物根分泌物及其有机酸组分对土壤中微生物及养分的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2019.
- [16] 陆红飞, 乔冬梅, 齐学斌, 等. 外源有机酸对土壤 pH 值、酶活性和 Cd 迁移转化的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(3): 542-553.
- [17] 杨伯祥, 王治斌. 适宜间套种植的短果枝棉花新品种蜀棉 3 号 [J]. *中国棉花*, 2004, 31(3): 25.
- [18] GARTZIA-BENGOETXEA N, GONZÁLEZ-ARIAS A, MERINO A, et al. Soil organic matter in soil physical fractions in adjacent semi-natural and cultivated stands in temperate Atlantic forests [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(8): 1674-1683.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] WU J, JOERGENSEN R G, POMMERENING B, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction an automated procedure [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22(8): 1167-1169.
- [21] 谢芳, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 长期施肥对棕壤微生物量碳和水溶性有机碳的影响 [J]. *农业科技与装备*, 2008(3): 10-13.
- [22] 周虎, 吕貽忠, 杨志臣, 等. 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): 1973-1979.
- [23] 邱莉萍, 张兴昌, 张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布 [J]. *生态学报*, 2006(2): 364-372.
- [24] SODHI G P S, BERI V, BENBI D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103(2): 412-418.
- [25] KHAN F U, KHAN A A, LI K, et al. Influences of long-term crop cultivation and fertilizer management on soil aggregates stability and fertility in the Loess Plateau, Northern China [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22(2): 1446-1457.
- [26] ZHOU W X, LI C J, ZHAO W W, et al. Spatial distributions of soil nutrients affected by land use, topography and their interactions, in the Loess Plateau of China [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2024, 12(1): 227-239.
- [27] EDMEADES D C. The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: a review [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 66(2): 165-180.
- [28] 孙燕, 王建, 王全九, 等. 生化黄腐酸对盐碱土水盐运移特

- 征的影响[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 302-310.
- [29] 宋红梅, 高玉, 员明鑫, 等. 长期施肥对旱塬麦田土壤大团聚体有机碳组分及冬小麦产量的影响[J/OL]. 环境科学: 1-14 (2023-11-01) [2024-06-28]. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202308046>.
- [30] DEBASISH-SAHA, KUKAL S S, BAWA S S. Soil organic carbon stock and fractions in relation to land use and soil depth in the degraded shivaliks hills of lower Himalayas [J]. Land Degradation & Development, 2014, 25(5): 407-416.
- [31] 贺美, 王迎春, 王立刚, 等. 深松施肥对黑土活性有机碳氮组分及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 446-456.
- [32] YANO Y, McDOWELL W H, ABER J D. Biodegradable dissolved organic carbon in forest soil solution and effects of chronic nitrogen deposition [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(11/12): 1743-1751.
- [33] HUANG R, LAN M L, LIU J, et al. Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: the role of different straws returning[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(36): 27942-27952.
- [34] 黄诗蔚, 张子颖, 钟小琳, 等. 酸浸米糠协同脱硫石膏驱动赤泥成土[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(5): 1712-1726.
- [35] 贺云龙, 齐玉春, 彭琴, 等. 外源碳输入对陆地生态系统碳循环关键过程的影响及其微生物学驱动机制[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 358-366.
- [36] GUGGENBERGER G, ZECH W, HAUMAIER L, et al. Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soils: II. CPMAS and solution  $^{13}\text{C}$  NMR analysis[J]. European Journal of Soil Science, 1995, 46(1): 147-158.
- [37] 邓仁菊, 尹旺, 罗密, 等. 不同有机肥对甘薯产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 热带作物学报, 2024, 45(2): 351-361.
- [38] LIANG C, GUTKNECHT J L M, BALSER T C. Microbial lipid and amino sugar responses to long-term simulated global environmental changes in a California annual grassland [J]. Frontiers in Microbiology, 2015, 6: 385.
- [39] GHOSH B N, MEENA V S, SINGH R J, et al. Effects of fertilization on soil aggregation, carbon distribution and carbon management index of maize-wheat rotation in the north-western Indian Himalayas [J]. Ecological Indicators, 2019, 105: 415-424.

## Effects of Acetic Acid and Cattle Manure Application on Soil Aggregates and Organic Carbon Composition of Cotton Fields in Arid Zones

PAN Mengyue, ZHANG Shanhang, WANG Bao, HE Mingming, LI Peijin, QIN Jinxin, SHENG Jiandong, LIU Yunhua

(College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** In order to promote soil fertilization and efficient utilization of organic fertilizers in cotton fields in arid areas, a 6-year field experiment was conducted in Shawan County, Tacheng Prefecture, Xinjiang Uygur Autonomous Region. Three treatments were set up, namely control, application of  $40\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  acetic acid, and application of  $15\ 000\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  cow manure. The effects of acetic acid and cow manure on the composition, stability, and organic carbon components of soil aggregates in cotton fields in arid areas of Xinjiang were studied. The results showed that both acetic acid and cattle manure application significantly increased the mass percentage,  $\text{WR}_{0.25}$  and geometric mean mass diameter (GMD) of macroagglomerates ( $>2.000\text{ mm}$ ) and sticky flour grains ( $<0.053\text{ mm}$ ) in the soil layer  $0-20\text{ cm}$ , and increased the organic carbon, soluble organic carbon, and microbial amount of organic carbon, soluble organic carbon, and microbial amount of microorganisms in macroagglomerates, microagglomerates ( $0.053-0.250\text{ mm}$ ), and sticky flour grains. The content of organic carbon in clay meal was the most significant response to acetic acid application with an increase of  $26.94\%$ , while the content of microbial carbon in microaggregate was the most significant response to cattle manure application with an increase of  $53.49\%$ . In the soil layer from  $20-40\text{ cm}$ , the application of acetic acid and cattle manure significantly increased the content of organic carbon, soluble organic carbon and microbial carbon in macroaggregates, and the microbial carbon content in clay meal was the most significant in response to the application of acetic acid and cattle manure, with an increase of  $66.15\%$  and  $103.38\%$ , respectively. The application of acetic acid and cattle manure could increase the mass ratio of macroaggregates in soil aggregates, improve the stability of aggregates, and increase the contents of organic carbon, soluble organic carbon and microbial carbon in macroaggregates and sticky powder particles.

**Keywords:** cotton field; acetic acid; cattle manure; soil aggregate structure; active organic carbon fraction