

董林林, 盛雪雯, 严凯, 等. 耕作方式对稻田土壤团聚体构成和水溶性有机碳的影响[J]. 山西农业科学, 2025, 53(4):56-63.

DONG L L, SHENG X W, YAN K, et al. Effect of tillage method on soil aggregates composition and water-soluble organic carbon in paddy soil[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(4):56-63.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2025.04.07

耕作方式对稻田土壤团聚体构成和水溶性有机碳的影响

董林林^{1,2}, 盛雪雯³, 严凯³, 陆长婴^{1,2}, 施林林^{1,2}, 王海候^{1,2}, 吴正贵³

(1. 国家土壤质量相城观测实验站, 江苏 苏州 215155; 2. 苏州市农业科学院, 江苏 苏州 215105;

3. 苏州市农业技术推广中心, 江苏 苏州 215008)

摘 要: 耕作方式是影响土壤团聚体构成的重要农业措施, 对土壤结构和有机碳(SOC)稳定性的影响意义重大。研究设置了稻麦旋耕(RT)和稻麦免耕(NT)2种模式, 通过对比2 a后不同耕作方式间土壤团聚体有机碳构成和水溶性有机碳(WSOC)含量的差异, 以揭示不同耕作方式下土壤水溶性有机碳和团聚体有机碳的变化。结果表明, 稻麦免耕的土壤有机碳含量比稻麦旋耕高3.36%, 水溶性有机碳含量及其占比分别较稻麦旋耕低16.91%和19.52%; 稻麦免耕处理下>2 mm大团聚体占比最高, 为54.48%, 而稻麦旋耕处理下0.25~2.00 mm中间团聚体占比最高, 为49.13%, 稻麦旋耕和稻麦免耕的团聚体平均质量直径分别为1.07、1.49 mm, 稻麦免耕处理的团聚体平均质量直径显著高于稻麦旋耕处理; 稻麦免耕处理下>2 mm大团聚体有机碳占比最高, 为57.84%, 而稻麦旋耕处理下0.25~2.00 mm中间团聚体占比最高, 为48.50%, 稻麦免耕更有利于提升土壤大团聚体有机碳含量, 稻麦旋耕更有利于提高中间团聚体有机碳占比; 水溶性有机碳含量与大、中粒级团聚体间呈显著负相关, 说明水溶性有机碳的溶出并不利于土壤大于0.25 mm团聚体的形成。相对而言, 稻麦免耕更有利于土壤大团聚体的形成和有机碳稳定性的提升, 是提升土壤团聚体结构和有机碳稳定性的有效耕作方式。

关键词: 旋耕; 免耕; 水溶性有机碳; 土壤团聚体

中图分类号: S511

文献标识码: A

文章编号: 1002-2481(2025)04-0056-08

Effect of Tillage Method on Soil Aggregates Composition and Water-Soluble Organic Carbon in Paddy Field

DONG Linlin^{1,2}, SHENG Xuewen³, YAN Kai³, LU Changying^{1,2},
SHI Linlin^{1,2}, WANG Haihou^{1,2}, WU Zhenggui³

(1. National Experimental Station for Soil Quality in Xiangcheng, Suzhou 215155, China;

2. Suzhou Academy of Agricultural Sciences, Suzhou 215105, China;

3. Suzhou Agricultural Technology Promotion Center, Suzhou 215008, China)

Abstract: The cultivation method is an important agricultural measure that affects the composition of soil aggregates and has significant implications for soil structure and organic carbon(SOC) stability. In this study, two modes of rotary tillage(RT) and no-tillage(NT) for rice and wheat were set, by comparing the differences in soil aggregate organic carbon composition and water-soluble organic carbon(WSOC) content between different tillage methods after 2 years to reveal the changes in soil water-soluble organic carbon(WSOC) and aggregate organic carbon under tillage methods. The results showed that the soil organic carbon of NT was 3.36% higher than that of RT. The content and proportion of WSOC in NT were lower than those in RT by 16.91% and 19.52%, respectively. Under the NT treatment, the proportion of large aggregates(>2 mm) was the highest,

收稿日期: 2024-10-29

基金项目: 苏州市农业科技创新项目(SNG2022071); 苏州市碳达峰碳中和科技重点专项(ST202228); 江苏省碳达峰碳中和专项(BE2022308)

作者简介: 董林林, 副研究员, 博士, 主要从事农业耕作与土壤培肥研究, E-mail: jinjindoudou2005@163.com

通信作者: 吴正贵, 高级农艺师, 主要从事农作物栽培研究与技术推广, E-mail: wuzhenggui@163.com

accounting for 54.48%, while under the RT treatment, the proportion of intermediate aggregates(0.25~2 mm) was the highest, accounting for 49.13%. The mean weight diameter of aggregates under the RT and NT treatments was 1.07 mm and 1.49 mm, respectively. The mean weight diameter of aggregates under the NT treatment was significantly higher than that under the RT treatment. Under the NT treatment, the proportion of organic carbon in >2 mm large aggregate was the highest, accounting for 57.84%. While, under the RT treatment, the proportion of organic carbon in 0.25~2 mm aggregate was the highest, accounting for 48.50%. No tillage for rice and wheat was more conducive to increasing the content of organic carbon in soil large aggregates, while rotary tillage for rice and wheat was more conducive to increasing the proportion of organic carbon in middle aggregates. The significant negative correlation between WSOC and large and medium sized aggregates indicated that the dissolution of WSOC was not conducive to the formation of soil aggregates larger than 0.25 mm. Relatively, NT was more conducive to the formation of soil large aggregates and the improvement of organic carbon stability, and was an recommended effective tillage method to enhance soil aggregate structure and SOC stability.

Keywords: rotary tillage; no-tillage; water-soluble organic carbon; soil aggregate

土壤有机碳库是陆地生态系统最大的碳库^[1],是关系土壤肥力和全球气候变化的关键因素。土壤有机碳的稳定性与土壤肥力、养分储备和作物生长密切相关,且受耕作方式、肥料类型和灌溉等人为活动的影响发生变化^[2-3]。土壤团聚体(Soil aggregate)是有机碳存储的基础场所,更是衡量土壤有机碳库稳定性最可靠的指标^[4-5]。团聚体的形成通过化学吸附和物理保护作用阻碍微生物对有机碳的降解及微生物残体碳的累积,土壤有机碳与矿物、微生物间相互作用的改变,影响土壤水溶性有机碳(water-soluble organic carbon, WSOC)的溶出和有机碳的周转^[3,6]。土壤团聚体构成中,大团聚体的占比决定了土壤的固碳功能和养分储备,在实现农业固碳和丰产增效目标中发挥着积极作用^[6-7]。但耕作方式对土壤团聚体构成和有机碳稳定性的影响研究结果尚不统一。

耕作方式是众多农业生产措施中影响土壤有机碳变化最为重要的因素之一。免耕有利于土壤大团聚体的形成并促进有机碳累积,被认为是促进农田生态系统固碳减排的有效措施;旋耕对土壤产生一定程度的破坏,但可降低土壤紧实度、更利于作物根系生长并增加深层土壤有机碳^[8-9]。王峻等^[10]研究发现,免耕+秸秆还田更有利于增加土壤团聚体有机碳,特别是大团聚体和中间团聚体的有机碳含量。武均等^[11]借助12 a的保护性耕作长期定位试验,研究了耕作方式对土壤团聚体有机碳分布的影响,结果表明,免耕方式下 ≥ 0.25 mm土壤团聚体占比和有机碳含量均高于传统耕作。黄羽翔等^[12]研究指出,长期机械化耕作下,土壤团聚体破碎率随耕作时间延长呈增加趋势,土壤结构稳定性呈逐渐降低趋势。WANG等^[13]研究表明,

长达10 a的秸秆还田+免耕处理增加了0~10 cm土壤含水量和 >0.25 mm土壤团聚体,使得玉米的根系、长度等形态学指标优于传统耕作。车延静等^[14]研究表明,秸秆还田处理下深松比免耕的耕作方式更能增加土壤有机碳和溶解性有机碳,但免耕秸秆还田更有利于提升土壤有机碳稳定性。熊瑞等^[15]研究表明,秸秆还田搭配深耕比免耕更有利于提高南方双季稻区土壤团聚体稳定性和有机碳,提高土壤质量。综上,耕作方式对土壤团聚体有机碳构成及水溶性有机碳变化的影响结果并不统一,有待开展更加深入的相关研究。

太湖地区自古有“鱼米之乡”的美誉,稻麦二熟是该区作物种植的主要轮作制度,稻麦旋耕是该区农业种植最普遍的耕作方式。本研究于2019年水稻季在太湖地区开展了稻麦轮作定位试验,通过采集并分析2021年的稻麦旋耕和稻麦免耕2种耕作方式下秸秆还田土壤团聚体和水溶性有机碳的变化特征,对比研究耕作方式在改变土壤团粒结构和有机碳活性中的作用,旨在为采用适宜的耕作方式改善土壤结构、促进土壤固碳培肥提供实践经验和理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验在苏州市相城区望亭镇北苏州农业科学院(120°25'26"E, 31°27'16"N)内进行。该区属亚热带季风气候,年平均气温15.7℃,年均降雨量1 128 mm, ≥ 10 ℃有效积温4 947℃。稻麦二熟制是该区主要的种植制度。土壤类型为重壤质黄泥土,壤土,0~20 cm土层土壤有机质含量为33.83 g/kg,全氮含量为1.82 g/kg,速效磷含量为36.55 mg/kg,

速效钾含量为 136.23 mg/kg, pH 值为 6.19。

1.2 试验设计

2019 年设稻麦 2 季免耕直播 (NT) 和稻麦 2 季旋耕 (RT) 2 个处理, 稻麦二季秸秆均全量还田。稻麦旋耕处理的田块面积 1 503.5 m², 小麦旋耕后撒播、水稻季旋耕后机插秧。稻麦免耕直播处理的田块面积为 1 150 m², 稻麦均人工撒播。稻麦旋耕处理的秸秆采用机械切碎 5~10 cm 后旋耕还田, 还田深度约 15 cm, 稻麦免耕处理的秸秆采用机械切碎 5~10 cm 后直接还田, 2 种处理稻麦根茬高度均为 5 cm 左右。

1.3 田间管理

2 种处理作物全生育期田间管理一致。稻麦旋耕处理于每年 6 月初进行水稻机插秧, 栽插密度为 30 cm×12 cm; 免耕处理直播水稻的播种量为 60.0 kg/hm², 10 月底收获。水稻品种为苏香梗 100, 2 种处理氮磷钾肥用量相同, 氮肥折合纯氮为 270 kg/hm², 按基肥: 蘖肥: 穗肥=3:4:3 施用, 其中, 分蘖肥按 4:6 分 2 次施入; 磷肥 (67.5 kg/hm²) 作基肥一次性施入; 钾肥 (67.5 kg/hm²) 按基肥、穗肥各 1/2 施入。

1.4 测定项目及方法

2021 年水稻收获后采集 0~20 cm 土壤样品 1.0 kg, 每个处理 4 次重复。所有样品均分 2 份, 一份风干, 剔除草根等杂质, 研磨过 0.25、0.15 mm 尼龙筛; 另一份新鲜土样冷藏, 用于测定土壤水溶性有机碳、氮组分。称取 5.0 g 新鲜样品加入 50 mL 去离子水 ($m:V=1:10$) 在 250 r/min 振荡 30 min, 再 5 000 r/min 离心 10 min, 过 0.45 μm 滤膜, 部分上清液借助 TOC 仪测定水溶性有机碳 (WSOC) 及水溶性氮含量 (WSN)^[16]。另采集部分原状土壤, 风干后过 2、0.25、0.053 mm 筛网, 得到 >2.00、0.25~2.00、0.053~0.250 mm 和 <0.053 mm 粒级土壤, 称质量后按比例称量干土 50.0 g, 采用 DIK-2012 土壤团聚体分析仪进行团聚体湿筛分级, 得到 >2 (大团聚体)、0.25~2.00 (中间团聚体)、0.053~0.25 (微团聚体) 和 <0.053 mm (粉黏粒) 等团聚体组分^[17]。所有组分于 60 °C 烘干称质量、磨细过 0.15 mm 尼龙筛。采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳 (SOC) 和团聚体有机碳含量, 测定方法参考《土壤农业化学分析》^[17-18]。

各团聚体质量分数=该团聚体质量/土壤样

$$\text{品总质量} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{土壤团聚体有机碳贡献率} = \text{各团聚体有机碳} / \text{总有机碳} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{平均质量直径 (MWD)} = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i W_i \quad (3)$$

式中, n 为粒级分组组数, $\bar{X}_i$ 为粒级组分平均直径, W_i 为粒级质量分数。

1.5 数据分析

单因素方差分析用于检验不同耕作方式下土壤团聚体有机碳和水溶性有机碳之间的差异, 确定不同耕作方式对稻田土壤团聚体有机碳构成和水溶性有机碳的影响。Pearson 相关分析用于检验水溶性有机碳含量与土壤团聚体占比及有机碳含量之间的相关性 ($P<0.05$)。数据处理与分析采用 Excel 和 SPSS 软件完成。

2 结果与分析

2.1 耕作方式对土壤水溶性有机碳的影响

经过 2 a 耕作处理后, 稻麦旋耕和稻麦免耕处理的土壤有机碳和水溶性有机碳含量如表 1 所示, 稻麦旋耕处理的土壤含水量为 41.76%, 显著高于稻麦免耕处理 ($P<0.05$)。2 种耕作方式下, 稻麦免耕处理的土壤有机碳含量高于稻麦旋耕 3.36%, 无明显差异; 稻麦旋耕处理的土壤水溶性有机碳、水溶性氮含量及水溶性有机碳占比分别高于稻麦免耕处理 16.91%、31.90% 和 19.52%, 均达到显著水平 ($P<0.05$), 而稻麦旋耕处理的土壤水溶性有机碳: 水溶性氮为 88.72, 明显低于稻麦免耕处理 (108.39) ($P<0.05$)。

土壤水溶性有机碳是活性较高的碳组分, 在总有机碳的占比一般不超过 3%^[19]。而本研究中, 稻麦旋耕和稻麦免耕方式下土壤水溶性有机碳的含量均较高, 且占比都超过了 3%, 分别为 10.16% 和 8.18%, 原因可能有 2 个方面, 一方面, 旋耕方式加速了土壤有机碳的分解, 增加了水溶性有机碳含量, 且以水溶性有机碳氮比较低的组分为主, 而这些碳组分的芳香性和稳定性并不高^[20]; 另一方面, 秸秆还田在促进土壤固碳的同时增加了不稳定性的碳组分含量, 产生了更多的水溶性有机碳, 使其含量增加^[21]。不同耕作方式下, 土壤含水量间存在显著差异, 这是影响土壤水溶性有机碳的溶出和土壤有机碳累积的重要因素^[22-24]。相对而言, 免耕减少了耕作扰动, 减缓了土壤有机碳的分解

和水溶性有机碳的溶出,有助于增加土壤固碳并提高有机碳的稳定性^[15,17]。稻麦旋耕处理的水溶有机碳占比高于稻麦免耕处理,进一步证实了耕作方式能明显影响水溶性有机碳含量,而且旋耕处理对水溶性有机碳的溶出作用更显著。耕作活

动对土壤产生的扰动会加速土壤有机碳的矿化分解,并不利于增加土壤有机碳。土壤有机碳矿化分解的部分产物会以水溶性有机碳的形式存在于土壤中,并参与到碳循环和养分运移的过程中,对土壤培肥和作物生长产生积极作用。

表 1 稻麦旋耕和稻麦免耕处理下土壤水溶性有机碳的对比

Tab.1 Comparison of water-soluble organic carbon between rotary tillage and no tillage for rice and wheat treatments

处理 Treatment	土壤含水量/% Soil water content	SOC/(g/kg)	WSOC/(g/kg)	WSN/(mg/kg)	WSOC/WSN	WSOC 占比/% WSOC rate
稻麦旋耕 Rotary tillage for rice and wheat	41.76±0.44a	22.53±0.32a	2.29±0.07a	25.86±3.03a	88.72±2.94b	10.16±0.18a
稻麦免耕 No-tillage for rice and wheat	39.82±0.25b	23.29±0.34a	1.90±0.02b	17.61±1.45b	108.39±3.87a	8.18±0.15b

注:不同小写字母表示同一指标不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicated significant differences among different treatments for the same indicator($P<0.05$).

2.2 耕作方式对土壤团聚体构成的影响

稻麦旋耕和稻麦免耕 2 种耕作方式下,土壤团聚体构成如图 1 所示,在稻麦旋耕处理下,土壤各粒级团聚体占比的大小顺序为中间团聚体>大团聚体>粉黏粒>微团聚体,以中间团聚体为主;在稻麦免耕处理下,土壤各粒级团聚体占比的大小顺序为大团聚体>中间团聚体>粉黏粒>微团聚体,以大团聚体为主。就各粒级团聚体占比而言,稻麦免耕处理下的大团聚体占比为 54.48%,是稻麦旋耕处理(19.21%)的 2.84 倍;稻麦旋耕处理的中间团聚体占比为 49.13%,而稻麦免耕处理下为 30.70%,差异明显;稻麦旋耕处理微团聚体占比为 14.77%,是稻麦免耕处理下微团聚体占比(5.94%)的 2.49 倍;稻麦旋耕处理粉黏粒占比为 16.89%,是稻麦免耕处理下粉黏粒占比(8.89%)的 1.90 倍。总体上,除>2 mm 大团聚体占比为稻麦免耕处理高于稻麦旋耕处理外,其他各粒级团聚体占比均为稻麦旋耕处理高于稻麦免耕处理,稻麦旋耕和稻麦免耕处理下>0.25 mm 团聚体占比分别为 68.34% 和 85.18%,2 种处理方式下,微团聚体的占比均最低。这说明,稻麦旋耕和稻麦免耕对土壤团聚体的构成变化产生重要影响,稻麦免耕更有利于>2 mm 大团聚体的形成,而稻麦旋耕更有利于 0.25~2.00 mm 中间团聚体的形成,且因耕作的破坏作用,使得微团聚体和粉黏粒占比增加,不利于土壤团粒结构的形成和稳定性的提高。

稻麦旋耕和稻麦免耕处理下的团聚体平均质

量直径(MWD)分别为 1.07、1.49 mm,稻麦免耕处理的团聚体平均质量直径高于稻麦旋耕处理 39.25%,2 种耕作方式下,团聚体平均质量直径差异较大。团聚体大小还受秸秆还田的影响,秸秆还田有助于提高土壤大团聚体,增加 MWD^[25]。在秸秆还田条件下,由于秸秆的添加为团聚体的形成提供了更多的胶结物质,促进了团聚体的形成,而免耕对团聚体的破坏作用更小。因此,免耕处理下大团聚体占比的提升效果更明显^[26]。

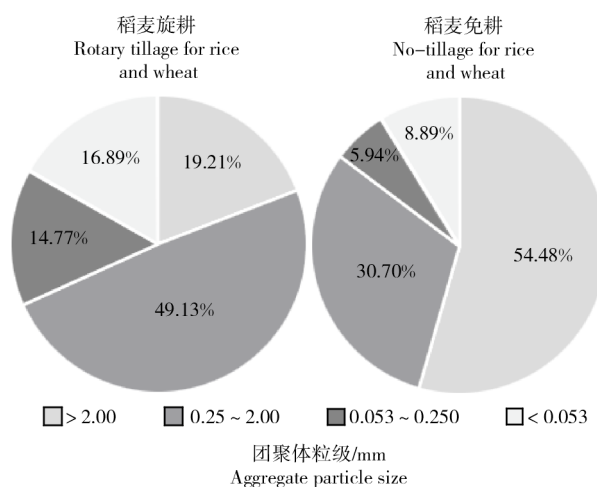


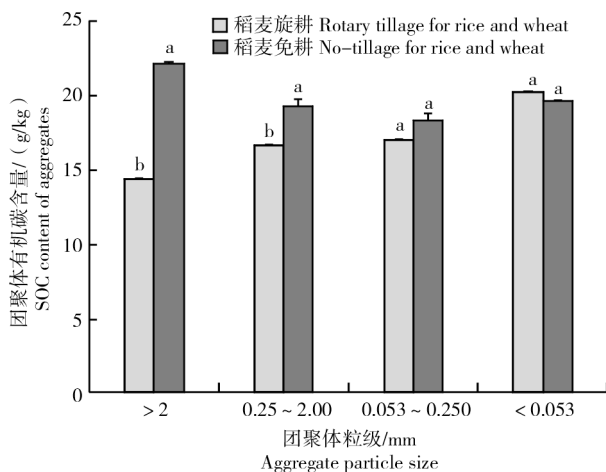
图 1 稻麦旋耕和稻麦免耕下土壤团聚体构成

Fig.1 Composition of soil aggregates in rotary tillage and no tillage for rice and wheat

2.3 耕作方式对土壤团聚体有机碳的影响

从图 2 可以看出,稻麦旋耕和稻麦免耕 2 种耕作方式下,不同粒级的土壤团聚体有机碳含量存

在显著差异($P<0.05$)。在稻麦旋耕处理下,各粒级土壤团聚体有机碳含量的大小顺序为粉黏粒>微团聚体>中间团聚体>大团聚体,团聚体粒级越小,土壤团聚体有机碳含量越高;而在稻麦免耕处理下,各粒级土壤团聚体有机碳含量的大小顺序为:大团聚体>粉黏粒>中间团聚体>微团聚体,大团聚体土壤有机碳含量最高,微团聚体有机碳含量最低。在团聚体粒级尺度上,稻麦免耕处理的大团聚体有机碳含量最高,为 22.10 g/kg,而稻麦旋耕处理的大团聚体有机碳含量为 14.32 g/kg,显著低于稻麦免耕处理($P<0.05$);就中间团聚体有机碳含量而言,稻麦旋耕和稻麦免耕处理下分别为 16.63、19.25 g/kg,稻麦免耕处理显著高于稻麦旋耕处理($P<0.05$);稻麦旋耕和稻麦免耕处理的微团聚体和粉黏粒有机碳含量之间均无明显差异,所不同的是,稻麦旋耕处理的微团聚体有机碳含量低于稻麦免耕处理,而粉黏粒有机碳含量高于稻麦免耕。



不同小写字母表示同一粒级下 2 种处理间差异显著 ($P<0.05$)

Different lowercase letters indicated significant differences among the two treatments at the same aggregate ($P<0.05$)

图 2 稻麦旋耕和稻麦免耕下土壤各团聚体有机碳含量比较

Fig.2 Soil aggregate organic carbon under rotary tillage and no tillage for rice and wheat

稻麦旋耕和稻麦免耕方式影响了土壤团聚体构成,也改变了土壤有机碳在团聚体中的分配。土壤有机碳含量及其矿化分解速率受土壤团聚体粒级大小的影响明显,微团聚体占比越高,土壤有机碳越易矿化分解^[27]。稻麦免耕的保护性耕作方

式更有利于>2 mm 大团聚体有机碳的形成,而稻麦旋耕方式下,粉黏粒的有机碳含量最高,这可能是因为耕作活动的破坏作用,导致大粒径团聚体破碎化,不利于大团聚体的形成,使得 0.25~2.00 mm 中间团聚体成为土壤团聚体的主要组分,从而影响土壤团粒结构稳定性的提高^[9,11]。相对而言,免耕方式可显著提高大团聚体占比和有机碳含量($P<0.05$),降低了微团聚体占比和微团聚体有机碳含量,这也是免耕可改善土壤结构、提高土壤肥力的关键原因^[27-28]。另外,秸秆还田为土壤有机碳累积提供了丰富的碳源,且在免耕处理下对各粒级土壤团聚体有机碳的提升作用更明显^[13]。因此,免耕是提升土壤固碳和稳定性相对更优的措施。

2.4 耕作方式对土壤团聚体有机碳构成的影响

耕作方式不仅影响了土壤团聚体组分构成,也影响了不同粒级团聚体有机碳对总有机碳的贡献。从图 3 可以看出,在稻麦旋耕处理下,各粒级土壤团聚体有机碳占比大小依次为中间团聚体>粉黏粒>大团聚体>微团聚体,中间团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献最大;在稻麦免耕处理下,各粒级土壤团聚体有机碳占比大小依次为大团聚体>中间团聚体>粉黏粒>微团聚体,大团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献最大。就各粒级团聚体有机碳占比而言,稻麦免耕处理下的大团聚体有机碳占比为 57.84%,是稻麦旋耕处理(16.32%)的 3.54 倍;稻麦旋耕和稻麦免耕处理的中间团聚体有机碳占比分别为 48.50% 和 28.39%,稻麦旋耕高于稻麦免耕处理下 70.83%,差异明显;稻麦旋耕处理微团聚体有机碳占比为 14.90%,是稻麦免耕处理下微团聚体有机碳占比(5.33%)的 2.79 倍;稻麦旋耕处理粉黏粒有机碳占比为 20.27%,是稻麦免耕处理下粉黏粒有机碳占比(8.43%)的 2.40 倍。经过 2 a 的耕作处理后,稻麦免耕处理>2 mm 大团聚体有机碳的占比高于稻麦旋耕处理,而其他各粒级团聚体有机碳占比均为稻麦旋耕处理高于稻麦免耕处理,且 2 种处理方式下,微团聚体有机碳的占比均最低。说明耕作方式不仅改变了土壤团聚体组分构成,也改变了各粒级团聚体有机碳对总有机碳的贡献,即有机碳在不同粒级团聚体中的分配比例,是影响土壤团聚体有机碳组分构成的重要驱动因素^[29]。

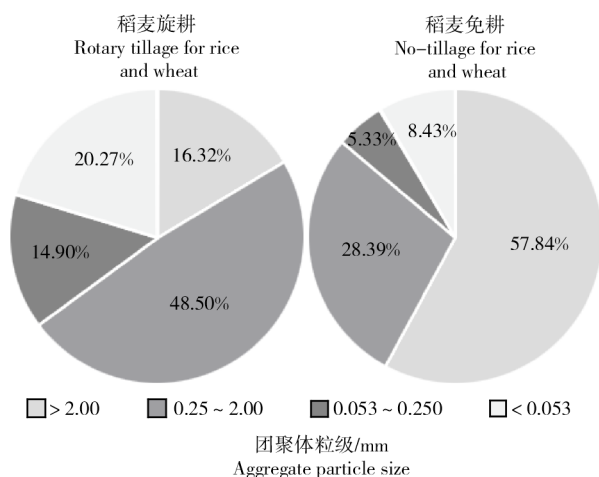


图3 稻麦旋耕和稻麦免耕下土壤的团聚体有机碳构成
Fig.3 Composition of soil aggregate organic carbon under rotary tillage and no tillage for rice and wheat

相对而言,稻麦免耕更有利于 >2 mm大团聚体有机碳的累积,稻麦旋耕更有利于 $0.25\sim 2.00$ mm中间团聚体有机碳的累积。一般来讲,团聚体粒级越大,累积的土壤有机碳越多。稻麦免耕处理下, >0.25 mm团聚体有机碳占比达到了86.23%,说明稻麦免耕可促进大团聚体的形成从而加强对有机碳的保护作用;而稻麦旋耕的破坏作用,使得中间团聚体和粉黏粒占比增加,团聚体对有机碳的保护作用减弱,特别是粉黏粒有机碳组分的增加,说明稻麦旋耕并不利于提高土壤大团聚体占

比和有机碳的累积。这是稻麦免耕处理土壤有机碳含量高于稻麦旋耕处理的重要原因(表1),也是导致土壤团聚体有机碳组分构成差异的关键因素(图3)。

2.5 不同耕作方式下土壤水溶性有机碳对团聚体有机碳的影响

耕作方式影响下土壤有机碳、水溶性有机碳与土壤团聚体间的相关性如表2所示,2种耕作方式下,土壤有机碳、水溶性氮均与团聚体构成、平均质量直径和团聚体有机碳含量间无显著相关性;水溶性有机碳含量及其在总有机碳中的占比与土壤团聚体平均质量直径间呈极显著负相关($P<0.01$),相关系数分别为0.932和0.970;水溶性有机碳与 >2 mm大团聚体占比呈极显著负相关($P<0.01$),相关系数为0.929,与中间团聚体占比呈显著相关($P<0.05$),相关系数为0.907,与微团聚体和粉黏粒占比呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别为0.950和0.927;水溶性有机碳在总有机碳中的占比与土壤大团聚体占比呈极显著负相关($P<0.01$),相关系数为0.969,与中间团聚体、微团聚体和粉黏粒占比呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别为0.954、0.979和0.966;水溶性碳氮比与大团聚体占比呈显著正相关($P<0.05$),相关系数为0.906,与其他各粒级团聚体占比间呈显著负相关($P<0.05$),与微团聚体占比间相关性最强。

表2 土壤团聚体有机碳和土壤水溶性有机碳的相关性分析

Tab.2 Correlation analysis of soil aggregate organic carbon and water-soluble organic carbon

指标 Index	团聚体质量直径 Weight diameter of aggregate	不同粒级团聚体有机碳含量 Content of soil aggregates organic carbon with different particle sizes				各粒级团聚体占比 Proportion of different particle size aggregates			
		>2 mm	$0.25\sim 2$ mm	$0.053\sim 0.25$ mm	<0.053 mm	>2 mm	$0.25\sim 2$ mm	$0.053\sim 0.25$ mm	<0.053 mm
SO	0.629	0.651	0.729	0.033	-0.648	0.637	-0.649	-0.601	-0.632
WSOC	-0.932**	-0.937**	-0.894*	-0.746	0.501	-0.929**	0.907*	0.950**	0.927**
WSN	-0.704	-0.678	-0.630	-0.205	0.753	-0.718	0.760	0.780	0.635
WSOC:WSN	0.903*	0.881*	0.862*	0.445	-0.806	0.906*	-0.886*	-0.951**	-0.866*
WSOC/SOC	-0.970**	-0.979**	-0.958**	-0.666	0.595	-0.969**	0.954**	0.979**	0.966**

注:*,**分别表示在0.05、0.01水平上相关性显著和极显著。

Note: The *, ** indicated significant and extremely significant correlation at the $P<0.05$ and $P<0.01$ levels.

水溶性有机碳含量与大团聚体有机碳含量间呈极显著负相关($P<0.01$),与中间团聚体有机碳含量呈显著负相关($P<0.05$),相关系数分别为0.937和0.894,与微团聚体有机碳呈负相关,与粉黏粒有机碳含量呈正相关,但相关性均不显著;水

溶性有机碳在总有机碳中的占比与土壤大团聚体有机碳和中间团聚体有机碳含量呈极显著负相关($P<0.01$),相关系数分别为0.979和0.958,与微团聚体有机碳呈负相关,与粉黏粒有机碳含量呈正相关,均不显著;水溶性碳氮比与大团聚体有机碳

和中间团聚体有机碳含量呈显著正相关($P < 0.05$),相关系数分别为 0.881 和 0.862,与微团聚体有机碳含量呈正相关,与粉黏粒有机碳含量呈负相关,相关性均不显著。

表 2 结果显示,水溶性有机碳及其占比与 $> 2\text{ mm}$ 土壤团聚体占比、平均质量直径和 $> 0.25\text{ mm}$ 团聚体有机碳含量之间呈显著负相关性,说明大团聚体的形成有利于更多的有机碳累积,并能减少水溶性有机碳的溶出,而使水溶性有机碳含量降低。结合图 1、表 1 可知,稻麦免耕促进了土壤大团聚体的形成,提高了土壤平均质量直径,从而加强了团聚体对有机碳的保护,并减少了水溶性有机碳的溶出,也是水溶性有机碳含量及其占比降低的重要原因;稻麦旋耕处理的土壤中间团聚体占比更高,对有机碳的保护和固持作用弱于大团聚体,水溶性有机碳含量及其占比与中间团聚体占比和团聚体有机碳含量之间的正、负相关关系说明中间团聚体的形成比大团聚体的形成更有利于土壤水溶性有机碳的溶出,水溶性有机碳含量及占比增强了土壤有机碳活性,但降低了有机碳稳定性,并不利于土壤固碳。

3 结论

本研究表明,稻麦旋耕和稻麦免耕对土壤水溶性有机碳和团聚体有机碳产生了重要影响。稻麦免耕比稻麦旋耕更有利于增加土壤有机碳含量和水溶性有机碳含量。稻麦免耕处理土壤团聚体组成以大团聚体为主, $> 2\text{ mm}$ 大团聚体占比最高,为 54.48%;稻麦旋耕处理以 $0.25\sim 2.00\text{ mm}$ 中间团聚体为主,占比最高,为 49.13%,稻麦旋耕和稻麦免耕的团聚体平均质量直径分别为 1.07、1.49 mm,稻麦免耕处理的团聚体平均质量直径显著高于稻麦旋耕处理 39.25%,稻麦免耕更有利于提高土壤结构稳定性;稻麦免耕土壤大于 0.25 mm 团聚体有机碳占 86.23%,稻麦旋耕土壤大于 0.25 mm 团聚体有机碳占 64.82%,稻麦免耕更有利于提升土壤大团聚体有机碳;水溶性有机碳的溶出并不利于土壤大于 0.25 mm 团聚体的形成。综上,稻麦免耕更有利于土壤团聚体的形成和有机碳的累积。

参考文献:

[1] WIESMEIER M, URBANSKI L, HOBLEY E, et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of driv-

ers and indicators at various scales[J]. Geoderma, 2019, 333: 149-162.

- [2] ZHANG S, LIN J J, WANG P, et al. The direct and legacy effects of drying-rewetting cycles on active and relatively resistant soil carbon decomposition[J]. Land Degradation & Development, 2023, 34(7): 2124-2135.
- [3] DUAN Y, CHEN L, ZHANG J B, et al. Long-term fertilisation reveals close associations between soil organic carbon composition and microbial traits at aggregate scales[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 306: 107169.
- [4] CHEN K L, HUO T C, ZHANG Y W, et al. Response of soil organic carbon decomposition to intensified water variability co-determined by the microbial community and aggregate changes in a temperate grassland soil of northern China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2023, 176: 108875.
- [5] 汪景宽, 徐英德, 丁凡, 等. 植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 528-540.
- WANG J K, XU Y D, DING F, et al. Process of plant residue transforming into soil organic matter and mechanism of its stabilization: a review[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(3): 528-540.
- [6] ZHANG W J, MUNKHOLM L J, LIU X, et al. Soil aggregate microstructure and microbial community structure mediate soil organic carbon accumulation: Evidence from one-year field experiment[J]. Geoderma, 2023, 430: 116324.
- [7] CHEN L Y, FANG K, WEI B, et al. Soil carbon persistence governed by plant input and mineral protection at regional and global scales[J]. Ecology Letters, 2021, 24(5): 1018-1028.
- [8] 刘艳, 孙文涛, 宫亮, 等. 不同耕作措施对水稻土耕层理化性质及水稻产量的影响[J]. 辽宁农业科学, 2013(6): 16-18.
- LIU Y, SUN W T, GONG L, et al. Effects of different tillage measures on physical and chemical properties of paddy soil topsoil and rice yield[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2013(6): 16-18.
- [9] 殷涛. 保护性耕作农田土壤团聚体固碳机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- YIN T. Carbon sequestration mechanism of soil aggregate in long-term conservation tillage farmland[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [10] 王峻, 薛永, 潘剑君, 等. 耕作和秸秆还田对土壤团聚体有机碳及其作物产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 121-127.
- WANG J, XUE Y, PAN J J, et al. Effects of tillage and straw incorporation on sequestration of organic carbon and crop yields[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 121-127.
- [11] 武均, 蔡立群, 齐鹏, 等. 不同耕作措施下旱作农田土壤团聚体中有机碳和全氮分布特征[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(3): 276-284.
- WU J, CAI L Q, QI P, et al. Distribution characteristics of organic carbon and total nitrogen in dry farmland soil aggregates under different tillage methods in the Loess Plateau of central Gansu Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(3): 276-284.
- [12] 黄羽翔, 刘炜, 石浩, 等. 机耕年限对潮土性水稻土壤物理

- 特性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(11): 1903-1913.
- HUANG Y X, LIU W, SHI H, et al. Effects of mechanical tillage years on the soil physical properties of fluvo-aquic paddy soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(11): 1903-1913.
- [13] WANG Y, ZOU L D, LOU C C, et al. No-tillage with straw retention influenced maize root growth morphology by changing soil physical properties and aggregate structure in North-east China: a ten-year field experiment[J]. Geoderma Regional, 2024, 38: e00840.
- [14] 车延静, 谷思玉, 王紫颖, 等. 保护性耕作下不同区域农田黑土溶解性有机碳荧光特性分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(9): 1544-1555.
- CHE Y J, GU S Y, WANG Z Y, et al. DOC fluorescence spectral structure of black soil in different regions under conservation tillage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(9): 1544-1555.
- [15] 熊瑞, 欧阳宁, 欧茜, 等. 秸秆还田与耕作方式对双季稻土壤团聚体及碳氮含量的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(6): 1347-1356.
- XIONG R, OUYANG N, OU X, et al. Effect of straw returning and tillage method on soil aggregates and carbon, nitrogen content in double-season rice[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2024, 36(6): 1347-1356.
- [16] DONG L L, YANG X, SHI L L, et al. Biochar and nitrogen fertilizer co-application changed SOC content and fraction composition in Huang-Huai-Hai plain, China[J]. Chemosphere, 2022, 291: 132925.
- [17] 杨飞霞, 曹广超, 于东升, 等. 引黄灌溉耕作对土壤团聚体有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 190-196.
- YANG F X, CAO G C, YU D S, et al. Effect of cultivation and irrigation with Yellow River on soil organic carbon in soil aggregates[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 190-196.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- LU R K. Methods of soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [19] 孙盛凯, 刘新坤, 朱旭毅, 等. 土壤可溶性有机碳、氮的迁移淋溶规律研究进展[J]. 山西农业科学, 2022, 50(8): 1158-1167.
- SUN S K, LIU X K, ZHU X Y, et al. Research progress on migration and leaching law of dissolved organic carbon and nitrogen in farmland[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(8): 1158-1167.
- [20] 梁栋, 周巧林, 张辉, 等. 生物质炭和有机肥配施对水稻土溶解性有机质光谱学特征的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 1123-1133.
- LIANG D, ZHOU Q L, ZHANG H, et al. Effects of biochar and organic fertilizers combined application on spectral characteristics of soil dissolved organic matter in paddy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(4): 1123-1133.
- [21] 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.
- YUAN J J, PENG S L, JIANG X J, et al. Effects of combing ridge and no-tillage on aggregates and organic matter in a rice-based cropping system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(12): 153-160.
- [22] 董立国, 白晓雄, 许浩, 等. 免耕和休耕改善黄绵土水稳性团聚体组成及稳定性[J]. 土壤与作物, 2024, 13(3): 294-304.
- DONG L G, BAI X X, XU H, et al. No-tillage and fallow improve the composition and stability of soil water-stable aggregates for cultivated loessial soils[J]. Soils and Crops, 2024, 13(3): 294-304.
- [23] 刘艳丽, 李成亮, 高明秀, 等. 不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5183-5190.
- LIU Y L, LI C L, GAO M X, et al. Effect of different land-use patterns on physical characteristics of the soil in the Yellow River delta region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5183-5190.
- [24] 董林林, 查金芳, 沈明星, 等. 长期秸秆还田对稻麦轮作区土壤有机碳组分构成的影响[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(3): 166-175.
- DONG L L, ZHA J F, SHEN M X, et al. Effect of long-term straw returning on soil organic carbon fractions composition in rice-wheat rotation ecosystem[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(3): 166-175.
- [25] 安婉丽, 高灯州, 潘婷, 等. 水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1833-1840.
- AN W L, GAO D Z, PAN T, et al. Effect of rice straw returning on paddy soil water-stable aggregate distribution and stability in the paddy field of Fuzhou plain[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(5): 1833-1840.
- [26] 陈文超, 朱安宁, 张佳宝, 等. 保护性耕作对潮土团聚体组成及其有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2014, 46(1): 35-40.
- CHEN W C, ZHU A N, ZHANG J B, et al. Effects of conservation tillage on the composition and organic carbon content of soil aggregates in fluvo-aquic soil[J]. Soils, 2014, 46(1): 35-40.
- [27] GUO L L, XI C T, JIN B B M, et al. Carbon mineralization associated with soil aggregates as affected by short-term tillage[J]. Journal of Resources and Ecology, 2016, 7(2): 101-106.
- [28] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 378-386.
- LI J, WU H J, WU X P, et al. Impact of long-term conservation tillage on soil aggregate formation and aggregate organic carbon contents[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 378-386.
- [29] 熊瑞, 张玮, 钟康裕, 等. 秸秆还田与轮耕对双季稻土壤物理特征及碳氮含量的影响[J]. 河南农业科学, 2023, 52(5): 81-90.
- XIONG R, ZHANG W, ZHONG K Y, et al. Effects of straw returning and rotating tillage on soil physical characteristics and carbon and nitrogen content in double-cropping paddy field[J]. Journal of Henan Agricultural sciences, 2023, 52(5): 81-90.