

耕作方式对旱地麦田土壤团聚体及其碳氮组分分布的影响

吴林甲^{1,3}, 祁琛¹, 闫秋艳^{2,3}, 闫双堆¹, 董飞², 张敏敏¹

(1. 山西农业大学资源环境学院, 山西 太谷 030801; 2. 山西农业大学小麦研究所, 山西 临汾 041000;

3. 山西省土壤环境与养分资源重点实验室, 山西 太原 030001)

摘要:为明确蓄水保墒耕作方式下旱地麦田土壤团聚体稳定性、有机碳及碳组分和全氮及氮组分在不同粒径团聚体组分中的分布特征,深入了解不同耕作方式下土壤碳氮固持机制,以连续3 a(2017—2020年)实施不同耕作方式(免耕、深松、深翻)后冬小麦收获期0~20 cm土壤为研究对象,采用湿筛法测算土壤团聚体的构成与稳定性($R_{0.25}$, >0.25 mm 团聚体含量; MWD , 平均重量直径; GMD , 几何平均直径),并测定各粒径团聚体有机碳(SOC)和碳组分(重组有机碳, HFOC; 轻组有机碳, LFOC; 易氧化有机碳, EOC; 可溶性有机碳, DOC; 颗粒有机碳, POC)含量、全氮(TN)和氮组分(硝态氮, NO_3^- -N; 铵态氮, NH_4^+ -N; 可溶性有机氮, SON)含量,分析了碳氮组分的相关关系。结果显示:(1)免耕和深松处理>2 mm 团聚体土壤比例较深翻处理分别提高8.8%和22.1%,免耕有利于增加<0.053 mm 粉黏粒比例,较深松和深翻处理分别提高46.4%和27.7%。深松处理较深翻处理的 $R_{0.25}$ 、 MWD 、 GMD 分别提高了2.8%、6.3%和9.0%;(2)免耕和深松处理较深翻提高土壤各粒径团聚体SOC、LFOC、EOC、DOC和POC含量。深松处理各粒径团聚体HFOC含量均高于深翻处理,免耕处理仅<0.053 mm 团聚体HFOC含量比深翻高24.7%;(3)与深翻处理相比,免耕处理有利于提高>2 mm、0.25~2 mm、0.053~0.25 mm 土壤团聚体TN、 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量;深松处理有利于增加土壤各粒径团聚体TN含量以及>2 mm和0.25~2 mm 团聚体 NO_3^- -N含量,各粒径团聚体 NH_4^+ -N含量低于深翻处理。免耕和深松处理各粒径团聚体SON含量均高于深翻处理。碳氮比(C/N)在不同粒径团聚体均表现为深松>免耕>深翻;(4)免耕和深松处理的0~20 cm 土壤碳储量分别比深翻高85.4%和86.3%,土壤氮储量分别比深翻高48.1%和32.5%,而秸秆碳还田量分别比深翻低30.9%和16.4%;(5)通过结构方程模型分析发现,DOC和POC通过协同EOC变化,是影响SOC变化的主导因子。SON是协同TN提升的主导因子。因此,黄土高原旱地麦田实施深松技术可改善土壤团聚体结构,实现土壤固碳保氮的协同效应。

关键词:耕作方式;旱地小麦;土壤团聚体;土壤碳氮组分

中图分类号:S512;S341;S158.3 **文献标志码:**A

Effects of tillage methods on soil aggregation and aggregate-associated carbon and nitrogen fractions in dryland wheat fields

WU Linjia^{1,3}, QI Chen¹, YAN Qiuyan^{2,3}, YAN Shuangdui¹, DONG Fei², ZHANG Minmin¹

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China;

2. Institute of Wheat Research, Shanxi Agricultural University, Linfen, Shanxi 041000, China;

3. Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources of Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi 030001, China)

Abstract: The study aimed to investigate the soil aggregate stability, distribution characteristics of soil organic carbon (SOC) and its components, and total nitrogen (TN) and its fractions in water-stable aggregates of dryland wheat field under different tillage methods and further understand the mechanism of soil carbon and nitrogen sequestration under different tillage methods. Topsoil samples (0~20 cm) for 3 consecutive years (2017–2020) were collected under three tillage methods (no tillage, subsoiling and deep tillage) after harvest in the third experimental

收稿日期:2022-03-22

修回日期:2022-09-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1901102);山西省研究生创新项目(2021Y338);山西省土壤环境与养分资源重点实验室开放基金课题(2020002)

作者简介:吴林甲(1997-),男,山西天镇人,硕士研究生,研究方向为旱地作物-土壤互动与调控。E-mail: 1832259393@qq.com

通信作者:闫秋艳(1983-),女,山西襄汾人,博士,副研究员,主要从事旱地土壤肥力提升研究。E-mail: sxnkyqy@163.com

season. A wet sieve method was used to analyze fractions of particle size, and distribution of carbon components (SOC, HFOC, LFOC, EOC, DOC, POC) and nitrogen components (TN, NO_3^- -N, NH_4^+ -N, SON). The relationship between carbon-nitrogen components was examined. The results showed that, (1) >2 mm aggregates under no tillage and subsoiling treatments were 8.8% and 22.1% higher than that under deep tillage treatment. No tillage was conducive to increasing <0.053 mm silt and clay, and 46.4% higher than subsoiling and 27.7% higher than deep tillage. $R_{0.25}$, MWD and GMD under subsoiling treatment increased by 2.8%, 6.3% and 9.0% compared with deep tillage treatment. (2) The contents of SOC, LFOC, EOC, DOC and POC of soil aggregates in no tillage and subsoiling treatments were higher than those in deep tillage treatment. The content of HFOC in subsoiling treatment was higher than that in deep tillage, and the content of HFOC in no tillage was higher than that in deep tillage only in <0.053 mm. (3) The contents of TN, NO_3^- -N and NH_4^+ -N in >2 mm, $0.25 \sim 2$ mm and $0.053 \sim 0.25$ mm aggregates under no tillage treatment were higher than deep tillage, and the contents of <0.053 aggregates were lower than deep tillage. Compared with deep tillage treatment, subsoiling treatment increased TN contents of soil aggregates and NO_3^- -N contents of >2 mm and $0.25 \sim 2$ mm aggregates, while NH_4^+ -N content was lower than that under deep tillage. The content of SON in no tillage and subsoiling was higher than that in deep tillage. The C/N ratio of aggregates under different particle sizes showed the fallow of subsoiling $>$ no tillage $>$ deep tillage. (4) The stocks of soil carbon under no-tillage and subsoiling in $0 \sim 20$ cm soil layer were 85.4% and 86.3% higher than that under deep tillage, soil nitrogen stocks were 48.1% and 32.5% higher than that under deep tillage, while the straw carbon return was higher under deep tillage. (5) Based on the structural equation model analysis, DOC and POC were the main factors affecting SOC change through synergistic EOC change. SON was the dominant factor affecting TN. In dryland wheat field of Loess Plateau, subsoiling improved soil aggregate structure, and increased soil organic carbon and total nitrogen contents.

Keywords: tillage methods; dryland wheat; soil aggregate; soil carbon and nitrogen fractions

土壤碳氮是表征农田土壤质量和肥力的核心指标,其质量和数量会影响耕地生产力与稳定性,其动态变化会影响土壤质量和作物产量^[1]。土壤有机碳储量的变化直接影响到土壤的理化性质和生物特性,其含量的增加不仅可以改善土壤结构,提高土壤稳定性与缓冲性,还能增强土壤保水保肥能力,对于维持土壤质量有重要作用^[2]。由于生态系统中大部分的氮素储存在土壤有机质库中,故土壤中氮含量的变化与土壤有机碳的变化紧密相关^[3]。研究土壤有机碳和氮素动态变化对了解碳氮循环过程及提高土壤增产保肥能力具有重要作用。土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,是形成土壤结构的物质基础,其数量和质量决定土壤肥力的高低^[4]。土壤碳氮在不同团聚体粒径中的分布情况直接影响土壤碳固持和氮循环。

在农田系统中,不同耕作方式可以通过人为和农机具对土壤的扰动直接改变耕层土壤粒径结构^[5-7],进而影响土壤碳氮在不同团聚体粒径中的分布^[8-9]。一般认为保护性耕作的免耕和深松比深翻能提高土壤 $0 \sim 5$ cm 有机碳和全氮含量,增加的有机碳主要累积于大团聚体 (>0.25 mm) 中,对微团聚体 (<0.25 mm) 影响较小^[10-11],而深翻对 $10 \sim 20$

cm 土层碳、氮组分的提高作用较明显^[12]。其中, $0.25 \sim 2$ mm 细大团聚体中的颗粒有机碳对耕作的响应最为敏感,免耕条件下该组分碳含量是翻耕的 5 倍^[13]。Zhang 等^[14]研究表明免耕条件下 $0 \sim 5$ cm 和 $5 \sim 10$ cm 颗粒有机氮、微生物量氮和可溶性有机氮比传统耕作分别高 52.3%、116.0%、69.4% 和 41.6%、108.0%、44.9%。目前,关于黄土高原旱地麦田蓄水保墒耕作方式下土壤理化性质的研究主要侧重于土壤水稳定性团聚体稳定性、土壤物理性质、氮组分空间分布、土壤养分等^[6,15]。但是,关于旱地麦田蓄水保墒耕作技术下土壤碳、氮组分分布尚缺乏系统研究。

本研究依托定位试验,旨在揭示不同蓄水保墒耕作方式下土壤团聚体及碳氮组分的分布,明确旱地麦田蓄水保墒耕作方式下土壤肥力特征,为进一步科学合理地应用蓄水保墒耕作措施,促进旱地小麦稳产增产提供理论支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验地点位于山西省临汾市吴村镇洪堡村 ($111^\circ 33' 07'' \text{E}$, $36^\circ 13' 02'' \text{N}$) 山西农业大学小麦研究

所洪堡国家试验基地,海拔 457.9 m, 年均降雨量 468.5 mm, 年蒸发量 1 829.4 mm, 年日照时数 2 416.5 h, 年均温度 12.20℃, $\geq 0^\circ\text{C}$ 有效积温 4 617.5℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 有效积温 4 151.0℃, 无霜期 184 d。试验期间 2017—2018、2018—2019 和 2019—2020 年降雨量分别为 496、432 mm 和 481 mm, 不采用灌溉措施。试验地土壤类型为石灰性褐土, 0~20 cm 土壤 pH 值 8.63, 有机碳 11.67 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 0.93 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 0.73 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验开始于 2017 年, 冬小麦采用一年一熟制, 10 月上旬播种, 次年 6 月上旬留茬 10~15 cm 机械收获, 秸秆粉碎覆盖还田。试验采用随机区组设计, 每个处理 3 次重复, 每小区面积 500 m^2 (50 m×10 m)。于 7 月 15 日左右设置免耕 (NT)、深松 (SS)、深翻 (DT, 传统耕作, 对照) 3 种耕作处理, 其中免耕处理休闲至小麦播种, 深松处理采用深松机 (型号: 1SZL-300, 深度 30~35 cm) 深松土壤, 翻耕处理采用铧式犁 (型号 1L-320, 深度 30~35 cm) 翻耕土壤。8 月下旬对 3 个处理均旋耕、耙耱一次, 收墒并除草。10 月上旬播种。小麦品种为‘晋麦 92 号’, 播种量 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 种肥同播, 播种时施阿波罗复合肥料 (总养分含量 $\geq 40\%$; N : P_2O_5 : K_2O = 22 : 16 : 5) 750 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。后期管理均保持一致。

1.3 土壤样品采集与测定方法

土壤样品采集: 于 2020 年 6 月冬小麦收获时, 在每个小区按“S”形采样法, 用硬质铝盒 (高度为 10 cm、直径为 10 cm) 采集 0~20 cm 原状土壤样品, 每个处理采集 3 个样点, 混合后带回实验室自然风干, 并沿自然断裂缝隙掰成小于 1 cm 的小块, 除去杂质后进行土壤团聚体粒径组分的筛分。

1.3.1 土壤团聚体筛分 利用 Elliott 湿筛法^[16]测定土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分: 将 2 mm、0.25 mm 和 0.053 mm 孔径筛子从上到下、从大到小的顺序排放好, 取 50 g 风干土样放入最大孔径的筛子中, 将整套筛子放至装满自来水的桶中, 静置 5 min, 然后上下震荡 3 min, 振幅 3 cm。将各个筛子中的土壤洗出, 在 60℃ 下烘干, 冷却后称取粗大团聚体 (>2 mm)、细大团聚体 (0.25~2 mm)、微团聚体 (0.053~0.25 mm) 和粉黏粒 (<0.053 mm) 的土壤质量, 装入自封袋用于测定土壤各粒径团聚体有机碳、碳组分、全氮和氮组分。

1.3.2 有机碳及碳组分的测定 土壤总有机碳 (SOC) 采用重铬酸钾容量-外加热法测定^[17]。土壤重组有机碳 (HFOC), 采用将 25 mL 1.8 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的

溴化锌溶液加入到盛有过 0.25 mm 筛 5 g 土样的离心管中振荡离心 3 次, 再用 95% 的乙醇振荡离心 3 次、蒸馏水振荡离心 2 次后, 将盛有土样的离心管置于 60℃ 下烘 48 h, 最后土样磨细过 0.149 mm 筛, 用重铬酸钾容量-外加热法测定^[17]。土壤轻组有机碳 (LFOC) 采用土壤总有机碳和重组有机碳的差值法求得。易氧化有机碳 (EOC) 采用 333 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ KMnO_4 氧化法测定^[18]。土壤可溶性有机碳 (DOC) 采用 K_2SO_4 溶液浸提法, 总有机碳分析仪测定^[15]。颗粒有机碳 (POC) 采用 5 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 六偏磷酸钠分散法进行提取, 在往复式振荡器 (100 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$) 上震荡 15 h 分散, 将分散溶液置于 0.053 mm 筛上, 用清水冲洗直至滤液澄清, 将筛上保留的 0.053~2 mm 土样洗入已知重量的烘干铝盒, 在 60℃ 下烘干至恒重 (48 h), 最后土样磨细过 0.149 mm 筛, 有机碳含量用重铬酸钾容量-外加热法测定^[19]。

1.3.3 全氮及氮组分测定 土壤全氮 (TN) 采用 K_2SO_4 - CuSO_4 -Se 催化剂和浓硫酸消化, 半微量开氏法测定^[17]。可溶性总有机氮 (STN) 采用 0.5 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ K_2SO_4 浸提 (水土比为 4 : 1) 后, 用 TOC-1020A 分析仪测定^[18]。硝态氮 (NO_3^- -N) 和铵态氮 (NH_4^+ -N) 含量采用 KCl 溶液浸提, 连续流动分析仪测定^[19]。可溶性有机氮 (SON) 为 STN 与 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 的差值。

1.4 数据统计分析

1.4.1 团聚体指标相关计算 各粒级水稳性团聚体的质量分数用 w_i (>2 mm, 0.25~2 mm, 0.053~0.25 mm 和 <0.053 mm 共 4 个粒级的团聚体 $i=1, 2, 3, 4$) 表示。采用平均重量直径 (MWD, Mean weight diameter) 和几何平均直径 (GMD, Geometric mean diameter) 表示团聚体水稳性, 采用 $R_{0.25}$ 评价 >0.25 mm 的团聚体。

$$w_i = m_i / 100 \times 100\%$$

$$R_{0.25} = \sum_{i=1}^n w_i$$

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right]$$

式中, m_i 表示各粒级团聚体质量; \bar{x}_i 为各粒级团聚体的平均直径。

1.4.2 土壤碳氮比 (C/N) 土壤碳氮比 (C/N) = 土壤有机碳含量 (SOC, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) / 土壤全氮含量 (TN, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

1.4.3 土壤碳氮储量及秸秆碳还田量 单位面积土壤有机碳和氮储量计算:

$$SOCS = SOC \times \rho \times H \times 0.1$$

$$TNS = TN \times \rho \times H \times 0.1$$

式中, $SOCS$ 和 TNS 分别表示单位面积土壤有机碳和全氮储量 ($t \cdot hm^{-2}$); SOC 和 TN 分别表示土壤有机碳和全氮含量 ($g \cdot kg^{-1}$); ρ 表示土壤容重 ($g \cdot cm^{-3}$); H 表示研究土层深度 (cm)。

秸秆碳还田量 (Straw carbon return, $kg \cdot hm^{-2}$) = 秸秆生物量 ($kg \cdot hm^{-2}$) \times 秸秆碳含量 ($g \cdot kg^{-1}$)

1.4.4 数据处理 采用 Microsoft Excel 2010 和 Origin 软件处理试验数据和作图。采用 SPSS17.0 软件进行统计分析, 利用最小显著差数法 (LSD) 进行差异显著性检验, 显著性水平设定为 $P < 0.05$ 。采用 Pearson 相关分析, 分析小麦产量与土壤水稳性团聚体指标、土壤碳氮组分之间的相关系数。利用 Amos 软件作结构方程模型 (SEM), SEM 模拟不同耕作方式下土壤团聚体活性有机碳对土壤总有机碳变化的影响, 土壤团聚体活性氮对总氮变化的影响。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式对土壤水稳性团聚体及粉黏粒质量占比的影响

由表 1 可知, 3 种耕作方式下均以细大团聚体 ($0.25 \sim 2 \text{ mm}$) 比例最高, 显著 ($P < 0.05$) 高于其他粒径团聚体, 粉黏粒 ($< 0.053 \text{ mm}$) 比例最低, 且显著 ($P < 0.05$) 低于其他粒径团聚体。免耕处理细大团聚体 ($0.25 \sim 2 \text{ mm}$) 显著低于深翻, 粉黏粒 ($< 0.053 \text{ mm}$) 比例显著高于深翻。不同粒径团聚体在深松和深翻之间差异不显著, 但深松显著增加 MWD 和 GMD 。免耕处理较深翻处理的 $R_{0.25}$ 显著降低。

2.2 不同耕作方式对土壤团聚体有机碳及碳组分的影响

由图 1 可知, 与深翻处理相比, 免耕处理使 $> 2 \text{ mm}$ 、 $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 、 $0.053 \sim 0.25 \text{ mm}$ 、 $< 0.053 \text{ mm}$ 粒级团聚体有机碳含量分别增加 52.2%、65.4%、47.9%

和 44.9%, 深松处理使土壤 $> 2 \text{ mm}$ 、 $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 、 $0.053 \sim 0.25 \text{ mm}$ 、 $< 0.053 \text{ mm}$ 粒级团聚体有机碳含量分别增加 77.9%、111.6%、85.3% 和 77.2%。与深翻相比, 深松处理使土壤 $> 2 \text{ mm}$ 、 $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 、 $0.053 \sim 0.25 \text{ mm}$ 、 $< 0.053 \text{ mm}$ 粒级团聚体重组有机碳 (HFOC) 含量分别增加 35.1%、32.7%、25.2% 和 53.2%, 免耕处理使土壤 $> 2 \text{ mm}$ 、 $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 、 $0.053 \sim 0.25 \text{ mm}$ 粒级团聚体 HFOC 含量分别减少 28.5%、41.3% 和 24.9%, $< 0.053 \text{ mm}$ 粒级团聚体 HFOC 含量增加 24.8%。免耕和深松处理之间土壤各粒级团聚体轻组有机碳、易氧化有机碳和颗粒有机碳含量差异不显著, 但显著高于深翻处理。土壤各粒级团聚体的可溶性有机碳含量均表现为免耕 $>$ 深松 $>$ 深翻。

2.3 不同耕作方式对土壤团聚体全氮及氮组分的影响

由图 2 可知, 与深翻处理比, 免耕和深松处理增加 $> 2 \text{ mm}$ 和 $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 粒径团聚体全氮和硝态氮含量, $< 0.053 \text{ mm}$ 粒级团聚体全氮和硝态氮含量在免耕处理下最低; 免耕处理各粒径团聚体铵态氮含量与深翻处理差异不显著, 深松处理各粒径团聚体铵态氮含量均低于深翻处理; 免耕和深松处理土壤各粒径团聚体可溶性有机氮含量均高于深翻处理, 且在 $< 0.053 \text{ mm}$ 粒级团聚体差异显著。

2.4 不同耕作方式对碳、氮储量的影响

由表 2 可知, 定位 3 a 后 (2020 年收获期), 免耕和深松处理的 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层土壤有机碳储量显著高于深翻处理, 免耕和深松处理间差异不显著。土壤氮储量表现为免耕 $>$ 深松 $>$ 深翻, 其中免耕显著高于深翻处理。秸秆碳还田量表现为深翻 $>$ 深松 $>$ 免耕, 其中深翻显著高于免耕处理。

2.5 不同耕作方式对土壤团聚体碳氮比 (C/N) 的影响

由图 3 可知, 免耕和深松处理土壤团聚体各粒级的 C/N 均显著高于深翻处理, 免耕使 $> 2 \text{ mm}$ 、 0.25

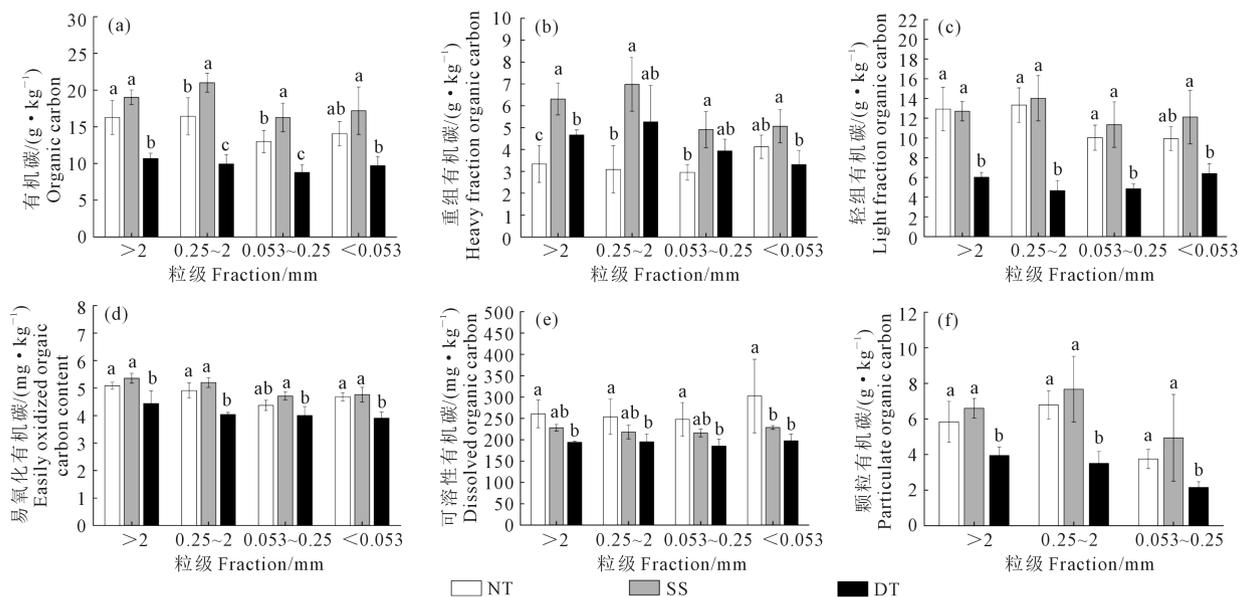
表 1 不同耕作方式下土壤团聚体稳定性分析

Table 1 Stability analysis of soil aggregates under different tillage methods

处理 Treatment	各粒级团聚体质量占比 Aggregate fraction/%				$R_{0.25}$ /%	平均重量直径 MWD/mm	几何平均直径 GMD/mm
	$> 2 \text{ mm}$	$0.25 \sim 2 \text{ mm}$	$0.053 \sim 0.25 \text{ mm}$	$< 0.053 \text{ mm}$			
NT	21.33 \pm 2.19a	40.71 \pm 1.66b	24.63 \pm 1.83a	13.34 \pm 0.94a	62.03 \pm 1.60b	0.93 \pm 0.23b	0.52 \pm 0.17b
SS	23.93 \pm 4.03a	42.23 \pm 1.34a	24.73 \pm 1.92a	9.11 \pm 1.14b	66.16 \pm 3.45a	1.00 \pm 0.08a	0.60 \pm 0.06a
DT	19.60 \pm 2.49a	44.75 \pm 5.29a	25.22 \pm 2.14a	10.44 \pm 0.94b	64.32 \pm 3.63a	0.94 \pm 0.02b	0.55 \pm 0.04b

注: NT: 免耕; SS: 深松; DT: 深翻。表中的数值代表平均值 \pm 标准差 ($n = 3$), 同列不同小写字母表示不同耕作处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: NT: No tillage; SS: Subsoiling; DT: Deep tillage. The values in the table represent the mean \pm standard deviation ($n = 3$), different lowercase letters in the same column between different tillage methods indicate significant differences at $P < 0.05$ level. The same below.



注:不同小写字母表示同一粒径团聚体不同耕作处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Note: Different lowercase letters under the same aggregate size fraction between tillage treatments indicate significant difference ($P < 0.05$), the same as below.

图 1 不同耕作方式下土壤团聚体有机碳及碳组分含量

Fig.1 Soil organic carbon and carbon fractions of soil aggregates under different tillage methods

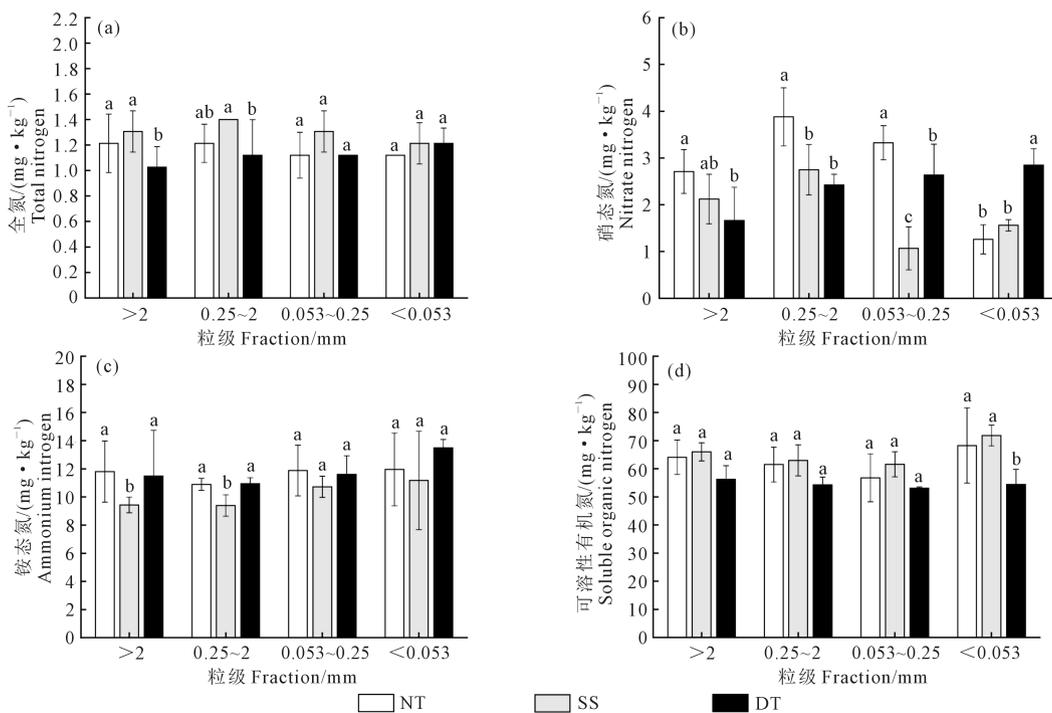


图 2 不同耕作方式下土壤团聚体全氮及氮组分含量

Fig.2 Soil total nitrogen and nitrogen fractions of soil aggregates under different tillage methods

~ 2 mm、0.053 ~ 0.25 mm、< 0.053 mm 分别增加 32.9%、50.1%、51.3%和 44.6%。深松处理使土壤团聚体各粒级的 C/N 分别增加 39.3%、61.8%、61.8%和 65.3%。

2.6 相关分析

POC 和 EOC 之间表现为显著协同效应

(0.743)。DOC 和 EOC 之间表现为协同效应。EOC 和 POC 对 SOC 表现出较大正效应 (0.498 和 0.465), DOC 对 SOC 表现为正效应 (图 4); SON 对 TN 表现出最大正效应 (0.399), NO_3^- -N 对 TN 表现正效应作用, NH_4^+ -N 对 TN 表现负效应作用 (图 5)。

表 2 不同耕作方式下土壤碳氮储量及秸秆碳还田量

Table 2 Soil organic carbon and nitrogen stocks and straw carbon return under different tillage treatments

处理 Treatment	土壤有机碳储量 Soil organic carbon stock /(t · hm ⁻²)	土壤氮储量 Soil nitrogen stock /(t · hm ⁻²)	秸秆碳还田量 Straw carbon return /(kg · hm ⁻²)
NT	35.62±2.30a	3.14±0.83a	1.47±0.21b
SS	35.79±1.91a	2.81±0.71ab	1.78±0.20ab
DT	19.21±1.23b	2.12±0.60b	2.13±0.14a

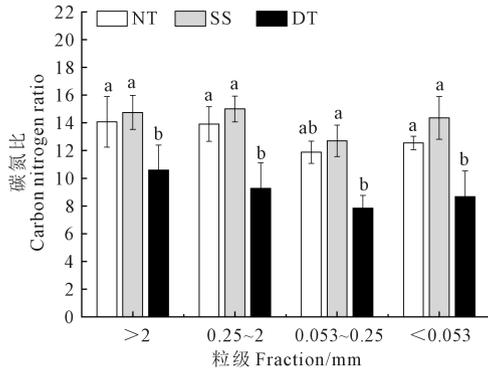
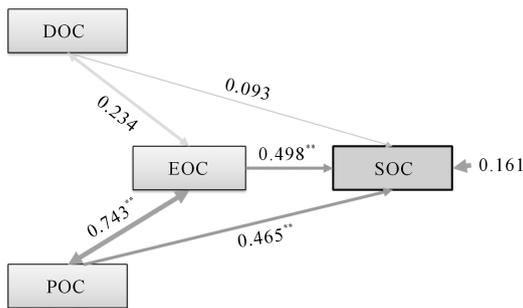


图 3 不同耕作方式下土壤团聚体碳氮比 (C/N)

Fig.3 C/N ratio of soil aggregates under different tillage methods

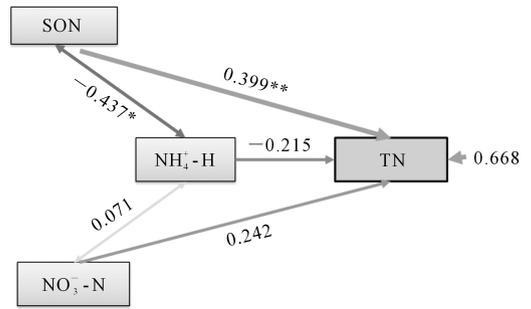


注: DOC:可溶性有机碳;EOC:易氧化有机碳;POC:颗粒有机碳;SOC:土壤有机碳。线粗度与影响强度的关系呈正比。线条旁数字代表标准路径系数,反映了变量之间的关系。*表示变量间差异显著($P<0.05$);**表示变量间差异极显著($P<0.01$)。下同。

Note: DOC: Dissolved organic carbon; EOC: Easily oxidized organic carbon; POC: Particulate organic carbon; SOC: Soil organic carbon. The relationship between the line thickness and the influence strength. The number next to the line represents the standard path coefficient, reflecting the relationship between variables. * represents significant differences among variables ($P<0.05$), and ** represents extremely significant differences among variables ($P<0.01$). The same below.

图 4 土壤团聚体活性有机碳对 SOC 影响的结构方程模型

Fig.4 Structural equation model for the effect of soil aggregates active organic carbon on SOC



注:SON:可溶性有机氮;NH₄⁺-N:铵态氮;TN:全氮;NO₃⁻-N:硝态氮。

Note:SON: Soluble organic nitrogen;NH₄⁺-N: Ammonium nitrogen;TN: Total nitrogen;NO₃⁻-N: Nitrate nitrogen.

图 5 土壤团聚体活性氮对 TN 影响的结构方程模型

Fig.5 Structural equation model for the effect of soil aggregates active nitrogen on TN

3 讨论

3.1 耕作方式影响土壤团聚体稳定性

耕作方式通过对土壤的扰动从而影响土壤团聚体的形成。无论哪种耕作处理,旱地麦田土壤水稳性团聚体在 0~20 cm 土层表现为细大团聚体(0.25~2 mm)比例最大(表 1)。水稳性团聚体的 *MWD* 和 *GMD* 反映了团聚体粒径分布的总体状况,其值越大表示团聚体的团聚度和稳定性越强^[20]。本研究表明,与连续深翻比较,深松增加细大团聚体比例和土壤团聚体稳定性。李慧等^[6]连续 3 a 实施深翻后进行深松的土壤团聚体 *MWD* 和 *GMD* 仍低于连续 4 a 免耕,而深松/深翻轮耕更有利于土壤团聚体稳定性提高。耕作强度是影响土壤水稳性团聚体的主要因素之一,同时一定的机械活动也加速了有机物质和微生物的移动,增加土壤胶结大团聚体的能力^[6]。但本研究中深翻条件下土壤团聚体稳定性仍比免耕高,而深松处理较免耕和深翻更有利于提高土壤团聚体稳定性。也有研究指出,深翻比旋耕增加土壤 0~50 cm 的 *MWD* 和 *GMD*。Six 等^[21]研究表明,机械耕作破坏土壤结构,使团聚体的稳定性降低,而免耕增加了团聚体的含量和稳定性。造成差异可能是由于深翻增加了还田的秸秆与土壤颗粒接触面积^[9],而且增加了土壤孔隙度和渗透性。此外,深松和深翻条件下作物较大的根系生物量可通过物理生物学过程促进土壤团聚体形成和稳定^[22],有机质(植株秸秆)的投入为微生物生产土壤粘合剂提供了碳源,有助于土壤大团聚体的形成^[21]。本研究免耕处理的粉黏粒组分较深松和深翻处理较高,可能是由于免耕条件下生育后期土壤表层水分的极度干燥,导致耕层团聚作用降

低^[8]。其次,由于 2019—2020 年生育期极度干旱,免耕条件下旱地小麦植株生长量较小,秸秆还田量较少,根系及根域环境可能不利于团聚作用^[22]。

3.2 耕作方式影响土壤团聚体碳氮及其组分分布

保护性耕作措施通过减少土壤扰动,减少原有有机质的分解,从而增加了 SOC 和活性有机碳含量,其中以免耕和深松提升最多^[23-24]。同时,免耕和深松增加 0~20 cm 土层土壤碳储量,且显著高于深翻处理。这主要是由于免耕和深松处理减少了土壤 CO₂ 的挥发^[25],同时免耕和深松处理的秸秆碳由于土壤的少扰动,使表层土壤有机质及养分富集,有机碳含量增加。本研究中由于深翻处理较大的蓄水能力,秸秆生物量较深松和免耕处理高,秸秆碳还田量相应增加,但是并未增加 0~20 cm 土层土壤碳储量,可能是翻耕导致更多秸秆向下层分布,进而使土壤碳积累深层化^[26],需要进一步探讨不同层次土壤碳储量的分布。耕作方式改变了有机碳在不同粒径团聚体的分布。也有研究认为,深翻由于改变了土壤物理结构,土壤水温增加,进而促进了有机碳的分解,导致碳储量降低^[27]。一方面,耕作方式影响碳在不同粒径团聚体的分布,郑凤君等^[28]研究表明,无论是免耕覆盖还是深翻,>2 mm 和 0.25~2 mm 粒径团聚体有机碳及碳组分含量较高,可见耕作主要影响粗大团聚体和细大团聚体中有机碳积累,这与本研究结果一致。另一方面,耕作方式影响不同粒径团聚体活性碳组分分布。土壤活性有机碳作为土壤碳组分中最活跃的部分,与土壤总有机碳相比,其对耕作措施的反应更为灵敏^[29-30]。Six 等^[21]研究指出 0.25~2 mm 细大团聚体中的颗粒有机碳对耕作的响应最为敏感,免耕条件下该组分碳含量是翻耕的 5 倍。本研究中,与深翻相比,免耕和深松可以显著提升团聚体中 SOC、LFOC、EOC、DOC 和 POC 含量。郑凤君等^[28]基于山西运城 11a 的定位试验表明,免耕覆盖各粒径团聚体中 SOC、DOC 和 MBC 均高于常规翻耕。不同碳组分与总有机碳呈显著正相关关系。可见,免耕和深松条件下,土壤碳组分增加是土壤总有机碳含量增加的重要前提。也有研究指出,深翻增加了土壤通气性,加速微生物对秸秆的分解,因而增加了有机碳的含量^[31],这可能与测定的土层深度有很大关系。徐尚起等^[32]研究表明,翻耕较免耕显著提高 10~20 cm 土层重组有机碳含量。本研究深松和深翻均可以提升 0~20 cm 各团聚体中重组有机碳含量。

土壤全氮含量的高低和供氮能力在一定程度

上决定了农作物的发育状态和耕地的生产潜力^[31]。本研究发现,免耕和深松处理的土壤氮储量高于深翻处理,可能是由于土壤不扰动或少扰动导致肥料和秸秆残茬等积累在土壤表层,并被团聚体保护^[14]。郭亚飞等^[33]通过长期定位试验发现,免耕可显著提高 0~5 cm 土壤全氮含量,降低 5~10 cm 土壤全氮含量。可见,不同土层间全氮含量也存在差异。免耕和深松的全氮主要累积于>0.25 mm 的团聚体中,而深翻累积于<0.25 mm 的团聚体中。可溶性有机氮和硝态氮是全氮提升的主导因子。李景等^[34]研究发现,免耕覆盖和深松覆盖微团聚体全氮含量的提高幅度高于大团聚体,造成差异可能是因为土壤环境和气候条件的不同。

免耕引起的表层土壤 C、N 积累主要被大团聚体所固持,并且 C、N 在大团聚体中对外界化学、物理和生物条件造成的分解不那么敏感^[35]。Kabiri 等^[36]连续 6 a 实行不同耕作处理土壤全碳和全氮并未出现明显差异,仅改变了碳氮在不同团聚体结构中的分布,团聚体碳氮对耕作处理的敏感度更高。土壤 C/N 是衡量土壤碳、氮平衡状况的指标,它的演变趋势对土壤碳、氮循环有重要作用。C/N 比值是有机物分解程度的一个指标,比值越高,表明有机物的分解程度越低,有机碳趋于积累,反之亦然^[10]。在本研究条件下,免耕和深松的 0~20 cm 土壤 C/N 明显高于深翻,这与多数研究结果一致^[4,11]。总体来讲,耕作方式土壤碳氮测定结果与试验田定位年限也有一定关系,对于土壤碳氮的周年变化仍需进一步探讨。

4 结 论

黄土高原旱地麦田实施保护性耕作(免耕和深松)较传统深翻有利于提升土壤不同粒径团聚体有机碳、碳组分、全氮含量以及碳氮比,其中深松的提升幅度较大。土壤碳氮储量在免耕和深松处理下显著高于深翻处理。可溶性有机碳和可溶性有机氮是协同土壤总有机碳和总氮提升的主导因子。深松提高了土壤团聚体稳定性指标,但不同粒径团聚体组成与深翻处理之间差异不显著,需要在定位试验的基础上进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] MO F, ZHANG Y Y, LI T, et al. Fate of photosynthesized carbon as regulated by long-term tillage management in a dryland wheat cropping system[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 138: 107581.
- [2] 张向前, 杨文飞, 徐云姬. 中国主要耕作方式对旱地土壤结构及养分和微生态环境影响的研究综述[J]. *生态环境学报*, 2019, 28

- (12): 2464-2472.
- ZHANG X Q, YANG W F, XU Y J. Effects of main tillage methods on soil structure, nutrients and micro-ecological environment of upland in China: a review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(12): 2464-2472.
- [3] PU C, KAN Z R, LIU P, et al. Residue management induced changes in soil organic carbon and total nitrogen under different tillage practices in the North China Plain[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(6): 1337-1347.
- [4] DU Z L, REN T S, HU C S, et al. Soil aggregate stability and aggregate-associated carbon under different tillage systems in the North China Plain[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(11): 2114-2123.
- [5] XIE J Y, XU M G, CIREN Q J, et al. Soil aggregation and aggregate associated organic carbon and total nitrogen under long-term contrasting soil management regimes in loess soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(12): 2405-2416.
- [6] 李慧, 代新俊, 高志强. 夏闲期耕作对黄土高原旱地麦田土壤水稳性团聚体稳定性的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(13): 2524-2534.
- LI H, DAI X J, GAO Z Q. Stability characteristics of soil water-stable aggregates under different tillage treatments in summer fallow on the Loess Plateau [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(13): 2524-2534.
- [7] SCANLAN C A, DAVIES S L. Soil mixing and redistribution by strategic deep tillage in a sandy soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 185: 139-145.
- [8] SONG K, YANG J J, XUE Y, et al. Influence of tillage practices and straw incorporation on soil aggregates, organic carbon, and crop yields in a rice-wheat rotation system[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 36602.
- [9] WEIDHUNER A, HANAUER A, KRAUSZ R, et al. Tillage impacts on soil aggregation and aggregate-associated carbon and nitrogen after 49 years[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 208: 104878.
- [10] TIAN S Z, NING T Y, WANG Y, et al. Crop yield and soil carbon responses to tillage method changes in North China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 163: 207-213.
- [11] KAN Z R, LIU Q Y, HE C, et al. Responses of grain yield and water use efficiency of winter wheat to tillage in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2020, 249: 107760.
- [12] XUE J F, REN A X, LI H, et al. Soil physical properties response to tillage practices during summer fallow of dryland winter wheat field on the Loess Plateau[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(2): 1070-1078.
- [13] SIX J, BOSSUYT H, DEGRYZE S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1): 7-31.
- [14] ZHANG H H, ZHANG Y Q, YAN C R, et al. Soil nitrogen and its fractions between long-term conventional and no-tillage systems with straw retention in dryland farming in northern China[J]. *Geoderma*, 2016, 269: 138-144.
- [15] HE L Y, LU S X, WANG C G, et al. Changes in soil organic carbon fractions and enzyme activities in response to tillage practices in the Loess Plateau of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 209: 104940.
- [16] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627-633.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:30-49.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:30-49.
- [18] BLAIR G J, LEFROY R D B, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [19] 邵孝侯, 胡霁堂, HOUBA V J G, 等. 0.01 mol · L⁻¹ CaCl₂ 作为土壤不同 N 素形态浸提剂的研究[J]. *土壤学报*, 1991, 28(1): 32-39.
- SHAO X H, HU A T, HOUBA V J G, et al. Aspects of the study of 0.01 mol · L⁻¹ CaCl₂ as extracting solution for different N fractions in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28(1): 32-39.
- [20] YAN L, JIANG X X, JI X N, et al. Distribution of water-stable aggregates under soil tillage practices in a black soil hillslope cropland in Northeast China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(1): 24-31.
- [21] SIX J, BOSSUYT H, DEGRYZE S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1): 7-31.
- [22] LE BISSONNAIS Y, PRIETO I, ROUMET C, et al. Soil aggregate stability in mediterranean and tropical agro-ecosystems: effect of plant roots and soil characteristics [J]. *Plant and Soil*, 2018, 424(1): 303-317.
- [23] WINGEYER A B, WALTERS D T, DRIJBER R A, et al. Fall conservation deep tillage stabilizes maize residues in soil organic matter [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(6): 2154-2163.
- [24] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141-163.
- [25] WANG H, WANG S L, YU Q, et al. No tillage increases soil organic carbon storage and decreases carbon dioxide emission in the crop residue returned farming system [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 261: 110261.
- [26] 闫秋艳, 董飞, 贾亚琴, 等. 耕作方式对旱地麦田土壤蓄水变化特征及小麦产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 222-228.
- YAN Q Y, DONG F, JIA Y Q, et al. Effects of tillage patterns on soil water storage and wheat yield in dryland wheat field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 222-228.
- [27] LIU X T, Q L I, TAN S W, et al. Evaluation of carbon mineralization and its temperature sensitivity in different soil aggregates and moisture regimes: a 21-year tillage experiment[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 837: 155566.
- [28] 郑凤君, 王雪, 李生平, 等. 免耕覆盖下土壤水分、团聚体稳定性及其有机碳分布对小麦产量的协同效应[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(3): 596-607.
- ZHENG F J, WANG X, LI S P, et al. Synergistic effects of soil moisture, aggregate stability and organic carbon distribution on wheat yield under no-tillage practice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(3): 596-607.