

DOI: 10.11766/trxb202003180714

董建新, 丛萍, 刘娜, 李玉义, 王婧, 逢焕成. 秸秆深还对黑土亚耕层土壤物理性状及团聚体分布特征的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58 (4): 921–934.

DONG Jianxin, CONG Ping, LIU Na, LI Yuyi, WANG Jing, PANG Huancheng. Effects of Deep Straw Incorporation on Subsoil Physical Properties and Aggregate Distribution in Black Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (4): 921–934.

# 秸秆深还对黑土亚耕层土壤物理性状及团聚体分布特征的影响\*

董建新<sup>1, 2</sup>, 丛萍<sup>2</sup>, 刘娜<sup>1</sup>, 李玉义<sup>1</sup>, 王婧<sup>1</sup>, 逢焕成<sup>1†</sup>

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 中国农业科学院烟草研究所, 青岛 266100)

**摘 要:** 为改善我国东北地区黑土亚耕层的土壤结构并解决当地玉米秸秆还田难问题, 于 2015—2018 年开展切碎秸秆 (QS) 与秸秆颗粒 (KL) 2 种秸秆形态下 1 倍 (15 000 kg·hm<sup>-2</sup>)、3 倍 (45 000 kg·hm<sup>-2</sup>) 与 5 倍 (75 000 kg·hm<sup>-2</sup>) 3 种秸秆用量的一次性深埋 (30~40 cm) 还田试验, 探究其对黑土亚耕层 (0~20 cm) 土壤容重、紧实度及土壤含水量的影响, 并分析土壤团聚体变化对主要物理性状的调控效应。3 年玉米成熟期的测试结果表明: (1) 秸秆深还对亚耕层土壤容重、紧实度以及土壤含水量的改善程度高于耕层 (0~20 cm), 表现为随秸秆用量的增加而提高, 随还田后的时间延长而降低, 一次性秸秆高量深还改善土壤物理性状的效果可维持多年。(2) 秸秆 3 倍、5 倍量还田显著提高了亚耕层土壤 > 0.25 mm 与 > 2 mm 水稳性大团聚体的含量, 降低了微团聚体含量; 秸秆还田第 1、2 年为 > 0.25 mm 和 > 2 mm 水稳性团聚体的主要形成时期, 其含量最高为 CK 的 5 倍和 1.5 倍 ( $P < 0.05$ )。(3) 亚耕层土壤 0.25~0.053 mm 微团聚体以及 >0.25 mm 水稳性大团聚体含量均与土壤容重、紧实度以及采样时土壤含水量显著相关, 其中 0.25~0.053 mm、>2 mm 和 >0.25 mm 粒径团聚体为 2016 与 2017 年驱动土壤物理性状变化的关键因子, 1~0.5 mm 粒径团聚体为 2018 年驱动土壤物理性状变化的关键因子。综上, 切碎秸秆 75 000 kg·hm<sup>-2</sup> 还田是值得优先推荐的调控土壤团聚体分布、改善亚耕层土壤物理性状的良好措施, 兼具改土培肥与秸秆资源化利用的双重优点, 可为今后我国黑土区农田土壤改良提供理论依据与技术指导。

**关键词:** 秸秆颗粒; 高量; 亚耕层; 物理性状; 团聚体

中图分类号: S153 文献标志码: A

## Effects of Deep Straw Incorporation on Subsoil Physical Properties and Aggregate Distribution in Black Soil

DONG Jianxin<sup>1, 2</sup>, CONG Ping<sup>2</sup>, LIU Na<sup>1</sup>, LI Yuyi<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>1</sup>, PANG Huancheng<sup>1†</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China; 2. Tobacco Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Qingdao 266100, China)

\* 国家重点研发计划项目 (2016YFD0300804) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2016YFD0300804)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: panghuancheng@caas.ac.cn

作者简介: 董建新 (1976—), 男, 山东省菏泽市, 副研究员, 博士研究生, 主要从事土壤耕作与培肥研究。Email: dongjianxin@caas.cn

收稿日期: 2020-03-18; 收到修改稿日期: 2020-11-11; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-12-15

**Abstract:** 【 Objective 】 In order to improve soil structure of the subsoil layer of black soil and solve the problem of how to return maize straw in Northeast China, a three-year (2015—2018) field experiment was carried out. 【 Method 】 The field experiment was designed to have three treatments in returning pattern, i.e. CK (no straw return), QS (returning of chopped straw) and KL (returning of pelletized straw), and three treatments in straw returning dosage, i.e. low dosage ( $15\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), medium dosage ( $45\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 3 times as much as the low dosage) and high dosage ( $75\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 5 times as much as the low dosage), and all had the straw buried in the soil 30–40 cm depth. Effects of the treatments on soil bulk density, soil compactness and soil water content were explored, and effects of soil aggregate distribution regulating soil physical properties was analyzed. 【 Result 】 The tests of the soil samples collected at the maize maturity stage of the three year experiment show: 1) The practice of deep straw returning reduced soil bulk density and soil compactness and increased soil water content, and the effects were more significant in the 20–40 cm layer than in the 0–20cm soil layer. Moreover, the effects become more significant with increasing of straw dosage, and less with the time going on, and the effects of straw returning once at a high rate might last for a few years. In the third year of the experiment, only QS5 reduced soil bulk density significantly or by 10.9% ( $P < 0.05$ ), and QS5 and KL5 lowered soil compactness by 24.1% and 22.0% ( $P < 0.05$ ), but raised soil water content by 8.9% and 7.4% ( $P < 0.05$ ), respectively; 2) The treatments of medium and high in dosage significantly increased the content of macroaggregates and reduced the content of microaggregates in the subsoil, and the fractions of  $> 0.25\ \text{mm}$  water stable aggregates and of the  $> 2\ \text{mm}$  large aggregates increased significantly with rising straw dosage. What's more, the return of pelletized straw tended to promote the formation of macroaggregates than the return of chopped straw. The first and second years of straw returning were the main period for formation of macroaggregates, of which the highest content reached up to about 5 times and 1.5 times than that in CK, respectively; 3) Significant relationships were observed of 0.25–0.053 mm micro aggregate and  $> 0.25\ \text{mm}$  water stable aggregate with soil bulk density, soil compactness and soil water content in the subsoil layer ( $P < 0.05$ ), and the 0.25–0.053 mm,  $> 2\ \text{mm}$ , and  $> 0.25\ \text{mm}$  fractions of aggregates were the key factor driving changes in soil physical properties in 2016 and 2017, but the 1–0.5 mm fraction of aggregates was found to be the key factor driving the changes in soil physical properties in 2018. 【 Conclusion 】 Therefore, from the perspective of recycling maize straw in Northeast China, the return of chopped straw with a rate of  $75\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  is a good management to regulate the distribution of soil aggregates and improve the physical properties of subsoil. The finding may provide a theoretical basis and technical guidance for improvement of soil structure of the black soil in China.

**Key words:** Pelletized straw; High dosage; Subsoil; Physical properties; Soil aggregates

东北黑土地是中国最重要的、可年产 70 亿千克粮食的商品粮生产基地, 然而长期以旋代耕的方式造成土壤紧实、耕层变浅。吉林省大部分玉米产区土壤有坚实的犁底层存在, 其坚硬度约为耕层的 3 倍, 厚度为  $7\sim 11\ \text{cm}$ <sup>[1]</sup>, 严重影响土体水、热、气的运行<sup>[2]</sup>, 而这种不良结构恰好位于  $20\sim 40\ \text{cm}$  土壤亚耕层范围, 亚耕层作为连接表土层与底土层的重要耕作层, 对作物根系向深层土壤生长<sup>[3]</sup>以及土壤碳库构建有重要作用<sup>[4]</sup>。目前这种“板结”性的不良土壤结构占黑土总面积的 30%以上<sup>[5]</sup>, 严重影响黑土地的可持续发展。

目前, 秸秆还田已成为改良土壤结构的有效措施。研究表明, 秸秆还田对于土壤的蓄水保墒<sup>[6]</sup>、提高水分利用效率<sup>[7]</sup>以及防止水土流失等方面均有积极作用。韩晓增等<sup>[2]</sup>将秸秆及有机肥施入  $20\sim$

$35\ \text{cm}$  的黑土层中, 使土壤容重降低  $6.2\%\sim 9.9\%$ , 土壤含水量提高  $7.8\%\sim 22.9\%$ , 玉米产量提高 20% 以上, 其改良增厚耕作层的效果优于秸秆覆盖还田。秸秆还田后促进了土壤胶结, 有利于土壤微团聚体向大团聚体转化, 从而提高土壤结构稳定性, 而单施化肥则会抑制土壤大团聚体的形成<sup>[8]</sup>。秸秆还田能够有效提高耕层  $>0.25\ \text{mm}$  土壤水稳性团聚体含量<sup>[9]</sup>, 并且随秸秆还田量的增加, 土壤中机械稳定性团聚体及水稳性团聚体的含量均有所增加<sup>[10-11]</sup>。然而, 当前尚未系统地研究过不同秸秆还田方式对于亚耕层土壤结构的改良作用。

秸秆还田量与秸秆形态对土壤结构有重要影响。Liu 等<sup>[12]</sup>的研究表明, 秸秆还田量越高, 土壤水势越高, 表明持水量越大; 且粉碎秸秆较长秸秆更能在短期内增加土壤的持水能力<sup>[13]</sup>。然而, 当前

秸秆还田量与秸秆形态对土壤物理特征的影响尚不明确。本课题组前期研发出秸秆颗粒化还田技术,即将秸秆高度粉碎后挤压造粒,形成秸秆颗粒后直接还田,其堆积密度约为常规粉碎秸秆的 5 倍,具有体积小、施用方便、与土壤接触性好<sup>[14]</sup>,并且能够快速提升土壤有机碳含量<sup>[15]</sup>的优点,这为解决玉米秸秆体量大,秸秆还田形态单一、粗放,还田质量差,影响下一季作物生根以及出苗等问题提供了途径。我国东北地区一季玉米秸秆产量约为  $15\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,秸秆还田量多在  $6\ 000\sim 15\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ <sup>[16-17]</sup>,但如此充足的秸秆资源并未被应用到亚耕层土壤结构的改良中来。秸秆深埋还田是将秸秆直接施入亚耕层范围,与传统的旋耕还田相比缩短了对亚耕层的作用路径,且大量秸秆深施不会影响作物的生根、出苗,这就为秸秆一次性高量还田提供了可能,一次性还田避免了“年年耕”对土壤的扰动,也减少了人力物力的投入。但目前尚不明确亚耕层土壤物理结构对秸秆一次性高量深埋还田的响应,且新型秸秆颗粒化还田是否对黑土亚耕层土壤物理结构具有积极效果也未可知。因此,本研究从改良亚耕层土

壤物理性状出发,分秸秆切碎和制成颗粒两种形式,设 1 倍 ( $15\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )、3 倍 ( $45\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 与 5 倍 ( $75\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 三种倍量,一次深埋至 30~40 cm 土层(亚耕层),通过测定并比较其后 3 年秋收期亚耕层土壤主要物理性状及团聚体粒径分布,分析秸秆不同形态、不同用量深埋还田对亚耕层主要物理性状的影响,以期为选择最佳秸秆还田措施改良我国黑土区农田土壤提供理论依据以及技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

田间定位试验于 2015—2018 年在吉林省公主岭市朝阳坡镇 ( $124^{\circ}43'E$ 、 $43^{\circ}36'N$ ) 进行,该地位于我国东北黄金玉米生产带,地处吉林省中西部,东辽河中游右岸。当地以雨养农业为主,种植作物主要为玉米、大豆。属温带大陆性季风气候,年均气温  $5.6^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量  $594.8\ \text{mm}$ ,无霜期  $144\ \text{d}$ 。试验地土壤类型为典型黑土。土壤基本理化性状如表 1,土壤质地为黏壤土(国际制)。

表 1 试验地土壤基本理化性状

Table 1 Basic soil properties of the experiment field

土壤类型 Soil type	土层 Soil depth /cm	有机质 Organic matter /( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	颗粒组成/% Soil mechanical composition			容重 Soil bulk density /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	紧实度 Soil compactness /kPa	田间持水量 Field water holding capacity /%
			砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay			
黑土 Black soil	0~20 20~40	19.7 12.6	42.6 42.1	34.2 36.0	23.2 21.9	1.40 1.53	879 1005	31.3 29.1

### 1.2 试验设计

还田秸秆有切碎与制成颗粒两种形态,用量以当地秸秆还田常规用量为基准(每年玉米收获后地上部秸秆总量约为  $15\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),设 1 倍量 ( $15\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )、3 倍量 ( $45\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )、5 倍量 ( $75\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 3 个水平,以秸秆不还田(CK)为对照,共计 7 个处理(表 2);每个处理 3 次重复,共设 21 个小区,每个小区长 4 m、宽 4 m (6 垄)。

供试秸秆取自当地玉米收获后农田。切碎后还田秸秆(QS 处理)经风干、切碎约 10 cm 备用;颗粒态还田秸秆(KL 处理)用 HC-2000 型粉碎机粉碎后过 2 mm 筛,按照 30%~35%含水量添加蒸馏

水,混匀,用 FTHBCX350 型环模秸秆颗粒机挤压制成直径 4 mm、长度 4~6 cm 的棒状固体。切碎秸秆、颗粒秸秆容重分别约为  $53\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $447\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。试验处理编号及其秸秆用量如表 2。

在 2015 年 10 月玉米收获后进行秸秆翻埋还田;翻埋前将切碎秸秆和颗粒秸秆按试验设计用量均匀铺于各个小区地表,再用秸秆翻埋犁(功率  $> 92\ \text{kW}$ )直接将其翻埋至 30~40 cm 土层(亚耕层)。此后 3 年试验期间不再进行秸秆还田,且每年玉米播种前清除地表残留秸秆。2016—2018 年玉米一年一熟连作,供试品种为奇玉 8 号,每年 5 月初播种,种植密度  $67\ 500\ \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。施用化肥为尿素、过磷酸钙

表 2 不同试验处理秸秆还田方式及其用量

Table 2 Method and rate of straw returning relative to treatment

处理 Treatments	还田方式 Incorporation methods	秸秆用量 Incorporation rates / (kg·hm <sup>-2</sup> )	处理 Treatments	还田方式 Incorporation methods	秸秆用量 Incorporation rates / (kg·hm <sup>-2</sup> )
CK	秸秆不还田	0	KL1	秸秆颗粒还田	15 000
QS1	秸秆切碎还田	15 000	KL3	秸秆颗粒还田	45 000
QS3	秸秆切碎还田	45 000	KL5	秸秆颗粒还田	75 000
QS5	秸秆切碎还田	75 000			

和硫酸钾, 用量为 N 225 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg·hm<sup>-2</sup> 和 K<sub>2</sub>O 225 kg·hm<sup>-2</sup>, 其中磷肥、钾肥用做基肥一次性施入, 氮肥 30%基施、70%拔节期追施。各处理田间管理同当地高产玉米栽培。每年 10 月初玉米收获, 收获时进行玉米测产和土壤样品采集。

### 1.3 土壤样品采集与物理性质测定

采集土壤样本时, 在各小区对角线上布置 3 个取样点, 取样深度为 0~20 cm、20~40 cm 两层, 同一深度土层 3 个点取样混合为一个土样, 该土样用于测定土壤基本物理性质。同时采集 0~20 cm、20~40 cm 土层原状土用于土壤团聚体测定, 采集的土样装入硬质塑料盒内 (17 cm×11 cm×6 cm) 以避免其受到挤压、结构破坏。采集的土样挑拣出石块及植株残体等杂物, 带回实验室, 立即取其中部分用烘干法测定土壤质量含水量 (Soil water content, SWC, g·kg<sup>-1</sup>), 其余部分风干备用。

在采集土壤样品的同时现场测定土壤容重、紧实度。土壤容重采用环刀法测定。土壤紧实度 (Soil compactness, SC, kPa) 用 SC900 紧实度仪测定, 土壤紧实度的测定单位为 kPa, 压强分辨率为 35 kPa (精确度为 35 kPa) [18], 测量范围为 0~7 000 kPa; 最大测定土层深度为 45 cm, 空间分辨率为 2.5 cm, 故紧实度测定结果为各小区 0~45 cm 土层的穿透阻力分布状况。

土壤团聚体参考 Cambardella 和 Elliott [19] 的方法, 用湿筛法分级测定。使用的套筛筛孔直径分别为 2、1、0.5、0.25、0.053 mm。称取风干土样 100 g 置于 2 mm 筛内, 套筛放在沉降筒内蒸馏水中浸润 5 min 后, 以 30 次·min<sup>-1</sup> 速度、上下 30 mm 的振幅在水中振荡 2 min, 再将套筛取出, 把不同孔径筛内的团聚体冲洗到烧杯中; 获得 >2 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm、0.053~0.25 mm 粒径的

团聚体, 而 <0.053 mm 的团聚体则需要沉降筒静置 48 h, 弃去上清液再转移至烧杯中。将盛有各级团聚体的烧杯置于烘箱内 50℃ 烘干后, 称重, 计算可得各粒级团聚体的百分含量 [20]。在此过程中, 遇有悬浮秸秆残体采用自制滤网捞出。

### 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 对试验数据进行整理并绘图。运用 SAS 9.4 软件做单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和 Pearson 相关分析, 比较处理间数据差异显著性 (LSD,  $P=0.05$ ) 和不同土壤理化性质间的相关性。运用 CANOCO 5 软件进行土壤不同粒径团聚体含量与主要物理性状关系的冗余分析 (RDA)。

## 2 结 果

### 2.1 不同处理的土壤容重比较

与 CK 相比, 秸秆深埋还田能够降低 0~20 cm 耕层与 20~40 cm 亚耕层土壤容重, 尤其以亚耕层降低最显著。由表 3 可见, 2016 年, 对于 0~20 cm 土层, QS3、QS5 与 KL5 处理的土壤容重显著低于 CK, 降低比率以 QS5 最高, 为 11.9% ( $P<0.05$ ); 对于 20~40 cm 土层, 除 KL1 外, 各秸秆还田处理的土壤容重显著低于 CK, 降低比率以 QS5 最高, 为 28.1% ( $P<0.05$ ); 2017 年, 除 KL1 外, 各处理仍能较 CK 显著降低 20~40 cm 土层土壤容重, 降低比率以 QS5 最高, 为 12.2% ( $P<0.05$ ); 2018 年, QS5 较 CK 显著降低 20~40 cm 土层土壤容重的比率最高, 可达 10.9% ( $P<0.05$ )。

秸秆用量相同时, 不同秸秆形态下土壤容重的比较发现: 秸秆低量还田时, 仅 2016 年 20~40 cm

土层切碎秸秆与秸秆颗粒有显著差异, QS1 土壤容重显著低于 KL1 13.1% ( $P<0.05$ ); 秸秆中量还田时, 仅 2016 年切碎秸秆与秸秆颗粒表现出显著差异, 对于 0~20 cm 与 20~40 cm 土层, QS3 土壤容重分别显著低于 KL3 7.5% ( $P<0.05$ ) 与 14.7% ( $P<0.05$ ); 秸秆高量还田时, 2016 年, 对于 0~20 cm 与 20~40 cm 土层, QS5 土壤容重分别显著低于 KL5 6.8% ( $P<0.05$ ) 与 18.9% ( $P<0.05$ ); 2017 年, 对于 20~40 cm 土层, QS5 土壤容重显著低于 KL5 6.3% ( $P<0.05$ ); 2018 年, QS5 处理使得 20~40 cm 土层土壤容重显著低于 KL5 4.8% ( $P<0.05$ )。可见, 当秸秆用量相同时, 粉碎秸秆能够较秸秆颗粒大幅度降低土壤容重。

秸秆形态相同时, 不同秸秆用量下土壤容重的比较发现: 粉碎秸秆还田时, 2016 年, 0~20 cm 土层, QS3、QS5 土壤容重分别低于 QS1 6.9% ( $P<0.05$ ) 与 8.3% ( $P<0.05$ ), 20~40 cm 土层, QS3、QS5 土壤容重分别低于 QS1 7.9% ( $P<0.05$ ) 与 15.1%

( $P<0.05$ ); 2017 年, 20~40 cm 土层, QS5 土壤容重分别低于 QS1 7.6% ( $P<0.05$ ) 与 QS3 6.3% ( $P<0.05$ ); 2018 年, 20~40 cm 土层, QS5 土壤容重分别低于 QS1 6.8% ( $P<0.05$ ) 与 QS3 4.2% ( $P<0.05$ )。秸秆颗粒还田时, 2016 年, 0~20 cm 土层, KL5 土壤容重分别低于 KL1 4.7% ( $P<0.05$ ), 20~40 cm 土层, KL5 与 KL3 土壤容重分别低于 KL1 9.0% ( $P<0.05$ ) 与 6.2% ( $P<0.05$ ); 2017 年, 20~40 cm 土层, KL5 土壤容重较 KL1 降低 3.4% ( $P<0.05$ ); 2018 年, 20~40 cm 土层, KL3 与 KL5 的土壤容重分别较 KL1 降低 3.3% ( $P<0.05$ ) 与 4.6% ( $P<0.05$ )。可见, 当秸秆形态相同时, 随秸秆倍量的增加, 土壤容重降低幅度加大, 一次性高量还田可使土壤容重多年维持在较低水平。

此外, 从年际间变化看, 随着秸秆还田时间的延长, 亚耕层土壤容重逐渐增大, 相同处理的土壤容重降低幅度逐渐减小, 这与秸秆在土壤中不断腐解以及农机具逐年进地压实有关。

表 3 不同处理的土壤容重及土壤容重降低比率

Table 3 Soil bulk density and its decreasing rate relative to treatment

土层 Soil layer /cm	处理 Treatments	2016 年		2017 年		2018 年	
		容重	降低比率	容重	降低比率	容重	降低比率
		Soil bulk density / ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	Decrease rate/%	Soil bulk density / ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	Decrease rate /%	Soil bulk density / ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	Decrease rate /%
0~20	CK	1.51±0.02a	—	1.52±0.02a	—	1.46±0.01a	—
	QS1	1.45±0.03ab	3.98	1.48±0.03a	2.56	1.46±0.01a	0.26
	QS3	1.35±0.02c	10.40	1.47±0.02a	2.99	1.45±0.01a	0.62
	QS5	1.33±0.03c	11.89	1.46±0.04a	3.96	1.45±0.01a	0.50
	KL1	1.49±0.03a	1.63	1.52±0.03a	0.09	1.48±0.01a	1.30
	KL3	1.46±0.02ab	3.07	1.49±0.03a	1.69	1.46±0.01a	0.04
	KL5	1.42±0.01b	5.96	1.48±0.05a	2.35	1.45±0.01a	0.63
20~40	CK	1.49±0.03a	—	1.53±0.02a	—	1.55±0.01a	—
	QS1	1.26±0.03c	15.02	1.45±0.03bc	5.15	1.48±0.01bc	4.49
	QS3	1.16±0.04d	22.32	1.43±0.02c	6.45	1.44±0.02c	7.13
	QS5	1.07±0.03d	28.08	1.34±0.02d	12.18	1.38±0.02d	10.94
	KL1	1.45±0.02a	2.24	1.48±0.03ab	3.45	1.52±0.02ab	2.15
	KL3	1.36±0.02b	8.72	1.47±0.02bc	3.84	1.47±0.01c	5.22
	KL5	1.32±0.03bc	11.44	1.43±0.01c	6.14	1.45±0.01c	6.37

注: 相同年份同一深度土层不同小写字母代表不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ ), 下同。Note: Lowercase letters represent difference between treatments at level of 0.05 in the same soil depth in the same year. The same below.

## 2.2 不同处理的土壤紧实度的比较

土壤紧实度是指土壤抵抗外力压实和破碎的能力,其大小直接影响土壤中水、肥、气、热等状况,对作物生长、发育和产量均具有重要影响<sup>[21]</sup>。0~45 cm 深度土壤的紧实度测定结果表明,秸秆深埋还田尤其能在第 1、2 年降低 15~35 cm 深度的土壤紧实度(图 1),该范围恰好为犁底层所在,表明秸秆深埋还田对打破犁底层有良好效果。因犁底层恰好位于亚耕层范围内,故而对各处理 20~40 cm 土

层的平均土壤紧实度进一步做统计分析(表 4),结果表明:2016 年,各秸秆还田处理土壤紧实度均显著低于 CK,其中 QS5 与 KL5 的降低幅度最大,分别达 27.2% ( $P<0.05$ ) 与 23.8% ( $P<0.05$ );2017 年,仅 QS3、QS5 显著低于 CK 18.5% ( $P<0.05$ )、20.9% ( $P<0.05$ );2018 年,仅 QS1、QS3、QS5、KL5 处理显著低于 CK,其中 QS5 降低幅度最高,为 24.1% ( $P<0.05$ )。可见,秸秆高量还田在降低亚耕层土壤紧实度上具有显著优势。

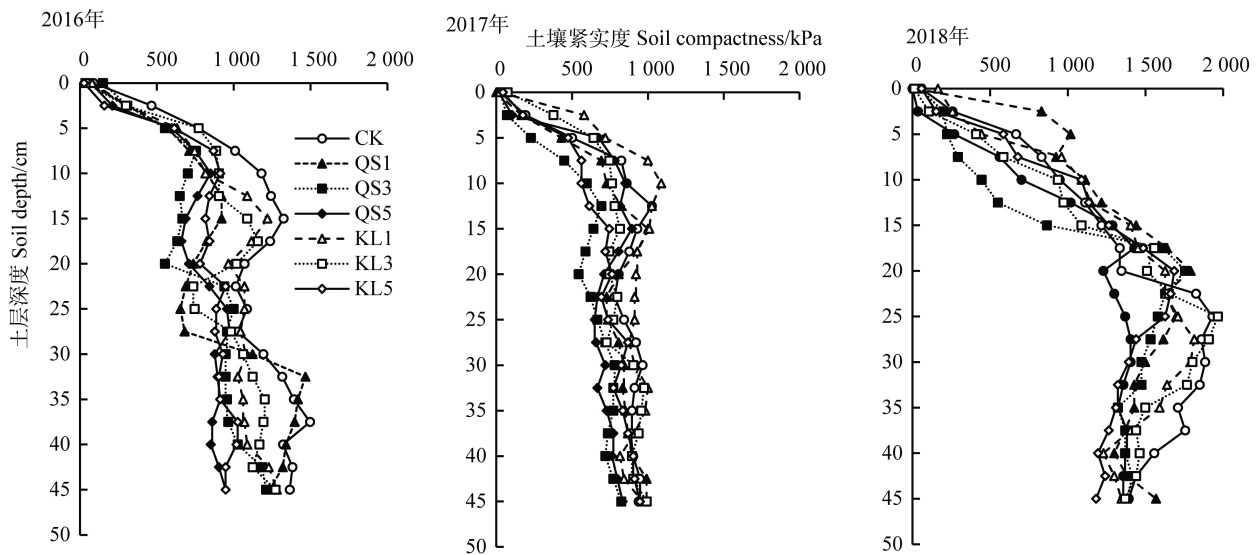


图 1 2016—2018 年玉米收获期 0~45 cm 土层土壤紧实度变化

Fig. 1 Changes in soil compactness of 0-45 cm soil layer in maize harvest season in year 2016, 2017 and 2018

表 4 不同处理对亚耕层(20~40 cm)土壤紧实度的影响

Table 4 Effect of straw return on soil compactness in the subsoil layer (20-40 cm) relative to treatment /kPa

处理	年份 Year			处理	年份 Year		
Treatments	2016	2017	2018	Treatments	2016	2017	2018
CK	1230.91±39.81a	888.19±51.42a	1796.17±82.93a	KL1	1063.84±49.23b	915.72±69.78a	1600.13±55.48ab
QS1	1095.98±48.64b	820.22±36.91a	1494.83±66.55bc	KL3	1026.53±32.02bc	870.78±39.67a	1686.33±73.98a
QS3	967.25±79.71bc	723.56±30.87b	1468.42±51.34cd	KL5	937.66±60.21c	812.66±34.97a	1401.17±59.62cd
QS5	896.03±44.13c	702.91±46.79b	1362.96±50.82d				

此外,从图 1 与表 4 还可看出,一次性秸秆深埋还田后,随着还田后年份的增加,秸秆降低土壤紧实度的作用逐渐减弱。2016 年,各处理 0~45 cm 深度的土壤紧实度变化范围为 500~1 500 kPa,经过 1 年秸秆并未完全腐解,仍有部分秸秆残留于土壤中起到降低紧实度的作用;2017 年,各处理土壤紧实度在 500~1 000 kPa 范围变化,这可能与当年

降水量多,测定时土壤含水量较高有关;2018 年,亚耕层土壤紧实度增至 1 000~2 000 kPa,农机具的频繁进地导致土壤紧实度上升的重要原因,但秸秆还田处理仍具有降低土壤紧实度的作用。

## 2.3 不同秸秆还田方式对土壤持水能力的影响

表 5 是每年秋收后采集土样时测定的耕层、亚耕层土壤含水量,在此用于表征土壤持水能力大小。

表 5 2016—2018 年不同处理对 0~20 cm 与 20~40 cm 土壤质量含水量的影响

Table 5 Effect of straw return on soil water content of 0-20 cm and 20-40 cm soil layer in 2016 to 2018 relative to treatment/%

土层 Soil layer/cm	处理 Treatment	年份 Year			平均 Average
		2016	2017	2018	
0~20	CK	25.97±0.36b	27.29±0.57a	26.60±0.45a	26.62
	QS1	26.82±0.31ab	27.54±0.32a	25.87±0.50a	26.74
	QS3	26.46±0.36ab	28.39±0.42a	25.55±0.39a	26.80
	QS5	27.13±0.29a	28.43±0.46a	26.21±0.67a	27.26
	KL1	25.57±0.37b	27±0.24a	25.82±0.44a	26.51
	KL3	26.41±0.22ab	27.71±0.35a	25.71±0.52a	26.62
	KL5	26.64±0.34ab	28.52±0.58a	26.99±0.50a	27.39
20~40	CK	24.68±0.39e	27.59±0.40c	26.22±0.35c	26.15
	QS1	26.85±0.30cd	28.15±0.29c	27.08±0.25c	27.49
	QS3	28.14±0.41b	28.05±0.49c	27.23±0.38bc	27.83
	QS5	30.64±0.52a	31.27±0.35a	28.57±0.27a	30.16
	KL1	26.08±0.34d	27.15±0.40c	26.91±0.31c	26.71
	KL3	27.33±0.36bc	29.53±0.44b	26.90±0.45c	27.99
	KL5	29.80±0.42a	30.52±0.53ab	28.17±0.41ab	29.50

表 5 数据表明, 秸秆深还田对 20~40 cm 亚耕层土壤含水量的影响高于 0~20 cm 土层, 亚耕层土壤含水量差异在各处理间达到显著水平。2016 年, 各秸秆还田处理 20~40 cm 土层土壤含水量均显著高于 CK, 且提升幅度随秸秆用量的增加而增加, 其中 QS5 增幅最高、为 24.1% ( $P<0.05$ ), KL1 增幅最低、为 5.7% ( $P<0.05$ ); 2017 年, QS5、KL3 与 KL5 处理土壤含水量均显著提高, 提高幅度分别为 13.3% ( $P<0.05$ )、7.0% ( $P<0.05$ )、10.6% ( $P<0.05$ ); 2018 年, 仅 QS5 与 KL5 处理显著提高土壤含水量, 提高幅度分别为 8.9% ( $P<0.05$ )、7.4% ( $P<0.05$ ), 可见秸秆高量处理在还田 3 年后仍然具有较好的保持土壤水分作用。从各处理 3 年的平均土壤含水量变化来看, 不同处理下 20~40 cm 土层的土壤含水量呈现显著的规律性变化, 表现在随着秸秆用量的增加, 土壤含水量逐渐升高, 然而相同秸秆用量、不同形态秸秆还田处理间的土壤含水量相差较小。由此可见, 秸秆高量深还能够显著提高亚耕层土壤持水能力, 降低农田表土跑墒的风险。

#### 2.4 不同秸秆还田方式下亚耕层不同粒径土壤团聚体的分布

由图 2 可见, 粒径>0.25 mm 的水稳性大团聚体

含量占比约 30%~35%, 其中以 0.25~0.5 mm 粒径占比最高, 约为 15%, 而> 2 mm 与 1~2 mm 占比最小, 约为 5%, 且高量还田的水稳性团聚体含量显著高于低量还田; 而 CK 则以 0.25~0.5 mm 和< 0.053 mm 粒径团聚体占比最高。

2016 年, 随秸秆用量的增加, > 2 mm、1~2 mm 水稳性团聚体含量随之递增, 这使得> 0.25 mm 水稳性大团聚体含量同样表现出递增趋势。不同处理间比较, KL5 的>2 mm 与 1~2 mm 水稳性团聚体含量显著高于其他秸秆还田处理, 分别为 CK 的 4.75 倍与 1.95 倍 ( $P<0.05$ ), QS5 处理能够显著增加 0.5~1 mm 水稳性团聚体含量, 约为 CK 1.40 倍 ( $P<0.05$ ), 同时显著高于其他秸秆还田处理, 而 QS3 处理 0.25~0.5 mm 水稳性团聚体含量显著高于其他处理, 与 CK 相比约为其 1.16 倍 ( $P<0.05$ )。可见增加秸秆用量可促进>0.25 mm 水稳性大团聚体的形成, 增加程度表现为 KL5 与 QS5> QS3 与 KL3> KL1> QS1。

2017 年, > 2 mm 与> 0.25 mm 水稳性团聚体含量亦随秸秆用量的增加而增加。与 CK 相比, 秸秆中、高量还田可提高> 2 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 水稳性团聚体含量, 其中 QS5 处理下

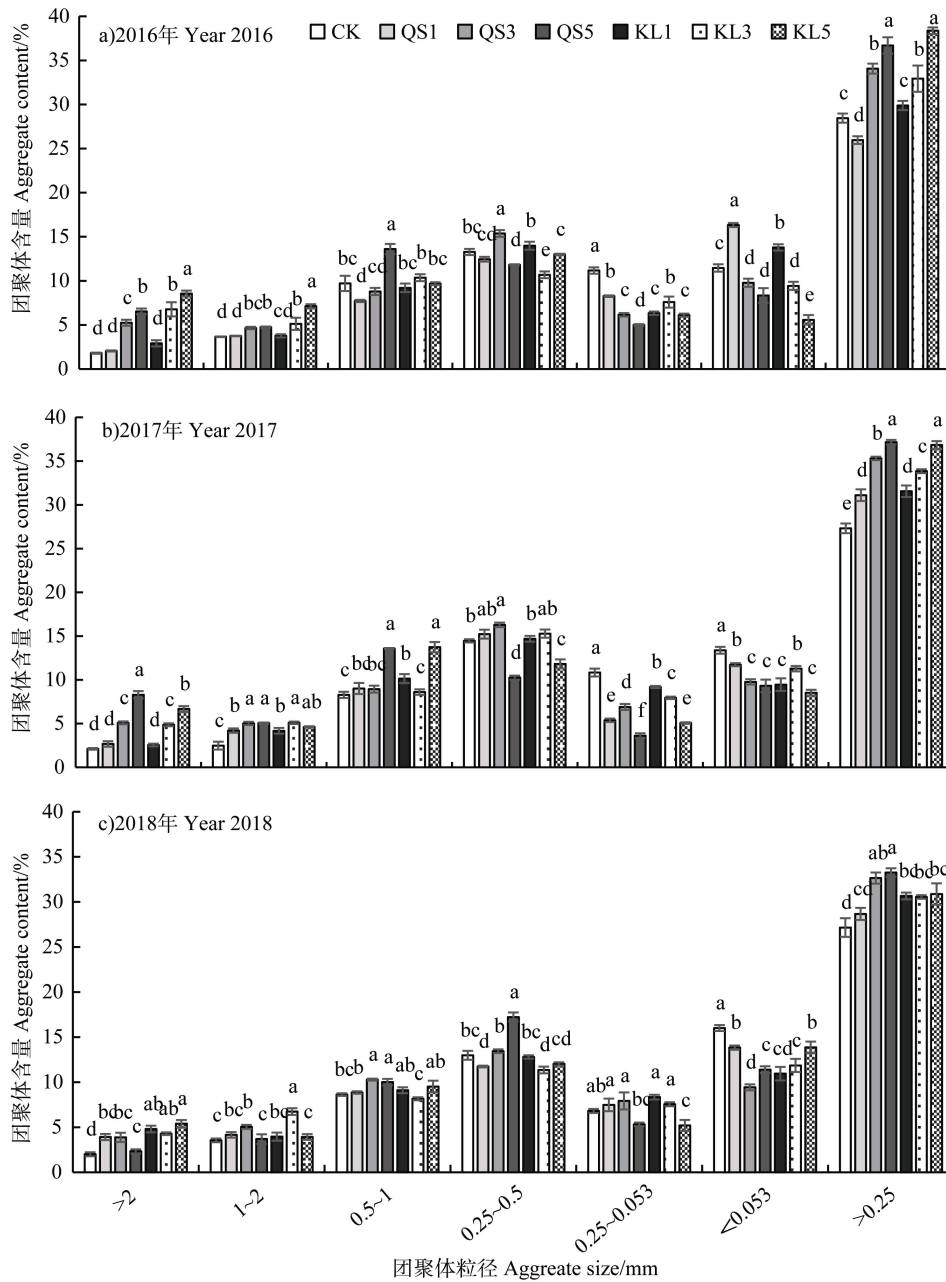


图 2 2016—2018 年不同处理的亚耕层土壤团聚体分布特征

Fig. 2 Soil aggregates distribution in the subsoil layer in 2016, 2017 and 2018 relative to treatment

> 2 mm、1~2 mm 与 0.5~1 mm 水稳性团聚体含量最高，约为 CK 的 3.93 倍、2.03 倍与 1.64 倍 ( $P < 0.05$ )，KL5 的显著性水平次之，其 > 2 mm 与 0.5~1 mm 水稳性团聚体含量占比较高，约为 CK 3.16 倍与 1.66 倍 ( $P < 0.05$ )，而 QS3 与 KL3 中量还田则能显著提高 0.25~0.5 mm 水稳性团聚体含量，低倍量还田仅能显著提高 1~2 mm 水稳性团聚体含量。各粒级水稳性团聚体的变化共同影响了 > 0.25 mm 水稳性大团聚体含量，其显著性顺序表现为 KL5 与

QS5> QS3> KL3> KL1 与 QS1，其中 KL5 约为 CK 1.35 倍 ( $P < 0.05$ )，QS1 约为 CK 1.14 倍 ( $P < 0.05$ )。此外，秸秆还田显著降低了 0.25~0.053 mm 微团聚体与 < 0.053 mm 粉黏粒的比例，其中秸秆高量还田的降低幅度最显著。

2018 年，秸秆中、高量还田能显著提升 >2mm、1~2 mm、0.5~1 mm 以及 0.25~0.5 mm 粒径团聚体含量，具体表现为：KL5 处理 > 2 mm 粒径团聚体含量，约为 CK 的 2.70 倍 ( $P < 0.05$ )，KL3 处理 1~



2 mm 粒径团聚体含量约为 CK 的 1.90 倍 ( $P < 0.05$ ), 而 QS3 与 QS5 显著提高 0.5~1 mm 粒径团聚体含量, 约为 CK 的 1.2 倍 ( $P < 0.05$ ), QS5 显著提高 0.25~0.5 mm 团聚体含量, 为 CK 的 1.33 倍 ( $P < 0.05$ )。除 QS1 外, 秸秆还田均能显著提高 > 0.25 mm 水稳性大团聚体含量, 其中 QS5 与 QS3 最高, 约为 CK 的 1.21 倍 ( $P < 0.05$ )。此外, 秸秆还田可显著降低 < 0.053 mm 粉黏粒含量, 而对于 0.25~0.053 mm 微团聚体含量仅秸秆高量还田具有显著降低作用, 可见秸秆中、高量一次性深还能促进亚耕层土壤粉黏粒、微团聚体团聚成大团聚体, 在一定程度上增加了土壤有机碳的赋存空间, 尤其是水稳性团聚体的增加对于土壤结构的改善有重要意义。

## 2.5 亚耕层土壤团聚体粒径分布与容重、紧实度及含水量的相关性

亚耕层土壤团聚体粒径分布与土壤容重、紧实度及含水量的相关分析结果如表 6 所示。2016 年, 土壤容重与 0.25~0.053 mm 团聚体含量呈显著 ( $P < 0.05$ ) 正相关, 土壤紧实度与 > 2 mm、> 0.25 mm 水

稳性土壤团聚体含量呈显著 ( $P < 0.05$ ) 负相关, 与 0.25~0.053 mm 团聚体含量呈极显著 ( $P < 0.01$ ) 正相关, 而土壤含水量与 > 2 mm、> 0.25 mm 水稳性土壤团聚体含量呈显著 ( $P < 0.05$ ) 正相关, 与 0.25~0.053 mm 团聚体含量呈显著 ( $P < 0.05$ ) 负相关。2017 年, 土壤容重与 > 2 mm、> 0.25 mm 水稳性土壤团聚体含量呈显著 ( $P < 0.05$ ) 负相关, 与 0.25~0.053 mm 呈极显著 ( $P < 0.01$ ) 正相关, 土壤紧实度与 0.25~0.053 mm 团聚体含量呈显著 ( $P < 0.05$ ) 正相关, 土壤含水量与 > 2 mm 团聚体含量呈极显著 ( $P < 0.01$ ) 正相关, 与 0.5~1 mm、> 0.25 mm 水稳性团聚体含量呈显著 ( $P < 0.05$ ) 正相关, 与 0.25~0.5 mm 团聚体含量呈显著 ( $P < 0.05$ ) 负相关。2018 年, 土壤容重与 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量呈显著 ( $P < 0.05$ ) 负相关, 土壤紧实度与 0.5~1 mm 土壤团聚体含量呈显著 ( $P < 0.05$ ) 负相关, 土壤含水量与 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量呈显著 ( $P < 0.05$ ) 正相关。由此可见, 大团聚体增多可能是提高土壤持水能力、降低土壤容重和紧实度的重要原因。

表 6 亚耕层土壤团聚体粒径分布与容重、紧实度及含水量的相关性

Table 6 Pearson correlation analysis of soil aggregate distribution with soil bulk density, soil compactness and soil water content in the subsoil layer in 2016 to 2018

年份 Year	指标 Indexes	团聚体粒径 Aggregate size /mm						>0.25 mm 水稳性团聚体 Water stable aggregate
		> 2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.053	< 0.053	
2016	容重	-0.681	-0.467	-0.571	0.187	0.756*	0.515	-0.698
	紧实度	-0.824*	-0.643	-0.491	0.070	0.942**	0.614	-0.837*
	含水量	0.824*	0.691	0.579	-0.189	-0.823*	-0.671	0.846*
2017	容重	-0.860*	-0.726	-0.715	0.639	0.897**	0.666	-0.838*
	紧实度	-0.750	-0.567	-0.452	0.380	0.764*	0.435	-0.707
	含水量	0.918**	0.572	0.762*	-0.783*	-0.748	-0.471	0.779*
2018	容重	-0.261	-0.114	-0.657	-0.608	0.516	0.524	-0.883**
	紧实度	-0.443	0.238	-0.810*	-0.456	0.490	0.420	-0.729
	含水量	0.402	-0.213	0.669	0.580	-0.735	-0.298	0.777*

\*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ .

进一步通过冗余分析 (RDA) 探究引起土壤容重、土壤紧实度以及土壤含水量变化的主导团聚体粒径, 图 3 表明, 2016 年, 两个排序轴解释了总变异的 99.27%, 表明两个排序轴可反映土壤团聚体粒径分布对土壤容重、土壤紧实度以及土壤含水量影

响的绝大部分信息, 其中 0.25~0.053 mm (78.9%,  $F=18.7$ ,  $P=0.006$ ) 微团聚体、> 0.25 mm 水稳性团聚体 (69.9%,  $F=11.6$ ,  $P=0.028$ ) 以及 > 2 mm 水稳性团聚体 (66.4%,  $F=9.9$ ,  $P=0.012$ ) 的向量权重最大, 是引起亚耕层土壤容重、紧实度以及含水量变

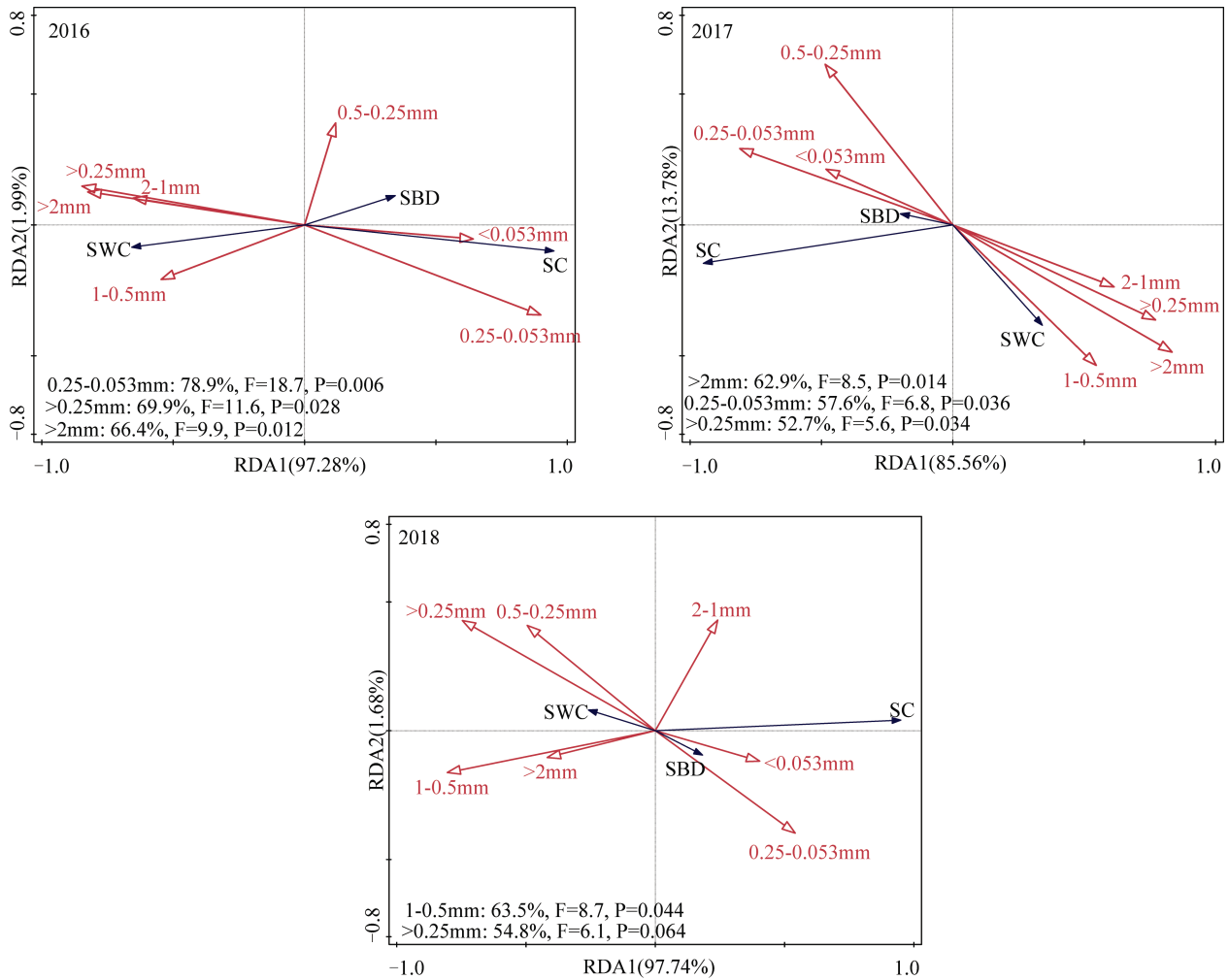


图3 2016—2018年亚耕层土壤容重、土壤紧实度以及土壤含水量与土壤团聚体粒径的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis of soil bulk density, soil compactness and soil water content with soil aggregate particle size of subsoil layer in 2016, 2017 and 2018

化的主导团聚体粒径。2017年，两个排序轴解释了总变异的99.34%，其中>2 mm (62.9%， $F=8.5$ ， $P=0.014$ )水稳性团聚体、0.25~0.053 mm (57.6%， $F=6.8$ ， $P=0.036$ )微团聚体以及>0.25 mm水稳性团聚体 (52.7%， $F=5.6$ ， $P=0.034$ )的向量权重最大，是引起亚耕层土壤容重、土壤紧实度以及土壤含水量变化的主导团聚体粒径。2018年，两个排序轴解释了总变异的99.42%，其中1~0.5 mm (63.5%， $F=8.7$ ， $P=0.044$ )粒径团聚体是引起亚耕层土壤容重、土壤紧实度以及土壤含水量变化的主导团聚体粒径。结合 Pearson 相关分析，微团聚体与土壤容重及土壤紧实度呈正比，而与土壤含水量呈反比，因此秸秆还田后可能通过促进微团聚体向水稳性大团聚体团聚来实现土壤物理性状的改善。

### 3 讨论

#### 3.1 秸秆高量还田对亚耕层土壤容重、土壤紧实度及土壤含水量的影响

土壤容重是衡量土壤结构和评价土壤质量的重要参数。前人研究表明，秸秆还田量越高对土壤容重的降低效果越显著<sup>[22]</sup>。在本研究中，各秸秆还田处理均能降低土壤容重，降低幅度同样随着秸秆用量的增加而提高，有三点原因：首先，农作物秸秆是一种低容重 ( $\approx 23 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ )的天然有机材料，施入土壤中又能够增加土壤孔隙度，从而降低土壤容重<sup>[23]</sup>，切碎秸秆较秸秆颗粒更易降低土壤容重也是因为切碎秸秆体积较大，易与土壤颗粒之间形成大孔隙；再者，秸秆在土壤中腐解产生的腐殖酸类有机分子与土壤

中原有的有机无机分子相螯合形成有机无机复合体,调控了土壤的团粒结构形成<sup>[24]</sup>,从而间接影响土壤三相;此外,秸秆还田时机械耕翻搅动对土壤直接起到了疏松作用,也是引起土壤紧实度降低的重要原因。土壤紧实度是评估土壤结构的另一个重要参数,可用于表征土壤压实强度,并与土壤容重显著相关<sup>[16, 25]</sup>。本研究中土壤紧实度的变化规律与土壤容重相似,增加秸秆用量以及还田深度还能显著降低亚耕层的土壤容重以及土壤紧实度,这有助于打破阻碍根系生长的犁底层<sup>[26]</sup>,从而促进根系吸收深层土壤的水分及养分。

亚耕层土壤含水量对秸秆深埋还田的响应程度高于耕层,且亚耕层土壤含水量随秸秆还田量的增加而增加。前人研究证实,秸秆埋在土壤中尤其增加其相邻土层的土壤含水量<sup>[27]</sup>,这主要由三方面原因造成,第一,秸秆分解产生的腐殖质具有亲水性<sup>[28]</sup>,能够形成良好的土壤团聚体并保持水分<sup>[29]</sup>;第二,秸秆本身具有保水性<sup>[30]</sup>,可以吸收、储存更多的水分供给植物吸收利用;第三,秸秆施入土壤中改善了土壤孔隙状况,增加了土壤水分的贮存空间<sup>[23]</sup>。

此外,本研究得出了随着时间的推移,秸秆还田对改善土壤物理性状的作用逐渐减弱的结果。这是因为还田秸秆在土壤中逐渐腐解,其自身保水效果以及对土壤孔隙的影响减弱<sup>[21]</sup>,致使后期秸秆还田处理的土壤物理性状与秸秆不还田处理差异缩小。然而,秸秆高量还田在3年后仍然对该物理性状的调节有积极作用,这是因为秸秆的腐解率不会随着秸秆的用量呈直线增加,其必然受到在土壤微生物群落平衡和土壤氮含量的制约<sup>[31]</sup>。

### 3.2 秸秆高量还田对亚耕层土壤团聚体粒径分布的影响

秸秆还田推动了土壤团聚体的形成过程,促进微团聚体向大团聚体团聚,大团聚体的增加有利于提高土壤养分的供应能力<sup>[32]</sup>。本研究中以高量秸秆还田处理土壤大团聚体含量最高,尤其是在第1、2年显著增加,这主要是因为秸秆还田的第1到第2年为快速腐解期<sup>[14]</sup>,能够较快产生大量腐殖酸,加上秸秆还田量高,大大增加了腐殖酸总量,腐殖酸是土壤中重要的有机胶结物质,能将土壤颗粒胶结成微团聚体,进而团聚成大团聚体<sup>[33]</sup>。从不同还田秸秆形态来看,第1年秸秆颗粒高量还田对大团聚体数量的增加有更好效果,这可能因为颗粒态秸秆在

土壤中吸水膨散开变成高粉碎化状态,加快了秸秆的腐殖化进程,更快地产生腐殖酸所致<sup>[14]</sup>;而随着时间的推移,秸秆颗粒快速腐解期结束,切碎秸秆由于体积较大、腐解慢,腐解仍在持续,在第2、3年仍能释放出大量腐殖酸促进团聚体形成,故而表现出切碎秸秆在还田后期更利于大团聚体形成。然而,各秸秆深还处理并未改变亚耕层0.5~0.25 mm团聚体优势粒级的地位,这与亚耕层土壤本身的成土过程有关,在一定程度的淋溶淀积作用下,近似于粉粒黏粒的微小团聚体在亚耕层累积<sup>[34]</sup>,造成其在亚耕层的占比较高。由此可见,秸秆还田对促进不同土层团聚体形成的原因基本一致,区别在于亚耕层团聚体形成周期相对较长,这与亚耕层通气性差、微生物活性较低有关,今后还应从亚耕层特殊环境进行深入分析。

### 3.3 亚耕层土壤团聚体粒径分布的主导作用

土壤团聚体是土壤结构的重要组成部分,它的数量以及大小在一定程度上反映土壤供储养分、持水性、通透性等能力的高低<sup>[35]</sup>。文中土壤容重、土壤紧实度以及土壤含水量三者与各粒级团聚体含量的相关性分析表明(表6),土壤容重多与水稳性大团聚体含量呈负相关,与微团聚体含量呈正相关,而土壤含水量则与之相反,这是因为秸秆还田量越大,大团聚体越多,相对而言微团聚体越少;大团聚体含量高不仅土壤孔隙度增高、大孔隙数量也增加,最终影响了土壤持水性<sup>[36-37]</sup>,尤其是具有抵抗水力分散作用的水稳性大团聚体(粒径>0.25 mm)的含量与土壤水分保持、有机碳含量以及土壤肥力有密切正相关关系<sup>[37]</sup>。本研究中秸秆一次性还田后的3年间,>0.25 mm土壤水稳性大团聚体含量显著高于CK,且不同倍量间亦有显著差异,表明高量还田具有提高>0.25 mm水稳性大团聚体的绝对优势,这为土壤物理性状的改善以及土壤有机碳的固存提供了有利条件,且前期试验也证实,秸秆高量深埋还田确实有显著提升土壤有机碳的效应<sup>[38]</sup>。本研究进一步通过冗余分析揭示水稳性大团聚体在影响亚耕层土壤容重、土壤紧实度以及土壤含水量的变化中具有主导作用,这是因为土壤大团聚体越多,越稳定,越能形成良好的孔隙结构<sup>[37]</sup>,在降低土壤容重<sup>[21]</sup>的同时,增强其持水保水能力。可见,秸秆还田后土壤水稳性大团聚体的增加是土壤物理性状改善的重要原因。

## 4 结 论

秸秆深还对亚耕层土壤容重、土壤紧实度的降低以及土壤持水能力的提升效果优于耕层,其降低或增加幅度随秸秆倍量的增加而提高,随还田时间的增加而递减;至秸秆还田第3年,切碎秸秆 $75\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理能同时显著降低亚耕层土壤容重10.9%、土壤紧实度24.1%,提高土壤含水量8.9%,切碎秸秆高量还田后效果显著。秸秆 $45\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 与 $75\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 还田可显著提高亚耕层 $>0.25\ \text{mm}$ 水稳性大团聚体含量,降低 $0.25\sim 0.053\ \text{mm}$ 、 $<0.053\ \text{mm}$ 微团聚体含量。秸秆还田第1、2年是促进亚耕层各粒级大团聚体形成的主要时期。 $0.25\sim 0.053\ \text{mm}$ 微团聚体、 $>0.25\ \text{mm}$ 团聚体以及 $>2\ \text{mm}$ 团聚体为2016年与2017年驱动亚耕层土壤容重、土壤紧实度以及土壤含水量变化的关键因子,而 $1\sim 0.5\ \text{mm}$ 粒径团聚体为2018年的关键因子。综上,增加秸秆用量实施秸秆深还能够改善亚耕层土壤物理性状,并提升水稳性大团聚体含量,其中以切碎秸秆 $75\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 深还对土壤物理结构的改善效果最显著,在改良培肥土壤的同时提供了秸秆资源化利用的新途径。

## 参考文献 (References)

- [1] Liu S, He W Q, Yan C R, et al. Effects of different tillage managements on soil physical properties in dryland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28 (2): 65–70. [刘爽, 何文清, 严昌荣, 等. 不同耕作措施对旱地农田土壤物理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28 (2): 65–70.]
- [2] Han X Z, Zou W X, Wang F X, et al. Construction effect of fertile cultivated layer in black soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20 (12): 2996–3002. [韩晓增, 邹文秀, 王凤仙, 等. 黑土肥沃耕层构建效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20 (12): 2996–3002.]
- [3] Palta J A, Yang J C. Crop root system behaviour and yield[J]. *Field Crops Research*, 2014, 165: 1–4.
- [4] Kirkegaard J A, Lilley J M, Howe G N, et al. Impact of subsoil water use on wheat yield[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2007, 58 (4): 303.
- [5] Guo W Y, Wei D, Zhou B K, et al. Current situation and comprehensive control strategies of the mid-low yield land in northeast[J]. *Heilongjiang Agricultural Science*, 2008 (6): 52–55. [郭文义, 魏丹, 周宝库, 等. 东北中低产田现状与综合治理对策[J]. 黑龙江农业科学, 2008 (6): 52–55.]
- [6] Munoz K, Buchmann C, Meyer M, et al. Physicochemical and microbial soil quality indicators as affected by the agricultural management system in strawberry cultivation using straw or black polyethylene mulching[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 113: 36–44.
- [7] Tao Z Q, Li C F, Li J J, et al. Tillage and straw mulching impacts on grain yield and water use efficiency of spring maize in Northern Huang-Huai-Hai Valley[J]. *Crop Journal*, 2015, 3 (5): 445–450.
- [8] Hao X X, Dou S, An F H, et al. Humus composition and structural characteristics of humic acid in soil aggregates under different utilization of land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24 (5): 248–252. [郝翔翔, 窦森, 安丰华, 等. 不同利用方式下土壤团聚体腐殖质组成及胡敏酸结构特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24 (5): 248–252.]
- [9] Lan M L. Influence of straws returning with landfill on organic carbon in soil aggregate and microbial community structure[D]. Chongqing: Southwest University, 2016. [兰木羚. 秸秆翻埋对土壤团聚体有机碳分布和微生物群落结构的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2016.]
- [10] Zhang P, Jia Z K, Wang W, et al. Effects of straw returning on characteristics of soil aggregates in semi-arid areas in southern Ningxia of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45 (8): 1513–1520. [张鹏, 贾志宽, 王维, 等. 秸秆还田对宁夏半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45 (8): 1513–1520.]
- [11] Jiang C L, He Y Q, Liu X L, et al. Effect of long-term application of organic manure on structure and stability of aggregate in upland red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (4): 715–722. [姜灿烂, 何园球, 刘晓利, 等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47 (4): 715–722.]
- [12] Liu S C, Zhang H, Lü J L, et al. A preliminary study on soil water transport and thermodynamics in a Loess soil with straw returning for long Time[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31: 1791–1798.
- [13] Wang Z L. Effects of different straw incorporation manners on soil physical and chemical properties and crop growth[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2012. [王增丽. 秸秆不同处理还田方式对土壤理化特性和作物生长效应的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2012.]
- [14] Wang J, Zhang L, Pang H C, et al. Returning granulated straw for accelerating decomposition rate and improving soil fertility[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (6): 177–183. [王婧, 张莉, 逢焕成, 等. 秸秆颗粒化还田加速腐解速率提高培肥效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33 (6): 177–183.]

- [ 15 ] Cong P, Li Y Y, Gao Z J, et al. High dosage of pelletized straw returning rapidly improving soil organic carbon content and wheat-maize yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 ( 1 ): 148–156. [丛萍, 李玉义, 高志娟, 等. 秸秆颗粒化高量还田快速提高土壤有机碳含量及小麦玉米产量[J]. 农业工程学报, 2019, 35 ( 1 ): 148–156.]
- [ 16 ] Xu Z S. Effects of straw returning to field on soil properties and maize yield in black soil[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017. [徐忠山. 秸秆还田量对黑土地土壤性状及玉米产量的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.]
- [ 17 ] Lin L, Zhang C C, Wang E H. Mechanical properties of black soil after straw incorporation: Effect of straw mixing amount[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28 ( 9 ): 2932–2938. [林琳, 张程程, 王恩娟. 添加秸秆后黑土力学行为特征——秸秆含量的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28 ( 9 ): 2932–2938.]
- [ 18 ] Jiao C Q, Wang Y Q, Liu J, et al. Spatial-temporal variability of soil hardness and effect of soil hardness on other soil properties in rotary tillage in Guanzhong farmland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27 ( 3 ): 7–12. [焦彩强, 王益权, 刘军, 等. 关中地区耕作方法与土壤紧实度时空变异及其效应分析[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27 ( 3 ): 7–12.]
- [ 19 ] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57 ( 4 ): 1071–1076.
- [ 20 ] Qiu J F, Dou S, Shao C, et al. Effects of corn stalk application on quantity and structural characteristics of humus acid in soil aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48 ( 4 ): 781–787. [仇建飞, 窦森, 邵晨, 等. 添加玉米秸秆培养对土壤团聚体胡敏酸数量和结构特征的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48 ( 4 ): 781–787.]
- [ 21 ] Zhang S, Kong D G, Chang X H, et al. Effect of straw deep application on soil water storage capacity[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41 ( 6 ): 127–129. [张帅, 孔德刚, 常晓慧, 等. 秸秆深施对土壤蓄水能力的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41 ( 6 ): 127–129.]
- [ 22 ] Wei C F, Gao M, Shao J G, et al. Soil aggregate and its response to land management practices[J]. China Particology, 2006, 4 ( 5 ): 211–219.
- [ 23 ] Yin C C. Effects of deep straw returning on physical properties[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2014. [殷程程. 深层秸秆还田对土壤物理性质的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2014.]
- [ 24 ] Bucka F B, Kölbl A, Uteau D, et al. Organic matter input determines structure development and aggregate formation in artificial soils[J]. Geoderma, 2019, 354: 113881.
- [ 25 ] Catania P, Badalucco L, Laudicina V A, et al. Effects of tilling methods on soil penetration resistance, organic carbon and water stable aggregates in a vineyard of semiarid mediterranean environment[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77 ( 9 ): 1–9
- [ 26 ] Zhai Z, Li Y Y, Guo J J, et al. Effect of tillage depth on soil physical properties and yield of winter wheat-summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 ( 11 ): 115–123. [翟振, 李玉义, 郭建军, 等. 耕深对土壤物理性质及小麦-玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33 ( 11 ): 115–123.]
- [ 27 ] Wang S N, Zou H T, Zhang Y L, et al. Effect of straw deep returning on the soil water features and soil organic carbon components[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29 ( 1 ): 154–158. [王胜楠, 邹洪涛, 张玉龙, 等. 秸秆集中深还田对土壤水分特性及有机碳组分的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29 ( 1 ): 154–158.]
- [ 28 ] Rubinić V, Husnjak S. Clay and humus contents have the key impact on physical properties of Croatian Pseudogleys[J]. Agriculturae Conspectus Scientificus, 2016, 81 ( 4 ): 187–191.
- [ 29 ] Wright S F, Anderson R L. Aggregate stability and glomalin in alternative crop rotations for the central Great Plains[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, 31 ( 3/4 ): 249–253.
- [ 30 ] Xie L H, Liu M Z, Ni B L, et al. Utilization of wheat straw for the preparation of coated controlled-release fertilizer with the function of water retention[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60 ( 28 ): 6921–6928.
- [ 31 ] Yue D, Cai L Q, Qi P, et al. The decomposition characteristics and nutrient release laws of wheat and corn straws under different straw-returned amount[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30 ( 3 ): 80–85. [岳丹, 蔡立群, 齐鹏, 等. 小麦和玉米秸秆不同还田量下腐解特征及其养分释放规律[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30 ( 3 ): 80–85.]
- [ 32 ] Zhang J M, Chi F Q, Han J Z, et al. SOC distribution characteristics of mollisols aggregates in different long-term fertilization systems[J]. Soil and Crop, 2017, 6 ( 1 ): 49–54. [张久明, 迟凤琴, 韩锦泽, 等. 长期不同施肥黑土团聚体有机碳分布特征[J]. 土壤与作物, 2017, 6 ( 1 ): 49–54.]
- [ 33 ] 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 & Tillage Research, 2009, 103 ( 2 ): 412–418.

- [ 34 ] Unger P W. Organic matter and water-stable aggregate distribution in ridge-tilled surface soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59 ( 4 ): 1141–1145.
- [ 35 ] Cai L Q, Qi P, Zhang R Z. Effects of conservation tillage measures on soil aggregates stability and soil organic carbon in two sequence rotation system with spring wheat and field pea[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22 ( 2 ): 141–145. [蔡立群, 齐鹏, 张仁陟. 保护性耕作对麦-豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22( 2 ): 141–145.]
- [ 36 ] Wang Q K, Wang S L. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36 ( 3 ): 415–421. [王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36 ( 3 ): 415–421.]
- [ 37 ] Neufeldt H, Ayarza M A, Resck D V S, et al. Distribution of water-stable aggregates and aggregating agents in Cerrado Oxisols[J]. Geoderma, 1999, 93 ( 1 ): 85–99.
- [ 38 ] Cong P, Pang H C, Wang J, et al. Effect of returning chopped and pelletized straw at a high rate enhancing soil organic carbon in subsoil of farmlands of black soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 ( 4 ): 811–823. [丛萍, 逢焕成, 王婧, 等. 粉碎与颗粒秸秆高量还田对黑土亚耕层土壤有机碳的提升效应[J]. 土壤学报, 2020, 57 ( 4 ): 811–823.]

(责任编辑: 檀满枝)