

添加玉米秸秆对旱作土壤团聚体及其有机碳含量的影响

王碧胜¹, 于维水¹, 武雪萍¹, 高丽丽^{1,2}, 李景^{1,3}, 李生平¹, 宋霄君¹,
刘彩彩^{1,4}, 李倩^{1,5}, 梁国鹏¹, 蔡典雄¹, 张继宗¹

(¹ 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; ² 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; ³ 河北地质大学水资源与环境学院, 石家庄 050031; ⁴ 山西师范大学地理科学学院, 山西临汾 041004; ⁵ 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要: 【目的】研究玉米秸秆还田对不同耕作处理下旱地土壤团聚体及其有机碳的影响, 旨在探究长期传统耕作土壤添加秸秆后团聚体及其有机碳的变化规律, 并确定添加秸秆提高土壤有机碳的主要原因, 为旱地农田固碳技术提供理论依据。【方法】采集大田长期试验地的传统耕作和免耕小区土样进行室内培养试验, 设置 4 个处理, 分别为传统耕作土壤不加秸秆(CT)、免耕土壤不加秸秆(NT)、传统耕作土壤加秸秆(CTS)和免耕土壤加秸秆(NTS), 15 次重复; 秸秆为传统耕作玉米植株地上部分, 用量为 5% 烘干土质量, 在 25℃ 恒温培养箱中通气培养 180 d, 定期取样进行团聚体组成和有机碳含量的测定。【结果】(1) 不加秸秆处理团聚体以 250—53 μm 为主, 占全部团聚体的 52%—66%; 添加秸秆处理以 2 000—250 μm 团聚体为主, 占全部团聚体的 41%—50%, CTS 较 CT 提高 230%—302%, NTS 较 NT 提高 92%—134%。(2) 添加秸秆处理平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)以及 > 0.25 mm 团聚体百分比($R_{0.25}$)显著提高, 培养到 180 d 时, CTS 较 CT 分别提高 133%、130%和 235%, NTS 较 NT 分别提高 53%、75%和 87%。(3) 培养至 180 d 时, CTS 较 CT 分别提高 250—53 μm 和 < 53 μm 团聚体有机碳 70%和 54%; NTS 较 NT 分别提高 250—53 μm 和 < 53 μm 团聚体有机碳 30%和 25%。(4) 添加秸秆显著提高 2 000—250 μm 团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率, CTS 和 NTS 分别为 49%—61%和 50%—60%, 且受团聚体组成影响较大。【结论】添加秸秆能够有效提高旱作土壤大团聚体(> 250 μm)形成并增强其稳定性, 提高大团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率, 且对传统耕作处理土壤的促进效果更明显。

关键词: 添加秸秆; 旱作土壤; 团聚体; 有机碳

Effect of Straw Addition on the Formation of Aggregates and Accumulation of Organic Carbon in Dryland Soil

WANG BiSheng¹, YU WeiShui¹, WU XuePing¹, GAO LiLi^{1,2}, LI Jing^{1,3}, LI ShengPing¹, SONG XiaoJun¹,
LIU CaiCai^{1,4}, LI Qian^{1,5}, LIANG GuoPeng¹, CAI DianXiong¹, ZHANG JiZong¹

(¹ Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;
² Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;
³ College of Water Resources and Environment, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031; ⁴ College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041004, Shanxi; ⁵ College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048)

Abstract: 【Objective】To understand the regularity of aggregation and organic carbon changes after adding straw in long-term conventional tillage soil and to explore the main reason of improved soil organic carbon, the effects of straw incorporation on soil aggregates and the organic carbon content in aggregate were determined, so as to provide theoretical basis for carbon fixation in

收稿日期: 2018-11-07; 接受日期: 2019-01-21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0200408、2016YFD0300804)、国家科技支撑计划课题(2015BAD22B03)、中国农业科学院基本科研业务费专项(1610132019033)

联系方式: 王碧胜, E-mail: wangbisheng2@126.com. 通信作者武雪萍, E-mail: wuxueping@caas.cn. 通信作者张继宗, E-mail: zhangjizong@caas.cn

dryland agriculture.【Method】An in-lab incubation experiment was conducted for 180 days in a constant temperature incubator at 25 °C with the soil collected from conventional tillage and no-tillage field plot. Four treatments were set up, namely conventional soil without straw (CT), no-tillage soil without straw (NT), conventional tillage soil with straw (CTS) and no-till soil with straw (NTS). Each treatment was sampled 15 replicates periodically for aggregate and organic carbon determinations. The straw was the aboveground parts of maize collected from conventional tillage, and the dosage was 5% dry soil weight.【Result】(1) Aggregate in CT and NT were dominated by 250-53 μm fraction, accounting for 52%-66% of total aggregates, while in CTS and NTS, the aggregates were dominated by 2 000-250 μm fraction, accounting for 41%-50% of total aggregates. CTS and NTS improved 2 000-250 μm aggregate by 230%-302% and 92%-134% relative to CT and NT, respectively. (2) Straw incorporation significantly increased the mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) and macro-aggregate content ($R_{0.25}$) of water-table aggregates. In the 180th day, CTS increased 133%, 130%, and 235%, respectively; compared with CT, NTS increased 53%, 75% and 87%, respectively, compared with NT. (3) In the 180th day, compared with CT, CTS increased the organic carbon content in aggregate of 250-53 μm and $<53 \mu\text{m}$ by 70% and 54%, respectively, and compared with NT, NTS increased in the same aggregates by 30% and 25%, respectively. (4) The contribution of organic carbon in 2 000-250 μm aggregate to soil organic carbon was significantly increased by CTS and NTS, with improvement of 49%-61% and 50%-60%, respectively, which was more affected by aggregate composition.【Conclusion】The addition of straw could effectively increase the content of macroaggregates ($>250 \mu\text{m}$) in the dryland, enhance its stability and increase the contribution of macroaggregates to soil organic carbon, and had a greater effect on the conventional tillage soil.

Key words: straw addition; dryland soil; aggregate; organic carbon

0 引言

【研究意义】土壤团聚体是土壤的基本结构单元^[1],其分布和稳定性是土壤物理性质的重要指标。土壤有机碳作为土壤质量的核心要素,决定着土壤肥力^[2-3]。土壤团聚体和有机碳之间通常有着密切的联系,一方面团聚体的包被作用可以使其内部的有机碳得到物理保护而免受微生物的分解,增加土壤有机碳的稳定性^[4];另一方面土壤有机碳是重要的胶结物质,能够增强土粒的团聚性、促进团粒结构的形成^[5-7]。秸秆还田不仅能够使数量巨大的秸秆能源得到充分利用^[8-9],而且能够有效增加土壤有机碳含量^[10-13]、提高土壤肥力和保持土壤水分^[14]。此外,秸秆还田对土壤团聚体形成也具有促进作用^[15-16],改善土壤结构。中国北方的旱作农业大约占全国耕地面积 55%,此区域土壤干旱和水土流失严重,传统耕作频繁的翻耕和秸秆移除导致土壤结构破坏和土壤肥力下降,是限制该地区作物产量的主要因素^[17]。因此,研究秸秆还田对旱作农田土壤团聚体形成及有机碳分布的影响,对于旱作农田土壤管理措施的选择具有重要的实践意义。【前人研究进展】目前关于秸秆还田对土壤团聚体及其有机碳的影响已备受关注。王秀娟等^[8]研究表明秸秆还田能够提高 0—20 cm 土层 $>2 \text{ mm}$ 团聚体含量以及 0.25—1 mm 和 $<0.25 \text{ mm}$ 粒级中的有机碳含量。刘哲等^[18]研究表明,在培养 15 d、60 d 和 120 d 时添加秸秆均能显著提高土壤 $>2 000 \mu\text{m}$ 团聚体含

量。谢柠桢等^[19]通过研究玉米根、茎、叶在土壤中的分配,得知在 180 d 的培养期内各添加物处理有机碳含量均显著高于未添加处理。上述研究表明,秸秆对团聚体及其有机碳有重要影响,通过短期室内培养研究其变化规律是可行的。【本研究切入点】不同土壤类型和气候环境常常影响秸秆还田对土壤团聚体及有机碳的作用效果^[20-21],北方旱地具有多风少雨的特殊气候^[17],自 20 世纪 80 年代引入保护性耕作以来^[22],秸秆还田得到普遍推广。关于秸秆对团聚体影响的研究多是在施肥^[2-3,7,10]和耕作^[5,16]条件下开展,导致秸秆还田对北方旱作农田土壤团聚体和有机碳的影响尚不清楚;关于添加秸秆对长期传统耕作的土壤团聚体及其有机碳变化的研究更少见报道。【拟解决的关键问题】本文采用室内培养方法,通过对比长期传统耕作(每年耕作两次,秸秆移除)和免耕处理(不耕作,秸秆覆盖)土壤在添加玉米秸秆后团聚体组成、稳定性以及各粒级团聚体有机碳分布的变化,明确添加秸秆对旱地不同耕作处理土壤团聚体及其有机碳的影响,为北方旱作农田筛选合理农田管理方式提供科学依据,为深入研究旱作农田土壤团聚体固碳机制提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于山西省寿阳县宗艾村(东经 112°—113°,北纬 37°—38°),海拔 1 066—1 159 m,年平均气温 7.4℃,近 20 年的平均降雨量为 461.8 mm,年

均蒸发量约为 1 700—1 800 mm, 属中纬度暖温带半湿润偏旱大陆性季风气候区, 受季风影响, 平均风速可达 $3.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 冬春季最大风力可达 8 级以上。四季分明、季节温差大, 无霜期为 130 d 左右。一年一作春玉米播种面积占粮食播种面积的 50% 以上。试验地点选在地势较平缓的褐土上, 质地为砂质壤土, 属于全年无灌溉雨养地。2003 年时 0—20 cm 土层基础养分含量为有机质 $25.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.04 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效氮 ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) $54.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷 $7.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $84.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 7.87。

本试验开始于 2003 年并一直保持相同处理, 试验设传统耕作 (CT) 和免耕 (NT) 2 种耕作处理, 具体操作为: 传统耕作 (CT), 秋收后秸秆移出, 秋季耕翻, 春季播前撒施化肥并春耕; 免耕 (NT), 秋收后将秸秆顺行推倒免耕覆盖, 春季免耕, 顺行开 5 cm 深小槽, 点播玉米种子, 在两播种点之间穴施化肥。种植作物为春玉米, 一年一作, 供试玉米品种为当地优势品种。处理小区面积为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} = 25 \text{ m}^2$, 重复 3 次, 每年不同耕作处理 N、 P_2O_5 施肥量分别为 $105 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.2 供试材料

2016 年秋季收获后, 采集 0—20 cm 土层样品, 通过环刀法获取原状土样, 通过土钻采集 3 样点土壤混合均匀获取混合土样。采集的土样带回实验室, 在通风阴凉处自然风干后沿土块天然断裂面轻轻掰开, 将大的植物残体和石子砂砾去除, 原状土样通过 6 mm 筛子, 用于测定初始土样水稳性团聚体; 混合土样全部通过 2 mm 筛子, 用于培养试验。2016 年 CT 和 NT 处理土壤养分含量分别为: 有机质 $27.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $35.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.05 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.55 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷 $12.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $46.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $106.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $173.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 8.12 和 7.76。供试秸秆为大田试验传统耕作处理下玉米秸秆, 取地上部分, 在 60°C 烘干, 粉碎过 2 mm 筛, 秸秆有机碳含量为 $424.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮 $18.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.3 培养试验

试验设置 4 个处理, 即传统耕作土壤不加秸秆 (CT)、免耕土壤不加秸秆 (NT)、传统耕作土壤加秸秆 (CTS) 和免耕土壤加秸秆 (NTS), 每个处理 15 次重复。将过 2 mm 筛的土样 60 g 和 3 g 玉米秸秆 (5% 烘干土的质量百分数^[23]) 混匀后装入 500 mL 的玻璃广口瓶中, 加入蒸馏水至土壤最大持水量的 70%, 用中间带透气滤纸的塑料膜封闭瓶口, 在 25°C 恒温培

养箱中通气培养, 每周称重保持土壤水分。培养周期为 180 d, 分别于培养后第 15 天、30 天、60 天、90 天、180 天取各处理 3 个重复样品进行试验指标测定; 第 0 天数据采用室内培养试验开始前土壤测定, 因此 CT 和 CTS、NT 和 NTS 分别相同。

1.4 测试方法

土壤水稳性团聚体: 称取 50.00 g 风干土平铺于 2 mm 筛子上, 室温下用蒸馏水浸润 5 min, 手动上下振动筛子, 幅度为 3 cm, 震动 2 min, 共 50 次。震动完毕后用蒸馏水将筛子上的土样洗入铝盒。按照上述方法将土样依次通过 0.25 mm 和 0.053 mm 筛, 分别获得 $>2\,000 \mu\text{m}$ 、 $2\,000\text{—}250 \mu\text{m}$ 、 $250\text{—}53 \mu\text{m}$ 和 $<53 \mu\text{m}$ 四部分团聚体。

土壤有机碳测定采用干样燃烧法, 所用仪器为元素分析仪 (Vario MAX122 C/N, Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Germany), 测定前土样经 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸处理, 去除无机碳。

1.5 计算方法

利用各粒级团聚体数据, 计算平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD)、 $>0.25 \text{ mm}$ 团聚体百分比 ($R_{0.25}$)。

$$\text{MWD} = \sum (X_i \times M_i / M_t) \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \text{Exp} [\sum (M_i \times \ln X_i) / \sum M_i] \quad (2)$$

$$R_{0.25} = \frac{M_{t>0.25}}{M_t} \times 100\% \quad (3)$$

式中, X_i 为第 i 级团聚体平均直径 (mm), M_i 为第 i 级团聚体质量 (g), M_t 为团聚体总质量 (g), $M_{t>0.25}$ 为直径大于 0.25 mm 团聚体质量 (g)。

团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率 (W):

$$W = \frac{\text{OC}_i \times M_i}{\text{SOC} \times M_t} \times 100\% \quad (4)$$

式中, W 为团聚体中有机碳对土壤有机碳的贡献率 (%), OC_i 为第 i 级团聚体中有机碳含量 ($\text{g C}\cdot\text{kg}^{-1}\text{aggregate}$), SOC 为土壤有机碳含量 ($\text{g C}\cdot\text{kg}^{-1}\text{soil}$)。

1.6 统计分析

采用 Microsoft Excel 2007 和 SAS9.2 进行数据处理和作图, 采用一般线性模型进行方差分析, 最小显著极差法 (LSD 法) 进行多重比较, 显著性水平 $P < 0.05$ 。数据为平均值 \pm 标准误 ($n=3$)。

2 结果

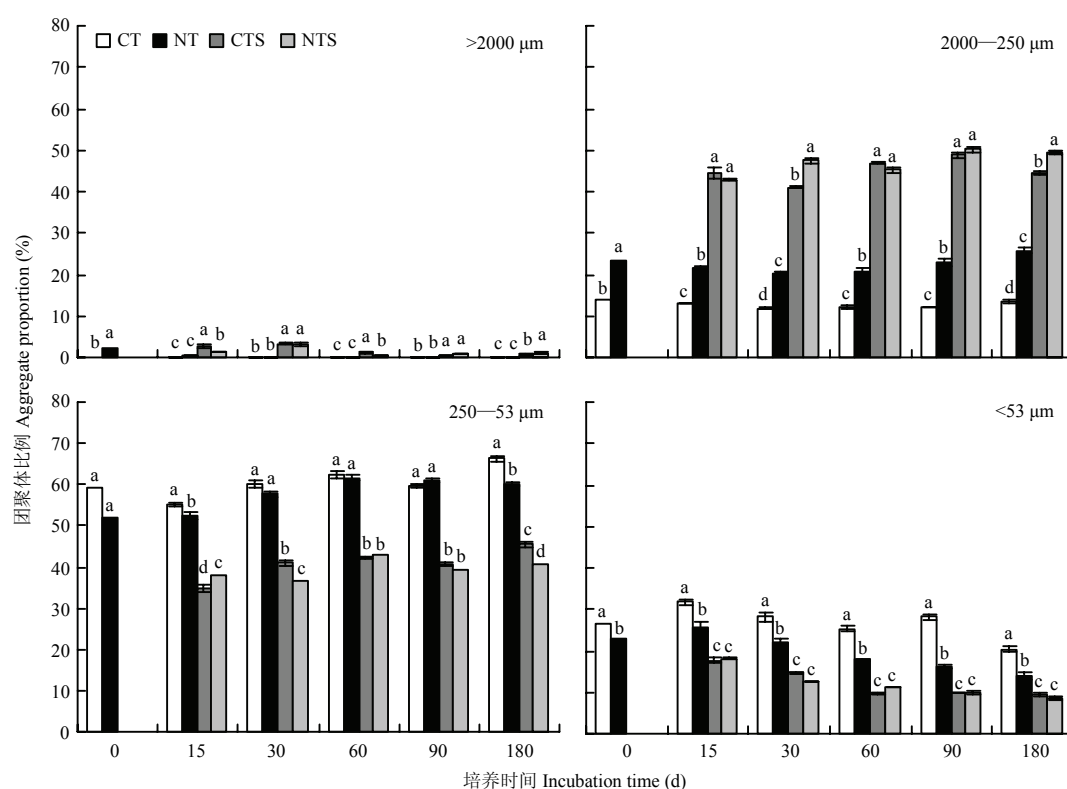
2.1 添加秸秆对不同耕作处理土壤团聚体的影响

添加秸秆对不同耕作处理土壤团聚体有较大影响

(图 1), 不加秸秆处理 (CT 和 NT) 团聚体主要分布在 250—53 μm 级别, 占全部团聚体的 52%—66%, 显著高于其他团聚体; 添加秸秆处理 (CTS 和 NTS) 显著提高土壤大团聚体 (>250 μm) 含量, 2 000—250 μm 团聚体所占比例最高, 达 41%—50%。在整个培养时期内, CTS 较 CT 提高 2 000—250 μm 团聚体含量 230%—306%, 降低 250—53 μm 和 <53 μm 团聚体分别为 31%—37%和 40%—65%; NTS 较 NT 提高 2 000—250 μm 团聚体含量 92%—134%, 降低 250—53 μm 和 <53 μm 团聚体分别为 28%—36%和 30%—42%,

由此可知, 添加秸秆对于传统耕作处理土壤团聚体含量的影响更大。此外, CTS 和 NTS 各级团聚体含量仅在个别培养时期差异显著, 其他培养时间两处理间无显著差异, 说明添加秸秆可减小传统耕作与免耕土壤之间团聚体含量的差异。

与培养 0 d 时团聚体含量相比, 添加秸秆条件下 CTS 处理增加 >2 000 μm 团聚体含量, 而 NTS 处理减少 >2 000 μm 团聚体含量, 其他级别团聚体变化趋势一致, 即增加 2000—250 μm 团聚体含量, 减少 250—53 μm 和 <53 μm 团聚体含量。



图中误差线为标准误差, 不同小写字母代表不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)
Error bars represent standard errors. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$)

图 1 培养期间土壤水稳性团聚体组成

Fig. 1 The proportion of soil water-stable aggregate composition in each phase

2.2 添加秸秆对不同耕作处理土壤团聚体稳定性的影响

平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 以及 >0.25 mm 团聚体百分比 $R_{0.25}$ 是评价土壤团聚体稳定性的重要指标。从表 1 可知, 不加秸秆时, 在整个培养阶段 NT 处理 MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 均显著高于 CT ($P < 0.05$), 培养到 180 d 时, NT 处理

MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 分别比 CT 提高 50%、43%和 92%, 说明免耕处理能增强土壤团聚体稳定性。添加秸秆后, CTS 和 NTS 均显著提高 MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 值, 培养至 180 d 时 CTS 较 CT 分别提高 133%、130%和 235%, NTS 较 NT 分别提高 72%、83%和 96%, 由此可知, 添加秸秆对于传统耕作土壤团聚体稳定性的改善作用更大。在各培养时期, CTS 的 MWD、

表 1 不同培养时期土壤团聚体稳定性
Table 1 Soil aggregate stability under different incubation periods

培养时间 Incubation time (d)	处理 Treatment	MWD (mm)	GMD (mm)	R _{0.25} (%)
0	CT	0.26±0.00b	0.13±0.00b	14.34±0.46b
	NT	0.43±0.01a	0.17±0.01a	16.28±0.42a
15	CT	0.24±0.00d	0.11±0.00c	13.12±0.16d
	NT	0.32±0.00c	0.15±0.00b	21.77±0.65c
	CTS	0.67±0.03a	0.28±0.01a	47.48±1.85a
	NTS	0.60±0.00b	0.27±0.01a	44.12±0.16b
30	CT	0.24±0.00d	0.12±0.00d	11.85±0.25d
	NT	0.33±0.00c	0.16±0.00c	20.36±0.19c
	CTS	0.66±0.01b	0.30±0.01b	44.35±0.54b
	NTS	0.72±0.01a	0.35±0.01a	50.62±0.67a
60	CT	0.24±0.00d	0.13±0.00d	12.30±0.31d
	NT	0.33±0.01c	0.17±0.00c	20.62±1.10c
	CTS	0.64±0.00a	0.34±0.00a	48.07±0.08a
	NTS	0.60±0.01b	0.32±0.00b	45.92±0.62b
90	CT	0.23±0.00c	0.12±0.00d	12.04±0.10c
	NT	0.35±0.01b	0.18±0.00c	22.74±0.89b
	CTS	0.64±0.00a	0.35±0.00b	49.40±0.59a
	NTS	0.66±0.01a	0.36±0.01a	50.93±0.63a
180	CT	0.26±0.00d	0.14±0.00d	13.43±0.44d
	NT	0.39±0.01c	0.20±0.01c	25.84±0.87c
	CTS	0.60±0.01b	0.32±0.00b	45.03±0.51b
	NTS	0.66±0.00a	0.36±0.00a	50.61±0.42a

表中数值为平均值±标准误差，不同小写字母代表处理间差异显著（ $P<0.05$ ）
Values are means with standard error (SE). Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$)

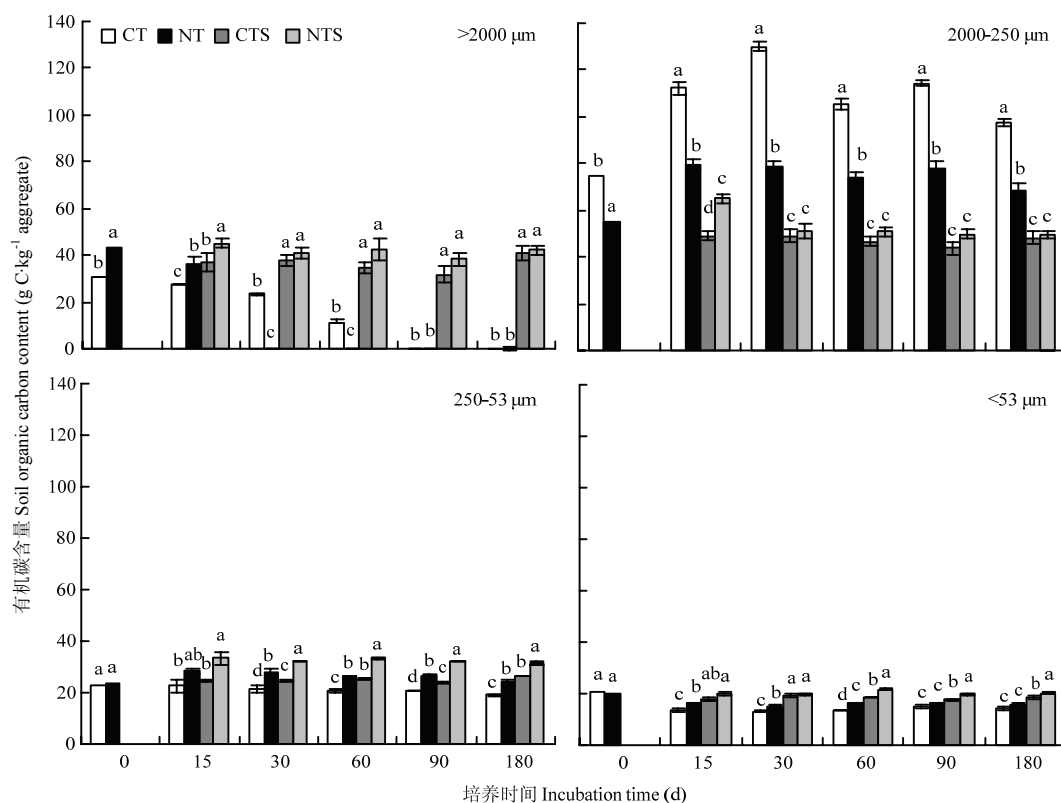
GMD、R_{0.25} 值与 NTS 非常接近，并且显著高于 NT，说明添加秸秆可提高传统耕作土壤团聚体稳定性并缩小甚至掩盖由于耕作处理不同造成的差异。与培养 0 d 时相比，添加秸秆同样显著提高 MWD、GMD、R_{0.25} 值，说明在培养时期内团聚体主要保持在较大团聚体级别。

2.3 添加秸秆对不同耕作处理土壤团聚体有机碳的影响

在整个培养期，各处理 2 000—250 μm 团聚体中有机碳含量最高，达 43.7—130.0 g·kg⁻¹，显著高于其他级别团聚体(图 2)。不加秸秆时，NT 处理 2 000—250 μm 团聚体有机碳含量显著低于 CT，降低幅度达 29%—40%；250—53 μm 和 <53 μm 团聚体有机碳含量 NT 处理显著高于 CT 处理，提高幅度分别为 25%—31%和 9%—20%。与不加秸秆处理相比，添

加秸秆提高了>2 000 μm、250—53 μm 和<53 μm 团聚体有机碳含量。培养到 180 d 时，CTS 处理 250—53 μm 和<53 μm 团聚体有机碳含量分别为 26.4 g·kg⁻¹和 18.5 g·kg⁻¹，较 CT 提高 39%和 30%；NTS 处理 250—53 μm 和<53 μm 团聚体有机碳含量分别为 31.2 g·kg⁻¹和 20.1 g·kg⁻¹，较 NT 分别提高 30%和 25%。添加秸秆同时显著降低了 2 000—250 μm 团聚体有机碳含量，CTS 和 NTS 分别较 CT 和 NT 降低有机碳 51%和 28%，CTS 和 NTS 之间无显著差异。综上，添加秸秆对传统耕作土壤团聚体有机碳的影响程度大于免耕土壤。

与培养 0 d 时相比，CTS 增加>2 000 μm 和 250—53 μm 团聚体有机碳含量，减少 2 000—250 μm 和<53 μm 团聚体有机碳含量；NTS 处理>2 000 μm、2 000—250 μm 和<53 μm 团聚体有机碳基本保持不变，250—53 μm 团聚体有机碳含量显著增加。



图中误差线为标准误差, 不同小写字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$)
Error bars represent standard errors. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$)

图 2 培养期间各级别团聚体有机碳含量

Fig. 2 Soil organic carbon content in aggregate

2.4 不同耕作处理团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率

不加秸秆时, CT 和 NT 处理团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率以 2 000—250 μm 和 250—53 μm 团聚体的贡献率最高 (图 3)。添加秸秆后 2 000—250 μm 团聚体有机碳的贡献率最高, CTS 和 NTS 分别高达 49%—61% 和 50%—60%, 显著高于其他级别团聚体有机碳贡献率。CTS 和 NTS 处理显著提高 >2 000 μm 和 2 000—250 μm 团聚体有机碳贡献率, 同时显著降低 250—53 μm 和 <53 μm 团聚体有机碳贡献率。培养至 180 d 时, CTS 较 CT 提高 2 000—250 μm 团聚体有机碳贡献率 32%, 分别降低 250—53 μm 和 <53 μm 团聚体有机碳贡献率 34% 和 51%; NTS 较 NT 提高 2 000—250 μm 团聚体有机碳贡献率 16%, 分别降低 250—53 μm 和 <53 μm 团聚体有机碳贡献率 26% 和 36%。综上, 添加秸秆对传统耕作处理团聚体有机碳贡献率影响更明显。与培养 0 d 时相比, CTS 处理 >2 000 μm 和

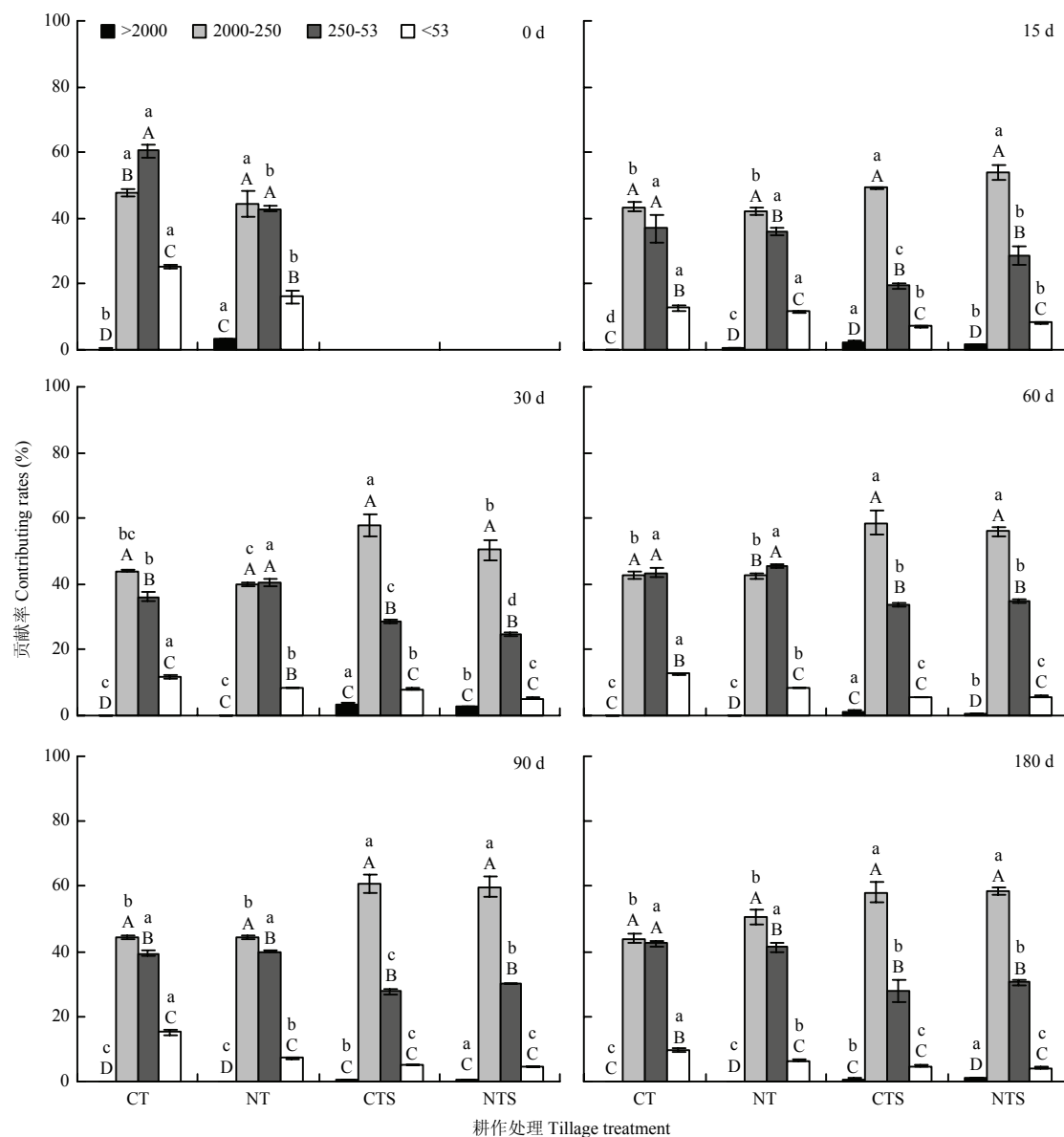
2 000—250 μm 团聚体有机碳贡献率处于增加水平, 而 250—53 μm 和 <53 μm 团聚体有机碳处于减少水平; NTS 处理 2 000—250 μm 团聚体有机碳贡献率处于增加水平, 其他团聚体有机碳贡献率均处于减少水平。

表 2 所示为各培养时期土壤团聚体有机碳贡献率、团聚体质量百分比、团聚体有机碳浓度与培养 0 d 时对应指标的变化量。团聚体有机碳贡献率变化与团聚体质量百分比变化规律一致, 团聚体有机碳贡献率随团聚体质量百分比增加而增加。另外, 由团聚体质量百分比和团聚体有机碳浓度的变化幅度可知, 团聚体质量百分比变化幅度高于团聚体有机碳浓度变化幅度。因此, 从添加秸秆促进土壤有机碳储存角度考虑, 添加秸秆对土壤团聚体的影响强于对土壤团聚体有机碳浓度的影响。

3 讨论

3.1 添加秸秆促进土壤大团聚体形成

土壤团聚体是衡量土壤结构进而判断土壤质量好



图中误差线为标准误差，不同大写字母代表不同级别间差异显著，不同小写字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Error bars represent standard errors. Different uppercase letters indicate significant differences between aggregates and different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$)

图3 团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率

Fig. 3 Contributing rates of organic carbon in aggregate to soil organic carbon

坏的重要指标，促进土壤大团聚体 ($>250 \mu\text{m}$) 形成对增强土壤固碳能力、减少水土流失及提高土壤肥力有重要作用^[8]。本研究通过室内培养试验得出，长期进行传统耕作和免耕处理的土壤，在添加秸秆后能明显改变其土壤团聚体构成。不加秸秆处理 (CT 和 NT) 土壤团聚体以 $250\text{—}53 \mu\text{m}$ 级别为主，占 $52\%\text{—}66\%$ ；添加秸秆后 (CTS 和 NTS) 土壤团聚体以 $2\ 000\text{—}250 \mu\text{m}$ 级别为主，占 $41\%\text{—}50\%$ 。添加秸秆使 CTS 和 NTS

分别提高 $2\ 000\text{—}250 \mu\text{m}$ 团聚体 $230\%\text{—}306\%$ 和 $92\%\text{—}134\%$ ，同时降低 $250\text{—}53 \mu\text{m}$ 团聚体 $31\%\text{—}37\%$ 和 $28\%\text{—}36\%$ ，降低 $<53 \mu\text{m}$ 团聚体 $40\%\text{—}65\%$ 和 $30\%\text{—}42\%$ ，这与关松等^[24]、刘哲等^[18]的研究结果一致。关松、刘哲分别研究了室内培养条件下添加玉米、水稻秸秆对黑土、红壤团聚体组成的作用，结果表明添加秸秆均能增加土壤 $>2\ 000 \mu\text{m}$ 和 $2\ 000\text{—}250 \mu\text{m}$ 团聚体含量，降低 $<250 \mu\text{m}$ 团聚体。

表 2 团聚体有机碳贡献率 (W, %)、团聚体质量百分比 (P, %) 及团聚体有机碳浓度 (OC, g C·kg⁻¹ aggregate) 变化量
Table 2 The increment of aggregate organic carbon contribution rate (W, %), aggregates distribution (P, %) and aggregate organic carbon content (OC, g C·kg⁻¹ aggregate) in added straw treatment soil compared with unprocessed soil

培养时间 Incubation time	处理 Treatment	>2000 μm			2000—250 μm			250—53 μm			<53 μm		
		W	P	OC	W	P	OC	W	P	OC	W	P	OC
15 d	CTS	2.2	2.7	6.7	17.7	30.5	-26.1	-20.7	-24.2	1.9	-9.6	-8.9	-3.1
	NTS	-1.4	-0.7	2.0	15.1	19.6	10.0	-8.3	-14.0	9.5	-5.7	-4.8	-0.2
30 d	CTS	3.4	3.1	7.4	26.2	26.9	-25.9	-11.4	-18.0	1.7	-8.7	-12.0	-1.8
	NTS	-0.2	0.9	-2.6	11.8	24.4	-4.1	-12.7	-15.2	8.4	-8.7	-10.2	-0.3
60 d	CTS	1.1	0.9	4.3	27.0	32.8	-28.2	-6.5	-16.9	2.5	-11.0	-16.8	-2.3
	NTS	-2.1	-1.5	-0.7	17.4	22.1	-4.3	-2.2	-8.8	9.6	-8.1	-11.8	1.4
90 d	CTS	0.3	0.3	1.5	28.9	34.7	-31.2	-12.5	-18.3	1.2	-11.8	-16.8	-3.1
	NTS	-2.1	-1.4	-5.0	21.2	27.0	-5.4	-7.0	-12.5	8.3	-9.3	-13.1	-0.4
180 d	CTS	0.7	0.5	16.5	26.5	30.2	-26.8	-4.9	-13.5	9.6	-11.1	-17.2	1.1
	NTS	-1.8	-1.1	-1.0	20.0	26.4	-5.9	-6.5	-11.0	7.5	-9.8	-14.3	0.0

由此可见,添加秸秆对促进土壤大团聚体形成具有显著作用,这主要是因为秸秆进入土壤后发挥的直接和间接作用。直接作用一方面表现为秸秆直接成为大团聚体形成的核心,使土壤中的细小颗粒附着于秸秆上形成大团聚体^[25];另一方面秸秆直接提高了土壤有机碳含量^[14],有机碳作为土壤团聚体形成和稳定的主要胶结物质^[18],有效促进其形成。间接作用表现为秸秆作为外源碳添加到土壤中,势必会改变土壤 C/N,而微生物自身的 C/N 含量比较低,当秸秆 C/N 小于 25 : 1 时,就能够提高微生物生物量和活性^[26],尤其促进真菌菌丝生长,缠绕细小颗粒形成团聚体^[20,27],本研究中所用秸秆 C/N 小于 23 : 1,极有可能对微生物生长产生促进作用,进而促进团聚体形成;同时,秸秆在腐解过程中常常会产生多种有机质,其中的碳水化合物、蛋白质、木质素等可将小团聚体胶结在一起或通过吸附作用形成大团聚体^[8,16]。

添加秸秆能够显著提高平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 以及 >0.25 mm 团聚体百分比,这些指标常用来反映土壤团聚体的大小分布状况,表征土壤团聚体稳定性具有一致性,值越大代表团聚体越稳定^[4]。培养至 180 d 时,CTS 较 CT 分别提高 133%、130%和 235%,NTS 较 NT 分别提高 53%、75%和 87%,说明添加秸秆不仅能够促进大团聚体形成,而且能够增强团聚体稳定性。研究表明,添加秸秆对传统耕作土壤团聚体的影响大于免耕土壤,这与孙元宏等^[20]的研究相似,主要原因是传统耕作土壤未加秸秆时大团聚体 (>250 μm) 含量低,微团聚体 (<250 μm)

含量较高,而大团聚体主要是由细小微粒包裹在秸秆表面团聚而成^[25]。

3.2 添加秸秆提高团聚体有机碳含量

添加秸秆有助于提高土壤有机碳含量^[19,28],研究表明秸秆进入土壤后主要转化成土壤团聚体中的有机碳,被隔离保存以限制土壤微生物的分解作用^[27]。本研究结果表明,添加秸秆显著提高 >2 000 μm、250—53 μm (除 15 d) 和 <53 μm 团聚体有机碳含量,培养至 180 d 时,CTS 较 CT 提高 250—53 μm 和 <53 μm 团聚体有机碳 70%和 54%;NTS 较 NT 提高 >2 000 μm、250—53 μm 和 <53 μm 团聚体有机碳 23%、30%和 25%。这与刘哲等^[18]、顾鑫等^[29]的研究结果一致,他们分别通过培养试验研究添加秸秆对土壤团聚体有机碳的影响,结果证明,无论是在红壤还是棕壤中添加秸秆均显著提高了各级团聚体有机碳含量。主要原因一是由于秸秆作为外源有机碳直接参与到各级团聚体中,二是秸秆添加后促进了土壤微生物的繁殖^[28],二者均为土壤有机碳主要组成成分^[18,27]。另外,从添加秸秆对不同耕作土壤团聚体有机碳的提升作用来看,添加秸秆对传统耕作土壤团聚体有机碳的提升作用更大,这主要受土壤初始有机碳含量影响,初始有机碳含量越低,固定外源碳越多^[20,30];另外,免耕土壤黏粒胶体的固碳“位点”多数已被利用,而传统耕作土壤黏粒胶体大量的固碳“位点”呈空置状态,因此再添加秸秆对传统耕作团聚体有机碳的影响高于免耕。同时,添加秸秆显著降低了 2 000—250 μm 团聚体有机碳含量,培养至 180 d 时,CTS 和 NTS 分别

较 CT 和 NT 降低了 51% 和 28%, 这主要受秸秆对原有机碳的激发效应影响。SARKER 等^[31]研究表明, 添加秸秆后大团聚体原有有机碳矿化量显著高于微团聚体, 且大团聚体固定的新碳含量随时间延长会逐渐降低^[27]。

3.3 添加秸秆提高大团聚体有机碳贡献率

本研究结果表明, 在相同培养时期内添加秸秆显著提高 $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 和 $2\ 000\text{—}250\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳的贡献率, 同时显著降低 $250\text{—}53\ \mu\text{m}$ 和 $<53\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳贡献率。与未培养土壤团聚体有机碳贡献率相比, CTS 和 NTS 均显著增加 $2\ 000\text{—}250\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳贡献率, 显著降低 $250\text{—}53\ \mu\text{m}$ 和 $<53\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳贡献率; 但对于 $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳贡献率二者表现不同: CTS 显著增加而 NTS 有所降低。王秀娟等^[8]的研究也发现秸秆还田提高了土壤大粒级团聚体对有机碳的贡献率, 同时降低了 $<250\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳贡献率。这主要是因为秸秆进入土壤改变了土壤团聚体分布状况, 同时也引起团聚体有机碳的变化^[21], 与未培养土壤相比, 添加秸秆显著提高了 $>2\ 000\ \mu\text{m}$ (CTS) 和 $2\ 000\text{—}250\ \mu\text{m}$ (CTS 和 NTS) 团聚体含量及其有机碳浓度。郝翔翔等^[32]在黑土地地区的研究同样印证了这一点。另外在细小颗粒团聚成大团聚体的过程中, 也会导致有机碳发生转移, 进入大团聚体, 降低微团聚体中有机碳含量^[18]。团聚体质量百分比变化对团聚体有机碳贡献率变化影响更大, 这可能与培养时间有关, 在短期内秸秆能够迅速被细小颗粒包裹形成较大团聚体, 但秸秆经过化学过程最后形成土壤有机碳需要更长的时间。

4 结论

添加秸秆使 $2\ 000\text{—}250\ \mu\text{m}$ 级别团聚体成为主体级别, 显著提高土壤团聚体稳定性。各处理 $2\ 000\text{—}250\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳含量最高, 添加秸秆显著提高了 $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 、 $250\text{—}53\ \mu\text{m}$ 和 $<53\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳含量, 同时显著提高了 $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 和 $2\ 000\text{—}250\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳的贡献率, 降低 $250\text{—}53\ \mu\text{m}$ 和 $<53\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳贡献率。综上分析得出, 添加秸秆对于土壤水稳性大团聚体的形成及其有机碳的提升效果显著, 且在传统耕作处理土壤中的效果优于免耕处理土壤。

References

[1] ZHU G Y, SHANGGUAN Z P, DENG L. Soil aggregate stability and

aggregate-associated carbon and nitrogen in natural restoration grassland and Chinese red pine plantation on the Loess Plateau. *Catena*, 2017, 149: 253-260.

[2] 白文娟, 徐华勤, 章家恩. 不同培肥措施对土壤团聚体中微生物特性的影响. *生态环境学报*, 2018(1): 24-30.

BAI W J, XU H Q, ZHANG J E. Effects of different manure application on the soil microbial biomass properties within different soil aggregates. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018(1): 24-30. (in Chinese)

[3] SUI Y Y, JIAO X G, LIU X B, ZHANG X Y, DING G W. Water-stable aggregates and their organic carbon distribution after five years of chemical fertilizer and manure treatments on eroded farmland of Chinese Mollisols. *Canadian Journal of Soil Science*, 2012, 92(3): 551-557.

[4] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响. *环境科学*, 2018, 39(1): 355-362.

XU G X, WANG Z F, GAO M, TIAN D, HUANG R, LIU J, LI J C. Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration. *Environmental Science*, 2018, 39(1): 355-362. (in Chinese)

[5] GAO W D, ZHOU T Z, REN T S. Conversion from conventional to no tillage alters thermal stability of organic matter in soil aggregates. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 21(6): 1455-1464.

[6] OU H P, LIU X Y, CHEN Q S, HUANG Y F, HE M J, TAN H W, XU F L, LI Y R, GU M H. Water-stable aggregates and associated carbon in a subtropical, rice soil under variable tillage. *Revista Brasileira De Ciêncin Solo*, 2016, 40: e0150145.

[7] BENBI D K, SINGH P, TOOR A S, VERMA G. Manure and fertilizer application effects on aggregate and mineral-associated organic carbon in a loamy soil under rice-wheat system. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2016, 47(15): 1828-1844.

[8] 王秀娟, 解占军, 董环, 赵颖, 刘慧屿, 娄春荣. 秸秆还田对玉米产量和土壤团聚体组成及有机碳分布的影响. *玉米科学*, 2018(1): 108-115.

WANG X J, XIE Z J, DONG H, ZHAO Y, LIU H Y, LOU C R. Effects of straw returning on yield and soil aggregates composition and organic carbon distribution. *Journal of Maize Sciences*, 2018(1): 108-115. (in Chinese)

[9] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 梁国庆, 周卫. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 1-21.

SONG D L, HOU S P, WANG X B, LIANG G Q, ZHOU W. Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting.

- Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 1-21. (in Chinese)
- [10] 于维水, 李桂花, 王碧胜, 武红亮, 赵雅雯, 孟繁华, 卢昌艾. 不同施肥制度下我国东部典型土壤易分解与耐分解碳的组分特征. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 675-683.
- YU W S, LI G H, WANG B S, WU H L, ZHAO Y W, MENG F H, LU C A. Component characteristics of soil labile and recalcitrant carbon under long-term different fertilization systems in eastern China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(3): 675-683. (in Chinese)
- [11] YANG Z P, ZHENG S X, NIE J, LIAO Y L, XIE J. Effects of long-term winter planted green manure on distribution and storage of organic carbon and nitrogen in water-stable aggregates of reddish paddy soil under a double-rice cropping system. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(8): 1772-1781.
- [12] YAZDANPANA N, MAHMOODABADI M, CERDA A. The impact of organic amendments on soil hydrology, structure and microbial respiration in semiarid lands. *Geoderma*, 2016, 266: 58-65.
- [13] ZHENG L, WU W L, WEI Y P, HU K L. Effects of straw return and regional factors on spatio-temporal variability of soil organic matter in a high-yielding area of northern China. *Soil & Tillage Research*, 2015, 145: 78-86.
- [14] 王碧胜, 蔡典雄, 武雪萍, 李景, 梁国鹏, 于维水, 王相玲, 杨毅宇, 王小彬. 长期保护性耕作对土壤有机碳和玉米产量及水分利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1455-1464.
- WANG B S, CAI D X, WU X P, LI J, LIANG G P, YU W S, WANG X L, YANG Y Y, WANG X B. Effects of long-term conservation tillage on soil organic carbon, maize yield and water utilization. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6): 1455-1464. (in Chinese)
- [15] 于博, 于晓芳, 高聚林, 胡树平, 孙继颖, 王志刚, 高鑫, 朱文新. 玉米秸秆全量深翻还田对高产田土壤结构的影响. 中国生态农业学报, 2018, 26(4): 584-592.
- YU B, YU X F, GAO J L, HU S P, SUN J Y, WANG Z G, GAO X, ZHU W X. Effects of deep tillage and straw return on soil structure of high-yield spring maize field. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(4): 584-592. (in Chinese)
- [16] 薛斌, 黄丽, 鲁剑巍, 李小坤, 殷志遥, 刘智杰, 陈涛. 连续秸秆还田和免耕对土壤团聚体及有机碳的影响. 水土保持学报, 2018, 32(1): 182-189.
- XUE B, HUANG L, LU J W, LI X K, YIN Z Y, LIU Z J, CHEN T. Effect of continuous straw returning and no-tillage on soil aggregates and organic carbon. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 182-189. (in Chinese)
- [17] WANG X B, DAI K, ZHANG D C, ZHANG X M, WANG Y, ZHAO Q S, CAI D X, HOOGMOED W.B, OENEMA O. Dryland maize yields and water use efficiency in response to tillage/crop stubble and nutrient management practices in China. *Field Crops Research*, 2011, 120(1): 47-57.
- [18] 刘哲, 韩霁昌, 孙增慧, 余正洪, 张卫华, 高红贝. 外源新碳对红壤团聚体及有机碳分布和稳定性的影响. 环境科学学报, 2017, 37(6): 2351-2359.
- LIU Z, HAN J C, SUN Z H, YU Z H, ZHANG W H, GAO H B. Effects of fresh carbon on distribution and stability of aggregates and organic carbon in red soil. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(6): 2351-2359. (in Chinese)
- [19] 谢柠松, 安婷婷, 李双异, 孙良杰, 裴久渤, 丁凡, 徐英德, 付时丰, 高晓丹, 汪景宽. 外源新碳在不同肥力土壤中的分配与固定. 土壤学报, 2016, 53(4): 942-950.
- XIE N K, AN T T, LI S Y, SUN L J, PEI J B, GONG F, XU Y D, FU S F, GAO X D, WANG J K. Distribution and sequestration of exogenous new carbon in soils different in fertility. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(4): 942-950. (in Chinese)
- [20] 孙元宏, 高雪莹, 赵兴敏, 隋标, 王鸿斌, 赵兰坡. 添加玉米秸秆对白浆土重组有机碳及团聚体组成的影响. 土壤学报, 2017, 54(4): 1009-1017.
- SUN Y H, GAO X Y, ZHAO X M, SUI B, WANG H B, ZHAO L P. Effects of corn stalk incorporation on organic carbon of heavy fraction and composition of soil aggregates in Albic Soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(4): 1009-1017. (in Chinese)
- [21] 侯晓娜, 李慧, 朱刘兵, 韩燕来, 唐政, 李忠芳, 谭金芳, 张水清. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响. 中国农业科学, 2015, 48(4): 705-712.
- HOU X N, LI H, ZHU L B, HAN Y L, TANG Z, LI Z F, TAN J F, ZHANG S Q. Effects of biochar and straw additions on lime concretion Black Soil aggregate composition and organic carbon distribution. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(4): 705-712. (in Chinese)
- [22] 王燕, 王小彬, 刘爽, 梁二, 蔡典雄. 保护性耕作及其对土壤有机碳的影响. 中国生态农业学报, 2008(3): 766-771.
- WANG Y, WANG X B, LIU S, LIANG E, CAI D X. Conservation tillage and its effect on soil organic carbon. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008(3): 766-771. (in Chinese)
- [23] 仇建飞, 窦森, 邵晨, 李明敏, 安丰华. 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. 土壤学报, 2011, 48(4): 781-787.

- QIU J F, DOU S, SHAO C, LI M M, AN F H. Effects of corn stalk application on quantity and structural characteristics of humus acid in soil aggregates. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(4): 781-787. (in Chinese)
- [24] 关松, 窦森, 胡永哲, 魏博薇. 添加玉米秸秆对黑土团聚体碳氮分布的影响. 水土保持学报, 2010, 24(4): 187-191.
- GUAN S, DOU S, HU Y Z, WEI B W. Effects of application of corn stalk on distribution of C and N in black soil aggregates. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4): 187-191. (in Chinese)
- [25] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [26] 李涛, 何春娥, 葛晓颖, 欧阳竹. 秸秆还田施氮调节碳氮比对土壤无机氮、酶活性及作物产量的影响. 中国生态农业学报, 2016, 24(12): 1633-1642.
- LI T, HE Y E, GE X Y, OUYANG Z. Responses of soil mineral N contents, enzyme activities and crop yield to different C/N ratio mediated by straw retention and N fertilization. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(12): 1633-1642. (in Chinese)
- [27] ZHANG X F, XIN X L, ZHU A N, YANG W L, ZHANG J B, DING S J, MU L, SHAO L L. Linking macroaggregation to soil microbial community and organic carbon accumulation under different tillage and residue managements. *Soil & Tillage Research*, 2018, 178: 99-107.
- [28] ZHANG X F, XIN X L, ZHU A N, ZHANG J B, YANG W L. Effects of tillage and residue managements on organic C accumulation and soil aggregation in a sandy loam soil of the North China Plain. *Catena*, 2017, 156: 176-183.
- [29] 顾鑫, 安婷婷, 李双异, 李慧, 汪景宽. $\delta^{13}\text{C}$ 法研究秸秆添加对棕壤团聚体有机碳的影响. 水土保持学报, 2014, 28(2): 243-247.
- GU X, AN T T, LI S Y, LI H, WANG J K. Effects of application of straw on organic carbon in brown soil aggregates by $\delta^{13}\text{C}$ method. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2): 243-247. (in Chinese)
- [30] 吕元春, 薛丽佳, 尹云锋, 高人, 马红亮, 杨玉盛. 外源新碳在不同类型土壤团聚体中的分配规律. 土壤学报, 2013, 50(3): 534-539.
- LV Y C, XU L J, YIN Y F, GAO R, MA H L, YANG Y S. Distribution of fresh carbon in aggregate fractions of different soil types. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(3): 534-539. (in Chinese)
- [31] SARKER J R, SINGH B P, COWIE A L, FANG Y Y, COLLINS D, DOUGHERTY W J, SINGH B K. Carbon and nutrient mineralisation dynamics in aggregate-size classes from different tillage systems after input of canola and wheat residues. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 116: 22-38.
- [32] 郝翔翔, 杨春葆, 苑亚茹, 韩晓增, 李禄军, 江恒. 连续秸秆还田对黑土团聚体中有机碳含量及土壤肥力的影响. 中国农学通报, 2013, 29(35): 263-269.
- HAO X X, YANG C B, YUAN Y R, HAN X Z, LI L J, JIANG H. Effects of continuous straw returning on organic carbon content in aggregates and fertility of black soil. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(35): 263-269. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)