

寒旱区不同秸秆还田方式对土壤团聚体稳定性和有机碳组分含量的影响

谢世兴, 刘雪玲[#], 刘晨, 和江鹏, 赵海超^{*}, 刘松涛, 卢海博, 黄智鸿^{*}

(河北北方学院, 河北省农产品食品质量安全分析检测重点实验室, 张家口市特色农产品质量安全重点实验室, 河北 张家口 075000)

摘要: 为了明确春玉米秸秆还田对低温缺水条件下农田土壤团聚体及其有机碳组分的影响, 并为冀西北寒旱区春玉米秸秆还田方式提供科学依据, 田间设置秸秆还田翻耕 (JF)、秸秆还田旋耕 (JX)、大垄轮播秸秆还田 (JL) 3 种还田方式, 以秸秆不还田为对照 (CK), 分析秸秆还田方式对土壤不同粒径团聚体分布、稳定性及有机碳组分含量的影响。结果表明: 在 0 ~ 20 cm 土层, 各还田方式均能显著提高 1.00 ~ 2.00 mm 团聚体占比, JX 处理显著提高 >5.00 mm 团聚体占比。JX 处理土壤团聚体平均重量直径 (MWD) 最高, 团聚体稳定性较强, JL 和 JX 处理显著提高 2.00 ~ 5.00 mm 团聚体占比, JL 处理土壤团聚体几何平均直径 (GMD) 较高。各还田方式对土壤 MWD 和 GMD 分别提高了 10.32% ~ 15.46% 和 16.23% ~ 18.35%, 均能增加土壤团聚体稳定性。土壤各粒径团聚体有机碳含量在 42.88 ~ 54.72 g · kg⁻¹ 之间, JL 处理显著提高 2.00 ~ 5.00、0.50 ~ 1.00 mm 团聚体有机碳含量, 增幅大于其它两种还田方式。各还田方式土壤各粒径团聚体活性有机碳含量在 4.18 ~ 8.29 g · kg⁻¹ 之间, 各团聚体活性有机碳含量均高于 CK; 秸秆还田均能提高 1.00 ~ 2.00、0.50 ~ 1.00 mm 团聚体黑碳含量, JF 和 JX 处理提高 >5.00、2.00 ~ 5.00 mm 团聚体黑碳含量; JL 处理提高 >5.00、2.00 ~ 5.00、1.00 ~ 2.00、0.25 ~ 0.50 mm 团聚体腐殖质碳含量。各还田方式对 0 ~ 20 cm 土层有机碳含量提高幅度高于 20 ~ 40 cm 土层, CK 和 JF 处理团聚体腐殖质碳含量 20 ~ 40 cm 土层高于 0 ~ 20 cm 土层。CK、JF 和 JX 处理 >5.00、2.00 ~ 5.00、1.00 ~ 2.00 mm 团聚体黑碳含量在 0 ~ 20 cm 土层最高。综合分析冀西北部寒旱区适宜采用春玉米大垄轮播秸秆还田方式。

关键词: 秸秆还田方式; 土壤团聚体; 稳定性; 粒径分布; 有机碳组分; 春玉米

土壤团聚体是土壤颗粒在自然过程中凝聚胶结而形成^[1], 它包括微生物、动植物残体及其分泌物^[2], 是土壤的主要结构成分^[3]。土壤团聚体稳定性是评价土壤质量的有效方法^[4-5], 稳定的土壤团聚体有利于土壤结构改良、气体与水汽循环、养分的利用与固持, 并且对有机碳组分的固定和积累也有一定影响^[6-10]。土壤团聚体的形成与土壤有机碳密切相关, 有机碳下降会引起土壤退化和土壤侵蚀从而抑制土壤团聚体的形成^[11]。作物残体是土

壤有机碳的重要来源, 作物秸秆可以通过直接或间接还田进入土壤, 增加土壤有机碳含量^[12-13]。研究发现, 土壤团聚体中活性有机质是有机质的活性较高的部分, 可以反映土壤微环境和碳库的变化; 腐殖质碳是有机质的主体部分, 它可以促进作物根系发育和果实成长; 黑碳作为生物物质不完全燃烧的产物有利于提高有机质库稳定性。研究表明, 秸秆还田可以有效增加土壤团粒胶结剂, 促进土壤团聚体的形成^[14]。如春玉米秸秆深埋还田有利于 >0.25 mm 大团聚体的形成^[15], Wang 等^[12]研究表明秸秆还田的土壤有机碳平均提高 14% 左右, 孙雪等^[16]研究表明配施秸秆有利于有机碳组分在团聚体中迁移, 增加团聚体稳定性。

目前, 对于春玉米秸秆还田的研究主要是对作物产量和土壤养分、湿度、pH 的影响, 且都集中在气候适宜的春玉米种植区^[17], 而对于气候寒冷干旱的冀西北地区研究相对较少; 况且不同秸秆还田技术各有优缺点, 环境及限制因子不同, 秸秆还

收稿日期: 2023-07-21; 录用日期: 2023-11-20

基金项目: 河北省现代农业产业技术体系 (HBCT2023020202); 河北省创新能力提升计划项目 (20526401D); 河北省教育厅重大项目 (ZD2019097); 张家口市科技局项目 (2311025C)。

作者简介: 谢世兴 (1998-), 硕士研究生, 研究方向为作物高产栽培。E-mail: 18849304295@163.com。刘雪玲 (1999-), 硕士研究生, 研究方向为作物高产栽培。E-mail: 3059126952@qq.com。谢世兴和刘雪玲为共同第 1 作者。

通讯作者: 赵海超, E-mail: haichaozhao19@163.com; 黄智鸿, E-mail: hbnhzh@163.com。

田的效应也有很大差异^[18]；寒旱区春玉米秸秆还田后腐解较慢，秸秆还田对土壤团聚体稳定性和有机碳组分含量的影响机理尚不清楚，特别是对土壤不同粒径团聚体中有机碳组分分布规律尚缺乏系统的研究，因此，本研究通过秸秆还田翻耕、秸秆还田旋耕和大垄轮播秸秆还田3种还田方式，探讨不同秸秆还田方式下土壤团聚体和有机碳组分分布特征，筛选适宜该地区春玉米秸秆还田技术，为低温缺水的寒旱区春玉米保护性耕作提供技术支撑，进而为培肥寒旱区农田土壤提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2019—2020年在河北省西北部张家口蔚县西合营镇南大坪村（海拔880 m，39°34′—40°10′N，114°13′—115°04′E）进行春玉米秸秆还田定位试验，该地区平均气温在6.8~7.6℃之间，降水量不足400 mm，是我国典型的春玉米种植寒旱区，土壤类型为栗钙土。土壤基本理化性质为pH 8.39、容重1.34 g·cm⁻¹、全氮0.818 g·kg⁻¹、全磷0.463 g·kg⁻¹、有机碳35.77 g·kg⁻¹。

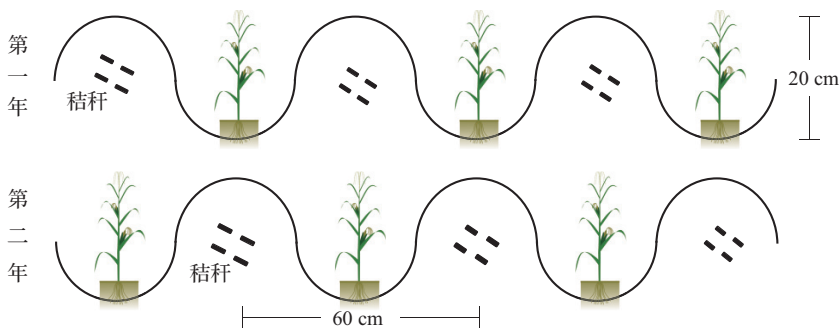


图1 春玉米大垄轮播示意图

1.3 土壤样品采集

分别在2019年10月、2020年5月利用GPS定位，选择3个样方，每个样方4 m²，样方按“S”形采样法采集5点，每个样点采集0~20、20~40 cm土层土壤。现场混匀，去除土壤中植物残体等杂质，置于塑封袋中带回实验室，干燥处阴凉风干。

1.4 测定项目及方法

土壤团聚体不同粒径的分级采用沙维诺夫干筛法，将风干的土壤样品沿着自然裂痕分割为1 cm³左右，取200 g左右土样使其通过5.00、2.00、1.00、0.50、0.25 mm的筛组，得到>5.00、

1.2 试验设计

参考和江鹏等^[19]的研究，试验设置秸秆还田翻耕(JF)、秸秆还田旋耕(JX)和大垄轮播秸秆还田(JL)3种还田方式，以秸秆不还田为对照(CK)，共4个处理。其中秸秆还田量为9000~10500 kg·hm⁻²，每个处理面积0.33 hm²，连续种植2年，2019年10月进行秸秆还田，2019年(品种：福来818)、2020年(品种：诚信16号)5月初播种，春季随播种每公顷施入玉米专用肥750 kg，垄距60 cm，株距32 cm，密度3500株·hm⁻²。

对于大垄轮播秸秆还田处理，春玉米采用高起垄种植，垄高20 cm，垄距60 cm，秋季采用机械收获秸秆粉碎还田，秸秆还田后在冬季风力作用下聚集在垄沟中，第二年在上一年的垄背开沟种植，开沟后的土壤向两侧翻压(图1)。秸秆还田翻耕处理，春玉米采用高起垄种植，垄高20 cm，垄距60 cm，秋季采用机械收获秸秆粉碎还田，春季播种前进行翻耕，耕深20~25 cm。秸秆还田旋耕处理，春玉米采用高起垄种植，垄高20 cm，垄距60 cm，秋季采用机械收获秸秆粉碎还田，春季播种前进行旋耕，耕深10~15 cm。

2.00~5.00、1.00~2.00、0.50~1.00、0.25~0.50及<0.25 mm 6个粒级的团聚体，称量每个粒级团聚体重量并计算其所占比例。计算公式如下：

$$\text{团聚体质量分数}(\%) = \frac{\text{某粒级团聚体质量}}{\text{土壤样品总质量}} \times 100$$

土壤团聚体稳定性指标用平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)^[20]来表示。计算公式如下：

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

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

式中, n 为粒径分组的组数; $\bar{x}_i$ 为粒径的平均直径; w_i 为粒径团聚体的质量分数。

土壤团聚体有机碳组分采用土壤碳素烧失法测定, 测定步骤如图 2 所示。

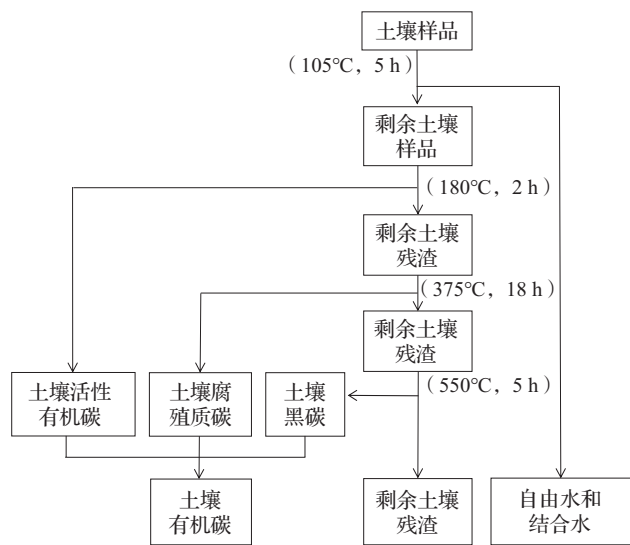


图 2 土壤碳素烧失法路线图

活性有机碳的测定: 取一定量的白金坩埚分别称重并编号, 分别称取干燥土壤样品 2 g 左右依次倒入白金坩埚中, 然后将白金坩埚依次放入马弗炉中设置温度为 180℃ 并灼烧 2 h, 灼烧完毕后等马弗炉内温度冷却至室温, 取出白金坩埚后立即用天平称重, 再放入马弗炉中在 180℃ 下灼烧 30 min, 冷却, 称重, 重复至恒重。烧失量 (LOI180, 土壤与白金坩埚原重量与灼烧后土壤与白金坩埚重量的差值) 即为活性有机碳量。

腐殖质碳的测定: 上一步骤中灼烧后的土壤与白金坩埚, 依次放入马弗炉中设置温度为 375℃ 并灼烧 18 h, 灼烧完毕后等马弗炉内温度冷却至室温, 取出白金坩埚后立即用天平称重, 再放入马弗炉中在 375℃ 下灼烧 30 min, 冷却, 称重, 重复至恒重。烧失量 LOI375 与 LOI180 差值即为腐殖质碳量。

黑碳和有机碳的测定: 上一步骤中灼烧后的土壤与白金坩埚, 依次放入马弗炉中设置温度为 550℃ 并灼烧 6 h, 灼烧完毕后等马弗炉内温度冷却至室温, 取出白金坩埚后立即用天平称重, 再放入马弗炉中在 550℃ 下灼烧 30 min, 冷却, 称重, 重

复至恒重。烧失量 (LOI550) 即为土壤有机碳量, 烧失量 LOI550 与 LOI375 差值即为黑炭量。

1.5 数据处理与分析

用 Excel 2003 进行数据分析并作图, 采用 SPSS 20.0 对土壤团聚体分布、团聚体稳定性和团聚体有机碳含量进行单因素方差分析, 处理间差异显著性分析用 Duncan 法进行检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田方式下土壤团聚体粒径及其稳定性变化 (2 年平均数据)

2.1.1 不同秸秆还田方式下土壤团聚体粒径垂向分布

不同还田方式土壤团聚体垂向分布如图 3 所示。在 0 ~ 40 cm 土层, 0.25 ~ 0.50 mm 团聚体为优势粒级, 团聚体质量比在 26.28% ~ 31.83% 之间, <0.25 mm 团聚体为劣势粒级。与 0 ~ 20 cm 土层相比, 20 ~ 40 cm 土层各还田方式土壤团聚体各粒径占比的变化存在差异, 在 CK 处理中, >5.00、2.00 ~ 5.00、1.00 ~ 2.00 mm 团聚体质量比上升, 其中 >5.00 mm 团聚体质量比上升最高为 7.37%, 在 JF 处理中, >5.00、2.00 ~ 5.00、0.25 ~ 0.50 mm 团聚体质量比上升, 其它团聚体质量比降低, 在 JL 处理中, 0.25 ~ 0.50、<0.25 mm 团聚体分别上升了 3.93%、2.47%, 在 JX 处理中, >5.00、0.25 ~ 0.50 mm 团聚体质量比上升。总体来看, 在 0 ~ 20 cm 土层, 各还田方式均能显著提高 1.00 ~ 2.00 mm 团聚体比例, JX 处理显著提高 >5.00 mm 团聚体比例, JL 和 JX 处理显著提高 2.00 ~ 5.00 mm 团聚体比例, 在 20 ~ 40 cm 土层, 各还田方式提高 0.25 ~ 0.50 mm 和 <0.25 mm 团聚体比例, 可见各秸秆还田方式对土壤 20 ~ 40 cm 土层大粒径团聚体提高效果不明显。

2.1.2 不同秸秆还田方式下土壤团聚体稳定性变化

不同秸秆还田方式土壤团聚体稳定性垂向分布如表 1 所示。团聚体的稳定性用 MWD 和 GMD 两个指标表示, 大粒径团聚体含量占比越多, 它们的值越大, 土壤稳定性越高, 在 0 ~ 20 cm 土层, 不同还田方式 MWD 在 1.73 ~ 2.00 之间, 大小顺序为 JX > JL > JF > CK, GMD 在 0.99 ~ 1.17 之间, 大小顺序为 JL = JX > JF > CK, 与 0 ~ 20 cm 土层相比, 20 ~ 40 cm 土层 MWD 和 GMD 各有不同的变化, 其中 CK、JF 和 JX 处理 MWD 垂向上分别提高了 18.3%、3.0%、4.3%, JL 处理下降了 10.2%。CK 和

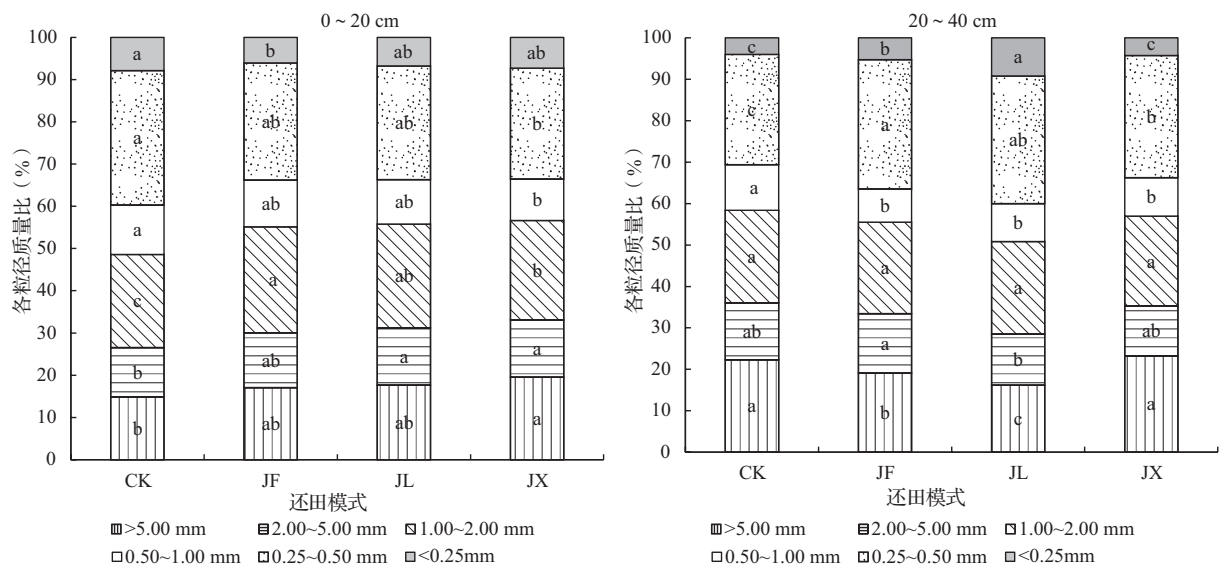


图3 不同秸秆还田方式下土壤团聚体占比垂向分布

注：不同小写字母表示同一粒级不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

JX 处理 GMD 垂向上分别提高了 22.7%、4.9%，JL 处理下降了 18.2%。总体来看，各秸秆还田方式均能增加 0 ~ 20 cm 土层土壤 MWD 和 GMD，从而提高土壤团聚体稳定性，随着土层深度的增加各还田方式土壤 MWD 和 GMD 均由高于 CK 变为低于 CK，表明秸秆还田对 20 ~ 40 cm 土层团聚体稳定性影响较小。

表 1 不同秸秆还田方式下土壤团聚体平均重量直径与几何平均直径垂向分布

项目	处理	土层 (cm)	
		0 ~ 20	20 ~ 40
平均重量直径 (mm)	CK	1.73 ± 0.18b	2.12 ± 0.06a
	JF	1.91 ± 0.20ab	1.97 ± 0.01b
	JL	1.95 ± 0.22ab	1.77 ± 0.08c
	JX	2.00 ± 0.09a	2.09 ± 0.06a
几何平均直径 (mm)	CK	0.99 ± 0.09b	1.28 ± 0.02a
	JF	1.15 ± 0.15a	1.15 ± 0.01b
	JL	1.17 ± 0.18a	0.99 ± 0.04c
	JX	1.17 ± 0.07a	1.23 ± 0.02a

注：不同小写字母表示同一项目不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 不同秸秆还田方式对土壤团聚体有机碳组分分布的影响 (2 年平均数据)

2.2.1 不同秸秆还田方式下土壤有机碳含量垂向变化

不同秸秆还田方式土壤团聚体有机碳含量垂向分布如图 4 所示。不同粒径土壤团聚体中有

机碳含量相比 1.00 ~ 2.00 mm 团聚体最高，在 42.88 ~ 54.72 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间，<0.25 mm 团聚体有机碳含量最低，在 32.68 ~ 43.48 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。在 0 ~ 20 cm 土层，1.00 ~ 2.00、0.50 ~ 1.00 mm 团聚体中 JL 处理有机碳含量显著高于 CK，在 20 ~ 40 cm 土层 1.00 ~ 2.00 和 0.50 ~ 1.00 mm 团聚体中各还田方式有机碳含量均显著高于 CK。与 0 ~ 20 cm 土层相比，20 ~ 40 cm 土层各粒径团聚体有机碳含量变化为 >5.00 mm 团聚体中 CK、JF 和 JX 处理有机碳含量分别下降了 1.8%、3.5%、6.3%，在 2.00 ~ 5.00 和 1.00 ~ 2.00 mm 团聚体中，各还田方式有机碳含量均下降，在 0.50 ~ 1.00 mm 团聚体中，CK 和 JL 处理分别提高了 4.4%、1.2%，在 0.25 ~ 0.50 mm 团聚体中，CK、JL 和 JX 处理有机碳含量分别下降了 3.2%、1.1%、2.6%，JF 处理提高了 1.5%，在 <0.25 mm 团聚体中，CK、JL 和 JX 处理有机碳含量均下降，JF 处理提高了 4.5%。总体来看，JL 处理对提高土壤团聚体有机碳含量效果最佳。

2.2.2 不同秸秆还田方式下土壤团聚体活性有机碳含量垂向变化

不同秸秆还田方式土壤团聚体活性有机碳含量垂向分布如图 5 所示。活性有机碳是有机碳的活性较高的部分，可以反映土壤微环境和碳库的变化，在 0 ~ 20 cm 土层，JF、JL 和 JX 处理各团聚体活性有机碳含量均高于 CK 处理，其中，>5.00 mm 团聚体中，JX 处理活性有机碳显著高于

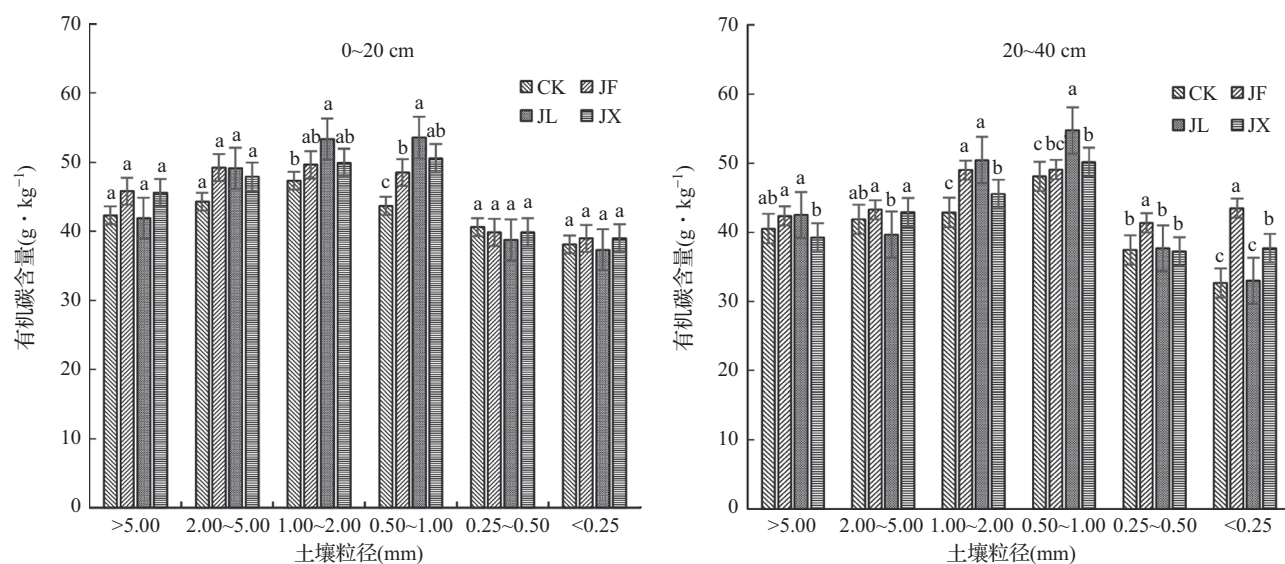


图4 不同秸秆还田方式下土壤团聚体有机碳含量的垂向变化

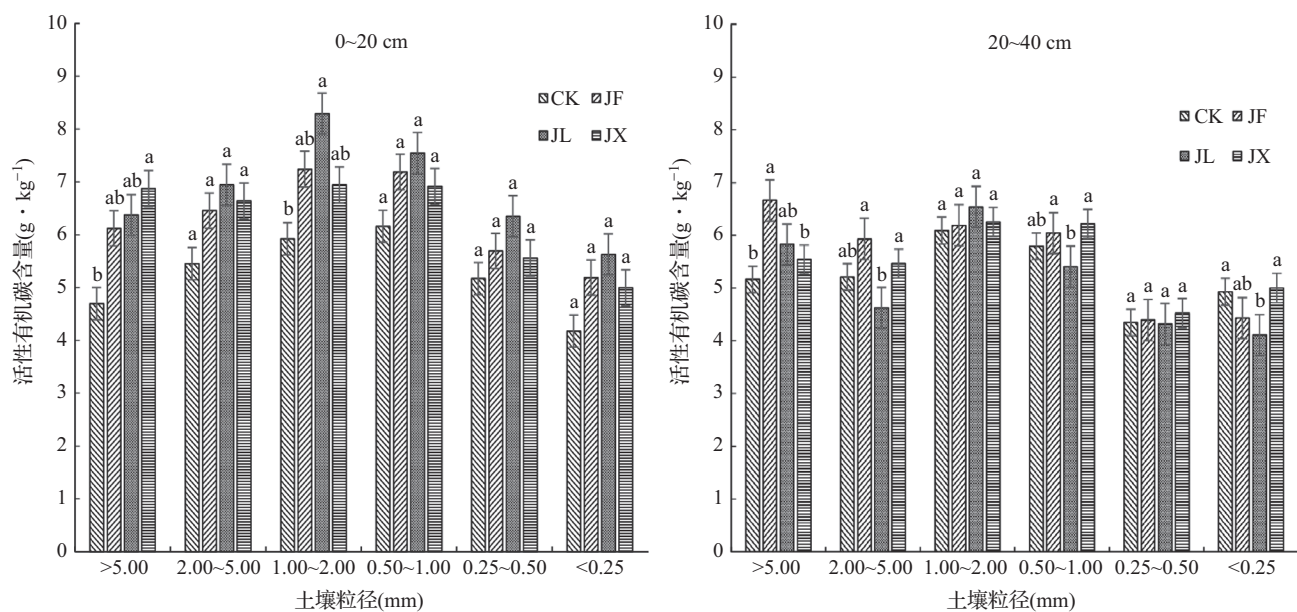


图5 不同秸秆还田方式下土壤团聚体活性有机碳含量的变化

CK 处理, 1.00 ~ 2.00 mm 团聚体中, JL 处理活性有机碳显著高于 CK 处理。与 0 ~ 20 cm 土层相比, 20 ~ 40 cm 土层各粒径团聚体活性有机碳含量变化为 2.00 ~ 5.00、1.00 ~ 2.00、0.50 ~ 1.00 和 0.25 ~ 0.50 mm 团聚体中, 各处理活性有机碳含量下降, 在 >5.00 mm 团聚体中, CK 和 JF 处理活性有机碳含量分别提高了 9.95%、8.88%, JL 和 JX 处理分别降低了 8.56%、19.44%。总体来看, 各还田方式均能提高 0 ~ 20 cm 土层土壤各粒径团聚体活

性有机碳含量, 并且对 0 ~ 20 cm 土层提高效果高于 20 ~ 40 cm 土层, JF 处理对 20 ~ 40 cm 土层 >5.00、2.00 ~ 5.00 mm 团聚体活性有机碳提高幅度高于 JL 和 JX 处理。

2.2.3 不同秸秆还田方式下土壤团聚体腐殖质碳含量垂向变化

不同秸秆还田方式土壤团聚体腐殖质碳含量垂向分布如图 6 所示。腐殖质碳是有机质的主体部分, 它可以促进作物根系发育和果实成长, 在

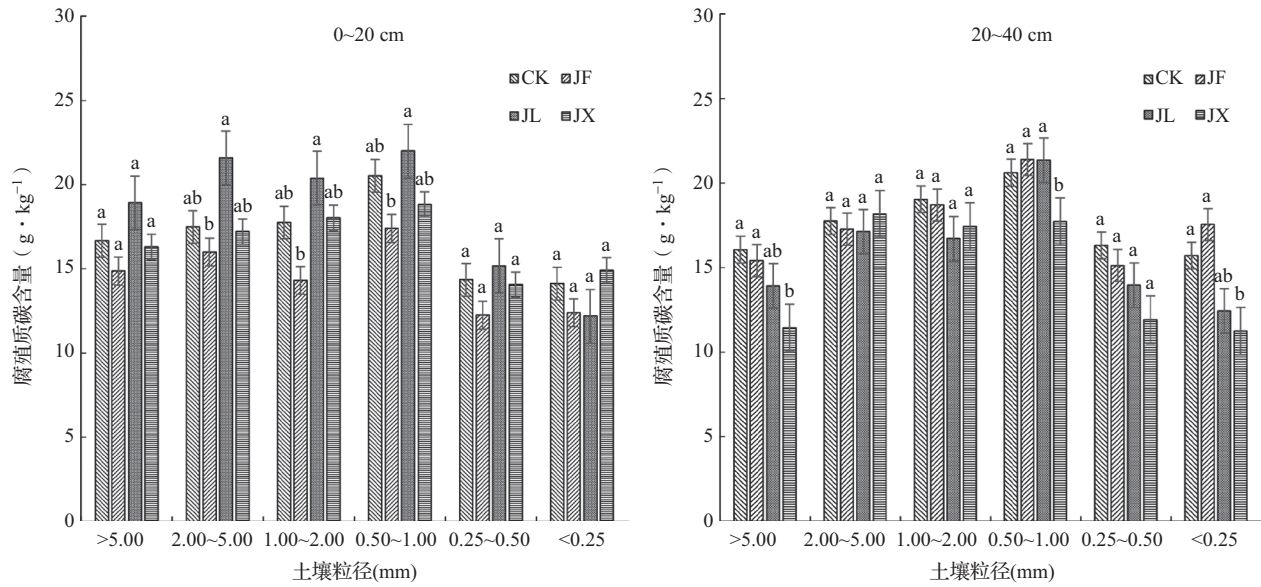


图6 不同秸秆还田方式下土壤团聚体腐殖质碳含量的变化

0 ~ 20 cm 土层 >5.00、2.00 ~ 5.00、1.00 ~ 2.00 和 0.50 ~ 1.00 mm 团聚体中, JL 处理腐殖质碳含量均高于 CK 处理, JF 和 JX 处理均低于 CK 处理。在 20 ~ 40 cm 土层 >5.00、2.00 ~ 5.00、1.00 ~ 2.00 mm 团聚体中, JF 和 JL 处理腐殖质碳含量均低于 CK 处理。与 0 ~ 20 cm 土层相比, 20 ~ 40 cm 土层各粒径团聚体腐殖质碳含量变化为 CK 和 JF 处理各团聚体腐殖质碳含量上升, JL 和 JX 处理各团聚体腐殖质碳含量下降。总体来看, JL 处理提高 0 ~ 20 cm 土层 >5.00、2.00 ~ 5.00、1.00 ~ 2.00、0.25 ~ 0.50 mm 团聚体腐殖质碳含量, CK 和 JF 处理团聚体腐殖质碳含量垂向表现为上升, JL 和 JX 处理表现为下降。

2.2.4 不同秸秆还田方式下土壤团聚体黑碳含量垂向变化

不同秸秆还田方式土壤团聚体黑碳含量垂向分布如图 7 所示。黑碳作为生物质不完全燃烧的产物有利于提高有机质库稳定性, 在 0 ~ 20 cm 土层 >5.00、2.00 ~ 5.00 mm 团聚体中, JF 和 JX 处理黑碳含量均高于 CK 处理, 在 1.00 ~ 2.00 和 0.50 ~ 1.00 mm 团聚体中, 各还田方式黑碳含量均高于 CK 处理。与 0 ~ 20 cm 土层相比, 20 ~ 40 cm 土层各粒径团聚黑碳含量变化为 CK、JF 和 JX 处理 >5.00、2.00 ~ 5.00、1.00 ~ 2.00 mm 团聚体黑碳含量均下降, JL 处理 >5.00、1.00 ~ 2.00 mm 团聚体黑碳含量分别提高了 22.38%、9.75%,

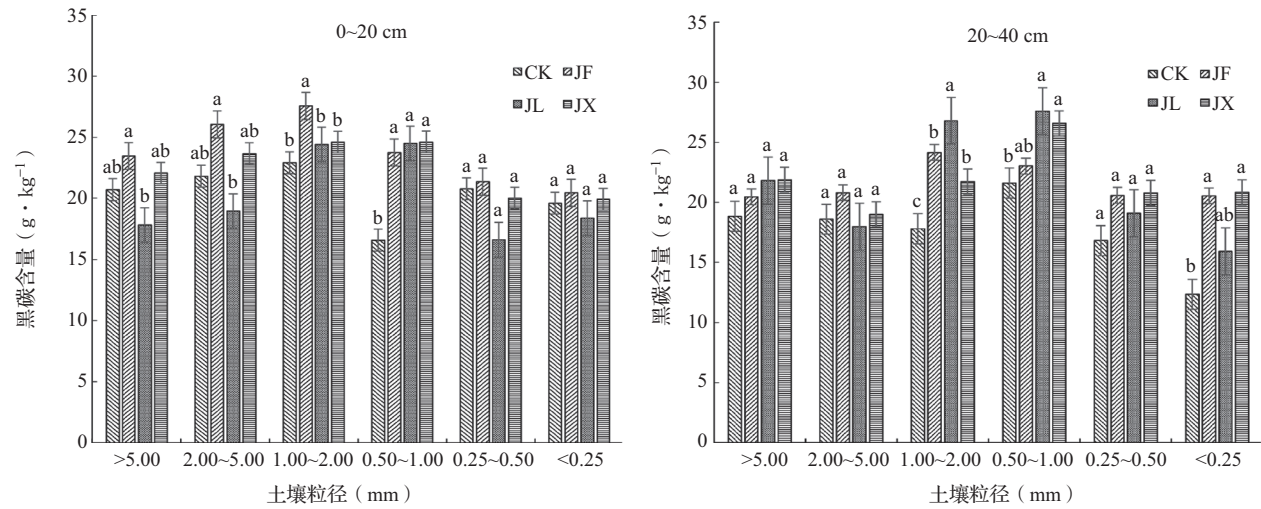
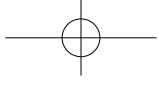


图7 不同秸秆还田方式下土壤团聚体黑碳含量变化



2.00 ~ 5.00 mm 团聚体黑碳含量下降了 5.15%。总体来看, JF 和 JX 处理可以提高 0 ~ 20 cm 土层 >5.00、2.00 ~ 5.00 mm 团聚体黑碳含量, 各还田方式提高 1.00 ~ 2.00、0.50 ~ 1.00 mm 团聚体黑碳含量, CK、JF 和 JX 处理 >5.00、2.00 ~ 5.00、1.00 ~ 2.00 mm 团聚体黑碳含量随土壤深度增加而下降。

3 讨论

3.1 秸秆还田方式对土壤团聚体粒径分布及其稳定性的影响

本研究团聚体的分级方法采用干筛法, 可以明确团聚体抗机械分散的能力, 对于干旱地区研究更有意义。研究表明, 在 0 ~ 20 cm 土层, 各还田方式均能显著提高 1.00 ~ 2.00 mm 团聚体比例, JX 处理显著提高 >5.00 mm 团聚体比例, 且 MWD 最高, 团聚体稳定性较高, JL 和 JX 处理显著提高 2.00 ~ 5.00 mm 团聚体比例, JL 处理 MWD 较高, 各还田方式对不同粒径团聚体影响效果不同, 主要表现在对耕层 (0 ~ 20 cm) 大粒径的团聚体 (>5.00、2.00 ~ 5.00、1.00 ~ 2.00 mm) 提高效果显著。大粒径团聚体比例占比越高, 土壤团聚体稳定性越大, 秸秆还田可以增加土壤大粒径团聚体占比从而提高团聚体稳定性。近几年研究表明, 土壤团聚体与土壤肥力关系密切^[21], 良好的土壤团聚体结构可以提高土壤肥力, 进而提高作物产量, 不同秸秆还田方式对土壤大团聚体形成的作用不同, 前人研究表明, 秸秆覆盖还田和翻埋还田显著提高土壤 >5.00、2.00 ~ 5.00 mm 团聚体数量, 提高土壤的 GMD 和 MWD^[20, 22], 与本试验的研究结果一致, 秸秆粉碎进入土壤后, 增加了机器对土地耕作的扰动阻力, 降低耕作对土壤团聚体的破坏, 同时也改善了微生物的栖息环境, 增加了微生物的活性, 微生物通过分解混入土层中的秸秆产生多糖物质等, 促进土壤颗粒黏结在一起, 有利于 <0.25 mm 团聚体向更大级粒径转变, 形成大团聚体, 这与张先凤等^[23]研究秸秆还田翻耕和免耕有利于微团聚体转化为大团聚体 (>0.25 mm) 的研究结果一致, 本试验结果表明秸秆还田翻耕、旋耕和大垄轮播减少了 <0.25 mm 团聚体, 这与贾辉等^[24]的研究结果一致, 可能由于微团聚体黏结为大团聚体所致。秸秆还田翻耕、大垄轮播秸秆还田和秸秆还田旋耕对各级团聚体的影响不尽相同, 秸

秆还田后由于微生物的作用增加土壤胶态有机质, 翻耕、旋耕等耕作方式对土壤扰动程度不同, 导致土壤结构和微生态环境存在差异^[25], 翻耕促进土壤疏松, 孔隙度增大, 旋耕降低土壤密度和硬度, 增加土壤孔隙度, 大垄轮播秸秆还田可以将垄沟中的秸秆有效掩埋, 促进秸秆的腐熟分解, 分解时产生的土壤腐殖物质有利于土壤黏结, 提高大团聚体百分比, 各种耕作方式对团聚体的影响不同, 导致各还田方式的 MWD 和 GMD 不同, 大团聚体占比越高 MWD 和 GMD 的值就越大^[26-27]。本研究结果表明 3 种秸秆还田方式均能提高土壤团聚体的稳定性, 但提升效果不同, 秸秆还田旋耕对团聚体稳定性提高效果最佳。本研究结果表明, 随着土层深度的增加各还田方式土壤 MWD 和 GMD 均由高于 CK 变为低于 CK, 不同秸秆还田方式对土壤的作用效果会随着土层深度的增加而变小, 由梁尧等^[28]研究数据可以看出秸秆覆盖还田和秸秆深耕还田两种方式与不还田相比, 可以显著提高耕层土壤 MWD, 对亚耕层 MWD 作用不显著, 与本试验结果一致。

3.2 秸秆还田方式对土壤团聚体有机碳组分含量的影响

有机碳含量是评价土壤肥力的重要指标, 其不同时空下的变化可以反映出土壤肥力的变化, 作物秸秆作为一种重要的有机物料不仅含有大量的活性有机碳成分, 作物残茬、根系及其分泌物和还田的秸秆是农田生态系统有机碳投入的主要来源。根据土壤碳组分与 GMD、WMD 相关性分析 (表 2) 可知, 土壤活性有机碳与 WMD 呈显著正相关^[29], 可见, 随着活性有机碳的增加, 提高了土壤团聚体的稳定性, 许多研究表明, 不同秸秆还田方式可以提高土壤有机碳含量, 本试验将土壤团聚体按粒径大小分为 6 个等级, 并分别测定每个等级粒径中的有机碳组分含量。由于本试验是在连续 4 年的秸秆还田处理下取中间 2 年的土样, 不同处理间的有机碳、腐殖质碳、黑炭差异较大。研究表明, 在 0 ~ 20 cm 土层, JL 处理显著提高 2.00 ~ 5.00、0.50 ~ 1.00 mm 土壤团聚体有机碳含量。各还田方式均能提高各团聚体活性有机碳含量, 提高 1.00 ~ 2.00、0.50 ~ 1.00 mm 团聚体黑碳含量, JL 处理提高 >5.00、2.00 ~ 5.00、1.00 ~ 2.00、0.25 ~ 0.50 mm 团聚体腐殖质碳含量, JF 和 JX 处理提高 >5.00、2.00 ~ 5.00 mm 团

聚体黑碳含量。河北省西北部寒旱区干旱少雨，低温天气持续时间长，秸秆进入土壤腐解最适温度在30℃左右，最适土壤含水量在田间持水量的65%左右，通常经过4个月的时间彻底腐解，秸秆腐化后会增加土壤有机碳含量，改善土壤结构，而不同的耕作方式下秸秆的腐解速率不同，导致各还田方式有机碳组分含量不同。高洪军等^[30]研究表明，秸秆还田旋耕会提高大团聚体(>0.25 mm)有机碳含量，皇甫呈惠等^[31]对青岛莱阳土壤研究表明小麦、玉米秸秆还田团聚体不同粒径中有机碳含量高于秸秆不还田处理，贾辉等^[24]对河南许昌土地土壤研究表明秸秆还田翻耕显著提高0~30 cm土层各粒径团聚体有机碳含量，也有研究表明土壤有机碳与团聚体稳定性呈显著正相关，崔正果等^[32]对吉林长春土壤研究表明根茬与秸秆全量耕翻还田对土壤活性有机碳提高至少5%。土壤腐殖质碳构成了有机碳的主体，它包括富里酸、胡敏酸和胡敏素^[33]，有研究结果表明秸秆还田提高连作田土壤富里酸、胡敏酸和胡敏素含量^[34]，与本研究结果一致。不同秸秆还田方式对于0.25~0.50和<0.25 mm团聚体有机碳组分提升效果不明显，可能是由于有机碳组分赋存在各团聚体的程度不同，大粒径团聚体是由小团聚体在富含碳的非稳性胶结剂的作用下黏结而形成，这些胶结剂包括真菌菌丝、植物根系微生物分泌的多糖等，因此大粒径团聚体有机碳含量较多，<0.50 mm团聚体对有机碳的固存较少，所以外部源碳的输入对增加<0.50 mm团聚体有机碳含量提升作用不明显。本研究结果表明，各还田方式对耕层提高效果高于亚耕层。CK和JF处理团聚体腐殖质碳含量垂向表现为上升，JL和JX处理表现为下降。CK、JF和JX处理>5.00、2.00~5.00、1.00~2.00 mm团聚体黑碳含量随土壤深度增加而下降。碳组分垂向不同变化可能由于3种耕作方式(翻耕、旋耕、轮播)下秸秆进入土壤各深度效果和输入碳源速率不同的缘故。

表2 不同秸秆还田方式下土壤碳组分与团聚体稳定性相关性分析

相关系数	活性有机碳	腐殖质碳	黑碳	有机碳
几何平均直径	0.484	-0.035	0.281	-0.201
平均重量直径	0.533*	0.068	0.189	-0.122

注：n=16，*表示显著相关(P<0.05)。

4 结论

(1) 各处理土壤以0.25~0.50 mm团聚体为优势粒级，在0~20 cm土层，各还田方式均能显著提高1.00~2.00 mm团聚体比例，JX处理显著提高>5.00 mm团聚体比例，JX处理MWD最高，JL和JX处理显著提高2.00~5.00 mm团聚体比例，JL处理MWD较高。各处理均能提高土壤团聚体稳定性。

(2) 在0~20 cm土层，JL处理显著提高2.00~5.00、0.50~1.00 mm团聚体有机碳含量，JL处理对土壤团聚体有机碳含量提高效果最好。各还田方式均能提高土壤各团聚体活性有机碳含量，提高1.00~2.00、0.50~1.00 mm团聚体黑碳含量，JL处理提高>5.00、2.00~5.00、1.00~2.00、0.25~0.50 mm团聚体腐殖质碳含量，JF和JX处理提高>5.00、2.00~5.00 mm团聚体黑碳含量。

(3) 各还田方式对0~20 cm土层提高效果高于20~40 cm土层。CK和JF处理团聚体腐殖质碳含量垂向表现为上升，JL和JX处理表现为下降。CK、JF和JX处理>5.00、2.00~5.00、1.00~2.00 mm团聚体黑碳含量随土壤深度增加而下降。各处理对亚耕层有机碳组分作用效果小于耕层。

(4) 综合考虑，根据冀西北寒旱区春玉米种植区地理和气候条件，大垄轮播秸秆还田耕作方式能较好地提高土壤团聚体稳定性和团聚体有机碳组分含量，该地区适宜采用大垄轮播秸秆还田耕作方式。

参考文献：

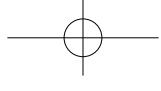
[1] 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3816-3824.

[2] 周方亮. 紫云英和秸秆还田下团聚体稳定性及有机碳的分布特征[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.

[3] Laskar S Y, Sileshi G W, Pathak K, et al. Variations in soil organic carbon content with chronosequence, soil depth and aggregate size under shifting cultivation[J]. Science of the Total Environment, 2021, 762: 143114.

[4] Zhu G Y, Shanguan Z P, Deng L. Variations in soil aggregate stability due to land use changes from agricultural land on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2021, 200: 105-181.

[5] Liu M, Han G, Zhang Q. Effects of soil aggregate stability



- on soil organic carbon and nitrogen under land use change in an erodible region in southwest China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16 (20): 3809–3819.
- [6] Yassine B, Aicha R, Namira E A P. Machine learning approaches for the prediction of soil aggregate stability [J]. Heliyon, 2021, 7 (3): 6480–6494.
- [7] Liu Y, Ma M H, Ran Y G, et al. Disentangling the effects of edaphic and vegetational properties on soil aggregate stability in riparian zones along a gradient of flooding stress [J]. Geoderma, 2021, 385: 1–13.
- [8] Shen Y F, Cheng R M, Xiao W F, et al. Effects of understory removal and thinning on soil aggregation, and organic carbon distribution in *Pinus massoniana* plantations in the three Gorges Reservoir area [J]. Ecological Indicators, 2021, 123: 1–8.
- [9] Babur E, Kara O, Fathi R A, et al. Wattle fencing improved soil aggregate stability, organic carbon stocks and biochemical quality by restoring highly eroded mountain region soil [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 288: 112489.
- [10] Garcia L, Damour G, Gary C, et al. Trait-based approach for agroecology: contribution of service crop root traits to explain soil aggregate stability in vineyards [J]. Plant and Soil, 2019, 435 (1–2): 1–14.
- [11] Zhu Y L, Wang D Y, Wang X J, et al. Aggregate-associated soil organic carbon dynamics as affected by erosion and deposition along contrasting hillslopes in the Chinese Corn Belt [J]. Catena, 2021, 199: 105106.
- [12] Wang Y L, Wu P N, Mei F J, et al. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase? A meta-analysis [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 288: 112391.
- [13] 安娜娜, 马琨, 王明国, 等. 玉米秸秆还田对土壤团聚体组成及其碳氮分布的影响 [J]. 西北农业学报, 2020, 29(5): 766–775.
- [14] 冯秋苹, 刘玉涛, 郭勇智, 等. 不同秸秆还田方式对土壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响 [J]. 吉林农业大学学报, 2023, 45 (5): 564–571.
- [15] Li J, Huang Y, Liu H, et al. Study on the effect of maize stalk returning on soil aggregates in the western Liaoning province [J]. Hans Journal of Soil Science, 2019, 7 (1): 1–9.
- [16] 孙雪, 张玉铭, 张丽娟, 等. 长期添加外源有机物料对华北农田土壤团聚体有机碳组分的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2021, 29 (8): 1384–1396.
- [17] 于博, 王钰艳, 任琴, 等. 秸秆还田对土壤结构和春玉米生长的影响 [J]. 浙江农业学报, 2023, 10 (27): 1–11.
- [18] 王富贵, 邹润厚, 高聚林, 等. 秸秆还田方式对内蒙古东部地区土壤水热及春玉米苗期生长的影响 [JOL]. 作物杂志, (2023–09–15) [2024–06–17]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1808.S.20230914.1126.004>.
- [19] 和江鹏, 王雨晴, 赵海超, 等. 春玉米秸秆还田对土壤碳组分及碳库管理指数的影响 [J]. 江苏农业科学, 2021, 49 (21): 224–230.
- [20] 盛明, 龙静泓, 雷琬莹, 等. 秸秆还田对黑土团聚体内有机碳红外光谱特征的影响 [J]. 土壤与作物, 2020, 9 (4): 355–366.
- [21] 刘学彤, 曹彩云, 郑春莲, 等. 长期秸秆还田对潮土土壤团聚体碳氮和作物产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2023 (4): 25–33.
- [22] 朱雪峰, 张春雨, 郝艳杰, 等. 玉米秸秆覆盖还田量对免耕土壤有机碳中红外光谱特征的影响 [J]. 应用生态学报, 2021, 32 (8): 2685–2692.
- [23] 张先凤, 朱安宁, 张佳宝, 等. 耕作管理对潮土团聚体形成及有机碳累积的长期效应 [J]. 中国农业科学, 2015, 48 (23): 4639–4648.
- [24] 贾辉, 赵亚鹏, 符云鹏, 等. 施用生物炭和秸秆对植烟土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响 [J]. 烟草科技, 2020, 53 (4): 11–19.
- [25] 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.
- [26] 王敬宽, 吕鹏超, 张楷悦, 等. 不同土地利用方式对盐碱地土壤团聚体及碳氮含量的影响 [J]. 山东农业科学, 2023, 10 (27): 1–10.
- [27] 胥佳忆, 李先德, 刘吉龙, 等. 农业土地利用转变对土壤团聚体组成及碳、氮含量的影响 [J]. 环境科学学报, 2022, 42 (8): 438–448.
- [28] 梁尧, 蔡红光, 杨丽, 等. 玉米秸秆覆盖与深翻两种还田方式对黑土有机碳固持的影响 [J]. 农业工程学报, 2021, 37 (1): 133–140.
- [29] 吴梦瑶, 陈林, 庞丹波, 等. 贺兰山不同海拔植被下土壤团聚体分布及其稳定性研究 [J]. 水土保持学报, 2021, 35 (2): 210–216.
- [30] 高洪军, 彭畅, 张秀芝, 等. 不同秸秆还田方式对黑钙土团聚体特征的影响 [J]. 水土保持学报, 2019, 33 (1): 75–79.
- [31] 皇甫呈惠, 孙筱璐, 刘树堂, 等. 长期定位秸秆还田对土壤团聚体及有机碳组分的影响 [J]. 华北农学报, 2020, 35 (3): 153–159.
- [32] 崔正果, 李秋祝, 张恩萍, 等. 玉米秸秆不同还田方式对土壤有机质及微生物数量的影响 [J]. 玉米科学, 2018, 26 (6): 104–109.
- [33] 窦森, 周桂玉, 杨翔宇, 等. 生物质炭及其与土壤腐殖质碳的关系 [J]. 土壤学报, 2012, 49 (4): 796–802.
- [34] 范如芹, 周运来, 李赞, 等. 秸秆发酵还田提升土壤腐殖质含量与品质 [J]. 江苏农业学报, 2019, 35 (5): 1095–1101.

Effects of different straw returning methods on soil aggregate stability and organic carbon content in cold and arid regions

XIE Shi-xing, LIU Xue-ling[#], LIU Chen, HE Jiang-peng, ZHAO Hai-chao^{*}, LIU Song-tao, LU Hai-bo, HUANG Zhi-hong^{*} (Key Laboratory of Analysis and Inspection of Agricultural Products and Food Safety of Hebei Province, Key Laboratory of Quality and Safety of Characteristic Agricultural Products of Zhangjiakou City, Hebei North University, Zhangjiakou Hebei 075000)

Abstract: In order to clarify the impact of returning spring corn straw on soil aggregates and their organic carbon components under low temperature and water scarcity conditions in farmland, and to provide scientific basis for the method of returning spring corn straw to farmland in the northwest cold and arid region of Hebei, three methods of returning straw to farmland were set up in field experiment, namely, returning straw to farmland through plowing (JF), returning straw to farmland through rotary tillage (JX), and returning straw to farmland through large ridge rotation (JL). Using no straw returning to farmland as control (CK), the effects of straw returning methods on the distribution, stability and organic carbon component content of soil aggregates with different particle sizes were analyzed. The results showed that in 0–20 cm soil layer, all returning methods significantly increased the proportion of 1.00–2.00 mm aggregates, while JX treatment significantly increased the proportion of >5.00 mm aggregates. The average weight diameter (MWD) of soil aggregates under JX treatment was the highest, and the stability of aggregates was strong. JL and JX treatments significantly increased the proportion of 2.00–5.00 mm aggregates, while JL treatment had a higher geometric mean diameter (GMD) of soil aggregates. Each returning method increased soil MWD and GMD by 10.32%–15.46% and 16.23%–18.35%, respectively, which could increase soil aggregate stability. The organic carbon content of soil aggregates with different particle sizes ranged from 42.88–54.72 g · kg⁻¹. The JL treatment significantly increased the organic carbon content of aggregates by 2.00–5.00 and 0.50–1.00 mm, with an increase greater than the other two returning methods. The active organic carbon content of soil aggregates with different particle sizes under different returning methods ranged from 4.18 to 8.29 g · kg⁻¹, and the active organic carbon content of each aggregate was higher than that of CK. Returning straw to the field increased the black carbon content of aggregates of 1.00–2.00 and 0.50–1.0 mm, while JF and JX treatments increased the black carbon content of aggregates of >5.00 and 2.00–5.00 mm. JL treatment increased the carbon content of aggregate humus of >5.00, 2.00–5.00, 1.00–2.00, and 0.25–0.50 mm. The increase in organic carbon content in 0–20 cm soil layer by various returning methods was higher than that in 20–40 cm soil layer, while the carbon content of aggregate humus in 20–40 cm soil layer treated with CK and JF was higher than that in 0–20 cm soil layer. The black carbon contents of aggregates >5.00, 2.00–5.00, and 1.00–2.00 mm with CK, JF, and JX treatments were the highest in 0–20 cm soil layer. Based on comprehensive analysis, it was suitable to adopt the method of rotating spring corn in large ridges and returning straw to the field in the cold and arid areas of northwest Hebei.

Key words: the way of straw return to the field; soil aggregates; stability; particle size distribution; soil organic carbon; spring maize