

免耕秸秆覆盖对半干旱区土壤团聚体稳定性和玉米产量的影响

马小明¹ 齐翔鲲¹ 谭雪¹ 史孟豫¹ 王玉凤^{1,2} 付健^{1,2} 杨克军^{1,2}

(¹黑龙江八一农垦大学农学院, 163319, 黑龙江大庆; ²黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室, 163319, 黑龙江大庆)

摘要 为解决半干旱区风沙土壤风蚀导致的土壤结构变差、有机碳含量下降及玉米低产等问题, 于黑龙江省杜尔伯特蒙古族自治县进行长期田间定位试验, 设置旋耕垄作 (CK)、1 年免耕秸秆覆盖还田 (T1)、连续 3 年免耕秸秆覆盖还田 (T2) 和连续 7 年免耕秸秆覆盖还田 (T3) 4 种处理, 分析各处理对不同土层土壤团聚体分布特征、有机碳积累及玉米产量的影响。结果表明, 在 0~30 cm 土层, 相较于其他处理, T3 处理下土壤容重明显降低, 含水量则显著增高; 同时, T3 处理提高了 >0.25 mm 粒级水稳性团聚体百分比含量、有机碳含量及贡献率, 并增大了平均重量直径和几何平均直径。免耕秸秆覆盖还田可显著提高玉米产量, 与 CK 处理相比, 各处理增幅在 14.98%~39.54%。综上, 免耕结合秸秆覆盖还田有助于提升半干旱区土壤团聚体稳定性、各粒级团聚体有机碳含量及玉米产量, 其中 T3 处理效果最佳。

关键词 玉米; 免耕秸秆覆盖; 土壤团聚体; 有机碳; 平均重量直径; 几何平均直径; 产量

黑龙江西部半干旱区土壤类型为典型的风沙土壤, 受冬春季节大风天气影响, 该地干燥疏松的土壤表层易遭受强烈的风蚀作用^[1]。土壤风蚀是引发水土流失、导致土壤变薄、加剧土壤退化及造成粮食减产的重要原因之一^[2]。土壤团聚体作为土壤结构的组成单元, 对土壤结构与养分状况具有重要影响, 其稳定性是衡量土壤结构稳定性的关键指标^[3]。其中, 水稳定性团聚体是决定土壤抗风蚀能力的关键因素。土壤团聚体的稳定不仅有助于减少水土流失、降低土壤养分损耗, 还能提升土壤固碳能力, 而团聚体的形成和稳定与土壤有机碳密切相关^[4-5]。土壤有机碳是土壤的重要组成部分, 对土壤肥力起决定性作用, 对维持土壤生产力至关重要^[6]。土壤团聚体与有机碳相互作用, 团聚体为有机碳的形成与转化提供载体; 有机碳则作为胶结物质, 通过吸附作用增强土粒间的团聚性, 进而提升团粒结构的稳定性^[7-8]。

作物秸秆是重要的可再生资源, 还田是其合理利用的有效途径^[9]。免耕结合秸秆覆盖还田措施影响了土壤团聚体的分布及有机碳的积累^[10]。免耕措施减少了对土壤团聚体的扰动, 从而增强了大团聚体对有机碳的保护作用^[11-13]。同时, 秸秆覆盖还田

可显著提高土壤中大团聚体比例与团聚体稳定性, 增加耕层土壤有机碳含量^[14]。研究^[15]发现不同年限的免耕秸秆覆盖处理均能提升土壤有机碳含量与玉米产量, 且随还田年限的延长而递增。另有研究^[16]表明, 免耕秸秆覆盖可增加土壤表层 >0.25 mm 的团聚体数量与有机质含量, 进而改善土壤结构的稳定性。

为降低土壤风蚀, 明确黑龙江省半干旱地区在免耕秸秆覆盖还田条件下土壤结构稳定性的变化特征, 本研究设置不同免耕秸秆覆盖还田年限的田间定位试验, 通过分析不同处理下 0~30 cm 土层土壤容重、含水量、土壤团聚体分布以及团聚体有机碳含量的变化规律, 旨在为改善该地区农田土壤质量以及促进玉米增产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于黑龙江省大庆市杜尔伯特蒙古族自治县 (45.53°~47.87° N, 123.45°~124.42° E) 进行, 平均海拔 152 m, 属温带季风气候。年均气温 3.6~4.4 °C, 年均日照 2852 h, 年均降水量 400 mm, 无霜期 158 d, 处于第一积温带, 全年有效积温可达

作者简介: 马小明, 研究方向为寒地作物全程机械化优质高效生产, E-mail: 209421254@qq.com

杨克军为通信作者, 研究方向为寒地玉米产量品质与生理生态, E-mail: byndykj@163.com; 付健为共同通信作者, 研究方向为玉米高产技术创新及农田土壤改良, E-mail: fujian_hl@163.com

基金项目: 黑龙江自然科学基金 (YQ2024C043); 黑龙江省领军人才梯队后备带头人资助项目

收稿日期: 2024-12-18; 修回日期: 2025-03-29; 网络出版日期: 2025-04-23

2800~2900 °C。该地为典型的西部半干旱区，土壤类型为风沙土，0~30 cm 耕层土壤基础肥力为有机质 25.60 g/kg、全氮 1.03 g/kg、碱解氮 44.60 mg/kg、速效磷 19.04 mg/kg、速效钾 178.42 mg/kg。粮食作物主要以玉米为主，熟制为一年一熟，种植密度 6.75 万株/hm²，田间管理同当地管理。

1.2 试验设计

以当地主栽玉米品种美豫 815 为供试材料开展田间定位试验，设置 4 个处理：1 年免耕秸秆覆盖还田处理，开始于 2022 年秋收后（T1）；连续 3 年免耕秸秆覆盖还田处理，开始于 2020 年秋收后（T2）；连续 7 年免耕秸秆覆盖还田处理，开始于 2016 年秋收后（T3）；常规旋耕垄为对照（CK）。T1、T2 和 T3 在处理开始后均为连年秸秆覆盖还田。于 2023 年统一进行取样。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤样品采集 于 2023 年玉米完熟期，每小区随机取多个点混合，采集 0~10、10~20 和 20~30 cm 3 个土层原状土放入塑料取样盒，除去采集土壤样品中的植物残体和石块等其他杂物。带回实验室后，在通风干燥处自然风干。

1.3.2 土壤团聚体结构 参照 Elliott^[17]的土壤团聚体湿筛法，采用 LBF-100 土壤团粒结构分析仪（杭州绿博仪器有限公司）分析土壤团聚体结构，将自然风干后的土壤样品筛成直径约为 1 cm 的团块，随机取 200 g 样品分别放入孔径大小为 5.00、2.00、1.00、0.50 和 0.25 mm 的团粒结构分析仪套筛，浸泡 15 min 后上下振动 15 min，收集各筛层土壤分别转移至铝盒中，60 °C 烘干至恒重，称量烘干后各粒级团聚体质量，每个样品 3 次重复。对烘干后的各粒级团聚体研磨过筛，以测定各粒级团聚体的有机碳含量。

计算各粒级水稳性土壤团聚体百分比含量（ W_i ），公式^[18]为：

$$W_i(\%) = M_i / M \times 100 \quad (1)$$

式中， M_i 表示第 i 级团聚体的质量（g）； M 表示测定土壤团聚体的总质量（g）。

计算各土样平均重量直径（mean weight diameter, MWD ）和几何平均重量直径（geometric mean diameter, GWD ），公式^[19]为：

$$MWD(\text{mm}) = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i X_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2)$$

$$GWD(\text{mm}) = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n (W_i \ln X_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}\right) \quad (3)$$

式中， X_i 表示聚集在每个尺寸筛子的土壤团聚体平均直径（mm）； W_i 表示该粒径范围内土壤团聚体的百分比含量（%）； n 表示分离出的团聚体份数； i 表示第 i 个团聚体。

计算各粒级土壤水稳性团聚体有机碳贡献率 Y ，公式^[20]为：

$$Y(\%) = \frac{C_i}{C_w} W_i \times 100 \quad (4)$$

式中， C_i 表示该粒级团聚体中有机碳含量（g/kg）； C_w 表示土壤中有机碳含量（g/kg）； W_i 为该粒级团聚体含量（%）。

1.3.3 土壤容重 采用环刀法^[21]测定土壤容重，用容积为 100 cm³ 的环刀在取样点分层取原状土样，每小区取样土层依次为 0~10、10~20 和 20~30 cm，3 次重复。

1.3.4 土壤水分含量 采用铝盒烘干称重法^[21]测定土壤水分含量，用土钻按取样土层取土样，分装到铝盒中，就地称量，3 次重复，带回实验室烘干后进行称量计算。

1.3.5 产量及其构成因素 于玉米成熟期，随机从每个大区选取 3 个样点，从每个样点中间选取 2 行（长 5 m），收获全部果穗，对株数和果穗数进行计数，测量果穗行数、行粒数和百粒重，采用 PM8818 水分测定仪（北京和信昌科技发展有限公司）测定其含水量，折算出实际产量。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013 软件对试验数据进行整理，采用 SPSS 29.0 软件进行方差分析，采用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同年限免耕秸秆覆盖还田的土壤容重和含水量

如表 1 所示，各处理土壤容重随土层加深而增大。在 0~10 cm 土层，与 CK 处理相比，T2 和 T3 处理土壤容重显著降低，T1 处理差异不显著，T3、T2 和 T1 处理降低幅度分别为 17.29%、6.01% 和 0.75%；在 10~20 cm 土层，与 CK 处理相比，T3 处理容重显著降低 13.10%，T1 处理升高 3.45%；在 20~30 cm 土层，与 CK 处理相比，T3、T2 和 T1

处理容重降低幅度分别为 9.80%、5.88%和 0.65%。各处理不同土层土壤含水量表现为 T3>T2>T1>

表 1 不同年限免耕秸秆覆盖还田下土壤容重和含水量的变化
Table 1 Changes of soil bulk density and moisture content under no-tillage with straw mulching and returning over different years

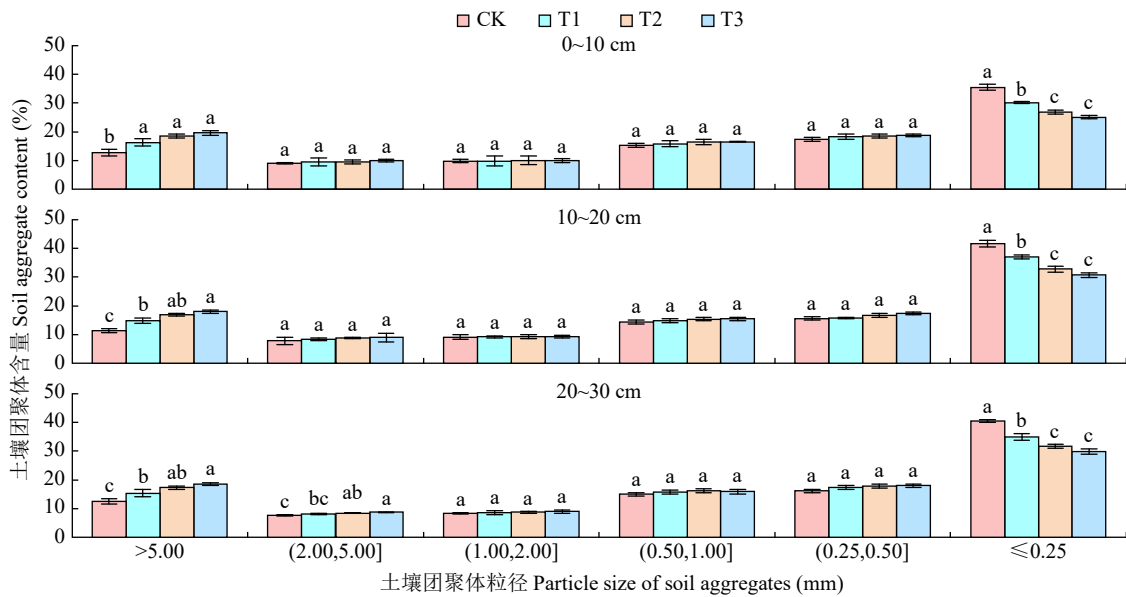
土层深度 Soil depth (cm)	处理 Treatment	容重 Bulk density (g/cm ³)	含水量 Moisture content (%)
0~10	CK	1.33±0.10a	12.01±0.27d
	T1	1.32±0.03a	14.54±0.10c
	T2	1.25±0.02b	17.19±1.01b
	T3	1.10±0.02c	24.16±0.46a
10~20	CK	1.45±0.02a	8.56±0.35c
	T1	1.50±0.02a	11.98±0.28b
	T2	1.42±0.04a	13.85±0.07b
	T3	1.26±0.01b	17.62±1.21a
20~30	CK	1.53±0.01a	6.48±0.31c
	T1	1.52±0.01a	10.14±0.40b
	T2	1.44±0.04b	12.44±0.65a
	T3	1.38±0.01b	13.70±0.12a

不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)，下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$), the same below.

CK，含水量随土层加深而降低。在 0~10 cm 土层，与 CK 处理相比，T3、T2 和 T1 处理增幅分别为 101.16%、43.13%和 21.06%。在 0~10 cm 土层，各处理含水量较 10~20 cm 土层升高了 21.36%~40.30%；在 20~30 cm 土层，各处理含水量明显低于 0~20 cm 土层。

2.2 不同年限免耕秸秆覆盖还田的各粒级土壤水稳性团聚体含量

由图 1 可知，在 0~10 cm 土层，与 CK 处理相比，T3、T2 和 T1 处理明显提高了 >0.25 mm 粒级水稳性团聚体含量，平均增幅分别为 16.08%、13.20%和 8.18%。在 10~20 cm 土层，T3 处理 >0.25 mm 粒级团聚体含量最高，较 CK 处理升高了 18.63%；与 CK 处理相比，各处理 >0.25 mm 粒级团聚体含量均有所升高。与 10~20 cm 土层相比，20~30 cm 土层各处理 >0.25 mm 粒级团聚体含量有所提高；且各处理间均以 T3 处理最高，与 T2、T1 和 CK 处理相比平均增幅分别为 2.61%、7.81%和 17.71%。在 0~30 cm 土层，CK 处理 ≤0.25 mm 粒级小团聚体含量显著高于 T3 和 T2 处理，平均增



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，下同。
Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$), the same below.

图 1 不同年限免耕秸秆覆盖还田下各粒级土壤团聚体含量分布的变化
Fig.1 Changes of soil aggregate content distribution in different particle size fractions under no-tillage with straw mulching and returning over different years

幅分别为 37.18%和 27.22%。

2.3 不同年限免耕秸秆覆盖还田的各粒级团聚体有机碳含量

各处理土壤团聚体有机碳含量随土层的加深

而降低 (表 2)。在 0~30 cm 土层，与 CK 处理相比，T3、T2 和 T1 处理团聚体有机碳含量均有所提升，以 T3 处理最高。与 CK 处理相比，T3 处理在 0~10、10~20 和 20~30 cm 土层增幅分别为 36.17%、

27.57%和 31.04%。在 0~30 cm 土层，各粒级团聚体有机碳含量由多到少依次为 >5.00、(2.00,5.00]、(1.00,2.00]、(0.50,1.00]、(0.25,0.50]和 ≤0.25 mm 粒级，且各处理团聚体有机碳含量均以 >5 mm 粒级为最高。在 0~10 cm 土层，T3、T2 和 T1 处理

>5 mm 粒级团聚体有机碳含量与 CK 处理相比，增幅分别为 24.57%、18.79%和 7.86%。在 10~20 cm 土层，T3 处理各粒级团聚体有机碳含量与 T2、T1 和 CK 处理相比增幅分别为 13.64%、17.90%和 29.01%。

表 2 不同年限免耕秸秆覆盖还田下各粒径团聚体中有机碳含量的变化
Table 2 Changes of organic carbon content in aggregates with different particle sizes under no-tillage with straw mulching and returning over different years

土层深度 Soil depth (cm)	处理 Treatment	粒径 Particle size (mm)					
		>5.00	(2.00,5.00]	(1.00,2.00]	(0.50,1.00]	(0.25,0.50]	≤0.25
0~10	CK	15.38±0.51b	14.27±0.32c	14.10±0.39b	11.86±0.50b	9.89±0.26c	9.57±0.43c
	T1	16.59±0.48b	15.98±0.69b	15.07±0.26b	15.30±1.07a	14.54±0.31b	13.14±0.50b
	T2	18.27±0.61a	16.80±0.31b	15.23±0.56b	15.21±0.31a	14.63±0.24b	13.64±0.52b
	T3	19.16±0.34a	18.59±0.55a	16.77±0.29a	16.34±0.53a	16.00±0.60a	15.37±0.48a
10~20	CK	12.63±0.46b	12.30±0.26b	10.84±0.50c	9.86±0.36c	9.75±0.32b	9.67±0.31b
	T1	13.14±0.31b	12.48±0.35b	12.47±0.12b	11.57±0.27b	10.94±0.18a	10.55±0.61ab
	T2	13.23±0.46b	13.22±0.35b	12.90±0.38b	11.84±0.46b	11.68±0.26a	11.26±0.52ab
	T3	16.05±0.48a	15.79±0.57a	14.28±0.43a	13.59±0.50a	11.74±0.52a	11.54±0.43a
20~30	CK	10.71±0.51c	10.67±0.47b	10.36±0.45b	9.40±0.27b	9.38±0.31a	9.03±0.35b
	T1	11.18±0.35bc	11.21±0.51b	11.10±0.70b	10.38±0.41b	9.51±0.43a	9.78±0.16ab
	T2	12.11±0.21b	11.39±0.47b	11.15±0.71b	11.21±0.92b	10.63±0.54a	10.04±0.23ab
	T3	15.02±0.42a	14.46±0.39a	13.90±0.35ab	13.16±0.47a	10.99±0.68a	10.51±0.48a

2.4 不同年限免耕秸秆覆盖还田的各粒级团聚体有机碳贡献率

在 0~30 cm 土层，各处理团聚体有机碳贡献率为 T3>T2>T1>CK (表 3)。在 0~10 cm 土层，T3 处理 >5.00 mm 和(0.25,0.50] mm 粒级团聚体有机碳贡献率显著高于 CK 处理，增幅分别为 31.81%和 21.16%。在 10~20 cm 土层，T3 处理 >0.25 mm 粒级团聚体有机碳贡献率高于 T2、T1 和 CK 处

理，增幅分别为 5.70%、10.65%和 21.88%。在 20~30 cm 土层，T3、T2 和 T1 处理 >0.25 mm 粒级团聚体有机碳贡献率与 CK 处理相比均有所增加，增幅分别为 25.65%、13.60%和 8.02%；T3 处理 >5.00 mm 团聚体有机碳贡献率增幅最高，与 CK 处理相比增幅为 63.21%。在 0~30 cm 土层，各处理 ≤0.25 mm 团聚体有机碳贡献率均为 CK>T1>T2>T3，处理间存在显著差异。

表 3 不同年限免耕秸秆覆盖还田下各粒级土壤团聚体的有机碳贡献率
Table 3 Contribution rate of organic carbon in soil aggregates of different particle sizes under no-tillage cover measures %

土层深度 Soil depth (cm)	处理 Treatment	粒径 Particle size (mm)					
		>5.00	(2.00,5.00]	(1.00,2.00]	(0.50,1.00]	(0.25,0.50]	≤0.25
0~10	CK	16.88±1.99b	11.16±0.45a	11.92±1.08a	15.52±0.89a	14.70±0.30b	29.03±1.84a
	T1	18.24±1.58ab	10.22±1.68a	9.98±1.59a	16.29±1.56a	17.92±0.95a	27.46±1.85ab
	T2	21.85±0.68a	10.37±0.93a	9.80±1.39a	16.11±0.42a	17.55±0.81a	23.68±0.77b
	T3	22.25±0.69a	10.94±0.57a	9.94±0.72a	15.92±0.33a	17.81±0.80a	22.81±0.92b
10~20	CK	13.60±0.86c	9.17±1.29a	9.46±1.04a	13.60±1.41a	14.48±1.13a	38.32±2.74a
	T1	17.12±1.35bc	9.13±0.63a	10.09±0.73a	14.95±0.76a	15.14±0.26a	34.22±2.35ab
	T2	18.54±0.57ab	9.67±0.77a	9.97±0.33a	15.13±0.81a	16.23±1.03a	30.61±1.78bc
	T3	21.67±1.65a	10.56±1.43a	10.07±0.75a	15.87±1.30a	15.34±0.88a	26.58±1.39c
20~30	CK	14.08±2.02c	8.45±0.23b	8.94±0.81a	14.60±1.04a	15.74±0.44a	37.89±2.60a
	T1	16.69±1.49bc	8.90±0.64b	9.24±0.70a	15.96±0.45a	15.98±0.47a	33.39±2.25ab
	T2	19.03±0.55ab	8.73±0.11b	8.87±0.75a	16.33±0.62a	17.26±1.77a	28.82±0.30bc
	T3	22.98±0.79a	10.57±0.61a	10.32±0.71a	17.39±1.22a	16.41±1.14a	25.97±1.61c

2.5 不同年限免耕秸秆覆盖还田对土壤 MWD 和 GMD 的影响

土壤团聚体的稳定性可用 MWD 和 GMD 指标表示, 大团聚体的含量占比越多, MWD 和 GMD 指标值越大, 土壤团聚体稳定性越高, 其中土壤表层 MWD 和 GMD 值较高(图 2)。在 0~10 cm 土层, 与 CK 处理相比, T3、T2 和 T1 处理 MWD 明显升高, 增幅分别为 26.08%、21.73%和 13.04%。在 10~20cm 土层, 各处理 MWD 较 0~10 cm 土层降低了 7.40%~11.29%; 且与 CK 处理相比, T3、T2 和 T1 处理的 MWD 显著升高, 增幅分别为 28.57%、23.80%和 14.28%。在 20~30 cm 土层, 各处理 MWD 较 10~20cm 土层升高了 1.25%~4.84%。各处理 GMD 值在 0.79~0.95, 在 0~10 cm 土层, 与 CK 处理相比, T3、T2 和 T1 处理 GMD 显著升高, 增幅分别为 13.09%、10.71%和 7.14%; 在 10~20 cm 土层, T3、

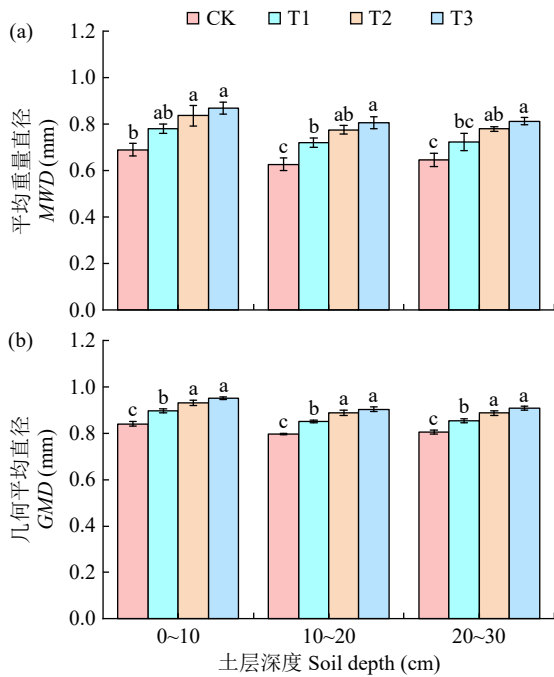


图 2 不同年限免耕秸秆覆盖还田下土壤 MWD 和 GMD 的变化

Fig.2 Changes of soil MWD and GMD under no-tillage with straw mulching and returning over different years

表 4 不同年限免耕秸秆覆盖还田下玉米产量及其构成因素

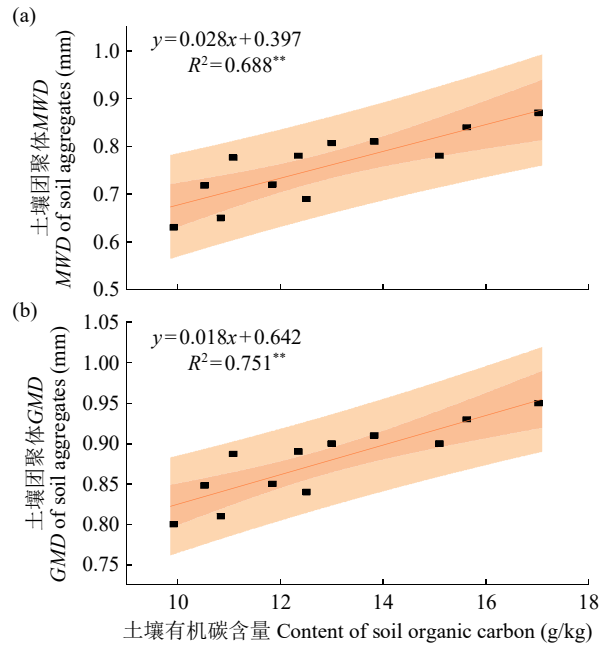
Table 4 Maize yield and its components under no-tillage with straw mulching and returning over different years

处理 Treatment	穗长 Ear length (cm)	穗行数 Kernel row number	行粒数 Grains per row	百粒重 100-grain weight (g)	含水量 Moisture content (%)	产量 Yield (kg/hm ²)
CK	18.35±0.24d	14.00±1.15a	31.00±1.52b	32.57±0.09a	29.80±0.18ab	10 183.45±292.62c
T1	19.41±0.34c	14.00±0.67a	36.00±2.00a	33.15±0.14a	30.27±0.29b	10 894.41±393.46bc
T2	20.41±0.22b	16.00±1.15a	34.00±1.52ab	33.39±0.04a	27.97±0.76a	11 921.39±536.32ab
T3	21.96±0.38a	16.00±1.15a	37.00±2.00a	33.44±0.19a	29.27±0.69ab	12 993.62±328.17a

T2 和 T1 处理较 CK 处理 GMD 升高了 12.50%、11.25%和 6.25%; 在 20~30 cm 土层, 与 CK 处理相比, 各处理 GMD 升高了 6.25%~13.75%。

2.6 土壤有机碳含量与 MWD 和 GMD 的线性相关性分析

由图 3 可知, 在本试验条件下, 土壤有机碳含量与团聚体 MWD 呈线性正相关关系, 达极显著 ($R^2=0.688$), 表明二者之间存在相互促进作用, 即土壤有机碳含量增加有利于 MWD 提高。土壤有机碳含量与 GMD 也呈线性正相关关系, 达极显著水平 ($R^2=0.751$), 表明二者之间相互促进, 有机碳含量增加利于 GMD 提高。



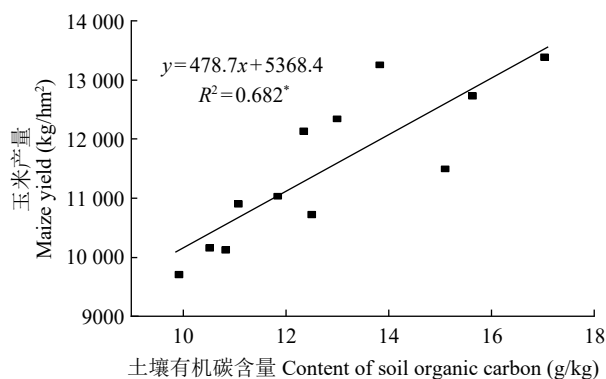
“**”表示在 $P < 0.01$ 水平极显著相关。
“**” indicates extremely significant correlation at $P < 0.01$ level.

图 3 土壤有机碳含量与 MWD 和 GMD 的相关性
Fig.3 Correlation between soil organic carbon content and MWD and GMD

2.7 不同年限免耕秸秆覆盖还田的玉米产量及其构成因素

如表 4 所示, 与 CK 处理相比, 各免耕覆盖处理对玉米产量及其构成因素有明显的促进作用。与

CK 处理相比，各免耕覆盖处理显著提高了穗长，但各处理的穗行数和百粒重差异不显著。T3 和 T1 处理的行粒数显著高于 CK 处理，T2 处理的含水量显著高于 T1 处理。与 CK 处理相比，T3、T2 和 T1 处理玉米产量增幅分别为 27.59%、17.06% 和 6.98%。土壤团聚体有机碳含量与玉米产量的关系如图 4 所示，二者之间的关系密切，存在显著相关关系 ($R^2=0.682$)，表明土壤有机碳含量增加有利于玉米增产。



“*”表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关。
 “**” indicates significant correlation at $P < 0.05$ level.

图 4 土壤有机碳含量与玉米产量相关性
 Fig.4 Correlation between soil organic carbon content and maize yield

3 讨论

3.1 免耕秸秆覆盖还田下的土壤容重和含水量

免耕秸秆覆盖能够极大程度减少土壤风蚀与地表扰动，玉米秸秆覆盖于土壤表层，可拦截太阳辐射，降低土壤水分流失，进而最大限度维持土壤含水量。此外，秸秆覆盖还田后在耕层表面腐解，可增加表层土壤有机质，改善土壤理化性状，降低土壤容重^[22]。本研究结果显示，相较于 CK 处理，7 年免耕覆盖还田处理可显著降低 0~30 cm 土壤容重，这与张兴义等^[23]的结论相似。可能由于长期免耕秸秆覆盖改善了土壤团聚结构，有利于土壤微生物数量增加，进而疏松土壤、降低土壤容重^[24]。但 Wang 等^[25]研究发现免耕秸秆覆盖会显著增加土壤容重；张贵云等^[26]研究表明，免耕秸秆覆盖能降低 0~10 cm 土层土壤容重，却提高了 10~20 cm 土层土壤容重，这可能与当地土壤类型差异有关。本研究发现，免耕秸秆覆盖还田可提高 0~20 cm 土层土壤含水量，与郑洪兵等^[27]的研究结果相似，说明免耕秸秆覆盖对表层土壤保水效果明显，能够增加土壤含水量，维持良好的土壤持水性。

3.2 免耕秸秆覆盖还田下土壤团聚体粒级的分布特征

土壤团聚结构是土壤肥力的物质基础，土壤团聚体稳定性是评价土壤质量的有效指标，其组成与稳定性直接影响土壤风蚀，同时，团聚体的组成与有机碳含量紧密相关，有机碳含量下降会造成土壤退化和风蚀^[28-29]。本研究结果显示，免耕秸秆覆盖还田提高了 0~30 cm 土层中大团聚体 (>0.25 mm) 粒径的占比，这与闫雷等^[30]的研究结果类似，良好的土壤团聚体结构有助于提升土壤肥力。不同年限的免耕覆盖还田对土壤大团聚体形成的作用存在差异，本研究发现还田时间越长，效果越明显，免耕秸秆覆盖还田时间为 3 年和 7 年时，0~30 cm 土层中 >5.00 mm 粒级团聚体含量显著增加，MWD 和 GMD 也得到提高，这与朱雪峰等^[31]的研究结果较为相似。且 MWD 和 GMD 随还田年限延长呈逐步上升趋势，这可能由于免耕措施仅对表层土壤部分土面产生一定的扰动，对土壤结构影响较小，有效减少了对土壤大团聚体结构的破坏。同时，秸秆还田改善了土壤中微生物的栖息环境，增加了微生物数量，微生物分解混入土层的秸秆，产生多糖等物质，促进土壤颗粒黏结，有利于 ≤ 0.25 mm 小团聚体向更大粒径转变，形成大团聚体，大团聚体含量越高，MWD 和 GMD 值越大^[32-33]。本研究发现，0~10 cm 土层的团聚体占比、MWD 和 GMD 均高于 10~30 cm 土层，这可能是由于秸秆覆盖在表层，腐解后养分直接输入表层土壤，有利于提高微生物活性，进而增加大团聚体数量；各处理则整体表现为 $T3 > T2 > T1 > CK$ ，表明长时间免耕覆盖还田处理比短时间处理能更长期稳定地促进土壤团聚体含量和稳定性的提升，且还田年限越长效果越佳。

3.3 免耕秸秆覆盖对团聚体有机碳积累和贡献率的影响

土壤有机碳含量与水稳性团粒结构的形成及稳定性紧密相关，免耕秸秆覆盖有助于大团聚体有机碳的积累^[34]。本研究中，大团聚体 (>0.25 mm) 的有机碳含量占比明显高于小团聚体 (≤ 0.25 mm)；0~10 cm 土层的有机碳含量明显高于 10~30 cm 土层，这与胡宁等^[35]的研究结果相似。这可能由于免耕秸秆覆盖措施最大程度降低了对土壤的扰动，显著增加了表层土壤大团聚体含量，进而大幅提高了土壤表层有机碳储量，但对深层土壤有机碳含量的影响较小^[36]。不同粒径土壤团聚体的有机碳贮存规

律存在差异, Cheng 等^[37]研究发现有机碳含量随团聚体粒径增大而增加, 而李景等^[38]则表明并非团聚体粒径越大越有利于土壤有机碳固存。本研究中, 各处理下团聚体有机碳含量主要集中在 $>5\text{ mm}$ 粒级, 较 $\leq 0.25\text{ mm}$ 粒级提高了 29.36%。土壤团聚体有机碳贡献率由团聚体百分比含量和该团聚体有机碳含量共同决定。与不还田处理 (CK) 相比, T3 处理通过增加 $>5\text{ mm}$ 团聚体的百分比含量, 提高了 $>5\text{ mm}$ 粒级的有机碳贡献率, 同时降低了 $\leq 0.25\text{ mm}$ 粒级的有机碳贡献率。

3.4 不同年限免耕秸秆覆盖还田对玉米产量的影响

研究^[39-40]发现, 覆盖还田可增加土壤有机碳含量及其他营养物质, 显著提升大团聚体的比例与稳定性, 为作物生长提供充足养料。本研究结果显示, 与 CK 处理相比, T3 处理下玉米产量显著增加, 增幅达 27.59%, 表明玉米产量随免耕秸秆覆盖还田时间的延长而增加。这可能由于免耕秸秆覆盖还田通过改善作物的光合性能, 提高了土壤水分利用效率, 为根系生长提供了丰富养分, 增加了玉米根系生长所需的营养物质, 进而促进玉米根系生长、数量增多以及分布空间扩大, 最终提高了玉米产量^[41-42]。

4 结论

免耕结合秸秆覆盖还田措施可显著降低表层土壤容重、提升土壤含水量, 且秸秆覆盖还田时间越长效果越好。免耕覆盖可提高 $>0.25\text{ mm}$ 各粒级水稳性团聚体的百分比含量, 促进土壤团聚体的形成与稳定, 提高团聚体有机碳含量及其贡献率, 增强土壤 *MWD* 和 *GMD* 的稳定性。与旋耕垄作相比, 各处理均能提高玉米产量, 7 年免耕覆盖还田处理提升幅度最大。综上, 免耕秸秆覆盖还田措施可有效改良土壤质量, 对玉米增产具有积极作用, 且玉米产量随免耕覆盖还田时间延长而增加。

参考文献

- [1] 李胜龙, 李和平, 林艺, 等. 东北地区不同耕作方式农田土壤风蚀特征. 水土保持学报, 2019, 33(4): 110-118, 220.
- [2] Zhu G Y, Shangguan Z P, Deng L. Variations in soil aggregate stability due to land use changes from agricultural land on the Loess Plateau, China. *Catena*, 2021, 200: 105181.
- [3] 付鑫, 王俊, 刘全全, 等. 不同覆盖材料及旱作方式土壤团聚体和有机碳含量的变化. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1423-1430.
- [4] 薛斌, 黄丽, 鲁剑巍, 等. 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.
- [5] Paul B K, Vanlauwe B, Ayuke F, et al. Medium-term impact of tillage and residue management on soil aggregate stability, soil carbon and crop productivity. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 164: 14-22.
- [6] González-Rosado M, Parras-Alcántara L, Aguilera-Huertas J, et al. Effects of land management change on soil aggregates and organic carbon in Mediterranean olive groves. *Catena*, 2020, 195: 104840.
- [7] 李柏桥, 付玉, 李光录, 等. 退耕年限与方式对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响. 干旱地区农业研究, 2017, 35(3): 238-244.
- [8] Assi A T, Blake J, Mohtar R H, et al. Soil Aggregates structure-based approach for quantifying the field capacity, permanent wilting point and available water capacity. *Irrigation Science*, 2019, 37(4): 511-522.
- [9] 王永栋, 武均, 蔡立群, 等. 秸秆还田量对陇中旱作麦田土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响. 干旱地区农业研究, 2022, 40(2): 232-239, 249.
- [10] 周明星, 代子俊, 樊军, 等. 免耕结合覆盖措施对渭北旱塬黑垆土结构与团聚体有机碳含量的影响. 中国农业科学, 2023, 56(12): 2329-2340.
- [11] Du Z L, Ren T, Hu C S, et al. Soil aggregate stability and aggregate-associated carbon under different tillage systems in the North China Plain. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(11): 2114-2123.
- [12] Hati K M, Chaudhary R S, Mandal K G, et al. Effects of tillage, residue and fertilizer nitrogen on crop yields, and soil physical properties under soybean-wheat rotation in Vertisols of Central India. *Agricultural Research*, 2015, 4(1): 48-56.
- [13] Zhang Y J, Tan C J, Wang R, et al. Conservation tillage rotation enhanced soil structure and soil nutrients in long-term dryland agriculture. *European Journal of Agronomy*, 2021, 131: 126379.
- [14] 李涵, 张鹏, 贾志宽, 等. 渭北旱塬区秸秆覆盖还田对土壤团聚体特征的影响. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 27-33.
- [15] 蔡太义, 黄耀威, 黄会娟, 等. 不同年限免耕秸秆覆盖对土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响. 生态学杂志, 2011, 30(9): 1962-1968.
- [16] Wang H X, Sun H X, Han Q F, et al. Effects of straw mulching on the soil aggregates in dryland wheat field under no-tillage. *The Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(4): 1025-1030.
- [17] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627.
- [18] 张鹏, 周泉, 黄国勤. 冬季不同种植模式对稻田土壤团聚体及其有机碳的影响. 核农学报, 2019, 33(12): 2430-2438.
- [19] 王兴, 祁剑英, 井震寰, 等. 长期保护性耕作对稻田土壤团聚体稳定性和碳氮含量的影响. 农业工程学报, 2019, 35(24): 121-128.
- [20] 马守义, 谢丽华, 朱广石. 黑土地保护性耕作技术的思考. 玉米科学, 2018, 26(1): 116-119.
- [21] 刘洋. 多年不同耕作措施及秸秆还田对土壤理化特性的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [22] 马晓明, 李丹, 雷佳, 等. 不同降水年型下耕作方式结合覆盖对旱地土壤物理性质和马铃薯产量的影响. 应用生态学报, 2024, 35(2): 447-456.
- [23] 张兴义, 李健宇, 郭孟洁, 等. 连续 14 年黑土坡耕地秸秆覆盖免耕水土保持效应. 水土保持学报, 2022, 36(3): 44-50.
- [24] 郭孟洁, 李建业, 李健宇, 等. 实施 16 年保护性耕作下黑土土壤结构功能变化特征. 农业工程学报, 2021, 37(22):

- 108-118.
- [25] Wang Q J, Zhang J T, Gai Z J, et al. Effect of long-term straw mulching and no-tillage on physical properties of meadow soil in cold region. *The Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(9): 2943-2948.
- [26] 张贵云, 吕贝贝, 张丽萍, 等. 黄土高原旱地麦田 26 年免耕覆盖对土壤肥力及原核微生物群落多样性的影响. *中国生态农业学报*, 2019, 27(3): 358-368.
- [27] 郑洪兵, 罗洋, 隋鹏祥, 等. 秸秆还田对东北黑土水分特征及物理性质的影响. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(1): 226-236.
- [28] 谢世兴, 刘雪玲, 刘晨, 等. 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. *中国土壤与肥料*, 2024(6): 1-10.
- [29] 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. *Catena*, 2021, 199: 105106.
- [30] 闫雷, 董天浩, 喇乐鹏, 等. 免耕和秸秆还田对东北黑土区土壤团聚体组成及有机碳含量的影响. *农业工程学报*, 2020, 36(22): 181-188.
- [31] 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. *应用生态学报*, 2021, 32(8): 2685-2692.
- [32] 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. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4639-4648.
- [33] Zhou M, Yang X, Zhang X Y, et al. Fifteen years of conservation tillage increases soil aggregate stability by altering the contents and chemical composition of organic carbon fractions in Mollisols. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(15): 2932-2944.
- [34] 高洪军, 彭畅, 张秀芝, 等. 不同秸秆还田模式对黑钙土团聚体特征的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(1): 75-79.
- [35] 胡宁, 娄翼来, 梁雷. 保护性耕作对土壤有机碳、氮储量的影响. *生态环境学报*, 2010, 19(1): 223-226.
- [36] 徐艺萍, 饶越悦, 孟艳, 等. 免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta 分析. *环境科学*, 2024, 45(2): 952-960.
- [37] Cheng Y H, Wu L, Sun H J, et al. Effects of straw mulching and vetiver grass hedgerows on the size distribution of the soil water stable aggregates and aggregate-associated organic carbon in red soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(12): 3518-3524.
- [38] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期免耕和深松提高了土壤团聚体颗粒态有机碳及全氮含量. *中国农业科学*, 2021, 54(2): 334-344.
- [39] 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. *Journal of Environmental Management*, 2021, 288: 112391.
- [40] 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. *农业工程学报*, 2021, 37(1): 133-140.
- [41] 鲁悦, 鲍雪莲, 霍海南, 等. 免耕条件下不同量秸秆覆盖还田提高东北黑土区玉米光合性能和产量的效应. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(5): 840-847.
- [42] 马永财, 滕达, 衣淑娟, 等. 秸秆覆盖还田及腐解率对土壤湿度与玉米产量的影响. *农业机械学报*, 2021, 52(10): 90-99.

Effects of No-tillage with Straw Mulching on Soil Aggregate Stability and Maize Yield in Semi-Arid Region

Ma Xiaoming¹, Qi Xiangkun¹, Tan Xue¹, Shi Mengyu¹, Wang Yufeng^{1,2}, Fu Jian^{1,2}, Yang Kejun^{1,2}

(¹College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, Heilongjiang, China;

²Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Cultivation Techniques and Crop Germplasm Improvement, Daqing 163319, Heilongjiang, China)

Abstract To address the issues of soil structure deterioration, decreased organic carbon content, and low maize yield caused by soil wind erosion in semi-arid aeolian sandy regions, a long-term field positioning experiment was conducted in Durbod Mongolian Autonomous County, Heilongjiang Province. Four treatments were established: rotary tillage with ridging (CK), no-tillage with straw mulching for one year (T1), continuous no-tillage with straw mulching for three years (T2), and continuous no-tillage with straw mulching for seven years (T3). The effects of each treatment on soil aggregate distribution characteristics, organic carbon accumulation, and maize yield across different soil layers were analyzed. The results showed that in the 0-30 cm soil layer, compared with the other treatments, the T3 treatment significantly reduced soil bulk density and significantly increased soil moisture content. Meanwhile, the T3 treatment enhanced the percentage of >0.25 mm water-stable aggregates, the organic carbon content, and the contribution rate within these aggregates, while also increasing the mean weight diameter and geometric mean diameter. No-tillage with straw mulching significantly increased maize yield, with the increase ranging from 14.98% to 39.54% compared with the CK treatment. In summary, no-tillage combined with straw mulching helps improve soil aggregate stability, the organic carbon content of aggregates across all size classes, and maize yield in semi-arid areas, with the T3 treatment yielding the best results.

Key words Maize; No-tillage with straw mulching; Soil aggregate; Organic carbon; Mean weight diameter; Geometric mean diameter; Yield