

DOI: 10.11766/trxb202203230129

王钰皓, 庞津雯, 卫婷, 高飞, 刘恩科, 贾志宽, 张鹏. 旱作农田覆膜和秸秆碳投入对土壤团聚特性及作物产量的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(1): 272–284.

WANG Yuhao, PANG Jinwen, WEI Ting, GAO Fei, LIU Enke, JIA Zhikuan, ZHANG Peng. Coupled Effects of Film Mulching and Straw-derived Carbon Inputs on Soil Aggregate Characteristics and Crop Yields in Semiarid Areas[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(1): 272–284.

# 旱作农田覆膜和秸秆碳投入对土壤团聚特性及作物产量的影响\*

王钰皓<sup>1, 2</sup>, 庞津雯<sup>1, 2</sup>, 卫婷<sup>1, 2</sup>, 高飞<sup>3</sup>, 刘恩科<sup>4</sup>, 贾志宽<sup>1, 2</sup>,  
张鹏<sup>1, 2†</sup>

(1. 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 甘肃省耕地质量建设保护总站, 兰州 730020; 4. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

**摘要:** 研究秸秆还田形式对旱作覆膜农田土壤团聚特性、有机碳含量及玉米产量的影响, 为优化覆膜耕作措施, 实现旱作覆膜农田可持续性生产提供理论依据。以长期定位旱作玉米覆膜农田(始于 2012 年)为研究对象, 设置双垄沟覆膜(P)和传统平作(T), 分别施加秸秆(S)和生物质炭(C), 以不还田为对照(N), 共形成 6 个处理: 覆膜秸秆还田(PS)、覆膜生物质炭还田(PC)、覆膜不还田(PN)、平作秸秆还田(TS)、平作生物质炭还田(TC)和平作不还田(TN)。测定土壤团聚体组成及团聚体有机碳含量, 并分析了双垄沟覆膜和不同秸秆碳投入对土壤有机碳含量、团聚体稳定性及玉米产量的影响。研究表明, 各秸秆还田处理较不还田处理均可显著( $P < 0.05$ )改善各粒级团聚体分布及其稳定性, 其中  $> 0.25$  mm 团聚体含量平均显著( $P < 0.05$ )提高 47.32%, 各双垄沟覆膜处理 MWD 和 GMD 较平作处理分别平均提高 9.19% 和 4.15%; 各还田处理可显著( $P < 0.05$ )提高 0~60 cm 土层土壤有机碳含量, 其中 PC 和 TC 处理分别较对应 PS 和 TS 处理土壤有机碳含量提高 2.60% 和 2.73%; 各处理团聚体有机碳含量均随粒径增大而增大, 秸秆碳投入可显著( $P < 0.05$ )提高各粒级团聚体有机碳含量, 而双垄沟覆膜处理则降低了土壤有机碳及团聚体有机碳含量; 还田方式、种植方式及土壤有机碳对玉米产量有促进作用, 施加秸秆及生物质炭均能显著( $P < 0.05$ )提高旱作覆膜农田玉米产量, 平均提高 14.6%, 而秸秆直接还田处理与生物质炭还田处理的增产效果无显著差异。综合分析, 在双垄沟覆膜条件下投入秸秆碳能够明显提高土壤稳定性、土壤有机碳含量和作物产量, 其中, 双垄沟覆膜与生物质炭还田的耦合效应对改善农田土壤质量及地力提升有积极作用。

**关键词:** 双垄沟覆膜; 土壤团聚特性; 有机碳; 玉米产量; 秸秆碳投入

**中图分类号:** S513 **文献标志码:** A

\* 国家重点研究计划项目(2021YFE0101302), 国家自然科学基金项目(31801314, 31901475), 中国博士后科学基金特别资助项目(2019T120951)资助。Supported by the National Key Scientific Research Projects of China (No.2021YFE0101302), the National Natural Science Foundation of China (Nos.31901475, 31801314), the Postdoctoral Science Foundation Funded Project (No.2019T120951)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: pengzhang121@nwfufu.edu.cn

作者简介: 王钰皓, 男, 硕士研究生, 主要从事玉米高效栽培理论与技术研究。E-mail: wangyuhao@nwfufu.edu.cn

收稿日期: 2022-03-23; 收到修改稿日期: 2022-09-11; 网络首发日期(www.cnki.net): 2023-01-04

## Coupled Effects of Film Mulching and Straw-derived Carbon Inputs on Soil Aggregate Characteristics and Crop Yields in Semiarid Areas

WANG Yuhao<sup>1,2</sup>, PANG Jinwen<sup>1,2</sup>, WEI Ting<sup>1,2</sup>, GAO Fei<sup>3</sup>, LIU Enke<sup>4</sup>, JIA Zhikuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Peng<sup>1,2†</sup>

(1. College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Farming in Northwest Loess Plateau, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Gansu Cultivated Land Quality Construction and Protection Station, Lanzhou 730020, China; 4. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** 【Objectives】 This study aimed to provide a scientific basis for optimizing appropriate film mulching practices to improve productivity and protect the environment in dryland farming. 【Methods】 A complete random two-factor field experiment was conducted in Pengyang, Ningxia Province to investigate the coupled effects of mulching (started in 2012) with different straw-derived carbon inputs on the soil aggregate characteristics, organic carbon content, and maize yield. Specifically, the mulching method was the main factor and the straw return form was the sub-factor. Six treatments were established as follows: straw return with film mulching (PS), biochar return with film mulching (PC), no-return with film mulching, straw return without mulching (TS), biochar return without mulching (TC), and no return without mulching. 【Results】 The results indicated that each straw and biochar return treatment significantly ( $P < 0.05$ ) improved the soil aggregate distribution and stability of each particle size, and the aggregate content  $> 0.25$  mm increased significantly ( $P < 0.05$ ) by 47.32% on average. Compared with the no-mulching treatment, the mean weight diameter and geometric mean diameter of the soil particles increased by 9.19% and 4.15%, respectively, under the double ridge-furrow mulching treatments. The organic carbon content of the 0-60 cm soil layer increased significantly ( $P < 0.05$ ) under each straw and biochar return treatment compared with the no-return treatments, where the contents were 2.60% and 2.73% higher under PC and TC than PS and TS, respectively. The aggregate organic carbon contents under each treatment increased as the aggregate particle size increased. Also, the straw and biochar return treatments significantly increased the organic carbon content of aggregates, whereas the contents decreased under double ridge-furrow mulching treatments. Structural equation modeling showed that the straw return form, mulching method, and soil organic carbon content could significantly promote yield increases, while the straw and biochar return treatments significantly increased ( $P < 0.05$ ) the corn yield in film-mulched fields by 14.6% on average. However, the yield increase did not differ significantly between the straw return treatments and biochar return treatments. 【Conclusion】 In conclusion, double ridge-furrow mulching and straw carbon input treatments significantly improved the soil stability, soil organic carbon content, crop yield, and the coupled effect of the double ridge-furrow mulching and biochar return had a positive effect on improving the farmland soil quality and fertility.

**Key words:** Double ridge-furrow mulching; Soil aggregate characteristics; Soil organic carbon; Maize yield; Straw/biochar return

我国北方旱作区受干旱缺水和土壤供肥不足等资源条件限制<sup>[1]</sup>, 作物产量长期低而不稳<sup>[2]</sup>。近年来大面积使用的地膜覆盖栽培措施在增产的同时导致作物秸秆的大量移除<sup>[3]</sup>, 减少了有机物料的投入, 使进入土壤的碳源减少, 致使农田土壤结构与养分退化, 影响作物生长<sup>[4]</sup>。因此, 改进现有地膜栽培措施, 提升旱作覆膜农田土壤肥力、缓解覆膜导致的土壤质量退化对旱作覆膜农田生产可持续性具有重要意义<sup>[5]</sup>。

土壤有机碳作为表征土壤质量的重要指标<sup>[6]</sup>, 直接影响并决定着土壤结构及其肥力状况。大量研究表明, 作物秸秆作为粮田土壤最重要的有机肥源,

还田后具有明显的增碳、固碳作用<sup>[7-8]</sup>, 是提高土壤肥力及稳定生产力极为有效的途径<sup>[9-10]</sup>。Yu 等<sup>[11]</sup>的研究指出, 长期秸秆还田可显著提高土壤有机碳含量, 平均增幅达 23.9%。张明伟等<sup>[12]</sup>研究也表明, 秸秆还田在提高土壤有机碳含量的同时可显著提高农田土壤团聚体含量及其稳定性。然而也有研究指出, 秸秆直接还田可能会腐熟不充分, 在土壤中积累一定的酸性产物, 进而影响作物的出苗及生产力<sup>[13]</sup>, 因而将秸秆炭化后加以利用已逐渐成为重要的农艺措施。秸秆炭化后变成一类高度芳香化、稳定性高的富碳有机物料, 施入田间可明显改善农田土壤理

化性质,有效固持土壤养分,为作物生长提供良好环境<sup>[14]</sup>。Liu 等<sup>[15]</sup>在稻田中研究发现,施加秸秆碳通过促进土壤有机碳的积累,提高有机碳的利用率来改善土壤肥力状况,显著增加了作物产量。Agbede 和 Adekiya<sup>[16]</sup>的研究也发现,生物炭还田可通过提高土壤耕层团聚体的稳定性,改善土壤结构,使作物产量增加 40%以上。然而 Liu 和 Zhang<sup>[17]</sup>关于砂壤土的研究却发现,施加生物质炭对土壤团聚体的形成和稳定性均无显著影响。Wang 等<sup>[18]</sup>的研究也表明,添加生物质炭会促进砂质土壤有机碳矿化,从而降低土壤有机碳含量。

秸秆碳投入对农田土壤地力的影响与不同土壤类型及气候特点有关,然而目前对于旱作农田下不同秸秆碳投入对土壤结构及作物产量的研究较少,尤其针对旱作区长期覆膜农田的研究更是鲜有报道。因此,本研究以开始于 2012 年的长期定位旱作玉米双垄沟覆膜农田为研究对象,以传统平作不覆盖为对照,研究长期地膜覆盖下不同秸秆碳投入(秸秆直接还田和秸秆炭化还田)对农田土壤有机碳、团聚体组成及稳定性特征的影响,并结合玉米产量变化,探究不同形式秸秆碳投入对旱作覆膜农田土壤结构、肥力及作物生产力的影响,从而为实现旱作覆膜农田农业生产可持续发展提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验在宁夏回族自治区固原市彭阳县长城村(106°48'E, 35°52'N, 海拔 1 658 m)进行(图 1)。该地区属典型黄土高原丘陵地貌,年均降雨量约 430 mm(图 2),其中 70%的降雨集中在 7—9 月份,年平均气温 8.0℃,年平均日照时数 2 518 h,年蒸发量 1 753 mm,干燥度(≥0℃的蒸发量)为 1.21~1.99,无霜期 140~160 d,土壤类型为黄绵土。试验开始时(2012 年)0~60 cm 层土壤有机碳含量为 6.22 g·kg<sup>-1</sup>,全氮为 1.19 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮为 63.6 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷为 12.6 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾为 161.2 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

本研究为双因素随机区组试验,因素 1 为 2 种不同的种植模式:双垄沟地膜覆盖(P)、传统平作无覆膜(T);因素 2 为各种种植模式下分别施加秸秆(S)、施加生物质炭(C)、不施加(N)。共形成 6 个处理:覆膜施加秸秆(PS)、覆膜施加生物质炭(PC)、覆膜不施加(PN)、无覆膜施加秸秆(TS)、无覆膜不施加生物质炭(TC)、无覆膜施加秸秆(TN)。试验在 2012 年设置的双垄沟覆膜处理基础上,于 2019 年起每年在玉米收获后进行秸秆及生物质炭还田。

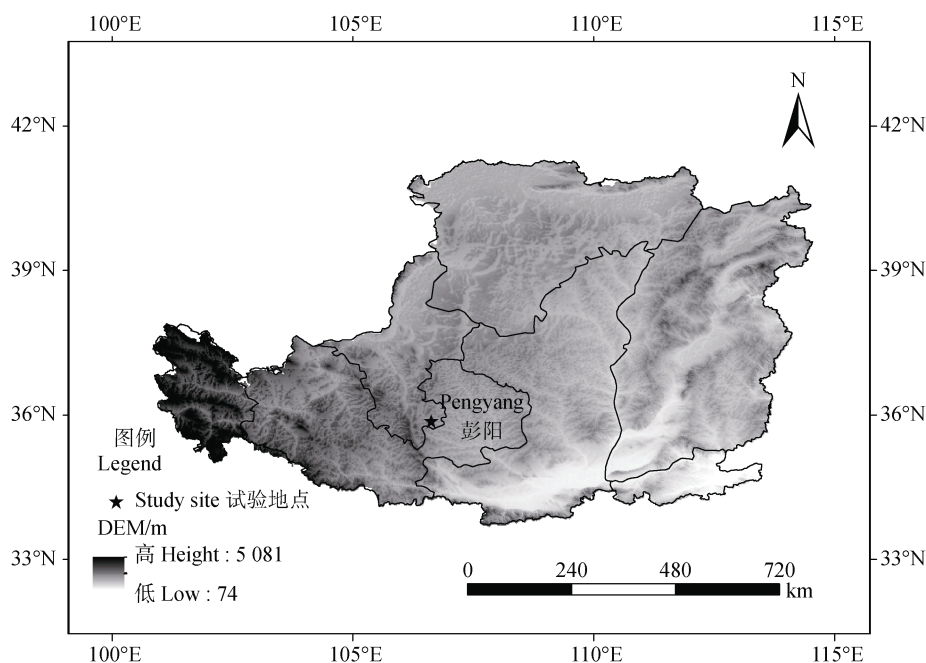


图 1 试验地位置

Fig. 1 Experimental site

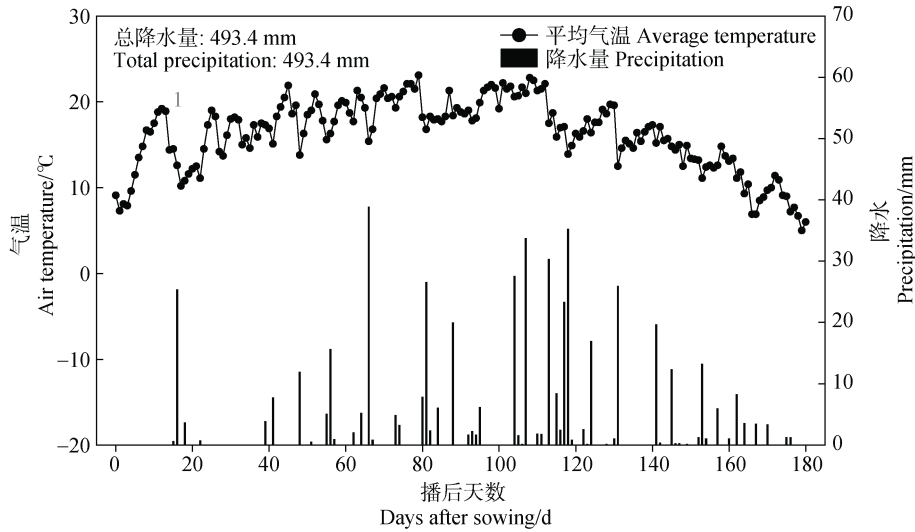


图2 2020年玉米生育期降水和日平均气温

Fig. 2 Precipitation and daily average temperature during the maize growth period of 2022

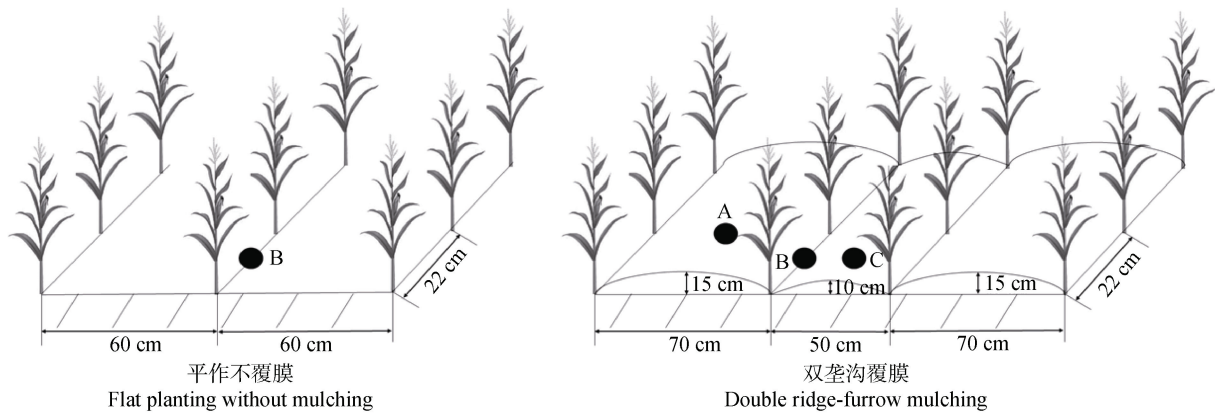
基于秸秆全量还田原则(每1 kg 秸秆可产生0.5 kg 生物质炭), 秸秆直接还田处理秸秆施加量为 $9\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 生物质炭还田处理生物质炭施加量为 $4\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 其中秸秆和生物质炭的有机碳含量分别为36%和40%。各小区重复3次, 小区面积为 $21\text{ m}^2$  ( $3\times 7\text{ m}$ ), 小区间设置1m宽隔离带, 防止小区间互相影响。

春玉米品种为大丰30, 播种密度为 $75\,000\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $60\text{ cm}\times 25\text{ cm}$ ), 用鹰嘴播种(施肥)器人工播种, 播种深度为4~5 cm。播种时各处理用人工鹰嘴播种(施肥)器施用基肥( $\text{N}\,140\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $\text{P}_2\text{O}_5\,150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 玉米播种后69~75 d后在玉米株间进行追肥( $\text{N}\,140\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 施肥深度为4~

5 cm, 全生育期不灌水。试验期间所有处理未发生病虫害, 并根据情况进行人工除草。

### 1.3 测定项目及方法

**1.3.1 土壤样品** 于2020年10月玉米收获后利用五点法采集各试验小区0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm和40~60 cm土层原状土样(约1500 g), 其中, 平作处理于玉米株间取样, 双垄沟覆膜处理于大垄上、株间、小垄上分别取样并均匀混合作为一个重复(图3), 取样后将土壤样品沿土壤结构的自然剖面轻轻地用手掰成直径1 cm左右的土块, 并避免受到机械压力, 去除植物残体和石块, 于避光处风干备用。



注: A、B、C 分别表示大垄、株间、小垄的不同采样位置。Note: A, B and C indicate the different sampling locations on large ridges, inter-plant and small ridges, respectively.

图3 不同处理取样示意图

Fig. 3 Schematics of the different treatments sampling

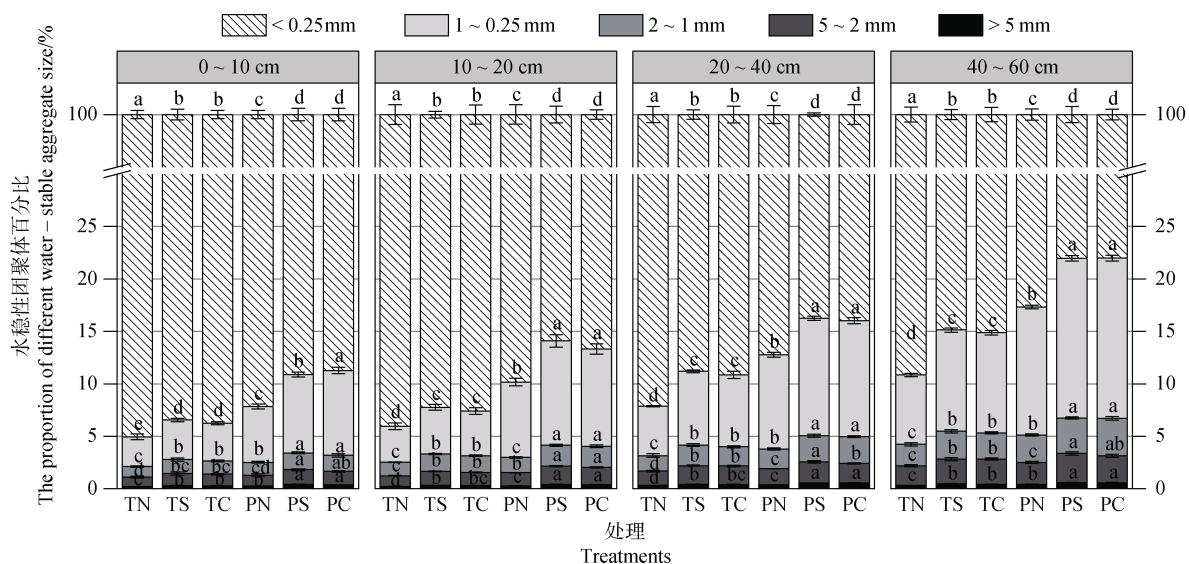
**1.3.2 土壤水稳性团聚体的测定** 使用的套筛筛孔直径分别为 5、2、1、0.25 mm。称取风干土样 100 g 置于筛内，套筛放在沉降筒内蒸馏水中浸润 5 min 后，以 30 次·min<sup>-1</sup> 速度、上下 30 mm 的振幅在水中振荡 2 min，再将套筛取出，把不同孔径筛内的团聚体冲洗至烧杯中；获得 >5 mm、5~2 mm、2~1 mm、1~0.25 mm 和 <0.25 mm 粒径的团聚体。将盛有各级团聚体的烧杯置于烘箱内 50℃ 烘干后，称重，计算可得各粒级团聚体的百分含量。在此过程中，遇有悬浮秸秆残体使用滤网捞出<sup>[19]</sup>。将分离的各粒级土壤团聚体磨碎后过 100 目筛，采用高温外加热重铬酸钾氧化容量法测定土壤有机碳及各粒级团聚体有机碳的含量<sup>[20]</sup>。

**1.3.3 团聚体平均质量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 和 >0.25 mm 团聚体含量 ( $R_{0.25}$ ) 的计算** 利用 MWD 平均质量直径 (mm)、几何平均直径 (GMD) 和 >0.25 mm 团聚体含量 ( $R_{0.25}$ ) 表征团聚体稳定性。

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n w_i \log \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (2)$$

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



注：图中误差棒为标准误差，不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。Note: Different letters indicate significant differences at  $P < 0.05$ .

图 4 覆膜和不同秸秆碳投入下土壤水稳性团聚体分布

Fig. 4 Distribution of water-stable aggregate size under film mulching and different straw-derived carbons inputs

式中， $X_i$  为第  $i$  个筛子上团聚体的平均直径， $W_i$  为第  $i$  个筛子上团聚体质量百分比。其中，>5 mm 筛上的团聚体平均直径采用 7.5 mm。 $R_{0.25}$  为粒径 >0.25 mm 团聚体含量 (%)， $M_{r>0.25}$  为粒径 >0.25 mm 团聚体质量 (g)， $M_T$  为团聚体的总质量 (g)。

#### 1.4 数据分析

采用单因素方差分析法 (IBM SPSS Statistics) 分析处理之间的差异 (显著差异在 95% 的置信水平下确定)，当检测到显著性时 ( $P < 0.05$  水平)，使用最小显著差异法 (LSD) 进行多重比较。利用 Amos 软件作结构方程模型 (SEM) 模拟种植方式、还田方式、团聚体组成、有机碳和玉米产量的关系，基于结构方程，构建种植、还田方式—团聚体组成及有机碳—土壤有机碳和产量之间的驱动与耦合模型，通过构建初始模型、检查模型、模型修改核对预测变量进行参数化，最终获得最佳结构方程模型。Origin 2022b 软件进行绘图。

## 2 结果

### 2.1 土壤团聚体粒级分布

在 0~60 cm 土层，各处理 >5、5~2、2~1 和 1~0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量均随土层加深不断增加，而 <0.25 mm 土壤水稳性团聚体则不断减少 (图 4)。与不还田处理 (TN 和 PN) 相比，各还田

处理均可显著 ( $P < 0.05$ ) 提高  $>0.25$  mm 土壤水稳性团聚体含量,  $>5$ 、 $5\sim 2$ 、 $2\sim 1$ 、 $1\sim 0.25$  mm 粒级分别平均提高 42.77%、27.95%、30.72%和 33.40%, 且双垄沟覆膜处理增幅均显著 ( $P < 0.05$ ) 高于不覆膜处理, 其中  $>5$ 、 $5\sim 2$ 、 $2\sim 1$  和  $1\sim 0.25$  mm 水稳性团聚体含量平均分别提高 32.31%、15.36%、27.80%和 81.55%, 各双垄沟覆膜处理间 PS 和 PC 处理均显著 ( $P < 0.05$ ) 高于 PN 处理,  $>5$ 、 $5\sim 2$ 、 $2\sim 1$  和  $1\sim 0.25$  mm 粒级分别平均显著 ( $P < 0.05$ ) 提高 45.45%、28.58%、33.94%和 29.96%, PS 和 PC 处理间均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

## 2.2 土壤团聚体稳定性特征

方差分析表明, 种植方式和秸秆碳投入均能显

著 ( $P < 0.05$ ) 影响土壤水稳性团聚体稳定性 (表 1), 但两者交互效应不显著。各处理土壤水稳性团聚体平均质量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD) 均随土层加深显著增大 ( $P < 0.05$ ), 而种植方式、还田形式和土层三者间交互作用不显著 (表 1)。与不还田处理 (TN 和 PN) 相比, 各还田处理均可提高 MWD 和 GMD, 平均分别提高 9.19%和 4.15%, 且各双垄沟覆膜处理 MWD 和 GMD 较对应不覆膜处理平均显著 ( $P < 0.05$ ) 提高 9.53%和 6.43%, 各双垄沟覆膜处理间 PS 和 PC 均显著 ( $P < 0.05$ ) 高于 PN, 其中 MWD 分别提高 10.88%和 9.52%, GMD 平均分别提高 4.24%和 4.24%, PS 和 PC 处理间在各土层均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

表 1 覆膜和不同秸秆碳投入下土壤团聚体平均质量直径和几何平均直径变化

Table 1 The mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) under film mulching and different straw-derived carbons inputs

指标 Items	处理 Treatments	土层 Soil layer/cm				方差分析 F 值及因素显著性	
		0~10	10~20	20~40	40~60	ANOVA F-value and significance of factors	
平均质量直径 Mean weight diameter/mm	TN	0.31b	0.32b	0.35b	0.38c	因素 A	84.00 **
	TS	0.33b	0.35b	0.38ab	0.42b	因素 B	32.93 **
	TC	0.33b	0.34b	0.37b	0.42b	因素 C	102.98 **
	PN	0.33ab	0.35b	0.37b	0.42b	A × B	1.00 ns
	PS	0.36a	0.39a	0.41a	0.47a	A × C	0.71 ns
	PC	0.36a	0.38a	0.41a	0.46a	B × C A × B × C	0.44 ns 0.23 ns
几何平均直径 Geometric mean diameter/mm	TN	0.27b	0.27b	0.28b	0.29b	因素 A	49.66 **
	TS	0.28b	0.28ab	0.29ab	0.31ab	因素 B	8.41 **
	TC	0.27b	0.28ab	0.29ab	0.31b	因素 C	28.83 **
	PN	0.28ab	0.29ab	0.30ab	0.31ab	A × B	0.50 ns
	PS	0.29a	0.30a	0.31a	0.33a	A × C	0.87 ns
	PC	0.29a	0.30a	0.31ab	0.33a	B × C A × B × C	0.50 ns 0.12 ns

注: 表中因素 A、B、C 分别代表种植方式、秸秆还田形式和土层深度, 同列不同字母表示差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), \*代表显著 ( $P < 0.05$ ), \*\*代表极显著 ( $P < 0.01$ ), ns 代表无显著性。Note: A represents planting mode, B represents returning form, and C represents soil layers in the table, Different letters indicate significant differences at  $P < 0.05$ , \* represents the significance ( $P < 0.05$ ), \*\* represents the extremely significant ( $P < 0.01$ ), and ns represents no significance.

种植方式及还田形式均能显著影响  $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量 ( $R_{0.25}$ ), 但两者交互作用不显著 (表 2)。各处理  $R_{0.25}$  随土层加深显著 ( $P < 0.05$ ) 增大, 且同秸秆还田形式显著相关。各还田处理  $R_{0.25}$  显著 ( $P < 0.05$ ) 高于对应不还田处理, 平均提高 32.46%, 各秸秆直接还田处理 (TS、PS) 要略高于

生物质炭还田 (TC、PC), 平均仅提高 1.86%; 各双垄沟覆膜处理  $R_{0.25}$  较对应无覆膜处理平均显著提高 61.87% ( $P < 0.05$ ), 各双垄沟覆膜处理间 PS 和 PC 处理在各土层均显著 ( $P < 0.05$ ) 高于 PN 处理, 分别平均提高 31.44%和 30.17%, 而 PS 和 PC 处理间均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

表 2 覆膜和不同秸秆碳投入下 >0.25 mm 土壤团聚体含量 ( $R_{0.25}$ ) 变化

Table 2 The &gt;0.25 mm soil aggregate contents under film mulching and different straw-derived carbons inputs

处理 Treatments	土层 Soil layer /cm			
	0~10	10~20	20~40	40~60
TN	4.96d	5.95c	7.86d	10.84d
TS	6.56c	7.77c	11.2bc	15.13c
TC	6.24c	7.40c	10.86c	14.87c
PN	7.84b	10.16b	12.77b	17.32b
PS	10.89a	14.10a	16.25a	21.97a
PC	11.27a	13.33a	16.02a	21.98a
方差分析 F 值及因素显著性 ANOVA F-value and significance of factors	因素 A	622.44 **	A×B	2.97 ns
	因素 B	96.34 **	A×C	6.96 ns
	因素 C	336.71 **	B×C	2.18 **
			A×B×C	0.56 ns

注: 表中因素 A、B、C 分别代表种植方式、秸秆还田形式和土层深度, 同列不同字母表示差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), \*代表显著 ( $P < 0.05$ ), \*\*代表极显著 ( $P < 0.01$ ), ns 代表无显著性。Note: A represents planting mode, B represents straw returning form, and C represents soil layers in the table, different letters indicate significant differences at  $P < 0.05$ , \* represents the significance ( $P < 0.05$ ), \*\* represents the extremely significant ( $P < 0.01$ ), and ns represents no significance.

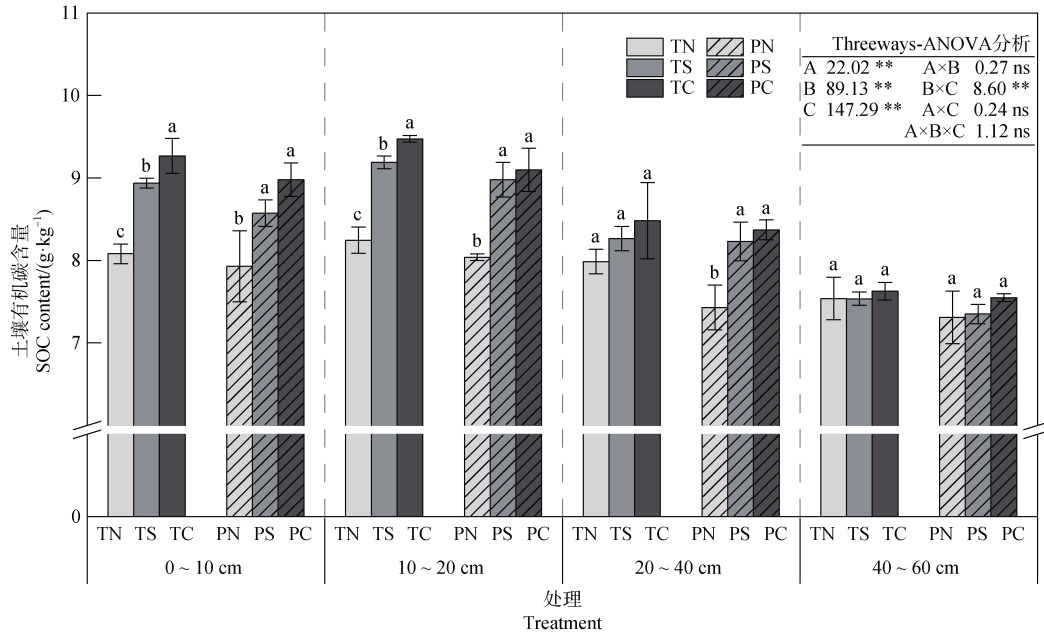
### 2.3 土壤总有机碳含量

玉米收获后各处理 0~60 cm 土层土壤有机碳含量的变化范围为 7.31~9.47 g·kg<sup>-1</sup>, 各处理有机碳含量均在 10~20 cm 土层最大 (图 5)。方差分析表明, 种植方式、秸秆还田形式及土层深度均能显著 ( $P < 0.05$ ) 影响土壤有机碳含量, 但仅土层深度与秸秆还田形式存在显著交互效应。与不还田处理 (TN 和 PN) 相比, 各还田处理土壤有机碳含量平均显著 ( $P < 0.05$ ) 提高 8.62%, 其中, 各生物质炭还田处理 (TC、PC) 增幅大于秸秆直接还田处理 (TS、PS), 平均提高 2.67%。各双垄沟覆膜处理均低于对应不覆膜处理, 在耕层 0~10 和 10~20 cm 土层分别平均显著降低 3.16% 和 3.04%, 而随着土层加深, 在 20~40 和 40~60 cm 无显著差异; 双垄沟覆膜处理间在各土层变化趋势类似, PS 和 PC 处理土壤有机碳含量均显著 ( $P < 0.05$ ) 高于 PN 处理, 分别平均提高 7.89% 和 10.70%, 而 PS 和 PC 处理间在各土层间均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

### 2.4 土壤水稳性团聚体有机碳含量

在 0~60 cm 各土层, 各处理土壤水稳性团聚体有机碳含量均随粒径增大而不断增加, 其中 >5 mm 粒径团聚体有机碳含量最高, 平均为 12.25 g·kg<sup>-1</sup>,

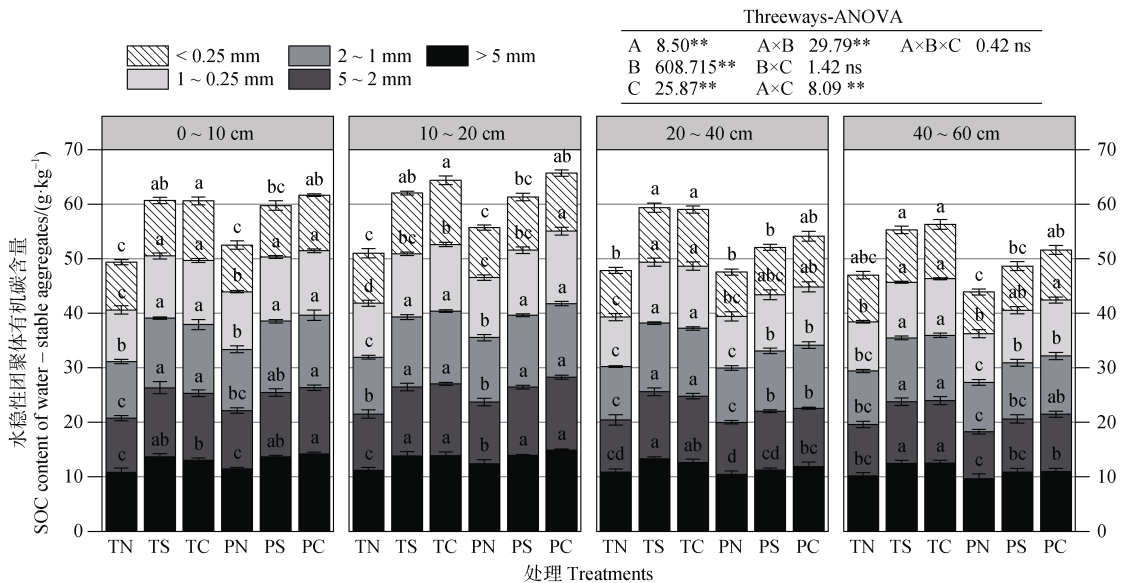
表明土壤有机碳主要富集在水稳性大团聚体中。方差分析表明, 种植方式、秸秆还田形式及土层深度均能显著 ( $P < 0.05$ ) 影响土壤水稳性团聚体有机碳含量, 其中, 种植方式与秸秆还田形式、土层深度均存在显著交互效应 (图 6)。在耕层 (0~20 cm), 各还田处理均可显著 ( $P < 0.05$ ) 提高各粒级土壤水稳性团聚体有机碳含量, >5、5~2、2~1、1~0.25 和 <0.25 mm 粒级分别平均提高 21.11%、19.00%、19.26%、16.91% 和 18.13%; 与不覆膜处理相比, 双垄沟覆膜处理 >5、5~2、2~1 和 1~0.25 mm 粒级土壤水稳性团聚体有机碳含量平均提高 5.39%、1.15%、5.20% 和 6.09%, 其中, PS 和 PC 处理各粒径团聚体有机碳含量均显著 ( $P < 0.05$ ) 高于 PN 处理, 分别平均提高 12.97% 和 13.27%, 而 PS 和 PC 处理间均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。随着土层加深, 在 20~60 cm 土层, 与不还田处理 (TN 和 PN) 相比, 各还田处理 >5、5~2、2~1、1~0.25 和 <0.25 mm 土壤水稳性团聚体有机碳含量分别平均显著 ( $P < 0.05$ ) 提高 14.14%、16.42%、16.60%、12.89% 和 12.72%, 而双垄沟覆膜处理土壤水稳性团聚体有机碳含量显著 ( $P < 0.05$ ) 低于不覆膜处理, 其中各粒径分别平均降低 10.64%、10.57%、8.91%、3.41%



注：图中误差棒为标准误差，不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )，多因素方差分析中数字为 F 值，A 代表种植方式，B 代表还田形式，C 代表土层深度，\*代表显著 ( $P < 0.05$ )，\*\*代表极显著 ( $P < 0.01$ )，NS 代表无显著性。Note: Different letters indicate significant differences at  $P < 0.05$ , The number is the F-value, A represents planting mode, B represents returning form, and C represents soil layers in the multivariate analysis of variance, \* represents the significance ( $P < 0.05$ ), \*\* represents the extremely significant ( $P < 0.01$ ), and NS represents no significance.

图 5 覆膜和不同秸秆碳投入下土壤有机碳含量变化

Fig. 5 Soil organic carbon contents under film mulching and different straw-derived carbons inputs



注：图中误差棒为标准误差，不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )，多因素方差分析中数字为 F 值，A 代表种植方式，B 代表还田形式，C 代表土层深度，\*代表显著 ( $P < 0.05$ )，\*\*代表极显著 ( $P < 0.01$ )，NS 代表无显著性。Note: Different letters indicate significant differences at  $P < 0.05$ , The number is the F-value, A represents planting mode, B represents returning form, and C represents soil layers in the multivariate analysis of variance, \* represents the significance ( $P < 0.05$ ), \*\* represents the extremely significant ( $P < 0.01$ ), and NS represents no significance.

图 6 覆膜和不同秸秆碳投入下水稳性团聚体有机碳含量

Fig. 6 Contents and distributions of organic carbon in water-stable aggregates under film mulching and different straw-derived carbons inputs



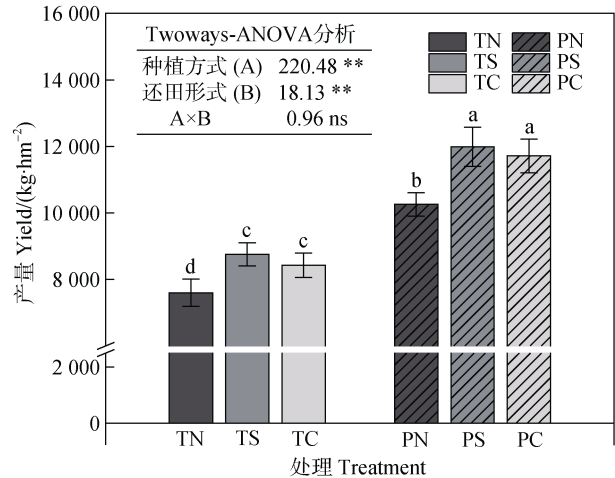
和 11.82%，双垄沟覆膜处理间各粒级大小顺序均为 PC>PS>PN，PC 和 PS 间均无显著差异 ( $P>0.05$ )。

### 2.5 玉米产量

由图 7 可知，种植方式和还田形式均可显著影响玉米产量，但两者间的交互作用不显著。各还田处理玉米产量均高于不还田处理，平均提高 14.6%；其中秸秆直接还田处理 (TS、PS) 增产效果好于生物质炭还田处理 (TC、PC)，平均增产 2.69%；与对应不覆膜处理相比，双垄沟覆膜处理玉米产量平均显著提高 37.06% ( $P<0.05$ )，各覆膜处理间 PS 和 PC 均显著 ( $P<0.05$ ) 高于 PN，平均分别提高 16.86% 和 14.21%。

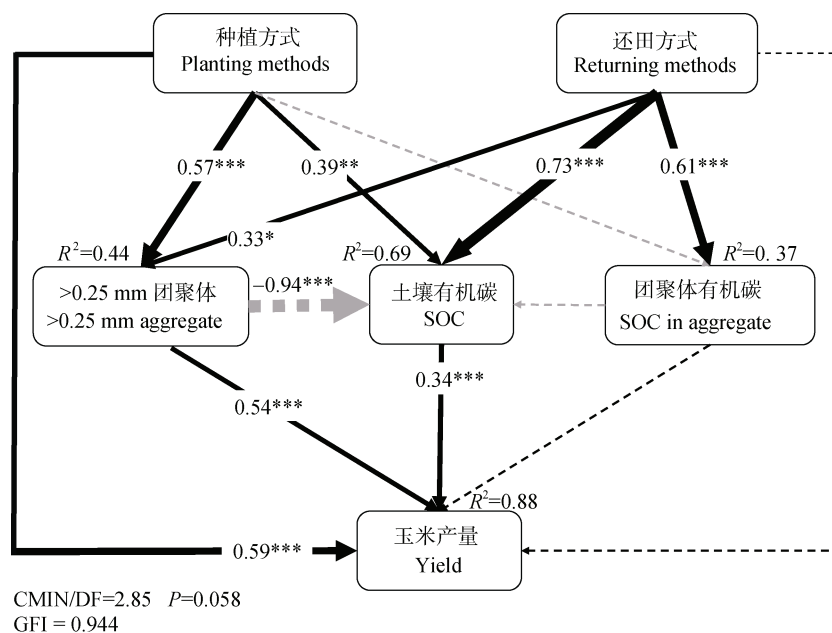
### 2.6 种植方式、还田方式、团聚体组成、有机碳和玉米产量间关系

该模型对玉米产量的总解释度 ( $R^2$ ) 为 0.88。模型结果显示，种植方式的直接作用可对土壤 >0.25 mm 团聚体、土壤有机碳和玉米产量产生显著的促进作用，而对土壤团聚体有机碳产生负影响；还田方式对 >0.25 mm 团聚体、土壤有机碳和团聚体有机碳有显著的促进作用；>0.25 mm 团聚体和土壤有机碳对玉米产量有显著促进作用 (图 8)。



注：图中误差棒为标准误差，不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )，多因素方差分析中数字为 F 值，A 代表种植方式，B 代表还田形式，\*代表显著 ( $P < 0.05$ ) \*\*代表极显著 ( $P < 0.01$ )，NS 代表无显著性。Note: Different letters indicate significant differences at  $P < 0.05$ , The number is the F-value, A represents planting mode, and B represents returning form, \* represents the significance ( $P < 0.05$ ), \*\* represents the extremely significant ( $P < 0.01$ ), and NS represents no significance.

图 7 覆膜和不同秸秆碳投入下玉米产量  
Fig. 7 Maize yields under film mulching and different straw-derived carbons inputs



注：CMIN/DF：卡方自由度比，GFI：拟合优度指数；线条上的路径为标准化路径系数 ( $\lambda$ )，线条的宽度与强度的关系成正比，黑色为正相关，灰色为负相关。Note: CMIN/DF: chi-square degree of freedom ratio, GFI: goodness of fit index; The path on the line is a standardized path coefficient ( $\lambda$ ), The relationship between the width and intensity of the line is proportional, black is positively correlated, grey is negatively correlated.

图 8 种植方式和还田方式对土壤有机碳和玉米产量 SEM 分析结果

Fig. 8 Results of structural equation model analysis on soil organic carbon and maize yield by planting and returning methods

### 3 讨 论

#### 3.1 覆膜和不同秸秆碳投入对土壤团聚体组成及稳定性的影响

土壤团聚体作为土壤养分的重要载体,是评价土壤肥力的重要指标<sup>[12]</sup>。大量研究表明,秸秆碳投入能够改善土壤团聚体组成及稳定性<sup>[3, 15]</sup>。本研究结果表明,与不还田处理相比,各秸秆和生物质炭还田均能提高 $>0.25\text{ mm}$ 土壤团聚体含量,并显著( $P<0.05$ )提高土壤团聚体的稳定性。Mohamed 等<sup>[21]</sup>的研究也得到相似的结果,这可能是由于秸秆还田降低了土壤容重,增加了土壤孔隙度及有机质含量,进而增强根系及土壤微生物的活动能力,有助于 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体的形成<sup>[22]</sup>,从而提高土壤结构的稳定性。本研究中秸秆还田处理对土壤 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量及稳定性的提高效果优于生物质炭还田。因为生物质炭是作物秸秆在高温条件下制备的惰性固体材料,具有高度羧酸酯化和稳定的芳香化结构,使其相较于秸秆难以被微生物分解利用,因此对 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体的结合能力相对较弱<sup>[23]</sup>。

本研究结果发现,双垄沟覆膜可显著( $P<0.05$ )提高土壤 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量。这可能是由于地膜覆盖降低了农田地面的蒸发,增加了土壤含水量<sup>[24]</sup>,降低了土壤的干湿交替作用,从而减少了对团聚体结构的破坏<sup>[25]</sup>。本研究结果还发现,双垄沟覆膜与秸秆碳投入的耦合效应能够进一步提高土壤结构的稳定性。因为双垄沟覆膜条件下投入秸秆碳既能增加外源有机物料投入,又能改善农田土壤水温状况,降低土壤容重的同时显著增强土壤微生物活性、促进作物根系的生长,进而促进 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体的形成并提高土壤团聚体稳定性<sup>[15, 22]</sup>。在本研究中双垄沟覆膜条件下秸秆还田对土壤 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量及稳定性的提高效果优于生物质炭还田,因为生物质炭丰富的孔隙结构有利于土壤毛细管孔隙中的闭蓄态空气随着水分的快速进入而被压缩,导致内部空气的扩散,进而破坏土壤团聚体结构<sup>[26]</sup>,从而降低了土壤的稳定性。

#### 3.2 覆膜和不同秸秆碳投入对土壤有机碳及团聚体有机碳的影响

大量研究发现,秸秆直接还田或炭化后还田均能促进土壤有机碳及团聚体有机碳积累<sup>[5, 15]</sup>。本研

究结果表明,各秸秆还田处理均能提高土壤有机碳及团聚体有机碳含量。这是因为秸秆还田后向农田输入了外源有机碳,提高土壤微生物活性的同时促进了秸秆中的碳在土壤中积累<sup>[27]</sup>,再者秸秆还田能够促进土壤团聚体的形成<sup>[28]</sup>,本研究中各秸秆还田处理显著提高了土壤大团聚体含量( $R_{0.25}$ ),而土壤有机碳的固定与土壤团聚过程密不可分<sup>[29]</sup>;另一方面,秸秆碳还田可促进富里酸和腐殖酸等土壤腐殖质以及土壤碳水化合物和芳烃等有机大分子的形成,从而提高土壤有机碳含量<sup>[30]</sup>。同时在本研究中,各生物质炭还田处理对土壤有机碳及团聚体有机碳含量的提高效果优于各秸秆还田处理。这可能是由于秸秆在土壤呼吸进行分解的过程中损失了大量新鲜易分解的碳,而生物质炭巨大的比表面积及孔隙结构能吸附土壤有机碳,对有机碳的生物活性有隔离或降低的作用,进而抑制土壤中被吸附的有机碳的分解,从而提高土壤有机碳及团聚体有机碳含量<sup>[31]</sup>。

本研究还发现,双垄沟覆膜处理的土壤有机碳含量均低于不覆膜处理,这与刘秀等<sup>[32]</sup>在辽宁褐土研究得到的结果相反。可能是由于旱作农田保温能力差,而双垄沟覆膜处理提高土壤温度的同时减少了雨水对土壤的直接拍打,疏松了土壤,进而使微生物活动旺盛<sup>[33]</sup>,从而加速土壤碳的矿化过程,不利于土壤有机碳积累<sup>[34]</sup>;同时,双垄沟覆膜处理的增温保墒作用可能会加速秸秆碳投入增加的外源有机物质的激发效应<sup>[35]</sup>,当激发效应的效果高于外源秸秆碳的积累,则可能会出现本研究中双垄沟覆膜条件下投入秸秆碳处理的土壤有机碳含量低于对应不覆膜处理(图5);Mo 等<sup>[36]</sup>通过整合分析数据发现,覆膜促进作物碳输入的同时,也显著提高了 $\text{CO}_2$ 的排放,促进了土壤有机碳的周转,因而并未增加土壤有机碳含量。研究还发现,表层土壤的土壤有机碳及团聚体有机碳含量显著高于深层。这可能由于土壤表层分布大量活力较强的作物根系分泌了大量的根系分泌物,促进了与碳代谢相关的酶及微生物的生长,从而有利于各碳库组分的分解转化<sup>[37]</sup>。

#### 3.3 覆膜和不同秸秆碳投入对玉米产量的影响

作物产量与土壤结构及质量之间具有密不可分的关系,良好的土壤结构及质量有利于作物及根系的生长,提高作物的养分利用率,从而提高作物产量<sup>[9, 38]</sup>。本研究结果表明,不同形式秸秆还田均能

显著提高玉米产量, 平均提高 14.6% ( $P < 0.05$ )。因为秸秆还田输入的大量营养物质改善了农田地力, 促进了农田土壤微生物及酶活性, 为作物生长提供了良好的环境, 从而增加了作物产量<sup>[39]</sup>。各还田处理中, 秸秆直接还田处理增幅大于生物质炭还田处理。可能是由于相较于生物质炭还田, 秸秆还田更能促进微生物产生胞外有机聚合物, 提高团聚体稳定性, 从而增加作物产量<sup>[40]</sup>。

相关研究表明, 覆膜能够通过改善农田土壤水热条件从而促进作物的生长, 进而提高作物产量<sup>[41]</sup>。本研究也发现, 与不覆膜处理相比, 双垄沟覆膜处理能显著 ( $P < 0.05$ ) 提高玉米产量 (平均提高 37.06%)。这是由于双垄沟覆膜处理能够保墒保温, 将水分贮存于土壤并集中入渗于作物根部, 具有明显的增产增效作用。双垄沟覆膜条件下投入秸秆碳能够显著提高玉米产量, 这可能是由于双垄沟覆膜与秸秆碳投入的耦合效应放大了双垄沟覆膜的保墒保温作用及秸秆碳投入的养分均衡供给作用, 优化的水热条件提高了养分的有效性, 进而提高了作物生产力<sup>[42-43]</sup>。同时, 因作物提高生产力而产生的秸秆与根系分泌物也随之增加, 这些有机物料归还土壤后进一步提高农田地力与土壤的可持续性<sup>[44]</sup>。但在旱作覆膜农田施入秸秆碳是否能够长期地提高土壤质量, 还需要未来长期试验的验证。

## 4 结 论

双垄沟覆膜和不同秸秆碳投入显著提高旱作覆膜农田土壤水稳性大团聚体含量及稳定性、土壤有机碳及团聚体有机碳含量, 且耕层 (0~20 cm) 效果较好, 同时生物质炭还田处理下土壤及团聚体有机碳含量略高于秸秆直接还田处理。秸秆碳投入可显著提高玉米产量, 且秸秆直接还田处理与生物质炭还田处理间增产效果差异不显著。综上, 在旱作双垄沟覆膜农田秸秆碳投入能够通过提高土壤有机碳含量和改善土壤结构稳定性实现作物增产, 尤其是生物质炭还田能够更好提升土壤地力, 维持旱作覆膜农田生产可持续性。

### 参考文献 (References)

[1] Zhang S L, Sadras V, Chen X P, et al. Water use efficiency of dryland wheat in the Loess Plateau in

response to soil and crop management[J]. *Field Crops Research*, 2013, 151: 9—18.

- [2] Zhao Y, Li M, Deng J Y, et al. Afforestation affects soil seed banks by altering soil properties and understory plants on the eastern Loess Plateau, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107670.
- [3] Wang B S, Yu W S, Wu X P, et al. Effect of straw addition on the formation of aggregates and accumulation of organic carbon in dryland soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52 (9): 1553—1563. [王碧胜, 于维水, 武雪萍, 等. 添加玉米秸秆对旱作土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52 (9): 1553—1563.]
- [4] Ren X L, Cai T, Chen X L, et al. Effect of rainfall concentration with different ridge widths on winter wheat production under semiarid climate[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 77: 20—27.
- [5] Xu X R, Schaeffer S, Sun Z H, et al. Carbon stabilization in aggregate fractions responds to straw input levels under varied soil fertility levels[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 199: 104593.
- [6] Chaudhary S, Dheri G S, Brar B S. Long-term effects of NPK fertilizers and organic manures on carbon stabilization and management index under rice-wheat cropping system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 166: 59—66.
- [7] Wang S C, Lu C G, Huai S C, et al. Straw burial depth and manure application affect the straw-C and N sequestration: Evidence from <sup>13</sup>C & <sup>15</sup>N-tracing[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 208: 104884.
- [8] Ma L J, Kong F X, Lü X B, et al. Responses of greenhouse gas emissions to different straw management methods with the same amount of carbon input in cotton field[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: 105126.
- [9] Islam M U, Guo Z C, Jiang F H, et al. Does straw return increase crop yield in the wheat-maize cropping system in China? A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2022, 279: 108447.
- [10] Li Y M, Duan Y, Wang G L, et al. Straw alters the soil organic carbon composition and microbial community under different tillage practices in a meadow soil in Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 208: 104879.
- [11] Yu Q G, Hu X, Ma J W, et al. Effects of long-term organic material applications on soil carbon and nitrogen fractions in paddy fields[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 196: 104483.
- [12] Zhang M W, Yang H S, Tai J C, et al. Effects of straw return and shallow drip irrigation on topsoil water-stable aggregates and carbon content in maize field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41 (5): 999—1008. [张明伟, 杨恒山, 邵继承, 等. 秸秆还田与浅埋滴灌

- 对玉米耕层土壤水稳性团聚体及其碳含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41 (5): 999—1008.]
- [ 13 ] Guo C L, Li N, Peng J, et al. Direct returning of maize straw or as biochar to the field triggers change in acidity and exchangeable capacity in soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24 (5): 1205—1213. [郭春雷, 李娜, 彭靖, 等. 秸秆直接还田及炭化还田对土壤酸度和交换性能的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (5): 1205—1213.]
- [ 14 ] Liang B Q, Lehmann J, Sohi S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. Organic Geochemistry, 2010, 41 (2): 206—213.
- [ 15 ] Liu J, Jiang B S, Shen J L, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar applications on soil carbon accumulation and nitrogen use efficiency in double-rice cropping systems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 311: 107286.
- [ 16 ] Agbede T M, Adekiya A O. Influence of biochar on soil physicochemical properties, erosion potential, and maize (*Zea mays* L.) grain yield under sandy soil condition[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2020, 51 (20): 2559—2568.
- [ 17 ] Liu X H, Zhang X C. Effect of biochar on pH of alkaline soils in the Loess Plateau: Results from incubation experiments[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2012, 14 (5): 745—750.
- [ 18 ] Wang J Y, Xiong Z Q, Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects[J]. GCB Bioenergy, 2016, 8 (3): 512—523.
- [ 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 ] Snyder J D, Trofymow J A. A rapid accurate wet oxidation diffusion procedure for determining organic and inorganic carbon in plant and soil samples[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1984, 15 (5): 587—597.
- [ 21 ] Mohamed I, Bassouny M A, Abbas M H H, et al. Rice straw application with different water regimes stimulate enzymes activity and improve aggregates and their organic carbon contents in a paddy soil[J]. Chemosphere, 2021, 274: 129971.
- [ 22 ] 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 and Tillage Research, 2009, 103 (2): 412—418.
- [ 23 ] Ke Y J, Hu X Y, Yi Q, et al. Impacts of rice straw biochar on organic carbon and CO<sub>2</sub> release in arable soil[J]. Environmental Science, 2014, 35 (1): 93—99. [柯跃进, 胡学玉, 易卿, 等. 水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO<sub>2</sub> 释放的影响[J]. 环境科学, 2014, 35 (1): 93—99.]
- [ 24 ] Li C J, Wang C J, Wen X X, et al. Ridge-furrow with plastic film mulching practice improves maize productivity and resource use efficiency under the wheat-maize double-cropping system in dry semi-humid areas[J]. Field Crops Research, 2017, 203: 201—211.
- [ 25 ] Park E J, Sul W J, Smucker A J M. Glucose additions to aggregates subjected to drying/wetting cycles promote carbon sequestration and aggregate stability[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39 (11): 2758—2768.
- [ 26 ] Grant C D, Dexter A R. Air entrapment and differential swelling as factors in the mellowing of molded soil during rapid wetting[J]. Soil Research, 1990, 28 (3): 361—369.
- [ 27 ] Guo R H, Jin H M, Chang Z Z, et al. Effects of returning patterns of straw to field on soil organic carbon and soil humus composition in rice-wheat double cropping systems[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36 (4): 727—733. [郭瑞华, 靳红梅, 常志州, 等. 秸秆还田模式对土壤有机碳及腐植酸含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36 (4): 727—733.]
- [ 28 ] Cao D Y, Lan Y, Sun Q, et al. Maize straw and its biochar affect phosphorus distribution in soil aggregates and are beneficial for improving phosphorus availability along the soil profile[J]. European Journal of Soil Science, 2021, 72 (5): 2165—2179.
- [ 29 ] Xu G X, Wang Z F, Gao M, et al. Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration[J]. Environmental Science, 2018, 39 (1): 355—362. [徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 环境科学, 2018, 39 (1): 355—362.]
- [ 30 ] Liu S H, Kong F L, Li Y, et al. Mineral-ions modified biochars enhance the stability of soil aggregate and soil carbon sequestration in a coastal wetland soil[J]. Catena, 2020, 193: 104618.
- [ 31 ] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43 (6): 1169—1179.
- [ 32 ] Liu X, Si P F, Zhang Z, et al. Effects of film mulching on soil aggregations and organic carbon contents in Northern dryland regions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 (21): 7870—7877. [刘秀, 司鹏飞, 张哲, 等. 地膜覆盖对北方旱地土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报, 2018, 38 (21): 7870—7877.]
- [ 33 ] Zhang J, Gao Y, Ren Y F, et al. Effects of ridge planting with film mulching for rainwater harvesting on soil microorganism and enzyme activities[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49 (5): 1103—1108. [张剑, 高宇, 任永峰, 等. 垄膜集雨种植对土壤微生物及酶活

- 性的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49 (5): 1103—1108.]
- [ 34 ] Mao H L, Wang J, Fu X, et al. Seasonal dynamics of soil organic carbon fractions under straw and plastic film mulching of spring maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26 (3): 347—356. [毛海兰, 王俊, 付鑫, 等. 秸秆和地膜覆盖条件下玉米农田土壤有机碳组分生长季动态[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26 (3): 347—356.]
- [ 35 ] Zhang Y Y, Mo F, Han J, et al. Research progress on the native soil carbon priming after straw addition[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (6): 1381—1392. [张叶叶, 莫非, 韩娟, 等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58 (6): 1381—1392.]
- [ 36 ] Mo F, Yu K L, Crowther T W, et al. How plastic mulching affects net primary productivity, soil C fluxes and organic carbon balance in dry agroecosystems in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 263: 121470.
- [ 37 ] Tong W J, Deng X P, Xu Z L, et al. Effect of plowing depth on soil physical characteristics and spatial distribution of root system of flue-cured tobacco[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24 (11): 1464—1472. [童文杰, 邓小鹏, 徐照丽, 等. 不同耕作深度对土壤物理性状及烤烟根系空间分布特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24 (11): 1464—1472.]
- [ 38 ] He L L, Zhao J, Yang S M, et al. Successive biochar amendment improves soil productivity and aggregate microstructure of a red soil in a five-year wheat-millet rotation pot trial[J]. Geoderma, 2020, 376: 114570.
- [ 39 ] Wang X J, Jia Z K, Liang L Y, et al. Changes in soil characteristics and maize yield under straw returning system in dryland farming[J]. Field Crops Research, 2018, 218: 11—17.
- [ 40 ] Zhang H J, Wang S J, Tian C J, et al. Effects of maize straw and its biochar on the dissolved organic matter characteristics of black soil in northeastern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35 (2): 243—250. [张海晶, 王少杰, 田春杰, 等. 玉米秸秆及其生物炭对东北黑土溶解有机质特性的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35 (2): 243—250.]
- [ 41 ] Lu X H, Li R P, Shi H B, et al. Successive simulations of soil water-heat-salt transport in one whole year of agriculture after different mulching treatments and autumn irrigation[J]. Geoderma, 2019, 344: 99-107.
- [ 42 ] Yang J, Mao X M, Wang K, et al. The coupled impact of plastic film mulching and deficit irrigation on soil water/heat transfer and water use efficiency of spring wheat in Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2018, 201: 232—245.
- [ 43 ] Xie J H, Li L L, Zhang R Z, et al. Effect of tillage system on rain-fed maize yield and soil physical characteristics for one film used two years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30 (3): 184—189, 195. [谢军红, 李玲玲, 张仁陟, 等. 一膜两年覆盖条件下耕作方法对旱作玉米产量及土壤物理性状的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30 (3): 184—189, 195.]
- [ 44 ] Yang F K, He B L, Zhang G P, et al. Impacts of different soil fertility improvement practices with film mulched ridge-furrow tillage on soil nutrient content, maize yield, and water use efficiency in Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30 (3): 893—905. [杨封科, 何宝林, 张国平, 等. 土壤培肥与覆膜垄作对土壤养分、玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30 (3): 893—905.]

(责任编辑: 檀满枝)