

# 长期深耕秸秆还田配施生物炭对砂姜黑土团聚体及小麦-玉米产量的影响

何家帅, 李新美, 魏跃鹏, 郭航兆, 杨康娜, 孙磊康, 李孝永,  
贾绪存, 李玉霞, 李荣发, 王群\*

(1. 河南农业大学农学院, 郑州 450046; 2. 河南省农田生态系统野外科学观测研究站, 西平 463900)

**摘要:** 为探究耕作方式、秸秆还田和生物炭添加结合对土壤团聚体粒径分布、团聚体养分特征、养分库储量及小麦-玉米周年产量的影响, 该研究采用3因素2水平试验设计, 分别为耕作方式: 常规旋耕(CT), 深翻耕作(DT); 秸秆处理: 秸秆还田(S)、秸秆不还田(NS); 生物炭: 生物炭添加(B)、无生物炭添加(NB), 共8个处理。结果表明: 无生物炭添加时, 旋耕秸秆还田提高了0~15 cm土层团聚体稳定性及土壤养分库储量, 而深耕秸秆还田改善了>15~30 cm土层土壤团粒组成, 提升土壤肥力, 促进作物增产。相关性分析表明, 砂姜黑土中作物产量的提升更依赖于深层(>15~30 cm)土壤物理结构的改善和土壤肥力的提升。配施生物炭后如DT-S-B(深耕秸秆还田配施生物炭)较CT-NS-NB(旋耕秸秆不还田无生物炭)处理使>15~30 cm土层团聚体稳定性增强, >2 mm粒级团聚体比例、重量平均直径和几何平均直径值分别增加165.88%、62.37%和119.81%, 提高了>2 mm粒级团聚体有机碳、全氮和全磷含量, 提高了>2 mm粒级团聚体有机碳和养分固持能力, 降低了<2 mm粒级团聚体有机碳和养分固持能力, 使>15~30 cm土层土壤有机碳库储量、全氮、全磷和全钾库储量分别提升了37.41%、38.99%、41.26%和9.84%, 使2a作物周年产量增加22.87%~23.03%。综上, 深耕秸秆还田配施生物炭能够改善黄淮海南部砂姜黑土深层土壤团聚体粒径分布和稳定性, 提升土壤肥力和作物周年产量, 保障农田高效绿色可持续生产。

**关键词:** 生物炭; 团聚体; 耕作; 秸秆还田; 养分固持; 黑土; 产量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202402001

中图分类号: S344

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-07-0161-11

何家帅, 李新美, 魏跃鹏, 等. 长期深耕秸秆还田配施生物炭对砂姜黑土团聚体及小麦-玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(7): 161-171. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202402001 <http://www.tcsae.org>

HE Jiashuai, LI Xinmei, WEI Yuepeng, et al. Effects of long-term deep tillage and straw return with biochar addition to lime concretion black soil on the aggregates and wheat-maize yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(7): 161-171. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202402001 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

黄淮海平原是中国的粮食主产区, 其土壤类型以潮土、砂姜黑土和褐土为主, 其中砂姜黑土面积约占河南省耕地面积的1/4。砂姜黑土富含黏粒, 具有涨缩性强、干时坚硬、湿时黏闭、难耕难耙和适耕期短的特点, 是典型的中低产田<sup>[1-2]</sup>。这与黄淮海地区光热水资源丰富等独特优势不匹配, 严重限制了作物生产的巨大潜力<sup>[3]</sup>。黄淮海区域多采用免耕或浅耕的耕作方式, 且不能合理利用作物秸秆, 导致耕层浅薄, 犁底层增厚变硬, 严重阻碍了作物产量的提高和农田的可持续发展<sup>[1,3]</sup>, 采用适

当的农田管理措施改善土壤结构, 增加土壤肥力, 进而提升黄淮海砂姜黑土地区作物产能是亟待解决的问题。

免耕作为一种保护性耕作被广泛应用于东北黑土区域<sup>[4]</sup>, 通过减少耕作对土壤团粒的破坏, 能够显著增加表层0~5 cm土壤粒径>0.25 mm团聚体含量, 提高团聚体几何平均直径和重量平均直径, 提升了土壤团聚体稳定性<sup>[5]</sup>。但免耕会导致深层土壤容重增加, 紧实度上升, 不利于作物根系的下扎, 并不适用黏重的砂姜黑土<sup>[3]</sup>。深翻能够通过物理作用直接打破犁底层, 改善深层土壤物理结构, 显著提高土壤团聚体稳定性, 促进产量提高<sup>[6]</sup>。而这存在着地域间差异, 韩上等<sup>[7]</sup>研究表明, 在砂姜黑土中直接深翻会大幅降低表层大团聚体和土壤有机质含量, 降低团聚体稳定性, 不利于作物产量的提升。秸秆中含有大量的有机质和氮磷钾等养分, 还田后在土壤中被迅速分解, 一方面能提供大量有机质作为团聚体间的胶结物质, 促进大团聚体的形成, 提升土壤稳定性; 另一方面其中的氮磷钾等养分能够促进土壤养分含量的提高, 为作物的生长提供充足的养分<sup>[8-9]</sup>。研究表明秸秆

收稿日期: 2024-02-01 修订日期: 2024-03-05

基金项目: 国家玉米产业技术体系专项(CARS-02-20); 河南省农田生态系统野外科学观测研究站(30602535)

作者简介: 何家帅, 研究方向为土壤改良与地力提升。

Email: [hejiashuai@stu.henau.edu.cn](mailto:hejiashuai@stu.henau.edu.cn)

\*通信作者: 王群, 博士, 教授, 研究方向为作物生理生态。

Email: [wangqun177@163.com](mailto:wangqun177@163.com)

还田能够显著增加土壤中 $>0.25$  mm 粒级团聚体含量和团聚体稳定性,同时提高了土壤团聚体的碳、氮含量,增加幅度与秸秆还田量成正比<sup>[8,10-11]</sup>。耕作与秸秆还田有机结合被认为是一种改善土壤结构和培肥地力的有效管理措施。研究表明免耕秸秆覆盖还田较传统耕作秸秆还田显著提高0~20 cm 土层 $>0.25$  mm 粒级团聚体质量比例及团聚体稳定性,增加表层土壤容重,降低土壤孔隙度<sup>[12]</sup>,而长期免耕秸秆覆盖还田存在表层土壤养分富集,土壤分层化严重的风险,同时大量秸秆覆盖在土壤表面容易滋生病虫害,不利于作物出苗生长。深耕秸秆还田通过将表层有机物质混合至犁深,增加了耕层厚度,显著提高20~30 cm 土层 $>0.25$  mm 粒级团聚体质量比例和团聚体稳定性,降低土壤容重,同时避免了养分在土壤表层集聚的风险,显著提升深层土壤肥力,促进根系发育和产量提高<sup>[13-14]</sup>。潮褐土中采用深耕秸秆还田提高了20~40 cm 土壤有机碳含量和土壤团聚体的有机碳、全氮含量,促进物质生产和产量提升<sup>[15]</sup>,砂姜黑土中同样发现类似结果,秸秆还田搭配深耕能够在显著改善土壤物理结构的同时提高土壤养分含量和碳库储量,进而提高作物产量<sup>[16]</sup>。但长期秸秆还田可能会由于激发效应导致土壤出现碳饱和现象,生物炭作为一种土壤改良剂或许可以在此基础上进一步提升土壤质量。在砂姜黑土中研究发现,生物炭作为外来碳源,能够直接增加土壤有机质含量,且其具有较大的比表面积和较强的吸附力,施入土壤后能够将微团聚体吸附团聚成大团聚体,从而增加土壤团聚体稳定性,改善土壤物理结构<sup>[17]</sup>。且生物炭与秸秆配施不仅能提高土壤大团聚体含量和团聚体稳定性,而且提高土壤和不同粒级团聚体的有机碳和全氮含量<sup>[18]</sup>。但深耕、秸秆还田和配施生物炭三者结合对于土壤团聚体和作物产量的影响尚不明确。

虽然大量研究表明耕作方式结合秸秆还田可以有效改良砂姜黑土,但黄淮海南部砂姜黑土区域由于长期采用小麦播前旋耕玉米免耕加秸秆还田的耕作模式<sup>[3]</sup>,目前仍存在耕层浅薄,土壤物理结构差,作物产量低等问题。因此,如何采取更有效的耕作措施或复合措施改善其土壤团聚体的结构组成和增加土壤肥力是砂姜黑土区农田的关注重点。目前,关于土壤团聚体的研究多偏重于耕作方式、秸秆还田及二者复合因素对团聚体粒径分布和碳氮组分的影响,而耕作方式、秸秆还田及生物炭添加3因素复合处理对团聚体有机碳、全氮、全磷和全钾分布特征及团聚体稳定性之间联系的研究仍不明确,尤其是对于砂姜黑土土壤团聚体的改良效果研究较少。因此本研究通过9a 定位试验探究耕作方式、秸秆还田和生物炭添加对砂姜黑土土壤团聚体粒径组成、稳定性、养分特征及作物产量的影响,探索适宜黄淮海南部区域改善砂姜黑土物理性质及提高土壤肥力的农田管理措施,以期为农田的高效绿色可持续生产提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 田间试验区域

于2014年在河南省农田生态系统野外科学观测研究站(驻马店西平,33°19'27" N, 114°01'36" E)开展长期定位试验,该研究站地处黄淮海平原南部,种植模式为冬小麦-夏玉米,一年两熟,年平均气温15℃,年平均降雨量846.1 mm。土壤类型为砂姜黑土,物理机械组成为砂粒18.60%、粉粒42.20%、黏粒39.20%。试验前,0~20 cm 土层土壤容重为1.41 g/cm<sup>3</sup>,含有有机质22.99 g/kg、全氮1.19 g/kg、速效磷20.12 mg/kg 和速效钾138.12 mg/kg。2022年6月—2023年11月的气温和降雨量见图1。

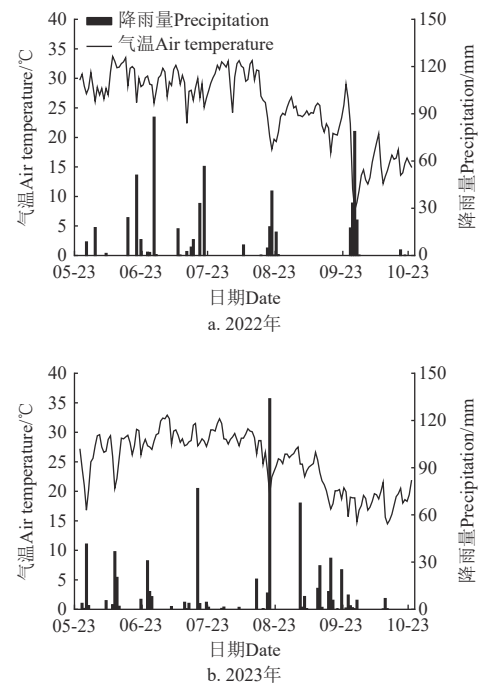


图1 2022—2023年夏玉米生育期气温和降雨量

Fig.1 Air temperature and precipitation during the summer maize growing period in the year of 2022 and 2023

### 1.2 长期定位试验设计与试验过程

采用3因素2水平试验设计,3因素主要包括耕作方式(常规旋耕CT,深翻耕作DT)、秸秆处理(秸秆还田S、秸秆不还田NS)、生物炭处理(生物炭添加B、无生物炭添加NB),共8个处理,每个处理设置3个重复小区,每个重复小区长33 m,宽5.4 m。

耕作处理与秸秆处理均开始于2014年,在每年冬小麦播种前进行试验处理,夏玉米季直接免耕播种。常规旋耕采用旋耕机进行旋耕,耕作深度约15 cm;深耕耕作采用铧式犁翻耕,耕作深度约35 cm。秸秆还田处理为两季作物秸秆全量还田,小麦秸秆还田量约为7 t/hm<sup>2</sup>,玉米秸秆还田量约为10 t/hm<sup>2</sup>;秸秆不还田处理是将冬小麦和夏玉米的地上部秸秆全部移出试验小区。生物炭处理从2020年开始,于每年冬小麦播种前将生物炭按照4.5 t/hm<sup>2</sup>的施用量均匀撒施在配施生物炭小区内,随后进行耕作处理;无生物炭添加处理不添加生物炭。

种植制度为小麦-玉米一年两熟制,小麦供试品种为

豫农 908，播种量为 165 kg/hm<sup>2</sup>，20 cm 等行距种植，于每年 10 月 15—25 日播种，第二年 6 月 2—5 日收获，小麦季施肥量分别为 225 kg/hm<sup>2</sup>（以 N 计）、150 kg/hm<sup>2</sup>（以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计）和 120 kg/hm<sup>2</sup>（以 K<sub>2</sub>O 计），其中 1/2 氮肥及全量磷钾肥作为底肥施入，1/2 氮肥于拔节期追施。玉米品种为中农大 678，种植密度为 75 000 株/hm<sup>2</sup>，等行距 60 cm 种植，于每年 6 月 10—15 日播种，当年 10 月 5 日收获，玉米季施肥量为 240 kg/hm<sup>2</sup>（以 N 计）、90 kg/hm<sup>2</sup>（以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计）和 120 kg/hm<sup>2</sup>（以 K<sub>2</sub>O 计），底肥以 1/3 氮肥和全量磷钾肥施入，2/3 氮肥在玉米大喇叭口期追施。灌溉方式采用滴灌水肥一体化，在小麦拔节期灌水 30 mm，孕穗期和灌浆期分别灌水 50 mm，玉米大喇叭口期、吐丝期和灌浆期分别灌水 40 mm，实际灌溉量随降雨进行调整，追施氮肥在对应时期通过水肥一体化同期施入。

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 土壤样品采集

2023 年于玉米吐丝期，每个试验小区按照 5 点取样法分别采集 0~15、>15~30 cm 土层原状土，置于取样盒，无扰动带回实验室于阴凉处自然风干后去除粗根和石块，沿土块自然缝隙掰成直径 8 mm 左右小块，作为测定团聚体及其养分的待测土样。

#### 1.3.2 土壤团聚体分布

土壤团聚体是土壤结构的关键组成部分，其粒径分布和稳定性影响着土壤养分的稳定性和固持能力<sup>[19-20]</sup>，而团聚体的几何平均直径（geometric mean diameter, GMD）、重量平均直径（mean weight diameter, MWD）和>0.25 mm 粒级团聚体比例是衡量团聚体分布和稳定性的重要指标<sup>[21]</sup>。采用湿筛法进行团聚体筛分<sup>[8]</sup>。称量 100 g 原状风干土样，在水中浸泡 10 min 后，放入套筛（粒径分别为 2、0.25 和 0.053 mm），将套筛置于盛水的水桶中上下震荡 10 min（30 次/min），上下振幅为 3 cm。筛分结束后，取出每层筛并将筛上土壤冲入培养皿中，放入烘箱中 50 ℃ 烘干至恒质量，称质量后分别记为大团聚体（>2 mm）、小团聚体（0.25~2 mm）、微团聚体（0.053~<0.25 mm）和粉黏粒（<0.053 mm）的质量，并计算各粒级团聚体质量比例（ $W_i$ ，%）、>0.25 mm 粒级团聚体比例（ $R_{0.25}$ ，%）。MWD（mm）和 GMD（mm）<sup>[15,22]</sup> 计算式如下：

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

$$GMD = e^{\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln X_i}{\sum_{i=1}^n W_i}} \quad (2)$$

式中  $W_i$  为各粒级水稳定性团聚体质量，g； $n$  为粒径分组的组数， $X_i$  为某一粒级团聚体的平均直径，mm。

#### 1.3.3 土壤及团聚体养分

依据《土壤农化分析（第三版）》<sup>[23]</sup> 中的方法测定土壤及各粒级水稳性团聚体有机碳、全磷、全钾和全氮

含量。以单位质量土壤中不同粒级团聚体中固持的养分含量表示团聚体养分固持能力<sup>[20]</sup>，计算团聚体有机碳、全氮、全磷、全钾固持能力和土壤有机碳、全氮、全磷、全钾库储量<sup>[24]</sup>，计算式如下：

$$K_p = C_i \cdot W_i \quad (3)$$

$$K_s = 10B \cdot d \cdot C_T \quad (4)$$

式中  $K_p$  为养分固持能力，g/kg； $K_s$  为养分库储量，t/hm<sup>2</sup>； $C_i$  为各粒级（ $i$ ）团聚体养分含量（有机碳、全氮、全磷、全钾），g/kg； $B$  为土壤容重，g/kg； $d$  为土层厚度，cm； $C_T$  为土壤养分含量（有机碳、全氮、全磷、全钾），g/kg。

#### 1.3.4 作物产量

分别于 2022 年和 2023 年小麦和玉米成熟期进行测产，在每个小区每个重复选 20 m<sup>2</sup>（小麦）和 60 m<sup>2</sup>（玉米）收获，小麦按照 12.5% 水分计产，玉米按照 14% 的籽粒水分计产。

#### 1.4 数据分析与绘图

采用 Excel 2016 进行数据整理，SPSS 19.0 进行统计分析，方差分析为单因素方差（One Way-ANOVA），采用一般线性模型进行三因素间的主效应分析，Origin 2024 进行科学绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 深耕秸秆还田配施生物炭对土壤水稳定性团聚体粒径分布和稳定性的影响

深耕秸秆还田配施生物炭显著影响团聚体粒径分布和团聚体稳定性（表 1）。>0.25 mm 粒级团聚体是砂姜黑土团聚体中的主要组成部分，其中深耕、秸秆还田和生物炭添加主要通过改变>2 mm 粒级团聚体比例影响团聚体稳定性。与 CT-NS-NB 相比，DT-NS-NB 处理在>15~30 cm 土层提高>0.25 mm 粒级团聚体比例，>2 mm 粒级团聚体比例提高 136.24%，MWD 和 GMD 分别提高 45.43% 和 52.09%（ $P<0.05$ ），显著提高深层（>15~30 cm）团聚体稳定性，这表明深耕主要改良>15~30 cm 土层土壤团粒结构。秸秆还田和生物炭添加均能增加 0~15 cm 和>15~30 cm 土层>2 mm 粒级团聚体比例，提高团聚体稳定性，其中秸秆还田的改良效果更强，如 CT-S-NB 较 CT-NS-NB 处理在 0~15 cm 土层中  $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 值分别显著提高 14.72%、27.49% 和 80.68%，>15~30 cm 土层中分别显著提高 13.33%、23.67% 和 44.96%。深耕结合秸秆还田能够显著增加>15~30 cm 土层>2 mm 粒级团聚体比例和团聚体稳定性，如 DT-S-NB 较 CT-NS-NB 处理>2 mm 粒级团聚体比例、MWD 和 GMD 值分别增加 160.99%、59.59% 和 105.24%，而 DT-S-B 较 CT-NS-NB 处理在>15~30 cm 土层土壤中>2 mm 粒级团聚体比例、MWD 和 GMD 值的提高幅度更为显著，分别显著提升 165.88%、62.37% 和 119.81%，这意味着生物炭添加能够较深耕秸秆还田进一步促进小团聚体形成大团聚体，提升团聚体稳定性。

表 1 不同处理下 0~15 cm 和 &gt;15~30 cm 土层土壤团聚体粒径分布和水稳性

Table 1 Particle size distribution of soil and water-stable aggregates in 0-15 cm and &gt;15-30 cm soil layers under different treatments

土层 Soil layers/cm	处理 Treatments	团聚体粒径分布 Aggregate size distribution/%				团聚体稳定性 Aggregate stability		
		$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$R_{0.25}/\%$	MWD/mm	GMD/mm
0~15	CT-NS-NB	45.3bcd	29.51abc	13.86ab	11.34a	74.81d	1.70cde	0.73c
	CT-NS-B	51.82bc	30.79abc	7.99c	9.39a	82.61ab	1.91bcd	1.03bc
	CT-S-NB	63.82a	21.99c	5.67c	8.52a	85.82ab	2.17ab	1.32ab
	CT-S-B	64.71a	23.27bc	5.41c	6.61a	87.98a	2.21a	1.38a
	DT-NS-NB	38.61d	36.55a	13.97ab	10.87a	75.16cd	1.58e	0.69c
	DT-NS-B	42.58cd	32.91ab	16.58a	7.93a	75.49cd	1.66de	0.73c
	DT-S-NB	54.32abc	25.66bc	10.14bc	9.88a	79.99bcd	1.92bcd	0.95c
	DT-S-B	55.67ab	26.22bc	9.18bc	8.92a	81.90abc	1.97abc	1.03bc
>15~30	CT-NS-NB	16.64b	52.53a	13.65a	17.18a	69.17d	1.10c	0.46d
	CT-NS-B	25.48b	45.01ab	14.00a	15.51a	70.49cd	1.28bc	0.51cd
	CT-S-NB	25.13b	53.26a	13.07ab	8.54bc	78.39ab	1.36b	0.67bc
	CT-S-B	23.25b	56.74a	13.01ab	6.99c	79.99ab	1.34b	0.71b
	DT-NS-NB	39.30a	36.68b	12.72ab	11.30abc	75.98bcd	1.60a	0.71b
	DT-NS-B	41.36a	35.60b	9.67ab	13.37ab	76.96bc	1.65a	0.74b
	DT-S-NB	43.42a	39.75b	9.13ab	7.70bc	83.17ab	1.76a	0.95a
	DT-S-B	44.24a	40.34b	8.42b	7.01c	84.58a	1.79a	1.02a

注: CT 为旋耕; DT 为深耕; NS 为秸秆不还田; S 为秸秆还田; NB 为无生物炭添加; B 为生物炭添加。 $R_{0.25}$ : >0.25 mm 粒级团聚体所占比例; MWD: 平均重量直径; GMD: 几何平均直径;  $F_1$ : >2 mm;  $F_2$ : 0.25~2 mm;  $F_3$ : 0.053~<0.25 mm;  $F_4$ : <0.053 mm。不同小写字母代表同一土层相同粒级不同处理间的差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

Note: CT: rotary tillage; DT: deep tillage; NS: straw not returned to the field; S: straw returned to the field; NB: no biochar addition; B: biochar addition.  $R_{0.25}$ : proportion of agglomerates >0.25 mm; MWD: mean weight diameter; GMD: geometric mean diameter;  $F_1$ : >2 mm;  $F_2$ : 0.25~2 mm;  $F_3$ : 0.053~<0.25 mm;  $F_4$ : <0.053 mm. Different lowercase letters represent significant differences ( $P<0.05$ ) among different treatments with the same particle size in the same soil layer. Same below.

## 2.2 深耕秸秆还田配施生物炭对团聚体有机碳和养分分布的影响

深耕、秸秆还田和配施生物炭均能影响土壤团聚体有机碳、全氮、全磷、全钾含量,且因子间对不同粒级团聚体养分含量存在显著交互作用(表2)。

由(表3)可知,土壤有机碳、全氮、全磷含量在土壤各粒级团聚体中富集趋势一致,大团聚体占比最高,其次为微团聚体、小团聚体、粉黏粒,而全钾含量随粒径由大到小依次降低。无生物炭添加时,秸秆还田下2种耕作方式间差异更显著,深耕较旋耕处理显著降低0~15 cm 土层各粒级团聚体有机碳含量,>15~30 cm 土层>2 mm 和 0.25~2 mm 粒级团聚体有机碳分别显著提高16.74%和27.63%、全氮含量分别显著增加13.76%和16.74%,而在秸秆不还田处理下2种耕作方式间无显著差异。秸秆还田能够促进0~15 cm 和>15~30 cm 土层>2 mm 粒级团聚体有机碳、全氮含量提升,旋耕处理下秸

秆还田更有利于提高0~15 cm 土层团聚体养分含量,而深耕结合秸秆还田更能促进>15~30 cm 土层团聚体养分提升。无生物炭添加时,与旋耕秸秆不还田相比,深耕秸秆还田显著提高0~15 cm 土层0.25~2 mm 和0.053~<0.25 mm 粒级团聚体有机碳、全氮和全钾含量,显著提高>15~30 cm 土层>2 mm、0.25~2 mm 和0.053~<0.25 mm 粒级团聚体有机碳、全氮和全磷含量,如DT-S-NB较CT-NS-NB处理>15~30 cm 土层>2 mm 粒级团聚体有机碳、全氮和全磷含量分别显著提升16.94%、24.06%和17.36%,表明深耕秸秆还田使表层(0~15 cm)和深层(>15~30 cm)土壤养分含量均有提高。三因素综合分析,DT-S-B处理较CT-NS-NB处理>15~30 cm 土层>2 mm 粒级团聚体有机碳、全氮和全磷分别显著提高30.61%、29.54%和22.00%,表明在深耕秸秆还田的基础上添加生物炭能够进一步提高>15~30 cm 土层土壤>2 mm 粒级团聚体养分含量,促进深层土壤地力提升。

表 2 不同处理对土壤不同粒级团聚体有机碳和养分含量的效应分析

Table 2 Effect analysis of different treatments on organic carbon and nutrient contents of soil aggregates of different particle sizes

土层 Soil layers/cm	来源 Source	土壤有机碳 Soil organic C (SOC)/(g·kg <sup>-1</sup> )				总氮 Total N(TN)/(g·kg <sup>-1</sup> )				总磷 Total P(TP)/(g·kg <sup>-1</sup> )				总钾 Total K(TK)/(g·kg <sup>-1</sup> )				
		$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	
0~15	T	**	**	**	**	**	*	ns	**	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	
	ST	**	**	**	*	**	**	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	**	**	**	ns
	BT	**	ns	**	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**
	T×ST	**	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	T×BT	*	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	**	**	**
	ST×BT	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	T×ST×BT	ns	**	**	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**
>15~30	T	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns	**	ns	ns	ns	
	ST	*	ns	*	ns	**	**	**	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
	BT	**	ns	**	ns	ns	**	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	
	T×ST	ns	ns	**	ns	*	**	**	*	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
	T×BT	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
	ST×BT	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
	T×ST×BT	ns	ns	ns	*	ns	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	

注: T 为耕作方式; ST 为秸秆处理; BT 为生物炭处理。\*和\*\*分别代表  $P<0.05$  和  $P<0.01$  水平显著; ns 表示不显著。下同。

Note: T is tillage practices; ST is straw treatments; BT is biochar treatments. \* and \*\* represent significances at the  $P<0.05$  and  $P<0.01$  levels, respectively; ns indicates insignificance. Same below.

表 3 不同处理下土壤不同粒级团聚体有机碳和养分含量的变化

Table 3 Changes of organic carbon and nutrient contents of soil aggregates of different particle sizes under different treatments

土层 Soil layers/cm	处理 Treatments	SOC/(g·kg <sup>-1</sup> )				TN/(g·kg <sup>-1</sup> )				TP/(g·kg <sup>-1</sup> )				TK/(g·kg <sup>-1</sup> )			
		F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>
0~15	CT-NS-NB	15.16d	13.4cd	12.73de	8.61ab	1.59cd	1.15c	1.23d	0.95b	0.85a	0.71a	0.91a	0.73b	4.21b	3.88f	3.48c	2.75bc
	CT-NS-B	17.05c	12.38e	15.85c	8.58ab	1.68bc	1.29bc	1.57ab	0.96b	0.93a	0.77a	0.91a	0.75b	4.27ab	4.01ef	3.68bc	2.62bcd
	CT-S-NB	20.91b	18.71a	20.13a	9.12a	1.86ab	1.47ab	1.48bc	1.14a	0.85a	0.73a	0.92a	0.76b	4.14b	4.27bcd	3.81ab	2.49de
	CT-S-B	22.22a	19.10a	18.97b	8.31abc	1.93a	1.40ab	1.72a	1.06ab	0.86a	0.80a	0.94a	0.78b	4.34ab	4.54a	3.81ab	2.62bcd
	DT-NS-NB	13.62e	11.94e	12.52e	6.15d	1.44d	1.37b	1.34cd	0.68c	0.78a	0.69a	0.87a	1.01ab	4.27ab	4.08def	3.81ab	2.29e
	DT-NS-B	13.74e	12.86de	13.61d	7.32c	1.45d	1.43ab	1.48bc	0.72c	0.90a	0.74a	0.91a	1.09a	4.34ba	4.14cde	3.61bc	3.02a
	DT-S-NB	15.97cd	14.65b	15.10c	7.38c	1.60cd	1.35b	1.49bc	0.92b	0.94a	0.80a	0.93a	0.95ab	4.47a	4.47ab	3.94a	2.56cd
	DT-S-B	16.28cd	13.93bc	15.68c	7.99bc	1.61cd	1.57a	1.59ab	0.95b	0.98a	0.79a	0.95a	0.95ab	4.34ab	4.34abc	3.75ab	2.82ab
>15~30	CT-NS-NB	12.11d	9.78b	10.19ef	5.61bc	1.08b	1.14e	1.04d	1.04c	0.68c	0.6b	0.77c	0.77ab	4.21ab	4.08ab	3.68ab	3.68ab
	CT-NS-B	13.10cd	10.10b	11.09de	5.83abc	1.11b	1.25d	0.91e	0.91bc	0.71bc	0.64b	0.80bc	0.80ab	4.08b	4.01ab	3.68ab	3.68a
	CT-S-NB	12.19d	9.80b	9.67f	6.22ab	1.17b	1.28cd	1.28c	1.28bc	0.76abc	0.61b	0.94abc	0.94ab	4.21ab	4.14ab	3.65ab	3.65a
	CT-S-B	13.51bcd	10.14b	11.28d	4.97c	1.17b	1.28cd	1.32c	1.32c	0.77abc	0.67b	0.81bc	0.81a	4.21ab	4.21ab	3.75a	3.75ab
	DT-NS-NB	12.48d	11.70a	12.42c	6.79a	1.15b	1.32cd	1.58b	1.58a	0.81ab	0.61b	0.97abc	0.97ab	4.34ab	4.08ab	3.48b	3.48ab
	DT-NS-B	14.73ab	12.09a	12.97bc	6.48ab	1.15b	1.36c	1.72a	1.72a	0.84a	0.77b	1.01ab	1.01ab	4.41a	4.08ab	3.68ab	3.68ab
	DT-S-NB	14.17bc	12.51a	13.53b	6.13ab	1.33a	1.50b	1.50ab	1.50ab	0.80ab	1.01a	1.08a	1.08b	4.34ab	4.01ab	3.48b	3.48b
	DT-S-B	15.82a	12.52a	14.58a	6.61a	1.39a	1.66a	1.56b	1.56c	0.83ab	1.06a	1.02ab	1.02ab	4.41a	4.21a	3.75a	3.75a

### 2.3 深耕秸秆还田配施生物炭对有机碳和养分固持能力的影响

耕作方式、秸秆处理和生物炭处理显著影响土壤团聚体有机碳和养分固持能力，且不同因子间存在交互效果（表 4）。团聚体有机碳和养分固持能力与水稳性团聚体的分布比例趋势高度一致，且超过 75% 的土壤团聚体养分固持在粒径>0.25 mm 的团聚体中（表 5）。在 0~15 cm 土层土壤中，各粒级团聚体有机碳、全氮、全磷和全钾固持能力随着粒径减小均呈现逐渐下降趋势，而>15~30 cm 土层中土壤各粒级团聚体养分固持能力在 2 种耕作方式间出现明显差异，仅在深耕处理下与 0~15 cm 土层土壤各粒级团聚体养分固持能力趋势一致。无生物炭添加时，在 0~15 cm 土层中秸秆还田下 2 种耕作方式的土壤团聚体养分固持能力差异更显著，如 DT-S-NB 较 CT-S-NB 处理>2 mm 粒级团聚体有机碳和全氮固持能力分别显著降低 34.98% 和 26.92%，而在>15~30 cm 土层中秸秆不还田时 2 种耕作方式间差异更显著，与旋耕相比，深耕处理>2 mm 粒级团聚体有机碳、全氮、全磷和全钾固持能力均显著提高，分别提升 143.48%、152.20%、181.63% 和 143.59%；与团聚体养分分布趋势不同，在 0~15 cm 和>15~30 cm 2 个土层中，均表现为在旋耕处理下秸秆还田较不还田处理团聚体有机碳、全氮、全磷和全钾固持能力提升幅度更显著。深耕秸秆还田配施生

物炭能够显著提升 0~15 cm 和>15~30 cm 土层>2 mm 粒级团聚体养分固持能力，如 DT-S-NB 和 DT-S-B 处理较 CT-NS-NB 处理 0~15 cm 和>15~30 cm 土层>2 mm 粒级团聚体有机碳和养分固持能力均能显著提高，其中 DT-S-B 处理效果更优，表明深耕秸秆还田能够提升 0~30 cm 土层土壤团聚体养分含量，且配施生物炭后提升效果更佳。

表 4 不同处理对土壤团聚体有机碳和养分固持能力的效应分析  
Table 4 Effect analysis of different treatments on organic carbon and nutrient preservation capacity of soil aggregate

土层 Soil layers/cm	来源 Source	C <sub>p</sub> /(g·kg <sup>-1</sup> )				N <sub>p</sub> /(g·kg <sup>-1</sup> )				P <sub>p</sub> /(g·kg <sup>-1</sup> )				K <sub>p</sub> /(g·kg <sup>-1</sup> )				
		F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	
0~15	T	**	ns	**	**	**	**	**	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	
	ST	**	ns	**	**	**	**	**	ns	**	**	**	*	**	**	**	**	
	BT	**	ns	ns	**	*	*	ns	**	*	ns	ns	*	**	ns	**	**	
	T×ST	**	**	ns	**	*	*	ns	**	*	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	
	T×BT	**	ns	**	**	ns	ns	**	*	ns	ns	**	ns	*	**	**	**	
	ST×BT	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	**	ns	
T×ST×BT	ns	ns	ns	ns	ns	**	**	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	**	ns	
>15~30	T	**	**	**	ns	**	**	ns	**	**	ns	**	ns	**	**	**	**	
	ST	**	**	**	**	**	**	ns	**	**	**	**	ns	**	**	**	**	
	BT	**	ns	ns	ns	**	ns	**	ns	*	ns	*	ns	**	*	ns	*	
	T×ST	*	ns	ns	**	**	ns	**	ns	**	*	ns	**	*	ns	ns	**	**
	T×BT	ns	ns	**	**	ns	*	*	ns	ns	*	ns	ns	**	ns	**	**	**
	ST×BT	**	**	**	*	**	**	**	**	*	ns	ns	ns	ns	**	**	**	*
T×ST×BT	ns	ns	ns	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	*	**	ns	

注：C<sub>p</sub>：有机碳固持能力；N<sub>p</sub>：全氮固持能力；P<sub>p</sub>：全磷固持能力；K<sub>p</sub>：全钾固持能力。下同。

Note: C<sub>p</sub>: organic carbon preservation capacity; N<sub>p</sub>: total nitrogen preservation capacity; P<sub>p</sub>: total phosphorus preservation capacity; K<sub>p</sub>: total potassium preservation capacity. Same below.

表 5 不同处理下土壤团聚体有机碳和养分固持能力的变化

Table 5 Changes of organic carbon and nutrient preservation capacity of soil aggregates under different treatments

土层 Soil layers/cm	处理 Treatments	C <sub>p</sub> /(g·kg <sup>-1</sup> )				N <sub>p</sub> /(g·kg <sup>-1</sup> )				P <sub>p</sub> /(g·kg <sup>-1</sup> )				K <sub>p</sub> /(g·kg <sup>-1</sup> )			
		F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>
0~15	CT-NS-NB	6.87d	3.95cd	1.76b	0.98a	0.72c	0.34c	0.17b	0.11a	0.38bc	0.21bc	0.13b	0.08ab	1.91e	1.14d	0.48c	0.31a
	CT-NS-B	8.83c	3.81de	1.27d	0.81b	0.87b	0.40b	0.13d	0.09bc	0.48ab	0.24ab	0.07cd	0.07bc	2.21d	1.23c	0.29f	0.25b
	CT-S-NB	13.34b	4.11bc	1.14de	0.78b	1.19a	0.32c	0.08e	0.10ab	0.54a	0.16d	0.05d	0.06bc	2.64b	0.94f	0.22g	0.21c
	CT-S-B	14.38a	4.44a	1.03e	0.55e	1.25a	0.32c	0.09e	0.07e	0.56a	0.19cd	0.05d	0.05c	2.81a	1.06e	0.21g	0.17d
	DT-NS-NB	5.26e	4.36ab	1.75b	0.67cd	0.56d	0.50a	0.19b	0.07de	0.30c	0.25a	0.12b	0.11a	1.65f	1.49a	0.53b	0.25b
	DT-NS-B	5.85e	4.23ab	2.26a	0.58de	0.62cd	0.47a	0.25a	0.06f	0.38bc	0.24ab	0.15a	0.09ab	1.85e	1.36b	0.60a	0.24b
	DT-S-NB	8.68c	3.76de	1.53c	0.73bc	0.87b	0.35c	0.15c	0.09bc	0.51a	0.20bc	0.09c	0.09ab	2.43c	1.15d	0.40d	0.25b
	DT-S-B	9.07c	3.65e	1.44c	0.71bc	0.90b	0.41b	0.15c	0.08cd	0.55a	0.21bc	0.09c	0.09ab	2.42c	1.14d	0.34e	0.25b
>15~30	CT-NS-NB	2.02e	5.14b	1.39b	0.96a	0.18d	0.60c	0.14c	0.14a	0.11d	0.32bc	0.11ab	0.13a	0.70e	2.14a	0.50ab	0.44a
	CT-NS-B	3.34d	4.55c	1.55a	0.90a	0.28c	0.56c	0.13c	0.13ab	0.18c	0.29cd	0.11ab	0.11a	1.04d	1.81b	0.52a	0.44a
	CT-S-NB	3.06d	5.22b	1.26c	0.53c	0.29c	0.68ab	0.17b	0.08c	0.19c	0.33bc	0.12a	0.07bc	1.06d	2.21a	0.48b	0.24d
	CT-S-B	3.14d	5.75a	1.47ab	0.35d	0.27c	0.72a	0.17b	0.06d	0.18c	0.38ab	0.11ab	0.06bc	0.98d	2.24a	0.49b	0.18e
	DT-NS-NB	4.91c	4.29c	1.58a	0.77b	0.45b	0.48d	0.20a	0.12b	0.32b	0.22d	0.12a	0.07b	1.71c	1.49de	0.44c	0.29c
	DT-NS-B	6.09b	4.30c	1.25c	0.87a	0.48b	0.49d	0.17b	0.14a	0.35ab	0.28cd	0.10ab	0.11a	1.82b	1.45e	0.36d	0.33b
	DT-S-NB	6.15b	4.97b	1.24c	0.47c	0.58a	0.60c	0.14c	0.08c	0.35ab	0.40a	0.10ab	0.05c	1.88ab	1.59cd	0.32e	0.19e
	DT-S-B	7.00a	5.05b	1.23c	0.46c	0.62a	0.67b	0.13c	0.06d	0.37a	0.43a	0.09b	0.05bc	1.95a	1.70c	0.32e	0.19e

## 2.4 深耕秸秆还田配施生物炭对土壤有机碳和养分库储量的影响

耕作方式、秸秆还田和配施生物炭对不同土层养分库储量的影响如表6, 三因子间存在交互作用。DT-S-NB 较 CT-NS-NB 处理使 0~15 cm 土层土壤全钾库储量显著增加 10.00%, 显著提升>15~30 cm 土层土壤有机碳、全氮、全磷和全钾库储量, 分别增加 33.61%、30.63%、35.43% 和 5.29%。表明深耕秸秆还田能够有效提升>15~30 cm 土层土壤养分储量。添加生物炭后, 促进了土壤有机碳和养分库储量进一步提升, 如 DT-S-B 较 CT-NS-NB 处理的土壤全氮和全钾库储量在 0~15 cm 土层分别提高 14.96% 和 7.93%, 在>15~30 cm 土层中土壤有机碳、全氮、全磷和全钾库储量分别显著提高 37.41%、38.99%、41.26%、9.84% ( $P<0.05$ ), 表明深耕、秸秆还田和生物炭添加三者结合对 0~30 cm 土壤肥力状况明显改善。

表6 不同处理下土壤养分库储量的变化

Table 6 Changes in soil organic carbon and nutrient pools under different treatments

土层 Soil layers/cm	处理 Treatments	$C_s/(t \cdot hm^{-2})$	$N_s/(t \cdot hm^{-2})$	$P_s/(t \cdot hm^{-2})$	$K_s/(t \cdot hm^{-2})$
0~15	CT-NS-NB	35.42c	2.92de	1.75ab	8.37d
	CT-NS-B	39.51b	3.22bc	1.88ab	8.69cd
	CT-S-NB	42.30a	3.68a	1.78ab	8.74bc
	CT-S-B	44.21a	3.78a	1.84ab	9.24a
	DT-NS-NB	26.03e	2.87e	1.71b	8.54cd
	DT-NS-B	29.57d	3.03cde	1.89ab	8.82bc
	DT-S-NB	34.99c	3.18bcd	1.97ab	9.21a
	DT-S-B	36.46c	3.36b	2.02a	9.04ab
	DT-S-NB	35.93a	3.59a	2.27a	10.09a
>15~30	CT-NS-NB	26.15e	2.58e	1.60c	9.19c
	CT-NS-B	26.74de	2.68e	1.68c	9.22c
	CT-S-NB	27.28cde	2.97d	1.72c	9.67b
	CT-S-B	28.81cd	2.98cd	1.77c	9.44bc
	DT-NS-NB	29.10bc	3.05cd	1.79c	9.55b
	DT-NS-B	31.06b	3.08c	2.00b	9.62b
	DT-S-NB	34.93a	3.37b	2.17ab	9.67b
	DT-S-B	35.93a	3.59a	2.27a	10.09a

注:  $C_s$ : 有机碳库储量;  $N_s$ : 全氮储量;  $P_s$ : 全磷储量;  $K_s$ : 全钾储量。下同。

Note:  $C_s$ : organic carbon storage;  $N_s$ : total nitrogen storage;  $P_s$ : total phosphorus storage;  $K_s$ : total potassium storage. Same below.

## 2.5 深耕秸秆还田配施生物炭对周年作物产量及其相关性分析

深耕、秸秆还田和生物炭添加均能显著提升作物周年产量(表7), 但三因素效应分析表明因子间并未出

现交互效应。深耕较旋耕处理周年产量分别显著提高 6.12% (2022)、5.53% (2023); 秸秆还田较秸秆不还田处理周年产量分别显著提高 13.74% (2022)、11.98% (2023); 生物炭添加随着施用年限的增加增产效果逐渐明显, 仅在 2023 年较无生物炭添加处理周年产量显著提高, 其中主要源于小麦产量显著提升 4.88%。

三因素综合分析, DT-S-NB 处理较 CT-NS-NB 处理周年产量分别增加 19.56% (2022)、21.66% (2023), DT-S-B 处理较 CT-NS-NB 处理周年产量分别增加 22.87% (2022)、23.03% (2023), 而 DT-S-B 与 DT-S-NB 处理间周年产量未表现出显著差异, 表明在深耕秸秆还田基础上增施生物炭在短期内并不能显著提升作物周年产量。对比不同处理下玉米和小麦产量的差异发现, 深耕、秸秆还田和配施生物炭三因素均对小麦季增产效果更明显。

表7 不同处理下作物产量的变化

Table 7 Changes in crop yield under different treatments

年份 Year	处理 Treatments	小麦 Wheat/(t·hm <sup>-2</sup> )	玉米 Maize/(t·hm <sup>-2</sup> )	周年 Annual/(t·hm <sup>-2</sup> )
2022	CT-NS-NB	9.37d	8.31b	17.68c
	CT-NS-B	9.38d	8.35b	17.73c
	CT-S-NB	11.88a	8.90a	20.79a
	CT-S-B	11.68ab	8.99a	20.67a
	DT-NS-NB	10.35cd	8.90a	19.25b
	DT-NS-B	10.77bc	8.70ab	19.47b
	DT-S-NB	12.22a	8.92a	21.13a
	DT-S-B	12.50a	9.22a	21.72a
	DT-S-NB	12.75a	11.81a	24.56a
2023	CT-NS-NB	9.47c	10.49b	19.96d
	CT-NS-B	10.07c	11.28ab	21.35c
	CT-S-NB	11.43b	11.53a	22.96b
	CT-S-B	11.84ab	11.75a	23.59ab
	DT-NS-NB	10.01c	11.28ab	21.29c
	DT-NS-B	11.02b	11.56a	22.58b
	DT-S-NB	12.65a	11.64a	24.28a
	DT-S-B	12.75a	11.81a	24.56a

相关分析表明(表8), 产量与>15~30 cm 土层的  $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 值和  $N_s$  呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 与土壤有机碳、全磷和全钾库储量显著正相关 ( $P<0.05$ )。且土壤团聚体稳定性与养分库储量显著相关, 其中 0~15 cm 土层中  $R_{0.25}$  值与 MWD、GMD、 $C_s$  和  $N_s$  呈极显著正相关, 而在>15~30 cm 土层中  $R_{0.25}$  值与 MWD、GMD、 $C_s$ 、 $N_s$ 、 $P_s$  和  $K_s$  均呈极显著正相关,  $P_s$  和  $K_s$  仅在>15~30 cm 土层与 MWD 和 GMD 值呈极显著正相关。

表8 不同处理下产量与土壤团聚体参数的相关性分析

Table 8 Correlation analysis between yield and soil aggregate indexes under different treatments

土层 Soil layers/cm	指标 Indexes	周年产量 Annual yield	0~15							>15~30					
			$R_{0.25}$	MWD	GMD	$C_s$	$N_s$	$P_s$	$K_s$	$R_{0.25}$	MWD	GMD	$C_s$	$N_s$	$P_s$
0~15	$R_{0.25}$	0.27	1												
	MWD	0.36*	0.90**	1											
	GMD	0.34	0.96**	0.96**	1										
	$C_s$	0.12	0.73**	0.77**	0.75**	1									
	$N_s$	0.29	0.73**	0.77**	0.76**	0.83**	1								
	$P_s$	0.41*	0.08	0.17	0.07	0.11	0.13	1							
>15~30	$R_{0.25}$	0.63**	0.18	0.31	0.24	0.06	0.34	0.49**	0.61**	1					
	MWD	0.47**	0.14	0.11	0.17	-0.39*	-0.07	0.45**	0.51**	0.68**	1				
	GMD	0.57**	0.05	0.14	0.06	-0.12	0.15	0.60**	0.59**	0.91**	0.88**	1			
	$C_s$	0.38*	-0.04	-0.02	-0.08	-0.22	-0.01	0.54**	0.57**	0.66**	0.75**	0.78**	1		
	$N_s$	0.48**	0.11	0.14	0.08	-0.16	0.13	0.49**	0.61**	0.72**	0.81**	0.84**	0.91**	1	
	$P_s$	0.42*	0.01	0.08	0.014	-0.20	0.03	0.56**	0.49**	0.60**	0.72**	0.73**	0.88**	0.90**	1
$K_s$	0.43*	0.09	0.16	0.11	-0.08	0.24	0.32	0.48**	0.67**	0.70**	0.72**	0.72**	0.88**	0.79**	

### 3 讨论

#### 3.1 深耕秸秆还田配施生物炭对团聚体粒径分布及其稳定性的影响

深耕、秸秆还田和配施生物炭均显著影响不同土层团聚体粒径分布和团聚体稳定性 ( $P < 0.05$ )。本研究发​​现, 深翻耕通过物理翻转将表层土壤转移到深层, 提高了深层大团聚体 ( $> 2$  mm) 比例和 MWD 值<sup>[25]</sup>。秸秆还田和配施生物炭均提高了 0~15 cm 和 >15~30 cm 两个土层 >2 mm 粒级团聚体比例、MWD 和 GMD 值, 尤其是在表层土 (0~15 cm 土层) 中, 这与秸秆还田和生物炭的主要施用位置有关。虽然二者均改善了土壤团聚体分布和稳定性, 但作用机制不同, 前者是因为微生物在分解秸秆过程中形成大量新鲜有机胶结物质, 通过胶黏性和菌丝的缠绕更易将土壤中小粒级团聚体团聚成较大团聚体<sup>[26]</sup>, 后者则是因为生物炭自身为疏松多孔结构, 具备较大的比表面积和结构内部有机大分子, 有着较强的吸附和团聚作用, 促进小团聚体聚合而形成大团聚体<sup>[27]</sup>。生物炭添加的改良效果不显著, 可能与生物炭添加量 and 处理年限较短有关。生物炭与深耕秸秆还田结合能协同改良土壤物理结构, 即深耕秸秆还田配施生物炭对 0~30 cm 两个土层土壤团粒结构组成均能改善, 提高土壤团聚体稳定性, 尤其显著改善 >15~30 cm 土层土壤物理结构。

#### 3.2 深耕秸秆还田配施生物炭对团聚体养分固持及养分库储量的影响

耕作方式、秸秆还田和配施生物炭通过改变土壤团聚体粒径分布而影响着团聚体的养分固持能力。本研究发​​现, 由于施肥和作物残茬多留存并作用在 0~15 cm 土层中, 因此随着土层加深, 土壤团聚体的有机碳和养分含量逐渐下降, 而深翻通过机械扰动实现了上下层土壤的匀质化, 表现出 >15~30 cm 土层土壤团聚体有机碳和养分含量的大幅提高, 且下层土壤粉黏粒比例高, 微生物分解作用较弱, 使得土壤团聚体中的有机碳和养分更易被固持<sup>[28-29]</sup>。秸秆还田增加了土壤团聚体有机碳、全氮、全磷和全钾养分含量, 尤其是提高了 >2 mm 粒级团聚体的养分含量, 与前人结论一致<sup>[11]</sup>。这与秸秆还田后, 在微生物的作用下形成大量富含养分、易胶黏的有机胶结物质有关<sup>[11]</sup>。配施生物炭由于作用年限较短且单次施用量较少, 对团聚体有机碳和养分含量的提升效果并未达到显著水平。本研究发​​现, DT-S-B 处理使 0~15 cm 土层团聚体承载养分较 CT-NS-NB 处理增加, 这意味着深翻对表层大团聚体分布的稀释负效应小于添加碳源后养分释放提高土壤养分的正效应<sup>[30]</sup>。

土壤养分固持能力反映不同粒级团聚体对于土壤养分的贡献度, 可以一定程度上预测土壤功能性及养分周转速率<sup>[11]</sup>, 单个粒级团聚体养分固持能力是结合团聚体的粒径分布计算得到<sup>[31]</sup>。本研究发​​现砂姜黑土中超过 75% 的土壤团聚体养分集中在粒径 >0.25 mm 团聚体中,

且该粒级团聚体养分固持能力在 0~15 cm 和 >15~30 cm 土层受到耕作、秸秆还田和生物炭的影响并不一致 (表 5)。深耕通过稀释效应提高了 >15~30 cm 土层 >0.25 mm 粒级团聚体养分固持能力, 促进深层土壤养分库储量提升; 秸秆还田在微生物分解作用下显著增加了 0~15 cm 和 >15~30 cm 土层 >0.25 mm 团聚体的有机碳和养分固持能力, 其原因一是秸秆还田增加了土壤中有有机碳的含量并促使 >0.25 mm 粒级团聚体的形成, 二是土壤碳氮比的提高, 降低土壤有机质和氮素的矿化速率, 故表现为有机碳固持能力和土壤有机碳库储量增加<sup>[11,32]</sup>。生物炭由于疏松多孔且含有稳定的芳香化结构碳, 增加了 2 个土层有机碳和养分固持能力。尽管深耕降低了 0~15 cm 土层 >2 mm 粒级团聚体养分固持能力, 但由于秸秆还田与配施生物炭二者对大团聚体养分固持能力的综合增加效应大于深耕的降低效应, 因此三者共同作用下仍表现为 0~15 cm 土层 >0.25 mm 粒级团聚体养分固持能力和有机碳库储量的增加。

#### 3.3 土壤团聚体稳定性和养分库储量与产量的相关性

本研究发​​现, 深耕搭配秸秆还田可以显著提高周年粮食产量, 这与前人研究结果一致<sup>[2,33]</sup>, 2023 年周年产量结果表明生物炭添加可以显著提高小麦-玉米周年产量, 且三因素对小麦的增产效果均大于玉米。这可能与耕作、秸秆处理和生物炭添加处理均在小麦播种前进行有关。深耕通过提高 >15~30 cm 土层土壤团聚体稳定性和养分库储量而影响产量, 秸秆还田主要通过提升 0~15 cm 土层土壤团聚体稳定性和养分库储量影响产量, 配施生物炭由于施用年限较短未能在深耕秸秆还田处理的基础上表现出进一步的显著增产作用。随着生物炭施用年限和累积添加量的增加, 其对作物的增产效果可能会更明显。

本研究亦发​​现, 土壤有机碳库储量 ( $C_s$ ) 和氮库储量 ( $N_s$ ) 与团聚体稳定性指标 ( $R_{0.25}$ 、MWD 值和 GMD 值) 呈现极显著正相关, 说明砂姜黑土中土壤团聚体的稳定性是影响土壤有机碳和全氮含量的关键因子, 而 >15~30 cm 土层团聚体稳定性及土壤氮库储量与产量呈极显著相关 (表 8), 表明深耕秸秆还田配施生物炭主要通过改良和优化深层土壤 (>15~30 cm) 物理结构, 提高了土壤的结构性肥力, 促进了作物下层根系的生长发育, 进而提高作物产量<sup>[13,34-35]</sup>。

### 4 结论

为了改善砂姜黑土土壤结构性差的现状, 探究适宜黄淮海南部砂姜黑土区域的田间管理措施, 于 2014 年设置长期定位试验, 探究耕作方式、秸秆还田和生物炭添加结合对土壤团聚体粒径分布、团聚体养分特征、养分库储量及作物产量的影响。结论如下:

1) 深耕秸秆还田使 0~30 cm 土层土壤养分再分配, 避免了养分在耕作表层土壤集聚的现象, 改善深层 (>15~30 cm) 土壤结构, 增加 >2 mm 团聚体养分固持

能力,同时增加土壤有机碳和养分库储量,有利于土壤有机碳和养分固持,促进作物产量显著提高23.03%,尤其显著提高小麦季产量。在深耕秸秆还田的基础上添加生物炭可以进一步改善土壤结构,提升地力,其施用效果与生物炭的累计添加量和施用年限成正相关。

2)相关性分析表明,>0.25 mm团聚体与团聚体稳定性有极显著正相关关系,产量与>15~30 cm土层团聚体稳定性和土壤有机碳和养分库储量呈正相关关系。砂姜黑土中土壤有机碳和养分库储量提升主要得益于下层土壤团聚体稳定性的增强,促进了产量的提升。

因此,深耕秸秆还田配施生物炭能够通过改善土壤物理特性,增加土壤养分库,促进土壤养分的利用和作物产量的提升,是适于黄淮海南部砂姜黑土区域土壤质量提升和作物产量提高的优良耕作措施。

#### [参 考 文 献]

- [1] 赵亚丽,刘卫玲,程思贤,等.深松(耕)方式对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J].中国农学科学,2018,51(13):2489-2503.  
ZHAO Yali, LIU Weiling, CHENG Sixian, et al. Effects of pattern of deep tillage on topsoil features, yield and water use efficiency in lime concretion black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(13):2489-2503. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘卫玲,程思贤,李娜,等.深松(耕)时期与方式对砂姜黑土耕层养分和冬小麦、夏玉米产量的影响[J].河南农学科学,2020,49(3):8-16.  
LIU Weiling, CHENG Sixian, LI Na, et al. Effects of tine and pattern of deep tillage on topsoil nutrient content, yield of winter wheat and summer maize in Lime Concretion Black Soil[J]. *Journal of Henan Agricultural Science*, 2020, 49(3): 8-16. (in Chinese with English abstract)
- [3] 谢迎新,靳海洋,孟庆阳,等.深耕改善砂姜黑土理化性状提高小麦产量[J].*农业工程学报*,2015,31(10):167-173.  
XIE Yingxin, JIN Haiyang, MENG Qingyang, et al. Deep tillage improving physical and chemical properties of soil and increasing grain yield of winter wheat in lime concretion black soil farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(10): 167-173. (in Chinese with English abstract)
- [4] 朱勇,李建业,张程远,等.长期保护性耕作对坡耕地黑土有机碳组分的影响[J].*农业工程学报*,2023,39(10):103-111.  
ZHU Yong, LI Jianye, ZHANG Chengyuan, et al. Effects of long-term conservation tillage on black soil organic carbon components in sloping farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(10): 103-111. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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[J].*农业工程学报*,2019,35(24):121-128.  
Wang Xing, Qi Jianying, Jing Zhenhuan, et al. Effects of long-term conservation tillage on soil aggregate stability and carbon and nitrogen in paddy field [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(24): 121-128. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李锡锋,许丽,张守福,等.砂姜黑土麦玉农田土壤团聚体分布及碳氮含量对不同耕作方式的响应[J].*山东农业科学*,2020,52(3):52-59.  
LI Xifeng, XU Li, ZHANG Shoufu, et al. Responses of aggregate distribution and carbon and nitrogen contents in Lime Concretion Black Soil under wheat - corn double cropping system to different tillage modes[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2020, 52(3): 52-59. (in Chinese with English abstract)
- [7] 韩上,武际,李敏,等.深耕结合秸秆还田提高作物产量并改善耕层薄化土壤理化性质[J].*植物营养与肥料学报*,2020,26(2):276-284.  
HAN Shang, WU Ji, LI Min, et al. Deep tillage with straw returning increase crop yield and improve soil physicochemical properties under topsoil thinning treatment[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(2): 276-284. (in Chinese with English abstract)
- [8] 黄璐,赵国慧,李廷亮,等.秸秆还田对黄土旱塬麦田土壤团聚体有机碳组分的影响[J].*农业工程学报*,2022,38(13):123-132.  
HUANG Lu, ZHAO Guohui, LI Tingliang, et al. Effects of straw returning on the organic carbon components of soil aggregates in wheat fields on the loess plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(13): 123-132. (in Chinese with English abstract)
- [9] 管方圆,刘琛,傅庆林,等.添加秸秆对水稻产量和土壤碳氮及微生物群落的影响[J].*农业工程学报*,2022,38(2):223-230.  
GUAN Fangyuan, LIU Chen, FU Qinglin, et al. Effects of straw addition on rice yield, soil carbon, nitrogen, and microbial community[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(2): 223-230. (in Chinese with English abstract)
- [10] 孟庆英,邹洪涛,韩艳玉,等.秸秆还田量对土壤团聚体有机碳和玉米产量的影响[J].*农业工程学报*,2019,35(23):



- 119-125.
- MENG Qingying, ZOU Hongtao, HAN Yanyu, et al. Effects of straw application rates on soil aggregates, soil organic carbon content and maize yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(23): 119-125. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王凤仁, 逢蕾, 沈健林, 等. 秸秆还田下双季稻田土壤团聚体碳氮磷含量及生态化学计量比特征[J]. *农业现代化研究*, 2023, 44(3): 550-557.
- WANG Fengren, PANG Lei, SHEN Jianlin, et al. Contents and eco-stoichiometric ratios of carbon, nitrogen and phosphorus of soil aggregates in double-cropping rice fields under straw incorporation[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2023, 44(3): 550-557. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(12): 2329-2340.
- ZHOU Mingxing, DAI Zijun, FAN Jun, et al. Effect of no-tillage combined with mulching on the structure and organic carbon content of aggregates in Heilu soil of the Weibei dry plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(12): 2329-2340. (in Chinese with English abstract)
- [13] 战秀梅, 李秀龙, 韩晓日, 等. 深耕及秸秆还田对春玉米产量、花后碳氮积累及根系特征的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2012, 43(4): 461-466.
- ZHAN Xiumei, LI Xiulong, HAN Xiaori, et al. Effects of subsoiling and straw-returning on yield and post-anthesis dry matter and nitrogen accumulation and root characteristics of spring maize[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2012, 43(4): 461-466. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(22): 181-188.
- YAN Lei, DONG Tianhao, LA Yuepeng, et al. Effects of no-tillage and straw returning on soil aggregates composition and organic carbon content in black soil areas of Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(22): 181-188. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张玉铭, 胡春胜, 陈素英, 等. 耕作与秸秆还田方式对碳氮在土壤团聚体中分布的影响[J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2021, 29(9): 1558-1570.
- ZHANG Yuming, HU Chunsheng, CHEN Suying, et al. Effects of tillage and straw returning method on the distribution of carbon and nitrogen in soil aggregates[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(9): 1558-1570. (in Chinese with English abstract)
- [16] 叶新新, 王冰清, 刘少君, 等. 耕作方式和秸秆还田对砂姜黑土碳库及玉米小麦产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(14): 112-118.
- YE Xinxin, WANG Bingqing, LIU Shaojun, et al. Influence of tillage and straw retention on soil carbon pool and maize-wheat yield in Shajiang black soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(14): 112-118. (in Chinese with English abstract)
- [17] 侯晓娜, 李慧, 朱刘兵, 等. 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[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(4): 705-712.
- HOU Xiaona, LI Hui, ZHU Liubing, et al. Effects of biochar and straw additions on Lime Concretion Black Soil aggregate composition and organic carbon distribution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(4): 705-712. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李玮, 尹广生, 陈冲, 等. 秸秆及其配施对黄灌区盐碱土壤团聚体结构、持水及收缩特性的影响[J/OL]. *农业资源与环境学报*:1-11[2024-04-11]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0625>.
- LI Wei, YIN Guangsheng, CHEN Chong, et al. Effects of straw and its application on aggregate structure, water holding capacity and shrinkage characteristics of saline-alkali soil in an irrigation area in the South bank of the Yellow River[J/OL]. *Journal of Agricultural Resources and Environment* 2024: 1-11[2024-04-11]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0625>. (in Chinese with English abstract)
- [19] 赵京考, 刘作新, 韩永俊. 土壤团聚体的形成与分散及其在农业生产上的应用[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(6): 163-166.
- ZHAO Jingkao, LIU Zuoxin, HAN Yongjun. Review on formation and dispersion of aggregates and their application in agriculture[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(6): 163-166. (in Chinese with English abstract)
- [20] WANG Y, WU P, QIAO Y, et al. The potential for soil C sequestration and N fixation under different planting patterns depends on the carbon and nitrogen content and stability of soil aggregates[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 897: 165430.
- [21] 李新悦, 李冰, 莫太相, 等. 长期秸秆还田对水稻土团聚体及氮磷钾分配的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(9): 3257-3266.
- LI Xinyue, LI Bing, MO Taixiang et al. Effects of long-term straw returning on distribution of aggregates and nitrogen, phosphorus, and potassium in paddy[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(9): 3257-3266. (in Chinese with English abstract)

- [22] 廖雅汶, 廖萍, 刘建秀, 等. 秸秆生物炭对红壤菜地土壤团聚体组成及其碳氮分布的短期效应[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2023, 44(5): 41-48.  
LIAO Yawen, LIAO Ping, LIU Jianxiu, et al. Short-term effects of straw biochar on the composition of soil aggregates and their carbon and nitrogen distribution in red soil vegetable fields[J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2023, 44(5): 41-48. (in Chinese with English abstract)
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] SOEPROBOWATI T R, SULARTO R B, HADIYANTO H, et al. The carbon stock potential of the restored mangrove ecosystem of Pasarbangi, Rembang, Central Java[J]. *Marine Environmental Research*, 2024, 193: 106257.
- [25] 冀保毅, 赵亚丽, 郭海斌, 等. 深耕和秸秆还田对不同质地土壤团聚体组成及稳定性的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(3): 65-70, 107.  
JI Baoyi, ZHAO Yali, GUO Haibin, et al. Effects of deep tillage and straw returning on different texture soils aggregate composition and stability[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(3): 65-70, 107. (in Chinese with English abstract)
- [26] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 627-643.  
LIU Yalong, WANG Ping, WANG Jingkuan. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3): 627-643. (in Chinese with English abstract)
- [27] 邓伟明, 唐梦天, 郭玉栋, 等. 生物炭与磷肥添加对红壤团聚体及其磷组分分布的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 352-363.  
DENG Weiming, TANG Mengtian, GUO Yudong, et al. Effects of biochar and phosphorus application on red soil aggregates and their phosphorus components distribution[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(2): 352-363. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李委涛, 李忠佩, 刘明, 等. 秸秆还田对瘠薄红壤水稻土团聚体内酶活性及养分分布的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3886-3895.  
LI Weitao, LI Zhongpei, LIU Ming, et al. Enzyme activities and soil nutrient status associated with different aggregate fractions of paddy soils fertilized with returning straw for 24 years[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20): 3886-3895. (in Chinese with English abstract)
- [29] 杨如意, 陈涛, 廖睿, 等. 耕作深度对植烟土壤理化特征及氨氧化微生物的影响[J]. 西南农业学报, 2023, 36(10): 2210-2216.  
YANG Ruyi, CHEN Tao, LIAO Rui, et al. Effects of tillage depth on physicochemical characteristics of tobacco-growing soil and ammonia-oxidizing microorganisms[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2023, 36(10): 2210-2216. (in Chinese with English abstract)
- [30] 胡鹏杰, 李柱, 吴龙华. 我国农田土壤重金属污染修复技术、问题及对策议[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(4): 535-542.  
HU Pengjie, LI Zhu, WU Longhua. Current remediation technologies of heavy metal polluted farmland soil in China: Progress, challenge and countermeasure[J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, 39(4): 535-542. (in Chinese with English abstract)
- [31] 安婉丽, 谢海云, 王维奇, 等. 秸秆还田对稻田土壤水稳性团聚体养分及其生态化学计量比的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1): 150-156.  
AN Wanli, XIE Haiyun, WANG Weiqi, et al. Effects of straw returning on nutrient content and ecological stoichiometric ratio of soil water-stable aggregates in paddy field[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(1): 150-156. (in Chinese with English abstract)
- [32] WANG D, ZHU Z, SHAHBAZ M, et al. Split N and P addition decreases straw mineralization and the priming effect of a paddy soil: A 100-day incubation experiment[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, 55(7): 701-712.
- [33] 田慎重, 王瑜, 张玉凤, 等. 旋耕转深松和秸秆还田增加农田土壤团聚体碳库[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 133-140.  
TIAN Shenzhong, WANG Yu, ZHANG Yufeng, et al. Residue returning with subsoiling replacing rotary tillage improving aggregate and associated carbon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(24): 133-140. (in Chinese with English abstract)
- [34] 李永贤, 周世永, 吴伯志. 耕作方式对玉米根系构型及抗根倒伏能力的影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(2): 112-120.  
LI Yongxian, ZHOU Shiyong, WU Bozhi. Effects of tillage methods on structure and lodging resistance of maize root[J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(2): 112-120. (in Chinese with English abstract)
- [35] YIN B, HU Z, WANG Y, et al. Effects of optimized subsoiling tillage on field water conservation and summer maize (*Zea mays* L.) yield in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 247: 106732.

## Effects of long-term deep tillage and straw return with biochar addition to lime concretion black soil on the aggregates and wheat-maize yield

HE Jiashuai , LI Xinmei , WEI Yuepeng , GUO Hangzhao , YANG Kangna , SUN Leikang , LI Xiaoyong ,  
JIA Xucun , LI Yuxia , LI Rongfa , WANG Qun<sup>\*</sup>

(1. College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China; 2. Henan Province Agro-ecosystem Field Observation and Research Station, Xiping 463900, China)

**Abstract:** Lime concretion black soil in the southern region of the Huang-Huai-Hai plain is known for its poor physical structure as a typical low-yield field. Although measures of deep tillage and straw return have been proved to be able to improve soil physical properties and soil fertility, there are still problems such as shallow tillage soil, weak fertility, high bulk density of the deeper soil, poor aggregate structural properties, serious stratification of the deeper soil, low crop yields and other problems, due to the long-term use of rotary tillage of wheat before sowing and no-tillage of maize and straw return tillage. It is important to adopt reasonable tillage practices and organic matter addition to improve the quality of lime concretion black soil. Therefore, in order to investigate the effects of the tillage practices, straw return to the field and biochar addition on the particle size structure distribution of soil aggregates, nutrient characteristics of aggregates, nutrient storage capacity and annual yield of wheat and maize, a long term localization experiment was set up with tillage and straw treatment at the Henan Province Agro ecosystem Field Observation and Research Station since 2014. After the year of 2020, the soils were supplemented with biochar. A three-factor, two-level experimental design was adopted, which consisted of tillage practices (conventional rotary tillage (CT), deep tillage (DT)), straw treatments (straw returned to the field (S), straw not returned to the field (NS)) and biochar addition (biochar addition (B), and no biochar addition (NB)), with a total of eight treatments. The results showed that rotary tillage without biochar addition significantly improved the stability of soil aggregates and soil nutrient stocks in the 0-15 cm soil layer, whereas deep tillage with straw significantly improved the composition of soil aggregates in the >15-30 cm soil layer, which enhanced soil fertility and promoted the increase of crop yield. The correlation analysis showed that the crop yield increase in the lime concretion black soil was more dependent on the improvement of soil physical structure and soil fertility in the deep layer (>15-30 cm). compared with CT-NS-NB (rotary tillage straw no return without biochar) treatment, Biochar addition, such as DT-S-B (deep tillage straw return with biochar addition) especially increased the stability of aggregates in the >15-30 cm layer, and increased the proportion of >2 mm aggregates, MWD and GMD values by 165.88%, 62.37% and 119.81%, respectively. DT-S-B treatment increased the organic carbon and nutrient preservation capacity of >2 mm aggregates and decreased the organic carbon and nutrient preservation capacity of <2 mm aggregates, and significantly increased the organic carbon storage, total nitrogen, total phosphorus and total potassium pools in the >15-30 cm soil layer 22.87%-23.03%. The treatment of DT-S-B contributed to an average increase of 22.96% in 2-year annual crop yield. Although the increased application of biochar was presented as having the function of improving soil structural properties and promoting soil fertility, it did not show a significant increase in crop yield, probably due to the short application time and small amount of addition. In sum, the application of biochar with deep tillage straw returned to the field significantly improved the particle size distribution and stability of deep soil aggregates in the lime concretion black soil of the southern Huang-Huai-Hai Plain, enhanced the soil fertility and the annual yield of wheat and maize, and ensured the efficient green and sustainable production of farmland.

**Keywords:** biochars; aggregates; tillage; straw return; nutrient preservation; black soil; yield