

华北平原长期秸秆还田潮土 土壤有机碳变化特征

刘学彤^{1,2}, 曹彩云^{1,2,3}, 党红凯^{1,2}, 马俊永^{1,2,3},
李科江^{1,2,3}, 郑春莲^{1,2}, 李月英⁴

(1. 河北省农林科学院旱作农业研究所, 河北 衡水 053000; 2. 国家土壤质量深州科学观测实验站, 河北 深州 052800;
3. 河北省农作物抗旱研究重点实验室, 河北 衡水 053000; 4. 衡水市气象局, 河北 衡水 053000)

摘要:为给华北平原潮土区制定合理的有机碳管理措施及提高土壤肥力提供科学依据,于1981—2021年在河北省农林科学院旱作农业研究所试验站开展长期定位试验,研究区种植制度为冬小麦-夏玉米轮作,共设置5个处理,分别为不施肥对照(CK)和无机肥施用条件下4个不同秸秆还田量处理(S0:0 kg·hm⁻², S2250:2 250 kg·hm⁻², S4500:4 500 kg·hm⁻², S9000:9 000 kg·hm⁻²),2021年玉米收获后分析不同秸秆还田量下0~20 cm土层土壤有机碳含量,同时利用40 a数据分析土壤有机碳含量的变化,建立作物产量与土壤有机碳含量之间的关系。结果表明:秸秆还田40 a后不同施肥处理土壤有机碳含量均高于CK,增幅为21.91%~50.33%;而S2250、S4500和S9000处理土壤有机碳含量随秸秆还田量的增加逐渐增加,处理间差异未达显著水平。长期耕作与施肥均可增加土壤有机碳储量,各处理耕层土壤有机碳储量较40年前增长13.64~24.50 t·hm⁻²;有机碳平均固持速率也随秸秆还田量的增加而逐渐增加,S9000处理达到0.61 t·hm⁻²·a⁻¹,较S0处理显著提高45.2%。综上,施用化肥配合长期秸秆还田可以增加潮土区表层土壤有机碳含量,提升土壤固碳速率。

关键词:秸秆还田;潮土;有机碳;固碳速率;作物产量

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A

Changes in soil organic carbon under long-term straw incorporation in fluvo-aquic soil of the North China Plain

LIU Xuetong^{1,2}, CAO Caiyun^{1,2,3}, DANG Hongkai^{1,2}, MA Junyong^{1,2,3},
LI Kejiang^{1,2,3}, ZHENG Chunlian^{1,2}, LI Yueying⁴

(1. Dryland Farming Institute of Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Hengshui, Hebei 053000, China;
2. National Soil Quality Shenzhou Scientific Observation and Experimental Station, Shenzhou, Hebei 052800, China;
3. The Key Laboratory of Crop Drought-Resistance Research of Hebei Province, Hengshui, Hebei 053000, China;
4. Hengshui Meteorological Service, Hengshui, Hebei 053000, China)

Abstract: To establish a scientific foundation for optimizing soil organic carbon and enhancing fluvo-aquic soil fertility, a long-term field experiment on the winter wheat-summer maize rotation system was conducted from 1981 to 2021 in the North China Plain. A total of 5 treatments including no-fertilizer control (CK) and maize straw incorporation at rates of 0 kg·hm⁻² (S0), 2 250 kg·hm⁻² (S2250), 4 500 kg·hm⁻² (S4500) and 9 000 kg·hm⁻² (S9000) combined with inorganic fertilizers were set up. Soil samples (0~20 cm) were collected to study the changes of soil organic carbon content in each plot after maize harvest in 2021. The changes of soil organic carbon in 40 years were analyzed and the relationship between crop yield and soil organic carbon content was simulated. The results showed that after 40 years of straw incorporation, the organic carbon contents were increased by 21.91%

收稿日期:2024-05-06

修回日期:2024-09-04

基金项目:河北省农林科学院创新工程课题(2022KJCXZX-HZS-9);河北省现代农业产业技术体系衡水小麦玉米综合试验推广站项目
作者简介:刘学彤(1991-),女,河北平山人,助理研究员,主要从事土壤肥力培育和养分资源利用研究。E-mail:liuxuetong349@163.com

通信作者:郑春莲(1979-),女,辽宁盖州人,副研究员,主要从事土壤肥力培育研究。E-mail:nkzheng@126.com

李月英(1967-),女,河北武邑人,高级工程师,主要从事气象信息与农业生产研究。E-mail:23200223041@qq.com

~50.33% in other fertilizers treatments compared with CK. The organic carbon content in the S2250, S4500, and S9000 treatments gradually increased with the amount of straw incorporation, however, no significant differences were observed among them. Long-term cultivation and fertilization increased soil organic carbon storage. After 40 years, the soil organic carbon storage in each treatment increased by 13.64~24.50 t·hm⁻². The average carbon sequestration rate also gradually increased with the increase in straw incorporation, and it reached 0.61 t·hm⁻²·a⁻¹ in the S9000 treatment, which was increased 45.2% than S0 treatment. In conclusion, long-term straw incorporation promotes surface soil organic carbon accumulation and improves soil carbon sequestration rate in fluvo-aquic soil.

Keywords: straw incorporation; fluvo-aquic soil; organic carbon; carbon sequestration rate; crop yield

土壤有机碳是评价土壤质量和肥力的核心因子^[1],其含量对维持和保障农田生产力稳定持续输出具有关键作用^[2]。农田管理对土壤有机碳库具有调节作用,增施有机肥、有机无机肥配施、秸秆还田等合理有效的农业管理措施均可以增加农田土壤有机碳的固定^[3]。作物秸秆中含有丰富的C、N、P、K等营养元素,将其还田能够有效提高土壤有机碳含量^[4-5],秸秆还田措施多年来受到高度重视并大力推广^[6],一定程度上不仅改善了土壤质量,也减少了肥料投入,提高了肥料利用率,在保障粮食安全和促进农业可持续发展方面发挥重要作用。研究表明,自1980年以来,我国农田土壤有机碳含量处于增长状态^[7-9]。黄耀等^[10]估算,我国农田1980年至20世纪初总的碳汇效应达311.3~401.4 Tg。张婧婷等^[11]模拟研究表明,1981—2019年华北平原农田0~20 cm土层土壤有机碳储量约为523.10 Tg,并以5.94 Tg·a⁻¹的固持速率稳步增长。众多研究表明外源物料(作物秸秆、有机肥等有机物料)的投入是提升土壤有机碳最直接有效的途径^[4,12],其中秸秆还田等直接碳投入也被认为是主要措施^[13]。有报道指出,施用肥料和推行秸秆还田等措施促使安徽省1980—2010年近30年耕地土壤有机碳含量增加^[14]。Zhao等^[15]研究表明,1980—2011年我国农田表层土壤有机碳储量的平均增长速率为140 kg·hm⁻²·a⁻¹,其中秸秆还田的贡献约为40%。赵雅雯等^[16]利用RothC模型模拟发现,在华北潮土区小麦玉米轮作体系中,玉米秸秆全量还田下小麦根系、玉米根系、玉米秸秆对土壤表层新形成的有机碳的贡献率分别为50%、22%和28%。也有研究表明,农田土壤有机碳水平及其稳定性对作物稳产高产有积极作用^[17-18]。Oldfield等^[19]研究发现,土壤有机碳含量从1.0%提升到2.0%可以使小麦和玉米分别增产55.4%和23.0%。华北平原是我国的粮食主产区,其低平原区拥有大面积的中低产田,约占该地区耕地总面积的1/2,农田土壤肥力下降成为制约该区粮食生产的障碍因

素,如何快速培肥这些中低产田是保证粮食产量稳步提高的关键。

近年来,作为提高土壤有机质含量和改善土壤质量的重要措施,秸秆还田已在河北省低平原区全面普及。但秸秆还田后农田土壤有机碳的积累、碳汇持续性等机制尚不清楚,土壤有机碳的变化与作物产量的可持续增长成为秸秆还田后土壤碳汇功能和作物稳产增产研究中的重点内容。因此,本研究利用华北平原潮土区40 a长期田间定位试验,分析玉米不同秸秆还田量下土壤耕层有机碳的变化及其和作物产量的关系,以期探究秸秆还田下农田生产过程中土壤有机碳的响应和变化趋势,同时为该区秸秆还田后土壤肥力评价和土壤碳汇变化预测提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

肥料长期定位试验田位于河北省农林科学院旱作农业研究所衡水深州节水农业试验站(37°53'N,115°42'E)。该区属于暖温带大陆性季风气候,年平均气温12.4℃,年平均降水量550 mm,降水集中在6—9月。供试土壤为壤质底粘潮土,试验开始前0~20 cm土层土壤的基本理化性状为pH值8.7,有机质含量11.5 g·kg⁻¹,全氮0.83 g·kg⁻¹,全磷1.03 g·kg⁻¹,全钾20.31 g·kg⁻¹,碱解氮51.3 mg·kg⁻¹,速效磷12.3 mg·kg⁻¹,速效钾109.8 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验始于1981年,设不施肥对照(CK)和N 360 kg·hm⁻²+P₂O₅ 240 kg·hm⁻²化肥用量下的不同玉米秸秆还田量处理(S0:0 kg·hm⁻²,S2250:2 250 kg·hm⁻²,S4500:4 500 kg·hm⁻²,S9000:9 000 kg·hm⁻²),共5个处理,采用随机区组设计,每个处理3次重复,小区面积33.75 m²(7.5 m×4.5 m)。其中,1981—1998年为每6 a一个试验周期,前3年按试验方案进行施肥和秸秆还田,后3年不进行施肥和秸秆还田;1999—2021年每年均按试验方案施用肥

料和玉米秸秆,施肥方案时间序列如图 1 所示。种植制度为冬小麦-夏玉米轮作,小麦生育时期为每年的 10 月下旬至次年 6 月上旬,玉米生育时期为每年的 6 月中下旬至 10 月上旬。1981—1993 年小麦收获后秸秆全部移出田间,1994—2021 年小麦留茬收获,参考 Di 等^[20]的研究中小麦留茬占秸秆生物量的比例 18% 计算,利用多年籽粒产量及籽粒与秸秆的比例估算,CK 处理每年小麦残茬量约为 $268 \sim 1\,264 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其余处理每年小麦残茬量约为 $846 \sim 2\,280 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,玉米收获后将残茬翻耕入土。

肥料施用方法:每年玉米收获后按试验设计计算各小区玉米秸秆还田量,原小区秸秆量不足时,利用附近小区玉米秸秆进行补充,粉碎后旋耕到土壤中。磷肥(2019 年之前为磷酸二铵和过磷酸钙,之后全部为过磷酸钙)在每年 10 月小麦播种整地前全部撒施后旋耕到土壤中。氮肥为冬小麦、夏玉米季各半,均为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;其中小麦季氮肥基肥和追肥比例为 1:1,基肥(2019 年之前为磷酸二铵和尿素,之后全部为尿素)同磷肥一起撒施,然后旋耕到土壤中,追肥(尿素)在拔节期撒施后浇水;玉米季氮肥(尿素)全部用作追肥,在大喇叭口期撒施后浇水。其他管理同一般大田。

1.3 样品采集与分析

于每年小麦成熟期,各小区随机选取长势均匀的 3 个 1 m^2 样方小麦进行收获,风干后脱粒称重,计算小麦单位面积籽粒产量;玉米成熟期,取 2 个 ($5 \text{ m} \times 2 \text{ 行}$) 样方调查小区穗数后计算公顷穗数,每

小区随机连续取 40 穗玉米收获,风干后脱粒称重,折合 14% 含水量计算玉米产量。

在每年玉米收获后,各小区采集 3 个样点的 0~20 cm 耕层土壤,混合均匀后带回实验室自然风干,研磨过筛测定土壤有机碳含量。土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定^[21]。

1.4 指标计算方法

土壤有机碳储量 (SOC , $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 计算公式如下:

$$\text{SOC} = \text{OC} \times \text{BD} \times H/10 \quad (1)$$

式中,OC 为单层土壤有机碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$);BD 为单层土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);H 为土层深度 (cm)。

土壤有机碳的固持速率 (SOC_{SR} , $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 计算公式如下:

$$\text{SOC}_{\text{SR}} = \Delta \text{SOC} / n \quad (2)$$

$$\Delta \text{SOC} = \text{SOC}_t - \text{SOC}_0 \quad (3)$$

式中, SOC_t 为处理土壤有机碳储量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); SOC_0 为供试前土壤有机碳储量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); ΔSOC 为有机碳储量的增加量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$);n 为外源有机碳输入的累积年份 (a)。

1.5 数据处理

利用 Excel 2013 进行数据整理和作图,使用 SPSS 22.0 进行方差分析,所有数据以平均值表示。处理间差异性检验采用 LSD 法。利用线性回归方程进行土壤有机碳含量和试验年限的相关性分析,以及土壤有机碳含量和作物产量的相关性分析。

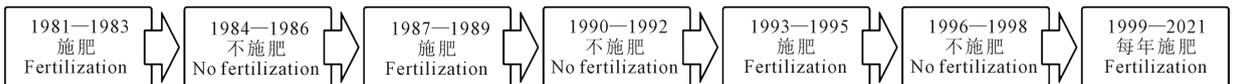


图 1 施肥方案时间序列

Fig.1 Time series of fertilization

2 结果与分析

2.1 长期秸秆还田下 0~20 cm 土层土壤有机碳含量变化

长期定位不同施肥处理 1981—2021 年 0~20 cm 土层土壤有机碳含量如图 2 所示。在 1999 年之前,各处理土壤有机碳的增加幅度较小,将土壤有机碳含量和试验年限做线性回归方程进行拟合可以发现,各处理的土壤有机碳含量变化较小(表 1),随着年限增加不施肥处理(CK)土壤有机碳含量降低,在此阶段耕层土壤有机碳含量变化范围为 $5.8 \sim 7.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;其余施肥处理土壤有机碳含量均表

现为前 3 年施肥时增加,后 3 年不施肥时又降低。1999 年后,按方案连续逐年进行施肥与秸秆还田,各处理土壤有机碳含量呈逐渐增加趋势,CK 的耕层土壤有机碳含量增加速率为 $0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$;其余施肥处理中以 S9000 处理土壤有机碳含量的增加速率最大,为 $0.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,S0、S2250 和 S4500 处理的土壤有机碳含量增加速率分别为 0.20 、 $0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

由表 2 可知,经过 40 年,不同施肥处理土壤有机碳含量均显著高于 CK,增幅为 21.91%~50.33%;各施肥处理中,仅 S9000 处理的土壤有机碳含量显著高于 S0,增幅为 23.31%;在 S2250、S4500 和

S9000 处理下,土壤有机碳含量随秸秆还田量的增加逐渐增加,但处理间差异未达显著水平。表明华北潮土农田长期施肥可以增加土壤有机碳含量,且高秸秆还田量对土壤有机碳含量的增加效果更佳。

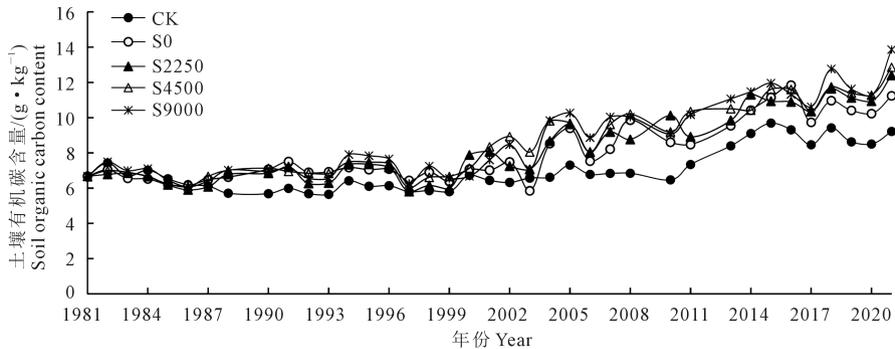
2.2 长期秸秆还田对 0~20 cm 土层土壤有机碳储量及固碳速率的影响

由表 3 可知,经过 40 a 的耕作与施肥,试验区耕层土壤有机碳储量有大幅度提升。与试验前相比,CK 处理土壤有机碳储量增长 96.4%,表明耕作可以增加土壤有机碳含量;其余施肥处理中,随秸秆还田量的增加,土壤有机碳储量以及有机碳储量的变化量均呈逐渐增加趋势,其中 S9000 处理土壤

有机碳储量较 S0 处理显著提高 25.7%。各处理的平均固碳速率同样表现为随秸秆还田量的增加而逐渐增加,CK 处理的固碳速率为 $0.34 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,而 S9000 处理达到 $0.61 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,后者较前者显著提高 79.4%;除高量还田处理外,其余不同秸秆还田量处理间固碳速率差异不显著。

2.3 长期秸秆还田土壤有机碳含量与作物产量的关系

由前文结果可知,土壤有机碳含量快速增加始于 1999 年逐年施肥,因此针对 2001—2021 年的作物产量进行分析。如图 3 和图 4 所示,全年作物产量年际间均出现不同程度波动,但整体处于上升趋势



注:1989、2009 年和 2012 年土样丢失。

Note: Soil samples in the years of 1989, 2009 and 2012 were lost.

图 2 不同处理 0~20 cm 土层土壤有机碳含量变化

Fig.2 Changes of soil organic carbon content of different treatments in 0~20 cm layer

表 1 土壤有机碳含量与试验年限的相关性分析

Table 1 Correlations of soil organic carbon content with experiment year

处理 Treatment	拟合方程 (1999 年前) Fitting formula (Before 1999)	R^2	拟合方程 (1999 年后) Fitting formula (After 1999)	R^2
CK	$y = -0.0613x + 6.7487$	0.4876	$y = 0.1533x + 3.2286$	0.7581
S0	$y = 0.0173x + 6.604$	0.0736	$y = 0.2065x + 3.0855$	0.7293
S2250	$y = -0.0068x + 6.6339$	0.0059	$y = 0.2068x + 3.5483$	0.8342
S4500	$y = 0.0129x + 6.6985$	0.0311	$y = 0.1941x + 4.3358$	0.8047
S9000	$y = 0.0161x + 6.7958$	0.0294	$y = 0.2415x + 3.0806$	0.7864

表 2 2021 年不同处理 0~20 cm 土层土壤有机碳含量

Table 2 Soil organic carbon content of different treatments in 0~20 cm layer in 2021

处理 Treatment	有机碳含量 Soil organic carbon content/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	$9.22 \pm 0.52c$
S0	$11.24 \pm 0.49b$
S2250	$12.40 \pm 1.08ab$
S4500	$12.86 \pm 1.86ab$
S9000	$13.86 \pm 0.05a$

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column mean significantly differences at $P < 0.05$ level. The same below.

表 3 2021 年 0~20 cm 土层土壤有机碳储量及固碳速率

Table 3 Soil organic carbon storage and carbon sequestration rate in 0~20 cm layer in 2021

处理 Treatment	土壤有机碳储量 Soil organic carbon storage/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	累积玉米秸秆投入量 Accumulated maize straw input/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	土壤有机碳储量变化 Change of soil organic carbon storage/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	固碳速率 Carbon sequestration rate/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
试验前 The initial soil	14.15	0		
CK	$27.79 \pm 2.25b$	0	$13.64 \pm 2.25b$	$0.34 \pm 0.06b$
S0	$30.75 \pm 1.16b$	0	$16.60 \pm 1.16b$	$0.42 \pm 0.03b$
S2250	$33.03 \pm 2.77ab$	67.5	$18.88 \pm 2.77ab$	$0.47 \pm 0.07ab$
S4500	$34.18 \pm 6.81ab$	135.0	$20.03 \pm 6.81ab$	$0.50 \pm 0.17ab$
S9000	$38.65 \pm 0.72a$	270.0	$24.50 \pm 0.72a$	$0.61 \pm 0.02a$

势。CK 处理小麦和玉米产量均显著低于其他施肥处理,其 2001—2021 年小麦产量为 555.0~2 617.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,玉米产量为 742.5~6 750.0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;秸秆还田下 S9000 处理小麦产量和玉米产量最高,2001—2021 年两作物产量分别较其余还田处理提高 1.9%~6.4% 和 2.7%~5.5%;整体上各施肥处理间作物产量无显著差异,表明在化肥施用量相同时,秸秆还田量对作物产量的影响较小。将全年作物产量和土壤有机碳含量进行拟合(图 5)发现,两者关系符合线性增长模型。

3 讨论

3.1 华北农田长期秸秆还田提高土壤有机碳效果显著

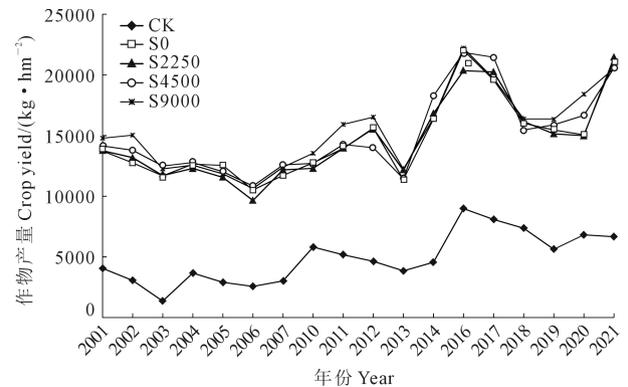
本研究中,不同施肥措施下耕层土壤有机碳含量介于 9.22~13.86 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,与我国农田耕层土壤有机碳的平均含量(0~30 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[22] 相比偏低,与欧美等发达国家 25~40 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的水平更是差距甚远^[23],土壤肥力较低,土壤有机质提升潜力巨大。因此,培肥地力、提高农田土壤有机碳水平、确保土壤肥力稳步提升,是维持我国农业可持续发展的关键环节。

土壤有机碳的周转是一个复杂而漫长的地球化学过程,受气候、种植制度、耕作等人为活动的影响^[24-25]。本研究中,1981—1999 年土壤有机碳含量变化较平稳,1999 年后其含量逐渐增加,这主要是因为外源有机物料投入和施肥方式不同,1999 年之前施肥方式为 6 a 一个周期,即前 3 年施肥(化肥和秸秆),后 3 年不施肥,1999 年后进行连续施肥(化肥和秸秆),秸秆作为外源碳直接投入到土壤中,而

施用化肥可增加作物生物量,根系等残留物增加,均有利于提高表层土壤有机碳含量。外源有机物料投入量同样影响土壤有机碳含量,王学霞等^[26] 研究发现,在华北麦玉轮作系统中,随秸秆还田量的增加,土壤总有机碳含量呈逐渐增加趋势。本研究也得到相似结论,在高秸秆还田量(9 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 处理下,土壤有机碳含量增加较快,增加速率为 0.24 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,固碳速率达到 0.61 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

3.2 秸秆还田农田土壤有机碳水平与作物产量协同提升

土壤有机碳是表征土壤肥力的核心因子,其含量对维持和保障农田生产力具有重要作用。本研究中,土壤有机碳含量与全年作物产量存在线性正相关关系,关系式为 $y = 2175.6x - 7551.6$ ($R^2 = 0.5514$)。黄少辉等^[27] 利用边界线和线性加平台模型分析发现,华北潮土区土壤有机碳含量处于较低

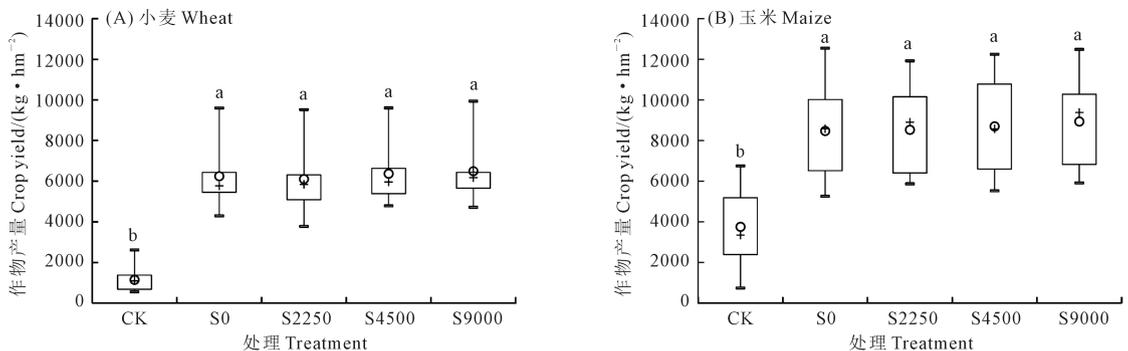


注:2008、2009、2015 年数据丢失。

Note: The data in the years of 2008, 2009 and 2015 were lost.

图 3 2001—2021 年不同处理全年作物产量变化

Fig.3 Change of crop yield in different treatments in 2001—2021



注:箱式图矩形盒中“+”代表中值,“○”代表平均值,下四分位数(矩形盒下边缘)和上四分位数(矩形盒上边缘)分别代表全部数据的 25% 和 75%,下边缘线和上边缘线分别代表最小值和最大值。图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: The “+” represent the median, the “○” represent the mean, the lower quartile (rectangular box edge) and the upper quartile (the upper edge of the rectangular box) represent 25% and 75% of all data respectively. The lower edge and the upper edge of line represent the minimum and maximum value respectively. Different lowercase letters mean significantly difference between treatments ($P < 0.05$).

图 4 2001—2021 年间不同处理小麦产量和玉米产量的变化

Fig.4 Changes of wheat yield and maize yield of different treatments in 2001—2021

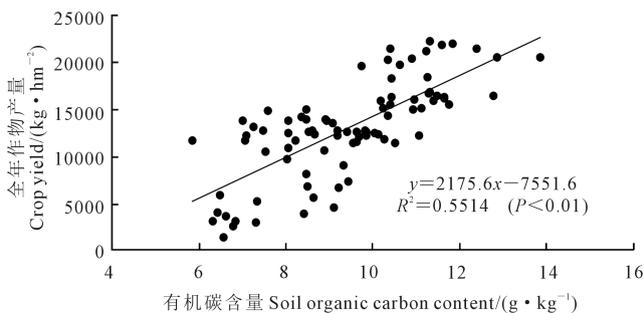


图5 全年作物产量与土壤有机碳含量的关系

Fig.5 Relationship between the changes of crop yield and soil organic carbon content

水平时,土壤有机碳含量每提高 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,小麦和玉米产量分别提高 $167.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $678.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。张旭博^[28]通过估算发现,我国北方地区农田土壤有机碳每增加 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,玉米产量可增加 $0.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,小麦产量增加 $0.96 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。土壤有机碳含量提高对产量的提升效果与研究区域、气候、土壤类型、耕作、管理措施等有很大关系^[29]。徐明岗等^[13]研究发现,农田土壤有机碳与作物增产协同效应存在一定的阈值,华北地区约为 $22 \sim 28 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,农田土壤每固定碳 $1.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,作物产量可平均提升约 $0.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,同样受环境和农田管理措施等因素的影响。本研究中,随施肥和秸秆还田年限的延长,全年作物产量整体呈上升趋势,仅在特殊年份因气候原因有轻微波动。作物产量的增加一方面是因为新品种和新技术的改良^[30],另一方面是因为秸秆还田后土壤有机碳含量逐步提升,土壤固碳量与作物增产的协同效应明显。

4 结 论

1) 长期秸秆还田可显著提高土壤有机碳储量,各处理土壤有机碳储量较试验初期增长 $13.64 \sim 24.50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $9000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 还田量处理较 $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 还田量处理土壤有机碳含量显著增加 23.31% ,其余不同还田量处理间差异不显著。

2) 土壤有机碳的平均固持速率随秸秆还田量的增加逐渐增加,不施肥处理和4个秸秆还田处理的平均固碳速率分别为 0.34 、 0.42 、 0.47 、 0.50 、 $0.61 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $9000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 还田量处理较 $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 还田量处理平均固碳速率显著提高 45.2% 。

3) 长期秸秆还田可一定程度提高作物产量,2001—2021年, $9000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 还田量处理小麦和玉米产量分别较其余还田处理提高 $1.9\% \sim 6.4\%$ 和 $2.7\% \sim 5.5\%$;拟合结果表明土壤有机碳含量增加对作物产量有一定促进作用。

参 考 文 献:

- [1] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] 邹文秀, 邱琛, 韩晓增, 等. 长期施用有机肥对黑土土壤肥力和玉米产量的影响[J]. 土壤与作物, 2020, 9(4): 407-418. ZOU W X, QIU C, HAN X Z, et al. Effects of long-term manure application on black soil fertility and maize yield[J]. Soils and Crops, 2020, 9(4): 407-418.
- [3] 徐明岗, 张文菊, 杨学云. 农田土壤有机质提升理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2022. XU M G, ZHANG W J, YANG X Y. The theory and practice of agricultural soil organic matter elevation[M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [4] LU F, WANG X K, HAN B, et al. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland[J]. Global Change Biology, 2009, 15(2): 281-305.
- [5] 陈鲜妮, 岳西杰, 葛玺祖, 等. 长期秸秆还田对壤土耕层土壤有机碳库的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(1): 25-32. CHEN X N, YUE X J, GE X Z, et al. Effect of long-term residue return on soil organic carbon storage[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(1): 25-32.
- [6] 崔新卫, 张杨珠, 吴金水, 等. 秸秆还田对土壤质量与作物生长的影响研究进展[J]. 土壤通报, 2014, 45(6): 1527-1532. CUI X W, ZHANG Y Z, WU J S, et al. Research progress on the effects of returning straw to fields on soil quality and crop growth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(6): 1527-1532.
- [7] 徐艳, 张凤荣, 汪景宽, 等. 20年来我国潮土区与黑土区土壤有机质变化的对比研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(2): 102-105. XU Y, ZHANG F R, WANG J K, et al. Temporal changes of soil organic matter in Ustic Cambisols and udic Isohumosols of China in recent twenty years[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(2): 102-105.
- [8] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家安全[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 384-393. PAN G X, ZHAO Q G. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: facing the challenge of global change and food security[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(4): 384-393.
- [9] 康日峰, 任意, 吴会军, 等. 26年来东北黑土区土壤养分演变特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(11): 2113-2125. KANG R F, REN Y, WU H J, et al. Changes in the nutrients and fertility of black soil over 26 years in Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(11): 2113-2125.
- [10] 黄耀, 孙文娟. 近20年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势[J]. 科学通报, 2006, 51(7): 750-763. HUANG Y, SUN W J. Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(7): 750-763.
- [11] 张婧婷, 石浩, 田汉勤, 等. 1981—2019年华北平原农田土壤有机碳储量的时空变化及影响机制[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9560-9576. ZHANG J T, SHI H, TIAN H Q, et al. Spatial-temporal changes in and influencing mechanisms for cropland soil organic carbon storage in the North China Plain from 1981 to 2019[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9560-9576.
- [12] 武红亮. 秸秆和养分综合管理下黑土的固碳效应及机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.

- WU H L. The mechanism of carbon sequestration in black soil under integrated management of straw and nutrients[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [13] 徐明岗, 张旭博, 孙楠, 等. 农田土壤固碳与增产协同效应研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1441-1449.
- XU M G, ZHANG X B, SUN N, et al. Advance in research of synergistic effects of soil carbon sequestration on crop yields improvement in croplands[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(6): 1441-1449.
- [14] 赵明松, 李德成, 王世航. 近 30 年安徽省耕地土壤有机碳变化及影响因素[J]. 土壤学报, 2018, 55(3): 595-605.
- ZHAO M S, LI D C, WANG S H. Variation of soil organic carbon in farmland of Anhui and its influencing factors in the 30 years from 1980 to 2010[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(3): 595-605.
- [15] ZHAO Y C, WANG M Y, HU S J, et al. Economics- and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4045-4050.
- [16] 赵雅雯, 王金洲, 王士超, 等. 潮土区小麦、玉米残体对土壤有机碳的贡献——基于改进的 RothC 模型[J]. 中国农业科学, 2016, 49(21): 4160-4168.
- ZHAO Y W, WANG J Z, WANG S C, et al. Contributions of wheat and corn residues to soil organic carbon under fluvo-aquic soil area — based on the modified RothC model[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(21): 4160-4168.
- [17] PAN G X, SMITH P, PAN W N. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 129(1/3): 344-348.
- [18] 任其然, 邓丽娟, 焦小强. 华北平原潮质土壤协同实现有机碳提升, 粮食增产稳产的途径——以曲周县为例[J]. 中国土壤与肥料, 2021, (1): 310-318.
- REN Q R, DENG L J, JIAO X Q. Approaches to the organic carbon enhancement and grain yield stability in North China Plain based on the coordination of tidal soils: a case study of Quzhou County[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2021, (1): 310-318.
- [19] OLDFIELD E E, BRADFORD M A, WOOD S A. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields[J]. Soil, 2019, 5(1): 15-32.
- [20] DI J Y, XU M G, ZHANG W J, et al. Combinations of soil properties, carbon inputs and climate control the saturation deficit dynamics of stable soil carbon over 17-year fertilization[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 12653.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [22] SUN W J, Huang Y, Zhang W, et al. Carbon sequestration and its potential in agricultural soils of China[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2010, 24(3): 1154-1157.
- [23] BOND-LAMBERTY B, THOMSON A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. Nature, 2010, 464(7288): 579-582.
- [24] 姜勇, 庄秋丽, 梁文举. 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2007, 26(2): 278-285.
- JIANG Y, ZHUANG Q L, LIANG W J. Soil organic carbon pool and its affecting factors in farmland ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(2): 278-285.
- [25] 许信旺, 潘根兴, 汪艳林, 等. 中国农田耕层土壤有机碳变化特征及控制因素[J]. 地理研究, 2009, 28(3): 601-612.
- XU X W, PAN G X, WANG Y L, et al. Research of changing characteristics and control factors of farmland topsoil organic carbon in China[J]. Geographical Research, 2009, 28(3): 601-612.
- [26] 王学霞, 张磊, 梁丽娜, 等. 秸秆还田对麦玉系统土壤有机碳稳定性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1774-1782.
- WANG X X, ZHANG L, LIANG L N, et al. Effects of straw returning on the stability of soil organic carbon in wheat-maize rotation systems[J]. Journal of Agro-environment Science, 2020, 39(8): 1774-1782.
- [27] 黄少辉, 杨军芳, 杨云马, 等. 长期不同施肥措施下华北潮土土壤有机碳的固存变化[J]. 华北农学报, 2019, 34(增刊 1): 168-175.
- HUANG S H, YANG J F, YANG Y M, et al. Soil organic carbon sequestration under long term fertilization practices in fluvo-aquic soil of North China plain[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(S1): 168-175.
- [28] 张旭博. 中国农田土壤有机碳演变及其增产协同效应[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- ZHANG X B. The synergistic effects of evolution of soil organic carbon on increment of crop yield in arable land in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [29] ZHANG X B, SUN N, WU L H, et al. Effects of enhancing soil organic carbon sequestration in the topsoil by fertilization on crop productivity and stability: Evidence from long-term experiments with wheat-maize cropping systems in China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 562: 247-259.
- [30] 王进慧. 小麦增产潜力及影响因素研究——以山东省为例[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- WANG J H. Research on the wheat potential yield and its influential factors—a case study of Shandong Province[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.