

长期秸秆还田显著降低褐土底层有机碳储量

徐虎^{1,2}, 蔡岸冬⁴, 周怀平^{3*}, Colinet Gilles², 张文菊¹, 徐明岗^{1*}

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2 Gembloux Agro-Bio Tech, University of Liege, Passage des deportes 2, Gembloux 5030, Belgium; 3 山西农业大学资源环境学院, 太原 030031; 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: 【目的】秸秆还田作为一种有效的培肥方式, 对土壤固碳效果显著, 但对于深层土壤有机碳的影响还存在不确定性。分析不同秸秆还田方式下褐土剖面土壤有机碳 (SOC) 储量变化, 为褐土区秸秆还田措施优化和固碳减排等提供科学依据。【方法】长期秸秆还田试验开始于 1992 年, 采用裂区设计, 主区为化肥春季和秋季施用, 副区为 4 个秸秆还田处理: 秸秆不还田 (CK)、秸秆覆盖还田 (SM)、秸秆粉碎后直接还田 (SC) 和秸秆过腹还田 (CM)。在 2013 年春玉米收获后采集 0—100 cm 土层土壤样品, 分析不同秸秆还田方式下 SOC 和土壤养分含量。【结果】在春季和秋季施肥下, 与 CK 相比, CM、SM 和 SC 处理表层 (0—20 cm) SOC 含量显著提高, 而 SM 和 SC 处理 40—60 和 80—100 cm SOC 含量显著降低。同时, 与 CK 处理相比各处理 SOC 储量变化量在处理间存在显著差异。在春季和秋季施肥下, 与 CK 相比, SM、SC 和 CM 处理表层 SOC 储量平均分别增加 2.32、5.42 和 12.60 t/hm², 且 CM 处理显著高于 SM 和 SC 处理; 而在底层 (40—100 cm) 平均分别降低 3.98、6.99 和 3.76 t/hm²; 0—100 cm, CM 处理 SOC 储量增加 9.62 t/hm², 而 SM 和 SC 处理平均分别降低 1.81 和 5.36 t/hm²。冗余分析结果表明, 有机碳输入和土壤养分对表层碳储量变化的总解释率为 90.10%, 而对下层 (20—100 cm) 的总解释率仅为 31.80%。其中, 影响表层碳储量变化的主要因子是有效磷 (解释率为 80.10%), 而下层则是全氮 (25.28%)。【结论】在施用化肥基础上, 长期秸秆还田促进表层碳累积, 但底层氮素供应不足引起碳耗竭。总体上, 秸秆过腹还田是褐土区农田培肥和增产的最优秸秆还田方式。

关键词: 褐土; 长期试验; 秸秆还田; 底层土壤; 有机碳耗竭

Long-term straw incorporation significantly reduced subsoil organic carbon stock in cinnamon soil

XU Hu^{1,2}, CAI An-dong⁴, ZHOU Huai-ping^{3*}, Colinet Gilles², ZHANG Wen-ju¹, XU Ming-gang^{1*}

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences / National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing, 100081, China; 2 Gembloux Agro-Bio Tech, University of Liege, Passage des deportes 2, Gembloux 5030, Belgium; 3 College of Natural Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China; 4 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: 【Objectives】Straw incorporation, as an effective fertilization mode, has a significant effect on soil organic stock (SOC) sequestration in the surface soil, but its effect in the deep soil is still uncertain. We studied SOC stock change of the soil profile in cinnamon soil under different straw incorporation methods to provide a scientific basis for optimizing straw incorporation practices. 【Methods】The long-term field experiment of straw incorporation was started in 1992. A split plot design was used, with the main plots under chemical fertilizer application season (spring and autumn), while subplots were subjected to four straw incorporation modes [No straw incorporation (CK), direct straw mulching (SM), straw incorporation after crushing (SC), and

收稿日期: 2021-04-02 接受日期: 2021-05-07

基金项目: 国家自然科学基金国际合作重点项目 (41620104006); 山西省重点研发计划重点项目 (201703D211002-3)。

联系方式: 徐虎 E-mail: xuhu1107@163.com

*通信作者 周怀平 E-mail: huaipingzhou@126.com; 徐明岗 E-mail: xuminggang@caas.cn

cattle manure produced by equal amount of straw (CM)]. After the spring maize harvest in 2013, the samples of 0–100 cm soil profile were collected to study the changes of SOC and nutrient content under different straw incorporation modes. **【 Results 】** Regardless of the chemical fertilization season, SM, SC, and CM treatments significantly increased SOC content in 0–20 cm layer, while SM and SC treatments significantly decreased SOC content in 40–60 cm and 80–100 cm relative to the CK treatment. The SOC stock change in soil layers was significantly different among straw incorporation methods. Compared with CK, SOC stock in SM, SC, and CM treatments increased by 2.32, 5.42, and 12.60 t/hm² in the 0–20 cm soil, respectively, but decreased by 3.98, 6.99, and 3.76 t/hm² in the 40–100 cm layer, respectively. The increment of SOC stock in 0–20 cm layer under CM treatment was significantly higher than those under SM and SC treatments. Compared with CK, CM treatment increased SOC stock in 0–100 cm by 9.62 t/hm², while SM and SC treatments decreased SOC stock in 0–100 cm by 1.81 and 5.36 t/hm². Redundancy analysis showed that cumulative carbon input and soil nutrient explained 90.10% and 31.80% of SOC stock change in 0–20 cm and 20–100 cm layer, respectively. The main factor determining SOC stock change in 0–20 cm soil depth was available P (80.10%) and in 20–100 cm soil depth was total N (25.28%). **【 Conclusions 】** Long-term straw incorporation promoted soil organic carbon accumulation in surface soil by increasing carbon input and soil nutrients, but led to soil organic carbon depletion due to insufficient nitrogen supply below the surface soil. Cattle manure was the optimal mode of straw incorporation to improve fertility and crop yield in cinnamon soil.

Key words: cinnamon soil; long-term experiment; straw incorporation; subsoil; soil organic carbon depletion

土壤有机碳 (SOC) 作为农田肥力的重要指标, 是农作物高产稳产的基础^[1]。土壤有机碳库也是陆地生态系统最大的碳库, 小幅度的变化就会对全球气候产生巨大影响^[2]。SOC 不仅对土壤肥力和作物生产力有直接影响, 在缓解气候变化方面也有极其重要作用^[1-2]。我国农作物秸秆资源十分丰富, 2015 年农作物秸秆总量约为 9.31×10^8 t^[3]。作物秸秆含丰富有机碳和养分, 秸秆还田既可减少就地焚烧产生的温室气体^[4], 也能增加农田碳输入和作物归还, 有效维持和提升土壤有机碳储量^[5-7]。因此, 秸秆还田在土壤有机碳固定方面有巨大潜力^[8]。Yang 等^[9]研究表明, 5 年秸秆还田 0—30 cm 土层 SOC 提高 4.45%~9.00%。刘玲等^[5]发现, 秸秆粉碎还田和过腹还田下黑土表层 SOC 分别增加 28.70% 和 12.40%。目前, 秸秆还田对有机碳的影响研究多集中在表层土壤^[5-7, 9], 然而底层 SOC 储量是表层的 2~3 倍, 所以探究底层 SOC 对秸秆还田的响应对深入理解农田碳循环和缓解气候变化也非常重要^[10]。SOC 提升是一个长期缓慢的过程, 因此, 只有在长时间尺度的研究才能获得更可靠结果^[11]。马力等^[12]研究表明, 17 年秸秆还田增加红壤水稻土 0—45 cm 土层 SOC。解丽娟等^[13]研究发现, 20 年秸秆还田配施化肥显著增加黑土 20—40 cm 土层 SOC (41%)。然而, 徐虎等^[14]在旱地红壤和盖霞普等^[15]在潮土研究表明, 长期秸秆还田可显著增加 40 cm 以下土层 SOC。褐土作为我国主要

土壤类型之一, 总面积约 2516×10^4 hm², 该地区是我国小麦和玉米主产区之一, 作物秸秆资源十分丰富, 探究农田剖面土壤有机碳对秸秆还田响应的特征, 对该地区农作物秸秆的高效利用、解决粮食安全及农业环境可持续性等问题等具有指导意义^[11]。此外, 褐土多具团粒结构且土质疏松, 其底层 SOC 对秸秆还田的响应特征还不明确, 尤其是不同方式秸秆还田^[11, 16]。因此, 本研究依托山西省寿阳县长期 (21 年) 秸秆还田试验平台, 通过对不同秸秆还田方式下褐土 0—100 cm 剖面 SOC 和土壤养分及作物产量开展研究, 以期明确不同秸秆还田方式下褐土剖面有机碳的变化特征及影响因素, 为该地区秸秆还田措施优化、农田培肥和固碳减排等提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

长期秸秆还田试验位于我国山西省寿阳县 (东经 113°06'、北纬 37°58'), 地处中纬度暖温带半湿润偏旱区, 年均温为 7.4℃, 年均降水量为 501 mm (降雨集中在每年 6~9 月份) 且年际间波动较大。供试土壤为褐土, 成土母质为马兰黄土, 试验初始 (1992 年) 表层 (0—20 cm) 土壤理化指标: 有机碳 15.71 g/kg、全氮 1.07 g/kg、全磷 0.76 g/kg、全钾 23.7 g/kg、有效磷 4.84 mg/kg、速效钾 95.0 mg/kg 和 pH 8.30^[14]

1.2 试验设计与田间管理

试验开始于 1992 年, 供试作物为春玉米, 种植制度为一年一熟, 玉米生育期内 (4 月 15—25 日播种, 9 月 20 日—10 月 10 日收获), 主要田间管理措施是除草和防治病虫害。试验采用裂区设计, 主区为化学氮磷肥春季施用和秋季施用, 副区为 4 个秸秆还田方式处理: 1) 秸秆不还田 (CK); 2) 秸秆覆盖还田 (SM); 3) 秸秆粉碎后直接还田 (SC); 4) 秸秆过腹还田 (CM, 腐熟鲜牛粪)。小区面积为 54 m², 无重复。供试化肥为尿素 (含 N 46%) 和过磷酸钙 (含 P₂O₅ 14%)。玉米秸秆 (风干) 有机碳、全氮、全磷 (P₂O₅) 和全钾 (K₂O) 含量分别为 443.0、7.39、0.44 和 27.50 g/kg。CM 处理的牛粪 (风干) 有机碳、全氮、全磷 (P₂O₅) 和全钾 (K₂O) 含量分别为 52.50、3.93、1.37 和 14.10 g/kg^[11]。

化肥春季施用是结合春播进行化肥穴施或浅条施 (深度为 4—7 cm), 化肥秋季施用是结合秋季深耕翻地进行化肥条施或全耕层深施 (深度 10—30 cm), 生育期内不再追肥。SM 处理是每年 5 月下旬, 将前茬全部玉米秸秆均匀覆盖地表, 当季玉米收获后, 再将未腐解秸秆深翻还田; SC 处理是当季玉米收获后, 直接将秸秆铡碎 (长 15 cm) 结合深耕还田; CM 处理是将前茬玉米秸秆 (与 SM 和 SC 处理秸秆等量) 喂牛, 将产生的牛粪腐熟, 在当季玉米收获后均匀撒施并深翻还田^[11]。每个处理具体化肥施用量和秸秆还田量详见表 1。

1.3 测定项目与方法

在 2013 年玉米收获后采集土壤剖面样品。采样方法为: 在每个小区选 3 个代表性样点, 用土钻分 5 个层次 (每层 20 cm) 采集 0—100 cm 剖面样品。土壤样品风干后研磨过 2 mm 筛, 测定有效磷和有效钾; 磨细过 0.25 mm 筛, 测定土壤有机碳、全氮、全磷和全钾。各指标测定方法如下: 土壤有机碳和

全氮含量分别采用重铬酸钾容量法和半微量凯氏法, 土壤全磷和全钾含量采用氢氧化钠熔融法, 土壤有效磷和速效钾含量分别采用 Olsen 法和乙酸铵浸提—火焰光度法, 土壤容重采用环刀法。同时, 在每年玉米收获后, 测定各小区作物籽粒产量和秸秆生物量及其有机碳和养分含量。

1.4 数据处理及计算

农田碳输入主要包括植物根系碳输入 (C_{root})、根茬碳输入 (C_{stubble}) 和肥料碳输入 (C_{straw or manure})。根据蔡岸冬等^[8]报道的方法, 估算各种来源碳输入量。根据 Jobbagy 等^[10]报道的农作物根系生物量在 0—100 cm 剖面分配比例, 估算各层土壤根系碳输入量。

土壤有机碳储量计算公式为:

$$SOC_s = (C_i \times BD_i \times D_i) / 10$$

式中, SOC_s 为第 *i* 层土壤有机碳储量 (t/hm²); C_i 为第 *i* 层土壤有机碳含量 (g/kg); BD_i 为第 *i* 层土壤容重 (g/cm³); D_i 为第 *i* 层土壤厚度 (cm)。

所有数据运用 SigmaPlot 12.5 软件进行作图, Canoco 5 软件进行冗余 (RDA) 分析。运用 SPSS 22.0 软件, 采用最小显著差数法 (LSD) 检验处理间差异显著性 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 长期不同秸秆还田方式下褐土作物产量和累积碳输入量

在春季和秋季 (图 1), 4 个处理玉米产量随种植时间延长总体均呈现相似的上升趋势。CK 处理的玉米产量最低且年际间波动较大 (产量范围为 2.21~10.91 t/hm²)。与 CK 相比, 玉米产量的中位值 (1992—2013 年) SC 处理分别增加 7.73%~14.69%, SM 和 CM 处理分别增加 17.12% 和 25.81%。

土壤碳输入量受秸秆还田方式和作物产量双重

表 1 长期定位试验各处理年化肥施用量和秸秆还田量

Table 1 Annual input of chemical fertilizers and different straw incorporation methods in long-term experiment

处理 Treatment	化肥施用量 Chemical fertilizer rate [kg/(hm ² ·year)]		秸秆还田量 Straw incorporation rate [t/(hm ² ·year)]	
	N	P ₂ O ₅	秸秆 (风干) Straw (Air dried)	腐熟牛粪 (鲜基) Manure (Fresh)
CK	150	84		
SM	150	84	6	
SC	150	84	6	
CM	150	84		45

注 (Note): CK—秸秆不还田 No straw incorporation; SM—秸秆覆盖还田 Direct straw mulching; SC—秸秆粉碎后直接还田 Straw incorporation after crushing; CM—等量秸秆过腹产生的牛粪还田 Cattle manure produced by an equal amount of straw

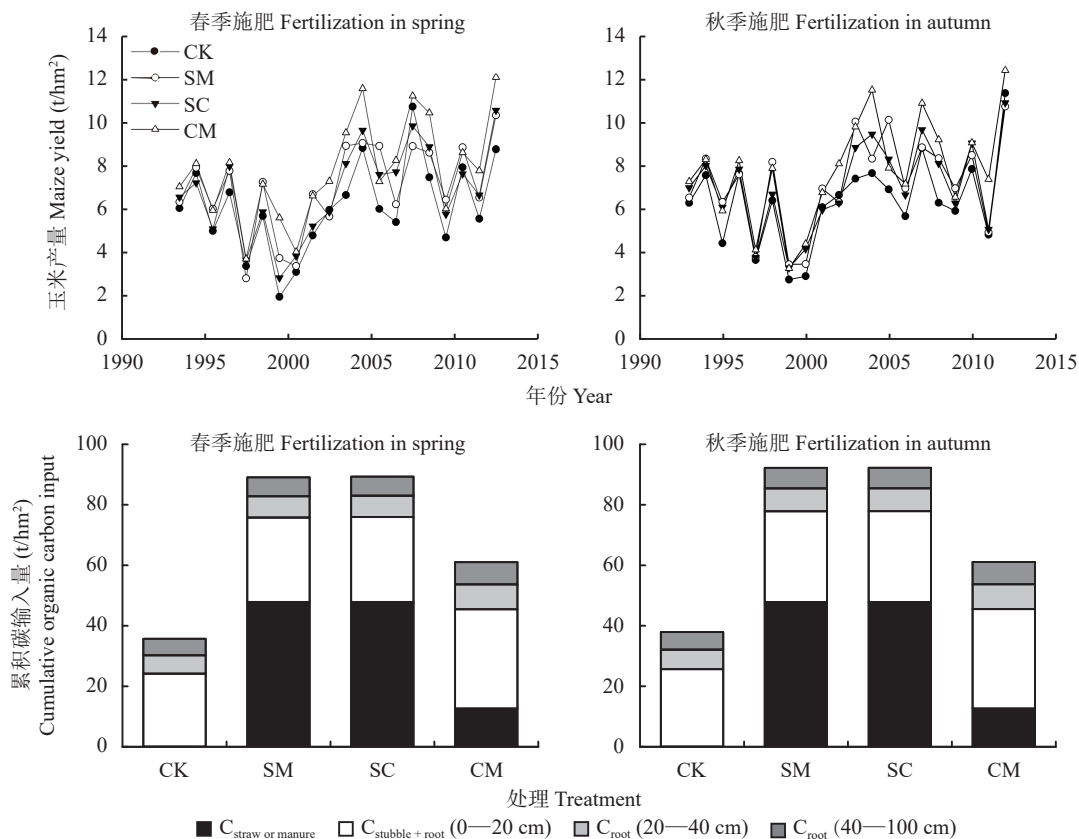


图1 春季和秋季施肥下各秸秆还田处理玉米产量和土壤累积碳输入量(1993—2012)

Fig. 1 Maize yield and cumulative carbon input under different straw incorporation methods and chemical fertilization seasons (1993–2012)

[注 (Note): CK—秸秆不还田 No straw incorporation; SM—秸秆覆盖还田 Direct straw mulching; SC—秸秆粉碎后直接还田 Straw incorporation after crushing; CM—等量秸秆过腹产生的牛粪还田 Cattle manure produced by an equal amount of straw; $C_{\text{straw or manure}}$ —秸秆或有机肥碳输入 Carbon input derived from straw or manure incorporation; $C_{\text{stubble+root}}$ —作物根茬和根系碳输入 Carbon input derived from crop stubble and root; C_{root} —作物根系碳输入 Carbon input derived from crop root.]

影响(图1)。SM和SC处理秸秆碳输入量是CM处理有机肥碳输入量的3.7倍。与CK相比,SM、SC和CM处理0—100 cm土体累积根茬和根系的碳输入量平均分别增加16.12%、16.51%和31.48%,而总累积碳输入量平均分别增加1.4、1.4和1.0倍。

2.2 长期不同秸秆还田方式下褐土各土层有机碳含量和储量

化肥施用季节和秸秆还田方式显著影响剖面SOC含量(表2)。与春季施肥相比,秋季施肥CM处理0—40 cm土层SOC含量显著提高,而SM和SC处理40—80 cm显著降低。不论春季施肥还是秋季施肥,与CK相比,CM、SM和SC处理表层(0—20 cm)SOC含量显著提高,而SM和SC处理40—60 cm和80—100 cm显著降低。

相对于CK处理,秸秆还田处理碳储量变化量在还田方式间存在显著差异,但在化肥施用季节间没有显著差异。在春季和秋季(图2),与CK相比

SM、SC和CM处理0—20 cm土层SOC储量平均分别增加2.32、5.42和12.60 t/hm²,CM处理的增加量显著高于SM和SC处理;而对于亚表层(20—40 cm),与CK相比,CM处理SOC储量略有增加(0.56~0.99 t/hm²),SM处理无明显变化,SC处理在春季和秋季施肥下分别降低2.98和4.62 t/hm²;与CK相比,SM、SC和CM处理底层(40—100 cm)SOC储量平均分别降低3.98、6.99和3.76 t/hm²,3个处理间无显著差异。在0—100 cm土层,与CK相比,CM处理SOC储量平均增加9.62 t/hm²,增加量小于表层土壤(12.60 t/hm²);而SM和SC处理平均分别降低1.81和5.36 t/hm²。

2.3 长期不同方式秸秆还田下褐土剖面养分含量

不同方式秸秆还田也显著影响褐土剖面养分含量(表3)。与CK相比,春季和秋季施肥SM、SC和CM处理0—20 cm土层全氮、有效磷和速效钾含量均有不同程度增加,且CM处理显著高于

表 2 春季和秋季施肥下各秸秆还田处理剖面有机碳含量

Table 2 Soil organic carbon content in soil profile under different straw incorporation methods and chemical fertilization seasons

施肥季节 Fertilization season	还田方式 Incorporation treatment	土壤剖面有机碳含量 Soil organic carbon content in soil profile (g/kg)				
		0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm
春季 Spring	CK	21.37 cA	18.20 aA	10.13 aA	5.22 bA	3.67 aA
	SM	22.98 bA	17.74 aA	8.09 bA	6.43 aA	2.93 bB
	SC	23.77 bA	16.78 aA	8.52 bA	5.13 bA	2.38 cB
	CM	26.67 aB	18.57 aB	10.05 aA	4.45 bA	3.08 bB
秋季 Autumn	CK	21.36 cA	18.19 bA	7.71 aB	4.01 aA	3.46 aA
	SM	23.50 bA	18.52 bA	6.25 bB	4.38 aB	3.23 bA
	SC	24.05 bA	16.80 cA	5.78 bB	4.00 aB	3.15 bA
	CM	28.21 aA	20.71 aA	6.27 bB	4.05 aA	3.45 aA

注 (Note): CK—秸秆不还田 No straw incorporation; SM—秸秆覆盖还田 Direct straw mulching; SC—秸秆粉碎后直接还田 Straw incorporation after crushing; CM—等量秸秆过腹产生的牛粪还田 Cattle manure produced by an equal amount of straw; 同列数据后不同小写字母表示相同化肥施用季节和相同土层下不同秸秆还田处理间差异显著 ($P < 0.05$), 同列数据后不同大写字母表示相同秸秆还田方式和相同土层下不同化肥施用季节间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among straw incorporation methods in same soil layer and chemical fertilization season ($P < 0.05$); values followed by different capital letters in the same column mean significant difference among chemical fertilization seasons in same soil layer and straw incorporation method ($P < 0.05$).

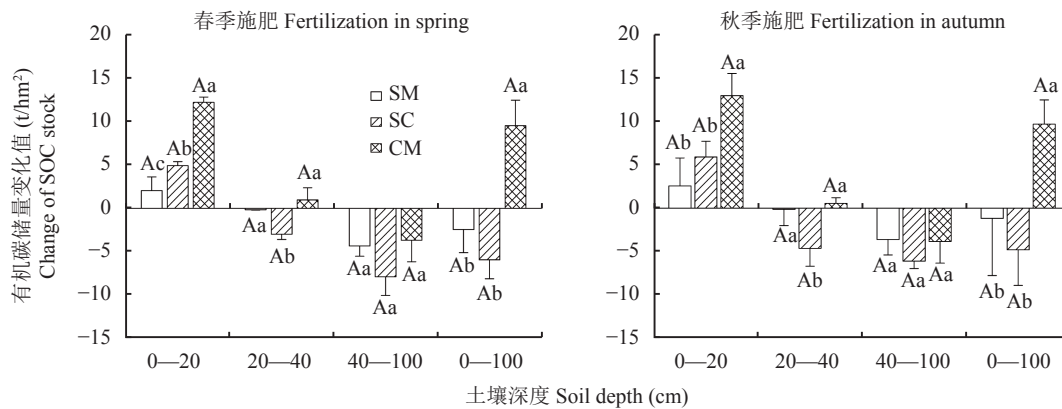


图 2 春季和秋季施肥下各秸秆还田处理不同土层有机碳储量相对于对照的变化量

Fig. 2 Changes of soil organic carbon stock (SOC) relative to CK in different soil layers affected by straw incorporation methods and chemical fertilization seasons

[注 (Note): CK—秸秆不还田 No straw incorporation; SM—秸秆覆盖还田 Direct straw mulching; SC—秸秆粉碎后直接还田 Straw incorporation after crushing; CM—等量秸秆过腹产生的牛粪还田 Cattle manure produced by an equal amount of straw; 柱上不同小写字母表示同一土层秸秆还田处理间有机碳储量变化量差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示相同秸秆还田方式和相同土层不同施肥季节间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters above the bars mean significant difference among straw incorporation methods in the same soil layer ($P < 0.05$), and different capital letters mean significant difference between chemical fertilization seasons in same soil layer and straw incorporation method ($P < 0.05$).]

SM 和 SC 处理。对于亚表层, 春季施肥 CM 处理全磷和有效磷含量显著高于 SM 处理, 而秋季施肥 CM 处理有效磷含量显著高于其他处理; 而对于底层, 春季施肥 CM 处理全氮和全钾含量显著高于 SC 处理, 秋季施肥 SM 处理全钾和有效磷含量显著高于 CK 处理。

2.4 长期不同秸秆还田方式下褐土有机碳储量变化的影响因素

以土壤累积碳输入量以及养分元素含量 (全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾) 作为影响 SOC 储量变化的因素进行冗余分析 (图 3)。结果表明, 碳输入和土壤养分含量对表层和底层 SOC 储量变化量的总

表 3 春季和秋季施肥下各秸秆还田处理的土壤养分含量

Table 3 Soil nutrient content under different straw incorporation methods and chemical fertilizer application seasons

土层 Depth (cm)	处理 Treatment	春季施肥 Fertilization in spring					秋季施肥 Fertilization in autumn				
		全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)	有效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)	有效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)
0—20	CK	1.17 c	0.90 ab	17.43 a	12.63 b	88.67 c	1.06 d	1.05 b	15.31 b	16.43 c	94.17 c
	SM	1.25 bc	0.71 b	16.59 ab	14.50 b	101.00 b	1.31 c	1.18 ab	17.58 a	18.93 c	110.00 b
	SC	1.32 b	1.00 ab	15.29 b	11.30 b	95.33 bc	1.37 b	1.05 b	16.31 ab	28.23 b	105.50 b
	CM	1.63 a	1.08 a	17.04 ab	68.00 a	156.00 a	1.66 a	1.37 a	15.96 ab	77.65 a	182.50 a
20—40	CK	0.94 a	0.66 ab	17.87 a	5.52 a	67.33 a	0.85 a	0.83 a	15.27 b	2.20 b	75.83 a
	SM	1.01 a	0.58 b	16.86 a	3.25 b	69.67 a	0.94 a	0.82 a	17.63 a	4.17 b	80.50 a
	SC	0.95 a	0.80 a	15.49 a	2.80 b	71.22 a	0.95 a	0.84 a	16.46 a	4.27 b	82.83 a
	CM	1.08 a	0.79 a	17.24 a	6.55 a	75.00 a	1.09 a	0.91 a	15.97 ab	10.75 a	89.50 a
40—100	CK	0.50 ab	0.65 a	17.81 a	1.52 a	68.22 a	0.44 a	0.60 a	16.56 b	1.74 b	77.17 a
	SM	0.48 ab	0.36 b	16.16 b	1.40 a	64.78 a	0.46 a	0.65 a	17.24 a	2.31 a	71.72 a
	SC	0.46 b	0.58 a	16.71 b	1.56 a	64.33 a	0.44 a	0.62 a	17.15 a	1.91 ab	76.72 a
	CM	0.52 a	0.60 a	18.29 a	1.63 a	65.33 a	0.47 a	0.59 a	16.55 b	1.90 ab	75.95 a

注 (Note): CK—秸秆不还田 No straw incorporation; SM—秸秆覆盖还田 Direct straw mulching; SC—秸秆粉碎后直接还田 Straw incorporation after crushing; CM—等量秸秆过腹产生的牛粪还田 Cattle manure produced by an equal amount of straw; 同列数据后不同小写字母表示在同一土层不同处理间养分含量差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters indicate significant difference among different straw incorporation methods in the same soil layer ($P < 0.05$).

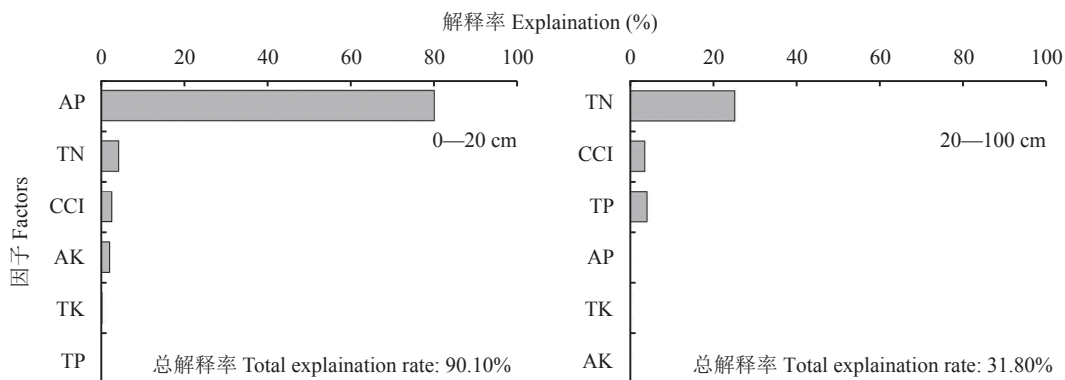


图 3 累积碳输入量和土壤养分含量对 0—20 cm 土层和 20—100 cm 土层土壤有机碳储量变化的解释率
Fig. 3 The explanation rate of cumulative organic carbon input and soil nutrient contents to the change of soil organic carbon stock in 0—20 cm and 20—100 cm soil

[注 (Note): CCI—累积碳输入量 Cumulative carbon input; TN—全氮 Total nitrogen; TP—全磷 Total phosphorus; TK—全钾 Total potassium; AP—有效磷 Available phosphorus; AK—速效钾 Available potassium.]

体解释率分别为 90.10% 和 31.80%。其中, 影响表层 SOC 储量变化量的主要因子为有效磷、全氮含量和累积碳输入量, 其解释率分别为 80.10%、4.40% 和 2.80%; 而影响下层 SOC 储量变化量的主要因子为全氮含量、碳输入量和全磷含量, 其解释率分别为 25.28%、13.67% 和 4.20%。

3 讨论

3.1 长期不同方式秸秆还田对褐土养分和作物产量的影响

本试验表明, 与 CK 相比, 秸秆还田均显著增加表层全氮、有效磷和速效钾含量, 且均以秸秆过腹还田最优。这主要因为鲜牛粪和秸秆施用表层土

壤,其被微生物分解利用后养分元素逐渐释放,且鲜牛粪比秸秆含有更多碳和丰富的营养元素^[17]。此外,所有处理玉米产量随种植时间延长总体均呈现升高趋势,这也间接表明单施化肥和秸秆还田配施化肥均能提升褐土地力,并改善作物生长环境^[16]。此外,CK处理玉米产量在大多数年份最低且年际间波动较大,这可能是因为单施化肥降低土壤系统稳定性。同时,CM处理作物产量高于SM和SC处理,这表明CM处理的培肥效果比SM和SC处理好,本研究CM处理表层有机碳和养分含量更高也证明了这一点。然而,本研究还发现,SM处理增产效果比SC处理好,这是因为本研究地属半湿润半干旱偏旱地区,秸秆覆盖能调节土温并减少地表径流和水分的蒸发,能更好保墒和保肥^[18]。

3.2 长期不同秸秆还田方式下褐土表层和底层有机碳储量变化差异及其影响因素分析

在农田土壤中,SOC含量是作物(根茬和根系)及外源有机物(秸秆和有机肥)碳输入下,SOC累积与有机质分解导致SOC损失之间的净平衡^[8]。本研究发现,与CK相比,SM、SC和CM处理均显著增加表层SOC储量,这与前人^[14,19]研究结果基本一致。这是因为3个秸秆还田处理表层碳输入量是CK处理的2~3倍;而SOC饱和前,通常随碳输入增加而增加^[8,20]。此外,CM处理表层SOC储量的增加量显著高于SM和SC处理,主要原因有:与秸秆相比,CM处理鲜牛粪主要是处于半分解状态有机质,其还田带入更多有效态氮,使其有较高碳转化效率^[21];同时,鲜牛粪促进团聚体形成和提升团聚体稳定性效果更好^[20]。此外,SC处理表层SOC储量增加量显著高于SM处理,这表明等量碳输入下SC处理更有利于农田表层碳累积。Fan等^[22]也发现,与覆盖还田相比,粉碎还田可增加耕层SOC含量。SC处理下秸秆与土壤颗粒充分接触,更易腐解转化并产生多糖等代谢物,促进土壤团聚体形成,进而增加碳吸附和固定^[23]。SM处理下秸秆整株覆盖在干湿交替频繁且微生物活性高的地表,大部分秸秆碳被微生物分解,以CO₂形式释放到大气^[24]。

本研究还发现,与CK相比,春季和秋季施肥SM、SC和CM处理底层SOC储量均显著降低,与徐虎等^[14]和盖霞普等^[15]研究结果不一致,这表明长期秸秆还田措施下褐土底层碳的输入量并不能补偿有机质矿化造成的SOC损失量^[8]。我们认为褐土底层碳耗竭可能有以下原因:1)本研究区域属偏旱地区,在水分不足

的条件下,致使根系向下延伸,但底层氮素含量低且供应不足,使微生物通过分解有机质提供作物生长所需氮素,引起底层SOC损失^[25]。此外,本研究氮素对底层SOC变化解释率最高(25.28%),也间接证明氮素供应不足可能是底层碳耗竭的主要原因。2)秸秆和鲜牛粪还田带入大量可溶性养分,通过淋溶和促进根系生长增加底层新鲜碳源(如可溶性有机质及根系分泌物),使底层有机质因激发效应而矿化损失^[26]。3)秸秆和鲜牛粪还田促进作物根系生长,且深耕打破犁底层,改善土壤通气性,有利于作物根系下扎,导致土壤扰动及大团聚体崩解增加,加速底层有机质分解^[27]。此外本研究还发现,SM、SC和CM处理均增加表层SOC储量,但大幅度降低底层SOC储量;对于0—100 cm土体,SM和SC处理SOC储量明显降低,而CM处理显著增加SOC储量(9.62 t/hm²),但增加量小于表层土壤(12.60 t/hm²)。可见,仅考虑表层有机碳变化,可能会高估秸秆还田措施下SOC提升效果,尤其是SM和SC处理。因此,秸秆还田措施下褐土底层SOC变化应该被关注。

冗余分析发现,土壤累积碳输入和养分含量对表层SOC储量变化的总体解释率为90.10%,这表明养分和有机碳输入是调控表层SOC储量变化的主要因子。这是因为秸秆和腐熟鲜牛粪含有大量碳、氮及磷^[4]。一方面,秸秆覆盖(SM处理)及粉碎和过腹还田(SC和CM处理)等措施主要作用在表层土壤,大幅度增加表层有机碳输入量,进而直接提升表层有机碳;另一方面这些措施降低了秸秆和有机肥转化过程中的微生物养分限制,更有利于表层有机碳增加^[14,28-29]。然而,本研究还发现,碳输入和养分对下层SOC储量变化总体解释率仅为31.80%,这可能是因为深层有机碳投入量和养分含量低且变化小,使其影响程度降低。此外,一些研究发现,下层SOC受粘粒含量、Ca²⁺、阳离子交换量、土壤孔隙度、铁和铝氧化物等影响可能更突出^[25,30-31]。综上,长期秸秆还田措施下表层与下层SOC来源、含量和稳定性等存在差异,表层有机碳储量变化主要受养分含量和碳输入量调控;而在下层受这些因素影响相对较小,可能受到自身属性影响更大^[25,28]。因此,在以后研究中,应进一步加强秸秆还田措施下底层SOC变化的驱动因素研究,为提升褐土农田有机碳固定和有机碳模型预测等提供基础理论。

4 结论

不论春季施肥还是秋季施肥,秸秆还田均提高

褐土表层有机碳、全氮、有效磷、速效钾含量和作物产量, 且均以秸秆过腹还田最优。秸秆还田均增加表层有机碳储量, 大幅度降低底层有机碳储量; 在 0—100 cm 土层, 秸秆覆盖还田和粉碎还田降低有机碳储量, 而秸秆过腹还田增加有机碳储量, 但增加量小于表层土壤。可见, 在评价秸秆还田措施对褐土有机碳影响时, 仅考虑表层有机碳变化, 可能会高估有机碳提升效果。综上, 秸秆过腹还田是褐土农田培肥和固碳减排的重要措施, 但秸秆还田措施下褐土底层有机碳变化也应该被关注。

参 考 文 献:

- [1] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, *et al.* Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, 478(7367): 49–56.
- [2] Zhang C, Liu G, Xue S, *et al.* Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 54: 16–24.
- [3] Ji L Q. An assessment of agricultural residue resources for liquid biofuel production in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 44: 561–575.
- [4] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 1–21.
Song D L, Hou S P, Wang X B, *et al.* Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 1–21.
- [5] 刘玲, 刘振, 杨贵运, 等. 不同秸秆还田方式对土壤碳氮含量及高油玉米产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(5): 187–192.
Liu L, Liu Z, Yang G Y, *et al.* Effects of different modes of straw returned on contents of soil carbon and nitrogen and yield of high oil maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5): 187–192.
- [6] 尤锦伟, 王俊, 胡红青, 等. 秸秆还田对再生稻田土壤有机碳组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(8): 1451–1458.
You J W, Wang J, Hu H Q, *et al.* Effects of straw returning on soil organic carbon components in ratoon rice field[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(8): 1451–1458.
- [7] 袁嫚嫚, 邬刚, 胡润, 等. 秸秆还田配施化肥对稻油轮作土壤有机碳组分及产量影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 27–35.
Yuan M M, Wu G, Hu R, *et al.* Effects of straw returning plus fertilization on soil organic carbon components and crop yields in rice-rapeseed rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(1): 27–35.
- [8] 蔡岸冬, 徐明岗, 张文菊, 等. 土壤有机碳储量与外源碳输入量关系的建立与验证[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(5): 934–941.
Cai A D, Xu M G, Zhang W J, *et al.* Establishment and verification of the relationship between soil organic carbon storage and exogenous carbon input[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(5): 934–941.
- [9] Yang S, Wang Y, Liu R, *et al.* Effects of straw application on nitrate leaching in fields in the Yellow River irrigation zone of Ningxia, China[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 954.
- [10] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423–436.
- [11] 徐明岗, 张文菊, 黄绍敏, 等. 中国土壤肥力演变[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015.
Xu M G, Zhang W J, Huang S M, *et al.* Soil fertility evolution in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2015.
- [12] 马力, 杨林章, 肖和艾, 等. 施肥和秸秆还田对红壤水稻土有机碳分布变异及其矿化特性的影响[J]. *土壤*, 2011, (6): 29–36.
Ma L, Yang L Z, Xiao H A, *et al.* Effects of fertilization and straw returning on distribution and mineralization of organic carbon in paddy soils in subtropical China[J]. *Soils*, 2011, (6): 29–36.
- [13] 解丽娟, 王伯仁, 徐明岗, 等. 长期不同施肥下黑土与灰漠土有机碳储量的变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 98–105.
Xie L J, Wang B R, Xu M G, *et al.* Changes of soil organic carbon storage under long-term fertilization in black and grey-desert soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(1): 98–105.
- [14] 徐虎, 申华平, 张文菊, 等. 长期不同管理措施下红壤剖面碳、氮储量变化特征[J]. *中国土壤与肥料*, 2016, (4): 24–31.
Xu H, Shen H P, Zhang W J, *et al.* Variation characteristics of soil organic carbon and total nitrogen storage in red soil under various long-term managements[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016, (4): 24–31.
- [15] 盖霞普, 刘宏斌, 杨波, 等. 不同施肥年限下作物产量及土壤碳氮库容对增施有机物料响应[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(4): 676–689.
Gai X P, Liu H B, Yang B, *et al.* Responses of crop yields, soil carbon and nitrogen stocks to additional application of organic materials in different fertilization years[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(4): 676–689.
- [16] 田有国, 张淑香, 刘景, 等. 褐土耕地肥力质量与作物产量的变化及影响因素分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(1): 105–111.
Tian Y G, Zhang S X, Liu J, *et al.* Change of soil fertility indices and crop yield of cinnamon soil and its affecting factors[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(1): 105–111.
- [17] Hadas A, Kautsky L, Goek M, *et al.* Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(2): 255–266.
- [18] 杨文治, 田均良. 黄土高原土壤干燥化问题探源[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 1–6.
Yang W Z, Tian J L. Essential exploration of soil aridization in loess plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 1–6.
- [19] 蔡岸冬, 张文菊, 申小冉, 等. 长期施肥土壤不同粒径颗粒的固碳效率[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1431–1438.
Cai A D, Zhang W J, Shen X R, *et al.* Soil carbon sequestration efficiency of different particle-size fractions after long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6): 1431–1438.
- [20] Xu H, Liu K, Zhang W, *et al.* Long-term fertilization and intensive cropping enhance carbon and nitrogen accumulated in soil clay-

- sized particles of red soil in South China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(4): 1824–1833.
- [21] Silver W L, Miya R K. Global patterns in root decomposition: Comparisons of climate and litter quality effects[J]. *Oecologia*, 2001, 129(3): 407–419.
- [22] Fan W, Wu J, Li J, *et al.* Comparative effects of different maize straw returning modes on soil humus composition and humic acid structural characteristics in Northeast China[J]. *Chemistry and Ecology*, 2018, 34(4): 355–370.
- [23] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. *土壤学报*, 2011, 48(2): 412–418.
- Dou S, Li K, Guan S. A review on organic matter in soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2): 412–418.
- [24] Abiven S, Menasseri S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability—A literature analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(1): 1–12.
- [25] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle[J]. *Plant and Soil*, 2011, 338(1): 143–158.
- [26] Fontaine S, Barot S, Barré P, *et al.* Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. *Nature*, 2007, 450(7167): 277–280.
- [27] 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 S, Wu J, Li M, *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.
- [28] De Oliveira Ferreira A, Amado T J C, Rice C W, *et al.* Driving factors of soil carbon accumulation in Oxisols in long-term no-till systems of South Brazil[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622–623: 735–742.
- [29] Murugan R, Kumar S. Influence of long-term fertilisation and crop rotation on changes in fungal and bacterial residues in a tropical rice-field soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(7): 847–856.
- [30] Han X, Gao G, Chang R, *et al.* Changes in soil organic and inorganic carbon stocks in deep profiles following cropland abandonment along a precipitation gradient across the Loess Plateau of China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 258: 1–13.
- [31] Dos Reis C E S, Dick D P, Caldas J da S, *et al.* Carbon sequestration in clay and silt fractions of Brazilian soils under conventional and no-tillage systems[J]. *Scientia Agricola*, 2014, 71(4): 292–301.