

长期秸秆还田对褐土农田土壤有机碳、氮组分及玉米产量的影响

赵宇航,殷浩凯,胡雪纯,解文艳,刘志平,周怀平,杨振兴

(山西农业大学资源环境学院,山西太原030031)

摘要:基于1992—2022年连续30 a的长期定位试验,研究秸秆不还田(CK)、秸秆覆盖还田(SM)、秸秆粉碎直接还田(SC)和秸秆过腹还田(CM)4种不同秸秆还田方式对土壤有机碳、氮组分和作物产量的影响。结果表明:(1)不同秸秆还田方式均可增加耕层土壤有机碳、全氮及其组分含量;与CK相比,CM处理0~20 cm土层土壤的总有机碳(SOC)、轻组有机碳(LFOC)、微生物量碳(MBC)、水溶性有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC)的含量分别显著增加42.85%、93.51%、80.09%、190.42%和123.38%;土壤全氮(TN)、轻组有机氮(LFON)、微生物量氮(MBN)、水溶性有机氮(WSON)和颗粒有机氮(PON)的含量分别显著增加49.37%、34.26%、69.49%、172.73%和129.29%。(2)各活性有机碳组分与土壤有机碳的比值表现为LFOC>POC>MBC>DOC;各氮组分与土壤全氮的比值表现为LFON>PON>MBN>WSON。(3)CM和SC处理下敏感指数最高的指标为DOC,DOC可作为CM和SC处理早期有机物变化的指示物;SM处理下敏感指数最高的指标为LFOC,LFOC可作为SM处理早期有机物变化的指示物。(4)土壤有机碳、氮组分间均呈显著正相关关系,其中DOC可以较好地反映SOC的变化情况,WSON可较好地反映TN的变化情况。(5)与CK相比,长期秸秆还田均可以显著提高玉米产量,SM、SC和CM处理30 a累计产量分别增加6.38%、7.82%和23.00%。综上,长期秸秆还田是提高土壤有机碳氮组分含量和作物产量的有效耕作措施,以秸秆过腹还田效果最为突出,可在黄土高原旱地玉米种植区域推广。

关键词:秸秆还田;活性碳;活性氮;敏感指数

中图分类号:S156; S153 **文献标志码:**A

Effects of long-term straw returning on soil organic carbon and nitrogen components and maize yield in brown soil farmland

ZHAO Yuhang, YIN Haokai, HU Xuechun, XIE Wenyan,

LIU Zhiping, ZHOU Huaiping, YANG Zhenxing

(College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi 030031, China)

Abstract: Based on a continuous 30-year long-term locational experiment from 1992 to 2022, the effects of four different straw return methods including no straw returned to the field (CK), straw mulching returned to the field (SM), straw crushed and directly returned to the field (SC) and straw returned to the field in the overgrowth (CM) on soil organic carbon, nitrogen fractions and crop yields were investigated. The results showed that (1) Straw returning increased the content of soil organic carbon, total nitrogen and its components in the tillage layer compared with CK. The content of total organic carbon (SOC), light group organic carbon (LFOC), microbial biomass carbon (MBC), water-soluble organic carbon (DOC) and particulate organic carbon (POC) in the soil layer of 0~20 cm of the CM treatment were significantly increased by 42.85%, 93.51%, 80.09%, 190.42% and 123.38%, respectively. The contents of soil total nitrogen (TN), light group organic nitrogen (LFON), microbial mass nitrogen (MBN), water-soluble organic nitrogen (WSON), and particulate organic nitrogen (PON)

收稿日期:2023-08-12

修回日期:2023-12-20

基金项目:山西省基础研究计划项目(202103021224124);科技基础资源调查专项(2021FY100501);山西省重点研发计划项目(202102140601010-4);山西省科技重大专项计划项目子课题(202101140601026-4-5)

作者简介:赵宇航(1998-),男,山西长治人,硕士研究生,研究方向为土壤碳氮循环。E-mail:zhaoyuhang0302@163.com

通信作者:解文艳(1978-),女,山西曲沃人,研究员,主要从事土壤水肥资源可持续利用及水土环境控制研究。E-mail:xwy6018060@163.com

increased significantly by 49.37%, 34.26%, 69.49%, 172.73% and 129.29%, respectively. (2) The ratio of each active organic carbon component to soil organic carbon showed LFOC>POC>MBC>DOC; the ratio of each nitrogen component to soil total nitrogen showed LFON>PON>MBN>WSON. (3) The highest sensitivity index under CM and SC treatments was DOC, which could be used as an indicator of the change of organic matter in the early stage of CM and SC treatments. LFOC had the highest sensitivity index under SM treatment and could be used as an indicator of early organic matter changes in SM treatment. (4) Significant positive correlations were found between soil organic carbon and nitrogen fractions, in which DOC better reflected the changes of SOC and WSON better reflected the changes of TN. (5) Compared with CK, long-term straw return could significantly increase corn yield, and the cumulative yields of SM, SC and CM treatments increased by 6.38%, 7.82% and 23.00%, respectively. In summary, long-term straw return was an effective tillage measure to improve soil organic carbon and nitrogen fractions and crop yield, and the effect of returning straw to the field was most prominent, which should be popularized in the dryland maize cultivation area of the Loess Plateau.

Keywords: straw return; activated carbon; activated nitrogen; sensitivity index

褐土广泛分布于我国北方地区,其中山西省是我国褐土分布最集中和典型的区域。土壤有机碳库作为陆地生态系统最大的碳库,是全球碳库中的核心和最活跃的部分,在维持全球碳库储量的平衡方面发挥着非常重要的作用^[1]。土壤有机碳(SOC)作为表征耕地土壤肥力的重要指标,不仅是作物产量提高的基础,在缓解气候变化方面也有极其重要的作用^[2]。秸秆还田可以减少因秸秆焚烧而产生的温室气体排放^[3]。同时,由于作物秸秆自身含有非常丰富的有机碳和养分,其施入农田后在土体中的微生物作用下迅速分解,可有效提高土壤有机碳的含量和质量,提高农田碳输入和作物秸秆的回归,有效保持和提高土壤有机碳储量,进而提高土壤肥力水平和促进养肥循环,增加作物产量^[4-8]。因此,秸秆还田在土壤固碳减排方面有巨大潜力^[9]。根据有机质在土壤中周转时间的长短和被微生物分解利用的难易程度不同,可将其分为惰性和活性有机质组分,其中活性有机质包括微生物生物量、水溶性有机质、颗粒有机质和轻组有机质等^[10]。在农田土壤中,土壤总有机碳的含量在短期内变化较慢,无法及时反映土壤质量的变化情况,活性有机质被认为是植物和微生物养分的直接供应库,植物、微生物、土壤环境等对活性有机质的影响较大,又因其易被降解且敏感性较强,常被作为农田管理措施的早期敏感指标^[11]。

众多研究表明,玉米秸秆还田因其能提高土壤有机物质的输入量,可显著增加土壤有机碳和全氮的含量。刘玲等^[4]研究发现,秸秆粉碎还田和过腹还田下的黑土耕层土壤有机碳、全氮以及微生物量碳和氮的含量显著提高。Zhou等^[12]对我国西南地区水稻-小麦轮作系统的研究表明,经过12 a

的长期秸秆覆盖还田可以提高土壤有机碳的固定并保持基本作物产量。徐萌等^[13]研究表明,破碎秸秆(秸秆压扁后剪成长度为4~5 cm)与粉碎秸秆还田均可增加土壤全氮含量。赵伟等^[14]通过大田试验对秸秆过腹还田的研究发现,土壤中全氮含量和可溶性有机氮含量均高于无任何肥料添加的对照处理,分别提高5.69%和12.66%,但对土壤微生物量氮含量增加效果不明显。

前人多对不同秸秆还田方式下土壤有机碳、氮组分变化分别进行研究,对碳、氮组分间关联的研究较少,由于土壤系统组成比较复杂,测定单一组分无法精准反映长期不同秸秆还田方式对耕地土壤质量的影响。因此,本研究依托山西省寿阳县30 a长期秸秆还田试验平台,以秋季玉米收获后的耕层土壤为研究对象,分析长期不同秸秆还田方式对耕层土壤有机碳、氮积累以及对其敏感性变化的影响,探讨活性有机碳氮组分之间的相关关系,以期旱作玉米生产中不同秸秆还田方式对褐土土壤质量的影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

秸秆还田长期定位试验在山西省寿阳县宗艾村北坪(37°58'N, 113°06'E)旱地上进行,试验地海拔1 130 m,年均气温7.4℃,无霜期约130 d,年均降水量501.1 mm,70%左右的降水集中在6—9月,属暖温带半湿润偏旱区。试验地块平坦,土层深厚,供试土壤为褐土,成土母质为马兰黄土,属于黄土旱地。试验初始时耕层土壤基本性质为:有机碳、全氮、全磷、全钾含量分别为13.6、1.07、1.78、14.10 g·kg⁻¹,有效氮、有效磷、有效钾分别为76.4、

2.8、95.0 mg · kg⁻¹, pH 值为 8.4。

1.2 试验设计

试验于 1992—2022 年开展共计 30 a。供试作物为春玉米, 1993—1997 年玉米品种为‘烟单 14 号’, 1998—2003 年为‘晋单 34 号’, 2004—2011 年为‘强盛 31 号’, 2012—2016 年为‘晋单 81 号’, 2016—2022 年为‘大丰 30 号’, 种植制度为一年一熟, 玉米播种日期为 4 月 15—25 日, 收获日期为 9 月 20 日—10 月 10 日, 种植密度为 49 500~52 500 株 · hm⁻²。

试验设 4 个处理, 分别为 (1) 秸秆不还田 (CK): 前茬玉米收获后, 将秸秆全部移出用于喂养牲畜; (2) 秸秆覆盖还田 (SM): 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; (3) 秸秆粉碎后直接还田 (SC): 当季玉米收获后, 直接将秸秆铡碎为 15 cm 长的小段, 深耕还田; (4) 秸秆过腹还田 (CM): 前茬玉米秸秆 (与 SM 和 SC 处理等量) 喂牛, 将产生的牛粪腐熟后, 于当季玉米收获后均匀撒施并深翻还田。小区面积均为 54 m²。风干玉米秸秆有机碳、全氮、全磷 (P₂O₅)、全钾 (K₂O) 含量分别为 443.00、7.39、0.44、27.50 g · kg⁻¹, 风干牛粪有机碳、全氮、全磷 (P₂O₅)、全钾 (K₂O) 含量分别为 52.50、3.93、1.37、14.10 g · kg⁻¹ [15]。供试化肥为尿素 (含 N 46%) 和过磷酸钙 (含 P₂O₅ 14%), 结合春播进行穴施或浅条施, 生育期内不再追肥。各处理具体化肥施用量和秸秆还田量见表 1。各小区栽培管理措施一致, 田间管理措施主要为除草和防治病虫害。

表 1 长期秸秆还田试验设计

Table 1 Long-term straw returning test design

处理 Treatment	施肥量 Fertilizer amount			
	N /(kg · hm ⁻²)	P /(kg · hm ⁻²)	秸秆 Straw /(t · hm ⁻²)	湿牛粪 Cow dung /(t · hm ⁻²)
CK	150	84	0	0
SM	150	84	6	0
SC	150	84	6	0
CM	150	84	0	45

1.3 样品采集及测定

1.3.1 土壤样品采集 2022 年玉米收获后, 采集耕层 0~20 cm 的土壤样品, 每个土样由 5 个采集点的土壤混合, 剔除杂质, 混合均匀后分为两份, 一份置于阴凉处待自然风干后研磨, 分别过 0.15 mm 和 0.2 mm 筛后保存, 用于土壤总有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、轻组有机碳 (LFOC) 和轻组有机氮 (LFON)、颗粒有机碳 (POC) 和颗粒有机氮 (PON) 的测定; 另

一份鲜土过 2 mm 筛子后用无菌袋放入冰盒内带回实验室, 冷藏于 4℃ 冰箱内, 用于土壤微生物量碳 (MBC)、微生物量氮 (MBN)、水溶性有机碳 (DOC) 和水溶性有机氮 (WOSN) 的测定。

1.3.2 土壤样品测定 土壤总有机碳 (SOC) 含量采用重铬酸钾容量法测定, 土壤全氮 (TN) 采用凯氏定氮法测定 [16]。微生物量碳 (MBC) 和微生物量氮 (MBN) 采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法测定 [17]; 水溶性有机碳 (DOC) 和水溶性有机氮 (WOSN) 采用去离子水浸提法测定 [18]; 颗粒有机碳 (POC) 和颗粒有机氮 (PON) 用 5 g · L⁻¹ 六偏磷酸钠浸提震荡后测定 [19]; 轻组有机碳 (LFOC) 和轻组有机氮 (LFON) 采用密度为 (1.8 g · cm⁻³) 溴化锌分离组分后测定 [20]。

1.3.3 敏感指数计算 敏感指数 = (秸秆还田处理活性碳组分 - 对照组活性碳组分) / 对照组活性碳组分 × 100% [21]

1.3.4 玉米产量测算 每年玉米成熟期, 将试验处理区分为 3 个小区, 各小区面积为 18 m², 玉米穗分别装袋风干, 脱粒称重, 计算玉米籽粒产量。

1.4 数据统计分析

使用 Microsoft Excel 2010 软件进行试验数据的整理; 采用 SPSS 26 对试验结果进行差异显著性统计分析、ANOVA 单因素方差分析、Pearson 相关系数进行相关性分析; 使用 Origin Pro 2021 绘图。

2 结果与分析

2.1 长期不同秸秆还田方式对土壤有机碳组分的影响

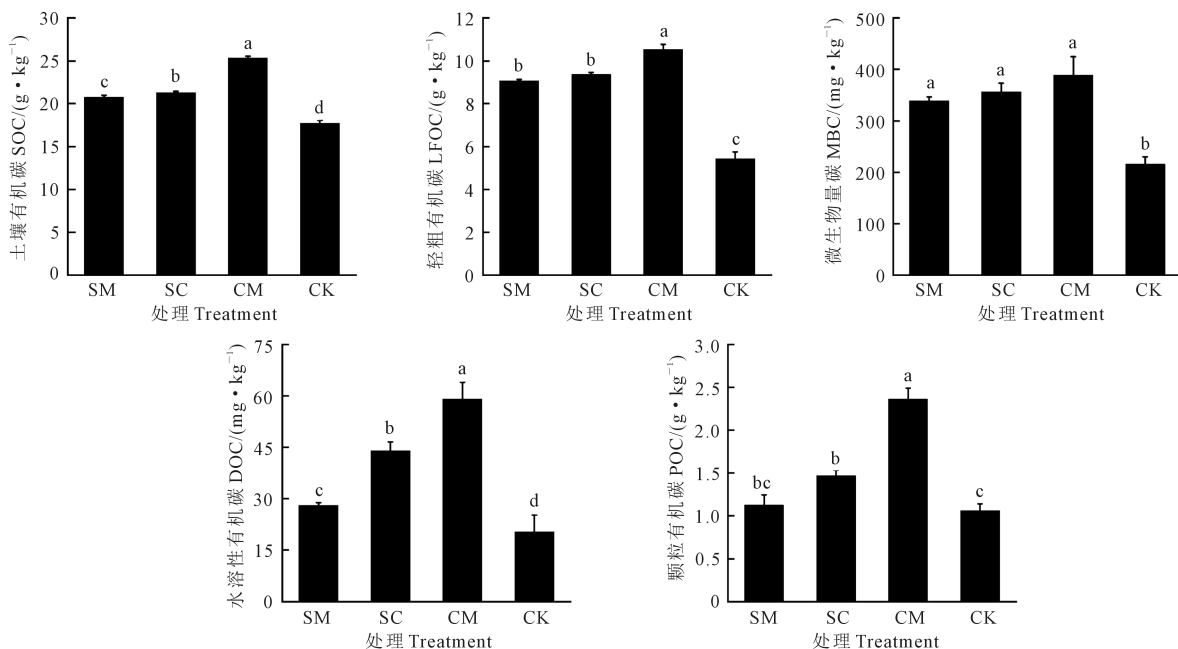
由图 1 可知, 不同秸秆还田处理下, SOC、LFOC、MBC、DOC 和 POC 含量变化趋势一致, 不同秸秆还田方式均高于秸秆不还田 (CK) 处理, 其中以秸秆过腹还田 (CM) 效果最好。与秸秆不还田 (CK) 相比, 秸秆过腹还田 (CM) 处理 SOC、LFOC、MBC、DOC 和 POC 含量分别显著增加 42.85%、93.51%、80.09%、190.42% 和 123.38%; 与秸秆覆盖还田 (SM) 相比, 秸秆过腹还田 (CM) 处理 SOC、LFOC、MBC、DOC 和 POC 含量分别增加 22.10%、16.36%、14.70%、110.58% 和 110.27%, 除 MBC 外, 其余指标含量均显著提高; 与秸秆粉碎直接还田 (SC) 相比, 秸秆过腹还田 (CM) 处理 SOC、LFOC、MBC、DOC 和 POC 含量分别增加 19.06%、12.59%、9.04%、34.05% 和 61.09%, 且 SOC、LFOC、DOC 和 POC 含量提升显著。与秸秆不还田 (CK) 相比, 秸秆覆盖还田 (SM) 处理 SOC、LFOC、MBC、DOC 和 POC 含量分别增加 17.00%、66.36%、57.01%、37.92%

和5.90%,除POC外,其余指标含量均显著提高;秸秆粉碎直接还田(SC)处理SOC、LFOC、MBC、DOC和POC含量分别显著增加19.98%、71.92%、65.16%、116.65%和38.80%。

2.2 长期不同秸秆还田方式对土壤氮组分的影响

土壤各组分氮含量与秸秆还田方式密切相关,各处理土壤TN、LFON、MBN、WSON和PON含量变

化趋势一致,均为秸秆过腹还田(CM)含量最高,秸秆不还田(CK)处理含量最低(图2)。与秸秆不还田(CK)相比,秸秆过腹还田(CM)处理土壤TN、LFON、MBN、WSON和PON含量分别显著增加49.37%、34.26%、69.49%、172.73%和129.29%;与秸秆覆盖还田(SM)相比,秸秆过腹还田(CM)处理的土壤TN、LFON、MBN、WSON和PON含量分别增加45.70%、



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different treatments ($P < 0.05$). The same below.

图1 长期不同秸秆还田方式对土壤有机碳组分的影响

Fig.1 Effects of long-term different straw returning methods on soil organic carbon components

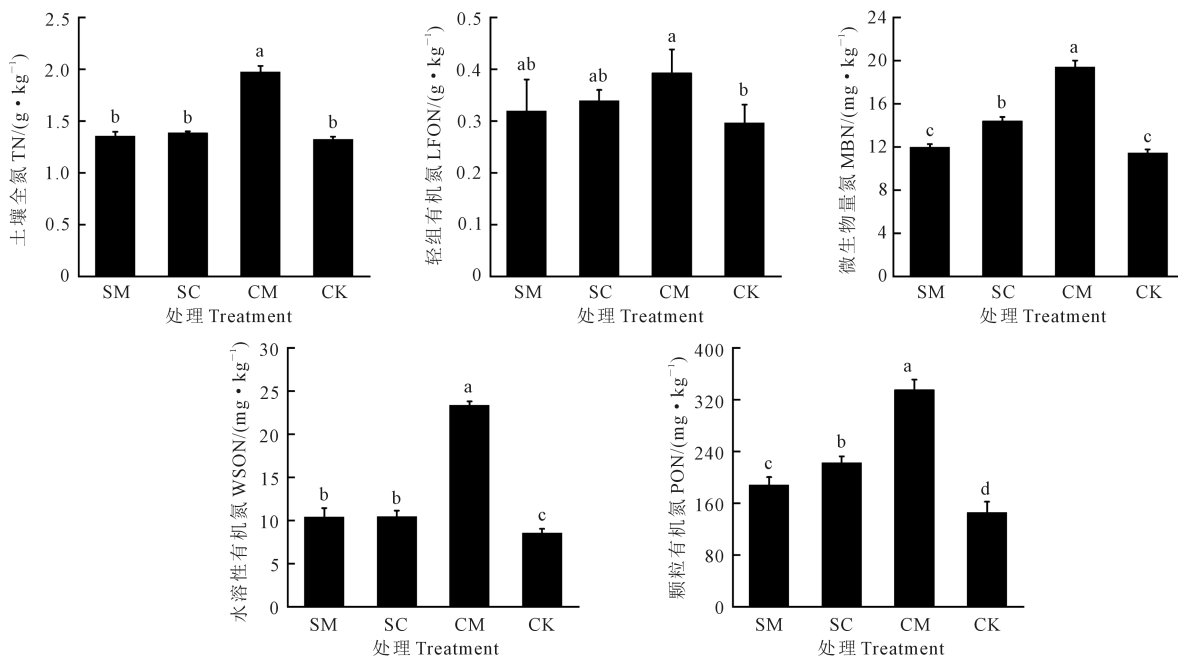


图2 长期不同秸秆还田方式对土壤氮组分的影响

Fig.2 Effects of long-term different straw returning methods on soil nitrogen components

22.91%、61.93%、124.35%和 77.91%，其中土壤 TN、MBN、WSON 和 PON 含量显著提高；与秸秆粉碎直接还田 (SC) 相比，秸秆过腹还田 (CM) 处理土壤 TN、MBN、WSON 和 PON 含量分别显著增加 42.54%、34.48%、122.86%和 50.70%，土壤 LFON 含量增加 15.68%。与秸秆不还田 (CK) 相比，秸秆覆盖还田 (SM) 处理土壤 TN、LFON、MBN、WSON 和 PON 含量分别增加 2.52%、6.79%、4.67%、21.56%和 28.87%，其中 WSON 和 PON 的含量显著提高；秸秆粉碎直接还田 (SC) 处理各指标分别增加 4.79%、13.46%、26.03%、23.38%和 50.16%，MBN、WSON 和 PON 含量提升显著。由图 3 可知，4 个处理 C/N 介于 12.83~15.36 之间，表现为秸秆粉碎直接还田 (SC) > 秸秆覆盖还田 (SM) > 秸秆不还田 (CK) > 秸秆过腹还田 (CM)，其中 SC 和 SM 处理均显著高于 CK。

2.3 长期不同秸秆还田方式对土壤各碳组分与 SOC 比值的影响

不同碳组分在土壤有机碳中所占比例均存在差异，秸秆还田普遍提高了各活性碳组分占土壤有机碳的比例 (表 2)。所有处理均表现为 LFOC 占比

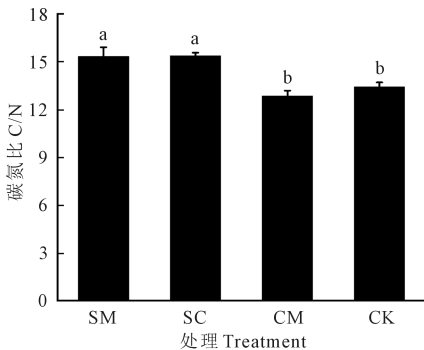


图 3 长期不同秸秆还田方式对土壤 C/N 的影响

Fig.3 Effects of long-term different straw returning methods on soil C/N

表 2 长期不同秸秆还田方式下土壤碳组分与 SOC 比值/%

Table 2 Ratio of soil carbon composition to SOC under long-term different straw returning methods

处理 Treatment	轻组有机碳/有机碳 LFOC/SOC	微生物量碳/有机碳 MBC/SOC	水溶性有机碳/有机碳 DOC/SOC	颗粒有机碳/有机碳 POC/SOC
SM	43.67±0.86a	1.63±0.04a	0.14±0.01b	5.43±0.46c
SC	44.00±0.45a	1.68±0.08a	0.21±0.01a	6.91±0.19b
CM	41.60±0.57b	1.53±0.13a	0.23±0.02a	9.34±0.41a
CK	30.70±1.22c	1.22±0.06b	0.11±0.03b	5.90±0.45c

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 indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$). The same below.

最高，LFOC/SOC 值介于 30.70%~44.00%，秸秆覆盖还田 (SM)、秸秆粉碎直接还田 (SC) 和秸秆过腹还田 (CM) 处理均显著高于秸秆不还田 (CK)；MBC/SOC 值介于 1.22%~1.68%，3 个秸秆还田处理均显著高于秸秆不还田 (CK)；DOC/SOC 值介于 0.11%~0.23%，POC/SOC 值介于 5.43%~9.34%，均表现为秸秆粉碎直接还田 (SC) 和秸秆过腹还田 (CM) 显著高于秸秆不还田 (CK)。

2.4 长期不同秸秆还田方式对土壤各氮组分与 TN 比值的影响

秸秆还田可以有效提高各活性氮组分占土壤全氮的比例 (表 3)。在土壤氮组分中，LFON 所占比例最高，LFON/TN 值介于 19.83%~24.61%，处理间差异不显著；MBN/TN 值介于 0.87%~1.04%，秸秆粉碎直接还田 (SC) 和秸秆过腹还田 (CM) 显著高于秸秆不还田 (CK)；WSON/TN 值介于 0.65%~1.18%，PON/TN 值介于 11.05%~17.00%，3 种秸秆还田方式均显著高于秸秆不还田 (CK)。

2.5 长期不同秸秆还田方式对土壤碳组分敏感指数的影响

利用敏感指数 (SI) 可以清晰地获取对不同秸秆还田处理反响灵敏的活性有机碳组分^[21]。由表 4 可知，不同处理下 SOC 的 SI 值介于 17.00%~42.85%，LFOC 的 SI 值介于 66.35%~93.52%，MBC 的 SI 值介于 57.01%~80.09%，DOC 的 SI 值介于 37.92%~190.42%，POC 的 SI 值介于 6.33%~123.38%。同一测定指标下 SI 值均以秸秆过腹还田 (CM) 处理最高，秸秆粉碎直接还田 (SC) 次之，秸秆覆盖还田 (SM) 最低。秸秆过腹还田 (CM) 处理下，各活性碳与总有机碳的敏感指数表现为 DOC>POC>LFOC>MBC>SOC；秸秆粉碎直接还田 (SC) 处理下，敏感指数表现为 DOC>LFOC>MBC>POC>SOC；秸秆覆盖还田 (SM) 处理下，敏感指数表现为 LFOC>MBC>DOC>SOC>POC。可见，DOC 可作为秸秆过腹还田 (CM) 和秸秆粉碎直接还田 (SC) 早期有机物变化的指示物，而 LFOC 可作为秸秆覆盖还田 (SM) 早期有机物变化的指示物。

表 3 长期不同秸秆还田方式下土壤氮组分与 TN 比值/%
Table 3 Ratio of soil nitrogen composition to TN under long-term different straw returning methods

处理 Treatment	轻组有机氮/全氮 LFON/TN	微生物量氮/全氮 MBN/TN	水溶性有机氮/全氮 WSON/TN	颗粒有机氮/全氮 PON/TN
SM	23.48±4.05a	0.88±0.04b	0.77±0.05b	13.90±0.31b
SC	24.61±1.27a	1.04±0.02a	0.76±0.04b	16.07±0.67a
CM	19.83±1.59a	0.98±0.04a	1.18±0.03a	17.00±0.84a
CK	22.46±2.65a	0.87±0.02b	0.65±0.02c	11.05±0.64c

表 4 长期不同秸秆还田方式下 SOC 和活性碳组分的敏感指数 (SI)/%

Table 4 Sensitivity index (SI) of SOC and activated carbon components under long-term different straw returning methods

处理 Treatment	土壤有机碳 SOC	轻组有机碳 LFOC	微生物量碳 MBC	水溶性有机碳 DOC	颗粒有机碳 POC
SM	17.00±1.31Cd	66.35±1.39Ca	57.01±3.42Ab	37.92±3.93Cc	6.33±3.21Ce
SC	19.99±0.92Bd	71.91±1.72Bb	65.16±7.48Ab	116.65±11.84Ba	38.80±4.18Bc
CM	42.85±1.09Ad	93.52±4.12Ac	80.09±16.31Ac	190.42±23.76Aa	123.38±8.16Ab

注:同行数据后不同小写字母表示同一处理不同指标间差异显著($P<0.05$),同列数据后不同大写字母表示同一指标不同处理间差异显著($P<0.05$)。

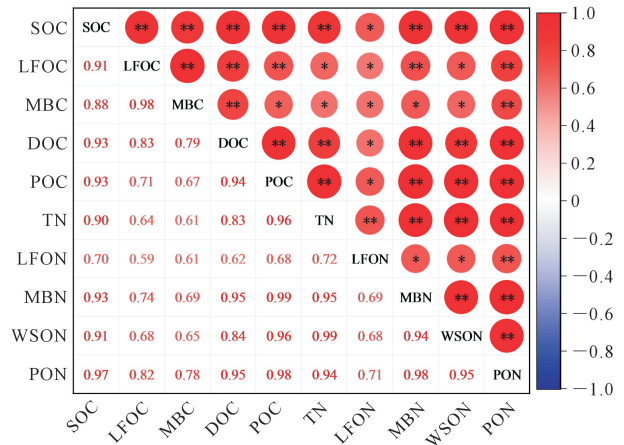
Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant differences between different indicators under the same treatment ($P<0.05$), and different uppercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments of the same indicator ($P<0.05$).

2.6 长期不同秸秆还田方式下土壤碳、氮组分间相关性分析

双变量 Pearson 检验结果(图 4)显示,各指标间均存在显著($P<0.05$)相关关系,相关系数介于 0.61~0.99,其中 POC 与 SOC、DOC、TN、MBN、WSON、PON 之间,PON 与 SOC、DOC、POC、TN、MBN、WSON 之间,DOC 与 SOC、MBN 之间以及 WSON 与 SOC、MBN、TN 之间均表现为极显著($P<0.01$)相关。多元线性逐步回归分析结果表明(表 5),在各活性有机碳组分中,耕作措施碳库最佳指示指标为 DOC,可解释总变量的 85.4%;耕作措施氮库最佳指示指标是 WSON,可解释总变量的 98.4%。

2.7 长期不同秸秆还田方式对玉米产量的影响

由图 5 可知,长期秸秆还田可以显著提高玉米的产量,1993—2022 年 30 a 间秸秆覆盖还田(SM)、秸秆粉碎直接还田(SC)、秸秆过腹还田(CM)、秸秆不还田(CK)累计玉米产量分别为 2.15×10^5 、 2.18×10^5 、



注: * 表示在 $P<0.05$ 水平显著; ** 表示在 $P<0.01$ 水平显著。

Note: * indicates significance at $P<0.05$ level; ** indicates significance at $P<0.01$ level.

图 4 长期不同秸秆还田方式下土壤碳、氮组分间 Pearson 相关性分析

Fig.4 Pearson correlation analysis between soil carbon and nitrogen components under long-term different straw returning methods

表 5 指示 SOC、TN 逐步回归分析模型中的 F 值和总变量 (R^2)

Table 5 F value and total variable (R^2) in the SOC and TN stepwise regression analysis model

反应变量 Response variable	初始模型 Initial model		最终模型 Final model		
	指示因子 Indicative factor	R^2	指示因子 Indicative factor	R^2	F
SOC	LFOC、MBC、DOC、POC	0.876	DOC	0.854	65.14
TN	LFON、MBN、WSON、PON	0.985	WSON	0.984	659.69

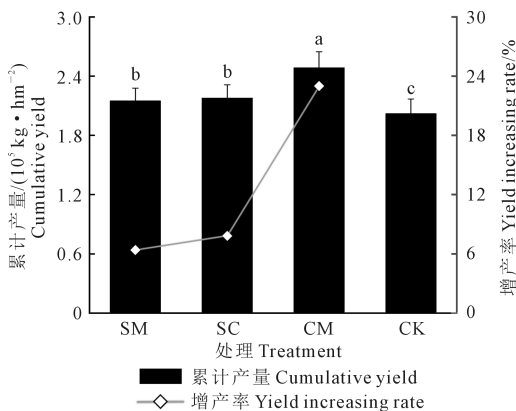


图 5 长期不同秸秆还田方式对玉米产量及增产率的影响

Fig.5 Effects of long-term different straw returning methods on maize yield and yield increase

2.49×10^5 、 2.02×10^5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。与秸秆不还田相比,3 个秸秆还田处理增产率分别为 6.38%、7.82%和 23.00%。秸秆过腹还田(CM)处理的累计产量和增产率最高,显著高于秸秆覆盖还田(SM)和秸秆粉碎直接还田(SC);秸秆覆盖还田(CM)与秸秆粉碎直接还田(SC)间累计产量差异不显著。

3 讨论

本研究结果表明,秸秆覆盖还田(SM)、秸秆粉碎直接还田(SC)、秸秆过腹还田(CM)均可以显著增加 0~20 cm 土层土壤有机碳、氮组分的含量,这与李玲等^[4]、Zhou 等^[12]、徐萌等^[13]和赵伟等^[14]研究结果一致。其主要的原因可能如下:首先,秸秆

中本身含有的大量碳和氮是土壤有机碳的重要来源^[4-6];其次,秸秆还田为微生物的生长繁殖提供了充足的碳源,可有效促进微生物量碳、氮的增长^[22];最后,微生物的作用加速了还田秸秆中有机态养分的分解、释放,土壤有机碳、氮组分因此得到提高^[23]。本试验中秸秆过腹还田(CM)的土壤有机碳、氮及其组分含量均显著高于秸秆覆盖还田(SM)和秸秆粉碎直接还田(SC),是因为秸秆中难被植物吸收的成分经过牲畜肠道微生物分解后,变得容易被吸收。秸秆粉碎直接还田(SC)后植物残体作为外源有机物质,经过微生物分解后可显著提高土壤有机碳含量;秸秆覆盖(SM)在冬季低温时有“增温效应”,生长季节有“低温效应”^[24]，“低温效应”会造成水分蒸发减少,微生物活动变弱,有机质矿化分解较慢,进而影响土壤有机碳含量^[25-26]。故本研究中秸秆粉碎直接还田(SC)对于农田耕层土壤有机碳、氮组分含量的整体提升效果略优于秸秆覆盖还田(SM)。

碳氮比是影响微生物活动的重要参数,也是反映土壤矿化能力的指标^[27]。本研究中 4 个处理的碳氮比值介于 12.8~15.3,秸秆覆盖还田和秸秆粉碎直接还田处理碳氮比显著高于秸秆过腹还田和秸秆不还田,秸秆过腹还田碳氮比最低;可能是由于经过动物消化后,粪便中的秸秆碳氮比低于其过腹前,长期秸秆过腹还田后土壤中的氮素累积较多,其土壤全氮含量也显著高于其他处理,故其碳氮比低于其他处理。秸秆中的碳氮比远高于土壤中,秸秆还田后会激发微生物数量增长,加速氮的矿化速率,导致土壤微生物处于“氮饥饿”状态,因此需要添加适量的氮肥进行调节从而达到适宜于微生物生长繁衍的碳氮比^[28]。

本研究中各碳、氮组分中 LFOC 和 LFON 所占比例最高,这是因为秸秆还田后,正在分解和未分解的秸秆残留物、糖类、半木质素等轻组有机质含量增加,同时土壤中的重组组分有机碳氮库易向轻组有机碳氮库转化,供土壤微生物及作物生长利用^[20],导致轻组有机碳氮的占比最高。秸秆还田处理其他碳氮组分与 SOC 和 TN 的比值整体高于秸秆不还田,是因为秸秆还田为土壤耕层微生物生长繁殖以及代谢活动提供了充足的能量来源。

敏感指数(SI)可以有效明确对不同秸秆还田处理响应灵敏的活性有机碳组分^[21]。Yan 等^[29]发现,HWSC 及 POC 可作为指示土壤有机碳早期变化指标。本研究中水溶性有机碳、微生物量碳和轻组有机碳的敏感指数均显著高于土壤总有机碳(表

4),其中水溶性有机碳反应最为灵敏($R^2 = 0.85$) (表 5),故而可将水溶性有机碳作为该地区秸秆还田之后有机物早期变化的指示指标。虽然水溶性有机碳占土壤总有机碳的比例较小,但其是土壤微生物的主要能量来源,对于土壤胶体的解吸、凋落物的分解起着关键的缓冲作用,对土壤中有机物质的流失敏感度较高,因而是评价土壤质量的重要方面^[30]。

作物的产量与土壤状况密切相关,秸秆还田可以增加土壤有机质含量,有机质不仅自身含有大量养分物质,还具有改善土壤物理结构,促进养分循环和保水保肥等功效,有利于有益微生物大量繁殖,最终促进作物生长和产量提升^[31]。李强等^[32]研究表明,连年秸秆覆盖还田下东北黑土区玉米增产率为 4.5%;张丽华等^[33]在我国半湿润区的研究发现,与秸秆不还田相比,2018 年和 2019 年秸秆粉碎还田处理增产率分别为 7.59% 和 9.12%;刘玮斌等^[34]研究表明,秸秆粉碎还田较秸秆不还田处理玉米产量增加 5.59%。本研究结果表明,长期秸秆还田均可以显著增加玉米产量,与秸秆不还田(CK)处理相比,秸秆覆盖还田(SM)和秸秆粉碎直接还田(SC)增产率分别为 6.38% 和 7.82%,秸秆过腹还田(CM)的增产率为 23.00%,与前人的研究结果基本一致。

4 结 论

1)不同秸秆还田方式均可增加耕层土壤有机碳、全氮及其组分含量。与秸秆不还田相比,秸秆过腹还田处理土壤总有机碳(SOC)、轻组有机碳(LFOC)、微生物量碳(MBC)、水溶性有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC)的含量分别显著增加 42.85%、93.51%、80.09%、190.42% 和 123.38%;土壤全氮(TN)、轻组有机氮(LFON)、微生物量氮(MBN)、水溶性有机氮(WSON)和颗粒有机氮(PON)的含量分别显著增加 49.37%、34.26%、69.49%、172.73% 和 129.29%。

2)不同处理下,各活性有机碳组分与有机碳的比值均以 LFOC/SOC 值最高,秸秆覆盖还田、秸秆粉碎直接还田和秸秆过腹还田处理显著高于秸秆不还田;各活性有机氮组分与全氮的比值中以 LFON/TN 值最高,但各处理间差异不显著。

3)SOC 和活性碳组分的敏感指数 SI 均表现为秸秆过腹还田>秸秆粉碎后直接还田>秸秆覆盖还田。秸秆过腹还田和秸秆粉碎后直接还田下 SI 最高的为 DOC,可作为这两个方式早期有机物变化的

指示指标;秸秆覆盖还田下 SI 值最高的为 LFOC, 可作为该方式早期有机物变化的指示指标。

4) 各土壤活性碳、氮组分间呈显著正相关关系, 其中 DOC 和 SOC 以及 WSON 和 TN 间的关系最为紧密, 分别可以解释总变量的 85.4% 和 98.4%。

5) 长期不同秸秆还田方式均可以显著提高玉米产量, 与秸秆不还田相比, 秸秆覆盖还田、秸秆粉碎后直接还田和秸秆过腹还田处理增产率分别为 6.38%、7.82% 和 23.00%。以秸秆过腹还田整体提升效果最好, 既可以解决秸秆废弃问题, 又能作为饲料为牲畜提供丰富的营养, 可在黄土高原旱地玉米种植区域进行推广。

参考文献:

- [1] ZHANG C, LIU G B, 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 袁嫚嫚, 邹刚, 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-rape-seed rotation system [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(1): 27-35.
- [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] 刘艳, 叶鑫, 包红静, 等. 秸秆还田配施化肥对春玉米耕层土壤理化性质及产量的影响[J]. *土壤*, 2023, 55(2): 254-261.
LIU Y, YE X, BAO H J, et al. Effects of straw incorporation combined with fertilizer on physiochemical properties of soil and yield of spring maize [J]. *Soils*, 2023, 55(2): 254-261.
- [8] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 等. 秸秆还田对宁夏旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(3): 522-528.
- [9] 马子钰, 马文林. 秸秆还田对中国农田土壤固碳效应影响的研究[J]. *土壤*, 2023, 55(1): 205-210.
MA Z Y, MA W L. Effects of straw returning on soil organic carbon in China's cropland—a meta-analysis [J]. *Soils*, 2023, 55(1): 205-210.
- [10] 王晶, 张旭东, 解宏图, 等. 现代土壤有机质研究中新的量化指标概述[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(10): 1809-1812.
WANG J, ZHANG X D, XIE H T, et al. New quantificational indexes in modern study of soil organic matter [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(10): 1809-1812.
- [11] MANDAL N, DWIVEDI B S, MEENA M C, et al. Effect of induced defoliation in pigeonpea, farmyard manure and sulphitation pressmud on soil organic carbon fractions, mineral nitrogen and crop yields in a pigeonpea - wheat cropping system [J]. *Field Crops Research*, 2013, 154: 178-187.
- [12] ZHOU Z J, ZENG X Z, CHEN K, et al. Long-term straw mulch effects on crop yields and soil organic carbon fractions at different depths under a no-till system on the Chengdu Plain, China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(5): 2143-2152.
- [13] 徐萌, 张玉龙, 黄毅, 等. 秸秆还田对半干旱区农田土壤养分含量及玉米光合作用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(4): 153-156.
XU M, ZHANG Y L, HUANG Y, et al. Effects of returning straw to field on soil nutrient content and corn photosynthesis in semiarid region [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(4): 153-156.
- [14] 赵伟, 陈雅君, 王宏燕, 等. 不同秸秆还田方式对黑土土壤氮素和物理性状的影响[J]. *玉米科学*, 2012, 20(6): 98-102.
ZHAO W, CHEN Y J, WANG H Y, et al. Impact of different straw return systems on nitrogen and physical characters in black soil [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2012, 20(6): 98-102.
- [15] 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.
- [16] 鲍士旦. 土壤化学分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil agricultural analysis [M]. Beijing: China agriculture Press, 2000.
- [17] 张英英, 蔡立群, 武均, 等. 不同耕作措施下陇中黄土高原旱作农田土壤活性有机碳组分及其与酶活性间的关系[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(1): 1-7.
ZHANG Y Y, CAI L Q, WU J, et al. The relationship between soil labile organic carbon fractions and the enzyme activities under different tillage measures in the Loess plateau of central Gansu province [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(1): 1-7.
- [18] HAYNES R J, FRANCIS G S. Changes in microbial biomass C, soil

- carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions[J]. *European Journal of Soil Science*, 1993, 44(4): 665-675.
- [19] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777-783.
- [20] 焦欢, 李廷亮, 高继伟, 等. 培肥措施对复垦土壤轻重组有机碳氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 208-213, 221.
- JIAO H, LI T L, GAO J W, et al. Effects of fertilization on light and heavy fractions organic nitrogen in reclaimed soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 208-213, 221.
- [21] 陈洁, 梁国庆, 周卫, 等. 长期施用有机肥对稻麦轮作体系土壤有机碳氮组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(1): 36-44.
- CHEN J, LIANG G Q, ZHOU W, et al. Responses of soil organic carbon and nitrogen fractions to long-term organic fertilization under rice-wheat rotation [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(1): 36-44.
- [22] 张乃文, 韩晓增, 朴勇杰, 等. 深翻和秸秆还田对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(3): 178-185.
- ZHANG N W, HAN X Z, PIAO Y J, et al. Effects of deep tillage and straw returning on microbial community functional diversity in soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(3): 178-185.
- [23] ZHANG P, CHEN X L, WEI T, et al. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 160: 65-72.
- [24] 高亚军, 李生秀. 旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(7): 15-19.
- GAO Y J, LI S X. Cause and mechanism of crop yield reduction under straw mulch in dryland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(7): 15-19.
- [25] 高云超, 朱文珊, 陈文新. 秸秆覆盖免耕土壤微生物生物量与养分转化的研究[J]. *中国农业科学*, 1994, 24(6): 41-49.
- GAO Y C, ZHU W S, CHEN W X. The relations between soil microbial biomass and the transformation of plant nutrients in straw mulched no-tillage soils [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1994, 27(6): 41-49.
- [26] 程曼, 解文艳, 杨振兴, 等. 黄土旱塬长期秸秆还田对土壤养分、酶活性及玉米产量的影响[J]. *中国生态农业学报:中英文*, 2019, 27(10): 1528-1536.
- CHENG M, XIE W Y, YANG Z X, et al. Effects of long-term straw return on corn yield, soil nutrient contents and enzyme activities in dryland of the Loess plateau, China[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2019, 27(10): 1528-1536.
- [27] 戴伊莎, 贾会娟, 熊瑛, 等. 保护性耕作措施对西南旱地玉米田土壤有机碳、氮组分及玉米产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(3): 82-90.
- DAI Y S, JIA H J, XIONG Y, et al. Impact of conservation tillage measures on maize yield, soil organic carbon and nitrogen components of maize field in rain-fed region in southwest China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(3): 82-90.
- [28] 霍竹, 付晋锋, 王璞. 秸秆还田和氮肥施用对夏玉米氮肥利用率的影响[J]. *土壤*, 2005, 37(2): 202-204.
- HUO Z, FU J F, WANG P. Effects of application of N-fertilizer and crop residues as manure on summer maize N recovery rate[J]. *Soils*, 2005, 37(2): 202-204.
- [29] YAN D Z, WANG D J, YANG L Z. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on labile organic matter fractions in a paddy soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 44(1): 93-101.
- [30] 李玲, 仇少君, 刘京涛, 等. 土壤溶解性有机碳在陆地生态系统碳循环中的作用[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1407-1414.
- LI L, QIU S J, LIU J T, et al. Roles of soil dissolved organic carbon in carbon cycling of terrestrial ecosystems; a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(5): 1407-1414.
- [31] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915-924.
- ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
- [32] 李强, 窦森, 焦云飞, 等. 不同秸秆还田模式对黑土物理性质及玉米产量的影响[J]. *东北农业科学*, 2022, 47(4): 52-56, 69.
- LI Q, DOU S, JIAO Y F, et al. Effects of different straw returning patterns on physical properties of black soil and maize yield[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2022, 47(4): 52-56, 69.
- [33] 张丽华, 徐晨, 于江, 等. 半湿润区秸秆还田对土壤水分、温度及玉米产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 299-306.
- ZHANG L H, XU C, YU J, et al. Effects of straw returning on soil moisture, temperature and maize yield in semi humid area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 299-306.
- [34] 刘玮斌, 田文博, 陈龙, 等. 不同秸秆还田方式对土壤酶活性和玉米产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019, (5): 25-29.
- LIU W B, TIAN W B, CHEN L, et al. Effects of different straw returning methods on soil enzyme activity and maize yield[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2019, (5): 25-29.