

秸秆还田方式及施氮量对滴灌棉田土壤有机碳氮的影响

霍启煜, 马丽娟, 徐悦轩, 闵伟, 侯振安

(石河子大学农学院, 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832003)

摘要: 通过连续 7 年田间定位试验, 采用 2 因素试验设计, 设置秸秆不还田(CK)、秸秆直接还田(ST)和秸秆炭化还田(BC)3 种秸秆还田方式和 0(N0), 300(N300), 450(N450) kg/hm² 3 个施氮(N)量, 研究秸秆直接还田和炭化还田配施氮肥对土壤碳氮含量和棉花产量的影响。结果表明: ST 和 BC 处理土壤有机碳含量呈现逐年递增趋势, 且 BC 处理增幅大于 ST 处理。第 7 年, 在各施氮水平下, ST 处理较 CK 处理土壤有机碳提高 33.28%~36.43%, BC 处理较 CK 处理土壤有机碳提高 58.56%~63.25%。多年秸秆还田(ST 和 BC)可以提高土壤全氮含量, N0 水平下, ST 处理全氮含量最高; N300 水平下, BC 处理 7 年后土壤全氮含量较 ST 处理显著提高; N450 水平下, 5 年后 BC 处理土壤全氮含量高于 ST 处理。在 N0 水平, ST 和 BC 处理提高了土壤碳/氮, N300 和 N450 水平, BC 处理提高了土壤碳/氮。秸秆炭化还田配施氮肥显著提高了棉花产量, N300 和 N450 条件下, BC 处理较 CK 增产 17.43%~17.89%。因此, 多年秸秆炭化还田配施氮肥可增加土壤有机碳含量, 氮库容量和土壤碳/氮, 提高棉花产量。

关键词: 滴灌棉田; 秸秆还田方式; 施氮量; 有机碳; 全氮

中图分类号: S562

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)03-0207-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2022.03.030

Effects of Straw Returning Mode and Nitrogen Application Rate on Soil Organic Carbon and Nitrogen in Drip Irrigated Cotton Field

HUO Qiyu, MA Lijuan, XU Yuexuan, MIN Wei, HOU Zhen'an

(Agricultural College of Shihezi University, Key Laboratory of Oasis Eco-agriculture,

Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi, Xinjiang 832003)

Abstract: Effects of straw returning directly and carbonization returning combined with nitrogen fertilizer on the content of carbon and nitrogen in soil and cotton yield were evaluated through a field positioning experiment for seven consecutive years. Using a two-factor experimental design, three straw returning modes were set up, which were no straw returning (CK), straw returning directly (ST) and straw carbonization returning (BC). Three nitrogen application rates were set up as 0 (N0), 300 (N300) and 450 (N450) kg/hm², respectively. The results showed that the content of soil organic carbon in ST and BC treatments increased year by year, and the increase of BC was greater than that of ST. In the 7th year, under different nitrogen application levels, the soil organic carbon of ST treatment was 33.28%~36.43% higher than that of CK, and that of BC treatment was 58.56%~63.25% higher than that of CK. Straw returning (ST and BC) for many years could improve the content of soil total nitrogen. Under N0 level, the highest of total nitrogen content was found in ST treatment. Under N300 level, the total nitrogen content of BC was significantly higher than that of ST after seven years. Under N450 level, the total nitrogen content of BC treatment was higher than that of ST after five years. Both ST and BC treatments increased soil C/N ratio under N0 level, while only BC treatment increased soil C/N ratio under N300 and N450 levels. Straw carbonization returning combined with nitrogen fertilizer application significantly increased cotton yield. Compared with CK, BC treatment increased cotton yield by 17.43%~17.89% under N300 and N450 levels. Therefore, straw carbonization returning combined with nitrogen fertilizer application could improve soil organic carbon content, nitrogen

收稿日期: 2021-10-20

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200100, 2018YFD0800800)

第一作者: 霍启煜(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力与调控研究。E-mail: 15735801074@163.com

通信作者: 侯振安(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事土壤肥力与调控研究。E-mail: hzaty1@163.com

pool capacity and soil C/N ratio and cotton yield.

Keywords: drip irrigated cotton field; straw returning mode; nitrogen application rate; organic carbon; total nitrogen

新疆是我国最大的棉花生产基地,棉花秸秆资源丰富。2020 年新疆棉花播种面积 $250.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$,棉花总产量 $516.2 \times 10^4 \text{ kg}^{[1]}$ 。按照棉花皮棉谷草比为 5 折算^[2],棉花秸秆资源量约为 $2.58 \times 10^4 \text{ t}$ 。秸秆还田是秸秆资源利用的重要途径,也是农田土壤培肥的重要举措,对实现农业可持续发展具有重要意义^[3-4]。秸秆炭化还田可以使有机碳稳定的存在于土壤中长达数百年,而且可以改善土壤理化性质、减少土壤养分损失以及提高肥料利用率^[5]。因此,秸秆炭化还田技术也被国家农业农村部列为 2021 年十大重大引领性农业技术之一。

秸秆还田在提高农田土壤有机碳、氮库容量方面的巨大潜力已经越来越受到人们的关注。长期秸秆直接还田不仅显著提高了土壤有机碳和全氮含量,还可通过改变土壤环境影响养分利用与积累,进而影响作物产量^[6-7]。秸秆炭化还田可显著提高土壤氮素固持能力,改善土壤肥力状况,提高作物产量和养分利用率^[8]。已有研究^[9]发现,连续 5 年玉米秸秆直接还田和炭化还田均显著提高土壤总有机碳储量,但二者之间无显著差异。也有研究^[10]表明,棉花秸秆直接还田和炭化还田均显著提高土壤有机碳和全氮含量,秸秆炭化还田的作用更显著。目前,多数研究集中在秸秆直接还田或秸秆炭化还田的单一短期研究,连续多年秸秆直接还田和炭化还田对土壤有机碳氮影响方面的研究相对较少。

因此,拟通过田间定位试验,研究连续 7 年棉花秸秆直接还田和炭化还田对滴灌棉田土壤有机碳、全氮及 C/N 的影响,并探讨其对施氮量的响应和棉花产量的变化,为合理利用棉花秸秆资源,提高滴灌棉田土壤有机碳、氮库容量和棉花产量提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间定位试验自 2014 年 3 月开始至今,试验位于石河子大学农试场($86^\circ 04' 11'' \text{E}$, $44^\circ 21' 14'' \text{N}$,海拔 443 m)。该地区为温带大陆性气候,年平均气温 $7 \sim 8^\circ \text{C}$,年均降水量 210 mm,蒸发量 1 660 mm,土壤类型为灌耕灰漠土,质地为壤土。土壤有机质、全氮分别为 11.50,0.89 g/kg,速效磷、速效钾分别为 22.40,284.00 mg/kg。

1.2 供试材料

每年棉花采收后收取棉花秸秆,一部分晾干后粉

碎,密封贮存;另一部分在 450°C 条件下厌氧炭化制备成棉花秸秆生物质炭后保存。供试棉花秸秆有机碳、全氮含量分别为 385.00,1.60 g/kg;棉花秸秆生物质炭有机碳、全氮含量分别为 625.00,0.89 g/kg。

1.3 试验设计

试验采用秸秆还田方式和施氮量 2 因素 3×3 试验设计。3 种棉花秸秆还田方式处理为秸秆不还田(对照,CK)、秸秆直接还田(ST)、秸秆炭化还田(BC);秸秆还田量为 6 t/hm^2 (全量还田),秸秆炭用量为 3.7 t/hm^2 (与秸秆还田等碳量)。3 个施氮(N)水平为 0,300,450 kg/hm^2 (分别用 N_0 、 N_{300} 、 N_{450} 表示)。试验共 9 个处理,每个处理重复 3 次,27 个试验小区。每年作物播种前,将棉花秸秆和炭化秸秆均匀撒施于土壤表面,然后翻耕入土,翻耕深度 20 cm。

棉花种植采用膜下滴灌模式($(66+10) \text{ cm}$),1 膜 3 管 6 行,滴灌带位于 2 行作物之间,棉花株距 10 cm。棉花于每年 4 月中下旬播种,干播湿出,播种后滴出苗水 45 mm。棉花全生育期共灌水 450 mm,分 9 次进行,灌水周期 7~10 天。氮肥使用尿素,分 6 次随水施入(第 2~7 次灌水)。磷、钾肥全部基施,分别施入 $105 \text{ kg/hm}^2 \text{ P}_2\text{O}_5$ 和 $75 \text{ kg/hm}^2 \text{ K}_2\text{O}$ 。其余管理措施与大田管理相同。

1.4 样品采集与测定

每年棉花吐絮期(9 月)采集土样,在每个小区随机选择 5 个样点,采集 0—20 cm 土壤样品。新鲜土壤样品混合均匀带回实验室风干后研磨,过 100 目筛备用。

土壤有机碳含量采用 TOC 分析仪测定,土壤全氮含量采用凯氏定氮法^[11]测定。

在棉花吐絮期,测定棉花产量并进行实收计产。

1.5 数据处理

数据处理和图表制作使用 Excel 2016 软件。采用 SPSS 20.0 软件进行 3 因素方差分析,多重比较采用 Duncan 法($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳

由表 1 可知,秸秆还田方式、施氮量和试验年限对土壤有机碳含量均有显著影响。多年秸秆还田或炭化还田均可逐年增加土壤有机碳含量,且秸秆炭化还田增效更显著。7 年试验中仅第 1 年 N_{450} 水平

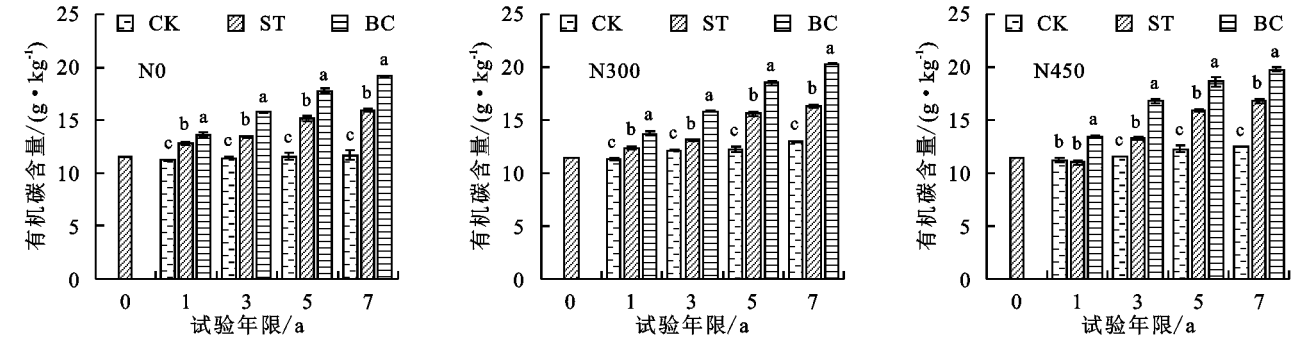
下,秸秆直接还田处理(ST)土壤有机碳含量与 CK 差异不显著;其他条件下,秸秆直接还田(ST)和炭化还田(BC)处理土壤有机碳含量均显著高于秸秆不还田(CK)处理(图 1)。同时,ST 和 BC 处理土壤有机

碳含量呈现逐年递增趋势,且 BC 处理增幅大于 ST 处理。第 7 年 3 个施氮水平下,ST 和 BC 处理土壤有机碳较相应 CK 处理分别提高 33.28%~36.43% 和 58.56%~63.25%。

表 1 秸秆还田方式、施氮量和试验年限对土壤有机碳氮含量及产量影响的 3 因素方差分析

变异来源	df	F			
		有机碳含量	全氮含量	C/N	产量
还田方式(C)	2	5850.97***	1189.55***	1982.00***	159.65***
施氮量(N)	2	48.39***	1078.84***	1608.00***	1181.65***
施用年限(T)	3	2002.91***	1296.01***	61.59***	353.98***
C×N	4	11.32***	81.31***	189.68***	5.66***
C×T	6	302.93***	122.30***	20.51***	7.16***
N×T	6	32.39***	156.93***	139.56***	15.94***
C×N×T	12	8.43***	9.66***	20.51***	6.09***

注:ns 表示未达到显著差异;* 表示在 $p<0.05$ 水平差异达到显著;* * 表示在 $p<0.01$ 水平差异达到显著;* * * 表示在 $p<0.001$ 水平差异达到显著。下同。



注:图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同试验年限的土壤有机碳含量

2.2 土壤全氮

由图 2 可知,与土壤有机碳相似,土壤全氮含量受秸秆还田方式、施氮量以及试验年限影响显著。不施氮肥时,秸秆直接还田土壤全氮含量高于秸秆炭化还田。N0 水平下,ST 处理土壤全氮含量显著高于 BC 和 CK; BC 处理土壤全氮在第 1 年与 CK 无显著差异,第 3~7 年显著高于 CK。配施氮肥时,多年秸秆炭化还田可以增加土壤全氮含量。N300 水平下,不同秸秆还田方式处理土壤全氮含量在第 1 年与 N0 相似;第 3,5

年,BC 和 ST 处理差异不显著(均显著高于 CK);第 7 年,BC 处理显著高于 ST,分别较 CK 分别增加 36.35% 和 30.28%。N450 水平下,第 1 年 CK、ST 和 BC 处理土壤全氮含量无显著差异;第 3 年,ST 和 BC 处理显著高于 CK,但二者差异不显著;第 5,7 年,BC 处理显著高于 ST,BC、ST 处理土壤全氮分别较 CK 处理增加 42.64%,37.67%(第 5 年)和 46.04%,40.45%(第 7 年)。多年秸秆炭化还田配施氮肥后,土壤全氮含量显著高于秸秆直接还田配施氮肥。

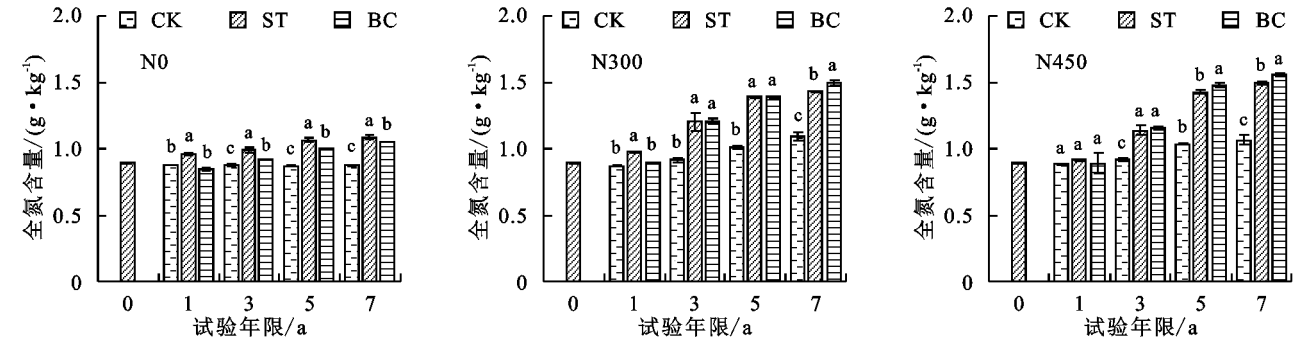


图 2 不同试验年限的土壤全氮含量

2.3 土壤碳/氮

秸秆还田方式、施氮量和试验年限对土壤碳/氮均

有显著影响($p<0.01$)(表 1)。不同秸秆还田方式下,增加施氮量显著降低土壤碳/氮,且随试验年限的延长

降低幅度加大(图 3)。至第 7 年,秸秆不还田条件下(CK),N300、N450 处理土壤碳/氮分别较 N0 降低 11.99%,12.90%;秸秆直接还田(ST)和炭化还田(BC)条件下,N300、N450 处理土壤碳/氮分别较 N0 降低 22.43%,23.72%和 25.49%,30.17%。

秸秆炭化还田显著提高土壤碳/氮,但秸秆直接还田配施氮肥降低土壤碳/氮。在 N0 水平下,BC 处

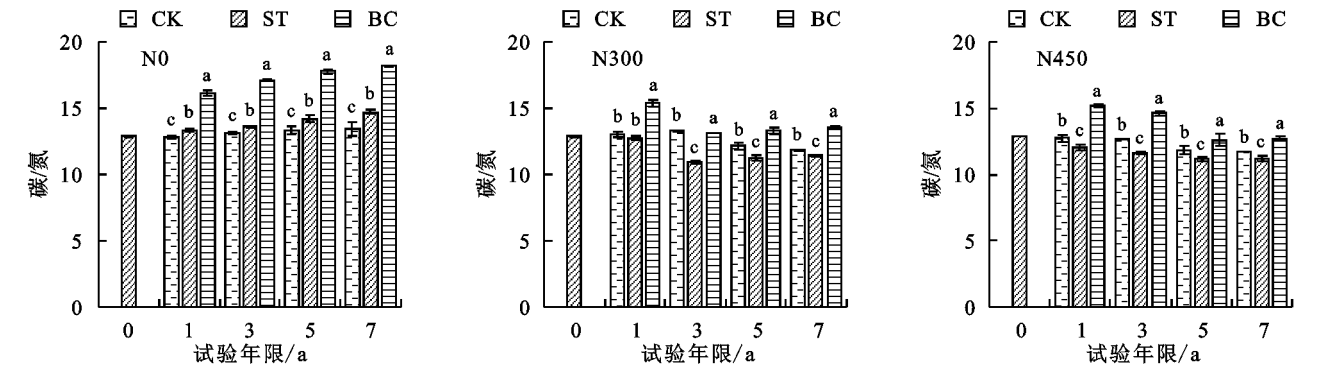


图 3 不同试验年限的土壤碳/氮

2.4 棉花产量

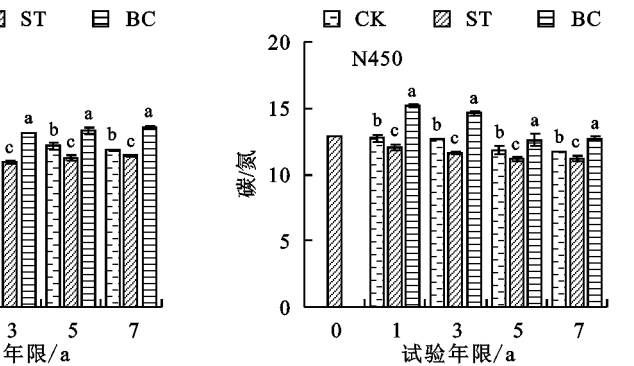
秸秆还田方式、施氮量和试验年限对棉花产量均呈极显著影响($p<0.01$)(表 1)。秸秆直接还田和秸秆炭化还田在各施氮水平均有增产效果,秸秆炭化还田增产效果在配施氮肥时显著高于秸秆直接还田。在不施氮肥条件下,ST 和 BC 处理棉花产量无显著差异,均显著高于 CK,且在不同年限的表现趋势一致(表 2)。ST 和 BC 处理棉花平均产量分别较 CK 增加 30.13%和 31.41%。在施氮肥条件下,不同年限棉花产量均表现为 BC 处理最高,其次是 ST 处理,CK 最低。N300 水平下,ST 和 BC 处理棉花平均产量较 N0 分别增加 10.54%和 17.43%;N450 水平下增加 7.33%和 17.89%。

由表 3 可知,棉花产量与土壤碳/氮呈显著负相关关系,全氮含量和土壤碳/氮显著负相关。土壤有机碳含量、全氮含量、棉花产量三者之间呈现显著正相关关系。

3 讨论

本研究中,秸秆以不同方式还田后,土壤有机碳含量均逐年显著增加,且秸秆炭化还田土壤有机碳含量增幅高于秸秆直接还田,这与前人^[4,9-10,12-14]研究结果一致。多年秸秆直接还田或炭化还田土壤有机碳会进行逐年累积,但不同还田方式土壤有机碳累积量不同。这是由于秸秆直接还田后,为微生物活动提供了足够的碳源,微生物活动过程中秸秆的部分有机碳矿化,造成了部分有机碳消耗^[3-4]。而秸秆炭化后所含有机碳大多具有惰性,可以稳定存在于土壤中^[15]。

理土壤碳/氮最高,其次是 ST 处理,均显著高于 CK;且 BC 和 ST 处理土壤碳/氮呈现逐年增长趋势(图 3)。至第 7 年,BC 和 ST 处理土壤碳/氮分别较 CK 处理提高 35.51%和 9.58%。N300 和 N450 水平下,不同秸秆还田方式处理土壤碳/氮变化趋势基本一致,总体呈现为逐年降低。与 CK 相比,BC 处理土壤碳/氮显著增加,而 ST 处理显著降低。



也有研究^[14]表明,秸秆炭化还田可以增强土壤固定碳的能力,从而增加土壤有机碳含量。所以秸秆炭化还田较秸秆直接还田更有利于土壤有机碳的累积。

表 2 不同试验年限棉花产量

		单位:t/hm ²				
施氮量	秸秆还田方式	第 1 年	第 3 年	第 5 年	第 7 年	平均值
N0	CK	2.81b	3.74b	3.22b	3.80b	3.12b
	ST	3.27a	4.33a	5.24a	5.06a	4.06a
	BC	3.29a	4.38a	5.27a	4.95a	4.10a
	平均值	3.12C	4.15B	4.58C	4.60C	3.76C
N300	CK	5.14c	5.60c	6.19c	5.72c	5.22c
	ST	6.03b	6.25b	6.48b	6.05b	5.77b
	BC	6.51a	6.79a	6.93a	6.32a	6.13a
	平均值	5.89B	6.21A	6.53B	6.03B	5.07B
N450	CK	5.73c	5.84c	6.18c	6.49c	5.87c
	ST	6.31b	6.03b	6.76b	6.98b	6.30b
	BC	6.79a	6.97a	7.95a	7.20a	6.92a
	平均值	6.28A	6.28A	6.96A	6.89A	6.36A

注:同列不同小写字母表示相同施氮量下不同还田方式处理差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示不同施氮量处理间差异显著($p<0.05$)。

表 3 土壤有机碳含量、全氮含量、碳/氮和棉花产量的相关性

项目	产量	有机碳	全氮	碳/氮
产量	1.000	0.450**	0.653**	-0.333*
有机碳		1.000	0.764**	0.296 ^{ns}
全氮			1.000	-0.383*
碳/氮				1.000

不施氮肥条件下,秸秆直接还田土壤全氮含量显著高于秸秆炭化还田,施用氮肥(N300)条件下,第1年开始秸秆直接还田就可以提高土壤全氮含量,多年(7年)后,秸秆炭化还田土壤全氮含量提升会显著高于秸秆直接还田。秸秆经过炭化后形成的秸秆生物炭含氮量低于秸秆。不施用氮肥时,秸秆自身的含氮量对土壤全氮的贡献更大,所以,秸秆直接还田土壤全氮要显著高于秸秆炭化还田。有研究^[16]发现,秸秆直接还田与外源氮肥(尿素)配合施用促进了作物生长,增强了土壤微生物活性,提升了土壤中无机氮向有机氮转化,可以提高土壤全氮含量。秸秆炭化还田可以持留土壤无机氮素,促进土壤氮素的固定^[14],秸秆炭化还田3年后土壤中全氮含量提升。秸秆直接还田在土壤中易腐解成小分子有机物,进而被微生物降解转化,矿化过程中会造成部分碳氮损失,但秸秆炭化还田有机物却不易矿化^[3-4,15],所以多年秸秆炭化还田后土壤全氮含量高于秸秆直接还田。

本研究结果表明,秸秆还田方式和施氮都对土壤碳/氮产生影响。不施氮条件下,秸秆直接还田和炭化还田均可提升土壤碳/氮;在配施氮肥条件下,秸秆直接还田降低土壤碳/氮,且高施氮量降幅大于低施氮量,而秸秆炭化还田则提升了土壤碳/氮。不施氮肥条件下,秸秆直接还田和炭化还田对土壤有机碳含量的提升比例大于土壤全氮含量提升比例。在施肥条件下,秸秆直接还田后微生物活动消耗有机碳的同时将土壤中无机氮向有机氮转化^[17],这一过程损失了部分有机碳,而土壤全氮含量却快速提升^[14,18],这使得土壤全氮的提升比例大于土壤有机碳。而秸秆炭化后作为稳定的惰性碳在土壤中会稳定地提升土壤有机碳含量^[15],土壤碳/氮随之提升。史登林等^[19]研究表明,秸秆炭化还田可以显著提高黄壤稻田土壤碳/氮,与本研究的结果一致。

多年秸秆直接还田和秸秆炭化还田均提高了棉花籽棉产量,在配施氮肥条件下秸秆炭化还田对籽棉产量的提高显著高于秸秆直接还田。土壤有机碳含量和全氮含量与产量呈显著正相关关系。有研究^[20]表明,长期施用氮肥可提高硝态氮含量,进而提高作物产量,与本研究施肥增加了棉花产量的结果一致。多年的秸秆直接还田和炭化还田使土壤有机碳、氮含量提高,土壤肥力得到了提升,所以在不施氮肥的条件下,多年的秸秆直接还田和炭化还田棉花产量也有显著提高。秸秆直接还田和炭化还田对作物产量的增产效果已经多有报道^[21-22],与本研究的結果一致。

秸秆促进微生物活动的同时,可能也消耗了土壤中部分无机氮,但秸秆炭化后,由于其特有的表面结构吸附截留无机氮,使得土壤中无机氮含量提升,更有利于作物的吸收利用^[7,16,23-24]。所以,秸秆炭化还田作物增产效果高于秸秆直接还田。

本研究探讨了多年不同秸秆还田方式下,土壤有机碳、全氮及碳/氮的演变规律和滴灌棉田产量变化。秸秆炭化还田可逐年增加土壤有机碳含量,且提升量显著高于秸秆直接还田。高施氮量条件下,秸秆炭化还田的土壤全氮含量超过秸秆直接还田的时间比秸秆直接还田更短。秸秆炭化还田配施氮肥仍可以提高土壤碳/氮。秸秆直接或炭化还田均可增加棉花产量,但秸秆炭化还田配施氮肥棉花增产效果优于秸秆直接还田。因此,多年秸秆炭化还田配施氮肥可以有效提高土壤肥力,稳定土壤氮库,增加棉花产量。

4 结论

(1)在不同施氮水平下,秸秆直接还田和炭化还田均能逐年提高土壤有机碳含量,且秸秆炭化还田显著高于直接还田。

(2)秸秆直接还田和炭化还田多年后,土壤全氮含量提升。秸秆直接还田在不施氮肥和配施氮肥短期内,土壤全氮含量高于秸秆炭化还田,但多年秸秆炭化还田配施氮肥后土壤全氮含量显著高于秸秆直接还田配施氮肥。

(3)施用氮肥可以降低土壤碳/氮,且降幅逐年加大。不施氮肥时,秸秆直接还田和炭化还田均可提高土壤碳/氮。秸秆炭化还田配施氮肥土壤碳/氮显著增加。

(4)施氮肥或秸秆还田均能提高棉花产量,尤其秸秆还田配施氮肥棉花产量的提高更显著,且秸秆炭化还田配施氮肥棉花产量显著高于秸秆直接还田配施氮肥。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国统计局.中国统计年鉴[EB/OL].[2021-10-01].<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2020/index-ch.htm>.
- [2] 左旭,毕于运,王红彦,等.中国棉秆资源量估算及其自然适宜性评价[J].中国人口·资源与环境,2015,25(6):159-166.
- [3] 张鹏,李涵,贾志宽,等.秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(12):2518-2525.
- [4] 李成芳,寇志奎,张枝盛,等.秸秆还田对免耕稻田温室

- 气体排放及土壤有机碳固定的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(11):2362-2367.
- [5] 杜衍红,蒋恩臣,王明峰,等.炭—肥互动对芥菜产量和肥料利用率的影响[J].农业机械学报,2016,47(4):59-64.
- [6] 孔德杰.秸秆还田和施肥对麦豆轮作土壤碳氮及微生物群落的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [7] 马芳霞,王忆芸,燕鹏,等.秸秆还田对长期连作棉田土壤有机氮组分的影响[J].生态环境学报,2018,27(8):1459-1465.
- [8] 盖霞普,刘宏斌,翟丽梅,等.长期增施有机肥/秸秆还田对土壤氮素淋失风险的影响[J].中国农业科学,2018,51(12):2336-2347.
- [9] 杨旭.玉米秸秆生物炭对棕壤碳库活度与碳收支的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2019.
- [10] 王晶,马丽娟,龙泽华,等.秸秆炭化还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响[J].环境科学,2021,41(1):420-429.
- [11] Bremner J M. Organic forms of nitrogen[M].Wisconsin: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America,1965:1238-1255.
- [12] Zhang P, Wei T, Li Y L, et al. Effects of straw incorporation on the stratification of the soil organic C, total N and C : N ratio in a semiarid region of China [J].Soil and Tillage Research,2015,153:28-35.
- [13] 马想,黄晶,赵惠丽,等.秸秆与氮肥不同配比对红壤微生物量碳氮的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(6):1574-1580.
- [14] 张璐,董达,平帆,等.逐年全量秸秆炭化还田对水稻产量和土壤养分的影响[J].农业环境科学学报,2018,37(10):2319-2326.
- [15] Khare P, Goyal D K. Effect of high and low rank char on soil quality and carbon sequestration [J].Ecological Engineering,2013,52:161-166.
- [16] 丛日环,张丽,鲁艳红,等.添加不同外源氮对长期秸秆还田土壤中氮素转化的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(7):1107-1114.
- [17] 张娟霞,刘伟刚,宁媛,等.长期秸秆还田与施氮后土壤活性碳、氮的变化[J].水土保持学报,2018,32(3):212-217.
- [18] 宋大利,习向银,黄绍敏,等.秸秆生物炭配施氮肥对潮土土壤碳氮含量及作物产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(2):369-379.
- [19] 史登林,王小利,刘安凯,等.黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应[J].环境科学,2021,42(1):443-449.
- [20] 刘学彤,郑春莲,曹薇,等.长期定位施肥对土壤有机质、不同形态氮含量及作物产量的影响[J].作物杂志,2021(4):130-135.
- [21] Liang F, Li G T, Lin Q M, et al. Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil [J].Journal of Integrative Agriculture,2014,13:525-532.
- [22] Jeffery S, Verheijen F G A, van der Velde M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis [J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2011,144(1):175-187.
- [23] 侯贤清,李荣,吴鹏年,等.秸秆还田配施氮肥对土壤碳氮含量与玉米生长的影响[J].农业机械学报,2018,49(9):238-246.
- [24] 张雅洁,陈晨,陈曦,等.小麦—水稻秸秆还田对土壤有机质组成及不同形态氮含量的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(11):2155-2161.