

王宏燕,许毛毛,孟雨田,等. 玉米秸秆与秸秆生物炭对2种黑土有机碳含量及碳库指数的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(12):228-232.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.12.058

玉米秸秆与秸秆生物炭对2种黑土有机碳含量及碳库指数的影响

王宏燕,许毛毛,孟雨田,李晓庆,高敬尧,郝帅

(东北农业大学资源与环境学院,黑龙江哈尔滨 150030)

摘要:采用室内培养的方法,研究玉米秸秆、玉米秸秆炭和两者混合配施添加到有机碳含量不同的2种黑土之后对土壤矿化、土壤有机碳组分及土壤碳库的影响,为不同退化程度黑土的修复提供依据。结果发现,秸秆施入低有机碳土壤的CO₂释放量高于高有机碳土壤,秸秆炭施入对2种黑土CO₂释放无显著影响;秸秆对高有机碳土壤有机碳含量提高更显著,秸秆炭能提高2种黑土的有机碳含量;秸秆提升黑土活性有机碳含量,秸秆炭施入降低了黑土活性有机碳含量,2种土壤之间无明显差异;秸秆与秸秆炭配施提高黑土的微生物量碳含量效果最佳,且对高有机碳土壤提升更大;秸秆施入对高有机碳黑土的可矿化碳含量增加影响更大,秸秆炭降低了2种黑土可矿化碳含量。另外,秸秆与秸秆炭的施入对低有机碳土壤的碳库管理指数影响更大。结果表明,秸秆与秸秆炭混合配施,在保障养分供应的同时能提高土壤有机碳的储量。对于低有机碳黑土,适当增加秸秆炭的施入,更利于有机碳的固持;对于高有机碳土壤,宜适当提高秸秆的施入,可减少CO₂释放,提高土壤养分含量。

关键词:黑土;秸秆;生物质炭;土壤矿化;有机碳组分;碳库

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)12-0228-05

东北黑土区是世界三大黑土带之一,是我国重要的粮食生产基地,对保障国家的粮食安全发挥着重要的作用^[1]。不合理的农业管理措施造成了黑土有机质不同程度的下降,提高黑土的有机质含量是稳定黑土区农业可持续发展的重要措施^[2]。

土壤有机碳是在土壤质量评价和土地可持续利用中需考虑的重要指标之一,其循环和转化与土壤物理、化学及微生物性状的改善密切相关^[3-5]。郝翔翔等研究表明黑土土壤有机质含量与土壤的结构性、通气性、渗透性、吸附性和缓冲性等都有密切的关系^[6-7]。土壤活性有机碳是土壤中易氧化、易分解、易矿化高活性有机碳,能够在土壤有机碳发生变化之前产生细微变化^[8]。土壤微生物碳是土壤活性养分的储存库和植物生长可利用养分的重要来源,其大小可以反映土壤的同化和矿化能力以及土壤的活性^[9-10]。土壤有机碳的矿化对土壤有机碳积累、大气CO₂排放有着直接深远的影响^[11]。Blair等认为土壤碳库的变化主要发生在易氧化碳库里,并提出土壤碳库管理指数(CPMI)算法,该指数基于研究对象与参考土壤的活性有机质与土壤有机质,是评价土壤活性有机碳的指标^[12]。

生物质炭(biochar)是指生物质在完全或部分缺氧环境下以及相对较低温度(<700℃)的条件下,经热裂解炭化形成的一种的固态产物^[13],生物炭含碳量丰富,拥有较大的孔隙度和比表面积,且具有高度羧酸酯化和芳香化结构,具有很

强的吸附性和稳定性^[14-16]。大量研究表明,添加生物炭可以提高土壤有机碳的含量,促进土壤团粒结构的形成,有助于植物生长^[17];施用生物质炭可增加土壤碳截留,降低碳排放,有效减缓温室效应;Kuzyakov等认为添加生物炭能有效降低土壤有机碳矿化速率^[18]。秸秆是农业生产中重要的肥料来源和潜在的碳库能源,秸秆还田能提升土壤有机质含量和质量^[19],还能够增加土壤活性碳、矿化碳、微生物碳和碳库管理指数^[20]。有研究表明添加有机物料及其生物炭对土壤碳转化率及各组分有机碳含量的影响存在差异^[21-22]。然而,秸秆炭化后和秸秆炭化前对不同有机质含量的黑土土壤碳库的影响尚不清楚。本试验采用恒温恒湿的室内培养法,选择2处有机碳含量差异较大的黑土土壤,添加等量的玉米秸秆及玉米秸秆炭,通过对土壤呼吸速率、有机碳组分、碳库的影响研究,以期明确玉米秸秆炭化前后对有机碳含量不同的黑土土壤的影响差异,为黑土退化机理和实际应用提供参考依据。

1 材料与与方法

1.1 试供土壤

供试土壤1为土壤有机碳含量低的黑土,取自东北农业大学校内试验基地;供试土壤2为有机碳含量高的黑土,取自黑龙江省伊春市西林区阴阳屯。在2个土壤样地均采用蛇形布点、多点混合的方法进行采样,采集0~20cm的表层土壤。将采集的土壤样品风干,筛除植物残体及其他固体物,磨细过2mm筛备用(表1)。

1.2 试供秸秆与秸秆炭

供试玉米秸秆取自黑龙江省哈尔滨市香坊农场试验田,粉碎过1mm筛;秸秆炭的生产设备采用笔者所在实验室研制的连续式回转窑生物炭化炉,炭化温度为500℃,生产的秸

收稿日期:2016-03-09

基金项目:环保公益性行业科研专项(编号:201309036)。

作者简介:王宏燕(1963—),女,黑龙江双鸭山人,博士,教授,主要从事农业生态学。E-mail:why220@126.com。

表1 试供土壤的基本理化性状

处理	pH 值	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	有机碳含量 (g/kg)	活性有机碳含量 (g/kg)
土壤1	7.30	1.27	0.72	153.0	57.4	182.1	14.33	2.05
土壤2	6.71	1.97	1.07	214.5	71.4	142.7	22.80	5.25

秆炭烘干后过1 mm筛,储备供试验用。供试玉米秸秆的全氮含量为10.8 g/kg、全磷含量为7.35 g/kg、全钾含量为7.55 g/kg、碳含量为462.6 g/kg、pH值为5.86;供试秸秆炭全氮含量为11.1 g/kg、全磷含量为37.95 g/kg、全钾含量为21.33 g/kg、碳含量为417.9 g/kg、pH值为9.41。

1.3 试验设计

本试验共设8个处理,每个处理的土壤质量为100 g,玉米秸秆和秸秆炭按照质量比例与土壤混合。(1)土壤1(CK1);(2)添加1%玉米秸秆的土壤1(S1);(3)添加1%秸秆炭的土壤1(C1);(4)添加0.5%玉米秸秆+0.5%秸秆炭的土壤1(M1);(5)土壤2(CK2);(6)添加1%玉米秸秆的土壤2(S2);(7)添加1%秸秆炭的土壤2(C2);(8)添加0.5%玉米秸秆+0.5%秸秆炭的土壤2(M2),每个处理设置3次重复。

将所有处理混合均匀,灌装于500 mL的培养瓶内,调节培养瓶中土壤含水量至25%,置于(25±0.5)℃恒温箱中培养73 d,培养过程中利用重量法定期补充水分,保持其含水量恒定。

1.4 测定的项目与方法

土壤基本性质测定按照土壤农化分析方法^[23]进行,秸秆与秸秆炭的基础指标测定参照有机肥料常规测定方法。分别在培养2、4、6、9、12、15、19、23、28、33、39、46、54、63、73 d对培养瓶进行排气之后放入装有NaOH的烧杯,密闭培养24 h之后,采用滴定法测定CO₂释放量,土壤CO₂释放量由CO₂释放速率计算而得;采用三氯甲烷熏蒸的方法测定土壤微生物量碳含量,采用333 mmol/L K₂MnO₄氧化法测定土壤活性有机碳含量,测定样品565 nm分光光度,与不加土壤的空白样吸光度相减,根据假设氧化过程中K₂MnO₄浓度变化1 mmol/L消耗0.75 mmol/L或9 mg碳,计算出被氧化的碳量^[24]。

在培养结束后,取25.00 g含水量为25%湿土平铺在干燥培养瓶中,置于装有NaOH的小烧杯中,培养5周,每周末用标准盐酸滴定来测定CO₂释放量,可矿化有机碳含量=CO₂释放量/微生物量碳含量,用g/kg干土表示^[25]。

土壤碳库指数(CPMI)等相关指标参照徐明岗等的方法^[26]计算。

碳库管理指数(CPMI)=CPI×LI×100;碳库指数(CPI)=样品全碳含量/对照土壤全碳含量;碳库活度(L)=活性碳含量/非活性碳含量;碳库活度指数(LI)=样品碳库活度/原始土壤碳库活度。

1.5 数据分析

采用Excel 2007 进行数据处理,采用SPSS 19.0 进行单因素方差分析。

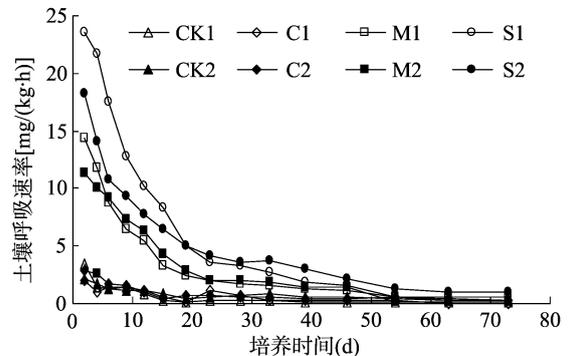
2 结果与分析

2.1 添加秸秆和秸秆炭对2种有机碳含量黑土呼吸速率、CO₂

排放量、矿化强度的影响

2.1.1 添加秸秆与秸秆炭对2种有机碳含量的黑土呼吸速率动态变化的影响 添加秸秆的4个处理S1、M1、S2、M2在培养时间内,均呈现CO₂呼吸速率开始较快,之后趋于平缓的规律,与CK存在极显著差异($P < 0.01$);而添加秸秆炭处理与对照差异不大,CO₂呼吸速率均处在一个很低的位置(图1)。

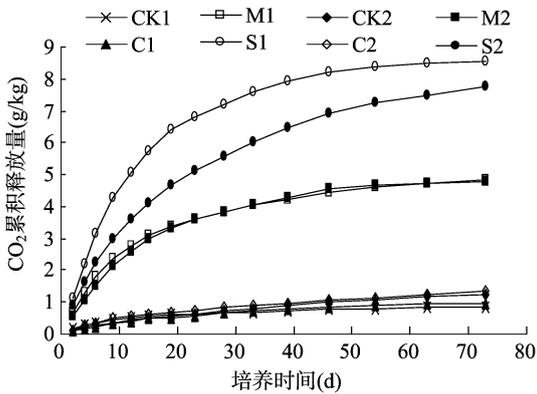
在培养开始阶段,各处理土壤CO₂呼吸速率顺序为S1 > S2 > M1 > M2。添加玉米秸秆,低有机碳土壤的呼吸速率明显高于高有机碳土壤,培养19 d秸秆添加处理的土壤CO₂呼吸速率出现拐点,S2 > S1,之后高有机碳土壤呼吸速率一直高于低有机碳土壤,直至培养时间结束,且整体S1较S2更早趋于平缓。添加一半秸秆的处理(混合处理)在培养6 d混合土壤CO₂呼吸速率出现拐点,高有机碳土壤高于低有机碳土壤(图1)。

图1 土壤CO₂释放速率动态变化

2.1.2 秸秆与秸秆炭添加对2种有机碳含量的黑土CO₂累积释放量的影响 添加玉米秸秆、秸秆炭的土壤CO₂释放累积量包括土壤本身的呼吸及秸秆与秸秆炭分解所释放的CO₂。其变化与CO₂释放速率变化规律相符合。初始阶段CO₂呼吸的速率较快,随着曲线的斜率逐渐减小,CO₂累积释放量趋于平衡点,释放量大小顺序为S1 > S2 > M2 > M1 > C2 > CK2 > C1 > CK1。秸秆处理与对照相比存在极显著差异($P < 0.01$),秸秆炭处理均高于对照,但秸秆炭处理与对照差异不显著(图2)。

在低有机碳土壤处理中,玉米秸秆处理土壤CO₂总释放量为8.55 g/kg、混合处理为4.86 g/kg,分别比对照(0.86 g/kg)提高7.69、4.00 g/kg;在高有机碳土壤处理中,玉米秸秆处理土壤CO₂总释放量为7.74 g/kg、混合处理为4.77 g/kg,分别比对照(1.23 g/kg)提高6.51、3.54 g/kg。可见,秸秆在低有机碳土壤中的分解量明显高于其在高有机碳土壤中的分解量。

2.1.3 添加玉米秸秆与秸秆炭对2种有机碳含量的黑土土壤矿化强度的影响 土壤有机碳矿化强度为土壤CO₂累积释放量与土壤有机碳含量的比值(其中包括秸秆与秸秆炭分解所释放的CO₂)。2种不同有机碳含量的供试黑土的矿化

图2 土壤CO₂累积释放量动态变化

强度均表现为秸秆处理 > 混合处理 > 秸秆炭处理(图3),其中秸秆处理、混合处理与对照存在极显著差异($P < 0.01$),秸秆炭处理与对照无显著差异。可以看出生物炭本身不易腐解或者不会促进土壤的矿化。秸秆在低有机碳黑土中的矿化速率高于高有机碳黑土,提高了25.07%,秸秆和秸秆炭混合处理呈同样趋势,矿化强度提高了13.56%。

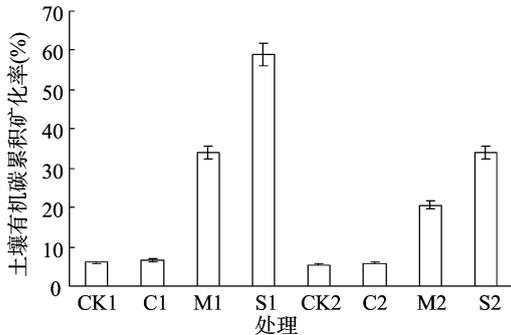


图3 不同处理土壤有机碳矿化强度

2.1.4 玉米秸秆与秸秆炭在2种有机碳含量黑土中的分解率 培养73 d结束时,秸秆在黑土中的分解率明显高于秸秆炭的分解率,秸秆炭基本未分解,且秸秆在低有机碳黑土中分解率高于高有机碳黑土中的分解率(图4)。秸秆在低有机碳黑土中的分解率为18.4%,在高有机碳黑土中的分解率为15.6%,降低了2.8个百分点。秸秆炭在低有机碳黑土中的分解率为0.17%,在高有机碳黑土中的分解率为0.20%。可以看出秸秆在黑土中的分解率更高,秸秆炭在2种黑土中的分解率均很低。

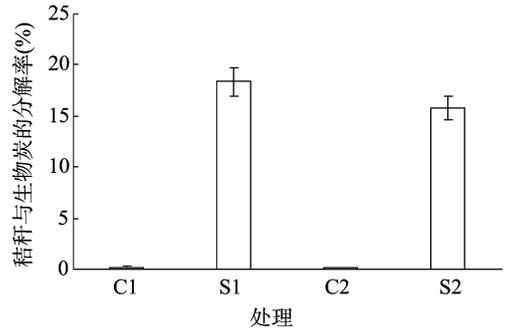


图4 秸秆与秸秆炭在2种黑土中的分解率

2.2 玉米秸秆与秸秆炭对不同有机碳含量黑土的有机碳组分及碳库管理指数的影响

2.2.1 施入玉米秸秆与秸秆炭后不同有机碳含量的2种黑土有机碳组分的变化 各处理都不同程度提高了2种黑土土壤TOC含量,提高顺序为秸秆炭处理 > 混合处理 > 秸秆处理,秸秆炭提高幅度最大($P < 0.05$),秸秆炭对2种黑土有机碳的提高幅度基本一致,分别提高5.82、5.72 mg/kg。秸秆处理效果低于秸秆炭处理,秸秆处理对高、低有机碳黑土TOC提高量分别为1.64、0.95 mg/kg(表2)。可以看出,秸秆对高有机碳黑土TOC含量的提高效果比低有机碳土壤更显著。

表2 不同添加处理2种黑土各组分有机碳含量及改变值

处理	有机碳(mg/kg)		活性有机碳(mg/kg)		微生物量碳(mg/kg)		可矿化碳(mg/kg)	
	含量	改变量	含量	改变量	含量	改变量	含量	改变量
CK1	14.45 ± 0.13c		2.08 ± 0.08cb		34.74 ± 2.68c		0.17 ± 0.06b	
S1	15.40 ± 0.60c	+0.95	2.40 ± 0.08a	+0.32	47.47 ± 4.37b	+12.73	0.35 ± 0.06a	+0.17
M1	17.58 ± 0.46b	+3.13	2.20 ± 0.06b	+0.12	68.31 ± 3.61a	+33.57	0.18 ± 0.05b	+0.01
C1	20.27 ± 0.65a	+5.82	1.92 ± 0.17c	-0.16	38.21 ± 1.74bc	+3.47	0.10 ± 0.03c	-0.07
CK2	23.71 ± 0.15c		5.27 ± 0.11b		79.89 ± 4.26b		0.35 ± 0.70b	
S2	25.35 ± 1.02b	+1.64	5.60 ± 0.11a	+0.33	108.26 ± 5.02a	+28.37	0.67 ± 1.47a	+0.32
M2	28.15 ± 0.32a	+4.44	5.36 ± 0.20b	+0.09	118.68 ± 2.01a	+38.79	0.38 ± 0.82b	+0.03
C2	29.43 ± 1.01a	+5.72	5.13 ± 0.04c	-0.14	84.53 ± 4.21b	+4.64	0.29 ± 1.05c	-0.06

注:表中数据为2种黑土各处理土壤样品分析结果的平均值 ± 标准差;数据后不同字母表示同一列2种黑土各自处理数据在0.05水平上差异显著。

各处理对不同有机碳含量黑土活性有机碳的影响存在一致性,各处理的影响顺序为秸秆处理 > 混合处理 > 对照 > 秸秆炭处理。其中,C1较对照降低0.16 mg/kg,C2比对照降低0.14 mg/kg;S1增加0.32 mg/kg,S2增加0.33 mg/kg;M1增加0.12 mg/kg,M2增加0.09 mg/kg。秸秆对于2种黑土活性有机碳的提高幅度基本相同,秸秆炭施入降低了2种黑土活性有机碳含量(表2)。

各处理对有机碳含量不同的2种黑土中MBC含量的影

响顺序为混合处理 > 秸秆处理 > 秸秆炭处理,混合处理、秸秆处理显著提高了土壤MBC含量,秸秆炭处理对土壤MBC含量无显著影响。其中,M1提高33.57 mg/kg,M2提高38.79 mg/kg,S1提高12.73 mg/kg,S2提高28.37 mg/kg,C1提高3.47 mg/kg,C2提高4.64 mg/kg(表2)。可见秸秆与秸秆炭混合施用对于黑土MBC含量的提高效果最佳,且对高有机碳含量的黑土提高效果更明显。

不论高有机碳含量还是低有机碳含量的黑土处理中,秸

秆施入明显提高了土壤可矿化碳含量,而秸秆炭施入降低了土壤有机矿化碳含量,混合处理影响居中。由表2可以看出,秸秆对高有机碳土壤的潜在可矿化碳含量提高更明显,同时,由高温制备(500℃)得到的秸秆炭具有发达的空隙结构与比表面积,使秸秆炭进入土壤后,对土壤易矿化有机质起到了吸附保护作用^[27],但是在2种有机碳含量黑土之间无明显差异(表2)。

2.2.2 添加玉米秸秆与秸秆炭对有机碳含量不同的2种黑土土壤碳库管理指数的影响 添加秸秆显著提高了不同有机碳含量的2种黑土土壤碳库管理指数,秸秆炭降低了土壤碳库管理指数(表3),混合处理虽然提高了土壤的碳库指数,但是却降低了碳库活度指数,从而整体降低了土壤的碳库管理指数。在低有机碳含量的黑土处理中,秸秆处理与配施处理的碳库管理指数均有所提高,分别为17.02%、3.50%,说明秸秆施入可提高土壤碳库管理指数;秸秆炭处理显著降低了土壤碳库管理指数,降低了12.70%。在高有机碳含量的黑土处理中,秸秆处理比对照提高了6.08%,配施与秸秆炭处理分别降低了2.29%、10.47%。在低有机碳黑土中,秸秆对于土壤CPMI的贡献更大,秸秆炭对土壤CPMI值降低率更大;在高有机碳土壤黑土中,秸秆与秸秆炭对土壤CPMI的影响较缓,可见低有机碳黑土CPMI更易受到外界的影响。

表3 不同处理下2种黑土碳库指数、碳库活度、活度指数、碳库管理指数

处理	碳库活度	碳库指数	碳库活度指数	碳库管理指数
CK1	0.17	1.01	1.00	101.53b
S1	0.18	1.08	1.10	118.81a
M1	0.14	1.23	0.85	105.08b
C1	0.10	1.42	0.63	88.63c
CK2	0.29	1.04	0.96	99.35b
S2	0.28	1.11	0.95	105.39a
M2	0.24	1.23	0.79	97.07b
C2	0.21	1.29	0.69	88.95c

3 讨论

秸秆施入土壤能够提高土壤的有机碳含量,改善土壤理化性质,补充土壤养分,但是其分解速率过快,不利于土壤有机碳的长期固持。有研究表明,秸秆对多个地区多种土壤均存在提高呼吸速率、增强土壤矿化强度的作用^[28-29]。这是因为施用秸秆后产生了正激发效应^[30],使得土壤微生物活性提高,有机碳的分解速率提高,释放CO₂速度加快。在本研究中,秸秆施入低有机碳土壤后分解速率更快、CO₂排放量更多,自身分解率也更高。一般认为低质量的土壤有机碳限制了土壤微生物生长所需的营养来源,限制了土壤的呼吸速率,施入新鲜有机碳会为微生物提供能力和营养,提高微生物活性,从而加速土壤有机碳的矿化^[31-32]。至今还不能确定激发效应和土壤有机质含量之间的关系。同时,秸秆炭在2种有机碳含量的黑土中分解率均非常低,土壤CO₂的释放量与对照相比无显著差异,这是因为生物炭具有较强的稳定性,不易被微生物分解。Zimmerman等认为因为生物炭具有强吸附性,土壤部分微生物附着于生物炭空隙中,减少了有机质与微生物的接触,降低了生物炭的分解率^[33]。说明了秸秆炭对土

壤有机碳的增加与黑土本身的有机碳含量大小无关,间接说明秸秆炭对于土壤有机碳的固定有着重要的作用,所以在低有机碳土壤中适当增加秸秆炭的施入更利于土壤碳库的储存。

研究结果表明,施用秸秆与秸秆炭均能提高土壤有机碳的含量,秸秆炭由于其较强的稳定性,对2种土壤有机碳的提高基本一致,但是秸秆的施入对有机碳含量高的土壤提升更明显,高有机碳含量土壤由于其自身微生物活性较高,更加利于土壤的矿化。土壤由于其背景值较高,有机碳变化表现存在一定的滞后性,然而,有机碳中有一些组分对其变化非常敏感,这部分称为活性有机碳。本试验中秸秆施入增加了其含量,秸秆炭施入降低了其含量,这与张杰等的研究结果^[34]相似。但是对于2种黑土而言,其变化值之间基本一致,秸秆施入2种土壤对活性有机碳的提高值相似,是因为秸秆中易分解部分已基本分解完全,土壤的活性有机碳开始减少并趋于平衡。谢国雄等指出,低有机质土壤中加入C/N比高的生物炭,会加剧微生物矿化有机质的过程中对N素需求的不足,抑制土壤有机质的矿化^[35]。而对于高有机质土壤,本身具有足够可矿化的碳源,添加活性较低的生物炭反而会抑制有机碳的矿化。

微生物量碳是衡量土壤微生物活性的重要指标,不同的添加物对2种土壤MBC含量的影响为秸秆与秸秆炭配施>秸秆>秸秆炭,这与李有兵等的研究结果^[21]一致,而且高有机碳土壤提高值均高于低有机碳土壤,主要是因为土壤本身微生物碳含量较高,更加利于秸秆的分解。土壤潜在可矿化碳(PMC)是指每单位微生物量产生的CO₂量,是对微生物分解有机质的衡量指标,属于活性有机碳的一种。秸秆施入对高有机碳黑土PMC提高更明显,表明高有机碳土壤的微生物分解有机碳的能力较高;生物炭施入降低了2种黑土PMC,是因为生物炭在后期会降低土壤CO₂的释放^[36],从而降低土壤的可矿化碳,再者由于高有机碳土壤MBC较高,使得土壤潜在可矿化碳低于低有机碳土壤。

杨旭等研究表明与秸秆炭化相比,秸秆直接还田对CPMI的效果更明显^[37],本试验也取得了相似的结果。本研究中秸秆炭施入降低了CPMI,原因在于秸秆炭化还田主要贡献是稳态碳,提高土壤总碳库,但是对于土壤活性却没有提高,造成了其CPMI低于参考土壤。同时,添加秸秆与秸秆炭对低有机碳土壤CPMI的影响更明显,低有机碳土壤的生态系统较弱,更易受外界干扰。

4 结论

秸秆与秸秆炭的施入因土壤的有机质含量不同而存在差异,宜因地制宜地选择秸秆还田的方式。单施秸秆虽然养分补充明显,但是CO₂释放较多,单施秸秆炭虽然短期内可提升有机碳的含量,对土壤养分补充较小。秸秆与秸秆炭混合配施对于低有机碳土壤的改良、高有机碳土壤的保持效果最佳。在低有机碳土壤中,秸秆分解率更高,CO₂释放量更高,不利于碳的储存;生物炭对于土壤有机碳的提高具有一致性,所以在低有机碳土壤中适当增加生物炭的施入,不仅利于土壤的固碳减排,同时利于土壤有机碳的提高;秸秆施入高有机碳土壤中,对土壤有机碳、土壤微生物碳和可矿化碳提高效果

更明显,所以在高有机碳土壤中适当增加秸秆的施入,更利于土壤活性组分和碳库管理指数的提升。

参考文献:

- [1] 范昊明,蔡强国,陈光,等. 世界三大黑土区水土流失与防治比较分析[J]. 自然资源学报,2005,20(3):387-393.
- [2] 高崇升,王建国. 黑土农田土壤有机碳演变研究进展[J]. 中国生态农业学报,2011,19(6):1468-1474.
- [3] Yang X Y, Ren W D, Sun B H, et al. Effects of contrasting soil management regimes on total and labile soil organic carbon fractions in a loess soil in China[J]. *Geoderma*,2012,177-178:49-56.
- [4] 张金波,宋长春. 土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标[J]. 生态环境,2003,12(4):500-504.
- [5] 龚伟,颜晓元,王景燕,等. 长期施肥对小麦-玉米作物系统土壤腐殖质组分碳和氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(6):1245-1252.
- [6] 郝翔翔,韩晓增,李禄军,等. 土地利用方式对黑土剖面有机碳分布及碳储量的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(4):965-972.
- [7] 韩晓增,王守宇,宋春雨,等. 黑土有机质功效的研究[J]. 农业系统科学与综合研究,2001,17(4):256-259.
- [8] Karlen D L, Rosek M J, Gardner J C, et al. Conservation reserve program effects on soil quality indicators[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,1999,54(1):439-444.
- [9] 马晓霞,王莲莲,黎青慧,等. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. 生态学报,2012,32(17):5502-5511.
- [10] 马涛涛,颜冬冬,毛连纲,等. 4种熏蒸剂处理对土壤可溶性有机氮和微生物量碳氮的影响[J]. 中国生态农业学报,2014,22(2):159-164.
- [11] Smith P. Carbon sequestration in croplands; the potential in Europe and the global context[J]. *European Journal of Agronomy*,2004,20(3):229-236.
- [12] Blair G J, Lefroy R B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Crop and Pasture Science*,1995,46(7):1459-1466.
- [13] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*,2006,11(2):395-419.
- [14] Braidia W J, Pignatello J J, Lu Y F, et al. Sorption hysteresis of benzene in charcoal particles [J]. *Environmental Science & Technology*,2003,37(2):409-417.
- [15] 林晓芬,张军,尹艳山,等. 生物质炭孔隙分形特征研究[J]. 生物质化学工程,2009,43(3):9-12.
- [16] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*,2006,70(5):1719-1730.
- [17] Novotny E H, Hayes M H, Madari B E, et al. Lessons from the Terra Preta de Índios of the Amazon region for the utilisation of charcoal for soil amendment [J]. *Journal of the Brazilian Chemical Society*,2009,20(6):1003-1010.
- [18] Kuz'yakov Y, Bogomolova I, Glaser B. Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ^{14}C analysis [J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2014,70(6):229-236.
- [19] 潘剑玲,代万安,尚占环,等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报,2013,21(5):526-535.
- [20] 陈尚洪,朱钟麟,刘定辉,等. 秸秆还田和免耕对土壤养分及碳库管理指数的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(4):806-809.
- [21] 李有兵,把余玲,李硕,等. 作物残体与其生物炭配施对土壤有机碳及其自身矿化率的提升[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(4):943-950.
- [22] 陈伟,周波,束怀瑞. 生物炭和有机肥处理对平邑甜茶根系和土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(18):3850-3856.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [24] 刘合明,杨志新,刘树庆. 不同粒径土壤活性有机碳测定方法的探讨[J]. 生态环境,2008,17(5):2046-2049.
- [25] 黄宗胜,喻理飞,符裕红. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤可矿化碳库特征[J]. 应用生态学报,2012,23(8):2165-2170.
- [26] 徐明岗,于荣,王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. 土壤学报,2006,43(5):723-729.
- [27] 花莉,张成,马宏瑞,等. 秸秆生物质炭土地利用的环境效益研究[J]. 生态环境学报,2010,19(10):2489-2492.
- [28] 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,2011,43(6):883-890.
- [29] 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.
- [30] Bingemann D, Ernstring N P. Femtosecond solvation dynamics determining the band shape of stimulated emission from a polar styryl dye [J]. *Journal of Chemical Physics*,1995,102(7):2691-2700.
- [31] Lohnis F. Nitrogen availability of green manures[J]. *Soil Science*,1926,22(4):253-290.
- [32] Bingeman C W, Varner J E, Martin W P. The effect of the addition of organic materials on the decomposition of an organic soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*,1953,17(1):34-38.
- [33] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2011,43(6):1169-1179.
- [34] 张杰,黄金生,刘佳,等. 秸秆、木质素及其生物炭对潮土 CO_2 释放及有机碳含量的影响[J]. 农业环境科学学报,2015,34(2):401-408.
- [35] 谢国雄,章明奎. 施用生物质炭对红壤有机碳矿化及其组分的影响[J]. 土壤通报,2014,45(2):413-419.
- [36] Jones D L, Murphy D V, Khalid M, et al. Short-term biochar-induced increase in soil CO_2 release is both biotically and abiotically mediated[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2011,43(8):1723-1731.
- [37] 杨旭,兰宇,孟军,等. 秸秆不同还田方式对旱地棕壤 CO_2 排放和土壤碳库管理指数的影响[J]. 生态学杂志,2015,34(3):805-809.