

秸秆及其生物炭对土壤碳库管理指数及有机碳矿化的影响

张影, 刘星, 任秀娟, 李东方, 吴大付, 陈锡岭

(河南科技学院资源与环境学院, 河南 新乡 453003)

摘要: 以河南省粮食主产区壤质潮土和砂土为研究对象, 通过盆栽试验和室内恒温培养试验, 研究了生物炭与不同腐殖化程度的传统有机物料(秸秆和腐熟鸡粪)单施及配施对壤质潮土和砂土有机碳储量、活性及碳库管理指数的影响, 并进一步比较了小麦秸秆直接还田和制炭还田对土壤有机碳矿化的影响, 以及生物炭对土壤原有有机碳矿化的调控作用。结果表明: 相同添加量下, 生物炭对土壤有机碳含量的提升效果优于秸秆和腐熟鸡粪, 在壤质潮土和砂土上分别较对照提升了 63.15% 和 115.62%。另外, 生物炭显著增加了土壤稳态碳含量和土壤碳库指数(CPI), 但降低了土壤碳素有效率(SC)和碳库活性指数(AI), 对土壤易氧化有机碳(POXC)和碳库管理指数(CPMI)无显著影响, 添加秸秆显著增加了 2 种土壤 POXC 含量、基础呼吸和 CPMI。进一步通过室内恒温培养试验发现, 秸秆可在培养前期(0~37 天)大幅度提升 2 种类型土壤有机碳矿化速率和累积矿化量, 秸秆制炭还田对土壤有机碳矿化无显著影响。此外生物炭对土壤原有有机碳矿化的调控作用受其施用量、外源活性有机碳输入和土壤类型的影响, 高量生物炭(2%)对非秸秆还田土壤有机碳矿化表现出较强的负激发效应, 而低量生物炭(0.55%)对秸秆还田土壤有机碳矿化表现出较明显的负激发效应。因此, 从“固碳减排”角度考虑, 秸秆制炭还田是更合理的利用方式, 且应根据土壤施肥管理措施和土壤类型考虑生物炭的施用量, 添加质量比为 2% 的生物炭可显著抑制土壤原有有机碳矿化, 降低 CO₂ 排放, 但应避免秸秆快速腐解期施用。

关键词: 小麦秸秆; 生物炭; 土壤碳库管理指数; 有机碳矿化

中图分类号: S158

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0153-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.023

Effects of Straw and Biochar on Soil Carbon Pool Management Index and Organic Carbon Mineralization

ZHANG Ying, LIU Xing, REN Xiujuan, LI Dongfang, WU Dafu, CHEN Xiling

(College of Resources and Environment, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003)

Abstract: Pot experiment and indoor thermostatic incubation experiment was conducted to study the effects of single and combined application of biochar and traditional organic materials (wheat straw and chicken manure) on organic carbon storage, activity and carbon pool management index of loamy fluvo-aquic soil and sandy soil in Henan Province, meanwhile, the effect of wheat straw returning and carbon-making returning on soil organic carbon mineralization and the regulation of biochar on soil original organic carbon mineralization were compared furtherly. The results showed that under the same application amount, the biochar and organic materials could increase soil organic carbon (TOC), and the highest TOC content was found in the soil treated by biochar, the content of TOC were increased by 63.15% and 115.62% in loamy fluvo-aquic and sandy soil, respectively. Moreover, biochar significantly increased soil stable organic carbon content and carbon pool index (CPI), while decreased soil carbon activity index (AI) and the effectiveness of carbon (SC), but had no significant effect on the content of potassium permanganate oxidizable carbon (POXC) and carbon pool management index (CPMI), and adding straw significantly increased POXC content, basic respiration and CPMI of two kinds of soils. Through indoor soil incubation experiment, the SOC mineralization rate and cumulative mineralization amount of the two types of soils were increased by straw at the early stage of cultivation (0 ~ 37 days), but there was little impact on SOC mineralization if the straw was made into biochar and added to the soil. The priming effects of biochar on soil native SOC mineralization were restricted by its application amount, exogenous active organic carbon input and soil type. In the soil without straw returning,

high biochar (2%) showed stronger negative priming effect on soil organic carbon mineralization, while low biochar (0.55%) showed more apparent negative priming effect soil organic carbon mineralization in the straw returning field. Therefore, from the perspective of carbon sequestration and emission reduction, compared with the direct returning straw to field, returning the straw prepared into biochar was a more reasonable way of utilization, and the application amount of biochar should be considered according to soil fertilization management measures and soil types. Application biochar with a mass ratio of 2% could significantly inhibit the mineralization of soil native organic carbon and reduce CO₂ emissions, but it should not be applied during the rapid decomposition period of straw.

Keywords: wheat straw; biochar; soil carbon pool management index; organic carbon mineralization

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,其中土壤有机碳的变化直接影响土壤肥力和环境变化。在农田土壤上,施肥是影响土壤有机碳库变化的重要因子之一^[1]。根据土壤中有有机碳的稳定性,可以将土壤有机碳分为活性有机碳和非活性有机碳。土壤活性有机碳是土壤中易氧化、分解和矿化的一部分碳,对农田管理措施反应灵敏。土壤活性有机碳指标繁多,所代表的活性部分受测定方法的制约。Lefroy 等^[2]测定了不同活性有机碳指标,指出能够被 333 mmol/L KMnO₄ 氧化的有机碳称作活性有机碳,也称为易氧化有机碳,并在此基础上提出了土壤碳库管理指数(CPMI)。CPMI 由土壤碳库指数和土壤碳库活度指数计算而来,既可以反映土壤有机碳储量的变化,也能反映土壤有机碳组分的变化情况,能够指示土壤肥力和土壤质量的变化。

有机肥是重要的培肥改土材料,既可以释放矿质养分供植物吸收,也会影响土壤有机碳组分的变化,但有机肥来源广泛、品种繁多,其种类和性质是决定其对土壤碳库影响的主要因素。大量的长期定位试验^[3-4]发现,施用有机肥可以提高土壤有机碳储量和活性,并提升土壤碳库管理指数。但是,对于一些腐殖化程度较低的有机肥,比如农作物秸秆也会引起农田温室气体排放增加等一系列负面效应^[5]。近年来,有机物料在完全或部分缺氧的情况下经高温热解炭化产生的生物炭在农业上的应用逐渐被关注。生物炭含碳量丰富,并具有很高的稳定性和吸附性能,可以吸附土壤活性碳素,降低温室气体排放^[6]。因此,生物炭和有机肥配施已经成为一种既可以提升土壤肥力,又可以降低温室气体排放风险的新思路。李有兵等^[7]发现,生物炭与秸秆配施在保证作物养分供应的同时能增加土壤碳库储量,降低秸秆矿化过程中的 CO₂ 释放量。然而,在不同试验条件下,生物炭对土壤有机碳活性和矿化速率的影响仍存在争议,它对土壤 CO₂ 排放既可能存在促进作用,也可能有抑制作用或者无显著影响^[8-10]。因此,土壤有机碳活性和 CO₂ 排放对生物炭输入的响应可能受诸多因素制约,比如生物炭的制备材料和工艺^[11]、供试土壤类

型^[12]等。基于以上原因,本研究以河南省粮食主产区壤质潮土和黄河泛滥沉积物发育而成的砂土为研究对象,以生物炭和不同腐殖化程度的传统有机物料(腐熟鸡粪、小麦秸秆)为供试材料,探讨生物炭和腐熟鸡粪、秸秆单施及配施对土壤有机碳、活性有机碳、基础呼吸以及碳库管理指数的影响,以及生物炭对秸秆还田土壤有机碳矿化的调控效应,以期为农田有机物料资源合理利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自河南省新乡市小麦/玉米一年二熟轮作区 0—20 cm 耕层,分别为潮土和黄河泛滥沉积物发育而成的砂土,其中壤质潮土砂粒、粉粒和黏粒分别占 20%,55%,25%,质地属于粉砂壤土,pH 8.01,有机质含量 12.6 g/kg,全氮含量 0.92 g/kg,碱解氮含量 75.5 mg/kg,速效磷含量 24.8 mg/kg,速效钾含量 192.3 mg/kg;砂土砂粒、粉粒和黏粒分别占 86%,8%,6%,质地属于壤砂土,pH 8.25,有机质含量 8.3 g/kg,全氮含量 0.78 g/kg,碱解氮含量 63.0 mg/kg,速效磷含量 39.5 mg/kg,速效钾含量 146.2 mg/kg。

供试玉米品种为“滑玉—12”,有机物料包括生物炭(BC)、小麦秸秆(WS)和腐熟鸡粪(CM)。小麦秸秆于 2015 年 5 月小麦收获前在田间采集得到,带回实验室烘干、粉碎后备用。腐熟鸡粪为市售产品,由新鲜鸡粪添加生物菌种高温发酵而成。生物炭为自制秸秆炭,首先将采集小麦秸秆烘干、粉碎,将粉末填满陶瓷坩埚并加盖,在限氧条件下升温至 350 ℃,并保持 4 h,自然冷却至室温,装袋备用。供试有机物料的营养含量见表 1。

表 1 有机物料养分含量

供试材料	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	C/N	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)
生物炭(BC)	684.8	14.5	47.2	10.5	28.7
腐熟鸡粪(CM)	166.4	22.3	7.5	9.8	7.5
小麦秸秆(WS)	356.7	8.4	42.5	1.7	13.4

1.2 试验设计

1.2.1 盆栽试验 试验设 6 个处理,分别为 CK(不

添加有机物料)、BC(添加 1.5%生物炭)、WS(添加 1.5%小麦秸秆)、CM(添加 1.5%腐熟鸡粪)、WS+BC(1.5%小麦秸秆和 1.5%生物炭)、CM+BC(1.5%腐熟鸡粪和 1.5%生物炭),每个处理重复 3 次。试验采用 20 cm×10 cm(直径×深度)塑料盆,每盆装风干过筛(2 mm)土壤 2.5 kg。播种前土壤施肥量 N 0.20 g/kg、P₂O₅ 0.15 g/kg、K₂O 0.20 g/kg,分别以尿素、磷酸二氢铵和氯化钾作为肥源,所有无机肥料和有机物料作为基肥一次施用。试验于 2015 年 5 月 20 日布置,并播种玉米种子,所有处理日常管理一致。2015 年 7 月 20 日采集土壤样品测定相关指标。以试验开始前的基础土壤为参考土样,用于土壤碳库管理指数计算,壤质潮土总有机碳为 7.29 g/kg,易氧化有机碳含量为 1.42 g/kg,砂土总有机碳为 5.87 g/kg,易氧化有机碳含量为 1.56 g/kg。

土壤样品于阴凉处自然风干,并分别过 1,0.15 mm 筛,装袋备用。土壤有机碳采用重铬酸钾容量法,土壤全氮测定采用硫酸加速剂消煮—凯氏定氮法^[13]。土壤易氧化有机碳测定采用 333 mmol/L KMnO₄ 氧化法^[2]。土壤微生物量碳测定采用氯仿熏蒸浸提法^[14],计算所用系数 $K_c=0.38$ 。土壤基础呼吸采用碱液吸收滴定法^[15]测定,微生物代谢熵为土壤基础呼吸与微生物量碳的比值。

1.2.2 室内恒温培养试验 基于前期研究结论,为了比较小麦秸秆直接还田与制炭还田对土壤碳排放的影响,以及生物炭对土壤及外源活性有机物料碳矿化的调控作用,于 2016 年 3 月 25 日布置恒温培养试验。供试土壤与盆栽试验相同,分别为壤质潮土和砂土,各设 6 个处理:CK(不添加有机物料)、WS(秸秆直接还田,添加 1.5%秸秆)、BC-1(秸秆制炭还田,添加 0.55%生物炭,由 1.5%秸秆施用量计算而来,成炭率为 36.8%)、BC-2(添加 2%生物炭)、WS+BC-1(添加 1.5%秸秆和 0.55%生物炭)、WS+BC-2(添加 1.5%秸秆和 2%生物炭),此外再设置纯生物炭对照处理,只添加 5 g 生物炭,每个处理设置 3 个重复。为了计算土壤 CO₂ 矿化量,同时设 1 个不添加任何土壤和有机材料的空白对照。

称取 40 g 风干土壤,按比例与有机材料充分混匀,并调节湿度至 50%的田间持水量,置于 250 mL 锥形瓶中,瓶内同时放置盛 20 mL 0.5 mol/L NaOH 溶液的小塑料试管作为集气瓶吸收土壤呼吸释放的 CO₂,并用保鲜膜封口,在 25 ℃恒温培养箱中培养 72 天。分别在培养的第 1,3,6,10,17,24,37,52,72 天取出其中的小试管,将吸收有 CO₂ 的 NaOH 倒入小烧杯中,用盐酸滴定,来分析土样释放出的 CO₂-C,然后向试管中装入等量 NaOH 溶液,并密封培养。

1.3 数据计算方法

1.3.1 土壤碳库管理指数

稳态碳(SC, g/kg)=样品有机碳含量(g/kg)-样品易氧化有机碳含量(g/kg)

碳素有效率(AC, %)=样品易氧化有机碳含量(g/kg)÷样品有机碳含量(g/kg)×100%

碳库指数(CPI)=样品有机碳含量(g/kg)÷参考土壤有机碳含量(g/kg)

碳库活度(A)=易氧化有机碳含量(g/kg)÷稳态碳含量(g/kg)

碳库活度指数(AI)=样品碳库活度÷参考土壤碳库活度

碳库管理指数(CPMI)=碳库指数(CPI)×碳库活度指数(AI)×100

1.3.2 有机碳矿化相关指标计算

有机碳矿化量(mg/kg)=C(CO₂, mg/L)×吸收液体积(L)÷土壤或生物炭干重(kg)

有机碳累积矿化量(mg/kg)=从培养开始到某个时间点释放的 CO₂ 总和

矿化速率(mg/(kg·d))=培养时间段内有机碳矿化量(mg/kg)÷培养时间(d)

生物炭对土壤有机碳矿化激发效应(mg/kg)=添加生物炭土壤有机碳矿化量(mg/kg)-土壤对照累积矿化量(mg/kg)-生物炭累积矿物化(mg/kg)

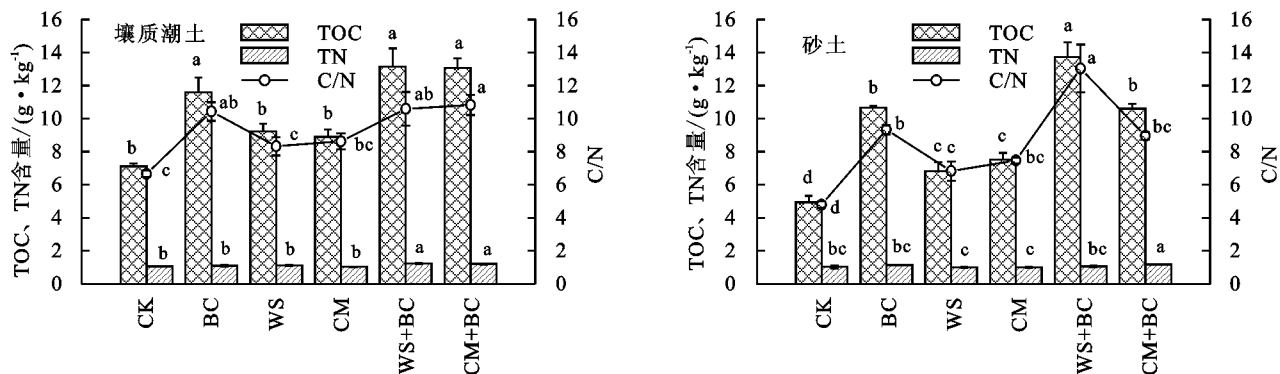
1.4 数据分析

所有数据用 Excel 2003 和 SPSS PASW Statistics 18.0 软件进行统计分析, SigmaPlot 10.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 生物炭与传统有机物料对土壤碳库管理指数的影响

2.1.1 土壤有机碳和全氮 由图 1 可知,在壤质潮土上,单施秸秆和腐熟鸡粪对土壤总有机碳的提升作用不显著,而添加生物炭的 3 个处理 BC、WS+BC、CM+BC 可以显著提高土壤总有机碳含量,增幅分别为 63.15%,84.84%,83.72%;砂土的有机碳含量较壤质潮土低,各处理对砂土有机碳的提升效果更明显,BC、WS、CM、WS+BC、CM+BC 处理均显著增加了土壤有机质含量,增幅分别为 115.62%,37.88%,51.93%,177.57%,114.09%。3 种有机物料单施对土壤全氮含量影响不显著,而 WS+BC、CM+BC 显著增加了壤质潮土全氮含量,CM+BC 显著增加了砂土全氮含量。由于各处理对土壤全氮的影响较小,因此各处理对土壤碳氮比的影响与土壤有机碳相似。总体来看,添加有机物料对碳含量低、缓冲能力弱的砂土的有机碳提升效果更明显,其中生物炭提升效果最佳。



注:图中不同字母表示不同处理之间差异达显著水平($P < 0.05$)。下同。

图 1 生物炭与有机物料对土壤总有机碳、全氮、碳氮比的影响

2.1.2 土壤活性有机碳和基础呼吸 土壤易氧化有机碳(POXC)和微生物量碳(MBC)分别代表土壤中易分解矿化的有机碳和微生物残体中的碳,是重要的活性有机碳指标。由图 2 可知,在 2 种类型土壤上,WS 和 WS+BC 处理可以显著提升土壤 POXC 含量,且在砂土(56.98%和 76.89%)上的提升幅度大于壤质潮土(35.16%和 16.89%),CM+BC 处理也显著增加了砂土 POXC 含量,单施生物炭对土壤 POXC 含量影响不显著。在壤质潮土上,WS 和 CM 处理对土壤 MBC 的提

升作用未达到显著水平,BC、WS+BC、CM+BC 显著提高了土壤 MBC 含量,增幅分别为 20.98%,40.84%,26.54%;在砂土上,BC、WS、CM 处理对土壤 MBC 提升作用不显著,WS+BC 和 CM+BC 显著增加了土壤 MBC 含量,增幅分别为 19.43%和 21.28%。在壤质潮土上,添加秸秆显著提升了土壤基础呼吸强度;在砂土上,各处理均可提升土壤基础呼吸强度,秸秆的提升幅度最大,其次是腐熟鸡粪,生物炭最低。此外,各处理对土壤微生物代谢熵的影响均不显著。

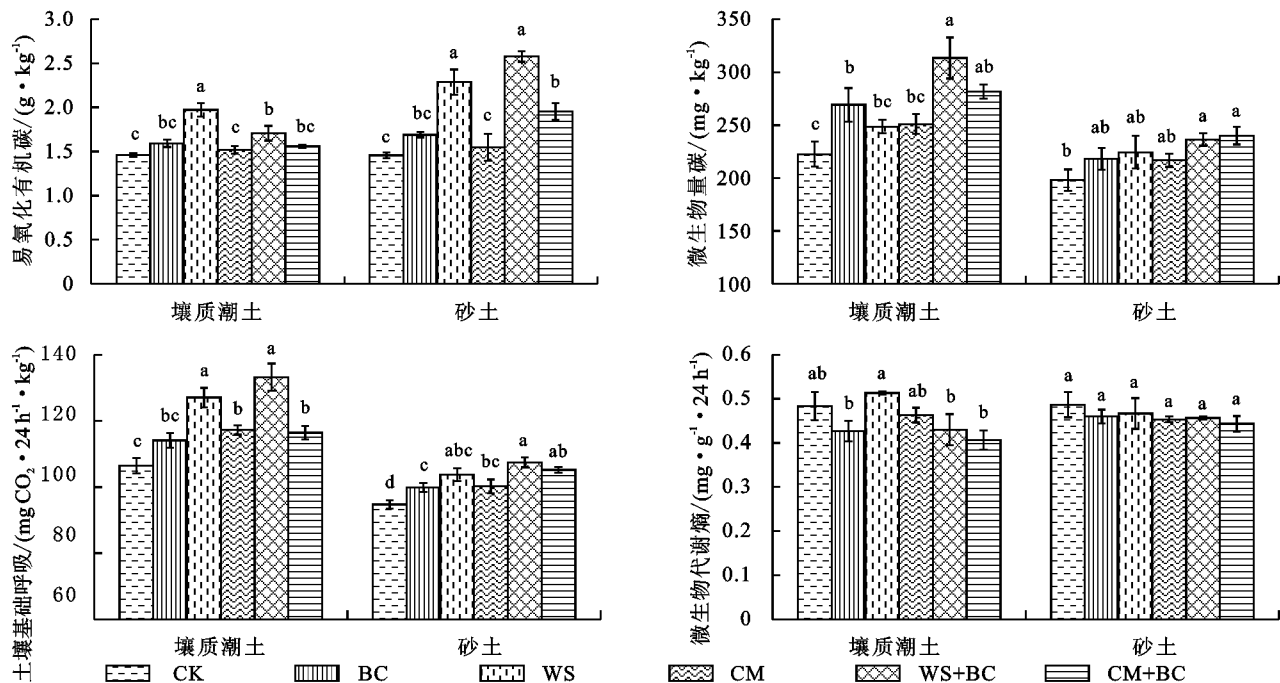


图 2 生物炭与有机物料对土壤易氧化有机碳、微生物量碳、土壤呼吸及微生物代谢熵的影响

2.1.3 土壤碳库管理指数 生物炭可以大幅度提升土壤总有机碳含量,并显著提高土壤的碳库指数(CPI),这部分碳主要是活性较低的稳态碳(SC)为主,而对土壤易氧化有机碳(POXC)无显著影响。因此,生物炭降低了碳素利用效率(AC)、碳库活度(A)和碳库活度指数(AI)。3 种有机物料中,生物炭处理的土壤 CPI 显著高于秸秆和腐熟鸡粪,但是秸秆处理的土壤 AC、A 和 AI 最高,腐熟鸡粪次之,生物炭

最低(表 2)。

土壤碳库管理指数(CPMI)是评价土壤有机碳质量的指标。由表 2 可知,在壤质潮土上,只有单施秸秆处理 WS 显著提高了土壤 CPMI,增幅为 31.50%;在砂土上,WS 和 WS+BC 处理可以显著提高土壤 CPMI,增幅分别为 64.99%和 53.62%。综上所述,3 种有机物料中,秸秆可以提高土壤活性有机碳,增加土壤碳库管理指数,生物炭处理的土壤可以保持更多的稳态碳,增加

土壤碳库容量,而腐熟鸡粪短期内对土壤碳库容量和活度的影响相对较小。

表 2 生物炭与有机物料对土壤碳库管理指数的影响

土壤类型	处理	稳态碳 SC/ (g · kg ⁻¹)	碳素有效率 AC/%	碳库指数 CPI	碳库活度 A	碳库活度指数 AI	碳库管理 指数 CPMI
壤质潮土	CK	5.61±0.15b	21.16±0.39a	0.98±0.02b	0.27±0.01a	1.12±0.03a	109.08±1.88b
	BC	12.78±0.85a	11.19±0.84c	1.97±0.12a	0.13±0.01c	0.53±0.05c	102.78±3.36b
	WS	7.26±0.38b	21.39±0.27a	1.26±0.06b	0.27±0.01a	1.13±0.02a	143.44±5.05a
	CM	7.38±0.42b	17.09±0.42b	1.22±0.06b	0.21±0.01b	0.86±0.03b	104.58±2.54b
	WS+BC	11.54±1.16a	12.50±1.64c	1.80±0.15a	0.14±0.02c	0.60±0.09c	105.71±9.53b
	CM+BC	11.51±0.58a	11.98±0.46c	1.79±0.08a	0.13±0.01c	0.57±0.02c	101.29±1.04b
砂土	CK	3.54±0.35d	29.47±2.31a	0.85±0.06d	0.42±0.04a	1.17±0.13a	98.10±4.67b
	BC	8.99±0.09b	15.83±0.26b	1.82±0.02b	0.19±0.01b	0.52±0.01b	95.02±1.95b
	WS	4.67±0.13cd	32.86±1.75a	1.18±0.03c	0.49±0.04a	1.37±0.11a	161.86±14.24a
	CM	5.98±0.54c	20.83±3.15b	1.28±0.07c	0.27±0.05b	0.74±0.15b	93.27±13.24b
	WS+BC	11.17±0.95a	18.97±1.72b	2.34±0.15a	0.24±0.03b	0.66±0.07b	150.70±6.65a
	CM+BC	8.65±0.19b	18.40±0.43b	1.81±0.05b	0.22±0.01b	0.63±0.02b	113.34±6.16b

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同字母表示不同处理之间差异达显著水平(P<0.05)。

2.2 生物炭与小麦秸秆对土壤有机碳矿化的影响

2.2.1 土壤有机碳矿化动态及总矿化量 由图 3 可知,在 2 种类型土壤上,各处理土壤有机碳矿化速率随时间的变化趋势相似,分别在 0~10,10~37 天出现“快速下降”和“慢速下降”2 个阶段,而后趋于平衡。在壤质潮土上,与培养初期(1 天)土壤相比,培养 10,37 天的土壤有机碳矿化速率分别下降了63.39%~87.42%和 90.73%~95.63%;砂土上,培养 10,37 天的土壤有机碳矿化速率分别下降了 67.56%~81.87%和 90.36%~93.19%。添加秸秆可大幅度提升土壤有机碳矿化速率,并且提升幅度随培养时间的延长而逐渐减小,生物炭对土壤有机碳矿化速率影响较小。

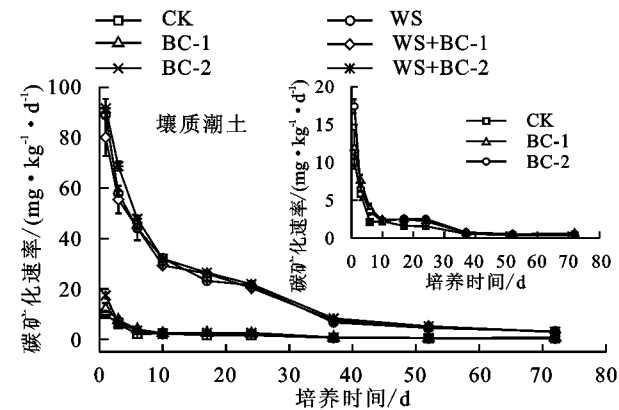
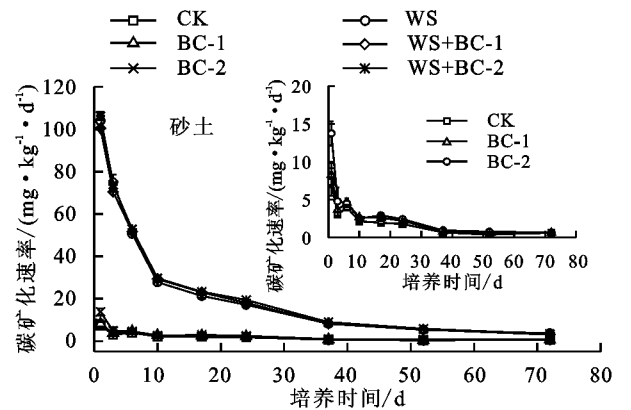


图 3 生物炭与秸秆对壤质潮土和砂土有机碳矿化速率的影响

2.2.2 生物炭对原有土壤及秸秆有机碳矿化的激发效应 由图 5 可知,生物炭对原有土壤有机碳矿化的激发效应受土壤类型和秸秆输入的影响。在不添加秸秆的壤质潮土上,添加低量生物炭(0.55%)对原有土壤有机碳矿化表现出正激发效应,添加高量生物炭(2%)表现出负激发效应,而生物炭对添加秸秆的壤质潮土表现出相反的影响规律。在砂土上,除了低量生物炭对不添

由图 4 可知,添加秸秆可大幅度提高 2 种类型土壤有机碳累积矿化量,培养 72 天后,WS、WS+BC-1 和 WS+BC-2 处理的土壤有机碳累积矿化量在壤质潮土和砂土上分别较对照提升了 915.93~1 004.01, 958.36~1 012.73 mg/kg,其中秸秆配施 2%生物炭处理显著高于单施秸秆处理。生物炭对壤质潮土有机碳累积矿化量无显著影响,而添加 2%生物炭表现出对砂土有机碳累积矿化量的显著提升作用,较对照提高了 33.66 mg/kg。总体来看,添加未腐熟的秸秆可大幅度提高土壤有机碳矿化,这部分活性碳的矿化主要集中在施入后前 40 天左右,添加生物炭对土壤有机碳矿化影响较小。



加秸秆土壤有机碳矿化表现出小幅度正激发效应外,生物炭主要表现出对原有土壤有机碳的负激发效应。

3 讨论

土壤有机碳库是土壤重要的养分库和微生物能量库,其分解和累积直接影响土壤生产力和全球陆地生态系统碳平衡^[16]。本研究发现,生物炭显著提升了 2 种类型土壤有机碳含量,且提升幅度高于相同施

用量的秸秆和鸡粪,但其对壤质潮土易氧化有机碳和土壤呼吸以及砂土易氧化有机碳的影响均不显著(图 1、图 2),这与张杰等^[17]的研究结果一致。可能是由于生物炭是有机材料在缺氧条件下高温裂解的产物,

碳含量高于传统有机物料,且芳香性较强,具有化学和微生物学惰性,可在土壤中长期保存,为土壤提供的主要是稳定性有机碳,与传统有机肥相比对土壤呼吸的直接贡献较小^[18]。

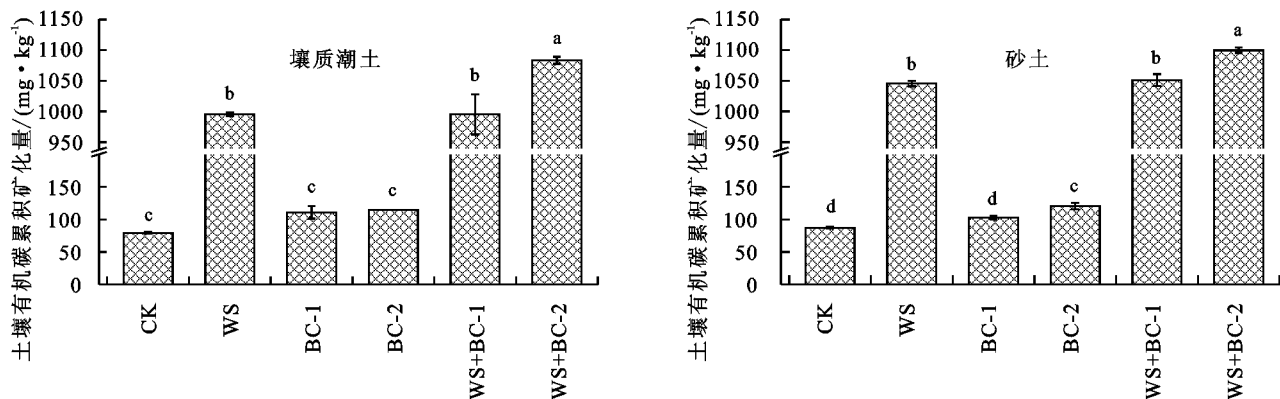


图 4 生物炭与秸秆对壤质潮土和砂土有机碳累积矿化量的影响

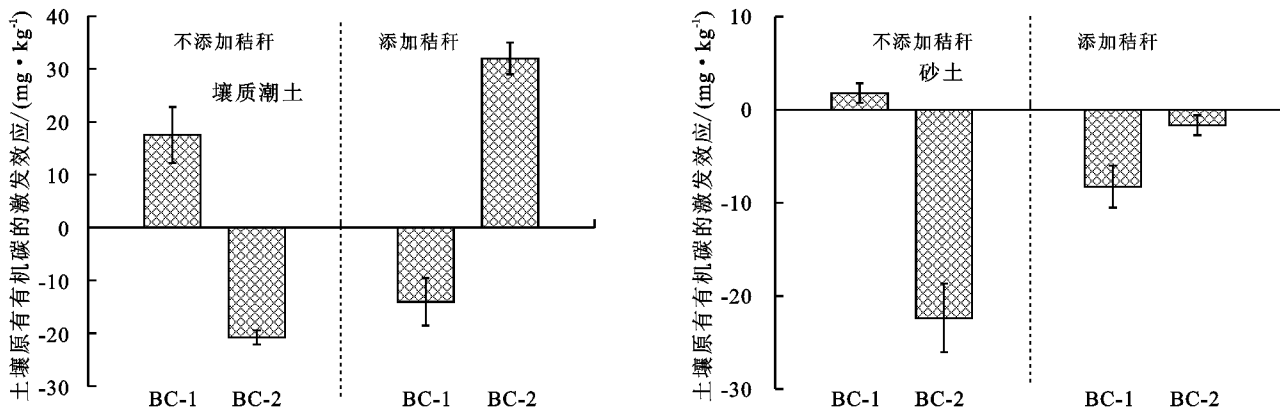


图 5 生物炭对不同处理条件下壤质潮土和砂土原有有机碳矿化的激发效应

生物炭促进^[11]或抑制^[19]了土壤呼吸和有机碳活度,这种差异可能受生物炭特性、土壤类型和试验周期等诸多因素影响。土壤碳库管理指数(CPMI)可表征土壤养分及碳素动态变化,比土壤有机碳更具灵敏性,反映有机碳被微生物和植物利用的难易程度,其值越大表示碳库活度和质量也就越高^[20]。本研究条件下,生物炭向土壤输入大量惰性碳,可显著增加土壤有机碳含量和碳库指数,却大幅度降低了土壤碳库活度,导致其对土壤碳库管理指数影响不显著。秸秆和鸡粪均可显著增加砂土有机碳含量,但对壤质潮土有机碳的提升作用不显著,这与前人^[21]在潮土上的研究结果不同,可能是由于供试土壤基础有机碳含量差异导致。此外,秸秆可显著提升 2 种土壤易氧化有机碳和土壤基础呼吸(图 2),丁瑞霞等^[22]也在田间条件下发现秸秆还田对土壤呼吸的良好促进作用。究其原因:一方面,秸秆中活性有机碳的快速分解直接增加土壤呼吸强度;另一方面,秸秆中的糖类、蛋白质、纤维素和可溶性碳等可作为微生物代谢的碳源和氮源,增加微生物活性和多样性^[23],从而促进土壤呼吸。此外,秸秆对更肥沃的壤质潮土呼

吸强度的提升幅度大于砂土(图 2),这可能是由壤质潮土自身微生物量和活性高于砂土,且对秸秆输入的碳源和氮源利用效率更高所致,这也从侧面证明了上述结论。3 种有机物料中,仅秸秆可显著提升土壤碳库管理指数,并且其对土壤易氧化有机碳和碳库活度指数的提升作用是其增加土壤碳库管理指数的主要原因。因此,秸秆直接还田可在短期内显著提升土壤有机碳活度和质量,但秸秆矿化强烈,短期内对土壤有机碳储量的提升作用较小,并且其快速腐解期的碳排放是主要的温室气体来源,对环境造成负面影响^[24]。室内培养试验同样发现,添加秸秆可在培养前期大幅度提升 2 种类型土壤有机碳矿化速率和累积矿化量(图 3、图 4)。

从“固碳减排”角度考虑,秸秆制成生物炭还田可能是更好的利用措施,生物炭是一种惰性碳,可提高土壤稳定性碳库,增加土壤碳汇^[25]。与秸秆直接还田相比,制炭还田大大降低了土壤 CO₂ 排放(图 3、图 4)。同时,除却其自身碳排放,生物炭还对土壤原有有机碳矿化影响显著。本研究发现,在壤质潮土上,生物炭对未添加秸秆土壤有机碳矿化表现出“低量

(0.55%)正激发”和“高量(2%)负激发”的影响规律,而生物炭对秸秆还田土壤则表现出相反的影响规律(图5),可见秸秆还田带入的易矿化有机碳会影响生物炭对壤质潮土有机碳矿化的调控规律。已有研究^[18]表明,生物炭对土壤有机碳的矿化同时存在促进和抑制2种相反的过程。首先,生物炭独特的多孔隙结构可以吸附土壤中的空气和水分,为微生物的生长和繁殖提供了良好的栖息地,促进了微生物活性^[26],间接的提升土壤碳素矿化。其次,生物炭的多孔隙结构还可以吸附土壤易溶有机碳,表现出包封作用,抑制了土壤微生物的活性^[27-28],因而降低土壤有机碳矿化,提高土壤“固碳减排”能力。因此,当生物炭对土壤有机碳的矿化的促进作用大于抑制作用时表现为正激发效应,反之则为负激发效应。

本研究条件下,随着施用量的增加,生物炭对壤质潮土有机碳矿化的抑制作用随之增强,并逐渐作为主导调控效应,而当秸秆还田带入大量易溶性有机碳后,生物炭对土壤有机碳矿化的抑制作用则逐渐减弱,促进作用逐渐提升。这可能是由于生物炭对易溶性有机碳的吸附和包封作用存在饱和状况,其对土壤有机碳矿化的促进作用则逐渐成为主导因素。在砂土上,生物炭对秸秆未还田土壤有机碳矿化的激发效应的影响规律与壤质潮土一致,而在秸秆还田条件下均表现出负激发效应,但在高量生物炭条件下负激发效应明显减弱,也可从侧面证明上述结论。综上,生物炭对土壤原有有机碳矿化的调控作用受其施用量、外源活性有机碳的输入和土壤类型的影响。

4 结论

(1)3种有机物料中,生物炭对土壤有机碳的提升作用最显著,秸秆表现出对土壤易氧化有机碳和土壤基础呼吸的最佳促进作用。另外,与单施秸秆相比,秸秆与生物炭配施降低了壤质潮土易氧化有机碳含量,但在砂土上无此影响。

(2)生物炭可以增加土壤碳库指数,降低土壤碳库有效率和碳库活度,提升土壤碳库储量,而秸秆增加了土壤活性有机碳和碳库管理指数,腐殖化程度较高的腐熟鸡粪短期内对土壤碳库的影响较小。

(3)秸秆可在培养前期(0~37天)大幅度提升2种类型土壤有机碳矿化速率和累积矿化量,秸秆转化为生物炭还田对土壤有机碳矿化无显著影响。生物炭对土壤原有有机碳矿化的调控作用受其施用量、外源活性有机碳输入和土壤类型的影响。从土壤“固碳减排”角度考虑,秸秆制炭还田是更合理的还田方式,并且应根据土壤施肥管理措施和土壤类型考虑生物炭的施用量,2%的生物炭可显著抑制土壤有机碳矿

化,降低CO₂排放,但应避免秸秆快速腐解期施用。

参考文献:

- [1] 廖敏,彭英,陈义,等.长期不同施肥管理对稻田土壤有机碳库特征的影响[J].水土保持学报,2011,25(6):129-133.
- [2] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ¹³C natural isotope abundance [J]. Plant and Soil, 1993, 155/156(1): 399-402.
- [3] 吴玉红,郝兴顺,田霄鸿,等.秸秆还田对汉中盆地稻田土壤有机碳组分、碳储量及水稻产量的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):325-331.
- [4] 黄晶,张杨珠,高菊生,等.长期施肥下红壤性水稻土有机碳储量变化特征[J].应用生态学报,2015,26(11):3373-3380.
- [5] 蒙世协,刘春岩,郑循华,等.小麦秸秆还田量对晋南地区裸地土壤一大气间甲烷、二氧化碳、氧化亚氮和一氧化氮交换的影响[J].气候与环境研究,2012,17(4):504-514.
- [6] Zhang A, Bian R, Pan G, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles [J]. Field Crops Research, 2012, 127: 153-160.
- [7] 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.
- [8] Zhao R, Coles N, Wu J. Carbon mineralization following additions of fresh and aged biochar to an infertile soil [J]. Catena, 2015, 125: 183-189.
- [9] 匡崇婷,江春玉,李忠佩,等.添加生物质炭对红壤水稻土有机碳矿化和微生物生物量的影响[J].土壤,2012,44(4):570-575.
- [10] 李正东,陶金沙,李恋卿,等.生物质炭复合肥对小麦产量及温室气体排放的影响[J].土壤通报,2015,46(1):177-183.
- [11] Zhang Y, Tan Q L, Hu C X, et al. Differences in responses of soil microbial properties and trifoliate orange seedling to biochar derived from three feedstocks [J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15(3): 541-551.
- [12] 方明,任天志,赖欣,等.花生壳生物炭对潮土和红壤理化性质和温室气体排放的影响[J].农业环境科学学报,2018,37(6):1300-1310.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [14] 吴金水,林启美,黄巧云,等.土壤微生物生物量测定方法及其应用[M].北京:气象出版社,2006.
- [15] Bekku Y, Koizumi H, Oikawa T, et al. Examination of four methods for measuring soil respiration [J]. Applied Soil Ecology, 1997, 5(3): 247-254.

- based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [8] 徐明岗,于荣,孙小凤,等.长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2006,12(4):459-465.
- [9] 张玉军,董士刚,刘世亮,等.不同有机物料对土壤基本化学性质及可溶性有机碳氮的影响[J].*中国农学通报*,2017,33(29):116-123.
- [10] 杨滨娟,黄国勤,兰延,等.施氮和冬种绿肥对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J].*应用生态学报*,2014,25(10):2907-2913.
- [11] 汪吉东,张永春,俞美香,等.不同有机无机肥配合施用对土壤活性有机质含量及 pH 值的影响[J].*江苏农业学报*,2007,23(6):573-578.
- [12] 蔡太义,黄会娟,黄耀威,等.不同量秸秆覆盖还田对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J].*自然资源学报*,2012,27(6):964-974.
- [13] 肖小平,唐海明,聂泽民,等.冬季覆盖作物残茬还田对双季稻田土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J].*中国生态农业学报*,2013,21(10):1202-1208.
- [14] 邱莉萍,张兴昌,程积民.土地利用方式对土壤有机质及其碳库管理指数的影响[J].*中国环境科学*,2009,29(1):84-89.
- [15] 许晶晶,郝明德,赵云英.黄土高原旱地小麦氮磷钾与有机肥优化配施试验[J].*干旱地区农业研究*,2009,27(3):143-147.
- [16] 高翔,沈阿林,寇长林,等.秸秆还田对小麦玉米轮作田土壤有机碳质量的影响[J].*河南农业科学*,2012,41(9):63-67.
- [17] 梁尧,韩晓增,宋春,等.不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响[J].*中国农业科学*,2011,44(17):3565-3574.
- [18] 张玉军,董士刚,刘世亮,等.有机物替代部分化肥对土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J].*河南农业科学*,2018,47(1):43-47.
- [19] 何翠翠,王立刚,王迎春,等.长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究[J].*土壤学报*,2015,52(1):194-202.
- [20] 杨永辉,武继承,丁晋利,等.长期免耕对不同土层土壤结构与有机碳分布的影响[J].*农业机械学报*,2017,48(9):173-182.
- [21] 宇万太,赵鑫,马强,等.长期定位试验下施肥对潮棕壤活性碳库及碳库管理指数的影响[J].*土壤通报*,2008,39(3):539-544.
- [22] 王改玲,李立科,郝明德.长期施肥和秸秆覆盖土壤活性有机质及碳库管理指数变化[J].*植物营养与肥料学报*,2017,23(1):20-26.
- [23] 张贵龙,赵建宁,宋晓龙,等.施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2012,18(2):359-365.
- (上接第 159 页)
- [16] 余健,房莉,卞正富,等.土壤碳库构成研究进展[J].*生态学报*,2014,34(17):4829-4838.
- [17] 张杰,黄金生,刘佳,等.秸秆、木质素及其生物炭对潮土 CO₂ 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.
- [18] 陈颖,刘玉学,陈重军,等.生物炭对土壤有机碳矿化的激发效应及其机理研究进展[J].*应用生态学报*,2018,29(1):314-320.
- [19] 章明奎, Bayou W D, 唐红娟.生物质炭对土壤有机质活性的影响[J].*水土保持学报*,2012,26(2):127-131.
- [20] 韩新辉,佟小刚,杨改河,等.黄土丘陵区不同退耕还林地土壤有机碳库差异分析[J].*农业工程学报*,2012,28(12):223-229.
- [21] 高伟,杨军,任顺荣.长期不同施肥模式下华北旱作潮土有机碳的平衡特征[J].*植物营养与肥料学报*,2015,21(6):1465-1470.
- [22] 丁瑞霞,王维钰,张青.两种轮作模式下秸秆还田对土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J].*中国生态农业学报*,2017,25(8):1106-1118.
- [23] 顾美英,唐光木,葛春辉,等.不同秸秆还田方式对和田风沙土壤微生物多样性的影响[J].*中国生态农业学报*,2016,24(4):489-498.
- [24] 刘昊,曹国军.不同农业废弃物还田对土壤碳排放及碳固定的影响[J].*水土保持学报*,2016,30(3):239-243.
- [25] 黎嘉成,高明,田冬,等.秸秆及生物炭还田对土壤有机碳及其活性组分的影响[J].*草业学报*,2018,27(5):42-53.
- [26] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipps N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review [J]. *Plant and Soil*, 2010, 337(1): 1-18.
- [27] 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.
- [28] Mitchell P J, Simpson A J, Soong R, et al. Shifts in microbial community and water-extractable organic matter composition with biochar amendment in a temperate forest soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 81(2): 244-254.