

杨宏伟,王小利,龙大勇,等. 秸秆和生物炭还田对稻田土壤有机碳及其矿化的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(11):226-232.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.11.032

秸秆和生物炭还田对稻田土壤有机碳及其矿化的影响

杨宏伟¹,王小利¹,龙大勇¹,段建军²,梅婷婷¹,徐彬¹,蒙姝熙¹,卢清涛¹

(1. 贵州大学农学院,贵州贵阳 550025; 2. 贵州大学烟草学院/贵州省烟草品质研究重点实验室,贵州贵阳 550025)

摘要:通过对稻田土壤有机碳矿化特征及其活性组分的研究,为提高贵州黄壤稻田土壤固碳能力提供理论依据。设置 4 个处理:不施肥(CK)、单施化肥(NPK)、秸秆配施化肥(NPKS)和生物炭配施化肥(NPKB),结合室内矿化试验对土壤碳氮比(C/N)、活性有机碳(AOC)含量、碳库管理指数(CPMI)和有机碳矿化进行研究。结果表明,与 NPK 处理相比,NPKB 处理 SOC 含量和 C/N 分别显著提高 9.10%、23.10%,NPKS 处理 TN 含量最高,与 CK 处理相比显著提高 19.39%。NPKS 处理下,土壤易氧化有机碳(ROC)、可溶性有机碳(DOC)和微生物量碳(MBC)含量均最高,分别为 5.88 g/kg、96.15 mg/kg 和 334.09 mg/kg。与 NPK 处理相比,NPKB 处理显著增加了土壤稳态碳(SC)含量、碳库指数(CPI)和 CPMI,对碳库活度(A)和碳库活度指数(AI)无显著影响,NPKS 处理则显著增加了 A、AI 和 CPMI。在培养期内,SOC 矿化速率在第 1 天处于最大值,前期(第 1~6 天)大幅下降,后期(第 6~45 天)缓慢下降;第 45 天时,SOC 累积矿化量在 2.14~2.82 g/kg 之间,而 SOC 累积矿化率在 11.01%~15.51%之间,均以 NPKB 处理最低。SOC 累积矿化量与 MBC 含量、ROC/SOC、A 和 AI 呈显著正相关关系,与 TN 含量、DOC/SOC 和 MBC/SOC 呈极显著正相关关系,与 C/N 呈极显著负相关关系。综上所述,秸秆与化肥配施,显著提高了土壤有机碳含量及其矿化程度,有机碳的稳定性下降;生物炭与化肥配施则对土壤的有机碳矿化具有显著的抑制作用,对土壤的固碳培肥起到积极作用。

关键词:水稻秸秆;生物炭;活性有机碳;碳库管理指数;有机碳矿化

中图分类号:S151.9+3;S511.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)11-0226-07

有机碳(SOC)是土壤碳库中最为活跃的一种物质,它对土壤的质量和肥力有着重要的影响,其矿化是土壤碳平衡、养分循环的关键过程,同时也是主要的温室气体排放源,研究其在农田中的含量变化和矿化特征有助于实现作物增产和稻田固碳减排的目标^[1-3]。活性有机碳(AOC)是由土壤中活性高、易矿化且能快速周转的一类有机碳组成的,尽管活性有机碳在土壤有机碳中占比较小,但反应

灵敏,能够对土壤碳库变化迅速作出响应,对研究土壤肥力概况有重要意义^[4-6]。碳库管理指数(CPMI)通过土壤碳库与碳库活度来反映不同施肥方式下土壤有机碳含量和组分的变化,CPMI 越高,相应的栽培措施对土壤的培肥作用就越大,可以反映出土壤的肥力和品质^[7-8]。

过量施用肥料使得土壤酸化和养分流失,间接导致土壤质量严重下降^[9]。最新数据显示,我国秸秆资源产量约 8.55 亿 t,有超过半数的光合作用产物储存于秸秆中,包括大量的有机碳和氮、磷、钾等养分,其随意丢弃或就地焚烧,既会造成资源的浪费,也会对生态产生危害^[10-11]。秸秆在微生物作用下转化为腐殖质,提高了土壤中有机的含量,并为农作物的生长提供营养,秸秆经高温热解成生物炭还田被认为是增加土壤碳固存以及减少温室气

收稿日期:2022-08-26

基金项目:国家自然科学基金(编号:31860160);贵州大学培育项目(编号:贵大培育[2019]12号)。

作者简介:杨宏伟(1998—),男,贵州六盘水人,硕士研究生,主要从事稻田土壤培肥研究。E-mail:2237341986@qq.com。

通信作者:王小利,博士,教授,主要从事土壤肥力与作物施肥研究。E-mail:xlwang@gzu.edu.cn。

[33] 赖金平,姚锋先,徐丽红,等. 有机液肥对赣南脐橙园土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 中国土壤与肥料,2022(6):16-24.

[34] 王伟鹏,张华. 长期施肥对华北农田褐土团聚体微结构与稳定性的影响[J]. 农业工程学报,2022,38(10):68-74.

[35] 张露,孟婷婷,胡雅,等. 不同培肥方式对沙质土地区次生林地土壤团聚体组成及稳定性的影响[J]. 干旱区研究,2021,

38(4):973-979.

[36] 秦萍,张俊华,孙兆军,等. 土壤结构改良剂对重度碱化盐土的改良效果[J]. 土壤通报,2019,50(2):414-421.

[37] 武晓森,杜广红,穆春雷,等. 不同施肥处理对农田土壤微生物区系和功能的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(1):99-109.

体排放的一种有价值的手段^[12-13]。在土壤中加入生物炭,既能很好地保持土壤湿度,增强土壤肥力,为农作物的生长提供良好的环境,更能降低有机碳矿化,提高土壤有机碳含量,起到固碳减排的效果^[14-15]。

本研究利用秸秆和生物炭进行田间试验,以不施肥和单施化肥作为对照,研究水稻耕层土壤总有机碳含量、活性有机碳含量、有机碳矿化及碳库管理指数的特征变化,以揭示秸秆及其生物炭还田在黄壤性水稻土培肥方面的差异,以期为贵州省作物秸秆的开发利用与稻田固碳培肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点为贵州省安顺市西秀区鸡场乡(106°5'58"E,26°7'10"N),属亚热带季风湿润性气候,年均降水量 968 ~ 1 309 mm,年均气温 13.2 ~ 15.0 ℃,海拔 1 204 m。试验土壤为黄壤性水稻土,其基本性质为 pH 值 5.19,有机质含量 35.16 g/kg,碱解氮含量 177.03 mg/kg,速效磷含量 9.14 mg/kg,速效钾含量 96.09 mg/kg。

1.2 试验设计和试验材料

本试验共设置 4 个处理,依次为对照(CK,不施肥)、单施化肥(NPK,肥料施用量 N 150 kg/hm²、P₂O₅ 40 kg/hm²、K₂O 100 kg/hm²)、秸秆配施化肥还田(NPKS,还田量为 15 t/hm²)、生物炭配施化肥还田(NPKB,还田量为 4 t/hm²,15 t 秸秆约能碳化得到 4 t 生物炭)。各处理小区面积为 72 m²(4 m × 18 m)采用大区对比试验,不设重复。在播种前一次性施用全部秸秆、生物炭、磷肥及 50% 的氮肥、钾肥,剩余 50% 氮肥按 3 : 2 的追肥比例分别于分蘖期和抽穗期施用,剩余 50% 钾肥则于抽穗期作追肥全部施用,并于 2021 年 6 月进行移栽,其他田间管理与当地水田管理保持一致,种植模式为单季稻。

供试水稻秸秆生物炭(B):炭化温度 450 ℃,pH 值 8.65,有机碳含量 344.97 g/kg,全氮含量 5.99 g/kg,全磷含量 1.99 g/kg、全钾含量 27.15 g/kg。供试水稻秸秆(S):有机碳含量 102.55 g/kg,全氮含量 0.62 g/kg,全磷含量 0.12 g/kg、全钾含量 3.26 g/kg。供试化肥为含 N 46.2% 的尿素、含 P₂O₅ 16% 的过磷酸钙、含 K₂O 60% 的氯化钾。供试水稻品种为锦城优雅禾(锦城 2A × 雅禾),全生育期 152 d。

1.3 土壤采集与测定

将各小区等分为 3 个样块(每个样块 24 m²),作为 3 次重复。于 2021 年 9 月 24 日,采用“五点取样”的方法,在所有处理内采集 0 ~ 20 cm 土壤样品,剔除可见根系和植物残体,混匀分成 2 份,一份风干后,分别过 0.15、0.25 mm 的筛子进行密封保存,用于土壤有机碳、全氮(TN)及易氧化有机碳(ROC)含量的测定,另外一份经过 2 mm 筛子后存放在 4 ℃ 的冰箱中,以备土壤有机碳的矿化培养和可溶性有机碳(DOC)、微生物量碳(MBC)的含量测定。SOC 和 TN 含量按鲁如坤的方法^[16]测定。DOC 含量采用 0.5 mol/L 的 K₂SO₄ 浸提法^[17]测定。土壤 MBC 含量采用三氯甲烷熏蒸 - 0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提法^[17]测定。ROC 含量采用 0.333 mol/L KMnO₄ 氧化法^[18]测定。

1.4 室内恒温培养试验

采用碱液吸收法:每个田间重复设置 3 个室内平行,同时设 6 个空白作对照,一共 42 组矿化培养系统。每组矿化培养系统中,于 50 mL 广口瓶中称取 2 mm 的鲜土(4 ℃ 冷藏)30.0 g,并用蒸馏水调节土壤含水量至 35%,置于 1 000 mL 培养瓶底部,加盖密封,在 25 ℃、湿度为 45% 的恒温箱中暗预培养 7 d。预培养后,在培养瓶的底部放置碱液吸收杯(1 mol/L NaOH 溶液 10 mL),分别于培养的第 1、3、6、9、12、15、18、21、24、27、30、33、36、39、42、45 天时,调节矿化培养系统含水量并更换碱液吸收杯,向碱性吸收杯中加入 1 mol/L BaCl₂ 溶液 2 mL 和 2 ~ 3 滴酚酞指示剂,最后用 0.1 mol/L 的 HCl 溶液(用无水 Na₂CO₃ 溶液标定)滴定直至紫色消失为止。

1.5 数据计算

1.5.1 碳库管理指数 以 CK 处理作为参考土壤,具体计算方法如下:

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) = 样品易氧化有机碳含量(g/kg)/稳态碳含量(g/kg);

碳库活度指数(AI) = 样品碳库活度(A)/参考土壤碳库活度(A₀);

碳库管理指数(CPMI) = CPI × AI × 100。

1.5.2 有机碳矿化相关指标 有机碳矿化量

$(\text{mg/kg}) = c(\text{HCl}) \times (V_0 - V_1) \times 22/0.03$ 。
式中: $c(\text{HCl})$ 表示盐酸浓度, mol/L ; V_0 为空白滴定的体积, mL ; V_1 为消耗盐酸的体积, mL 。

有机碳累积矿化量 (g/kg) = 从培养开始到结束土壤释放的 CO_2 量的总和;

矿化速率 [$\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$] = 培养时间段内有机碳矿化量 (mg/kg)/培养时间 (d);

有机碳累积矿化率 (%) = 样品有机碳累积矿化量 (g/kg)/样品有机碳含量 (g/kg)。

1.6 数据分析

利用 Excel 2010 进行数据处理和作图; 采用 SPSS 26.0 软件进行多重比较 (Duncan's 法, $\alpha = 0.05$) 和 Pearson 相关性分析。

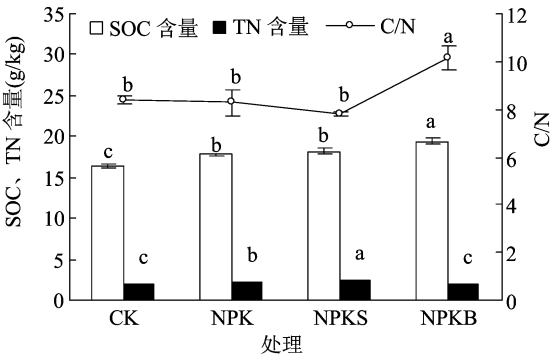
2 结果与分析

2.1 秸秆及其生物炭对稻田土壤碳氮比的影响

由图 1 可知,NPKB 处理土壤 SOC 含量最高, 为 19.42 g/kg ; 与 CK 相比,NPK、NPKS 和 NPKB 处理均显著提高了土壤 SOC 含量,增幅分别为 8.34% 、 10.71% 和 18.20% ($P < 0.05$); 与 NPK 和 NPKS 处理相比,NPKB 处理显著提高了土壤 SOC 含量,增幅分别为 9.10% 和 6.76% 。NPKS 处理土壤 TN 含量最高, 为 2.34 g/kg ; 与 CK 处理相比,NPK 和 NPKS 处理均显著提高了土壤 TN 含量,增幅分别为 10.20% 和 19.39% ,NPKB 处理则无显著影响。土壤 C/N 反映土壤的供肥能力, 与 CK 相比,NPK 和 NPKS 处理对土壤 C/N 的影响不显著; 与 CK、NPK 和 NPKS 处理相比,NPKB 处理显著提高了土壤 C/N,增幅分别为 21.33% 、 23.10% 和 30.85% 。总体来看,添加生物炭对水稻土 SOC 含量和 C/N 提升效果最佳,添加秸秆对水稻土 TN 含量提升效果最佳。

2.2 秸秆及其生物炭对稻田土壤活性有机碳含量及其分配比例的影响

由表 1 可知,除 ROC/SOC 外,NPK、NPKS 和



图中不同小写字母表示同一指标不同处理间差异达显著水平($P < 0.05$)。图 3 同

图1 不同处理的土壤有机碳、全氮含量和碳氮比

NPKB 处理较 CK 处理均不同程度地增加了土壤活性有机碳含量及其分配比例。其中,NPKS、NPKB 处理较 CK 处理土壤 ROC 含量分别显著增加 25.64% 、 14.74% ,较 NPK 处理分别显著增加 25.37% 、 14.50% ($P < 0.05$); NPK、NPKS 和 NPKB 处理的 DOC 含量较 CK 处理分别显著增加 20.21% 、 60.04% 和 36.43% ,MBC 含量分别显著增加 23.89% 、 68.25% 和 32.08% 。ROC/SOC、DOC/SOC 和 MBC/SOC 分别为 $26.36\% \sim 32.30\%$ 、 $0.37\% \sim 0.53\%$ 和 $1.21\% \sim 1.84\%$; 与 CK、NPK 和 NPKB 处理相比,NPKS 处理的 ROC/SOC 分别显著增加 13.67% 、 22.53% 和 16.73% ,MBC/SOC 分别显著增加 52.07% 、 33.33% 和 36.30% ; 与 CK 相比,NPK、NPKS 和 NPKB 处理的 DOC/SOC 分别显著增加 10.81% 、 44.24% 和 13.51% 。综上可知,土壤活性有机碳含量及其有效率均以 NPKS 处理为最高,并与其他处理达显著差异。

2.3 秸秆及其生物炭对稻田土壤碳库管理指数的影响

采用 CK 作为参照土壤,计算并分析了不同施肥条件下的土壤碳库管理指数。由表 2 可知,NPKB 可以大幅度提升 SOC 含量,这部分碳以稳定碳 (SC) 为主,活性较低。NPKS 处理显著提高了土壤

表 1 不同处理的土壤活性有机碳含量及其分配比例

处理	ROC 含量 (g/kg)	DOC 含量 (mg/kg)	MBC 含量 (mg/kg)	ROC/SOC (%)	DOC/SOC (%)	MBC/SOC (%)
CK	$4.68 \pm 0.36\text{b}$	$60.08 \pm 2.42\text{d}$	$198.57 \pm 22.78\text{c}$	$28.43 \pm 1.75\text{b}$	$0.37 \pm 0.02\text{c}$	$1.21 \pm 0.16\text{b}$
NPK	$4.69 \pm 0.22\text{b}$	$72.22 \pm 0.91\text{c}$	$246.01 \pm 22.77\text{b}$	$26.36 \pm 1.02\text{b}$	$0.41 \pm 0.01\text{b}$	$1.38 \pm 0.13\text{b}$
NPKS	$5.88 \pm 0.43\text{a}$	$96.15 \pm 2.82\text{a}$	$334.09 \pm 3.97\text{a}$	$32.30 \pm 1.79\text{a}$	$0.53 \pm 0.03\text{a}$	$1.84 \pm 0.03\text{a}$
NPKB	$5.37 \pm 0.12\text{a}$	$81.97 \pm 1.42\text{b}$	$262.28 \pm 25.59\text{b}$	$27.67 \pm 0.05\text{b}$	$0.42 \pm 0.02\text{b}$	$1.35 \pm 0.15\text{b}$

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。表 2 同。

表 2 不同处理的土壤碳库管理指数

处理	SC 含量 (g/kg)	A	AI	CPI	CPMI
CK	11.76 ± 0.10d	0.40 ± 0.03b	1.00 ± 0.00b	1.00 ± 0.00c	100.00 ± 0.00c
NPK	13.11 ± 0.09b	0.36 ± 0.02b	0.90 ± 0.05b	1.08 ± 0.01b	97.04 ± 5.76c
NPKS	12.31 ± 0.16c	0.48 ± 0.04a	1.19 ± 0.10a	1.11 ± 0.02b	132.38 ± 8.18a
NPKB	14.04 ± 0.28a	0.38 ± 0.01b	0.96 ± 0.01b	1.18 ± 0.02a	113.00 ± 2.50b

碳库活度(A)和碳库活度指数(AI),其中 NPKS 处理的 AI 较 CK、NPK 和 NPKB 处理分别提高 19.00%、32.22% 和 23.96% ($P < 0.05$); NPKB 处理显著提高了土壤碳库指数(CPI),比 CK、NPK 和 NPKS 处理分别提高 18.00%、9.26% 和 6.31%。CPMI 是衡量土壤有机碳质量的一个重要指标, NPKS、NPKB 处理较 CK、NPK 处理可以显著提高 CPMI, 分别提高 32.38%、36.42% 和 13.00%、16.45%, NPK 处理与 CK 相比,土壤碳库管理指数无显著差异,表明单施化肥对提高土壤碳库管理指数的作用并不显著,有机物料配施化肥则可以显著提升土壤的培肥效果。

2.4 秸秆及其生物炭对稻田土壤有机碳矿化的影响

2.4.1 土壤有机碳矿化速率 由图 2 可知,在矿化培养的 45 d 内,土壤有机碳矿化速率总体上均表现出相似的下降趋势,其在第 1 天处于最大值并快速下降至第 6 天,第 6 天的矿化速率是第 1 天的 51.96% ~ 73.64%; 第 6 ~ 45 天,矿化速率缓慢下降,第 45 天的矿化速率是第 1 天的 26.99% ~ 34.44%。在整个培养期间,与 CK 处理相比, NPKS 处理可大幅度提升土壤有机碳矿化速率, NPKB 处理可大幅度降低土壤有机碳矿化速率, NPK 处理对土壤有机碳矿化速率影响较小。

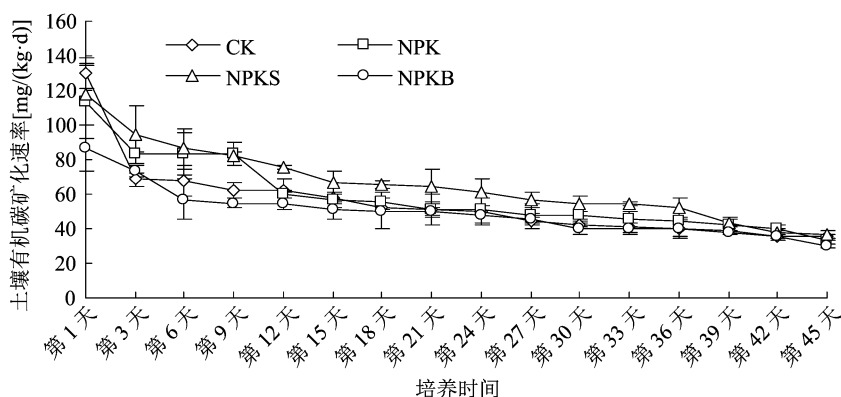


图2 不同处理的土壤有机碳矿化速率

2.4.2 土壤有机碳累积矿化量和累积矿化率 如图 3 - A 所示,随着培养时间的延长,各处理的有机碳累积矿化量逐渐增大并于第 45 天达最大值,其中以 NPKS 处理有机碳累积矿化量最高, NPKB 处理有机碳累积矿化量最低,培养结束后(第 45 天), NPKS、NPKB 处理的累积矿化量分别为 2.82、2.14 g/kg。在培养期间, NPKB 处理较 CK 处理的土壤有机碳累积矿化量有所下降,其他处理的大幅上升,并且以 NPKS 处理提升幅度最大;培养结束后(第 45 天), NPKB 处理较 CK 处理降低 7.36%,其他处理较 CK 处理提高 8.66% ~ 22.08%,所以

NPKB 处理可以降低土壤有机碳矿化。

有机碳累积矿化率是土壤固碳能力的重要指标,其值越低表示固碳能力越强。如图 3 - B 所示,矿化培养结束后,各处理土壤有机碳累积矿化率在 11.01% ~ 15.51%, NPKS 处理土壤有机碳累积矿化率显著高于其他 3 个处理 ($P < 0.05$),增幅为 10.39% ~ 40.87%, NPK 处理与 CK 差异不显著, NPKB 处理则显著低于其他处理,表明 NPKS 处理对土壤的固碳有明显的抑制作用, NPKB 处理则对土壤的固碳有明显的促进作用,生物炭还田能够显著增加土壤有机碳含量。

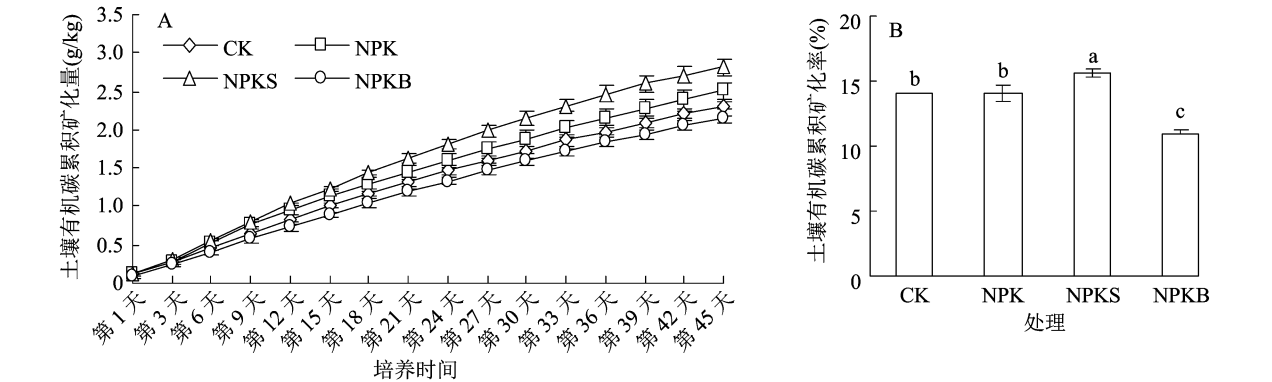


图3 不同处理的土壤有机碳累积矿化量和累积矿化率

2.5 土壤有机碳矿化与各指标的关系

相关性分析所用数据为各指标的平均值。结果(表3)表明,土壤有机碳累积矿化量与MBC含量、ROC/SOC、A和AI呈显著正相关关系($P <$

0.05),与TN含量、DOC/SOC和MBC/SOC呈极显著正相关关系($P < 0.01$),与C/N呈极显著负相关关系,与SOC、DOC、ROC、SC、CPI和CPMI的相关性未达到显著水平。

表3 土壤有机碳累积矿化量与各指标的相关性

项目	相关系数						
	SOC 含量	TN 含量	C/N	DOC 含量	MBC 含量	ROC 含量	DOC/SOC
45 - CO ₂ - C	-0.153	0.941 **	-0.821 **	0.546	0.625 *	0.423	0.725 **

项目	相关系数						
	MBC/SOC	ROC/SOC	SC	CPI	A	AI	CPMI
45 - CO ₂ - C	0.740 **	0.628 *	-0.465	-0.175	0.665 *	0.646 *	0.507

注:45 - CO₂ - C 表示培养 45 d 累积矿化量; *、** 分别表示显著相关 ($P < 0.05$)、极显著相关 ($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 秸秆及其生物炭对土壤碳氮比的影响

有机碳作为土壤的主要养分来源,其分解和固定都间接影响农业生态系统中的养分循环、水热平衡、土壤有机质周转和全球陆地生态系统碳平衡^[19]。本研究表明,NPKB 处理显著提高了SOC 含量和C/N,这与郭琴波等的研究结果^[20]一致,原因可能是秸秆生物炭自身具有较高的C/N,难以降解的稳定态有机碳含量丰富,并且秸秆生物炭具有丰富的速效养分和较大的孔隙度,为微生物提供了活动场所和养分来源,有利于土壤有机碳固定积累^[21-22]。有研究发现,秸秆配施化肥能够影响土壤微生物促进土壤中无机氮向有机氮转化过程,进而提高土壤全氮含量^[23],这与本研究结果一致。

3.2 秸秆及其生物炭对土壤活性有机碳及其分配比例和碳库管理指数的影响

有机碳库因对外部因素的敏感性和周转速率不同,它可以被分成三大类:活性有机碳、缓效有机

碳、惰性有机碳,其中活性有机碳含量或组成的变化对田间施肥措施的响应相对较快,其能对土壤质量变化和养分循环做到敏感监测^[24-25]。本研究显示,秸秆、生物炭与化肥配合施用能增加土壤中的有机碳活性组分含量,其中以秸秆配施化肥效果最显著,这与魏夏新等的研究结果^[26]一致;因为秸秆自身就含有较高的有机碳,并且由于微生物的分解作用使其释放出更多的养分,使得活性有机碳含量得以积累。有研究指出,ROC/SOC 和 DOC/SOC 能够反映土壤的碳库状况,其数值愈高,微生物对有机物的降解愈有利,反之则有机碳愈稳定^[27]。在本研究中,NPKS 处理能够显著提高 ROC/SOC 和 DOC/SOC,究其原因是秸秆还田后经微生物降解,使土壤中 ROC、DOC 含量升高;MBC/SOC 的变化则反映了土壤中 MBC 的来源及转化效率^[28],本研究中,通过秸秆与化肥配合施用,可以明显地增加 MBC/SOC 值,表明在施用秸秆后,土壤有机碳的循环速度显著提高。

碳库管理指数(CPMI)对土壤有机碳和活性成

分的变化具有灵敏的监测作用,可以更好地反映土壤的品质,是评价土壤质量对施肥措施响应的重要指标^[29]。本研究以不施肥耕层土壤作为参考,发现 NPKS 处理较 NPKB 处理显著提高了 CPMI,这说明秸秆直接还田较秸秆碳化还田更有利于土壤碳库活度的提高及质量的改善,追究其原因在于总有机碳和稳态碳(SC)/活性碳(AOC)的含量和比值差异巨大,这与王毅等的研究结果^[30-31]一致。

3.3 秸秆及其生物炭对土壤有机碳矿化的影响

微生物将有机碳降解为二氧化碳并释放大量养分元素的过程称之为有机碳矿化,是碳循环的重要组成部分,在全球气候变化中发挥重大作用^[32-33]。本研究中,所有处理 CO₂ 释放速率均呈相似的下降趋势,这与前人的研究结果^[34-35]一致,这是由于在矿化初期,土壤中有大量的活性有机碳和速效养分,微生物活性增强,促进 CO₂ 释放,随着矿化时间的延长,土壤中的有机碳主要是难降解的惰性组分碳,微生物活性减弱,有机碳矿化被限制^[36-37]。本试验中,有机碳累积矿化量和有机碳累积矿化率均以 NPKS 处理为最高,以 NPKB 处理为最低,这可能是由于秸秆还田后,秸秆中的活性有机碳、纤维素和糖类等可直接利用的碳氮源,为微生物活动提供了足够的养分源,而生物炭则因为其强吸附性和含有大量惰性有机碳,无法为微生物提供可利用碳源的同时降低了对土壤原生有机碳的降解,能够将有机碳更好地长期固存于土壤中^[38],这说明秸秆还田会降低土壤固碳能力,而生物炭还田则能够显著提高土壤固碳能力。

3.4 土壤有机碳矿化与各指标的关系

土壤碳氮比直接或间接地影响着有机碳矿化,土壤有机碳积累矿化量和土壤 TN 含量之间存在着极显著的正相关性,而和 C/N 呈极显著负相关关系,这与牛淑娟的研究结果^[39]一致,但与土壤 SOC 含量无显著相关性,这可能是由于外源碳的投入改变了土壤碳氮元素比例,间接影响了有机碳矿化。土壤有机碳累积矿化量与 MBC 含量、ROC/SOC 呈显著正相关关系,与 MBC/SOC、DOC/SOC 呈极显著正相关关系,表明土壤活性有机碳能够显著影响有机碳矿化,这与林仕芳等的研究结果^[40]一致;随着微生物可利用矿化底物的增加,微生物的数量和活力也会增加,有机碳的矿化能力也会增强。而土壤有机碳累积矿化量与 ROC 含量的相关性较弱,这是由于施肥差异导致处理间土壤肥力不同,微生物群

落对不同基质的利用能力也有一定的影响^[41]。本研究中,土壤有机碳累积矿化量与 A 和 AI 呈显著正相关关系,表明土壤有机碳矿化受碳库活度的影响,碳库活度越高,有机碳矿化越强。

4 结论

秸秆配施化肥还田,土壤全氮含量、活性有机碳含量、碳库活度指数和碳库管理指数均显著增加;生物炭配施化肥还田,使土壤有机碳含量、碳库指数和碳库管理指数显著增加,其中有机碳以稳态碳为主。

秸秆配施化肥对土壤有机碳矿化有明显的促进作用,并使其稳定性下降;生物炭配施化肥则对土壤有机碳矿化有明显抑制作用,增加了稳定态有机碳含量,有利于土壤固碳培肥。

综上,从土壤固碳培肥的角度考虑,生物炭是更合理的水稻秸秆还田方式。

参考文献:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623–1627.
- [2] Tian X P, Wang L, Hou Y H, et al. Responses of soil microbial community structure and activity to incorporation of straws and straw biochars and their effects on soil respiration and soil organic carbon turnover[J]. *Pedosphere*, 2019, 29(4): 492–503.
- [3] Moonis M, Lee J K, Jin H, et al. Effects of warming, wetting and nitrogen addition on substrate-induced respiration and temperature sensitivity of heterotrophic respiration in a temperate forest soil[J]. *Pedosphere*, 2021, 31(2): 363–372.
- [4] Langley J A, McKinley D C, Wolf A A, et al. Priming depletes soil carbon and releases nitrogen in a scrub-oak ecosystem exposed to elevated CO₂[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(1): 54–60.
- [5] 孙 娇, 周 涛, 郭鑫年, 等. 添加秸秆及生物质炭对风沙土有机碳及其活性组分的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(4): 802–808.
- [6] Wang F, Weil R R, Nan X X. Total and permanganate-oxidizable organic carbon in the corn rooting zone of US Coastal Plain soils as affected by forage radish cover crops and N fertilizer[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 247–257.
- [7] 张 影, 刘 星, 任秀娟, 等. 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[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 153–159, 165.
- [8] 王 超, 邱竞驰, 李建华, 等. 香蕉秆及其生物炭对双季水稻土团聚体及碳库管理的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(3): 537–546.
- [9] Liu Z W, Wu X L, Liu W, et al. Greater microbial carbon use efficiency and carbon sequestration in soils: amendment of biochar versus crop straws[J]. *GCB Bioenergy*, 2020, 12(12): 1092–

- 1103.
- [10] 张晓庆, 王梓凡, 参木友, 等. 中国农作物秸秆产量及综合利用现状分析[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(9): 30–41.
- [11] 李 一, 王秋兵. 我国秸秆资源养分还田利用潜力及技术分析[J]. 中国土壤与肥料, 2020(1): 119–126.
- [12] 徐蒋来, 胡乃娟, 张政文, 等. 连续秸秆还田对稻麦轮作农田土壤养分及碳库的影响[J]. 土壤, 2016, 48(1): 71–75.
- [13] Smith P. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies[J]. Global Change Biology, 2016, 22(3): 1315–1324.
- [14] He Y H, Yao Y X, Ji Y H, et al. Biochar amendment boosts photosynthesis and biomass in C_3 but not C_4 plants: a global synthesis[J]. GCB Bioenergy, 2020, 12(8): 605–617.
- [15] Zimmerman A R, Ouyang L. Priming of pyrogenic C (biochar) mineralization by dissolved organic matter and vice versa[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 130: 105–112.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [17] 赵林林, 吴志祥, 孙 瑞, 等. 土壤有机碳分类与测定方法的研究概述[J]. 热带农业工程, 2021, 45(3): 154–161.
- [18] 沈 宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. 生态学杂志, 1999, 18(3): 32–38.
- [19] 赵建坤, 李江舟, 杜章留, 等. 施用生物炭对土壤物理性质影响的研究进展[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(3): 95–101.
- [20] 郭琴波, 王小利, 段建军, 等. 氮肥减量配施生物炭对稻田有机碳矿化及酶活性影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 369–374, 383.
- [21] 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.
- [22] 黄雁飞, 陈桂芬, 熊柳梅, 等. 不同秸秆生物炭对水稻生长及土壤养分的影响[J]. 南方农业学报, 2020, 51(9): 2113–2119.
- [23] 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]. 植物营养与肥科学报, 2019, 25(7): 1107–1114.
- [24] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great Plains grasslands[J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(5): 1173–1179.
- [25] Mandal M, Kamp P, Singh M. Effect of long term manuring on carbon sequestration potential and dynamics of soil organic carbon labile pool under tropical rice – rice agro – ecosystem[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2020, 51(4): 468–480.
- [26] 魏夏新, 熊俊芬, 李 涛, 等. 有机物料还田对双季稻田土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2373–2380.
- [27] 周吉祥, 张 贺, 杨 静, 等. 连续施用土壤改良剂对沙质潮土肥力及活性有机碳组分的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(16): 3307–3318.
- [28] 孙凤霞, 张伟华, 徐明岗, 等. 长期施肥对红壤微生物生物量碳氮和微生物碳源利用的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2792–2798.
- [29] Tang H M, Xiao X P, Tang W G, et al. Long – term effects of NPK fertilizers and organic manures on soil organic carbon and carbon management index under a double – cropping rice system in Southern China[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2018, 49(16): 1976–1989.
- [30] 王 毅, 张俊清, 况 帅, 等. 施用小麦秸秆或其生物炭对烟田土壤理化特性及有机碳组分的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2020, 26(2): 285–294.
- [31] 林少颖, 赖清志, 刘旭阳, 等. 秸秆及配施生物炭对福州茉莉园土壤碳、氮、磷、铁含量及其生态化学计量学特征影响[J]. 环境科学学报, 2021, 41(9): 3777–3791.
- [32] Yu H, Sui Y Y, Chen Y M, et al. Soil organic carbon mineralization and its temperature sensitivity under different substrate levels in the mollisols of Northeast China[J]. Life, 2022, 12(5): 712.
- [33] 陈雪冬, 刘雪龙, 吴孔阳, 等. 丛枝菌根真菌和生物炭联合施用对土壤有机碳组分及团聚体的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(14): 245–249.
- [34] Guo Z, Wang X L, Liu Y L, et al. Effects of long – term fertilization on organic carbon mineralization of different grain size components in paddy soils from yellow earth[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2019, 22(3): 537–544.
- [35] 史登林, 王小利, 段建军, 等. 氮肥减量配施生物炭对黄壤稻田土壤有机碳活性组分和矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4117–4124.
- [36] Fatima S, Riaz M, Al – Wabel M I, et al. Higher biochar rate strongly reduced decomposition of soil organic matter to enhance C and N sequestration in nutrient – poor alkaline calcareous soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(1): 148–162.
- [37] Guo L Y, Wu G L, Li Y, et al. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat – maize rotation system in Eastern China[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 156: 140–147.
- [38] 霍启煜, 马丽娟, 徐悦轩, 等. 秸秆还田方式及施氮量对滴灌棉田土壤有机碳氮的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 207–212.
- [39] 牛淑娟. 玉米秸秆生物炭对石灰性农田土壤有机碳矿化的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [40] 林仕芳, 王小利, 段建军, 等. 有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2219–2225.
- [41] 龙 健, 廖洪凯, 李 娟, 等. 花椒(*Zanthoxylum bungeamun*)种植年限对土壤有机碳矿化拟合及化学分离稳定性碳的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1111–1119.