

氮肥减量配施生物炭对稻田有机碳矿化及酶活性影响

郭琴波¹, 王小利¹, 段建军², 皮义均¹, 林仕芳¹

(1. 贵州大学农学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学烟草学院, 贵阳 550025)

摘要: 氮肥减量配施生物炭对于提升土地生产力、提高土壤碳汇能力以及缓解气候变暖具有重要意义。依托大田试验, 设置 5 个氮肥用量梯度(T0~T4): 100% 化肥氮, 90% 化肥氮, 80% 化肥氮, 70% 化肥氮, 60% 化肥氮, 采用等氮原则, 氮肥减少量用等氮量生物炭替代, 以不施肥为对照(CK), 结合室内矿化培养, 揭示稻田有机碳矿化及酶活性对氮肥减量配施生物炭的响应。结果表明: 与 T0 处理相比, T3 处理(70% 化肥氮+7.5 t/hm² 生物炭氮)土壤全氮, 碱解氮及速效磷依次显著提高了 6.67%, 8.36% 及 30.94% ($P < 0.05$), T4 处理的速效钾含量最高, 显著提高了 23.78% ($P < 0.05$)。氮肥减量配施生物炭可有效提升土壤有机碳(SOC)含量, 且随配施生物炭比例的增大而增大; 与矿化前相比, 各处理矿化后 SOC, 微生物量碳(MBC)及微生物熵(qMB)依次下降 1.39~1.75 g/kg, 24.62~67.57 mg/kg 及 0.13%~0.32% ($P < 0.05$)。SOC 矿化速率在培养的第 1 天达到峰值, 第 1 阶段(第 1~6 天)迅速下降, 第 2 阶段(第 6~30 天)缓慢下降, 第 3 阶段(第 30~45 天)矿化速趋于平稳, 矿化速率与培养时间呈对数函数关系($P < 0.01$)。培养结束时 SOC 累积矿化量和累积矿化率的变化范围分别为 1.39~1.75 g/kg 和 6.02%~8.43%, 均以 T3 处理最低。与 CK 和 T0 处理相比, T3 处理的过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶活性最高, T1 处理的酸性磷酸酶活性最高。水稻产量以 T3 处理(7.37 t/hm²)最高, 比 T0 处理增产 39.58% ($P < 0.05$)。综上, 氮肥减量 30% 配施生物炭可明显提高土壤肥力, 减少 SOC 矿化, 增加土壤固碳, 提高土壤酶活性及水稻产量。

关键词: 生物炭; 水稻产量; 微生物量碳; 土壤酶; 土壤有机碳矿化

中图分类号: S153.6; S511

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)05-0369-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.05.049

Effects of Nitrogen Reduction Combined with Biochar Application on Organic Carbon Mineralization and Enzyme Activity in Paddy Field

GUO Qinbo¹, WANG Xiaoli¹, DUAN Jianjun², PI Yijun¹, LIN Shifang¹

(1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025; 2. College of Tobacco, Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract: Nitrogen reduction combined with biochar application is of great significance for improving land productivity, improving soil carbon sequestration and mitigating climate warming. Based on the field experiment, five nitrogen fertilizer dosage gradients (T0 ~ T4) were set: The response of organic carbon mineralization and enzyme activity to nitrogen reduction combined with biochar application in paddy fields was revealed by using the principle of isonitrogenous fertilizer (100% N, 90% N, 80% N, 70% N, 60% N). The results showed that compared with T0 treatment, the soil total nitrogen, alkaline hydrolysable nitrogen and available phosphorus in T3 treatment (70% N + 7.5 t/hm² biochar nitrogen) were significantly increased by 6.67%, 8.36% and 30.94% ($P < 0.05$), respectively. The content of available potassium in T4 treatment was the highest and significantly increased by 23.78% ($P < 0.05$). Soil organic carbon (SOC) content increased with the increase of nitrogen reduction combined with biochar application ratio. Compared with before mineralization, SOC, microbial biomass carbon (MBC) and microbial entropy (qMB) decreased by 1.39~1.75 g/kg, 24.62~67.57 mg/kg and 0.13%~0.32% ($P < 0.05$) after mineralization. SOC mineralization rate reached the peak value on the first day of culture, decreased rapidly in the first stage (1~6 days), decreased slowly in the second stage (6~30 days), and tended to be stable in the third stage (30~45 days). The relationship between mineralization rate and culture time was logarithmic ($P < 0.01$). At the end of culture, the SOC cumulative mineralization amount and cumulative mineralization rate varied from 1.39~1.75

收稿日期: 2021-05-06

资助项目: 贵州大学培育项目(贵大培育[2019]12 号)

第一作者: 郭琴波(1996—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事植物营养与稻田土壤培肥研究。E-mail: 1918569144@qq.com

通信作者: 王小利(1979—), 女, 博士, 教授, 主要从事土壤微生物功能多样性研究。E-mail: xlwang@gzu.edu.cn

g/kg and 6.02%~8.43%, respectively, and T3 treatment was the lowest. Compared with CK and T0 treatments, the activities of catalase, urease and sucrase in T3 treatment were the highest, and the activities of acid phosphatase in T1 treatment were the highest. The highest rice yield was found in T3 treatment (7.37 t/hm²), which was 39.58% higher than that in T0 treatment ($P < 0.05$). In conclusion, 30% reduction of nitrogen fertilizer combined with biochar can significantly improve soil fertility, reduce SOC mineralization, increase soil carbon sequestration, improve soil enzyme activity and rice yield.

Keywords: biochar;rice yield; MBC; soil enzymes; SOC

土壤呼吸是生态系统碳循环过程中不可或缺的,也是调控全球气候变化的关键过程。土壤有机碳被参与土壤养分转化并且比较活跃的土壤微生物活动分解利用并释放出 CO₂,对全球碳平衡产生重大影响^[1]。

水稻是中国、亚洲乃至全球的主要粮食作物之一,提高并稳定水稻单产对保障国家粮食安全具有至关重要作用^[2]。目前我国秸秆资源已达 8.55 亿 t,但是秸秆焚烧带来空气污染等问题日益严峻,因此将其大量制备成生物炭应用于工农业生产,正成为节能减排、资源化利用及绿色发展重要途径^[3]。生物炭是有机物料如农作物秸秆、木质物、畜禽粪便等在低氧环境下经过高温热解后产生的一种富含碳的材料^[4]。生物炭还田作为秸秆间接还田的方式之一,由于其具有高度稳定性、强吸附性、多孔性等优良理化特性,正逐渐成为土壤学、农学和环境科学等领域的研究热点^[5]。已有研究^[6-7]表明,施用生物炭可以显著降低土壤容重,提高土壤通气性和保水保非能力,提高土壤团聚体稳定性,显著提高土壤 pH^[8],提高土壤速效磷和速效钾的含量;还可以固碳减排,缓解气候变化^[9]。施用生物炭有利于增加土壤蔗糖酶、脲酶活性和土壤微生物量碳含量,减少氮素流失,但对土壤转化酶和多酚氧化酶活性无显著影响^[10]。荣飞龙等^[11]综合 5 年试验结果表明,酸性稻田添加生物炭有利于改善水稻群体质量,促进水稻增产,且增产效果随着生物炭添加量增加而增加。

过量施用化肥会导致土壤板结,土壤肥力下降,作物减产以及增加温室气体排放。目前关于化肥减量配施生物炭的研究^[12]主要集中在对作物产量和品质、氮的吸收利用和氮磷流失等方面而针对氮肥减量配施生物炭对黄壤稻田 SOC 矿化和土壤酶活性的研究较为缺乏。本研究通过田间试验结合室内培养,探讨黄壤稻田 SOC 矿化和土壤酶活性及稻谷产量对氮肥减量配施生物炭的响应,为贵州黄壤稻田氮肥减量配施生物炭提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于贵州省铜仁市思南县塘头镇(108°11′35″E,27°45′35″N),该区域属中亚热带季风湿润

型气候区,试验地海拔为 398.0 m,年均气温 17.5 ℃,年均降水量 1 200 mm。种植模式为单季水稻,土壤为黄壤性水稻土,其基础性质为:pH 5.86,有机质含量为 29.62 g/kg,全氮含量为 1.39 g/kg,碱解氮含量为 133.00 mg/kg,有效磷含量为 37.16 mg/kg,速效钾含量为 182.07 mg/kg。

1.2 试验设计和试验材料

试验按等氮量替代原则,设置 6 个处理分别为:不施肥(CK);常规施肥(100%化肥氮,T0);90%化肥氮+2.5 t/hm²生物炭(T1);80%化肥氮+5 t/hm²生物炭(T2);70%化肥氮+7.5 t/hm²生物炭(T3);60%化肥氮+10.0 t/hm²生物炭(T4),每个处理设 3 次重复,共 18 个小区,各小区面积为 30 m²,完全随机区组排列(表 1)。

供试化肥为含 N 46.2%的尿素、含 P₂O₅ 16%的过磷酸钙、含 K₂O 60%的硫酸钾;供试水稻秸秆生物炭由南京勤丰众成生物质新材料有限公司生产,炭化温度 450 ℃,pH 8.65,有机碳含量为 667.22 g/kg,全氮含量为 5.99 g/kg,全磷含量为 1.99 g/kg 和全钾含量为 27.15 g/kg。

于 2020 年 4 月 13 日育秧,5 月 13 日插秧,水稻行株距为 40 cm×20 cm,磷肥和生物炭作为基肥 1 次性施用;氮肥基追比为 5:5,追肥比例按分蘖肥:穗肥为 2:3,钾肥基追比为 5:5,在分蘖期追肥;田间管理模式与当地一致。

表 1 不同处理的生物炭和化肥用量

处理	生物炭/ (t·hm ⁻²)	化肥用量(kg·hm ⁻²)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	0	0	0	0
T0	0	150	148	230
T1	2.5	135	148	230
T2	5.0	120	148	230
T3	7.5	105	148	230
T4	10.0	90	148	230

1.3 测产采样与指标测定

2020 年 9 月 1 日对各试验小区收获测产,称取 100 g,采用烘干法测定含水量,计算水稻籽粒干重。按对角线取样法各小区中选取 9 个采样点利用土钻采集 0—20 cm 耕层土壤,混匀分 2 份,1 份过 2 mm 筛后存于 4 ℃冰箱,供土壤 MBC 测定及土壤有机碳矿化培养;1 份常温避光风干后过 0.15 mm 筛和 1

mm 筛,分别用于测定 SOC 和土壤酶活性。SOC 含量采用 $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$ 外加加热法测定,全氮、碱解氮、速效磷和速效钾按鲍士旦^[13]方法测定;MBC 含量采用氯仿熏蒸—0.5 mol/L K_2SO_4 浸提,用有机碳分析仪 TOC—vwp 测定,其换算系数为 0.45。

土壤有机碳矿化培养采用碱液吸收法^[14]测定:培养开始后的第 1,3,6,9,12,15,18,21,24,27,30,33,36,39,42,45 天,定时更换碱液(0.1 mol/L NaOH 溶液)吸收杯并对培养土壤加水至恒重,吸收杯中加入 1 mol/L $BaCl_2$ 溶液 2 mL,再滴加 1~2 滴酚酞指示剂,用 0.1 mol/L HCl(滴定前用硼砂标定)滴定至红色消失。测得碱液吸收的 CO_2 量,根据 CO_2 释放量计算培养期内土壤有机碳矿化量。

土壤酶活性的测定:依次采用 3,5-二硝基水杨酸比色滴定法测定蔗糖酶活性,磷酸苯二钠比色法测定磷酸酶活性,苯酚一次氯酸钠比色法测定脲酶活性和高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶活性^[15]。

1.4 计算公式

土壤有机碳矿化^[16]计算公式为:
$$SOC \text{ 矿化量}(CO_2 \text{ mg/kg}) = C_{HCl} \times (V_0 - V_1) \times 22/0.03$$

式中: C_{HCl} 为盐酸浓度(mol/L); V_0 为空白滴定的体积(mL); V_1 为消耗盐酸的体积(mL)。

$$SOC \text{ 矿化速率}(CO_2 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})) = \text{培养时间内 SOC 矿化量}(CO_2 \text{ mg/kg})/\text{培养时间}(\text{d})$$

SOC 累积矿化量指从矿化培养开始至某一时间点土壤 CO_2 总释放量,计算公式为

$$SOC \text{ 累积矿化率}(\%) = \text{某一时间段内 SOC 累积矿化量}(\text{g/kg})/\text{SOC}(\text{g/kg}) \times 100\%$$

1.5 数据分析

数据采用 Excel 2016 软件进行图表分析,采用 SPSS 21.0 软件 LSD 法对不同处理之间进行多重比较,显著水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 氮肥减量配施生物炭对土壤养分的影响

土壤中养分含量的高低体现土壤供给作物养分的能力。由表 2 可知,施肥可以明显提高土壤养分。与 CK 处理相比,各处理的土壤全氮、碱解氮、速效磷及速效钾的含量依次增加了 4.93%~25.56%,13.18%~22.64%,15.64%~56.15%及 25.46%~54.82%($P<0.05$),土壤全氮、碱解氮及速效磷含量以 T3 处理最高,且达到显著水平;速效钾以 T4 处理含量最高。与 T0 处理相比,土壤全氮和土壤速效磷以 T3 处理达到了显著水平($P<0.05$),T3 和 T4 处理显著增加了土壤碱解氮的含量($P<0.05$),T1 处理速效钾含量下降了 2.47%,T2、T3 和 T4 处理依次

增加了 13.04%,16.85%和 23.78%,并且 T4 处理达到显著水平($P<0.05$)。所以氮肥减量 30%配施 7.5 t/hm²生物炭有助于提升土壤肥力。

表 2 不同处理下土壤基础养分

处理	土壤全氮/ (g·kg ⁻¹)	土壤碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	土壤速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	土壤速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
CK	1.42±0.02c	70.51±0.33d	7.48±0.36b	68.02±15.64c
T0	1.50±0.01bc	79.80±0.63c	8.92±2.86b	87.50±5.87b
T1	1.50±0.05bc	82.19±2.72bc	8.65±0.71b	85.34±9.77bc
T2	1.49±0.07bc	80.71±1.25c	9.88±0.75ab	98.91±5.73ab
T3	1.60±0.04a	86.47±2.28a	11.68±1.07a	102.24±10.44ab
T4	1.57±0.05ab	85.36±2.61ab	9.65±0.23ab	108.31±10.10a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 氮肥减量配施生物炭对矿化前后土壤有机碳(SOC)、土壤微生物熵(qMB)及微生物量碳(MBC)的影响

由表 3 可知,矿化后 SOC、qMB 及矿化前后 MBC 均比矿化前有不同程度降低。T1~T4 处理 SOC 比 CK 处理显著增加了 21.75%~40.83%($P<0.05$),比 T0 处理显著增加了 10.73%~28.09%($P<0.05$)。矿化消耗 SOC 以 T3 处理最低,为 1.39 g/kg,T4 处理最高,为 1.75 g/kg;矿化后各处理 SOC 之间有显著差异($P<0.05$),矿化后 SOC 随氮肥减量配施生物炭比例的增大而增加。与 CK 处理相比,各处理矿化培养前土壤 MBC 均有所增加,增幅为 25.91%~58.84%,T1 处理达到显著水平($P<0.05$)。矿化培养前后 qMB 和矿化培养后 MBC 在各处理下差异均不显著($P>0.05$)。所以氮肥减量 30%配施 7.5 t/hm²生物炭有利于土壤有机碳累积。

2.3 氮肥减量配施生物炭对土壤有机碳矿化速率的影响

由图 1 可知,在培养期内所有处理 SOC 矿化速率均呈下降趋势,根据其下降幅度可划分为 3 个阶段:第 1 阶段(第 1~6 天),矿化速率从第 1 天最大值开始大幅度下降,第 6 天的矿化速率为第 1 天的 33.10%~40.02%;第 2 阶段(第 6~30 天),矿化速率以较小幅度下降,第 30 天的矿化速率为第 1 天的 13.81%~20.66%;第 3 阶段(第 30~45 天),矿化速率以极小幅度下降,逐渐趋于平稳,第 45 天的矿化速率为第 1 天的 4.29%~10.57%。

在矿化培养期内 SOC 矿化速率与时间呈对数函数关系 $y=b+k \cdot \ln t$ ($P<0.01$)(表 4),表明培养期内每变化 1%个单位,SOC 矿化速率将变化 k %的绝对值。

2.4 氮肥减量配施生物炭对土壤有机碳累积矿化量及有机碳累积矿化率的影响

SOC 累积矿化量是影响 SOC 矿化速率快慢的

重要指标。由图 2 可知,在培养期内,各处理 SOC 累积矿化量随培养时间增加呈上升趋势,但是斜率逐渐降低。各处理 SOC 累积矿化量变化范围为 1.39~1.75 g/kg,与 CK 处理(1.46 g/kg)相比,T3 处理降低了 4.79%,

T1、T2、和 T4 处理依次提高了 4.11%,7.53%和 19.86%。所以氮肥的 70%配施 7.5 t/hm²生物炭可以降低土壤有机碳(SOC)矿化,氮肥减施比例过高或过低都会加剧土壤有机碳矿化,降低土壤固碳。

表 3 不同处理下土壤有机碳、土壤微生物熵及微生物碳

处理	SOC/(g·kg ⁻¹)		土壤 MBC/(mg·kg ⁻¹)		qMB/%	
	矿化前	矿化后	矿化前	矿化后	矿化前	矿化后
CK	17.29±1.50d	15.84±1.48f	82.64±18.23b	58.02±10.09a	0.48±0.15a	0.35±0.03a
T0	19.01±0.49d	17.55±0.66e	104.05±14.52ab	41.57±7.47a	0.55±0.07a	0.23±0.05a
T1	21.05±1.54c	19.54±1.43d	133.38±22.81a	65.81±22.06a	0.63±0.10a	0.34±0.13a
T2	22.10±0.56bc	20.53±0.60c	121.70±19.89ab	60.15±10.12a	0.55±0.09a	0.28±0.04a
T3	23.10±0.47ab	21.71±0.08b	115.33±14.78ab	74.77±24.75a	0.50±0.06a	0.33±0.09a
T4	24.35±0.41a	22.59±0.47a	112.85±31.08ab	50.45±25.12a	0.46±0.13a	0.22±0.11a

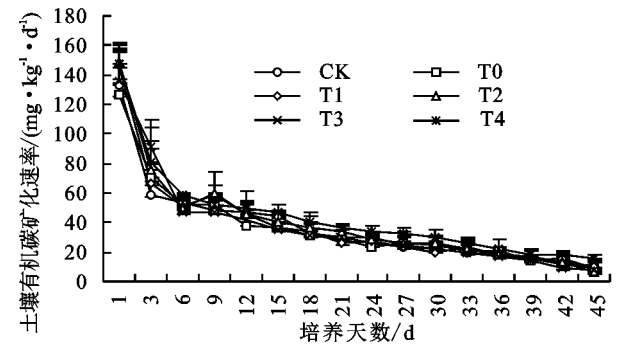


图 1 培养 45 天内不同处理下土壤有机碳矿化速率

表 4 培养 45 天内不同处理下土壤有机碳矿化速率回归方程

处理	回归方程	R ²
CK	y=105.45-35.63ln t	0.88**
T0	y=103.75-34.8ln t	0.91**
T1	y=113.23-38.98ln t	0.87**
T2	y=118.53-40.68ln t	0.89**
T3	y=113.94-39.75ln t	0.91**
T4	y=119.00-38.94ln t	0.90**

注:y 为 CO₂产生速率(mg/(kg·d));t 为培养天数; ** 表示 P<0.01。

土壤固碳能力的弱强可以由 SOC 累积矿化率的大小来反映。矿化培养结束后各处理土壤有机碳(SOC)累积矿化率在 6.02%~8.43%,与 CK 处理(8.43%)相比,氮肥减量配施生物炭处理均降低了 SOC 的累积矿化率,降幅为 14.48%~28.52%,以 T3 处理最低(图 3)。所以 70%化肥氮配施 7.5 t/hm²生物炭可减少土壤 CO₂的排放,促进土壤固碳培肥。

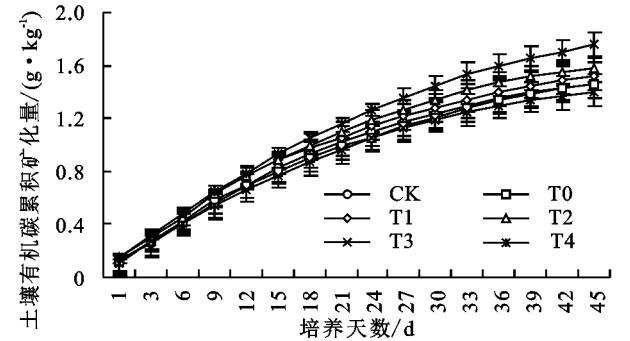
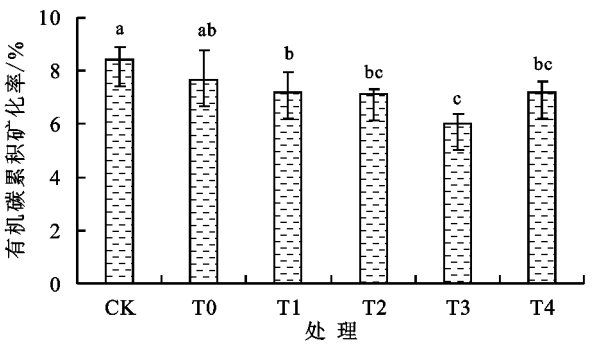


图 2 培养 45 天内不同处理下土壤有机碳累积矿化量



注:图柱上不同字母表示不同处理间差异达显著水平(P<0.05)。

图 3 培养 45 天各处理土壤有机碳累积矿化率

2.5 氮肥减量配施生物炭对土壤酶活性的影响

土壤酶活性是表征土壤肥力的一个重要指标。由表 5 可知,氮肥减量配施生物炭对土壤酶活性均有影响。与 CK 处理相比,各处理过氧化氢酶活性提高了 13.68%~41.98%,以 T3 处理最高;与 T0 处理相比,T1~T4 处理过氧化氢酶活性提高了 14.52%~24.90%,T1、T3 和 T4 处理达到显著水平(P<0.05)。脲酶活性随生物炭的配比增大,呈先增加后减小的趋势;各处理脲酶活性比 CK 处理显著提高了 1.0~3.6 倍,以 T3 处理最高;与 T0 处理相比,氮肥减量配施生物炭各处理脲酶活性显著提高了 1.0~1.3 倍(P<0.05)。与 CK 处理相比,各处理蔗糖酶活性均有所提高,其增幅为 13.22%~64.87%,T1~T4 处理均达到显著水平(P<0.05),以 T3 处理最高;与 T0 处理相比,氮肥减量配施生物炭处理蔗糖酶增幅为 13.52%~45.62%,T3 和 T4 处理达到显著水平(P<0.05)。与 CK 处理相比,各处理酸性磷酸酶活性均有所提高,其增幅为 11.48%~60.66%,T1、T2 和 T4 处理达到显著水平(P<0.05),以 T1 处理最高;与 T0 处理相比,T1 处理酸性磷酸酶活性显著提高了 46.32%(P<0.05)。可见氮肥减量配施生物炭有助于提高土壤酶活性,以氮肥减量 30%配施 7.5 t/hm²生物炭效果最佳。

表 5 不同处理下土壤酶活性

处理	过氧化氢酶	脲酶	蔗糖酶	酸性磷酸酶
CK	2.12±0.03c	0.10±0.01c	43.12±1.47d	1.22±0.04c
T0	2.41±0.35bc	0.20±0.00b	48.82±3.39cd	1.36±0.02bc
T1	2.89±0.13a	0.41±0.05a	56.77±5.87bc	1.99±0.20a
T2	2.76±0.26ab	0.43±0.02a	55.42±1.71bc	1.71±0.41ab
T3	3.01±0.14a	0.46±0.05a	71.09±2.91a	1.54±0.30bc
T4	2.85±0.10a	0.40±0.09a	63.51±14.21ab	1.57±0.03bc

注:土壤过氧化氢酶活性,以 20 min 后 1 g 风干土壤消耗的 0.1 mol/L KMnO₄ 体积表示(mL/(g·20 min));土壤脲酶活性,以 24 h 后 1g 风干土壤中 NH₃-N 的质量表示(mg/(g·d));土壤蔗糖酶活性,以 24 h 后 1 g 风干土生成葡萄糖的质量表示(mg/(g·d));土壤酸性磷酸酶活性,以 24 h 后 1 g 风干土中酚的质量表示(mg/(g·d))。

2.6 土壤酶活性与土壤有机碳累积矿化率相关性分析

Pearson 检验结果(表 6)表明,土壤蔗糖酶、脲酶以及过氧化氢酶活性均与有机碳累积矿化率呈显著负相关($P<0.01$),而磷酸酶活性与有机碳累积矿化率无显著相关关系($P>0.05$)。在有机碳矿化过程中 4 种土壤酶参与度大小为过氧化氢酶 > 蔗糖酶> 脲酶 > 酸性磷酸酶。土壤酶通过酶促作用给土壤微生物提供能量。所以,土壤酶活性的强弱也影响土壤有机碳矿化。氮肥减量配施生物炭通过影响土壤酶活性,进而影响了土壤微生物数量,从而影响土壤固碳。

表 6 土壤酶活性与土壤有机碳累积矿化速率的相关系数

项目	土壤有机碳累积矿化率(45 天)	
	r 值	P 值
过氧化氢酶活性	-0.750**	0
脲酶活性	-0.631**	0.005
蔗糖酶活性	-0.724**	0.001
酸性磷酸酶活性	-0.415	0.087

2.7 氮肥减量配施生物炭对水稻产量的影响

由图 4 可知,氮肥减量配施生物炭对水稻产量有显著影响($P<0.05$)。水稻产量随生物炭配比增大,呈先增加后减小的趋势。与 CK 处理相比,各处理水稻产量均增加了 6.23%~48.25%,氮肥减量配施生物炭处理达到显著水平($P<0.05$),以 T3 处理(7.37 t/hm²)最高;与 T0 处理相比,氮肥减量配施生物炭提高了 17.61%~39.58%,T1、T2 和 T3 处理均达到显著水平($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 氮肥减量配施生物炭对土壤养分的影响

本研究表明,与 CK 处理相比,氮肥减量配施生物炭处理下土壤基础养分均显著增加($P<0.05$);T3 处理比 T0 处理土壤全氮、碱解氮、速效磷分别显著

增加了 6.67%,8.36%和 30.94%,T4 速效钾显著增加 23.78%。与 Jones 等^[16]研究结果相似。氮肥减量配施生物炭提高土壤速效钾含量的原因:钾是生物炭中所含最多的养分元素,其速效钾含量非常丰富,施入土壤后可增加土壤有效钾含量,扩大钾素来源。生物炭的施入可提高不同土壤的水溶性、交换性和非交换性钾的含量。

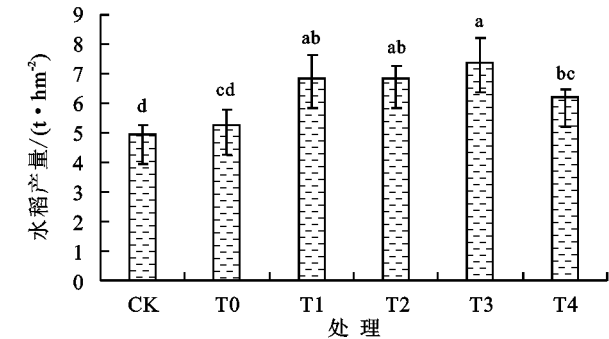


图 4 不同处理下水稻产量

3.2 氮肥减量配施生物炭对土壤有机碳、微生物量碳及土壤微生物熵的影响

与 CK 处理相比,氮肥减量配施生物炭显著提高了 SOC 和土壤 MBC($P<0.05$),T4 处理 SOC 最高为 24.35 g/kg,T1 处理土壤 MBC 最高为 133.38 mg/kg;矿化 45 天后各处理之间 SOC 差异显著($P<0.05$),而矿化后土壤 MBC 以及矿化前后 qMB 各处理间差异不显著($P>0.05$)。矿化前后 SOC 随生物炭配比增加而增加,这与 Jing 等^[17]研究结果类似。本研究矿化前 qMB 在 0.46%~0.63%,而史登林等^[12]研究得出在 0.7%~1.4%,比其低的原因是取样时间和当年气候不同,可能本研究在氯仿熏蒸不完全,还有测定方法不同,其采用滴定法误差大,而本研究采用有机碳分析仪 TOC-vwp 测定比较精准。土壤微生物量碳氮在土壤中的占比虽小,却能够很大程度上反映土壤有效养分状况和生物活性,是评价土壤肥力以及土壤微生物数量和活性的重要指标^[18]。与 CK 处理相比各处理矿化培养前土壤 MBC 均增加,增幅为 25.91%~58.84%,但土壤微生物量碳随施用生物炭配增加而减少。究其原因可能减氮配施生物炭促进了土壤微生物生长、繁殖,进而增加了土壤 MBC 含量;但过量生物炭配施氮肥还田后由于其自身吸附特性,使土壤微生物被包裹在生物炭空隙中,减少土壤微生物与有机质的接触面,因此过量生物炭配施氮肥降低了土壤 MBC 含量^[14]。

3.3 氮肥减量配施生物炭对土壤有机碳矿化的影响

有机碳矿化是碳循环的重要组成部分,受温度、水分、有机碳含量以及土壤营养状况等诸多因子影

响^[19],其速率的大小表示有机碳分解的快慢程度。本研究结果表明,在培养期内所有处理 SOC 矿化速率均呈下降趋势,氮肥减量 30% 配施生物炭降低 SOC 累积矿化量和累积矿化率。与乌达木等^[20]研究结果一致。矿化培养 45 天后各处理 SOC 累积矿化率在 6.02%~8.43%,以 T3 处理最低。已有研究^[21]表明,生物质炭施用量在一定阈值内可抑制土壤呼吸,达到减排的效果;但超过一定阈值,随着施用量的增加反而会促进土壤呼吸,与本研究结果相似。史登林等^[14]研究得出,氮肥减量 20% 配施生物炭降低 SOC 累积矿化量和累积矿化率,与本研究不尽相同,究其原因可能是生物炭的功效没有完全发挥,还有水稻种植的时间以及水稻生长时期的降雨量和气温不同。

3.4 氮肥减量配施生物炭对土壤酶活性的影响

土壤酶作为土壤生态系统重要组成部分,脲酶可促进土壤氮素转化,磷酸酶对促进土壤碳、氮、磷元素转化有显著作用,蔗糖酶和过氧化氢酶主要驱动土壤有机质的分解^[22]。本研究中,与 CK 和 T0 处理相比,氮肥减量配施生物炭处理提高了过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶及酸性磷酸酶活性,其中以 T3 处理的过氧化氢酶、脲酶及蔗糖酶活性较高,T1 处理酸性磷酸酶活性最高。生物炭施入土壤后增加土壤孔隙度,调节土壤碳氮比和氮磷比,进而提高了过氧化氢酶、脲酶及酸性磷酸酶活性;同时增加土壤有机质含量,提高了土壤蔗糖酶活性^[23]。土壤酶活性与土壤呼吸存在密切联系。本研究中,土壤酶活性与有机碳累积矿化量没有相关性,这与王永慧等^[24]研究结果不尽相同,其原因是种植作物、地理位置及土壤类型不同。综上可得,适量氮肥减量配施生物炭有助于提高土壤酶活性,从而促进土壤固碳。

3.5 氮肥减量配施生物炭对水稻产量的影响

本研究中,与 CK 处理相比,各处理水稻产量均增加,其增幅为 6.23%~48.25%,T1~T4 处理均达到显著水平($P<0.05$),以 T3 处理产量(7.37 t/hm²)最高;与 T0 处理相比,T1~T4 处理产量提高了 17.61%~39.58%,T1、T2 和 T3 处理达到显著水平($P<0.05$)。水稻产量随生物炭配比的增大呈先增加后减小的趋势,与史登林等^[14]研究结果一致。氮肥减量配施生物炭可以促进水稻生长,提高稻谷产量,与柳瑞等^[25]研究结果相似。生物炭施入土壤后增加土壤孔隙度,有利于水稻根系生长发育,生物炭自身含有磷、钾和水稻所需的微量元素,促进水稻生长发育,从而增加水稻产量。

4 结论

与 T0 处理相比,氮肥减量 30% 配施生物炭的土壤全氮、土壤碱解氮和土壤速效磷依次显著提高了 6.67%、8.36% 及 30.94% ($P<0.05$)。氮肥减量配施生物炭处理均降低了 SOC 的累积矿化率,以 T3 处理最低,比 T0 处理(7.65%)显著下降了 21.31% ($P<0.05$)。与 T0 处理相比,T3 处理过氧化氢酶、脲酶及蔗糖酶活性均显著提高($P<0.05$)。水稻产量以 T3 处理(7.37 t/hm²)提升效果最显著,比 T0 处理增加了 39.58% ($P<0.05$)。

综上,本研究条件下氮肥减量 30% 配施生物炭可明显提高土壤肥力,减少 SOC 矿化,增加土壤固碳,提高土壤酶活性及水稻产量。

参考文献:

- [1] 吕真真,刘秀梅,仲金凤,等.长期施肥对红壤性水稻土有机碳矿化的影响[J].中国农业科学,2019,52(15):2636-2645.
- [2] 李银银,陈静,周群,等.水稻籽粒灌浆的研究进展与展望[J].中国稻米,2015,21(4):20-24.
- [3] 崔红标,王昱茗,叶回春,等.不同内源重金属生物炭对 Cu 和 Cd 吸附及其对老化作用的响应[J].农业工程学报,2020,36(24):203-210.
- [4] Blanco H. Biochar and soil physical properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81(4): 687-711.
- [5] 王雅君,李珊珊,姚宗路,等.生物炭生产工艺与还田效果研究进展[J].现代化工,2017,37(5):17-20.
- [6] Wang L W, O Connor D, Rinklebe J, et al. Biochar aging: Mechanisms, physicochemical changes, assessment, and implications for field applications[J]. Environmental Science and Technology, 2020, 54(23):14797-14814.
- [7] Githinji L. Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2014, 60:457-470.
- [8] Cao Q Y, Hong S W, Li Y Y, et al. Coptisine suppresses tumor growth and progression by down-regulating MFG-E8 in colorectal cancer[J]. RSC Advances, 2018, 8(54):30937-30945.
- [9] Oliveira F R, Patel A K, Jaisi D P, et al. Environmental application of biochar: Current status and perspectives[J]. Bioresource Technology, 2017, 246:110-122.
- [10] Gul S, Whalen J K, Thomas B W, et al. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2015, 206:46-59.

[14] 马征,董晓霞,张柏松.不同保水剂对土壤团聚体组成及微生物量碳、氮的影响[J].中国土壤与肥料,2018(5):122-128.

[15] 宋迪思,盛浩,周清,等.不同母质发育土壤的中红外吸收光谱特征[J].土壤通报,2016,47(1):1-7.

[16] 黄擎,李发生,汪群慧.对几种典型土壤中粘粒级有机—矿质复合体的初步表征[J].农业环境科学学报,2006,25(2):407-411.

[17] 袁余洲.影响红外光谱峰位变化的因素之一:氢键形成的新因素[J].玉林师专学报(自然科学版),1997,18(3):45-48.

[18] 隗英华,武志杰,陈利军,等.东北 4 种典型土壤粘粒矿物的初步表征[J].光谱学与光谱分析,2010,30(7):1918-1921.

[19] 张素芬,汪海燕,戚文元,等.淀粉接枝聚丙烯酸钠高吸水树脂的电子束法制备及结构表征[J].核农学报,2015,29(3):462-471.

[20] 于湮.土壤水分特征曲线 Gardner 模型参数的预报模型研究[D].太原:太原理工大学,2017.

[21] 杨永辉,李宗军,武继承,等.不同水分条件下保水剂对土壤持水与供水能力的影响[J].中国水土保持科学,2012,10(6):58-63.

[22] 中国国家标准化管理委员会.GB/T 32136-2015 农业干旱等级[S].北京:中国标准出版社,2015:2,14.

[23] 韩云云,徐英,何久兴,等.保水剂底施对沙子剖面水分和硝态氮运移的影响研究[J].灌溉排水学报,2019,38(2):44-48.

[24] 刘川,查轩,黄少燕,等.保水剂施用方式对花岗岩红壤坡面水土保持的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):110-115.

[25] 魏琛琛,廖人宽,王瑜,等.保水剂吸释水分与养分动力学规律研究[J].农业机械学报,2019,50(1):276-284.

[26] 曹丽花,刘合满,赵世伟.不同改良剂对黄绵土水稳性团聚体的改良效果及其机制[J].中国水土保持科学,2011,9(5):37-41.

[27] 丁文斌,蒋平,史东梅,等.紫色土坡耕地蓄水保土及耕性特征研究[J].水土保持学报,2016,30(6):24-29,37.

[28] 尚应妮,胡斐南,赵世伟,等.不同胶结物质对黄绵土团聚体形成的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):204-208,239.

(上接第 374 页)

[11] 荣飞龙,蔡正午,覃莎莎,等.酸性稻田添加生物炭对水稻生长发育及产量的影响:基于 5 年大田试验[J].生态学报,2020,40(13):4413-4424.

[12] 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.

[13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

[14] 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.

[15] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.

[16] Jones D L, Rousk J, Edwards-Jones G, et al. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 45: 113-124.

[17] Jing Y L, Zhang Y H, Han I, et al. Effects of different straw biochars on soil organic carbon, nitrogen, available phosphorus, and enzyme activity in paddy soil [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1):e8837.

[18] 何甜甜,王静,符云鹏,等.等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物生物量碳氮的影响[J].环境科学,2021,42(1):450-458.

[19] 张秀玲,鄢紫薇,王峰,等.微塑料添加对果园土壤有机碳矿化的影响[J].环境科学,2021,42(9):4558-4565.

[20] 乌达木,范茂攀,赵吉霞,等.不同种植模式下坡耕地红壤团聚体有机碳矿化特征[J].农业环境科学学报,2021,40(7):1519-1528.

[21] 马雯琪,蒋靖佰伦,李典鹏,等.施用生物质炭 5 年后夏玉米土壤呼吸研究[J].农业资源与环境学报,2021,38(1):111-118.

[22] 朱长伟,龙潜,董世刚,等.小麦—玉米轮作体系不同旋耕和深耕管理对潮土微生物量碳氮与酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(1):51-63.

[23] 林秀颜,江贇伟,陈曦,等.稻田土壤微生物数量和酶活性对水碳调控的响应[J].中国农学通报,2021,37(7):75-80.

[24] 王永慧,轩清霞,王丽丽,等.不同耕作方式对土壤有机碳矿化及酶活性影响研究[J].土壤通报,2020,51(4):876-884.

[25] 柳瑞,高阳,李恩琳,等.减氮配施生物炭对水稻生长发育、干物质积累及产量的影响[J].生态环境学报,2020,29(5):926-932.