

城市污泥生物质炭对豫东黄泛平原风沙 土耕地土壤有机碳矿化影响

尤俊坚¹, 谢凯旋¹, 孙 蕾¹, 刘 霞¹, 胡续礼², 苏新宇¹, 吴 畏²

(1.南京林业大学 林学院 江苏省水土保持与生态修复重点实验室/南方现代林业协同创新中心,
南京 210037; 2.水利部 淮河水利委员会水土保持处, 安徽 蚌埠 233001)

摘 要:为探讨城市污泥生物质炭对风沙土耕地作物产量、土壤有机碳及其矿化的影响,采用田间定位试验,设置 5 个处理,分别为 20(B_{20}), 40(B_{40}), 60(B_{60}) t/hm^2 生物质炭、无机肥(NPK)、对照(CK),以一级动力学理论为基础,对 5 个处理的土壤样品进行了室内培养试验。结果表明:(1)与 CK 相比,不同施量生物质炭处理较 CK 产量提高了 21.30%, 51.88%, 41.06%, 有机碳含量提高了 18.30%, 21.84%, 29.62%。(2)不同处理土壤有机碳矿化速率随培养时间的动态变化特征呈对数函数关系,培养初期矿化速率先上升,之后迅速下降,最终趋于稳定,培养 49 d 后, NPK 处理土壤有机碳累积矿化量最高,达到 645.50 mg/kg , B_{40} , B_{60} 次之,为 449.53, 401.33 mg/kg 。(3)风沙土土壤有机碳矿化动态变化可以用一级动力学方程拟合,供试土壤潜在有机碳矿化库(C_p)和矿化速率常数(k)较高,分别为 0.26~0.66 g/kg 和 (0.008 6~0.013 4)/d,与 CK 处理相比, B_{40} , B_{60} , NPK 处理土壤有机碳矿化率提高 55.93%~150.37%。上述结果显示豫东黄泛平原风沙土施用生物质炭可以提高土壤有机碳含量,对比 NPK 处理,减小了土壤有机碳累积矿化量、矿化率,增强土壤固碳能力,以 40 t/hm^2 处理的效果更佳。研究结果可为豫东黄泛平原风沙土壤碳储量增加、城市污泥的资源化利用提供科学依据。

关键词:豫东黄泛平原; 风沙土; 城市污泥生物质炭; 有机碳矿化

中图分类号:S156.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0012-06

Influence of Sewage Sludge Biochar Application on Mineralization of Organic Carbon of Sandy Soil in the Yudong Plain

YOU Junjian¹, XIE Kaixuan¹, SUN Lei¹, LIU Xia¹, HU Xuli², SU Xinyu¹, WU Wei²

(1.Jiangsu Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration/ Southern Modern Forestry Collaborative Innovation Center, College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2.Branch of Soil and Water Conservation, Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Bengbu, Anhui 233001, China)

Abstract: In order to explore the effects of biochar on peanut yield, soil organic carbon and carbon mineralization dynamics, a field experiment was conducted. The experiment included 5 different treatments: biochar rates at 20 t/hm^2 (B_{20}), 40 t/hm^2 (B_{40}) and 60 t/hm^2 (B_{60}), inorganic fertilizers (NPK), the control (CK). The organic carbon mineralization was measured under the laboratory soil incubation experiment on the basis of the theory of soil organic carbon. The results showed that: (1) different application rates of biochar could significantly increase peanut yield and soil organic carbon by 21.30%, 51.88%, 41.06% and 18.30%, 21.84%, 29.62%, respectively; (2) the changes of soil organic carbon mineralization rate of each treatment followed the logarithmic relationship; the mineralization rate of soil organic carbon in each treatment increased first at the initial stage of incubation, then decreased rapidly and stabilized finally; after 49 days of incubation, the highest cumulative CO_2 emission occurred in the NPK treatment (645.50 mg/kg), followed by B_{40} (449.53 mg/kg) and B_{60} (401.33 mg/kg); (3) the dynamics of SOC mineralization preferably followed

收稿日期:2018-12-02

修回日期:2019-03-03

资助项目:水利部淮河水利委员会“淮河流域黄泛区风力侵蚀定位观测项目”(HWSBC2016037)

第一作者:尤俊坚(1990—),男,江苏南京人,博士研究生,研究方向为生物质炭对风沙土的改良。E-mail:junjian_you@163.com

通信作者:刘霞(1971—),女,山东菏泽人,博士,教授,博士生导师,主要从事水土保持监测与评价研究。E-mail:liuxia@njfu.edu.cn

the first order kinetics, the values of both C_p and k of all treatments were high, C_p ranged from 0.26 g/kg to 0.66 g/kg, and k ranged from 0.008 6 to 0.013 4 per day; compared with CK treatment, the soil organic carbon mineralization rates of B₄₀, B₆₀ and NPK treatment significantly increased (55.93%~150.37%). The above results indicated that the application of biochar to sandy soil in Yudong Plain could increase soil organic carbon, decrease cumulative CO₂ emission and mineralization rate of soil organic carbon, and enhance soil carbon fixation capacity. This study can provide the scientific basis for improving soil carbon pool and the utilization of sewage sludge.

Keywords: Yudong Plain; sandy soil; sewage sludge biochar; organic carbon mineralization

生物质炭是指由高温裂解炭化形成的一类高度芳香化,含碳量极丰富的多孔体固态物质,具有高稳定性,可作为长期固定碳源及能量源^[1-2]。土壤添加生物质炭,可有效改善土壤结构,提升土壤肥力,减少土壤 CO₂ 等温室气体排放,起到固碳减排的作用。Zhang 等^[3]研究发现,添加生物质炭与无机肥配施可提高玉米产量,降低 CH₄, NO₂ 的释放量,提高氮肥的利用率,表明生物质炭具有吸收无机肥使用过程中产生的温室气体的潜在功效。赵明等^[4]采用室内培养试验和大田设施生产试验对比研究发现,在培养 21 周后生物质炭的 CO₂-C 矿化量仅为牛粪堆肥的 13.7%,矿化速率显著低于牛粪堆肥,试验番茄果实的产量及品质差异不显著。不同材质制备而成的生物质炭对土壤影响作用不一致。城市污泥生物质炭比表面积大,表面聚集大量负电荷,拥有较高的电荷密度,施用于土壤中可改良土壤结构,有效减少温室气体排放。Khan 等^[5]研究发现土壤添加城市污泥生物质炭,可以吸附土壤动植物及微生物呼吸产生的 CO₂, CH₄, 并抑制了反硝化细菌的活性,减少土壤释放 NO₂, 达到减轻温室效应的作用。土壤矿化是土壤有机碳库周转的重要过程^[6],影响土壤向大气排放 CO₂ 的量,进而影响区域气候变化,土壤有机碳矿化成为近年来区域生态系统碳循环研究的热点问题^[7]。

豫东黄泛平原风沙土由于其特殊的成土过程与自然条件,土壤沙化严重,近年来人为活动又加速了土壤退化,严重影响了土壤碳含量的积累。目前生物质炭对土壤有机碳矿化的研究主要集中在南方红壤区、东北黑土区及黄土高原地区^[8-10],而豫东黄泛平原风沙区还未见相关的系统研究报道。因此,以豫东黄泛平原风沙土为研究对象,探索不同施量生物质炭对耕地土壤有机碳矿化动态变化规律,为科学管理风沙土农业生产、降低温室气体排放具有重要的现实意义。本文通过田间定位试验和室内培养试验,研究不同施量生物质炭对花生产量、土壤有机碳及其矿化的影响,为城市污泥资源优化利用、明确生物质炭适宜用量及其农业环境效应提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤 供试土壤是豫东黄泛平原风沙土,取自河南省开封市兰考县仪封乡(34°48′59″N, 114°57′12″E)。该区海拔 69~78 m,坡降在 1/4 000~1/2 000,是典型的黄河冲积平原,属亚热带季风气候,为半湿润地区。多年平均降雨量 630 mm,多年平均气温 14℃,多年平均日照时数在 2 240 h 以上,全年平均无霜期 220 d。供试土壤基本理化性质见表 1。

1.1.2 生物质炭 本试验采用的城市污泥生物质炭购自于密西西比国际水务(中国)有限公司。生物质炭以城市污泥为原材料,采用污泥干馏法,在 700~850℃无氧条件下烧制 4 h 制备而成,生成的生物质炭粉碎后过 2 mm 以备使用。生物质炭基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤和生物质炭基本理化性质

项目	土壤	生物质炭
pH 值	8.8	6.4
水分/%	4.5	9.7
容重/(g·cm ⁻³)	1.39	
黏粒/(g·kg ⁻¹)	55	
粉粒/(g·kg ⁻¹)	124	
沙粒/(g·kg ⁻¹)	821	
碳/(g·kg ⁻¹)	9.3	197.7
氮/(g·kg ⁻¹)	0.68	16.6
磷/(g·kg ⁻¹)	0.98	17.1
钾/(g·kg ⁻¹)	12.79	2.7
易挥发物/%		11.8
稳定性碳/%		29.4
灰分/%		58.8
比表面积/(m ² ·g ⁻¹)		14.2

1.2 试验设计

试验共设置 5 个处理:(1) 低施量生物质炭(B₂₀),施用量 20 t/hm²;(2) 中施量生物质炭(B₄₀),施用量 40 t/hm²;(3) 高施量生物质炭(B₆₀),施用量 60 t/hm²;(4) 无机肥(NPK),添加量与当地传统耕

作施量相一致,约为 300 kg/hm^2 ; (5) 对照(CK)。

田间试验设在河南省开封市兰考县仪封乡黄泛区风力侵蚀定位观测站(东经 $114^\circ 55' 12''$ — $114^\circ 55' 32''$, 北纬 $34^\circ 47' 55''$ — $34^\circ 47' 20''$)。小区面积为 40 m^2 ($8 \text{ m} \times 5 \text{ m}$) , 采用随机区组分布, 小区间有 1 m 的缓冲带, 每个处理 3 次重复, 试验共 15 个小区。在 2017 年种植前一次性施加生物质炭, 2018 年不再添加。生物质炭和无机肥在种植前均匀撒在土壤表面, 翻耕土壤使其均匀分布到耕层土壤中($0\text{—}30 \text{ cm}$)。供试花生品种为花豫 16 号, 试验实行夏花生一年一熟制, 在作物生长期按当地传统农作方式进行统一管理、灌溉。

土壤呼吸试验参考 Zhou 等^[11] 的研究: 将 30 g 新鲜土壤放入 500 ml 广口瓶中, 调节含水率为田间持水量的 60% , 放置于 22°C 恒温培养箱中预培养一周, 使土壤微生物恢复常温状态。预培养结束后, 根据试验 5 个不同处理添加物料并充分混匀。将 10 ml 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液放置于广口瓶内, 用于吸收土释放的 CO_2 。在培养 $0.5, 1, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49 \text{ d}$ 时取出小烧杯, 用 0.1 mol/L 的 HCl 溶液进行滴定, 测定 CO_2 释放量。土壤有机碳矿化量 $\text{CO}_2\text{-C}$ 用 (mg/kg) 干土表示。

1.3 样品采集与处理

于 2018 年花生收获前, 使用土钻 ($3 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$) , 并按“S”形采样法选择 5 个采样点, 采集 $0\text{—}15 \text{ cm}$ 的土壤, 所有的土壤样品采集后装入自封袋, 保存在便携式冰箱中带回实验室。充分混匀后分为两份, 一份鲜土样保存在 4°C 冰箱中, 用于室内培养试验使用, 另一份土样剔除石块、根茎叶等杂志后, 自然风干过 2 mm 筛后保存, 用于测定土壤有机碳含量。花生收获时按小区实际面积计产。

1.4 测定指标、方法及数据分析

有机碳采用重铬酸钾法外加热法;

土壤有机碳矿化率计算如下:

$$C_r = \frac{y}{S} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_r 为土壤有机碳矿化率($\%$); y 为累积培养时间内有机碳累计矿化量(mg/kg); S 为初始有机碳含量(mg/kg)。

培养 49 d 的有机碳矿化主要为土壤中活性的有机碳分解, 选用一级动力学方程分析土壤有机碳矿化动态:

$$y = C_p (1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

式中: y 为累积培养时间 t 内土壤有机碳矿化 C 量(g/kg); C_p 为土壤有机碳矿化 C 潜力(g/kg); k 为有机碳矿化速率常数(d^{-1}); t 为培养时间(d)。

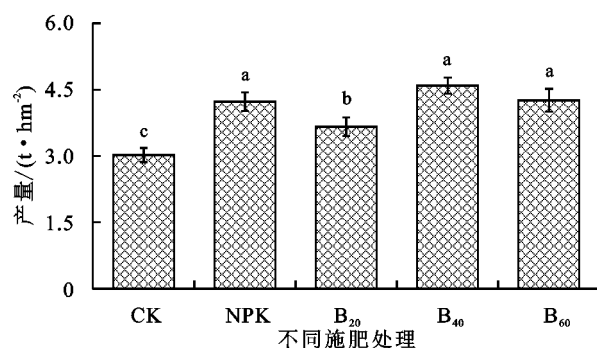
所有数据用 SPSS 16.0 软件进行单因素方差分析和

相关分析, 用 LSD 方法分析处理间平均数在 $p < 0.05$ 水平的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 生物质炭对作物产量的影响

作物产量是衡量施肥效应的常用指标, 是肥效的最终表现。5 个不同施肥处理花生产量为 $3.02 \sim 4.59 \text{ t/hm}^2$ (图 1)。方差分析结果表明, 不同施肥措施对花生产量的影响有所差异。与 CK 处理相比, 施加无机肥和生物质炭均可提高花生产量, 增产幅度 $21.30\% \sim 51.88\%$, 中施量生物质炭对产量提升最大, 低施量生物质炭提升效应最小, 具体表现为: $B_{40} > B_{60} \approx \text{NPK} > B_{20} > \text{CK}$ 。中施量生物炭产量高于高施量生物质炭及无机肥处理产量, 但差异不显著。



注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$), 下同。

图1 不同施肥处理花生产量

2.2 生物质炭对土壤有机碳的影响

土壤有机碳是土壤肥力的重要指标之一。不同施肥处理土壤有机碳含量为 $9.54 \sim 12.37 \text{ g/kg}$ (图 2)。方差分析结果表明, 不同处理之间土壤有机碳含量有所差异。对比 CK 处理, 添加生物质炭显著提高土壤有机碳含量, 低、中、高施量分别提高了 18.30% , 21.80% , 29.62% 。土壤有机碳含量随生物质炭施量增加而增加, 但差异不显著。无机肥处理土壤有机碳含量与对照处理相近, 未显著提升土壤有机碳含量。

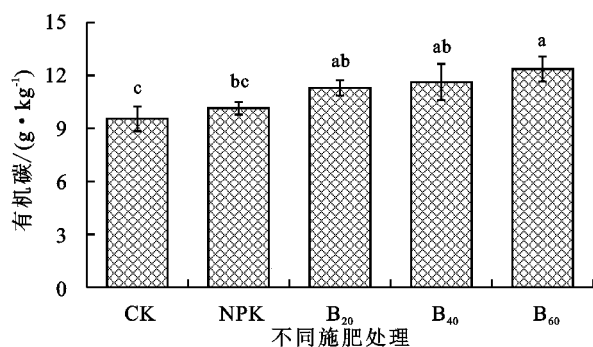


图2 不同施肥处理有机碳含量

2.3 生物质炭对土壤矿化的影响

不同施肥处理土壤有机碳矿化速率呈现相似的变化特征(图 3), 培养初期土壤有机碳矿化速率迅速

上升,之后迅速下降,至 28 d 时矿化率降至较低水平并最终趋于稳定。土壤有机碳矿化速率与培养时间的变化呈对数函数关系 $y=a+b\ln x$,且相关性均达到显著水平(表 2)。

CK, B₂₀, B₄₀, B₆₀ 在第 1 天时候达到矿化速率高峰,分别为 29.97, 34.33, 36.23, 43.47 mg/(kg·d), NPK 在第 3 天时候达到矿化速率高峰,为 76.27 mg/(kg·d), NPK 最大矿化速率分别为 CK, B₂₀, B₄₀, B₆₀ 最大矿化速率的 2.54, 2.22, 2.11, 1.75 倍。不同施量生物质炭处理最大矿化速率相比 CK, 提高了 1.15~1.45 倍。在培养的第 49 天, NPK, B₂₀, B₄₀, B₆₀ 日矿化速率是 CK 的 1.92, 1.07, 1.41, 1.72 倍。

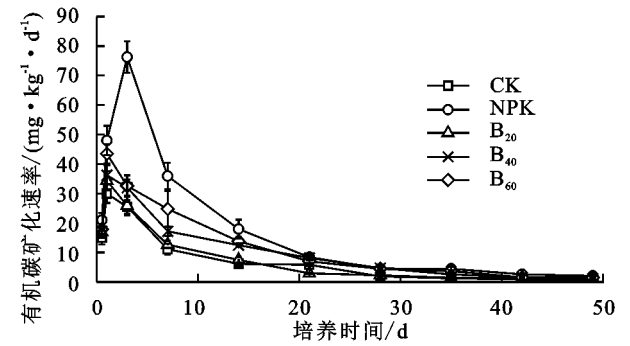


图 3 土壤有机碳矿化速率动态变化

表 2 土壤有机碳矿化速率回归方程

处理	回归方程	R^2
CK	$y=22.33-5.54\ln x$	0.72
NPK	$y=44.76-10.04\ln x$	0.54
B ₂₀	$y=24.65-6.21\ln x$	0.74
B ₄₀	$y=27.66-6.35\ln x$	0.68
B ₆₀	$y=31.32-7.21\ln x$	0.65

不同处理在 49 d 内的土壤有机碳累积矿化量差异显著(图 4)。在培养结束后,CK 与 B₂₀ 的累积矿化量差异不显著,分别为 258.43, 271.77 mg/kg。不同施量生物质炭之间,累积矿化量存在显著差异,具体表现为: B₆₀ > B₄₀ > B₂₀, 生物质炭施量越高,累积矿化量越大。NPK 及中高施量生物质炭处理相比 CK 处理,显著提高了累积矿化量,分别提高了 2.50, 1.55, 1.73 倍。5 种处理最大土壤累积矿化量为 NPK 处理,为 645.50 mg/kg。

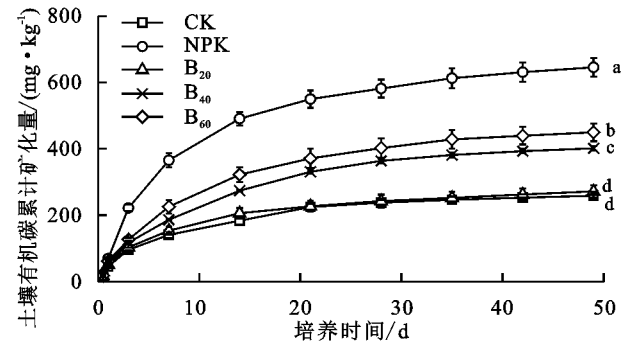


图 4 土壤有机碳累积矿化量动态变化

2.4 土壤有机碳矿化拟合

运用一级动力学方程对 5 种处理土壤有机碳累积矿化量与培养天数进行拟合,相关系数均达到了极显著相关水平($R^2>0.95$)(表 3),表明一级动力学方程可以很好地描述不同处理土壤有机碳累积矿化量的动态变化特征。

根据动力学方程的模拟结果显示,不同处理土壤潜在矿化碳库(C_p)存在一定差异,变化范围 0.26~0.66 g/kg, B₂₀ 与 CK 保持一致,未有显著差异, B₄₀ 和 B₆₀ 处理的 C_p 较 CK 处理提高了 57.69%, 84.62%, NPK 处理土壤潜在矿化碳库显著高于其他所有处理。土壤有机碳 k 值表示有机碳矿化速率常数,其变化范围 (0.008 6~0.013 4)/d, B₄₀ 与 B₆₀ 处理相比 CK 处理,显著降低了 k 值,分别降低了 30.65%, 19.35%。方差分析表明,不同处理土壤 C_p /SOC 值差异显著, NPK, B₄₀, B₆₀ 要高于 CK 处理的 C_p /SOC。

表 3 土壤有机碳矿化的动力学参数

处理	拟合参数			C_p /SOC/ %	有机碳矿 化率/%
	$C_p/(g \cdot kg^{-1})$	k/d^{-1}	R^2		
CK	0.26c	0.0124ab	0.97a	2.7c	2.7c
NPK	0.66a	0.0118b	0.99a	6.5a	6.76a
B ₂₀	0.26c	0.0134a	0.98a	2.3c	2.85c
B ₄₀	0.41b	0.0086c	0.98a	3.5b	4.21b
B ₆₀	0.48b	0.0100c	0.99a	3.9b	4.71b

注:表中不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。

3 讨论

3.1 生物质炭对风沙土有机碳的影响

近年来,生物质炭作为土壤调节剂改良耕地土壤,增加土壤有机碳储量的特殊作用深受研究人员关注。生物质炭是一种高度芳香化、含碳量丰富的有机物料,具有极强的稳定性和抗化学生物降解能力,土壤添加生物质炭能够快速提高土壤有机碳含量,且施用量越大提升效果越显著^[12]。本研究结果表明,不同施量生物质炭均可提高风沙土土壤有机碳含量,这与前人的研究结果相一致^[13-14]。Cheng 等^[15]研究认为生物质炭对有机碳提升效应是由于吸附保护和包封作用。一方面,生物质炭比表面积大,表面聚集着大量的负电荷,拥有较高的电荷密度和丰富的官能团,可以吸附土壤中小有机分子,通过表面催化活性将其聚合形成大的土壤有机质^[16];另一方面,生物质炭良好的孔隙结构,能将土壤中的活性有机物质吸附到其孔隙结构中,有效隔离有机物质与土壤微生物接触,阻断其被微生物分解产生 CO₂,这种吸附保护、包封作用在一定程度上保护或减弱了土壤有机碳的矿化作用效果,促进有机碳含量提升^[17-18]。研究供

试土壤为风沙土,整体土壤质地疏松,颗粒粗大,孔隙多,保水保肥能力弱,土壤养分容易因淋溶作用而损失,添加生物质炭可以改善土壤结构,促进团聚体形成,有利于养分的固持,减少淋失,促进有机碳提升。

3.2 生物质炭对风沙土有机碳矿化速率及矿化量的影响

土壤有机碳矿化是一个复杂过程,由土壤类型、颗粒组成、营养水平、有机碳化学结构稳定性等因子综合作用的结果^[19]。本研究表明,5个处理的土壤有机碳矿化速率随着培养时间延长而降低,培养初期土壤中含有较多易被土壤微生物利用的易氧化有机碳,这部分有机碳组分随培养时间延长消耗完后,剩余的有机碳多为难分解的纤维素、木质素等,导致土壤微生物的营养源减少,土壤微生物活性减弱,矿化速率降低并最终趋于稳定^[20]。生物质炭中的无机碳发生非生物降解及易氧化有机碳发生微生物分解,促进有机碳矿化速率上升,累积矿化量增大^[21-22],这在中高施量生物质炭处理中较为显著。也有研究表明添加生物质炭会降低土壤CO₂的累积释放量^[6],这与本研究结果不一致,原因可能是试验供试土壤为风沙土,肥力条件低是限制土壤微生物活性的首要因素,添加生物质炭及无机肥后带来营养源,促进了微生物活性,提高土壤矿化强度。供试土壤为碱性土壤,pH值达8.8,添加生物质炭有助于改善碱性土壤条件,使土壤适宜微生物生长、繁殖,提高CO₂的累积释放量^[23]。施用无机肥后土壤中高耗能微生物占据优势,促进土壤碳的矿化强度,这一过程无外源有机质的投入,会消耗分解土壤固有有机碳,减少土壤有机碳含量,不利于土壤有机碳累积^[24-26]。生物质炭具有植物生长所需的各类营养元素,含碳量丰富,施入土壤可作为植物及微生物的营养源,促进作物生长,根系分泌物增加,提高土壤中活性有机碳含量,土壤呼吸强度增强,但并未减少土壤固有有机碳含量,因而施用生物质炭有利于土壤有机碳的积累。

3.3 生物质炭对风沙土有机碳矿化参数的影响

试验结果表明,豫东黄泛平原风沙土整体土壤有机碳矿化率在2.7%~6.76%,高于其他研究中的有机矿化率(1.53%~1.71%)^[8]。试验区特殊的气候导致风水侵蚀危害强烈,区域存在严重的土壤风沙化问题,风沙土有机碳矿化迅速,矿化率高。施用无机肥及中高施量生物质炭处理调节土壤C/N,增加土壤微生物活动所需营养及能量,进而促进微生物活性及数量,土壤有机碳矿化潜力(C_p)增加,这与其他研究结果相一致^[23]。王朔林等^[23]研究发现,施用高量氮磷肥可提高土壤养分,促进栗褐土微生物生长,具

有较高的有机碳矿化潜力。与传统施肥方式相比,生物质炭表面的吸附作用可减少活性有机物质被微生物分解,因而会对土壤有机碳矿化产生抑制作用^[27]。 C_p /SOC值反映了土壤有机碳的固碳能力,该值越小,固碳能力越强,反之则有机碳矿化能力增强^[10]。对照处理和低施量生物质炭处理 C_p /SOC值最小,表明这两种处理的土壤固碳能力优于其他处理。土壤生物质炭主要成分是化学性质稳定的芳香类有机碳,能够抑制有机碳在土壤中发生的氧化作用,减小传统施肥带来有机碳矿化强度增加^[28]。有机碳矿化的周转速率常数(k)是由土壤类型、颗粒组成、营养元素、有机碳化学结构稳定性等因子综合作用的结果^[19]。本研究中,中高施量生物质炭处理有机碳周转速率显著低于CK处理,表明施用中高施量生物质炭可降低周转速率,增加土壤有机碳周转时间,这可能是由于中高施量生物质炭影响了土壤结构及化学性质,今后应针对 k 值与土壤理化性质及微生物特性等进行相关研究。

生物质炭土壤有机碳矿化速率、累积矿化量和矿化周转速率均小于传统施肥处理,固碳能力较好,有利于降低土壤有机碳分解,促进土壤有机碳累积和肥力提升。综合考虑产量及经济成本因素,中施量生物质炭要优于低、高施量生物质炭处理。目前,关于生物质炭添加后对土壤有机碳矿化作用的进程,还未有明确的科学解释,下一步需从生物质炭的制备工艺、结构特征、土壤类型、有机碳组分及微生物群落结构响应等多方面深入探讨其内在演变机理。

4 结论

(1) 豫东黄泛平原风沙土施用城市污泥生物质炭2年后,不同施量生物质炭均可显著提高花生产量,其中以中高施量生物质炭效果更显著。生物质炭处理均可提高土壤有机碳含量,且施用量越高,效果更显著。

(2) 传统施肥措施土壤呼吸强度、有机碳矿化速率和累积矿化量较高,施用生物质炭可降低土壤呼吸强度、有机碳矿化速率和累积矿化量。土壤有机碳矿化速率与培养时间呈显著的对数函数关系。研究区风沙土整体土壤有机碳矿化率高,低施量生物质炭土壤固碳能力优于中高施量生物质炭及传统施肥措施。

(3) 综合考虑产量、有机碳含量、有机碳矿化及经济成本因素,40 t/hm²可作为城市污泥生物质炭在豫东黄泛平原风沙土的最优用量,成为该区域传统碳库管理措施的替代选择。

参考文献:

- [1] Jr M J A, Grønli M. The art, science, and technology of charcoal production [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003, 42(8): 1619-1640.
- [2] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota: A review [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43(9): 1812-1836.
- [3] Zhang A, Liu Y, Pan G, et al. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain [J]. Plant and Soil, 2012, 351(1/2): 263-275.
- [4] 赵明, 蔡葵, 孙永红, 等. 污泥生物质炭的碳、氮矿化特性及其对大棚番茄产量品质的影响 [J]. 中国农学通报, 2014, 30(1): 215-220.
- [5] Khan S, Waqas M, Ding F, et al. The influence of various biochars on the bioaccessibility and bioaccumulation of PAHs and potentially toxic elements to turnips (*Brassica rapa* L.) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 300: 243-253.
- [6] 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 等. 生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响 [J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2298-2303.
- [7] 张文菊, 童成立, 杨钙仁, 等. 水分对湿地沉积物有机碳矿化的影响 [J]. 生态学报, 2005, 25(2): 249-253.
- [8] 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.
- [9] Yao Q, Liu J, Yu Z, et al. Three years of biochar amendment alters soil physiochemical properties and fungal community composition in a black soil of northeast China [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2017, 110: 56-67.
- [10] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌, 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系 [J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1217-1226.
- [11] Zhou X, Chen C, Lu S, et al. The short-term cover crops increase soil labile organic carbon in southeastern Australia [J]. Biology & Fertility of Soils, 2012, 48(2): 239-244.
- [12] Mandal S, Kunhikrishnan A, Bolan N S, et al. Application of Biochar Produced from Biowaste Materials for Environmental Protection and Sustainable Agriculture Production [C] // Prasad M N V, Kaimin Shih, Environmental Materials & Waste, Salt Lake City, USA: Elsevier Inc., 2016.
- [13] Elnaggar A H, Usman A R, Alomran A, et al. Carbon mineralization and nutrient availability in calcareous sandy soils amended with woody waste biochar [J]. Chemosphere, 2015, 138: 67-73.
- [14] Novak J M, Busscher W J, Watts D W, et al. Short-term CO₂ mineralization after additions of biochar and switchgrass to a Typic Kandudult [J]. Geoderma, 2010, 154(3/4): 281-288.
- [15] Cheng H, Reinhard M. The rate of 2, 2-dichloropropane transformation in mineral micropores: Implications of sorptive preservation for fate and transport of organic contaminants in the subsurface [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(8): 2879-2885.
- [16] Barker G. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43(6): 1169-1179.
- [17] Liang B, Lehmann J, Sohi S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil [J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(2): 206-213.
- [18] Zimmerman A R, Chorover J, Goynes K W, et al. Protection of mesopore-adsorbed organic matter from enzymatic degradation [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(17): 4542-4548.
- [19] 陈吉, 赵炳梓, 张佳宝, 等. 长期施肥潮土在玉米季施肥初期的有机碳矿化过程研究 [J]. 土壤, 2009, 41(5): 719-725.
- [20] Elnaggar A H, Usman A R, Alomran A, et al. Carbon mineralization and nutrient availability in calcareous sandy soils amended with woody waste biochar [J]. Chemosphere, 2015, 138: 67-73.
- [21] Clough T J, Condron L M, Kammann C, et al. A review of biochar and soil nitrogen dynamics [J]. Agronomy, 2013, 3(2): 275-293.
- [22] Jeffreyl S, Haroldp C, Vanessal B. The effect of young biochar on soil respiration [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42(12): 2345-2347.
- [23] 王朔林, 杨艳菊, 王改兰, 等. 长期施肥对栗褐土有机碳矿化的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1278-1285.
- [24] 杨莉琳, 张福锁, 毛仁钊, 等. 华北平原农田生态系统土壤 C、N 净矿化及尿素转化研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 824-830.
- [25] Zheng J, Zhang X, Li L, et al. Effect of long-term fertilization on C mineralization and production of CH₄ and CO₂ under anaerobic incubation from bulk samples and particle size fractions of a typical paddy soil [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2007, 120(2): 129-138.
- [26] 郭振, 王小利, 段建军, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土有机碳矿化的影响 [J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 225-235.
- [27] 王典, 张祥, 姜存仓, 等. 生物质炭改良土壤及对作物效应的研究进展 [J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 963-967.
- [28] Nguyen B T, Lehmann J, Kinyangi J, et al. Long-term black carbon dynamics in cultivated soil [J]. Biogeochemistry, 2009, 92(1/2): 163-176.