

王月玲, 耿增超, 尚杰, 等. 施用生物炭后塬土土壤有机碳、氮及碳库管理指数的变化[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 532–539.

WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, SHANG Jie, et al. Soil organic carbon and nitrogen and carbon pool management index in Loess soil as influenced by biochar[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 532–539.

施用生物炭后塬土土壤有机碳、氮及碳库管理指数的变化

王月玲, 耿增超*, 尚杰, 曹胜磊, 耿荣, 赵军, 林云

(西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:通过2年4季的田间小区试验,研究了添加0~80 t·hm⁻²果树枝条生物炭后,土壤总有机碳(TOC)、全氮(TN)、pH、土壤活性有机碳(AOC)、土壤中活性有机碳(MAOC)、土壤高活性有机碳(HAOC)、土壤水溶性有机碳(WSOC)、碳库管理指数(CPMI)的变化及各指标之间的相关性。结果表明:在第四季作物收获后,随生物炭施用量的增加,TOC增加59.80%~180.52%、TN增加13.22%~20.92%、pH增加0.76%~1.28%;HAOC和CPMI均在生物炭用量为60 t·hm⁻²时达到最大,分别较对照增加70.36%和52.43%;AOC前两季在生物炭用量为40 t·hm⁻²时达到最大,后两季在生物炭用量为60 t·hm⁻²时达到最大,而整个试验期内各施炭处理分别比对照增加18.46%~73.42%;WSOC在前3季随生物炭用量的增加而降低,且各施炭处理分别比对照低8.00%~42.77%。相关性分析表明,除MAOC外,上述各指标均与生物炭用量呈显著相关关系($P<0.05$)。研究认为,施用生物炭能提高土壤总有机碳、全氮含量和土壤碳库管理指数,有利于改善土壤质量,提高土壤肥力,为农田土壤可持续利用和生物炭作为土壤改良剂的应用提供科学依据和参考价值。

关键词:生物炭;固碳减排;水溶性有机碳;碳库管理指数

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)03-0532-08 doi:10.11654/jaes.2016.03.017

Soil organic carbon and nitrogen and carbon pool management index in Loess soil as influenced by biochar

WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao*, SHANG Jie, CAO Sheng-lei, GENG Rong, ZHAO Jun, LIN Yun

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment in North-west China, Ministry of Agriculture, Yangling Shaanxi, 712100, China)

Abstract: In recent years biochar has received widespread attention in soil improvement, pollution reduction, and carbon sequestration both at home and abroad. Total soil organic carbon (TSOC), total nitrogen (TN), pH, soil active organic carbon (AOC), moderately active organic carbon (MAOC), highly active organic carbon (HAOC), water-soluble organic carbon (WSOC), and carbon pool management index (CPMI) were investigated in a 2 year plot trial. Results showed that TSOC, TN and pH increased respectively by 59.80%~180.52%, 13.22%~20.92% and 0.76%~1.28% in a dose-effect manner after the fourth harvesting of crops, while HAOC and CPMI increased by 70.36% and 52.43% at biochar rate of 60 t·hm⁻² than in the control. AOC reached the maximum after the second season at 40 t·hm⁻² of biochar, but it was the highest in the third and forth seasons at 60 t·hm⁻² of biochar. During the experimental period, AOC was increased by 18.46%~73.42%, as compared with the control. During the first three quarters, WSOC was 8.00%~42.77% lower in biochar than in the control. There were significant correlation between all indexes and biochar rate ($P<0.05$), with an exception of MAOC. These findings indicate that applying biochar increases total soil organic carbon and total nitrogen as well as carbon pool management index, and also improves soil quality and soil fertility.

Keywords: biochar; carbon sequestration and emission cut; water-soluble organic carbon; carbon pool management index (CPMI)

收稿日期:2015-09-16

基金项目:杨凌示范区科技计划项目“添加生物炭对塬土温室气体排放影响”(2015SF-03)

作者简介:王月玲(1990—),女,硕士研究生,主要从事废弃物资资源利用及土壤养分研究。E-mail: wangyueling1103@163.com

*通信作者:耿增超 E-mail: gengzengchao@126.com

Marris 2006年在《Nature》的呼吁以及国际生物炭联盟(ABI)的成立为生物炭在缓解全球气候变化以及增汇减排方面的研究拉开了序幕^[1-3]。生物炭俗称黑炭,是生物质在高温厌氧条件下热裂解生成的富碳产物,由于原材料和裂解条件的不同,其性质有所差异^[4]。生物炭具有良好的物理性状,施入土壤后可以起到改土培肥的作用^[5]。近年来,利用生物炭实现碳封存和减缓全球气候变暖的策略引起了科学界的高度关注。生物废弃物的广泛存在加上生物炭较低的生产成本,使生物炭固碳技术成为一种非常有前景的、对生态友好安全的、可大面积推广的碳减排技术^[6]。

研究土壤有机碳和氮的变化规律为合理施肥,维持和提高土壤质量,促进农业可持续发展提供了重要依据。在全球气候变化的影响下,碳、氮循环尤其是和温室气体产生相关的碳氮组分的变化成为研究的热点之一。Lefroy等^[7]在测定不同活性的土壤活性有机质的基础上提出了土壤碳库管理指数(CPMI)的概念。大部分学者认为CPMI是全面、灵敏监测和反映土壤碳库质量变化和更新程度以及评价土壤管理的有效指标^[8],其值越大,表示有机碳越易于被微生物分解和被植物吸收利用^[9-10],碳库活度和质量也就越高。目前关于土壤总有机碳、全氮和碳库管理指数变化的研究大多集中在不同农艺措施下^[11-13],而关于生物炭不同用量条件下土壤有机碳、氮储量和碳库管理指数的变化鲜见报道,尤其在陕西关中壤土上的研究未见报道。因此,开展这方面的研究对于优化土壤管理措施、废弃生物质资源化利用及农业可持续发展具有重要的理论意义和实践价值。本文采用田间定位试验,研究了两年内生物炭对陕西壤土土壤碳、氮和土壤碳库管理指数的影响,以期对北方土壤资源有效利用和土壤养分提升提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验地位于陕西省杨凌示范区西北农林科技大学试验田,北纬34°16′、东经108°04′,海拔458.6 m。该地区属温带大陆性易旱气候区,年均日照时数2196 h,年均气温11~13℃,无霜期210 d,年均降雨量500~700 mm。土壤类型为褐土类,壤土亚类,红油土属,黄土母质,系统分类为土垫旱耕人为土,属石灰性土壤。研究所用生物炭为陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司在裂解炉、限氧环境下由废弃果树树干、枝条热裂解(450℃)所得,磨细过1 mm筛,备用。供

试作物选用西北农林科技大学选育小麦(小偃22号)和杂交玉米种(“正大12”)。

试验开始时土壤基础理化性质为:总有机质12.64 g·kg⁻¹,全氮0.71 g·kg⁻¹,全磷0.43 g·kg⁻¹,全钾19.64 g·kg⁻¹,硝态氮18.20 mg·kg⁻¹,铵态氮15.90 mg·kg⁻¹,速效磷12.38 mg·kg⁻¹,速效钾193.00 mg·kg⁻¹,pH 7.33(土水比为1:2.5),容重1.30 g·cm⁻³。生物炭基础理化性质为:C 72.38%,N 1.19%,O 23.81%,H 2.62%,硝态氮0.52 mg·kg⁻¹,铵态氮1.86 mg·kg⁻¹,比表面积86.70 m²·g⁻¹,pH 10.43(土水比为1:10)。

1.2 试验设计

生物炭于2012年4月一次性撒施于土壤表层并与耕层(0~20 cm)土壤混匀,其用量为5个水平:对照B0(0 t·hm⁻²)、B20(20 t·hm⁻²)、B40(40 t·hm⁻²)、B60(60 t·hm⁻²)、B80(80 t·hm⁻²)。采用随机区组设计,3次重复,小区面积为1.35 m×3.50 m,小区之间设0.5 m的隔离保护带。除生物炭用量不同外,氮、磷、钾肥(分别为尿素、磷酸二铵、硫酸钾)均作基肥于每次种植前施入,用量为225 kg N·hm⁻²、180 kg P₂O₅·hm⁻²、150 kg K₂O·hm⁻²。

试验目前共进行了两年四季。于2012年4月至2014年6月进行夏玉米和冬小麦的轮作,玉米播种量为52 500株·hm⁻²,冬小麦播种量为150 kg·hm⁻²。在作物生长期根据天气及作物生长状况适量灌水,以满足作物正常生长发育所需。分别于2012年10月、2013年6月、2013年10月、2014年6月作物收获后采集表层(0~20 cm)土样测定相关指标。以试验开始前土壤为参考土壤,其总有机碳质量分数(TOC_{参考})为7.33 g·kg⁻¹,活性有机碳质量分数(AOC_{参考})为2.03 g·kg⁻¹。

1.3 试验方法

土壤和生物炭的基本理化性质参照《土壤农化分析》常规方法测定^[14],其中:土壤总有机碳(Total organic carbon, TOC)采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法;土壤全氮(Total nitrogen, TN)采用混合催化剂-流动分析仪法;土壤活性有机碳(Active organic carbon, AOC)、中活性有机碳(Middle active organic carbon, MAOC)和高活性有机碳(High active organic carbon, HAOC)分别采用333、167、33 mmol·L⁻¹高锰酸钾氧化法测定^[12,15];土壤水溶性有机碳(Water-soluble organic carbon, WSOC)采用Ghani等^[16]的方法;土壤容重(Bulk density, BD)采用环刀法;土壤pH采用pH计测定(水土比为2.5:1)。

土壤活性有机碳库及碳库管理指数计算方法如下^[12,15,17]:

SC (Stable carbon, 稳态碳) = $\text{TOC} (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) - \text{AOC} (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$

AC (Availability of active carbon, 活性碳有效率) = $\text{AOC} (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) / \text{TOC} (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) \times 100\%$

CPI (Carbon pool index, 碳库指数) = $\text{TOC} (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) / \text{TOC}_{\text{参考}} (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$

A (Activity, 碳库活度) = $\text{AOC} (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) / \text{SC} (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$

AI (Activity index, 碳库活度指数) = $A / A_{\text{参考}}$

CPMI (Carbon pool management index, 碳库管理指数) = $\text{CPI} \times \text{AI} \times 100$

1.4 数据处理

试验数据的整理以及图表的绘制采用 Microsoft Excel 2003, 单因素方差分析和多重比较(最小显著差法)采用 SPSS 18.0。

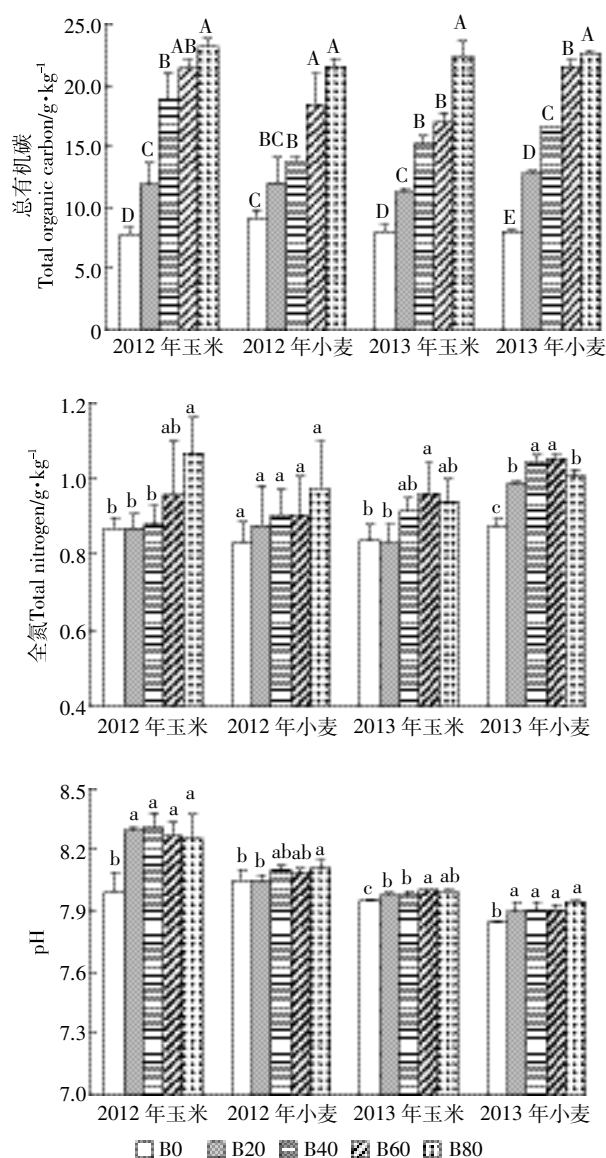
2 结果与分析

2.1 施用生物炭后土壤总有机碳、全氮含量及 pH 变化

由图 1 可以看出, 土壤 TOC 在四季作物收获后呈现出一致的规律, 均是随生物炭施用量的增加而显著增加。施炭处理的第 I、II、III、IV 季作物收获后, 土壤 TOC 含量分别比对照 B0 显著增加 53.82%~198.97%、30.19%~132.90%、40.63%~179.00%、59.80%~180.52%, 且随时间的延长, TOC 含量基本保持不变。说明一次性施入生物炭对土壤 TOC 具有直接的增加作用, 而且这种作用比较稳定。

施用生物炭对土壤 TN 的增加不显著, 但整体而言, 施用生物炭也提高了土壤 TN 含量。第 I 季 B80 处理比对照 B0 显著增加 23.35%, 其余处理与对照相比没有达到显著差异; 第 II 季施炭处理与对照之间没有显著差异; 第 III 季 B60 处理比对照显著增加了 14.59%; 第 IV 季施炭处理与对照相比均达到了显著差异, 比 B0 显著增加 13.22%~20.92%, 其中 B40 和 B60 处理增加最显著。这说明施用生物炭对土壤 TN 有增加作用, 但增加作用不稳定, 有待进一步深入研究。

由于生物炭具有较高的 pH, 施用后会直接造成土壤 pH 的上升。在南方酸性土壤区, 提高土壤 pH 可以缓解土壤酸化, 改良土壤性状, 但在北方地区, 土壤 pH 升高会影响土壤质量, 尤其是在石灰性土壤区。由图 1 可以看出, 施用生物炭的确造成土壤 pH 的升高, 与对照相比达到了显著性差异, 但整体而言, 从第 I 季到第 IV 季, 土壤 pH 呈下降趋势。这说明在短期



不同大写字母表示同一时期不同处理间差异极显著 ($P < 0.01$); 不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同
Different uppercase letters mean significant difference between treatments within a period at 0.01 level. Different lowercase letters mean significant difference between treatments within a period at 0.05 level. The same as below

图 1 施用生物炭对土壤总有机碳、氮含量及 pH 的影响
Figure 1 Effects of biochar on total soil organic carbon, total nitrogen and pH value

内生物炭的施用会造成土壤 pH 的升高, 但随时间的延长, 受耕作、施肥、灌溉等农业措施和人为活动的影响, 土壤 pH 可能会降低到原来的水平。

2.2 施用生物炭对不同土壤活性有机碳的影响

如图 2 所示, 施用生物炭后, 不同活性有机碳均有不同程度变化, 其中 AOC 在小麦季, 施生物炭的处理显著高于对照 B0。与对照相比, B20、B40、B60 和

B80 在整个试验期内 AOC 分别增加了 13.6%~37.7%、37.7%~121.8%、9.8%~75.1% 和 7.1%~61.3%, 且在前两季内, B40 处理显著高于其他各处理, 而后两季 B60 处理含量最高。MAOC 在小麦第一季 B40 显著高于 B0, 其他处理之间无显著差异, 在另三季各处理之间均无显著差异。HAOC 在连续四季内施炭处理均显著高于对照 B0, 与对照相比, B20、B40、B60 和 B80 在整个试验期内分别增加了 23.6%~37.4%、17.9%~52.9%、35.9%~70.4% 和 18.8%~70%, 且 B60 处理 HAOC 含量最高。这说明生物炭能够提高土壤 AOC 的含量, 且主要增加的是 HAOC 的含量, MAOC 的增加不显著。原因可能是生物炭施入土壤后使土壤土质

变松、通气性变好、微生物活性增强, 因此 AOC 含量增加。但由于生物炭的主要成分为稳定的芳香环结构的碳, 不易被微生物分解利用, 因此增加的主要为结构简单的高活性有机碳的量。

2.3 施用生物炭对土壤水溶性有机碳含量的影响

如图 3 所示, 在连续四季内, WSOC 含量总体呈下降趋势。前三季内, 施用生物炭的处理 WSOC 含量显著低于对照处理, B20、B40、B60 和 B80 分别比对照低 8%~11.2%、25.2%~33%、26.8%~35.1% 和 31.9%~42.8%, 且与生物炭施用量呈反比关系, 而第四季各处理之间差异不显著。这说明施用生物炭降低了土壤中 WSOC 含量, 但是随着种植年限的增加, 生物炭对土壤 WSOC 含量的影响逐渐减小。另外, 从图中可以看出, 土壤 WSOC 含量呈下降趋势, 这可能与作物的连续吸收利用有关。

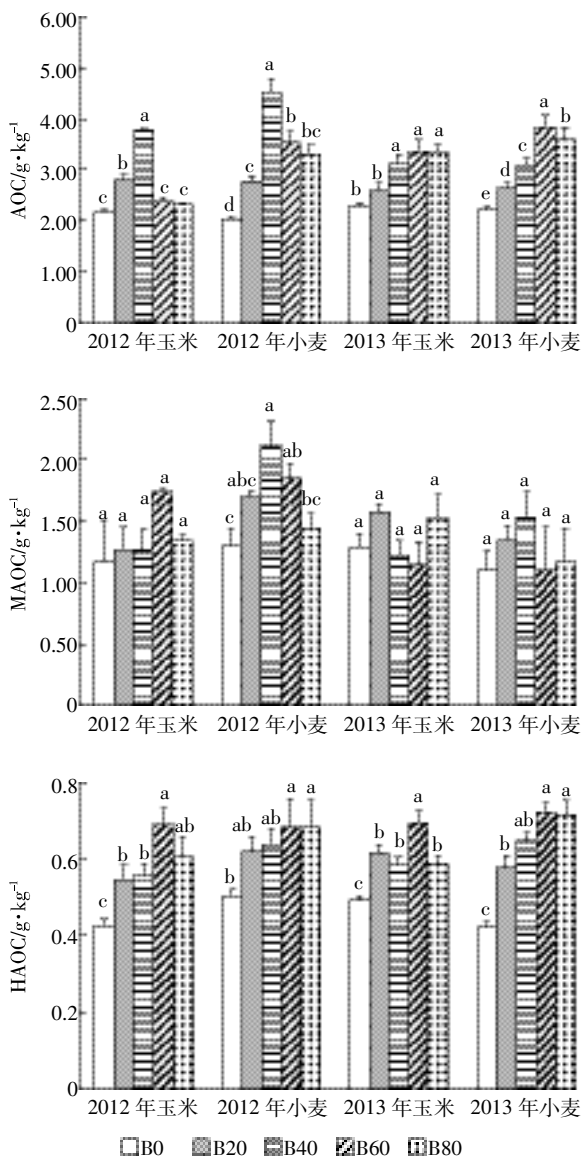


图2 施用生物炭对不同土壤活性有机碳含量的影响

Figure 2 Effect of biochar on active organic carbon

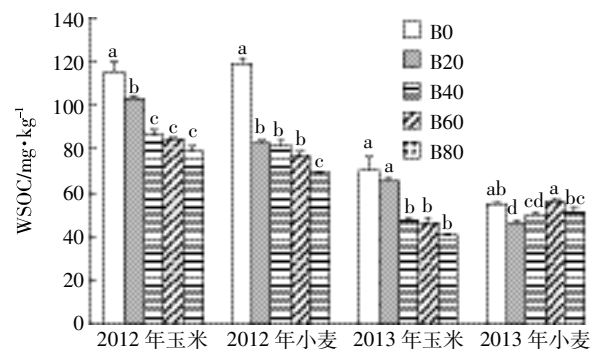


图3 施用生物炭对土壤水溶性有机碳含量的影响

Figure 3 Effect of biochar on soil water-soluble organic carbon

2.4 施用生物炭后土壤碳库管理指数的变化

土壤中 AOC 占 TOC 的百分比可以反映土壤有机碳质量, AOC 所占的比例越高, 表示土壤质量越好^[15]。由表 1 可以看出, 各施炭处理土壤 AOC 含量均高于对照, 玉米季和小麦季分别比对照高 13.60%~46.37% 和 18.47%~73.42%, 均为生物炭用量 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的含量最高。相关分析表明(表 2), 土壤 AOC 与生物炭施用量呈极显著相关 ($R^2=0.520, n=30, P<0.01$)。随生物炭施用量的增加, 土壤 AC 显著降低, 玉米季和小麦季施炭处理分别比对照低 19.22%~47.60% 和 26.15%~42.70%, 且对照 B0 显著高于施炭处理; 土壤 SC 含量随生物炭施用量的增加显著增加, 各处理间均达到显著性差异; CPI 和 SC 变化规律一致; 在不同作物种植下, 土壤 A 和 AI 均表现为 $B0>B20>B40>B60>B80$, 且对照 B0 显著高于施炭处理; CPMI 在玉米季表现为 $B60>B40>B80>B20>B0$, 在小麦季表现为 $B60>$

B80>B40>B20>B0,其与生物炭用量呈显著相关($R^2=0.272, n=30, P<0.05$)。这说明生物炭还田不仅可以提高土壤活性有机碳,增加碳库管理指数,而且能储存更多的稳态碳,增加土壤碳储量。

2.5 各指标之间的相关分析

如表2所示,施用生物炭条件下,MAOC与所有指标均不相关;pH除了与生物炭施用量呈极显著相关、与TN呈显著负相关、与HAOC呈显著正相关外,与其余各指标之间均不相关;WSOC除了与AOC之间呈显著负相关外,与其余各指标之间均呈极显著负相关;CPMI与生物炭施用量、TOC和TN之间呈显著正相关,与AOC和HAOC之间呈极显著正相关;其余各指标之间均呈极显著正相关。这说明随着生物炭施用量的增加,土壤TOC、TN、pH、

AOC、HAOC及CPMI均有显著的增加,而WSOC显著降低。

3 讨论

3.1 生物炭对土壤有机碳、氮含量的影响

直接向土壤中输入有机物质是提高土壤有机碳含量的主要途径之一^[18-19]。施用生物炭向土壤中直接输入了外源有机物质,因此能够显著增加土壤有机碳含量。生物炭主要由高度浓缩的芳香环结构组成,表面含有羟基、羧基、羰基等官能团以及内酯结构^[20],这种结构可以在很大程度上抵抗来自外界的物理、化学以及生物作用的影响,具有很强的稳定性。Swift等^[21]研究结果表明,生物炭在土壤中一般可以停留1000年,甚至长达10000年,进一步表明了生物炭的稳定

表1 不同生物炭用量对土壤碳库管理指数的影响

Table 1 Carbon pool management index under different rates of biochar

处理 Treatment		活性有机碳 AOC/g·kg ⁻¹	活性碳有效率 AC/%	稳态碳 SC/ g·kg ⁻¹	碳库指数 CPI	活度碳库 A	碳库活度指数 AI	碳库管理指数 CPMI
玉米 Maize	B0	2.28±0.08b	28.51±1.38a	5.73±0.49e	1.09±0.07e	0.40±0.03a	1.04±0.07a	113.49±3.63c
	B20	2.59±0.33b	23.03±2.78b	8.66±0.35d	1.54±0.04d	0.30±0.05b	0.78±0.12b	120.45±19.71bc
	B40	3.14±0.30a	20.74±2.08b	11.99±0.66c	2.06±0.09c	0.26±0.03b	0.68±0.09b	141.20±17.05ab
	B60	3.36±0.20a	19.88±0.82b	13.56±0.66b	2.31±0.11b	0.25±0.01b	0.65±0.03b	149.58±9.87a
	B80	3.34±0.27a	14.94±0.34c	18.98±1.06a	3.04±0.18a	0.18±0.004c	0.46±0.12c	139.73±12.04ab
小麦 Wheat	B0	2.22±0.06e	27.61±1.30a	5.83±0.21e	1.10±0.02e	0.38±0.02a	1.00±0.07a	109.44±5.08d
	B20	2.63±0.11d	20.39±1.01b	10.26±0.22d	1.76±0.02d	0.26±0.02b	0.67±0.04b	117.53±6.53d
	B40	3.11±0.14c	18.74±0.88c	13.49±0.15c	2.26±0.006c	0.23±0.01bc	0.60±0.03bc	136.38±7.80c
	B60	3.85±0.09a	17.89±0.08c	17.65±0.36b	2.93±0.06b	0.22±0.001c	0.57±0.003c	166.82±4.13a
	B80	3.58±0.12b	15.82±0.50d	19.03±0.12a	3.08±0.01a	0.19±0.007d	0.49±0.02d	151.41±6.01b

注:数据为2013年玉米季和小麦季测定值;同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Values were obtained from maize and wheat seasons in 2013. Different lowercase letters within a column mean significant difference at 0.05 levels.

表2 各指标之间的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficients between indexes

指标 Index	生物炭用量 Dosages	有机碳 TOC	全氮 TN	pH	活性有机碳 AOC	高活性有机碳 HAOC	中活性有机碳 MAOC	水溶性有机碳 WSOC	碳库管理指数 CPMI
Dosages	1	0.954**	0.556**	0.358**	0.520**	0.674**	0.114	-0.426**	0.272*
TOC		1	0.757**	0.186	0.567**	0.686**	0.053	-0.589**	0.293*
TN			1	-0.262*	0.475**	0.495**	-0.135	-0.781**	0.239*
pH				1	0.192	0.270*	0.184	0.195	0.183
AOC					1	0.580**	0.194	-0.330*	0.949**
HAOC						1	0.140	-0.330**	0.409**
MAOC							1	0.086	0.218
WSOC								1	-0.134
CPMI									1

注:*表示差异显著($P<0.05$),**表示差异极显著($P<0.01$)。

Note: Correlation coefficient labeled by * and ** indicates significant difference at 0.05 and 0.01, respectively.

性。本研究中生物炭对土壤有机碳含量具有显著增加作用,并且这种增加作用比较稳定。这是由于生物炭具有含碳量高和生物化学稳定性较强的特征,施入土壤后难以被微生物所降解,因而长期存留于土壤并成为土壤有机碳的组成部分。

生物炭能够防止养分流失^[22],因此可以降低氮素的淋失,提高氮肥利用率^[23]。这主要归功于生物炭具有巨大的比表面积等结构特性和很强的离子吸附交换能力、较高的电荷密度等功能特性^[9]。生物炭还增大了土壤 C/N,抑制了微生物对土壤氮素的分解利用。另外,生物炭本身含有一部分氮素,施用量越大,对土壤氮素的贡献越大。本研究发现施加高水平的生物炭后土壤全氮含量增加了,与郭伟等的^[24]研究结果一致。Laird 等^[25]的研究结果表明,向典型农业土壤中施加 20 g·kg⁻¹ 生物炭后土壤氮素淋失量减少了 11%。这主要是由于生物炭的强吸附性将氮素吸附到土壤表面,使得土壤溶液中的无机氮减少。另外,生物炭的孔隙能为土壤微生物提供适宜的生存环境^[26],从而促进固氮细菌活性,提高固氮菌的固氮功效。

3.2 生物炭对土壤 pH 的影响

土壤 pH 值是影响土壤养分有效率的重要因素。生物炭本身呈碱性,添加到土壤后对其周围局域环境的 pH 产生了一定程度的影响,因此农田土壤 pH 值随着生物炭施用量的增加而升高。本研究还发现,随种植次数的增加,生物炭对土壤 pH 的增加程度降低。这可能与土壤本身的缓冲性以及作物生长过程中分泌的有机酸有关。张祥等^[27]研究表明在酸性土壤中施用生物炭可显著提高土壤 pH;Zwieten 等^[28]、陈心想等^[29]的研究表明碱性或弱碱性土壤施用生物炭对 pH 影响不显著;张雯等^[30]对盐土的研究表明,由于生物炭本身偏碱性,对盐碱土的改良效应与自身的碱性效应相当,反而使 pH 较原土略有降低。

3.3 生物炭对土壤活性有机碳、水溶性有机碳含量的影响

AOC 是易受环境影响的土壤有机质组分,易被土壤微生物分解矿化,对土壤养分、土壤理化性质、植物生长以及全球气候变化都有重要影响。生物炭由于疏松多孔,施入土壤后能疏松土壤质地,促进植物根系生长。有研究表明,在沙土和沙壤土中施用生物炭不仅可以增加根生物质量,而且还可以改良根系结构^[31],使根系分泌物增多、微生物活性增大,从而使土壤 AOC 含量增加。本研究所施用的生物炭由于氧化不完全,本身含有部分活性有机碳,对土壤 AOC 含量的增加

有一定的贡献。本研究结果与马莉等^[32]的研究结果一致,均表明生物炭对土壤 AOC 有提高作用。但张杰等^[33]在潮土上的研究表明,施用生物炭后土壤 AOC 含量无明显变化,可能和生物炭原材料、裂解条件以及土壤类型有关。

WSOC 是一种非常活跃的有机碳组分,主要来源于土壤腐殖质的淋滤和微生物的分解^[34],虽然含量较少,但是可以被微生物直接利用,由于其对环境变化比较敏感,在一定程度上可以作为检测土壤肥力的重要指标。生物炭的特殊结构使其具有较强的吸附能力,施入土壤后增加了土壤对有机碳分子的吸附作用,而且这种吸附作用与生物炭施用量之间具有正比关系,导致了土壤 WSOC 含量的下降。另外,生物炭中含有大量的钙离子^[35],能够络合土壤 WSOC^[36],也是土壤溶液中 WSOC 含量下降的一个重要原因。邢英等^[37]、章明奎等^[38]的研究结果与该研究结果一致,但马莉等^[32]的研究结果表明,生物炭低施用量能够显著提高土壤 WSOC 含量,而高施用量与对照之间差别不大。这种结果的不一致性可能和生物炭原材料、裂解条件以及土壤类型有关。因此,关于生物炭对土壤 WSOC 含量的影响还需要进一步研究。

3.4 生物炭对土壤碳库管理指数的影响

Lefroy 等^[7]提出的土壤碳库管理指数可以作为评价土壤有机碳质量的指标,反映有机碳被微生物和植物利用的难易程度,其值越大表示越容易被利用,同时,碳库活度和质量也就越高^[9-10]。杨旭等^[39]在沈阳黄土母质上发育的棕壤上的研究表明,秸秆炭化还田可以有效提高土壤碳库管理指数,与本研究结果一致。这可能是秸秆生物炭中含有较多活性有机碳的原故^[40]。本研究表明,施用生物炭显著提高了土壤有机碳含量以及碳库管理指数,且在本研究所施用的生物炭含量范围内,其与生物炭施用量呈显著正相关关系。一方面,说明施用生物炭能够提高壤土土壤肥力;另一方面,对生物炭在固碳减排、减缓温室效应、提高肥料利用率等方面的研究具有一定的启示意义。另外,在小麦季和玉米季,生物炭对土壤碳库管理指数的影响有所差异。有研究表明^[41],种植作物不同,免耕以及秸秆还田对土壤碳库管理指数的影响不同,说明作物类型对土壤碳库管理指数具有重要的影响,但关于生物炭还田下作物类型对土壤碳库管理指数影响的研究尚未见报道。这可能与作物根系结构、根系分布状况以及生物炭对不同作物根系生长的影响有关,具体原因将在以后的研究中深入探究。本研究通过两

年连续种植作物的田间试验研究了生物炭对壤土土壤碳氮含量、碳库管理指数以及碳氮组分的影响,但农田土壤碳、氮的变化及其效应是一个长期的过程,对其影响机理及其效应还需要进一步深入研究。

4 结论

(1)施用生物炭可以显著提高土壤总有机碳含量,且与生物炭施用量呈正相关关系;在整个实验期内,生物炭对土壤全氮含量具有一定增加作用,但是在第二季内增加作用不显著。

(2)北方石灰性土壤上施用生物炭可以提高土壤pH,但是随着种植年限的增加,土壤pH有恢复到施炭前水平的趋势。

(3)生物炭可以提高土壤活性有机碳含量,且小麦季效果最显著;生物炭对于高活性有机碳,在连续四季内均为施用量 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 效果最好。另外,生物炭的施用显著降低了土壤水溶性有机碳含量,且这种降低程度与生物炭施用量呈正相关关系。

(4)生物炭施用能够显著提高土壤碳库管理指数,且生物炭用量为 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时效果最好。

参考文献:

- [1] Marris E. Putting the carbon back: Black is the new green[J]. *Nature*, 2006, 442:624-626.
- [2] Sohi S P, Krull E, Lopez C E, et al. A review of biochar and its use and function in soil[J]. *Advances in Agronomy*, 2010, 105(10):47-82.
- [3] 孙洪文, 张彦峰, 张 闻. 生物炭与环境[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013:1-14.
- [4] SNU Hong-wen, ZHANG Yan-feng, ZHANG Wen. Biochar and environment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013:1-14.
- [5] Xu G, Lü Y, Sun J, et al. Recent advances in biochar applications in agricultural soils: Benefits and environmental implications[J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2012, 40(10):1093-1098.
- [6] Herath H M S K, Camps-Arbestain M, Hedley M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol[J]. *Geoderma*, 2013, 209-210(11):188-197.
- [7] 李飞跃, 梁 媛, 汪建飞, 等. 生物炭固碳减排作用的研究进展[J]. 核农学报, 2013, 27(5):681-686.
- [8] LI Fei-yue, LIANG Yuan, WANG Jian-fei, et al. Biochar to sequester carbon and mitigate greenhouses emission: A review[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2013, 27(5):681-686.
- [9] Lefroy R D B, Blair C, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance[J]. *Plant and Soil*, 1993, 155-156(1):399-402.
- [10] 刘梦云, 付东磊, 常庆瑞, 等. 黄土台塬不同土地利用方式对土壤有机碳氧化稳定性及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(12):2415-2424.
- [11] LIU Meng-yun, FU Dong-lei, CHANG Qing-rui, et al. Effects of land-use type on soil organic carbon oxidability and enzyme activities in the tablelands of the loess plateau[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(12):2415-2424.
- [12] 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.
- [13] QIU Li-ping, ZHANG Xing-chang, CHENG Ji-min. Effects of land-use type on soil organic matter and carbon management index in Ziowuling area[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(1):84-89.
- [14] 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.
- [15] HAN Xin-hui, TONG Xiao-gang, YANG Gai-he, et al. Difference analysis of soil organic carbon pool in returning farmland to forest in loess hilly area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(12):223-229.
- [16] 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.
- [17] HUANG Zong-sheng, YU Li-fei, FU Yu-hong. Characteristics of soil mineralizable carbon pool in natural restoration process of Karst forest vegetation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(8):2165-2170.
- [18] 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.
- [19] XU Ming-gang, YU Rong, SUN Xiao-feng, et al. Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon management index of the typical soils of China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4):459-465.
- [20] 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.
- [21] XU Ming-gang, YU Rong, WANG Bo-ren. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5):723-729.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] BAO Shi-dan. Analysis methods for soil chemistry of agriculture[M]. 3rd edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [24] 吴建富, 曾研华, 潘晓华, 等. 稻草还田方式对双季水稻产量和土壤碳库管理指数的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6):1572-1578.
- [25] WU Jian-fu, ZENG Yan-hua, PAN Xiao-hua, et al. Effects of rice straw returning mode on rice grain yield and soil carbon pool management index in double rice-cropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(6):1572-1578.
- [26] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(9):1231-1243.
- [27] 兰 延, 黄国勤, 杨滨娟, 等. 稻田绿肥轮作提高土壤养分增加有机碳库[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13):146-152.
- [28] LAN Yan, HUANG Guo-qin, YANG Bin-juan, et al. Effect of green manure rotation on soil fertility and organic carbon pool[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(13):146-152.
- [29] 曾 骏, 郭天文, 包兴国, 等. 长期施肥对土壤有机碳和无机碳的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008(2):11-14.

- ZENG Jun, GUO Tian-wen, BAO Xing-guo, et al. Effects of soil organic carbon and soil inorganic carbon under long-term fertilization[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2008(2): 11-14.
- [19] Gong W, Yan X Y, Wang J Y, et al. Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in Northern China[J]. *Geoderma*, 2009, 149(3/4): 318-324.
- [20] Varhegyi G, Szabo P, Till F, et al. TG, TG-MS, and FTIR characterization of high-yield biomass charcoals[J]. *Energy Fuels*, 1998, 12(5): 969-974.
- [21] Swift R S. Sequestration of carbon by soil[J]. *Soil Science*, 2001, 166(11): 858-871.
- [22] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物炭环境行为与环境效应[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 977-982.
- LIU Yu-xue, LIU Wei, WU Wei-xiang, et al. Environmental behavior and effect of biomass-derived black carbon in soil: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 977-982.
- [23] 钟雪梅, 朱义年, 刘杰, 等. 竹炭包膜对肥料氮淋溶和有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(增刊): 154-157.
- ZHONG Xue-mei, ZHU Yi-nian, LIU Jie, et al. Influence of bamboo-charcoal coating on N leaching and effectiveness of fertilizers[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl): 154-157.
- [24] 郭伟, 陈红霞, 张庆忠, 等. 华北高产农田施用生物炭对耕层土壤总氮和碱解氮含量的影响[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(3): 425-428.
- GUO Wei, CHEN Hong-xia, ZHANG Qing-zhong, et al. Effects of biochar application on total nitrogen and alkali-hydrolysable nitrogen content in the topsoil of the high-yield cropland in North China Plain[J]. *Ecol Environ Sci*, 2011, 20(3): 425-428.
- [25] Laird D, Fleming P, Wang B, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3): 436-442.
- [26] Thies J E, Rillig M C. Characteristics of biochar: Biological properties [M]. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, 2009: 85-105.
- [27] 张祥, 王典, 姜存仓, 等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(8): 979-984.
- ZHANG Xiang, WANG Dian, JIANG Cun-cang, et al. Effect of biochar on physicochemical properties of red and yellow brown soils in the South China Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(8): 979-984.
- [28] Zwieter L Van, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 235-246.
- [29] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6534-6542.
- CHEN Xin-xiang, HE Xu-sheng, GENG Zeng-chao, et al. Effects of biochar on selected soil chemical properties and on wheat and millet yield[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(20): 6534-6542.
- [30] 张雯, 耿增超, 陈心想, 等. 生物炭对盐土改良效应研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(2): 73-77, 105.
- ZHANG Wen, GENG Zeng-chao, CHEN Xin-xiang, et al. Effects of biochar on saline soil improvement[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(2): 73-77, 105.
- [31] Abiven S, Hund A, Martinsen V, et al. Biochar amendment increases maize root surface areas and branching: A shovelomics study in Zambia[J]. *Plant Soil*, 2015, 395(1): 45-55.
- [32] 马莉, 吕宁, 冶军, 等. 生物炭对灰漠土有机碳及其组分的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(8): 976-981.
- MA Li, LÜ Ning, YE Jun, et al. Effects of biochar on organic carbon content and fractions of gray desert soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(8): 976-981.
- [33] 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.
- ZHANG Jie, HUANG Jin-sheng, LIU Jia, et al. Carbon dioxide emissions and organic carbon contents of fluvo-aquic soil as influenced by straw a lignin and their biochars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2): 401-408.
- [34] Wander M M, Traina S J, Stinner B R, et al. The effects of organic and conventional management on biologically active soil organic matter fraction pools[J]. *American Journal of Soil Science Society*, 1994, 58(4): 1130-1139.
- [35] Cao X, Harris W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14): 5222-5228.
- [36] Römken P F, Bril J, Salomons W. Interaction between Ca²⁺ and dissolved organic carbon: Implications for metal mobilization[J]. *Applied Geochemistry*, 1996, 11(1/2): 109-115.
- [37] 邢英, 李心清, 房彬, 等. 生物炭添加对两种类型土壤DOC淋失影响[J]. *地球与环境*, 2015, 43(2): 133-137.
- XING Ying, LI Xin-qing, FANG Bin, et al. Effect of biochar addition on DOC leaching from two different types of soils[J]. *Earth and Environment*, 2015, 43(2): 133-137.
- [38] 章明奎, Waleign D Bayou, 唐红娟. 生物炭对土壤有机质活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 127-131, 137.
- ZHANG Ming-kui, Waleign D Bayou, TANG Hong-juan. Effects of biochar's application on active organic carbon fractions in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 127-131, 137.
- [39] 杨旭, 兰宇, 孟军, 等. 秸秆不同还田方式对旱地棕壤CO₂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.
- YANG Xu, LAN Yu, MENG Jun, et al. Effects of different stover-incorporation ways on CO₂ emission in dryland brown soil and soil carbon pool management index [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(3): 805-809.
- [40] Zimmerman A R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon(biochar)[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(4): 1295-1301.
- [41] 董博, 曾骏, 张东伟, 等. 小麦-玉米免耕轮作对土壤有机碳、无机碳与微生物量碳含量的影响[J]. *土壤通报*, 2013, 44(2): 376-379.
- DONG Bo, ZENG Jun, ZHANG Dong-wei, et al. Effects of no-tillage and wheat-maize rotation on soil organic carbon, soil inorganic carbon and microbial biomass carbon contents[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(2): 376-379.