

施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响

尚 杰, 耿增超*, 陈心想, 赵 军, 耿 荣, 王 森

(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:通过安排田间试验,在旱作农田土壤中施用果树树干、枝条生物炭,分层分析不同用量(0、20、40、60、80 t·hm⁻²)生物炭对农田土壤有机碳、氮及其组分的影响。结果表明:在0~10 cm 土层,土壤总有机碳(TOC)、颗粒有机碳(POC)、易氧化有机碳(EOC)随生物炭施用量的增加而增加,微生物生物量碳(MBC)、全氮(TN)、碱解氮(AN)、硝态氮(NO₃-N)、微生物生物量氮(MBN)均在生物炭施用量为60 t·hm⁻²时达到最大,分别比对照(B0)显著增加87.22%、33.33%、18.76%、94.79%、178.80%;在10~20 cm 土层,TOC、POC、TN、NO₃-N 随生物炭施用量的增加而增加,EOC、MBC、AN 均在生物炭施用量为60 t·hm⁻²时达到最大,分别比B0显著增加78.05%、23.85%、31.07%,而MBN在40 t·hm⁻²时达到最大,比B0显著增加50.87%;在20~30 cm 土层,并没有直接地施用生物炭,但因为上层生物炭的影响,除NO₃-N外,其余各指标含量多在60 t·hm⁻²或80 t·hm⁻²时显著高于B0;此外,随生物炭施用量的增加,土壤有机碳储量和氮储量在0~30 cm 土层分别增加37.92%~108.31%和1.05%~14.94%,其中氮储量在生物炭施用量为60 t·hm⁻²时达到最大。相关分析也表明,土壤TOC、EOC、POC、TN、AN、NO₃-N含量与生物炭施用量呈极显著的正相关($P<0.01$)。因此,适量施用生物炭具有提高旱作农田土壤有机碳、氮含量,增加土壤碳截留,提升土壤养分供应的能力。推荐生物炭施用量为60 t·hm⁻²。

关键词:生物炭;有机碳;全氮;旱作农田;储量;分布;用量

中图分类号:S156 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)03-0509-09 doi:10.11654/jaes.2015.03.013

Effects of Biochar on Soil Organic Carbon and Nitrogen and Their Fractions in a Rainfed Farmland

SHANG Jie, GENG Zeng-chao*, CHEN Xin-xiang, ZHAO Jun, GENG Rong, WANG Sen

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

Abstract: In recent years, biochar has become an emerging soil amendment, and has multiple agricultural and environmental benefits. Here, a long-term field trial was carried out to investigate the effects of different rates of biochar (0, 20, 40, 60 t·hm⁻², and 80 t·hm⁻²) on soil organic carbon and soil total nitrogen and their fractions. The biochar used in this study was produced from fruit tree branches at pyrolysis temperature of approximately 450 °C. In 0~10 cm soil layer, total organic carbon (TOC), particulate organic carbon (POC) and easily oxidized organic carbon (EOC) increased with increasing rates of biochar. At 60 t·hm⁻² biochar, microbial biomass carbon (MBC), total nitrogen (TN), alkaline hydrolysis nitrogen (AN), NO₃-N, and microbial biomass nitrogen (MBN) were the greatest, which were significantly increased by 87.22%, 33.33%, 18.76%, 94.79%, and 178.80%, respectively, compared to the control (B0). In 10~20 cm soil layer, TOC, POC, TN and NO₃-N increased as biochar rates increased. EOC, MBC, and AN were the highest at 60 t·hm⁻² biochar, which were significantly increased by 78.05%, 23.85%, and 31.07%, respectively, over the control. Applying biochar at 40 t·hm⁻² led to the highest MBN, a 50.87% higher than the control. In 20~30 cm soil layer, no biochar was directly applied to this layer, but all measurements except NO₃-N were significantly higher at 60 t·hm⁻² or 80 t·hm⁻² biochar than those of the control (B0). Applying biochar increased soil organic carbon reserves and nitrogen reserves in 0~30 cm soil layer by 37.92%~108.31% and 1.05%~14.94%, respectively. Soil nitrogen reserves reached the maximum at biochar rate of 60 t·hm⁻². Total organic carbon, EOC, POC, TN, AN, and NO₃-N were significantly positively correlated with biochar rates ($P<0.01$). The results show that biochar at 60 t·hm⁻² yields the greatest effects in increasing soil organic carbon and nitrogen contents and improving nutrient supply in the rainfed farmland.

Keywords: biochar; organic carbon; total nitrogen; rainfed farmland; reserves; distribution; application rate

收稿日期:2014-10-14

基金项目:国家农业部“948”项目(2010-Z19);陕西省科技攻关项目(2010K02-12-1);国家级大学生创新创业训练计划项目(201310712036);西北农林科技大学大学生创新创业训练计划项目“生物炭对壤土物理性质和生物活性的影响”

作者简介:尚 杰(1989—),男,硕士研究生,主要从事废弃生物质资源化利用及土壤养分研究。E-mail: xnshangjie@163.com

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

国际生物炭行动组织(International Biochar Initiative, IBI)将生物炭(Biochar)定义为一种细颗粒状炭,富含有机碳且难降解,它是由生物体或废弃的有机原料热裂解而产生的,作为土壤改良剂,能与土壤形成顽固的土壤碳结合体,这种结合体是碳负性的,并将大气中的 CO₂ 储存到具有高抗性的土壤碳库中,施用生物炭的土壤,营养持久性增强,不仅减少了总的需求量,而且减少了气候和环境对作物的影响^[1]。

土壤碳、氮既是土壤质量的核心,也是土壤质量评价和土地可持续利用管理必须考虑的重要指标。土壤有机碳是影响土壤肥力和作物产量高低的决定性因子^[2-3],也是土壤中较为活跃的土壤组分,维持着土壤与大气之间的碳素平衡,并可保持农业生态系统的长期可持续性发展^[4]。土壤有机碳的活性组分是土壤中移动快、不稳定、易矿化^[5],且植物和土壤微生物利用较高的那部分有机态碳^[6-7]。氮肥利用率低的问题一直是一个世界性的难题,据统计,中国主要粮食作物的氮肥利用率为 27.5%,呈逐渐下降趋势^[8],过量氮肥施用和较低氮肥利用率导致氮素以不同方式进入环境,对土壤环境和水环境产生极大的危害,如何提高氮肥利用率,减少氮素损失是迫切需要解决的关键问题。前人研究表明,施用生物炭可以提高土壤碳^[2,9-10]、氮^[11-12]及相关组分^[2,12-13]的含量,但多数研究均是盆栽试验^[2]、模拟试验^[11-12]或者短期的田间小区试验^[9],缺乏较长期的研究,并且对生物炭的施用量也说法不一。因此,本文拟通过 2 年的田间定位试验,了解施用生物炭条件下旱地农田土壤碳、氮动态,碳、氮储量变化及其控制过程,为科学管理土壤奠定基础,以及为生物炭作为土壤改良剂的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

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,红土属,黄土母质,系统分类为土垫旱耕人为土,属石灰性土壤。

1.2 试验材料

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(450 ℃)由废弃果树树干、枝条热裂解所得,磨细过 1 mm 筛。供试作物选用西北农林科技大学选育小麦种(小偃 22 号)和杂交玉米种(“正大 12”)。供试土壤和生物炭的基本理化性质见表 1。

1.3 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,每个处理 3 次重复,小区面积为 1.35 m×3.50 m,每个小区之间设 0.30 m 隔离带。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作物前一次性施入,其用量折合成纯养分 N-P₂O₅-K₂O 为 225-180-150 kg·hm⁻²。

目前试验已进行了两年四季,于 2012 年 4 月至 2014 年 6 月进行夏玉米(Summer maize)和冬小麦(Winter wheat)的轮作。在第四季作物(冬小麦)收获后(2014 年 6 月 7 日)分层(0~10、10~20 cm 和 20~30 cm)采集土壤样品,取 100 g 左右鲜土于 4 ℃冰箱中保存,用于土壤硝态氮和微生物生物量碳、氮的测定,其余土样于阴凉处风干后供其他指标的测定。

1.4 测定指标及方法

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,生物炭的元素组成采用德国 Elementar 公司生产的 Vario EL III 型元素分析仪(Element Analyzer)测定,比表面积采用 mMK-ASAP 2020C 型全自动化学吸附仪-容量法装置,根据 BET 吸附方程计算得到生物炭比表面积。土壤总有机碳(Total organic carbon, TOC):K₂Cr₂O₇ 氧化-外加加热法;土壤全氮(Total nitrogen, TN):混合催化剂-

表 1 供试土壤和生物炭的基本理化性质

Table 1 Chemical and physical properties of soil and biochar used in experiment

土壤 Soil	pH(1:2.5)	容重/ g·cm ⁻³	有机质/ g·kg ⁻¹	全氮/ g·kg ⁻¹	全磷/ g·kg ⁻¹	全钾/ g·kg ⁻¹	NO ₃ -N/ mg·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/ mg·kg ⁻¹	有效磷/ mg·kg ⁻¹	速效钾/ mg·kg ⁻¹
	7.33	1.30	14.99	0.71	0.43	19.64	18.20	15.90	12.38	193.00
生物炭 Biochar	pH(1:10)	比表面积/m ² ·g ⁻¹	N/%	O/%	C/%	H/%	易氧化有机碳/g·kg ⁻¹	NO ₃ -N/mg·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·kg ⁻¹	
	10.43	86.70	1.19	23.81	72.38	2.62	73.59	0.52		1.86

流动分析仪法;土壤碱解氮(Alkali-hydrolyzable nitrogen, AN): 碱解扩散法; NO_3^- -N: $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 浸提-连续流动分析仪法;土壤微生物生物量碳、氮^[15]: 氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提法,其中,土壤微生物生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)采用岛津 TOC-5000A 碳分析仪, $\text{MBC}=\text{EC}/0.45$ (EC 为熏蒸和未熏蒸土样用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ K_2SO_4 提取的总碳之差,以 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土表示),土壤微生物生物量氮(Microbial biomass nitrogen, MBN)采用连续流动分析仪法, $\text{MBN}=\text{EN}/0.25$ (EN 为熏蒸和不熏蒸土样用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ K_2SO_4 提取的 NH_4^+ -N 之差,以 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土表示);土壤颗粒有机碳^[13](Particulate organic carbon, POC): $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $(\text{NaPO}_3)_6$ 分散, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 氧化-外加热法;易氧化有机碳^[16](Easily oxidized organic carbon, EOC): $333 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 高锰酸钾氧化-分光光度法;土壤容重:环刀法测定。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 进行数据整理和绘制图表, SPSS18.0 统计软件对数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和相关分析,多重比较采用最小显著差异法(LSD),显著性水平设为 0.05。结果以“平均值 $\pm$ 标准差”表示。土壤有机碳、氮密度,有机碳、氮储量分别用下列公式计算:

$$\text{土壤有机碳、氮密度}(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}) = C_i B_i H_i (1 - G_i) \times 0.1$$

$$\text{土壤有机碳、氮储量}(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}) = \sum_{i=1}^n C_i B_i H_i (1 - G_i) \times 0.1$$

式中: C_i 为第 i 层土壤总有机碳或全氮含量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; B_i 为第 i 层土壤容重, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; H_i 为第 i 层土壤厚度, cm; G_i 为第 i 层土壤中大于 2 mm 的石砾所占的体积百分数, %, 本研究样品 G_i 为零; 0.1 为单位转换系数。

2 结果与分析

2.1 施用生物炭后土壤总有机碳及其碳组分含量

TOC 含量是衡量土壤肥力水平的一个重要指标,施用生物炭对土壤 TOC 含量影响较大。如图 1A 所示,随生物炭施用量的增加,在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层,施炭处理的 TOC 含量分别比对照 B0 显著增加 65.14%~180.80% 和 54.70%~180.68%; 在 20~30 cm 土层,土壤 TOC 含量在 B60 和 B80 处理时显著增加,分别较 B0 增加 37.41% 和 35.90%。

EOC 是易被土壤微生物分解矿化的有机碳,对植物养分的供给有直接作用^[2]。与土壤 TOC 变化相比,EOC 随生物炭施用量的增加变化幅度明显较小

(图 1B)。在 0~10 cm 土层, B40、B60 和 B80 比 B0 分别显著增加 43.75%、68.33% 和 79.58%; 在 10~20 cm 土层, B60 比 B0 显著增加 78.05%, 其余处理较 B0 也有所增加, 但差异不显著; 在 20~30 cm 土层, B80 比 B0 显著增加 32.96%, 其余处理较 B0 无显著差异。

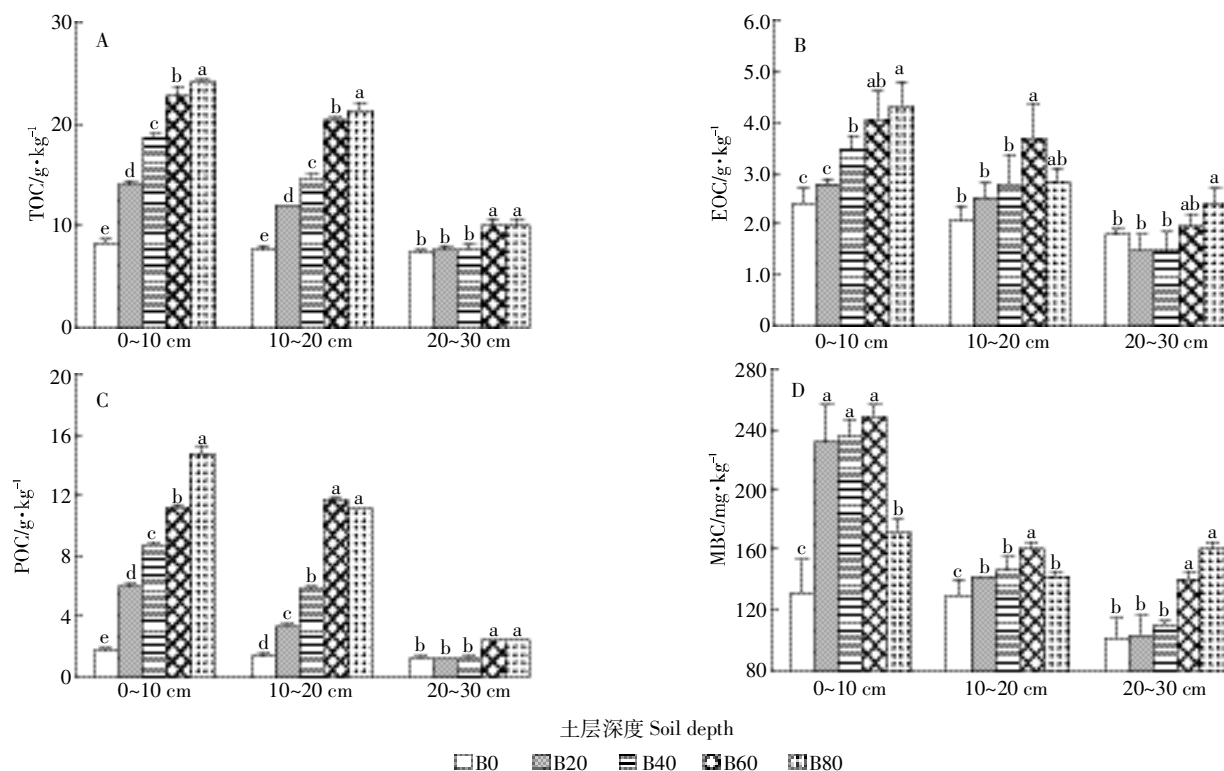
POC 是指示土壤 TOC 动态对短期农业管理措施响应的理想指标^[17]。由图 1C 可知, 与对照 B0 相比, 随生物炭施用量的增加, 在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层, 施炭处理的 POC 含量分别显著增加 4.14~12.88 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 1.98~9.67 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在 20~30 cm 土层, 土壤 POC 含量在 B60 和 B80 处理时分别显著增加 96.00% 和 98.40%, 与土壤 TOC 的变化趋势一致。

MBC 是土壤活性有机碳的一部分, 可作为土壤活性有机碳变化的敏感指标^[2]。随生物炭施用量的增加, 在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层, 土壤 MBC 含量均是先增加后减小, 20~30 cm 土层, MBC 含量呈增加趋势(图 1D)。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层, 施炭处理的 MBC 含量分别比 B0 显著增加 30.54%~87.22% 和 9.03%~23.85%, 且均在 B60 处理时达到最大; 在 20~30 cm 土层, 施炭处理比 B0 增加 2.25%~58.60%, 其中, B60 和 B80 与 B0 处理间差异达到显著。

垂直方向上, 同一处理的土壤 TOC 和 POC 含量在施炭土层(0~10 cm 和 10~20 cm)均明显高于下层(20~30 cm); 除 B80 的 MBC 含量在 10~20 cm 土层小于 20~30 cm 土层外, 同一处理的土壤 EOC 和 MBC 含量均是 0~10 cm 土层 > 10~20 cm 土层 > 20~30 cm 土层。说明土层深度也会对土壤 EOC 和 MBC 含量产生影响, 即同一处理的 EOC 和 MBC 含量随土层加深而减少。这可能与土壤微生物的活性和作物根系分布有关, 土壤表层土质疏松、通气透光、养分丰富, 有利于微生物的生存和作物根系的生长, 进而以微生物为食物的小型动物种群和数量也会增加, 使土壤表层生物活性较高, 因此土壤 EOC 和 MBC 含量均随土层加深而减少。

2.2 施用生物炭后土壤全氮及其氮组分含量

生物炭对土壤 TN 有较大的影响, 如图 2A 所示, 施炭处理均比对照 B0 有所增加。在 0~10 cm 土层, 施炭处理比 B0 增加 11.59%~33.33%, 其中 B20、B40 和 B60 与 B0 处理间差异达到显著; 在 10~20 cm 土层, 施炭处理比 B0 增加 3.03%~25.76%, 其中 B40、B60 和 B80 与 B0 处理间差异达到显著; 在 20~30 cm 土层, B40、B60 和 B80 分别比 B0 显著增加 15.69%、27.45% 和 31.37%。



不同字母表示同一土层不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

Different letters within a soil layer mean significant difference between treatments at 0.05 level. The same as below

图1 施用生物炭对土壤 TOC、EOC、POC 和 MBC 的影响

Figure 1 Effects of biochar on TOC, EOC, POC and MBC in soil

与土壤 TN 含量的变化趋势相似,土壤 AN 含量在施炭土层均比 B0 显著增加(图 2B)。在 0~10 cm 土层,施炭处理比 B0 显著增加 14.59%~18.76%,但施用生物炭的处理间差异不显著;在 10~20 cm 土层,施炭处理比 B0 显著增加 5.61%~31.07%;在 20~30 cm 土层,B60 和 B80 分别比 B0 显著增加 17.95%和 20.68%,而 B20 和 B40 较 B0 没有达到显著性差异。

NO_3^- -N 是作物吸收利用氮素的主要形态,其含量多少直接影响土壤的供氮能力。由图 2C 可知,随生物炭施用量的增加,土壤 NO_3^- -N 含量在 3 个土层均显著增加,在 0~10、10~20 cm 和 20~30 cm 土层,施炭处理比对照 B0 分别显著增加 46.64%~94.79%、57.31%~101.43%和 28.87%~44.63%,说明施用生物炭对土壤 NO_3^- -N 有明显的吸附截留作用。

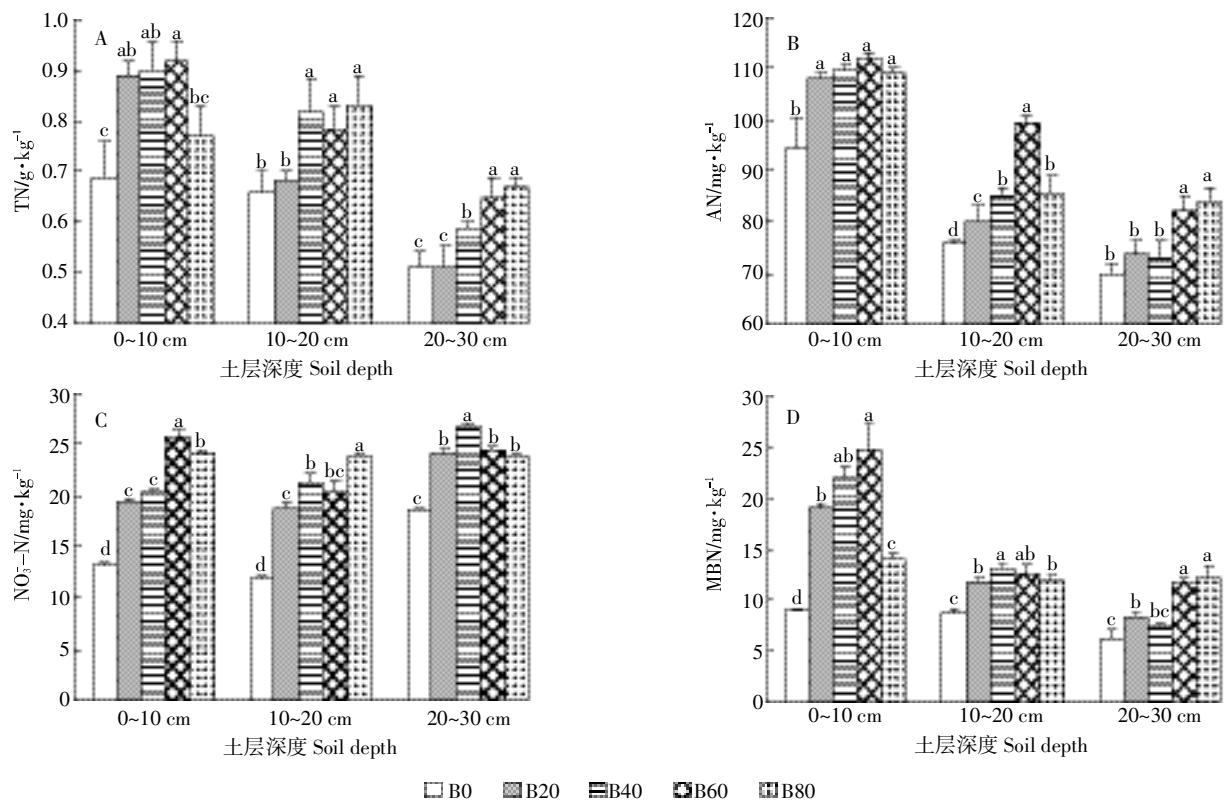
土壤 MBN 含量与 MBC 含量的变化趋势一致,随生物炭施用量的增加,MBN 含量在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层均是先增加后减小,在 20~30 cm 土层呈现增加趋势(图 2D)。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层,施炭处理比对照 B0 分别显著增加 58.06%~178.80%和 36.47%~50.87%;在 20~30 cm 土层,B20、B40、B60 和 B80 分别

比 B0 增加 35.26%、22.73%、91.60%和 98.19%,其中 B20、B60 和 B80 与 B0 处理间差异达到显著。

垂直方向上,除 B80 处理的 TN 含量在 0~10 cm 土层小于 10~20 cm 土层外,同一处理的土壤 TN、AN 和 MBN 含量均是 0~10 cm 土层>10~20 cm 土层>20~30 cm 土层; NO_3^- -N 含量在 3 个土层含量差异不大。土壤生物炭用量、养分形态和生物活性是影响土壤 TN、AN、 NO_3^- -N 和 MBN 含量的主要因素,因而呈现不同土层间的含量差异。

2.3 施用生物炭后土壤碳氮比的变化

施用生物炭显著改变了土壤 TOC 与 TN、MBC 与 MBN 的比值,如表 2 所示。TOC/TN 在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层随生物炭施用量的增加而显著增加,在 20~30 cm 土层,除 B40 处理外,其余处理较 B0 也显著增加。MBC/MBN 与 TOC/TN 的变化趋势相反,总体上呈现下降趋势,在 3 个土层均是对照 B0 显著高于其他施炭处理,在 0~10 cm 土层,MBC/MBN 在 B60 时比值最低,显著低于对照 32.48%;在 10~20 cm 土层,MBC/MBN 在 B40 时比值最低,显著低于对照 24.52%;在 20~30 cm 土层,MBC/MBN 在 B60 时比值

图 2 施用生物炭对土壤 TN、AN、NO₃-N 和 MBN 的影响Figure 2 Effects of biochar on TN, AN, NO₃-N and MBN in soil

最低,显著低于对照 28.52%。

生物炭富含细颗粒状且性质稳定的有机碳,可以直接增加土壤 TOC 含量(图 1A)。生物炭除具有吸附和保持氮素的作用外,由于生物炭的施用,极大地提高了土壤中碳素含量,而自然界中微生物会对土壤 C/N 进行调控,最终达到稳定的比值,这是生物炭提高土壤氮素的另一个重要原因。一般认为土壤微生物组成的不同会导致 MBC/MBN 的变化,本试验中 MBC/MBN 随生物炭用量的增加有下降的趋势,与陈

心想等^[18]的研究结果一致,其具体机理还需要进一步深入研究。

2.4 施用生物炭后土壤有机碳、氮密度的变化

土壤有机碳、氮密度主要由土壤容重和有机碳、氮含量决定^[19]。由于生物炭密度较低且具有一定的稀释作用^[13],在不同生物炭用量下,土壤容重存在一定差异。由图 3A 可见,随生物炭施用量的增加,土壤容重在施炭土层均显著降低,且 0~10 cm 和 10~20 cm 土层明显小于 20~30 cm 土层。

表 2 施用生物炭对土壤碳氮比的影响

Table 2 Effects of biochar on ratios of soil carbon to nitrogen

碳氮比 Carbon:nitrogen ratio	土层深度 Soil depth	处理 Treatments				
		B0	B20	B40	B60	B80
TOC/TN	0~10 cm	12.59±1.11e	15.83±0.34d	20.44±1.21c	25.09±0.41b	31.36±1.96a
	10~20 cm	11.46±0.61c	17.31±0.50b	18.44±0.22b	25.82±1.54a	25.89±0.95a
	20~30 cm	13.88±0.50b	15.14±0.72a	13.50±0.52b	15.80±0.14a	15.09±0.54a
MBC/MBN	0~10 cm	14.93±1.95a	12.23±0.96b	10.7±0.14bc	10.08±0.66c	12.35±0.14b
	10~20 cm	15.09±0.31a	12.07±0.25c	11.39±0.25d	12.73±0.50b	12.08±0.24c
	20~30 cm	16.90±2.29a	12.64±0.73bc	14.72±0.41bc	12.08±0.34c	13.48±1.02bc

注:同行数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: The different letters peer data of same indicator indicate the significant difference at $P<0.05$.

受生物炭施用量和土壤容重的影响,土壤有机碳密度随生物炭施用量的增加而显著增加(图3B)。在0~10 cm 土层,土壤有机碳密度在生物炭用量为 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时达到最大,比对照显著增加 132.19%;在10~20 cm 和 20~30 cm 土层,土壤有机碳密度均在生物炭用量为 $80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时达到最大,分别比对照显著增加 159.33%和 33.16%。这说明施用生物炭可以明显提高土壤有机碳密度。

施用生物炭也增加了土壤氮密度(图3C),在0~10 cm 土层,土壤氮密度在生物炭用量为 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时达到最大,比对照显著增加 23.60%;在10~20 cm 土层,当生物炭用量为 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时达到最大,比对照显著增加 16.05%;在20~30 cm 土层,当生物炭用量

为 $80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时达到最大,比对照显著增加 22.54%。这说明施用生物炭可以增加土壤氮密度,其增加程度与生物炭施用量和土层深浅有关,即随土层的加深(0~30 cm),生物炭的施用量($20 \sim 80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)越大,土壤氮密度增加越大。

2.5 施用生物炭对土壤有机碳、氮储量的影响

由图4可知,随生物炭施用量的增加,土壤有机碳、氮储量明显增加。当生物炭施用量为 20、40、60、 $80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤有机碳储量分别达到了 41.68、48.92、62.07 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $62.95 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别比对照 B0 高出 37.92%、61.88%、105.39%和 108.31%;土壤氮储量分别达到了 2.58、2.75、2.77、 $2.62 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别较对照 B0 高出 1.05%、14.11%、14.94%和 8.71%。可见,土壤有机碳储量在生物炭施用量为 $80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时达到最大,而土壤氮储量在生物炭施用量为 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时达到最大。

从土壤有机碳储量的垂直分布来看,在0~10 cm 和 10~20 cm 土层(施炭土层),施炭处理的土壤有机碳储量分别占整个测试土层(0~30 cm)的 41.02%~44.01%和 33.21%~38.19%,说明施用生物炭对土壤有机碳储量的贡献较大。随生物炭施用量的增加,土壤氮储量在垂直分布上也有一定的规律,在0~10 cm 和 10~20 cm 土层,施炭处理的土壤氮储量分别占0~30 cm 土层的 31.30%~42.63%和 31.01%~35.50%,说明施用生物炭也对土壤氮储量的增加有贡献。

3 讨论

3.1 生物炭对土壤总有机碳及其碳组分的影响

本研究表明,施用生物炭可以显著提高土壤 TOC、EOC、POC 和 MBC 含量,这与其他学者研究结果一致^[2,9,13];研究还发现,生物炭施用量为 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 或 $80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,以上各碳组分含量达到最大。由前文分析可知,本研究中土壤 TOC 含量随着生物炭施用量增加而显著增加,这是因为生物炭具有碳含量高、芳香化结构复杂和固有的化学惰性特征^[1,20],被认为是惰性碳库,在土壤环境中具有较高的化学和微生物稳定性,其作用大小取决于生物炭的用量和稳定程度^[10]。此外,生物炭的施用可能改变了土壤原有有机质的组成,形成比较稳定的土壤有机质。本试验所施用的生物炭含碳量为 72.38%,施入土壤后显著增加了土壤 TOC 含量,且提高幅度与生物炭施用量呈极显著正相关($P < 0.01$)(表3)。

土壤 EOC 和 MBC 是土壤有机碳的活性组分^[7],

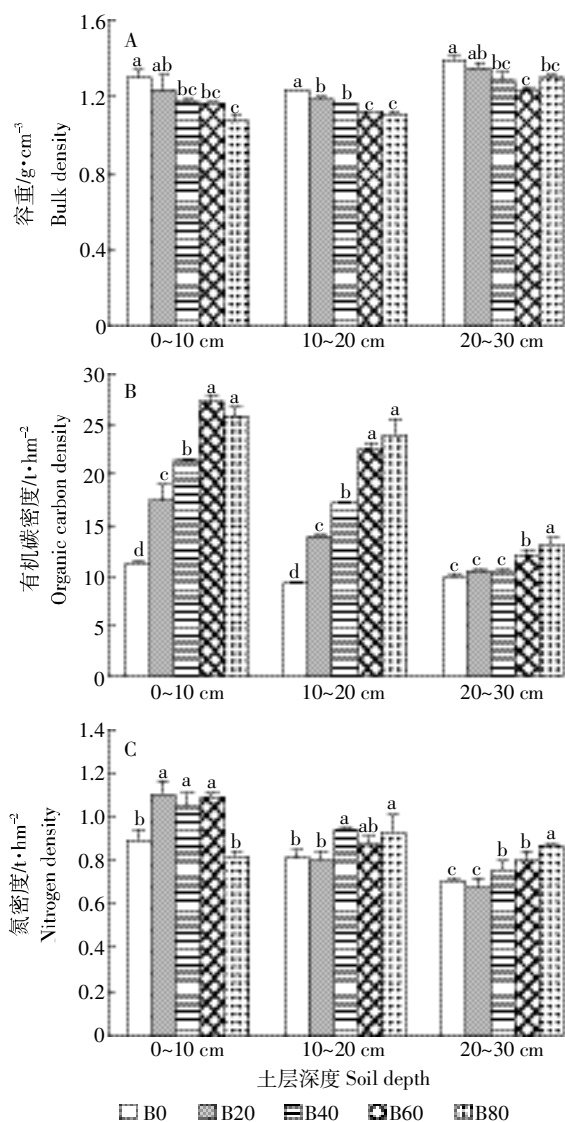


图3 不同生物炭施用量下土壤容重和有机碳、氮密度

Figure 3 Soil bulk density and organic carbon and nitrogen density under different rates of biochar

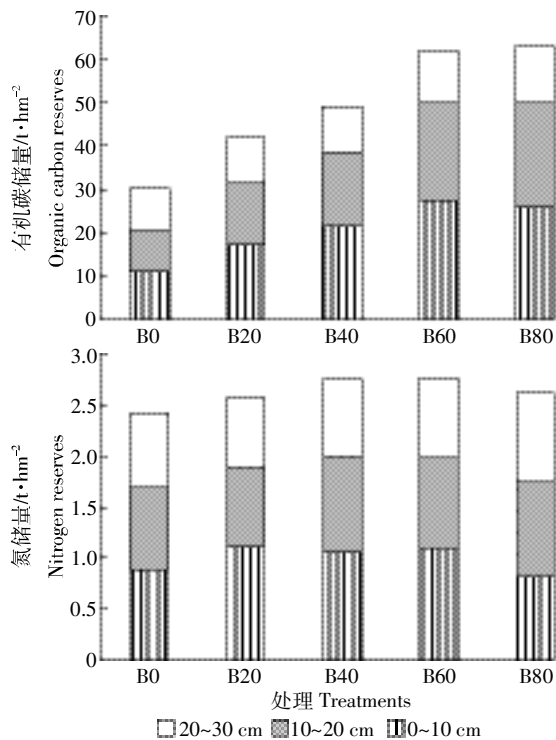


图4 不同生物炭施用量下土壤有机碳、氮储量分布

Figure 4 Distribution of soil organic carbon and nitrogen reserves under different rates of biochar

其来源于植物凋落物的分解、根系分泌物、土壤有机质的水解、土壤微生物本身及其代谢产物^[21]。施用生物炭后,土壤 EOC 和 MBC 含量明显增加。一方面,本研究所施用的生物炭是在 450 °C 条件下热裂解而成,氧化不完全,含有 7.36% 的易氧化有机碳成分;另一方面,适量生物炭的施用,使得土质疏松、通气透光、有利于作物根系的生长,根系分泌物增多,刺激土壤生物活性增强,进而促进了土壤的活性有机成分的增加。此外,生物炭存在特殊的孔隙结构,有利于真菌菌丝的生长和保存^[22],可以为其提供更多的 C 源,为土壤微生物生长提供了良好的生境^[23]。长期下来,会逐渐改变土壤的结构和环境特性,反过来又会影响土壤生物活性^[24],因而在适量的生物炭施用范围内,土壤 EOC 和 MBC 含量明显增加。

Glaser 等^[25]研究表明,生物炭具有与土壤颗粒形

成土壤团聚体和有机无机复合体的功能。本研究所施用的是过 1 mm 筛的细颗粒状生物炭,具有高度稳定性和较强吸附能力,不易被微生物分解,其巨大的孔隙结构和自身含有的营养物质则为植物根系生长和微生物生存提供了良好的场所和生长基质,刺激根系的分泌物增多,有利于土壤和生物炭颗粒的团聚,进而提高了土壤 POC 的含量。由表 3 可知,土壤 EOC、POC 与生物炭施用量呈极显著正相关($P<0.01$)。

3.2 生物炭对土壤全氮及其氮组分的影响

农业土壤氮肥利用率低会造成资源浪费、大气污染、地下水富营养化和增加农业生产成本等问题^[26-27],提高氮肥的利用效率是当前农业和环境研究的热点之一。本研究表明,施用生物炭显著地提高了土壤 TN、AN、NO₃-N 和 MBN 含量,与前人的研究结果基本一致^[11-12,28]。原因是生物炭能为固氮菌提供适宜的生境和丰富的 C 源,刺激固氮细菌活性,有利于固氮菌更好地发挥固氮功效^[29]。高德才等^[12]研究表明,当生物炭添加量达 2% 及以上时,旱地土壤 TN 含量随生物炭添加量的增加而增加,减少了氮素的淋失。本研究中,在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层,土壤 TN 含量分别在生物炭施用量为 60 t·hm⁻² 和 80 t·hm⁻² 时达到最大,且生物炭施用量与土壤 TN 之间满足极显著的正相关关系($P<0.01$)。

研究还发现,在 0~10 cm 土层,土壤 AN 和 NO₃-N 含量均在生物炭用量为 60 t·hm⁻² 时达到最大,在 10~20 cm 土层,土壤 AN 和 NO₃-N 分别在 60 t·hm⁻² 和 80 t·hm⁻² 时达到最大,说明生物炭用量对土壤氮组分含量产生了较大影响。造成这种现象的原因是:一方面,在适量的施炭条件下,生物炭可能会促进土壤有机态氮的矿化,释放出无机态氮^[22];另一方面,生物炭对土壤溶液中的无机氮素具有较强吸附作用,会减少土壤氮素的淋溶和挥发损失^[28],进而增加了土壤 AN 和 NO₃-N 含量;高于 60 t·hm⁻² 的施炭量可能会由于土壤 C/N 过高,引起土壤 AN 的生物固定^[30],拮抗生物炭对土壤 AN 的增加作用。由表 3 可知,NO₃-N 含量与生物炭用量之间呈极显著正相关($P<0.01$),AN 含量与生物炭用量之间呈显著正相关($P<0.05$)。

表3 土壤碳、氮各组分与生物炭用量之间的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficients between soil carbon and nitrogen fractions and biochar rates

指标 Index	TOC	EOC	POC	MBC	TN	AN	NO ₃ -N	MBN
生物炭 Biochar	0.958**	0.702**	0.952**	0.224	0.473**	0.397*	0.890**	0.317

注: * 表示差异达到显著水平($P<0.05$), ** 表示差异达到极显著水平($P<0.01$)。

Note: Correlation coefficients with * and ** indicate significant difference at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

在施炭土层(0~20 cm),土壤 MBN 在生物炭用量为 $40\sim 60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 相对较高。李世清等^[31]通过培养试验表明,在土壤含水率为 6.75%~23.23% 范围内,MBN 与水分呈指数关系。由于生物炭具有较强的保水和持水能力,在一定用量范围内,土壤含水量随生物炭施用量的增加而增加^[32-33];此外,生物炭的施用也增加了土壤微生物活性^[18,23]。因此,在一定的生物炭用量范围内,土壤 MBN 随生物炭施用量的增加而增加。MBN 含量的提高,表明有较多的氮素通过同化作用转入微生物体内暂时固定,从而会比较稳定地储存于耕层土壤中,减少了氮素的损失。

3.3 生物炭对土壤碳、氮储量的影响

土壤有机碳储量随生物炭施用量的增加而显著增加,最主要原因是生物炭富含稳定且难以被微生物分解的有机碳,可以在土壤中长期稳定存在^[34]。土壤氮储量增加的原因是生物炭的施用改善了土壤通气状况,通过抑制氮素微生物的反硝化作用从而减少了 NO_x 的形成和排放^[20];其次,生物炭具有大量的孔隙结构、巨大的比表面积、很强的离子吸附交换能力以及高电荷密度的特性^[1],可以降低氮素的淋失,吸附养分并将养分滞留在土壤里供植物吸收利用^[35];另外,生物炭本身含有一部分氮素,其施用量越大,对土壤氮素的增加越大。可见,在土壤中施用生物炭是一种减少土壤氮素损失、增加氮素截留的有效措施。

本研究中,施用生物炭显著提高了土壤有机碳、氮储量,说明施用生物炭对旱地农田土壤有明显培肥作用,土壤性能向良性状态发展;另一方面,对进一步利用生物炭增加土壤碳截留、提高肥料利用率、减少环境污染具有一定的启示意义。

4 结论

本试验结果表明,在施炭土层(0~10 cm 和 10~20 cm)中,生物炭可以显著提高土壤碳、氮及其相关组分含量,促进土壤碳、氮积累,提高土壤碳、氮储量。除 MBN 外,土壤有机碳、氮各组分含量均在生物炭用量为 $60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 或 $80\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时达到最大。表层以下(20~30 cm)也受到了上层土壤中生物炭的影响,在生物炭施用量较高时,土壤碳、氮各组分含量也明显提高。在整个研究土层中,土壤有机碳储量和氮储量分别在生物炭用量为 $80\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时达到最大。考虑到生物炭的生产价值及成本问题,建议北方旱地农田生物炭施用量为 $60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右。

生物炭与旱地土壤碳、氮的关系在本研究中已经

有了初步的结果,但生物炭促进土壤碳、氮积累的作用机理尚不完善、仍然需要进一步研究。由于本试验土壤局限于壤土,生物炭材料单一,在今后的研究中需要因地制宜,增加生物炭材料的种类,扩大供试土壤的范围。

参考文献:

- [1] 孙红文,张彦峰,张 闻. 生物炭与环境[M]. 北京:化学工业出版社, 2013.
SUN Hong-wen, ZHANG Yan-feng, ZHANG Wen. Biochar and environment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [2] 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.
- [3] 苏永中,赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 220-228.
SU Yong-zhong, ZHAO Ha-lin. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(3): 220-228.
- [4] 邱建军,王立刚,李 虎,等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 154-161.
QIU Jian-jun, WANG Li-gang, LI Hu, et al. Modeling the impacts of soil organic carbon content of croplands on crop yields in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(1): 154-161.
- [5] 柳 敏,宇万太,姜子绍,等. 土壤活性有机碳[J]. 生态学杂志, 2006, 25(11): 1412-1417.
LIU Min, YU Wan-tai, JIANG Zi-shao, et al. A research review on soil active organic carbon[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(11): 1412-1417.
- [6] 王丹丹,周 亮,黄胜奇,等. 耕作方式与秸秆还田对表层土壤活性有机碳组分与产量的短期影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 735-740.
WANG Dan-dan, ZHOU Liang, HUANG Sheng-qi, et al. Short-term effects of tillage practices and wheat-straw returned to the field on top-soil labile organic carbon fractions and yields in central China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4): 735-740.
- [7] 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.
SHEN Hong, CAO Zhi-hong, HU Zheng-yi. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(3): 32-38.
- [8] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
ZHANG Fu-suo, WANG Ji-qing, ZHANG Wei-feng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
- [9] 曾 爱,廖允成,张俊丽,等. 生物炭对壤土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 1009-1015.
ZENG Ai, LIAO Yun-cheng, ZHANG Jun-li, et al. Effects of biochar on soil moisture, organic carbon and available nutrient contents in manural loessial soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 1009-1015.

- [10] Zwieten L V, 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.
- [11] 周桂玉, 窦森, 刘世杰. 生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 2075–2080.
ZHOU Gui-yu, DOU Sen, LIU Shi-jie. The structural characteristics of biochar and its effects on soil available nutrients and humus composition[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10): 2075–2080.
- [12] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 54–61.
GAO De-cai, ZHANG Lei, LIU Qiang, et al. Application of biochar in dry land soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(6): 54–61.
- [13] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2930–2934.
CHEN Hong-xia, DU Zhang-liu, GUO Wei, et al. Effects of biochar amendment on cropland soil bulk density, cation exchange capacity, and particulate organic matter content in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11): 2930–2934.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [15] 李世清, 李生秀. 土壤微生物体氮测定方法的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 75–83.
LI Shi-qing, LI Sheng-xiu. Study on the methods for measuring microbial biomass nitrogen soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(1): 75–83.
- [16] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index, for agricultural systems[J]. *Australia Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459–1466.
- [17] 苏永中, 杨荣, 杨晓, 等. 农业管理措施对新垦荒漠沙地农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(14): 2867–2876.
SU Yong-zhong, YANG Rong, YANG Xiao, et al. Effects of agricultural management practices on soil organic carbon and its fractions in newly cultivated sandy soil in Northwest China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(14): 2867–2876.
- [18] 陈心想, 耿增超, 王森, 等. 施用生物炭后壤土土壤微生物及酶活性变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(4): 751–758.
CHEN Xin-xiang, GENG Zeng-chao, WANG Sen, et al. Effects of biochar amendment on microbial biomass and enzyme activities in loess soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(4): 751–758.
- [19] 董云中, 王永亮, 张建安, 等. 晋西北黄土高原丘陵区不同土地利用方式下土壤碳氮储量[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 955–960.
DONG Yun-zhong, WANG Yong-liang, ZHANG Jian-jie, et al. Soil carbon and nitrogen storage of different land use types in Northwestern Shanxi Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(4): 955–960.
- [20] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2): 395–419.
- [21] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777–783.
- [22] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: An introduction[M]. London: Earthscan, 2009.
- [23] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1812–1836.
- [24] 窦森, 周桂玉, 杨翔宇, 等. 生物质炭及其与土壤腐殖质碳的关系[J]. 土壤学报, 2012, 49(4): 796–802.
DOU Sen, ZHOU Gui-yu, YANG Xiang-yu, et al. Biochar and its relation to humus carbon in soil: A short review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(4): 796–802.
- [25] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35: 219–230.
- [26] Galloway J N, Aber J D, Erisman J W, et al. The nitrogen cascade[J]. *Bioscience*, 2003, 53(4): 341–356.
- [27] Zheng H, Wang Z Y, Deng X, et al. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2013, 206: 32–39.
- [28] Lehmann J, da Silva J P, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soils*, 2003, 249(2): 343–357.
- [29] Thies J E, Rillig M C. Characteristics of biochar: Biological properties[M]. Biochar for Environmental Management: Science and Technology, 2009.
- [30] Deenik J L, Clellan T M, Uehara G. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations[J]. *Soil Fertility and Plant Nutrition*, 2010, 74(4): 1259–1270.
- [31] 李世清, 任书杰, 李生秀. 土壤微生物体氮的季节性变化及其与土壤水分和温度的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 18–23.
LI Shi-qing, REN Shu-jie, LI Sheng-xiu. Seasonal change of soil microbial biomass and the relationship between soil microbial biomass and soil moisture and temperature[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(1): 18–23.
- [32] 高海英, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(24): 207–213.
GAO Hai-ying, HE Xu-sheng, GENG Zeng-chao, et al. Effect of biochar and biochar-based nitrate fertilizers on soil water-holding capacity[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(24): 207–213.
- [33] 王丹丹, 郑纪勇, 颜永毫, 等. 生物炭对宁南山区土壤持水性能影响的定位研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 101–104.
WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, YAN Yong-hao, et al. Effect of biochar application on soil water holding capacity in the southern region of Ningxia[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2): 101–104.
- [34] Matovic D. Biochar as a viable carbon sequestration option: Global and Canadian perspective[J]. *Energy*, 2011, 36(4): 2011–2016.
- [35] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物质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.