

生物质炭改善果园土壤理化性状并促进苹果植株氮素吸收

刘会¹, 朱占玲¹, 彭玲¹, 陈倩¹, 刘相阳², 葛顺峰^{1*}, 姜远茂^{1*}

(1 山东农业大学园艺科学与工程学院/作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018;

2 陕西枫丹百丽生物科技有限公司, 陕西千阳 721100)

摘要:【目的】探究生物质炭对苹果植株生长、土壤理化特性和氮素利用的影响, 为生产上苹果园合理应用生物质炭提供依据。【方法】以两年生红富士/平邑甜茶为试材, 以 400℃ 亚高温热解木材产生的生物质炭为供试肥料, 采用¹⁵N 同位素示踪技术进行了盆栽试验。设底施生物质炭 0、15、30、45 和 60 g/kg, 分别以 CK、T1、T2、T3 和 T4 表示。调查了苹果植株生长发育、土壤理化性质、根际微生物数量及氮素的吸收、利用和损失。【结果】添加生物质炭的所有处理植株株高、茎粗和总干重均显著高于 CK; T2、T3 和 T4 处理的根系活力均显著高于 T1 和 CK 处理, 但三个处理间差异不显著; 随着生物质炭用量的增加, 土壤容重逐渐降低, T3 和 T4 处理的土壤容重分别为 1.22 和 1.20 g/cm³, 两者间差异不显著, 但均显著高于 CK、T1 和 T2 处理; T3 和 T4 处理的土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾和根际土细菌、放线菌、真菌数量均显著高于其他处理, 两者间差异不显著; 与 CK 相比, 添加生物质炭显著增加了植株对肥料¹⁵N 的吸收, T4 和 T3 处理植株¹⁵N 利用率分别为 15.18% 和 15.63%, 均显著高于其他处理; 土壤¹⁵N 残留率以 T4 处理最高, 为 38.16%, T3 次之, T1 最低, 为 30.02%; 氮素损失以 T1 处理最高, 为 58.54%, T4 处理最低, 为 45.66%, 且 T4 与 T3 处理间差异不显著。通过对植株生物量和氮素利用效率与生物质炭施用量进行拟合分析, 两者出现最大值时的生物质炭施用量分别为 64 g/kg 和 55 g/kg。【结论】施用生物质炭降低了土壤容重, 提高了土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量及根际土壤细菌、放线菌和真菌数量, 促进了苹果植株根系和地上部的生长及对肥料氮的吸收, 增加了土壤对氮的固定, 减少了氮的损失, 提高了氮肥利用率, 本试验条件下适宜的生物质炭施用量为 55~64 g/kg 土。

关键词: 生物质炭; 苹果; 植株生长; 土壤养分; 土壤微生物; 氮素利用和损失

Applying biochar to improve soil physical and chemical properties and nitrogen utilization by apple trees

LIU Hui¹, ZHU Zhan-ling¹, PENG Ling¹, CHEN Qian¹, LIU Xiang-yang², GE Shun-feng^{1*}, JIANG Yuan-mao^{1*}

(1 College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018, China; 2 Shaanxi Belle Ferndean Biotechnology Co. Ltd., Qianyang, Shaanxi 721100, China)

Abstract: 【Objectives】The paper investigated the effects of different amounts of biochar on apple growth, soil physical and chemical properties and nitrogen utilization, which would provide a basis for rational application of biomass carbon in apple orchards. 【Methods】Two-year-old apple trees (*Malus domestica* Borkh. 'Red Fuji')/*Malushupehensis* were used as tested materials and biomass carbon produced by pyrolysis of wood under 400℃ was used as fertilizers in a pot experiment. Biochar was applied at rates of 0, 15, 30, 45 and 60 g/kg, which represented as CK, T1, T2, T3, and T4 in turn. Plant and soil samples were collected to investigate apple growth and development, the physical and chemical properties of soil, the population of rhizosphere microorganisms and their effects on nitrogen uptake, utilization and loss using the ¹⁵N trace technique. 【Results】The plant height,

收稿日期: 2017-04-23 接受日期: 2017-07-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0201100); 国家自然科学基金 (31501713); 国家现代农业产业技术体系建设资金 (CARS-27) 资助。

联系方式: 刘会 E-mail: m18364800875@163.com

* 通信作者 葛顺峰 Tel: 0538-8249778, E-mail: geshunfeng210@126.com; 姜远茂 E-mail: ymjiang@sdau.edu.cn

stem diameter and total dry weight of all the treatments which were added biochar were significantly higher than those of CK. The root activities of T2, T3 and T4 were significantly higher than those of T1 and CK, but there were no significant differences between the three treatments. With the increased addition of biomass carbon, soil bulk density was decreased gradually, the soil bulk density of T3 and T4 were 1.22 and 1.20 g/cm³, respectively, and the difference between the two treatments was not significant, but the density was significantly higher than that of CK, T1 and T2. Soil organic matter, alkali hydrolyzable nitrogen, readily available phosphorus, readily available potassium and rhizosphere soil bacteria, actinomycetes and fungi were highest in the T4 treatment, followed by the T3 treatment, the difference was not significant, but were significantly higher than other treatments. Compared with CK, the addition of biochar significantly increased the uptake of fertilizer ¹⁵N, and the ¹⁵N utilization rates of the T4 and T3 treatments were 15.18% and 15.63%, respectively, which were significantly higher than those of other treatments. The residual rate of soil ¹⁵N was highest in T4 (38.2%), followed by T3, and the lowest was T1 (30.0%). The highest nitrogen loss was T1 (58.5%), the lowest was T4 treatment, and the difference between T4 and T3 was not significant. Through the analysis of plant biomass and nitrogen use efficiency and biomass carbon dosage, the maximum amount of biomass carbon was in range of 64–55 g/kg.

【 Conclusions 】 Biochar application decreased soil bulk density, improved the soil nutrient contents and rhizosphere soil bacteria, actinomycetes and fungi, apple plant root and shoot growth and absorption of nitrogen fertilizer, increased the soil nitrogen fixation, reduced nitrogen loss, and improved the utilization rate of nitrogen fertilizer. Under the condition of this experiment, the suitable biomass carbon amount was 55–64 g/kg.

Key words: biochar; apple; plant growth; soil nutrients; soil microorganisms; nitrogen utilization and loss

苹果是我国第一大水果, 2014 年中国苹果种植面积和产量分别为 227 万公顷和 4092 万吨, 分别占世界苹果面积和产量的 50% 以上, 苹果产业已经成为果区农民增收的重要支柱产业。为获得最大经济产量, 化肥过量使用现象普遍发生, 其中纯氮施用量已高达 400~600 kg/hm²^[1]。但是, 我国苹果园立地条件较差, 土壤有机碳含量较低, 保肥能力较差, 肥料的过量施用不仅造成了资源浪费, 而且也导致了树体生理紊乱和生理性病害加重、水体富营养化、土壤有益微生物数量减少、土壤结构和根系环境遭到破坏, 严重影响果园土壤生态系统的稳定性及其功能的发挥^[2-5]。因此, 提高苹果园土壤有机碳含量, 增强土壤保肥能力, 进而提高氮肥利用效率, 对于减少氮肥用量和保护生态环境具有重要意义。

近年来生物质炭成为农业、环境修复、能源利用等领域的研究热点^[6-7]。生物质炭是指动植物残体或其他生物质在完全或部分缺氧的情况下, 以及相对较低的温度 (< 700℃) 下经热解炭化产生的一类富炭物质, 具有比表面积大、孔隙度好、吸附能力强的特点^[8]。大量研究表明, 生物质炭可以改善土壤理化性状, 提高土壤保肥保水性能, 改善土壤养分状况, 优化根系和土壤微生物生长环境, 增加有益微生物数量, 进而增加作物对养分的吸收^[9-11]。但是, 生物质炭的增产、提高养分利用率的作用有一定的

适用范围, 施用生物质炭量过高或过低时, 作物产量和养分利用率都有降低的可能, 如李程等^[12]发现, 生物质炭施用量为 10 g/kg 时, 增加了黑麦草生物量, 同时改善土壤理化性质, 为植株提供营养元素和良好的生长环境, 并提高了土壤碳库; 薛超群等^[13]在烤烟上的研究也表明, 适量生物质炭 (600 kg/hm²) 促进作物生长和增产, 而高用量 (900 kg/hm²) 会降低作物生物量及产量。可见, 生物质炭在不同作物上的最佳施用量不同。目前, 关于生物质炭的研究大多集中在大田粮食作物上, 且主要研究了生物质炭对土壤理化性状和作物产量的影响^[12, 14-16], 而关于生物质炭在苹果园的应用以及其对肥料氮在苹果植株-土壤体系中平衡的研究不足。本文以 2 年生红富士苹果/平邑甜茶为试材, 研究不同生物质炭用量对植株生长发育、土壤理化性质、根际微生物数量的影响, 并结合同位素示踪技术, 研究了其对氮素吸收、利用和损失的影响, 以为苹果生产中合理的生物质炭用量提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2016 年 3—10 月在山东农业大学园艺实验站防雨棚进行, 试材为 2 年生红富士 (*Malus domestica* Borkh. cv. Red Fuji)/平邑甜茶 (*Malus*

hupehensis), 供试生物质炭是由陕西枫丹百丽生物科技有限公司提供, 生物质炭为 400℃ 亚高温热解的木材, 基本性质为有机炭 286.32 g/kg, 全氮 4.16 g/kg, 全磷 0.65 g/kg, 全钾 10.37 g/kg。供试土壤为壤土, 土壤有机质 14.11 g/kg, 全氮 0.82 g/kg, 碱解氮 150.77 mg/kg, 有效磷 37.73 mg/kg, 速效钾 233.14 mg/kg。

试验采用普通陶盆, 每盆装风干土 10 kg。试验设 5 个处理, 生物质炭添加量分别为 0、15、30、45、60 g/kg, 搅拌均匀后装盆, 依次记录为 CK、T1、T2、T3、T4。一个月后 (2016 年 3 月 26 日), 选取长势基本一致、无病虫害的富士/平邑甜茶移栽入盆中, 待长势平稳后 (2016 年 5 月 1 号), 每个处理选取长势基本一致的 4 盆进行试验, 每盆施入 ¹⁵N-尿素 2.0 g, 普通尿素 5.0 g, 硫酸钾 4.6 g, 过磷酸钙 9.0 g, 各处理生长条件和栽培管理均保持一致, 于 10 月初进行破坏性采样。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 植株生长指标 植株茎粗测定距地表 10 cm 处的树干直径; 选取 3~5 个当年生新梢, 测定所有叶片的总面积, 叶面积用台式扫描仪 (国产 NUScan700) 扫描, 并用图像分析软件 Delta-T SCAN (Delta-T Devices LTD, Cambridge, U.K.) 计算叶面积。

1.2.2 根系总表面积和活力 植株根系经清水冲洗后, 用专业版 WinRH IZO (2007 年版) 根系分析系统获取根系扫描图像, 并用图像分析软件 Delta-T SCAN (Delta-T Devices LTD, Cambridge, U.K.) 分析根总表面积; 根系活力用氯化三苯基四氮唑 (TTC) 还原法测定。

1.2.3 根际土壤可培养微生物数量 采用稀释平板计数法测定根际土壤中微生物数量, 细菌、放线菌和真菌分别采用牛肉膏蛋白胨培养基、改良高氏 I 号培

养基和马丁氏培养基进行各微生物类群的培养、分离与计数。

1.2.4 土壤理化性质的测定 土壤容重用不锈钢环刀 (高 5 cm、直径 5 cm) 采集原状土样, 烘干法测定; 土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾分别采用重铬酸钾容量法、碱解扩散吸收法、钼蓝比色法和火焰光度法进行测定。

1.3 数据计算与统计

土壤容重 = [环刀土壤质量 (g) - 环刀质量 (g)] / 环刀体积 (cm³);

Ndff (%) = (植物样品中 ¹⁵N 丰度 - ¹⁵N 自然丰度) / (肥料中 ¹⁵N 丰度 - ¹⁵N 自然丰度) × 100;

氮肥分配率 = 各器官从氮肥中吸收的氮量 (g) / 总吸收氮量 (g) × 100%;

氮肥利用率 = [Ndff × 器官全氮量 (g)] / 施肥量 (g) × 100%。

土层全氮量 (g) = 土壤质量 (g) × 全氮 (%); 氮肥残留率 (%) = Ndff × 土层全氮量 / 施肥量 (g) × 100;

氮肥损失率 = 100% - 氮肥利用率 - 氮肥残留率。

试验数据统计应用 Microsoft Excel 2003 软件进行图表绘制, 应用 DPS 7.05 软件进行数据的统计分析, 采用单因素方差分析和差异性分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对苹果植株生长发育和根系形态及活力的影响

由表 1 可见, 不同处理植株的株高、茎粗与总干重的高低顺序均为: T4 > T3 > T2 > T1 > CK。T4 和 T3 处理株高显著高于 T2 和 T1; T4、T3 和 T2 处理间茎粗无显著差异, 但均显著高于 T1 和 CK, T1 和 CK 处理茎粗差异不显著; T4 和 T3 处理

表 1 不同处理苹果植株生长发育和根系活力

Table 1 Growth development and root activity of apple trees

处理 Treatment	株高 (cm) Height	茎粗 (cm) Stem diameter	总干重 (g) Total dry weight	根系活力 [μg/(g·h)] Root activity	根表面积 (cm ²) Root surface area
CK	126 ± 2 c	1.78 ± 0.04 b	146.67 ± 11.08 c	54.41 ± 2.23 c	469.89 ± 25.56 d
T1	130.34 ± 1.58 b	1.80 ± 0.07 b	149.69 ± 12.81 c	65.86 ± 2.82 b	557.99 ± 31.86 c
T2	131.66 ± 4.16 b	1.88 ± 0.01 a	170.33 ± 14.02 b	79.30 ± 2.49 a	599.92 ± 19.52 b
T3	140.67 ± 2.53 a	1.90 ± 0.07 a	190.83 ± 11.53 a	82.78 ± 1.52 a	669.63 ± 4.81 a
T4	141.67 ± 4.08 a	1.91 ± 0.06 a	192.67 ± 9.57 a	84.74 ± 3.74 a	682.22 ± 33.98 a

注 (Note): 同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平显著差异 Values followed by different letters in the same column indicate significant difference at the 0.05 level.

总干重显著高于其他处理; T4、T3 和 T2 处理间根系活力无显著差异, 但均显著高于 T1 和 CK 处理; T4 和 T3 处理间根系表面积差异不显著, 但均显著高于其他处理。

2.2 不同处理对土壤理化性质的影响

施用生物质炭显著降低了土壤容重, 增加了土壤有机质、碱解氮、速效养分含量 (表 2)。T4 和 T3 处理间的土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量差异不显著, 但均显著高于 T2、T1 和 CK。T4 处理土壤容重最低, 为 1.20 g/cm^3 , 其次是 T3 处理 (1.22 g/cm^3), 两者间差异不显著, 但均显著低于 T2 和 T1, T1 和 CK 间差异不显著。

2.3 不同处理对苹果植株根际可培养微生物数量的影响

由表 3 可见, 施用生物质炭的各处理根际土壤中细菌、放线菌、真菌的数量显著大于未施生物质炭的 CK。根际土壤中的微生物均以细菌居优势 ($62.33 \times 10^6 \sim 251.33 \times 10^6 \text{ CFU/g}$), 放线菌次之 ($39.24 \times 10^5 \sim 128.51 \times 10^5 \text{ CFU/g}$), 真菌最少 ($13.05 \times 10^3 \sim 32.32 \times 10^3 \text{ CFU/g}$)。根际土壤细菌、放线菌、

真菌数量均以 T3 和 T4 处理最高。

2.4 不同处理对氮素吸收、土壤残留和损失的影响

由表 4 可见, 不同处理显著影响植株对¹⁵N 的吸收利用, T4、T3、T2、T1 和 CK 处理的氮素利用率分别为 15.63%、15.18%、13.87%、11.44% 和 9.45%; 土壤中的¹⁵N 残留率, 以 T4 处理最高, 为 38.16%, T3 次之, 为 38.05%, T1 处理最低, 仅为 30.02%; 4 个施用生物质炭处理的氮素损失率显著低于不施生物质炭的对照, T4、T3、T2、T1 和 CK 处理氮素损失率分别为 46.21%、46.77%、48.78%、58.54% 和 65.88%。可见, 施用生物质炭可以显著降低氮素损失率, 以 T4 处理效果最好。

2.5 适宜生物质炭用量的确定

植株生物量和氮素利用效率是评价植株生长和氮素利用特性的重要指标。为确定本试验条件下的适宜生物质炭用量, 我们将这两个指标与生物质炭用量进行了拟合分析。由图 1 可见, 植株生物量和氮素利用效率与生物质炭用量的关系呈抛物线状, 即随着生物质炭用量的升高, 这两个指标均呈先上

表 2 不同处理土壤的理化性状

Table 2 Soil physical and chemical properties under different treatments

处理 Treatment	碱解氮 (mg/kg) Alkali-hydrolysable N	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K	有机质 (g/kg) Organic matter	土壤容重 (g/cm ³) Soil bulk density
CK	155.86 ± 0.068 c	35.40 ± 1.08 c	238.35 ± 19.97 d	12.27 ± 1.51 d	1.34 a
T1	157.02 ± 0.087 c	39.58 ± 1.46 b	258.02 ± 14.97 c	16.23 ± 1.67 c	1.33 a
T2	166.22 ± 0.09 b	41.70 ± 1.16 b	289.12 ± 15 b	20.11 ± 2.48 b	1.28 b
T3	173.51 ± 0.11 a	46.45 ± 0.85 a	318.43 ± 17.09 a	25.43 ± 1.67 a	1.22 c
T4	175.33 ± 0.150 a	48.30 ± 1.96 a	327.72 ± 20.68 a	26.21 ± 1.59 a	1.20 c

注 (Note): 同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平显著差异 Values followed by different letters in the same column indicate significant differences at the 0.05 level.

表 3 不同处理对根际土壤微生物数量 (CFU/g) 的影响

Table 3 Effects of different treatments on rhizosphere soil microbial quantity

处理 Treatment	细菌 (× 10 ⁶) Bacteria	真菌 (× 10 ³) Fungi	放线菌 (× 10 ⁵) Actinomycetes
CK	62.33 ± 13.79 d	13.05 ± 1.73 d	39.24 ± 3.21 c
T1	116.01 ± 8.72 c	14.53 ± 0.58 d	45.33 ± 5.51 c
T2	160.67 ± 13.79 b	19.33 ± 1.15 c	77.34 ± 3.61 b
T3	239.35 ± 14.81 a	26.21 ± 1.28 b	126.67 ± 9.53 a
T4	251.33 ± 20.53 a	32.32 ± 2.18 a	128.51 ± 18.21 a

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著 Values followed by different letters in the same column indicate significant differences at the 0.05 level.

表 4 不同处理氮素的吸收、残留和损失 (%)

Table 4 Effects of different treatments on nitrogen uptake, nitrogen residue and loss

处理 Treatment	¹⁵ N 利用率 ¹⁵ N use efficiency	残留率 Residual rate	损失率 Loss rate
CK	9.45 ± 0.36 d	24.67 ± 0.57 c	65.88 a
T1	11.44 ± 0.47 c	30.02 ± 0.67 b	58.54 b
T2	13.87 ± 0.51 b	37.35 ± 0.56 a	48.78 c
T3	15.18 ± 0.36 a	38.05 ± 0.81 a	46.77 c
T4	15.63 ± 0.28 a	38.16 ± 1.21 a	46.21 c

注 (Note): 同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平显著差异 Values followed by different letters in the same column indicate significant differences at the 0.05 level.

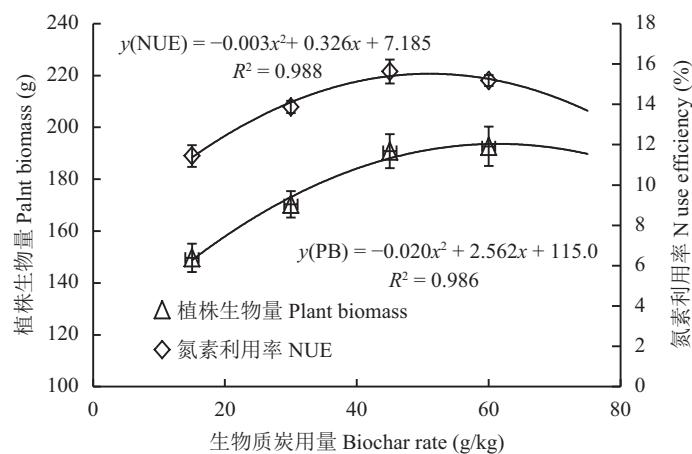


图 1 植株生物量、氮素利用效率与生物质炭用量的关系

Fig. 1 Relation between biochar input and plant biomass and nitrogen utilization efficiency (NUE)

升后下降的变化趋势。通过计算, 植株生物量和氮素利用效率出现最大值时的生物质炭用量分别为 64 g/kg 和 55 g/kg。因此, 综合考虑这两个指标, 本试验条件下富士苹果生长发育适宜的生物质炭用量为 55~64 g/kg。

3 结论与讨论

本研究发现, 添加生物质炭显著增加了苹果植株的株高和干重。结合生物质炭对土壤养分、微生物数量和物理性质的影响来看, 生物质炭对植株生长的促进作用主要基于以下两方面: 一方面, 生物质炭施入土壤后, 显著提高了土壤速效养分含量, 这是因为添加生物质炭后根际土壤微生物数量显著提高, 从而间接地提高了土壤养分的有效性^[6]; 同时, 生物质炭的多孔性和比表面积较大的特性有利于减少土壤中速效养分的随水淋失; 另外, 生物质炭灰分中水溶性矿质元素的存在, 也可以直接提高土壤中的速效养分含量^[17]。翟勇等^[18]在棉花上的研究

也表明在一定生物质炭用量范围内, 施用生物质炭显著提高了土壤速效养分含量, 且植株对氮、磷、钾的吸收量随着生物质炭用量的增加而增加。另一方面, 施用生物质炭后, 土壤容重降低了 0.06~0.11 g/cm³, 显著改善了土壤透气性, 为根系的生长发育创造了适宜的条件, 有利于增强根系活力, 促进根表面积增加, 从而促进了地上部器官的生长^[19], 这与 Chen 等^[20]和 Laird 等^[21]的研究结果一致。但是, 当生物炭施入量过多时, 会导致土壤容重过低, 过松的土壤使植物根系难以扎稳, 保水能力差, 土壤养分也易随水流失^[22], 这可能也是本实验条件下随着生物质炭用量越来越高, 其对植株生长的促进作用越来越小的原因之一。由于本研究所设生物质炭用量梯度的限制, 植株生物量在最大生物质炭用量处理时仍表现为最大, 但其促进作用已不显著, 进一步对植株生物量与生物质炭施用量进行拟合分析, 发现植株生物量出现最大值时的生物质炭施用量为 64 g/kg, 超过此用量后会抑制植株生长。

施用生物质炭后, 生物质炭特殊的多孔性和表面积特性为微生物提供良好的栖息环境, 为其提供附着载体, 减少了微生物间的生存竞争, 保护土壤有益微生物数量, 同时为微生物提供碳源、能量和矿物质营养, 使它们更好地生存和繁衍, 也为微生物生长提供了有利条件^[23-24]。因此, 生物质炭使土壤中细菌、真菌等繁殖率与活性也有明显提高, Kolb 等^[25]也发现施入生物质炭后, 土壤有益微生物数量显著提高, 与本实验的结果一致。

本研究表明, 添加生物质炭显著增加氮素利用率, 同时也显著增加了耕层土壤的氮素残留量, 相应地降低了氮素向深层土壤的淋失风险, 氮素损失显著减少, 主要原因在于施用生物质炭后, 一方面提高了土壤对氮的吸附, 降低了土壤液相中铵态氮含量, 进而抑制了氨挥发^[26]; 另一方面, 施用生物质炭后促进了土壤微生物的活动能力, 提高其活性, 过量而不能被根系吸收的氮素可被同化到微生物体内转化为较稳定的有机含氮物, 从而有效降低了氮的气态和深层淋溶损失^[27-28]。有试验表明, 生物质炭施用量过高时, 土壤中的微生物大量繁殖, 而微生物的大量繁殖需要消耗一部分氮素, 就会出现微生物与植株共同竞争土壤中的氮素, 影响植株的生长和根系对养分的吸收^[29]。因此, 适量的生物质炭能够限制土壤微生物的活动能力, 降低有机碳和有机氮的分解矿化速度, 有利于土壤有机碳的固存, 同时也不至于使土壤微生物对施入氮素的“固持”强度太高, 有利于充分发挥肥料氮的有效性, 促进植株对肥料氮的吸收利用^[30]。

综合生物质炭对苹果植株生长及氮素利用状况的影响来看, 生物质炭施用量显著影响了植株生长和氮素吸收。对植株生物量和氮素利用效率与生物质炭施用量进行拟合分析, 发现两者出现最大值时的生物质炭施用量分别为 64 g/kg 和 55 g/kg。因此, 综合考虑这两个指标, 得出本试验条件下适宜的生物质炭施用量为 55~64 g/kg。在此范围内, 植株生物量和氮素利用率均维持在较高的水平, 且变化较小, 说明该范围内的生物炭用量既能促进植株的生长发育, 又可以获得较高的氮素利用率。另外, 本试验所采用的土壤质地为壤土, 而不同类型的土壤由于其自身通气性及持水保肥能力的不同也会影响植株对施用生物质炭的反应, 比如沙土的通气性较好, 但保水保肥能力较弱, 因此可能就需要添加较多的生物质炭为根系创造最优的生长空间。同时, 本试验是在盆栽条件下进行的, 由于空间的局限会

影响根系的生长, 因此大田条件下苹果植株对生物质炭施用量的反应仍需进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] 彭福田, 姜远茂. 不同产量水平苹果园氮磷钾营养特点研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(2): 361-367.
Peng F T, Jiang Y M. Characteristics of N P and K nutrition in different yield level apple orchards[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(2): 361-367.
- [2] 侯云鹏, 秦裕波, 尹彩侠, 等. 生物有机肥在农业生产中的作用及发展趋势[J]. 吉林农业科学, 2009, 34(3): 28-29.
Hou Y P, Qin Y B, Yin C X, et al. The role of bio-organic fertilizer in agricultural production and its developing trends[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2009, 34(3): 28-29.
- [3] 张余莽, 周海军, 张景野, 等. 生物有机肥的研究进展[J]. 吉林农业科学, 2010, 35(3): 37-40.
Zhang Y M, Zhou H J, Zhang J Y, et al. Progress of studies of bio-organic fertilizer[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2010, 35(3): 37-40.
- [4] 葛顺峰, 姜远茂, 陈倩, 等. 土壤有机质含量对平邑甜茶生长及氮素吸收和损失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 26(1): 81-84.
Ge S F, Jiang Y M, Chen Q, et al. Effect of soil organic matter content on growth and ¹⁵N-urea absorption, utilization and loss of *malus hupehensis*[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 26(1): 81-84.
- [5] 葛顺峰, 彭玲, 任饴华, 等. 秸秆和生物质炭对苹果园土壤容重、阳离子交换量和氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 366-373.
Ge S F, Peng L, Ren Y H, et al. Effect of straw and biochar on soil bulk density, cation exchange capacity and nitrogen absorption in apple orchard soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2): 366-373.
- [6] 丁艳丽, 刘杰, 王莹莹. 生物炭对农田土壤微生物生态的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3311-3317.
Ding Y L, Liu J, Wang Y Y. Effects of biochar on microbial ecology in agriculture soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(11): 3311-3317.
- [7] 姚玲丹, 程广煊, 王丽晓, 等. 施用生物炭对土壤微生物的影响[J]. 环境化学, 2015, 34(4): 697-704.
Yao L D, Cheng G H, Wang L X, et al. Effects of biochar application to microorganisms in soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(4): 697-704.
- [8] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1): 117-128.
- [9] Germano, Gomescannavan M, Souzamedes F D, et al. Functional diversity of bacterial genes associated with aromatic hydrocarbon degradation in anthropogenic dark earth of Amazonia[J]. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 2012, 47(5): 654-664.
- [10] 杨放, 李心清, 王兵, 等. 生物炭在农业增产和污染治理中的应用[J]. 地球与环境, 2012, 40(1): 100-107.
Yang F, Li X Q, Wang B, et al. The application of biochar to improving agricultural production and pollution abatement[J]. *Earth*

- and Environment, 2012, 40(1): 100–107.
- [11] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 68–79.
Wu Y, Xu G, Lü Y C, *et al.* Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: current status and knowledge gaps[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(1): 68–79.
- [12] 李程, 李小平. 生物质炭制备及不同施用量对土壤碳库和植物生长的影响[J]. 南方农业学报, 2015, 46(10): 1786–1791.
Li C, Li X P. Effect of biochar preparation and its application amount on soil carbon pool and plant growth[J]. Journal of Southern Agriculture, 2015, 46(10): 1786–1791.
- [13] 薛超群, 杨立均, 王建伟. 生物质炭用量对烤烟烟叶净光合速率和香味物质含量的影响[J]. 烟草科技, 2015, 48(5): 19–22.
Xue C Q, Yang L J, Wang J W. Effects of biochar application rate on net photosynthetic rate and aroma component content of flue-cured tobacco leaves[J]. Tobacco Science & Technology, 2015, 48(5): 19–22.
- [14] 何绪生, 张树清, 余雕, 等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(15): 16–25.
He X S, Zhang S Q, She D, *et al.* Effects of biochar on soil and fertilizer and future research[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(15): 16–25.
- [15] 张斌, 刘晓雨, 潘根兴, 等. 施用生物质炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4844–4853.
Zhang B, Liu X Y, Pan G X, *et al.* Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(23): 4844–4853.
- [16] 张爱平, 刘汝亮, 高霁, 等. 生物炭对宁夏引黄灌区水稻产量及氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1352–1360.
Zhang A P, Liu R L, Gao J, *et al.* Effects of biochar on rice yield and nitrogen use efficiency in the Ningxia Yellow River Irrigation region[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(5): 1352–1360.
- [17] Xu G, Wei L L, Sun J N, *et al.* What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: Direct or indirect mechanism?[J]. Ecological Engineering, 2013, 52(2): 119–124.
- [18] 翟勇, 苏倩, 许文霞, 等. 不同施磷水平下生物质炭用量对土壤磷素状况及棉花养分吸收的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(6): 1464–1470.
Zhai Y, Su Q, Xu W X, *et al.* Effects of biochar content on soil phosphorus and cotton nutrient uptake[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(6): 1464–1470.
- [19] 葛顺峰, 周乐, 门永阁, 等. 添加不同炭源对苹果园土壤氮磷淋溶损失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 31–35.
Ge S F, Zhou L, Men Y G, *et al.* Effect of carbon application on nitrogen and phosphorus leaching in apple orchard soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2): 31–35.
- [20] Chen Y, Shinogi Y, Taira M, *et al.* Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality[J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48(7): 526–530.
- [21] Laird D A, Fleming P, Davis D D, *et al.* Impact of biochar amendments on the quality of a typical midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3–4): 443–449.
- [22] 吴崇书, 邱志腾, 章明奎. 施用生物质炭对不同类型土壤物理性状的影响[J]. 浙江农业科学, 2014, (10): 1617–1619.
Wu C S, Qiu Z T, Zhang M K. Effects of biochar application on soil physical properties[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2014, (10): 1617–1619.
- [23] Pietikäinen J, Kiikkilä O, Fritze H. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus[J]. Oikos, 2000, 89(2): 231–242.
- [24] Farrell M, Kuhn T K, Macdonald L M, *et al.* Microbial utilization of biochar-derived carbon[J]. Science of the Total Environment, 2013, 465(6): 288–297.
- [25] Kolb S E, Fermanich K J, Dornbush M E. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(4): 1173–1181.
- [26] 葛顺峰, 姜远茂, 彭福田, 等. 春季有机肥和化肥配施对苹果园土壤氨挥发影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 199–203.
Ge S F, Jiang Y M, Peng F T, *et al.* Effect of chemical fertilizers application combined with organic manure on ammonia volatilization in spring in apple orchard[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 199–203.
- [27] 胡诚, 曹志平, 罗艳蕊, 等. 长期施用生物有机肥对土壤肥力及微生物生物量碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 48–51.
Hu C, Cao Z P, Luo Y L, *et al.* Effect of long-term application of microorganismic compost or vermin compost on soil fertility and microbial biomass carbon[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(3): 48–51.
- [28] 葛顺峰, 姜远茂, 魏绍冲, 等. 不同供氮水平下幼龄苹果园氮素去向初探[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 950–956.
Ge S F, Jiang Y M, Wei S C, *et al.* Nitrogen balance under different nitrogen application rates in young apple orchards[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 950–956.
- [29] 刘畅, 唐国勇, 童成立, 等. 不同施肥措施下亚热带稻田土壤碳、氮演变特征及其耦合关系[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1489–1493.
Liu C, Tang G Y, Tong C L, *et al.* Evolution characteristics and coupling relationship of soil organic carbon and total nitrogen in subtropical paddy field ecosystem under different fertilization practices[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(7): 1489–1493.
- [30] Schipper L A, Sparling G P. Accumulation of soil organic C and change in C:N ratio after establishment of pastures on reverted scrub and in New Zealand[J]. Biogeochemistry, 2011, 104(1/3): 49–58.