

生物炭添加对设施茄子磷吸收及利用率的影响

陈新¹, 徐欣¹, 曲红云², 陈一民³, 隋跃宇³, 焦晓光^{1,4*} (1. 黑龙江大学现代农业与生态环境学院, 黑龙江哈尔滨 150080; 2. 黑龙江省农业科学院园艺分院, 黑龙江哈尔滨 150069; 3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土区农业生态重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150081; 4. 东北农业大学寒地黑土利用与保护重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150030)

摘要 以设施茄子为研究对象, 探究生物炭添加对设施茄子磷吸收及产量的影响, 选取常规水肥处理(WF)、常规水肥+生物炭(WFB)以及减水减肥+生物炭(80%W80%FB)处理, 分析添加生物炭对茄子磷吸收量及利用率的影响。结果表明, 与常规水肥处理相比, 常规水肥+生物炭处理产量为 54.88 t/hm², 增加 4.28% ($P<0.05$), 茄子磷的吸收量为 13.99 kg/hm², 增加 11.74% ($P<0.05$), 磷的吸收效率、利用效率和偏生产力分别增加 11.80% ($P<0.05$)、160.83 kg/kg ($P<0.05$) 和 4.28% ($P>0.05$); 减水减肥+生物炭处理产量为 52.79 t/hm², 增加 0.30% ($P>0.05$), 茄子磷的吸收量为 13.73 kg/hm², 增加 9.58% ($P>0.05$), 磷的吸收效率、利用效率和偏生产力分别增加 9.67% ($P>0.05$)、11.66 kg/kg ($P>0.05$) 和 25.38% ($P<0.05$)。综上所述, 施加生物炭可以促进植株对磷的吸收利用、增加作物产量、减少土壤中的肥料残留。

关键词 生物炭; 设施茄子; 磷吸收; 利用率; 产量

中图分类号 S641.1 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2020)19-0149-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.19.040



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effect of Biochar Addition on the Phosphorus Absorption and Yield of Eggplant in Facility Vegetable Fields

CHEN Xin¹, XU Xin¹, QU Hong-yun² et al (1. College of Modern Agriculture and Eco-Environment, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080; 2. Institute of Horticulture, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin, Heilongjiang 150069)

Abstract Taking eggplant in facility vegetable field as the research object, effects of biochar addition on phosphorus absorption and yield of eggplant were explored. Regular irrigation and fertilizer treatment (WF), regular irrigation and fertilizer + biochar (WFB), and reducing irrigation and reducing fertilizer + biochar (80%W80%FB) were selected and then effects of biochar addition on phosphorus absorption and utilization efficiency were analyzed. The results showed that in the regular irrigation and fertilizer + biochar treatment, yield was 54.88 t/hm², which increased by 4.28% ($P<0.05$) compared to that in the regular irrigation and fertilizer treatment; the absorption of phosphorus in eggplant was 13.99 kg/hm², which increased by 11.74% compared to the regular irrigation and fertilizer treatment ($P<0.05$); the absorption efficiency, utilization efficiency and partial productivity of phosphorus increased by 11.80% ($P<0.05$), 160.83 kg/kg ($P<0.05$), and 4.28% ($P>0.05$), respectively. In reducing irrigation and reducing fertilizer + biochar treatment, yield was 52.79 t/hm², which increased by 0.30% ($P>0.05$) compared to the irregular irrigation and fertilizer treatment; the phosphorus absorption of eggplant was 13.73 kg/hm², which was an increase of 9.58% ($P>0.05$) compared to the regular irrigation and fertilizer treatment; the absorption efficiency, utilization efficiency and partial productivity of phosphorus increased by 9.67% ($P>0.05$), 11.66 kg/kg ($P>0.05$), and 25.38% ($P<0.05$), respectively. In summary, the application of biochar in the facility eggplant field could promote the absorption and utilization of phosphorus by plants, increase vegetable yields and reduce fertilizer residues in soil.

Key words Biochar; Eggplant in facility vegetable field; Phosphorus absorption; Utilization rate; Yield

随着我国农业的发展, 以蔬菜为主体的设施园艺在农业经济方面贡献越来越大^[1], 我国的设施园艺面积占世界总面积的 85% 以上, 一直稳居世界第一, 其中蔬菜和西(甜)瓜种植面积占世界总面积的 90% 以上, 年人均供应量近 200 kg^[2]; 同时由于设施园艺的发展还创造了近 7 000 万个就业岗位, 大大提高了乡村居民人均收入^[3]。设施园艺在种植过程中为了追求更高的经济收益, 肥料大量投入和盲目灌溉等现象普遍存在, 造成未能被植株吸收的养分, 在土壤中大量损失^[4-5], 并通过土壤间隙向下迁移^[6], 流失进入到水体中^[7], 加剧农业面源污染和水体富营养化^[8], 极大地危害了生态环境。磷素是作物生长过程中必不可少的营养元素之一, 影响茄子的生理生化过程, 促进植株的生长发育^[9], 所以

磷肥的施用量一直普遍偏高^[10-11], 使得磷肥的当季利用率一般只有 10%~25%^[12]。设施菜田肥料对环境造成的污染是目前设施菜田面临的严峻挑战。

生物炭是由秸秆等废弃有机物在缺氧条件下通过低温热解产生的一种有机质含量丰富的固态物质^[13], 具有孔隙度大、含水量充足、保持土壤养分等特点, 能增加根系对土壤中营养物质的吸收面积, 在提高植株养分吸收能力和促进作物生长发育方面发挥重要作用^[14-15]。研究表明施用生物炭可以显著提高茄子的产量^[15-17]。生物炭还具有极强的吸附性^[18], 可以作为一种新型的土壤改良剂, 固定土壤中的有机物^[19-20], 降低土壤中氮、磷的流失和淋失^[21]。但也有研究表明施加生物炭对作物增产效应不明显甚至减产^[22]。虽然土壤中施加生物炭能够提高作物产量, 减少土壤中养分的残留, 但目前关于生物炭在东北黑土区设施园艺栽培应用等方面的研究较少, 笔者以此为切入点, 探究了生物炭添加对设施茄子产量、植株磷吸收量和磷肥利用率的影响, 旨在为生物炭在东北地区设施茄子生产中应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 试验在黑龙江省农业科学院园艺分院

基金项目 国家科技部重点研发计划项目“农田氮磷淋溶损失污染与防控机制研究”(2016YFD0800100); 东北农业大学寒地黑土利用与保护重点实验室项目“不同水肥管理对设施菜田黑土氮淋溶的影响”。

作者简介 陈新(1993—), 男, 河北承德人, 硕士研究生, 研究方向: 植物营养。* 通信作者, 教授, 博士, 从事土壤生态与植物营养方面的研究。

收稿日期 2020-05-08; **修回日期** 2020-06-06

(126°39'E,45°37'N)内进行,每栋设施大棚的面积为 324 m² (27 m×12 m),每个小区面积为 18 m² (6 m×3 m)。茄子种植垄距为 1 m,垄间距为 0.5 m,每垄种植 2 行,品种为龙杂 201,土壤为草甸黑土,供试土壤基本理化性质见表 1^[23]。

表 1 设施黑土壤基本理化性质(2016 年)

Table 1 Soil physicochemical properties in a facility vegetable field of black soil region(2016)

深度 Depth cm	有机碳 SOC g/kg	全氮 TN g/kg	全磷 TP g/kg	pH (水:土 = 2.5:1)	容重 Bulk density g/cm ³
0~20	26.9	2.5	2.1	6.93	1.07
20~40	18.3	1.7	1.1	6.45	1.28
40~60	14.8	1.3	0.6	6.80	1.25
60~80	9.8	0.9	0.4	6.85	1.33
80~100	9.6	0.8	0.6	6.75	1.41

1.2 试验设计 共设置常规水肥处理(CK)、常规水肥+生物炭(WFB)和减水减肥+生物炭(80%W80%FB)3 个处理,每个处理重复 3 次。①常规水肥处理(CK):常规施肥为施用有机肥(有机质含量 ≥ 40%)5 t/hm²,化肥施用量为纯 N 72 kg/hm²、P₂O₅ 72 kg/hm²和 K₂O 110 kg/hm²,作为基肥混合后一次性施入,施用深度为 0 ~ 30 cm。茄子生长至盛果期进行 2 次追肥,第一次追肥(6 月 22 日)为施用纯 N 70 kg/hm²,第二次追肥(7 月 23 日)施用纯 N 23 kg/hm²和 K₂O 113 kg/hm²,追肥方式为穴施。茄子移栽后进行灌水 27 m³/hm²;开花期后每隔 7 ~ 10 d 灌水一次,灌水量约 45 m³/hm²,灌溉方式均为滴灌。茄子在尾果期前停止灌溉。②常规水肥+生物炭(WFB):施用基肥时混入 30 t/hm²的生物炭,其余施用基肥的种类、施用量和施用时间均与 CK 相同。追肥的种类、施用量和追肥时间也与 CK 相同。灌溉量和灌溉时间与 CK 也相同。③减水减肥+生物炭(80%W80%FB):常规施肥为有机肥(有机质含量 ≥ 40%)5 t/hm²,化肥施用量为纯 N 57.6 kg/hm²、P₂O₅ 57.6 kg/hm²和 K₂O 88 kg/hm²,并添加 30 t/hm²的生物炭,作为基肥混合后一次性施入,施用深度为 0~30 cm。茄子生长至盛果期进行 2 次追肥,第一次追肥为施用纯 N 56 kg/hm²,第二次追肥施用纯 N 18.4 kg/hm²和 K₂O 90.4 kg/hm²,追肥时间和追肥方式与 CK 相同。茄子移栽后进行灌水 21.6 m³/hm²;开花期后灌水量约 36 m³/hm²,灌溉时间和灌溉方式与 CK 相同。茄子在尾果期前停止灌溉。茄子育苗结束后,均为人工进行栽植,并用黑色地膜覆盖栽培。除灌溉采用滴灌设备外,其余田间管理均采用人工操作进行。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 样品采集及处理。茄子从门茄时(6 月 17 日)开始进行第一次采摘,后期每隔 7~10 d 采摘一次,共采集 13 次;每次将茄子样品带回实验室烘干粉碎,进行测定。茄子植株在拉秧期(10 月 4 日)统一进行收割,将整株茄子的根、茎、叶分开,处理方式和果实相同。

1.3.2 样品测定及计算。植株磷含量采用钼锑抗比色法测定。植株磷素吸收量(kg/hm²)= 植株干物质质量×植株磷素

含量;磷素吸收效率=作物吸磷量/作物全生育期施磷量×100%;磷素利用效率(kg/kg)=作物产量/作物全生育期内吸磷量;磷肥偏生产力(kg/kg)=作物产量/作物全生育期期内施磷量。

1.4 数据处理与分析 采用 Excel 2019 进行数据处理,SPSS 20.0 进行分析,并用 Duncan 多重比较法对不同处理进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 生物炭添加对茄子产量及生物量的影响 生物炭添加对茄子产量及生物量的影响见表 2。由表 2 可知,生物炭添加可以增加茄子的产量,其中 WFB 的产量最高为 54.88 t/hm²,与 WF 相比产量增加 4.28% (P<0.05),80%W80%FB 处理比 WF 产量增加 0.30% (P>0.05),但未达差异显著水平(P>0.05)。生物炭添加对茄子生物量的影响较小,与 WF 处理相比,WFB 生物量表现为增加,并未达差异显著水平(P>0.05),而 80%W80%FB 生物量比 WF 略有降低,也未达差异显著水平(P>0.05)。

表 2 生物炭对茄子产量及生物量的影响

Table 2 Effect of biochar on yield and biomass of eggplant

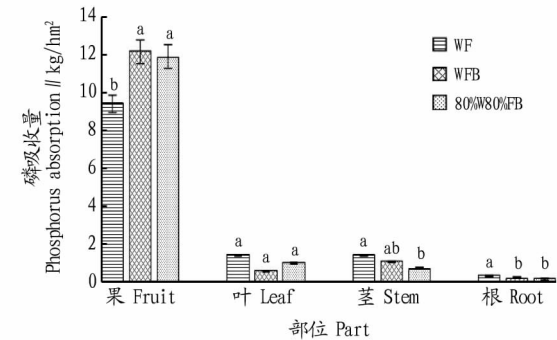
处理 Treatment	产量 Yield/t/hm ²	生物量 Biomass/t/hm ²
WF	52.63±0.97 b	60.67±4.58 a
WFB	54.88±0.85 a	60.90±6.06 a
80%W80%FB	52.79±0.67 b	59.98±6.31 a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)
Note: Different lowercase letters indicated significant difference between different treatments(P<0.05)

2.2 生物炭添加对茄子不同部位磷吸收量和干物质积累量的影响 生物炭添加对茄子磷吸收的影响见图 1。由图 1 可知,茄子总的磷吸收量在 12.52~13.99 kg/hm²,其中 WFB 的总磷吸量最高,为 13.99 kg/hm²,较 WF 增加 11.74% (P<0.05)。与 WF 处理相比,WFB 和 80%W80%FB 可显著提高茄子磷的吸收量,分别增加 29.21% (P<0.05)、26.55% (P>0.05)。WFB 和 80%W80%FB 与 WF 相比,叶、茎、根的磷吸收量均呈下降趋势,叶、茎的磷吸收量均未达显著水平(P>0.05),但 WFB 根的磷吸收量显著降低 41.67% (P<0.05),80%W80%FB 根的磷吸收量显著降低 50.00% (P<0.05)。

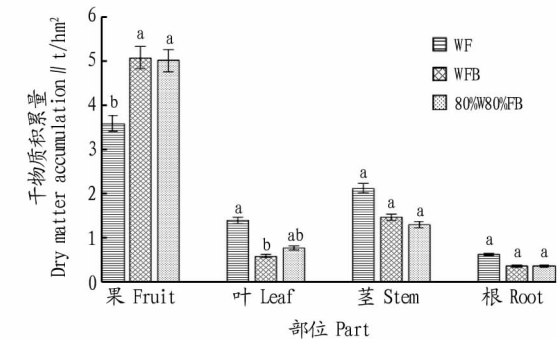
生物炭添加茄子对不同部位干物质积累量的影响见图 2。由图 2 可知,生物炭对茄子果实干物质积累量有显著影响,WFB 果实干物积累量比 WF 增加 41.62% (P<0.05),80%W80%FB 比 WF 果实干物质积累量增加 39.94% (P<0.05);但生物炭添加对茄子根、茎、叶干物质积累量影响较小,均未达差异显著水平(P>0.05)。

2.3 生物炭添加对茄子磷利用的影响 生物炭添加对磷利用的影响见表 3。由表 3 可知,WFB 的磷吸收效率为 19.43%,比 WF 增加 11.80% (P<0.05),80%W80%FB 与 WF 未达差异显著水平(P>0.05);添加生物炭后磷利用效率和偏生产力也有所提高,与 WF 相比,WFB 和 80%W80%FB 磷利用效率分别增加 160.83 和 11.66 kg/kg;80%W80%FB 的



注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)
Note: Different lowercase letters indicated significant difference between different treatments ($P<0.05$)

图 1 生物炭添加对不同处理茄子各部位磷吸收量的影响
Fig. 1 The effect of biochar addition on phosphorus absorption in different parts of eggplant



注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)
Note: Different lowercase letters indicated significant difference between different treatments ($P<0.05$)

图 2 生物炭添加对不同处理茄子各部位干物质积累量的影响
Fig. 2 The effect of biochar addition on dry matter accumulation in different parts of eggplant

磷偏生产力最高, 为 916. 49 kg/kg, 比 WF 增加 25. 38% ($P<0.05$), WFB 与 WF 的磷偏生产力未达差异显著水平 ($P>0.05$)。

表 3 生物炭添加对不同处理茄子磷利用的影响
Table 3 The effect of biochar addition on phosphorus utilization in different parts of eggplant

处理 Treatment	磷吸收效率 Phosphorus absorption efficiency %	磷利用效率 Phosphorus utilization efficiency kg/kg	磷偏生产力 Phosphate partial productivity kg/kg
WF	17.38 b	—	730.97 b
WFB	19.43 a	160.83 a	762.22 ab
80%W80%FB	19.06 ab	11.66 b	916.49 a

注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)
Note: Different lowercase letters indicated significant difference between different treatments ($P<0.05$)

3 结论与讨论

生物炭的添加可以促进设施茄子对磷的吸收和利用, 常规水肥添加生物炭处理茄子磷的吸收量为 13. 99 kg/m², 磷的吸收效率为 19. 43%, 磷的偏生产力为 762. 22 kg/kg; 减水减肥添加生物炭处理茄子磷的吸收量为 13. 72 kg/hm²。生

物炭的添加可以增加设施茄子的产量, 常规水肥添加生物炭处理茄子产量为 54. 88 t/hm², 显著高于常规水肥处理; 减水减肥+生物炭处理茄子产量为 52. 79 t/hm² 也略高于常规水肥处理。因此, 生物炭可以作为设施菜田茄子减少肥料用量增加产量的一种手段。

植物所能利用的磷大部分均来源于土壤, 而土壤中磷素的总含量仅为 0. 02%~0. 20% (P_2O_5 0. 05%~0. 46%)^[24]。土壤中磷的转化方式主要包括沉淀和溶解、吸附和解吸, 无机磷的生物固定以及有机磷的矿化等一系列复杂的生物化学过程^[25]。生物炭作为土壤改良剂, 具有改善土壤-植物系统中氮和磷循环利用的能力^[26], 随着生物炭施用量的增加, 土壤-生物炭滤液中氮、磷养分含量显著降低^[27]。研究中常规水肥添加生物炭、减水减肥添加生物炭比常规水肥处理总的磷吸收量都有提高, 说明生物炭的添加使土壤中植物可利用的磷含量增多, 从而促进了茄子对磷的吸收及利用, 主要原因是生物炭孔洞疏松, 可以为土壤中的微生物提供合适的分解环境, 不仅可以加快土壤中磷的转化速率^[28], 还能提高土壤中磷的转化能力, 加速了有效磷的生成^[29], 使土壤中有效磷含量增加, 促进植株对磷的吸收利用。研究显示生物炭的添加可以增加茄子的产量, 与李中阳等^[30]的研究结果基本一致, 说明生物炭的添加对茄子产量的增加有明显的促进作用。相对于常规水肥, 减水减肥添加生物炭处理对茄子产量增产的效应较低, 主要原因减水减肥对茄子产量影响较大, 会降低茄子的产量^[31], 而生物炭具有很强的保水能力^[32], 可以减少水分的向下渗透, 促进植株对水分的吸收, 同时生物炭添加后与肥料相互作用提升肥料的利用效率^[33], 促进植物对养分的吸收利用。这进一步说明生物炭的添加对提高作物产量及促进作物对养分的利用具有重要作用。

参考文献

[1] 孙锦,高洪波,田婧,等. 我国设施园艺发展现状与趋势[J]. 南京农业大学学报,2019,42(4):594-604.
[2] 魏晓明,齐飞,丁小明,等. 我国设施园艺取得的主要成就[J]. 农机化研究,2010,32(12):227-231.
[3] 杨其长. 供给侧改革下的设施园艺将如何发展?[J]. 中国农村科技,2016(5):40-43.
[4] 蒋卫杰,邓杰,余宏军. 设施园艺发展概况、存在问题与产业发展建议[J]. 中国农业科学,2015,48(17):3515-3523.
[5] 朱照华. 我国蔬菜灌溉施肥存在问题及对策建议[J]. 现代农业,2017(3):23.
[6] 张翠荣. 土壤磷素淋溶状况模拟研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2007.
[7] 王森,朱昌雄,耿兵. 土壤氮磷流失途径的研究进展[J]. 中国农学通报,2013,29(33):22-25.
[8] 李可芳,黄霞. 磷肥的使用与农业面源污染[J]. 环境科学与技术,2004(S1):189-190.
[9] 韩梦,张荣,陈爽,等. 不同浓度磷对茄子叶片光合及荧光特性的影响[J]. 中国瓜菜,2019,32(12):57-59.
[10] 官利兰,伏广农,徐鹏举,等. 广东省菜园土壤施肥状况调查与分析[J]. 南方农业学报,2014,45(3):420-424.
[11] 赖波,汤明尧,柴仲平,等. 新疆农田化肥施用现状调查与评价[J]. 干旱区研究,2014,31(6):1024-1030.
[12] 张宝贵,李贵桐. 土壤生物在土壤磷有效化中的作用[J]. 土壤学报,1998,35(1):104-111.
[13] XU G, LV Y C, SUN J N, et al. Recent advances in biochar applications in agricultural soils: Benefits and environmental implications[J]. Clean-soil, air, water, 2012, 40(10): 1093-1098.

合速率、胞间 CO_2 浓度、气孔导度、蒸腾速率有直接影响。其中,黏壤添加炭粒经光合特性效果较砂壤好。砂壤处理净光合速率在炭粒径 1~2 mm 效果最佳,达 $17.52 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;而胞间 CO_2 浓度、气孔导度、蒸腾速率均随着炭粒径增加而增强,分别达 0.23 、 172.95 、 $196.39 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;黏壤处理净光合速率、胞间 CO_2 浓度、气孔导度、蒸腾速率均在炭粒径 2~5 mm 效果最佳,分别为 18.33 、 0.29 、 223.48 、 $6.64 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

(2)在不同质地土壤中,添加不同炭粒径对根系形态及活力有直接影响。其中,砂壤处理根系形态及活力较黏壤处理好。砂壤处理根系形态及活力均在炭粒径 1~2 mm 效果最佳,分别达 9786.71 mm 、 5281.12 cm^2 、 283.14 cm^3 、 $86.94 \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$;黏壤处理根系形态及活力均在炭粒径 2~5 mm 效果最佳,分别为 8228.83 mm 、 4687.79 cm^2 、 261.49 cm^3 、 $80.98 \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。

(3)烤烟的养分吸收和农艺性状对产量、品质有直接影响。其中,砂壤处理株高、叶长、叶宽、叶面积较黏壤处理好。砂壤处理株高、叶长、叶宽、叶面积在炭粒径 1~2 mm 效果最佳,分别达 122.00 cm 、 76.97 cm 、 31.70 cm 、 0.15 m^2 ;黏壤处理株高、叶宽均在炭粒径 2~5 mm 效果最佳,分别为 126.33 m 、 28.83 cm 。

综上所述,炭粒径对不同质地黄壤烤烟光合特性、根系形态及农艺性状有很大影响,其中,黏壤添加炭粒径在烤烟光合特性上效果较砂壤好;而在根系形态和活力、农艺性状上较砂壤差。在砂壤处理条件下,烤烟的光合特性、根系形态和农艺性状在炭粒径为 1~2 mm 时效果最佳,黏壤处理下在炭粒径为 2~5 mm 时效果最佳。

参考文献

- [1] 熊元,秦松.新型烤烟专用壮苗素的效果[J].中国农村科技,1999(1):14.
- [2] 凌天孝,于晓娜,李志鹏,等.生物炭与化肥配施对土壤特性及烤烟品质和农艺性状的影响[J].土壤通报,2016,47(6):1425-1432.
- [3] RONDON M, RAMIREZ J A, LEHMANN J. Charcoal additions reduce net emissions of greenhouse gases to the atmosphere[C]//Proceedings of the 3rd USDA Symposium on Greenhouse Gases and Carbon Sequestration in Agriculture and Forestry. Baltimore, MD: University of Delaware Press, 2005:21-24.
- [4] GLASER B, HAUMAIER L, GUGGENBERGER G, et al. Black carbon in soils: The use of benzenecarboxylic acids as specific markers[J]. Organic geochemistry, 1998, 29(4):811-819.
- [5] HOSHI T, KANEKO T. A practical study on bamboo char-coal use to tea trees[R]. Japan: Tokyo University, 2001:1-47.
- [6] 花莉,张成,马宏瑞,等.秸秆生物质炭土地利用的环境效益研究[J].生态环境学报,2010,19(10):2489-2492.
- [7] 郭伟,陈红霞,张庆忠,等.华北高产农田施用生物质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.
- [8] 黄超,刘丽君,章明奎.生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2011,37(4):439-445.
- [9] 牛玉德,杜鸿波,李金峰,等.不同生物质炭施用量及类型对汉中烤烟生长发育及产量·产值的影响[J].安徽农业科学,2015,43(11):35-38.
- [10] 王欢欢,任天宝,张志浩,等.生物质炭对烤烟旺长期根系发育及光合特性的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):287-292.
- [11] 王成己,郭学清,曾文龙,等.不同生物质炭用量对烤烟生长和烟叶品质的影响[J].南方农业学报,2019,50(10):2160-2168.
- [12] STEINER C, TEIXEIRA W G, LEHMANN J, et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil[J]. Plant & soil, 2007, 291(1/2):275-290.
- [13] 曲晶晶,郑金伟,郑聚峰,等.小麦秸秆生物质炭对水稻产量及晚稻氮素利用率的影响[J].生态与农村环境学报,2012,28(3):288-293.
- [14] 张晗芝,黄云,刘钢,等.生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J].生态环境学报,2010,19(11):2713-2717.
- [15] 王冬冬,徐琪,杨洋,等.基施生物炭对菜用大豆植株营养吸收及土壤养分供应初报[J].大豆科学,2013,32(1):72-75.
- [16] 刘易,祁通,孟阿静,等.生物质炭输入对盐胁迫下玉米幼苗生长和光合生理特征的影响[J].华北农学报,2017,32(4):182-188.
- [17] 官宇,吴昊,胡建新,等.攀枝花烟区不同基因型烤烟的光合特性研究[J].西南农业学报,2013,26(6):2558-2561.
- [18] 毛家伟,张翔,刘贤宗,等.不同碳肥水平对土壤肥力及烤烟养分吸收和产质量的影响[J].中国烟草科学,2015,36(2):43-48.
- [19] 宋久洋,刘领,陈明灿,等.生物质炭施用对烤烟生长及光合特性的影响[J].河南科技大学学报(自然科学版),2014,35(4):68-72.
- [20] 李中阳,齐学斌,樊向阳,等.生物质炭对冬小麦产量、水分利用效率及根系形态的影响[J].农业工程学报,2015,31(12):119-124.
- [21] 吴崇书,吴耀,李淑枫,等.施用生物质炭对土壤肥力和作物生长的影响[J].中国园艺文摘,2014,30(12):207-209.
- [22] 秦胜金,刘景双,王国平.影响土壤磷有效性变化作用机理[J].土壤通报,2006,37(5):1012-1016.
- [23] 向万胜,黄敏,李学垣.土壤磷素的化学组分及其植物有效性[J].植物营养与肥料学报,2004,10(6):663-670.
- [24] 韩光明.生物炭对不同类型土壤理化性质和微生物多样性的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2013.
- [25] LAIRD D, FLEMING P, WANG B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3/4):436-442.
- [26] WARNOCK D D, LEHMANN J, KUYPER T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil-concepts and mechanisms[J]. Plant and soil, 2007, 300(1/2):9-20.
- [27] STEINER C, GLASER B, TEIXEIRA W G, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal[J]. Journal of plant nutrition and soil science, 2008, 171(6):893-899.
- [28] 李中阳,樊向阳,齐学斌,等.生物质炭对施用不同磷肥下温室茄子生长及品质的影响[J].中国农村水利水电,2015(4):34-37.
- [29] 张锦源,徐欣,陈一民,等.减水和减施化肥对设施黑土菜田茄子产量及水分利用率的影响[J].土壤与作物,2018,7(4):374-379.
- [30] 虎灵,魏晶晶,王慧春.生物炭在农业生产和环境保护方面的应用现状[J].青海草业,2019,28(3):26-30.
- [31] 陈温福,张伟明,孟军.农用生物炭研究进展与前景[J].中国农业科学,2013,46(16):3324-3333.
- [32] STEINBEISS S, GLEIXNER G, ANTONIETTI M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity[J]. Soil biology & biochemistry, 2009, 41(6):1301-1310.
- [33] 刘木均,刘爱群,惠成章.施用生物炭对土壤有机质及茄子根系特征和产量的影响[J].北方园艺,2018(1):72-76.
- [34] 刘木均,刘爱群,惠成章.生物炭处理对茄子生长和光合特性的影响[J].辽宁农业科学,2018(3):42-45.
- [35] 李丽,王雪艳,田彦芳,等.生物质炭对土壤养分及设施蔬菜产量与品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(5):1237-1244.
- [36] 霍丽丽,姚宗路,赵立欣,等.典型农业生物炭理化特性及产品质量评价[J].农业工程学报,2019,35(16):249-257.
- [37] 李力,刘娅,陆宇超,等.生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J].环境化学,2011,30(8):1411-1421.
- [38] 何绪生,耿增超,余雕,等.生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J].农业工程学报,2011,27(2):1-7.
- [39] 吴蔚君,徐云连,邢素林,等.生物炭对土壤氮磷转化和流失的影响[J].农学学报,2018,8(9):20-26.
- [40] 高海英,何绪生,陈心想,等.生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(10):1948-1955.
- [41] ZHOU K, SUI Y Y, XU X, et al. The effects of biochar addition on phosphorus transfer and water utilization efficiency in a vegetable field in Northeast China[J]. Agricultural water management, 2018, 210:324-329.

(上接第 151 页)