

戚琳,宋修超,韩承辉,等.不同热解温度水稻秸秆生物炭对菠菜生物量和品质的影响[J].江苏农业科学,2017,45(23):132-135.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.23.035

不同热解温度水稻秸秆生物炭对菠菜生物量和品质的影响

戚琳¹,宋修超²,韩承辉¹,谢伟芳¹,程婷¹

(1.江苏城市职业学院环境与生态学院,江苏南京 210019; 2.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所,江苏南京 210014)

摘要:土壤中施用生物炭具有改良土壤、提高作物产量和品质的潜能。以水稻秸秆为原料,分别在 300、500、700 ℃ 下热解制备生物炭,通过盆栽试验研究不同温度制备的生物炭(T_{300} 、 T_{500} 、 T_{700})在不同添加量(10、20 g/kg)下对菠菜生长和品质的影响。结果表明,相比于对照,土壤中添加生物炭可提高菠菜株高和生物量,且其增量与生物炭添加量成正比;植株硝酸盐含量因生物炭的添加而降低,且高水平添加量(20 g/kg)的 T_{500} 、 T_{700} 处理达到显著水平($P < 0.05$)。同时,高水平添加生物炭可显著提高植株维生素 C、可溶性糖和可溶性蛋白含量。综合各项指标, T_{500} 和 T_{700} 生物炭在高水平添加量时,对作物生物量的提高和品质的改善效果更显著。添加水稻秸秆生物炭有利于增加土壤孔隙度、提高土壤肥力,进而促进菠菜生长和改善品质。因此,生物炭可作为改良剂施用于土壤,但其具体用量须根据土壤状况和蔬菜种类而定。

关键词:热解温度;稻秸秆生物炭;菠菜;株高;生物量;营养品质;硝酸盐;孔隙度;土壤肥力;土壤改良剂

中图分类号: S636.104 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)23-0132-04

随着设施蔬菜种植面积的不不断扩大,长期过量地不合理施肥和单一品种连作会造成土壤酸化和板结、营养元素失衡,土壤中有机的矿化与分解速率减慢、养分有效性降低、肥力下降^[1-2],给生态环境带来不良影响和危害,同时造成蔬菜产量和品质降低等后果^[3]。菠菜(*Spinacia oleracea* L.)是一种重要的经济作物,营养价值高,被广泛种植和食用。但菠菜属于喜硝作物,极易富集硝酸盐,这已成为制约其品质的重要因素^[4-5]。因此,加强土壤理化性状的调控和改良,对提高作物产量和品质具有重要的理论和实践意义。

生物炭(biochar)一般指生物有机质如农业废弃物、植物组织或木材等在相对缺氧状态下高温裂解形成的物质^[6]。生物炭性质稳定,不易被微生物分解^[7],具有较大的比表面

积和阳离子交换量^[8]。近年来有关生物炭的研究和应用得到了广泛关注,其主要作用集中在以下几个方面:(1)改善土壤理化性质,提高土壤保水保肥性能^[9-10];(2)固碳作用,提高土壤碳库固碳潜力和碳封存能力^[11];(3)促进植物生长,增加农作物产量和改善品质^[12-13];(4)稳定土壤污染物,降低重金属和有机污染物的生物有效性等^[14-15]。生物炭的理化性质及结构特性受生物质原料和热解条件的影响^[16]。不同生物质原料的组分(如纤维素、半纤维素、木质素等)、粒径和全水分含量不同,制备得到的生物炭酸碱度、表面官能团组分^[17]和对重金属的吸附性能^[18]不同;而升高热解温度有利于生物炭微孔和孔隙结构的形成,随着热解温度的升高,孔隙数量增加、平均孔径变小,生物炭比表面积、微孔表面积和总孔容增加^[8],这在一定程度上决定了生物炭在土壤中的稳定性及其作用效果^[13]。利用生物炭作为土壤添加剂的研究发现,蔬菜硝酸盐含量因生物炭而显著降低,生物炭可改变氮素形态,缓慢供应以满足作物对氮素的需求,对蔬菜体内硝酸盐的富集具有较好的调控作用^[19-20],同时维生素 C 和可溶性糖含量升高,蔬菜的营养品质得到提升,但也有研究发现生物炭施用后产生了相反的作用^[21-22]。针对不同的试验结论,本试

收稿日期:2017-04-24

基金项目:江苏省大学生创新创业训练指导项目(编号:20150000014X);江苏省环境工程重点实验室开放课题(编号:KF2015012)。

作者简介:戚琳(1987—),女,山西临汾人,硕士研究生,助理实验师,主要从事环境生态学及土壤修复相关研究。E-mail:qlkatrina@163.com。

增长,主要是球茎的干物质积累,茎叶养分向球茎输送,是提高球茎品质的关键时期。

参考文献:

- [1]赵有为.几种主要的水生蔬菜生产技术发展概述(下)[J].长江蔬菜,1992(2):17-18.
- [2]陈家宽.中国慈姑属的系统与进化植物学研究[M].武汉:武汉大学出版社,1989:21-89.
- [3]邢湘臣.慈姑的食疗[J].蔬菜,2002(8):40.

- [4]黄新芳,孔庆东,柯卫东,等.华夏慈姑种质资源及其研究(上)[J].长江蔬菜,1998(11):1-3.
- [5]黄新芳,孔庆东,柯卫东,等.华夏慈姑种质资源及其研究(下)[J].长江蔬菜,1998(12):1-3.
- [6]黄新芳,孔庆东,柯卫东,等.慈姑种质资源的综合评估[C]//中国科学技术协会青年学术讨论会.北京,1998:627-631.
- [7]韩大勇,韩梅,杨利民,等.蕻蓎生长发育动态研究[J].吉林农业大学学报,2006,28(5):525-529.
- [8]崔广林,李隆云,吴叶宽.武陵山区黄花蒿生长发育规律研究[J].热带亚热带植物学报,2016,24(1):87-92.

验利用温室盆栽试验,以菠菜作为供试作物,研究常规水肥措施下不同热解温度制备的水稻秸秆生物炭在不同施加量下对菠菜生物量和品质的影响,以期寻求更合理的生物炭制备温度和施用浓度,为生物炭在蔬菜种植和生产过程中改善设施土壤质量、提高蔬菜产量与品质提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选用的菠菜品种为内蒙古大叶菠菜,购买自上海瑞琪种子有限公司。供试土壤采自江苏省苏州市相城区望亭镇设施大棚,该温室大棚已经采用常规管理方法连续种植番茄、

表 1 不同热解温度生物炭元素组成及基本性质

| 热解温度 (℃) | 平均孔径 (nm) | 碳含量 (%) | 氮含量 (%) | 灰分含量 (%) | pH 值 | 全磷含量 (g/kg) | 全钾含量 (g/kg) | 阳离子交换量 (cmol/kg) |
|-------------|--------------|------------|------------|-------------|------|----------------|----------------|---------------------|
| 300 | 18.94 | 53.12 | 1.50 | 21.28 | 8.2 | 2.11 | 42.5 | 13.5 |
| 500 | 11.04 | 65.08 | 0.87 | 29.43 | 10.5 | 2.86 | 59.1 | 15.8 |
| 700 | 4.73 | 68.81 | 0.27 | 37.05 | 10.7 | 3.49 | 64.7 | 22.1 |

1.2 试验设计

试验于 2016 年 10—11 月在江苏城市职业学院屋顶花园进行,菠菜种植盆钵选用长×宽×高为 42 cm×23 cm×17 cm 的长方形塑料花盆,每盆盛土 20 kg,播种前将土壤与生物炭充分混匀并先浇透底水。试验处理设置为双因素交互试验,3 种不同热解温度的生物炭 T₃₀₀、T₅₀₀、T₇₀₀ 分别设置 2 个浓度梯度:C₁ = 10 g/kg、C₂ = 20 g/kg(生物炭/土壤);同时,以仅施用基肥、不添加生物炭的空白作为对照(CK)共 7 个处理,每处理 3 个重复,共 21 个盆钵,完全随机摆放。各处理施加同水平基肥:N:P₂O₅:K₂O = 2:1:1.5。

选饱满、整齐一致的菠菜种提前在 50℃温水中浸种 2 h,再在室温下浸种 22 h,置于铺有 2 层湿润纱布的培养皿中,在 18℃培养箱中避光培养,取长势健壮一致的幼苗移栽于盆钵中,每盆 15 株,待长出 2 张真叶后间苗,每盆保留 6 株。每隔 2 d 于上午浇水 1 次,以不渗出盆底托盘为准,整个栽培期间不再补施任何肥料。

1.3 分析方法

1.3.1 菠菜株高及生物量的测定 菠菜出苗 50 d 后收获,用水洗净后用蒸馏水冲洗 1 遍,用吸水纸吸干水分后测量株高,称质量并记录每个盆钵菠菜单株生物量(包括地上部分和地下部分)。

1.3.2 菠菜品质的测定 选择部分处理好的代表性样品进行菠菜品质分析。其中,植株硝酸盐含量的测定利用水杨酸比色法^[23];维生素 C 含量的测定采用 2,6-二氯靛酚滴定法^[24];可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法^[25];可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝染色法^[25]。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 软件对试验数据进行整理,SPSS 19.0 统计软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)和 LSD 多重比较检验处理间的差异以及试验数据的统计,显著性水平 α = 0.05,利用 Origin 9.0 进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 不同处理对菠菜株高和生物量的影响

黄瓜、茄子和辣椒等超过 5 年。土壤属沙质壤土,耕层土壤(0~15 cm) pH 值 = 5.2,含总有机碳 18.3 g/kg、全氮 1.6 g/kg、全磷 0.7 g/kg、全钾 0.9 g/kg。种植前土壤过 2 mm 筛,去除肉眼可见植物残体和石块。

水稻秸秆(简称稻秆)生物炭的制备:水稻秸秆采自苏州市相城区望亭镇。将稻秆洗净后自然风干,粉碎并过 2 mm 筛,置于陶瓷坩埚中,分别以 300、500、700℃在马弗炉(carbolite CWF 12/13,GB)中厌氧裂解 3 h,冷却至室温后研磨过 1 mm 筛,得到的 3 种生物炭分别记为 T₃₀₀、T₅₀₀、T₇₀₀,其基本理化性质见表 1。

由表 2 可知,与对照相比,高量(C₂)生物炭的添加显著提高了菠菜株高(P<0.05),分别提高 10.94%、15.73%、12.85%;但低量(C₁)生物炭的添加对株高的影响不显著(P>0.05),3 种热解温度处理间差异也不显著。

由表 2 还可知,菠菜生物量对不同生物炭处理的响应不同。对于同种热解温度生物炭而言,植株地上部和地下部生物量随生物炭添加量的增加而增大;而添加量相同时,T₅₀₀生物炭较其他两种生物炭对植株地上部和地下部生物量的促进作用更强烈;三种热解温度生物炭在两种添加水平下均比对照显著提高了植株地下部生物量(P<0.05),而地上部生物量受低水平 T₅₀₀和高水平添加量的三种生物炭影响显著;不同添加量的同种生物炭处理间植株地上部生物量无显著差异,而地下部生物量受不同添加量的 T₃₀₀和 T₇₀₀生物炭影响显著(P<0.05)。

表 2 生物炭对菠菜株高和生物量的影响

| 生物炭处理 | 温度处理 | 株高 (cm) | 地上部生物量 (g,鲜质量) | 地下部生物量 (g,鲜质量) |
|----------------|------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| C ₀ | CK | 17.36±0.71c | 30.53±2.27c | 20.89±1.17d |
| C ₁ | T ₃₀₀ | 18.08±0.67bc | 33.86±1.21bc | 26.03±2.13bc |
| | T ₅₀₀ | 18.34±0.56bc | 35.99±2.63ab | 29.87±0.87a |
| | T ₇₀₀ | 18.68±1.13abc | 32.89±1.88bc | 25.39±1.54c |
| C ₂ | T ₃₀₀ | 19.26±0.44ab | 37.03±2.01ab | 29.73±2.41a |
| | T ₅₀₀ | 20.09±0.72a | 39.17±3.17a | 31.38±1.51a |
| | T ₇₀₀ | 19.59±1.13ab | 35.91±2.35ab | 28.91±1.86ab |

注:不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

2.2 不同处理对菠菜品质的影响

与对照相比,生物炭的添加可降低植株硝酸盐含量,且 C₂ 添加量的 T₅₀₀和 T₇₀₀处理达到显著水平(图 1,P<0.05);2 个处理的植株硝酸盐含量分别为 795.49、803.34 mg/kg,相比于对照分别降低 11.39%、10.52%;添加生物炭的各处理间菠菜植株硝酸盐含量差异不显著,且所有硝酸盐含量均低于国家安全标准(≤3 000 mg/kg,鲜质量),未产生硝酸盐含量超标的风险。

维生素 C 是评价蔬菜营养品质的重要指标之一。相比

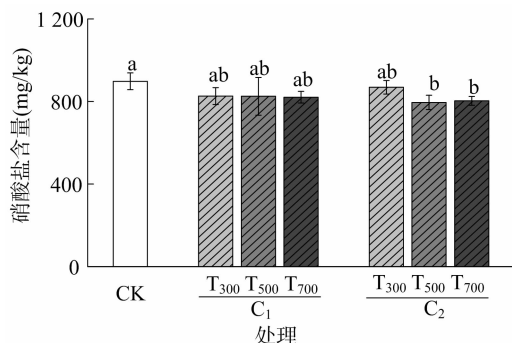


图1 生物炭对菠菜硝酸盐含量的影响

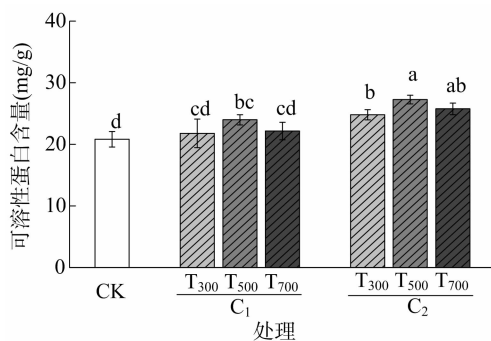


图4 生物炭对菠菜可溶性蛋白含量的影响

于对照,在 C_1 添加量下, T_{300} 处理的菠菜植株维生素 C 含量降低, T_{500} 处理升高,但均未达到显著水平 ($P > 0.05$);而其他处理均显著提高了维生素 C 含量。对于相同热解温度生物炭而言,添加量越大,菠菜维生素 C 含量越高,且 3 种生物炭处理间差异显著 ($P < 0.05$, 图 2)。

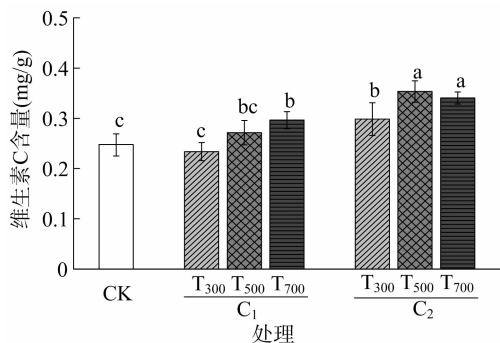


图2 生物炭对菠菜维生素 C 含量的影响

由图 3、图 4 可知,生物炭添加水平无论是高还是低,3 种热解温度生物炭对菠菜可溶性糖和可溶性蛋白含量有促进作用。相比于对照, C_1 生物炭对菠菜植株可溶性糖含量影响不显著,而 C_2 生物炭的影响达到显著水平 ($P < 0.05$); C_1 添加量下的 T_{300} 和 T_{700} 对植株可溶性蛋白含量影响不显著,其他处理则达到显著水平。3 种生物炭添加量增大时,可溶性糖和可溶性蛋白含量均显著提高 ($P < 0.05$),且 T_{500} 处理下的生物炭对可溶性糖和蛋白含量的促进作用高于其他 2 种生物炭,但与 T_{700} 生物炭差异不显著。

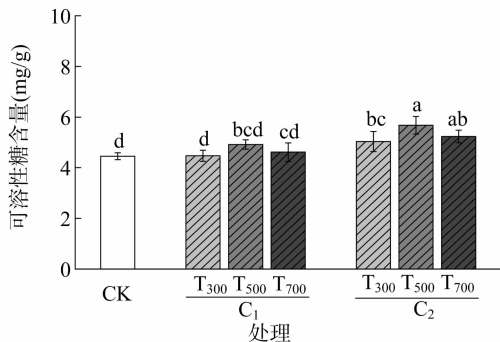


图3 生物炭对菠菜可溶性糖含量的影响

3 讨论

3.1 生物炭对菠菜生物量的影响

本研究发现,施加生物炭可提高菠菜株高、植株地上部和

地下部生物量,且高水平生物炭对其影响显著。这可能是由于生物炭施入土壤中可改善土壤性状、提高土壤肥力、促进作物根系活力与养分吸收能力,进而促进植株生长^[26]。因此,添加生物炭可作为提高作物产量的有效方式。有研究发现,生物炭对番茄根系形态特征的优化与产量的提高具有一定的促进作用^[27];房彬等发现,玉米和油菜秸秆生物炭处理下的玉米和油菜作物产量均高于对照组,生物炭有利于作物生物学产量的提高,且油菜籽实产量随着生物炭添加比例增大而显著提高^[28];刘玉学等发现,土壤中添加稻秆生物炭可增加白菜生物量,且在 10、20 t/hm² 水平下差异显著^[26]。

3.2 生物炭对菠菜品质的影响

硝酸盐是致癌物亚硝胺的前体,易诱发人体消化系统癌变,是衡量蔬菜品质的重要指标之一。本研究发现,生物炭的添加可降低菠菜植株硝酸盐含量,这可能是由于生物炭的孔隙结构对土壤硝态氮起到吸附和调控作用,从而能够起到固持、缓释土壤氮素的作用,减少菠菜硝酸盐的短期积累,达到降低植株硝酸盐含量的效果^[20]。付嘉英等发现,小麦炭基肥处理的白菜的硝酸盐含量显著低于复合肥,认为小麦炭基肥料对小白菜硝酸盐的富集具有较好的调控作用^[19]。刘玉学等发现,在 180 kg/hm² 施氮情况下,添加稻秆炭可降低小青菜硝酸盐含量,但低水平添加量下差异不显著,添加量达 40 t/hm² 时硝酸盐含量显著降低^[26];张万杰等通过盆栽试验得到了相反的结论^[29]。各研究中生物炭施用效果的差异与应用土壤的固有特征和生物炭本身性质有关,在施加量不同或与不同肥料配施的条件下,对不同作物生长和品质的影响产生差异。

植株维生素 C、可溶性糖和可溶性蛋白代表蔬菜的营养品质^[30-32],本研究发现土壤中添加生物炭可提高菠菜植株各营养指标的含量,且高水平添加量的生物炭对其影响显著,这与前人研究结果相同。王凤婷等研究发现,添加高水平稻秆炭可显著提高白菜维生素 C 含量^[33];付嘉英等发现,麦秸炭基肥可显著提高维生素 C 和可溶性糖含量^[19]。这可能是由于稻秆生物炭富含有机碳、无机碳酸盐和植物生长所需的大量营养元素,其输入可提高土壤养分水平^[34],促进植株体内营养物质的合成和积累。同时,生物炭的添加可提高土壤阳离子交换量(CEC),改善土壤保肥能力^[16,35];降低土壤酸性,改善土壤 pH 值状况,有助于作物对养分的吸收和利用^[10],进而改善作物品质。而高温热解生物炭孔隙结构更发达,pH 值和 CEC 更高,对土壤物理性状的改善和养分水平的提高能力优于低温热解生物炭。

4 结论

在常规水肥管理条件下,生物炭的添加可提高菠菜植株地上部和地下部生物量、改善菠菜营养品质。高水平添加量的 3 种热解温度生物炭均显著提高了菠菜植株的维生素 C、可溶性糖和可溶性蛋白含量;同时,高热解温度生物炭对硝酸盐含量降低效果显著。针对同种热解温度的生物炭,其添加量越大,菠菜品质指标的增加量越大;而 3 种热解温度生物炭中,高热解温度生物炭增效优于低热解温度生物炭。结合其他研究发现,生物炭对作物产量和品质的影响,要综合考虑当地土壤质地与水肥状况、作物品种和类型、生物炭类型和施加量等多方面因素。同时,植株生长和品质依赖于土壤养分状况,因此今后的研究应结合土壤输入生物炭后理化性状及养分情况的变化,综合探讨生物炭对作物生物量和品质的影响,以期进一步验证更适合当地土壤固有特性环境的生物炭热解温度和添加量。

参考文献:

- [1] 管安琴,卢昱宇,陈 罡,等. 棚室蔬菜栽培中的光、温、土壤环境调控技术综述[J]. 江苏农业科学,2015,43(9):191-193,194.
- [2] 张丹丹,包 立,张乃明,等. 不同设施栽培基质对生菜生长与品质的影响[J]. 北方园艺,2015(8):173-176.
- [3] 沈 虹,王 磊,苗 艳,等. 海藻渣对菠菜生长和品质的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(10):196-199,200.
- [4] 陈新平,邹春琴,刘亚萍,等. 菠菜不同品种累积硝酸盐能力的差异及其原因[J]. 植物营养与肥科学报,2000,6(1):30-34.
- [5] 葛晓光,郝 楠. 绿色蔬菜生产中化肥施用问题的讨论[J]. 中国蔬菜,2006,1(4):1-4.
- [6] Cao X D, Ma L, Gao B, et al. Dairy - manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine [J]. Environmental Science & Technology,2009,43(9):3285-3291.
- [7] Lehmann J, Nguyen B T, Kinyang J, et al. Long - term black carbon dynamics in cultivated soil [J]. Biogeochemistry,2009,92(1/2):163-176.
- [8] 简敏菲,高凯芳,余厚平. 不同裂解温度对水稻秸秆制备生物炭及其特性的影响[J]. 环境科学学报,2016,36(5):1757-1765.
- [9] 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.
- [10] 高敬尧,王宏燕,许毛毛,等. 生物炭施入对农田土壤及作物生长影响的研究进展[J]. 江苏农业科学,2016,44(10):10-15.
- [11] Jindo K, Sanchez - Monedero M A, Hernandez T A, et al. Biochar influences the microbial community structure during manure composting with agricultural wastes [J]. Science of the Total Environment,2012,416(2):476-481.
- [12] Gaskin J W, Steiner C, Harris K, et al. Effect of low - temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use[J]. Transactions of the ASABE,2008,51(6):2061-2069.
- [13] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. Bioresource Technology,2011,102(3):3488-3497.
- [14] 安增莉,方青松,侯艳伟. 生物炭输入对土壤污染物迁移行为的影响[J]. 环境科学导刊,2011,30(3):7-10.
- [15] Cornelissen G, Gustafsson O, Bucheli T D, et al. Extensive sorption

- of organic compounds to black carbon, coal, and kerogen in sediments and soils; mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation, and biodegradation [J]. Environmental Science & Technology,2005,39(18):6881-6895.
- [16] 王宏燕,王晓晨,张瑜洁,等. 几种生物质热解炭基本理化性质比较[J]. 东北农业大学学报,2016,47(5):83-90.
 - [17] 李 明,李忠佩,刘 明,等. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科学,2015,48(7):1361-1369.
 - [18] 林翊羽,张 越,刘 沅,等. 不同原料和炭化温度下制备的生物炭结构及性质[J]. 环境工程学报,2016,10(6):3200-3206.
 - [19] 付嘉英,乔志刚,郑金伟,等. 不同炭基肥料对小白菜硝酸盐含量、产量及品质的影响[J]. 中国农学通报,2013,29(34):162-165.
 - [20] 廖上强,陈延华,李艳梅,等. 生物炭基尿素对芹菜产量、品质及土壤硝态氮含量的影响[J]. 农业资源与环境学报,2015,32(5):443-448.
 - [21] 李泽锋,李 娜,刘金华,等. 生物质炭对辣椒果实品质和产量的影响[J]. 吉林农业大学学报,2016,38(6):686-692.
 - [22] van Zwieten L, 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.
 - [23] 赵世杰,刘华山,董心纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业出版社,1998:43-125.
 - [24] 刘春生,杨守祥. 农业化学分析[M]. 北京:中国农业大学出版社,1996:8-187.
 - [25] 李合生. 植物生理生化试验原理与技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000:184-195.
 - [26] 刘玉学,王耀锋,吕豪豪,等. 不同稻秆炭和竹炭施用水平对小青菜产量、品质以及土壤理化性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(6):1438-1444.
 - [27] 勾芒芒,屈忠义. 土壤中施用生物炭对番茄根系特征及产量的影响[J]. 生态环境学报,2013,22(8):1348-1352.
 - [28] 房 彬,李心清,赵 斌,等. 生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 生态环境学报,2014,23(8):1292-1297.
 - [29] 张万杰,李志芳,张庆忠,等. 生物质炭和氮肥配施对菠菜产量和硝酸盐含量的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(10):1946-1952.
 - [30] 冯 营,胡新燕,冯清伟,等. 不同熟期辣椒果实农艺性状和维生素 C 含量动态变化[J]. 江苏农业科学,2015,43(2):156-157.
 - [31] 徐心诚. 外源腐胺和精胺对弱光胁迫下黄瓜叶片可溶性糖含量的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(7):130-134.
 - [32] 李 洁. 干旱胁迫对青稞幼苗可溶性蛋白的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(12):124-126.
 - [33] 王凤婷,艾希珍. 钾与蔬菜品质的相关性研究进展[J]. 西北农业学报,2004,13(4):183-186.
 - [34] Woolf D, Amonette J E, Street - Perrott F, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change [J]. Nature Communications,2010,1(5):56.
 - [35] 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 Soil,2003,249(2):343-357.