

# 生物质炭对设施大棚土壤性质与果蔬产量影响的整合分析

肖婧<sup>1,2</sup>, 王传杰<sup>1</sup>, 黄敏<sup>2</sup>, 孙楠<sup>1</sup>, 张文菊<sup>1\*</sup>, 徐明岗<sup>1</sup>

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北武汉 430070)

**摘要:**【目的】设施大棚是果蔬的重要生产基地, 量化和评估生物质炭在设施栽培中的应用效果, 对生物质炭在设施大棚的推广应用具有重要的实践价值。【方法】通过文献收集并建立数据库, 共获得典型设施大棚或温室环境条件下相对独立的匹配数据 214 组, 采用数据整合分析 (Meta-analysis) 方法, 定量分析生物质炭特性 (原料、制备温度、C/N、pH) 与管理措施 (施用量与施用时长) 对果蔬产量、土壤理化性质的影响程度。【结果】设施条件下施用生物质炭可显著提高土壤 pH, 且土壤有机碳、氮、磷等均有不同程度的增加。果蔬增产效应显著, 其中, 叶菜类、块茎类、果菜类以及豆类产量分别增加 23.9%、43.3%、60.6% 和 79.5%。低量施用 (< 10.0 t/hm<sup>2</sup>) 平均增产 30.8%, 高量施用 (10.0~80.0 t/hm<sup>2</sup>) 增产 14.0%~27.4%。施用生物质炭前 6 个月增产效果显著, 最高可达 30.4%, 超过 6 个月, 增产效果不显著。不同制备生物质炭的增产效果也存在一定差异, 畜禽粪便类 (66.4%) > 秸秆类 (31.2%) > 木材类 (19.0%) > 壳渣类 (5.9%)。制备温度低于 600℃ 的生物质炭增产 20.4%~36.5%, 超过 600℃ 时增产效果不显著。当原料生物质炭 C/N 值 < 100 时, 增产 19.3%~49.1%, 且随 C/N 值的增加增产效果呈降低趋势。当生物质炭呈碱性时 (pH 9~10) 增产效果最佳。【结论】生物质炭类型及施用量是影响设施土壤肥力与果蔬产量的关键因素, 低温 (400~500℃ 下) 制备的生物质炭增产效果显著, 建议施用量控制在 10.0 t/hm<sup>2</sup> 以下且间断性施用, 可降低成本, 提高经济效益。

**关键词:** 生物质炭; 设施大棚; 土壤; 产量; Meta 分析

## Meta-analysis of biochar application effects on soil fertility and yields of fruit and vegetables in greenhouse

XIAO Jing<sup>1,2</sup>, WANG Chuan-jie<sup>1</sup>, HUANG Min<sup>2</sup>, SUN Nan<sup>1</sup>, ZHANG Wen-ju<sup>1\*</sup>, XU Ming-gang<sup>1</sup>

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2 School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** 【Objectives】Greenhouse cropping is one of the most important practices for vegetable production. Qualification and assessment of biochar application effect in greenhouse are of significance to enhance their popularization. 【Methods】By selecting independent research literatures with certain criteria, we collected 214 paired data set and conducted a meta-analysis to quantify application effects of biochar with various characteristics (e.g. raw material, pyrolysis temperature, C/N, pH etc.) and artificial application practices (e.g., application amount and duration) on yields of fruit and vegetables and soil chemical and physical properties. 【Results】Biochar application under greenhouse condition increased soil pH, and content of soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus significantly. Compared to the Control, biochar application increased the yield of fruit and vegetables significantly. The increment in yield was 23.9% for leafy vegetables, 43.3% for tubers, 60.6% for fruit and vegetables, and 79.5% for beans, respectively. The averaged increment in yield was 30.8% when the application rate was less than 10.0 t/hm<sup>2</sup>, and 14.0%–27.4% at the rate of 10.0–80.0 t/hm<sup>2</sup>. The improvement of yield was remarkable within 6 months after biochar application, and it reached a maximum of 30.4%. However, the yield improvement was not significant 6 month later after biochar application. Feedstock sources showed

收稿日期: 2017-04-10 接受日期: 2017-08-28

基金项目: 国家“十二五”国家科技支撑计划 (2014BAD14B02, 2014BAD14B03) 资助。

联系方式: 肖婧 E-mail: xiao\_jing06@163.com; \* 通信作者 张文菊 E-mail: zhangwenju01@caas.cn

significant effect on the yield improvement of biochar application. The yield improvement followed the order of livestock and poultry manure (66.4%) > straw (31.2%) > wood (19.0%) > shell residue (5.9%). Pyrolysis temperature also showed impact on yield improvement with biochar application significantly as well. The increment was 20.4%–36.5% when the pyrolysis temperature was lower than 600°C. However, it showed no effect on yield improvement when temperature was over 600°C. The increment in yield was 19.3%–49.1% when the biochar C/N value was less than 100, showing a rapid decreasing trend with the increase of biochar C/N ratio. Alkaline biochar (pH 9–10) showed better improvement effect than that of the acid ones. 【 **Conclusions** 】 The feedstock sources and application rates of biochar are the two key factors that regulating the yield improvement of fruit and vegetables and soil fertility. Application of biochar derived from pyrolysis temperature of 400–500°C with C/N value less than 100 and pH 9–10 are recommended for better yield improvement. The application rate of not over 10 t/hm<sup>2</sup> and application with intervals less than 6 months are recommended to save the cost and improve economic benefits.

**Key words:** biochar; greenhouse; soil; yield; Meta-analysis

设施栽培在蔬菜和花果等的反季节、跨区域种植中发挥着重要作用<sup>[1]</sup>, 到 2012 年我国设施农业面积已占世界总面积的 85.0% 以上, 且设施栽培的产量是露天种植的 3.5 倍<sup>[2]</sup>。随着人们对生活品质的要求不断提高, 绿色蔬菜花果的供应需求不断增大, 如何保障设施大棚的平稳增产显得尤为重要。

设施大棚作为一种特殊的农业旱地生态系统, 具有气温高、湿度大、灌溉频率高、复种指数高和施肥量大等特点<sup>[3]</sup>。尽管通过设施栽培可获得较高的果蔬产量和经济效益, 但由于设施环境的封闭性以及农户为追求高产而采取不当管理措施 (如过量投入化肥, 施用鸡粪、猪粪等未经过熟化处理的有机肥等) 导致的土壤酸化、盐渍化、养分失衡及土壤板结等问题突出<sup>[4-5]</sup>, 使得设施土壤难以持续耕作, 作物出现生理性干旱、死苗率上升和产量下降等一系列问题<sup>[6]</sup>。

生物质炭 (biochar) 是生物质在缺氧条件下通过热化学转化得到的固体产物, 它可以单独或者作为添加剂使用, 能够改良土壤、提高资源利用效率、改善或者避免特定的环境污染<sup>[7]</sup>。2013 年 4 月 18 日, 全球著名的专业信息提供商 Thomson Reuters 旗下知识产权与科技事业部发布《2013 年研究前沿: 自然科学与社会科学的 100 个学科领域》中, “生物质炭施用技术及其效应” (biochar amendment techniques effects) 被列为十大领先研究领域中的 100 大重要研究前沿之一。至今, 已有大量研究表明生物质炭施入土壤后不仅可以增强土壤固碳效果<sup>[8-9]</sup>, 还可有效改善土壤理化性状与结构<sup>[10]</sup>, 提高土壤质量和肥力、提升作物产量<sup>[11-12]</sup>。以往生物质炭

的研究侧重于投入农田后的增产减排效果<sup>[13-15]</sup>, 本研究收集了国内外有关设施大棚生物质炭施用的研究数据, 利用整合分析 (Meta-analysis) 方法, 量化和评估了生物质炭对设施大棚土壤性质和果蔬产量的作用效果及其影响程度, 旨在为设施大棚的绿色生产与生物质炭应用提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 数据来源

本研究收集的数据来自中国知网和 Web of Science 文献数据库。检索主要关键词: “生物质炭 (biochar)”、“土壤性质 (soil properties)”、“产量 (yield)”和“设施大棚 (greenhouse facilities)”等, 筛选 2007—2015 年符合以下基本要求的文献: 1) 设施大棚试验, 排除田间试验、露天盆栽试验等; 2) 试验处理组必须为施用生物质炭, 对照组为不施用生物质炭, 且处理组和对照组除生物质炭外, 其他试验条件严格一致; 3) 试验处理重复数必须大于或等于 3<sup>[16]</sup>。最终得到 214 组有效匹配数据。

### 1.2 数据库建立与数据分类

对收集到的独立试验数据, 按照施用生物质炭 (试验组) 与不施用生物质炭 (对照组) 处理, 提取每篇文献中各个指标的平均值 (试验 $\bar{x}_B$ 和对照组 $\bar{x}_C$ )、标准差 ( $s_B$  和  $s_C$ ) 和样本数 ( $N_B$  和  $N_C$ ), 通过图展示文献, 利用 GetData Graph Digitizer 2.24 软件获取数据。

数据收集指标包括生物质炭施用量, 生物质炭特性 (制备原料、制备温度、生物质炭 pH 值、

C/N 比等), 土壤理化性质(有机碳、全氮含量, 有效态氮、磷, pH 值等), 作物产量等。由于设施栽培规模不一致, 生物质炭施用比例表示方法包括采用质量百分比 (%) 和质量/土壤面积 (如 t/hm<sup>2</sup>) 两种形式。在本研究整合分析中将生物质炭施用比例统一为质量/土壤面积 (t/hm<sup>2</sup>)。如果是室内盆栽试验, 以每亩耕层土壤重 30 万斤来进行单位换算<sup>[17]</sup>, 以便统一产量单位 (t/hm<sup>2</sup>)。如果没有相关说明则将土层厚度设定为一般耕作层厚度 20 cm<sup>[18]</sup>。对于土壤 pH, 如果试验中 pH 是采用 CaCl<sub>2</sub> 溶液法, 那么使用公式转换, 即  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) = 1.65 + 0.86 \text{pH}(\text{CaCl}_2)$ <sup>[18]</sup>。根据文献, 将生物质炭原材料大致分为畜禽粪便类(猪粪、牛粪、羊粪等), 秸秆类(花生秸秆、玉米秸秆、小麦秸秆、高粱秸秆和油菜秸秆等), 木材类(树皮、木片、剪枝、树干和树枝等) 以及壳渣类(坚果壳、燕麦壳、核桃壳、花生壳和甘蔗渣等) 等 4 种类型进行整合分析。关于生物质炭制备温度, 如果文献给出的是温度区间, 则取其平均值, 并将生物质炭热解温度划分为 4 个区间: 低温 ( $\leq 400^\circ\text{C}$ )、中温 (401~500 $^\circ\text{C}$ )、中高温 (501~600 $^\circ\text{C}$ )、高温 ( $\geq 600^\circ\text{C}$ )。生物质炭碳氮含量比值 (C/N 值) 划分为 5 个水平: <20、20~50、50~100、100~300、 $\geq 300$ 。生物质炭 pH 分为  $\leq 7$ 、7~8、8~9、9~10 和  $\geq 10$  5 个水平。生物质炭施用量分为 4 个水平: <10.0、10.0~40.0、40.0~80.0、 $\geq 80.0$  t/hm<sup>2</sup>。生物质炭施用时间按月分为 4 个水平: <3、3.0~6.0、6.0~12.0 和  $\geq 12.0$ 。

### 1.3 数据分析

整合分析方法适用于对照试验的综合研究, 目的是判断试验处理对试验对象产生正效应或负效应、效应大小、同一主题下不同独立试验的结果是否一致及变异程度等问题<sup>[19]</sup>。参照 Gurevitch 等<sup>[20]</sup>的方法对文献中有关生物质炭对作物产量的影响结果进行标准化处理。试验中的产量值采用自然对数的反应比 (response ratio, RR) 作为效应量:

$$\ln RR = \ln (\bar{x}_B / \bar{x}_C)$$

式中:  $\bar{x}_B$  代表生物质炭试验组的处理值;  $\bar{x}_C$  代表对照组的处理值。如果  $\bar{x}_B$  和  $\bar{x}_C$  均为正态分布且  $\bar{x}_C$  不等于零时,  $\ln RR$  也为近似正态分布, 其方差为:

$$V_{\ln RR} = \frac{s_B^2}{N_B \bar{x}_B^2} + \frac{s_C^2}{N_C \bar{x}_C^2}$$

式中:  $s_B$  和  $s_C$  分别为试验组和对照组的标准差;  $N_B$  和  $N_C$  分别为试验组和对照组的样本数。

效应量的变异系数用各组处理的标准偏差和试验重复数来计算。效应量的权重采用变异系数的倒数表示<sup>[21]</sup>, 最终获得的相关数据通过 MetaWin 2.1 软件进行处理。处理前, 纳入的各研究结果须进行同质性检验, 若  $P > 0.1$ , 表明多个研究具有同质性, 此时选择固定效应模型进行分析 (fixed effect model, FEM); 若  $P \leq 0.1$ , 则多个研究不具有同质性, 此时选择随机效应模型 (random effect model, REM)。效应量的标准差越小, 分配的权重越大, 权重响应比 (weighted response ratio, RR<sub>w</sub>) 即处理相对于对照增减的百分数及其 95% 的置信区间 (95% CI) 通过  $(e^{RR_{w+}} - 1) \times 100\%$  来转化。如果 95% CI 包含零值表明该变量中处理与对照没有显著差异 ( $P > 0.05$ )<sup>[22]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物质炭对设施大棚土壤性质的影响

如图 1 所示, 本研究所收集数据中, 设施大棚果蔬产量和土壤 pH 值均符合正态分布 (图 1,  $P < 0.01$ )。图 2 分析表明, 施用生物质炭后, 土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、有效磷 (Olsen-P) 和阳离子交换量 (CEC) 分别提高 140.9%、66.8%、103.1%、80.7% 和 18.4%。土壤铵态氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 的含量有所降低, 对硝态氮 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) 的影响并不显著 ( $P > 0.05$ )。

生物质炭的施用量对设施土壤 pH 提升程度存在差异。如图 3 所示, 当生物质炭施用量低于 10.0 t/hm<sup>2</sup> 时, 对设施土壤 pH 影响不显著, 超过 10.0 t/hm<sup>2</sup> 时, 设施土壤 pH 值均显著提高, 且 pH 值增幅随着施用量的提高而增加。低于 80.0 t/hm<sup>2</sup> 时, 土壤 pH 值提高 3.3%~3.7%; 超过 80.0 t/hm<sup>2</sup> 时可提高 6.5%。生物质炭的施用时间对设施土壤 pH 值也有一定的影响。少于 3 个月时, 土壤 pH 可显著提高 3.2%, 3~6 个月时, 提升幅度最显著, 高达 15.3%, 是少于 3 个月效果的 4.8 倍。施用生物质炭 6~12 个月时, 对土壤 pH 的提升效果相比前 6 个月有所降低。

### 2.2 生物质炭施用对设施大棚果蔬产量的影响

整合分析结果表明, 施用生物质炭能显著提升设施大棚内各类果蔬的产量 (图 4), 可增产粮食作物 8.8%, 观赏草类 13.6%, 对叶菜类、块茎类和果菜类等的增产效果更为明显, 分别为 23.9%、43.3% 和 60.6%, 对于豆类 (主要包括豌豆和汤用豆类等) 增产高达 79.5%。

生物质炭施用量对大棚果蔬的增产效果存在差

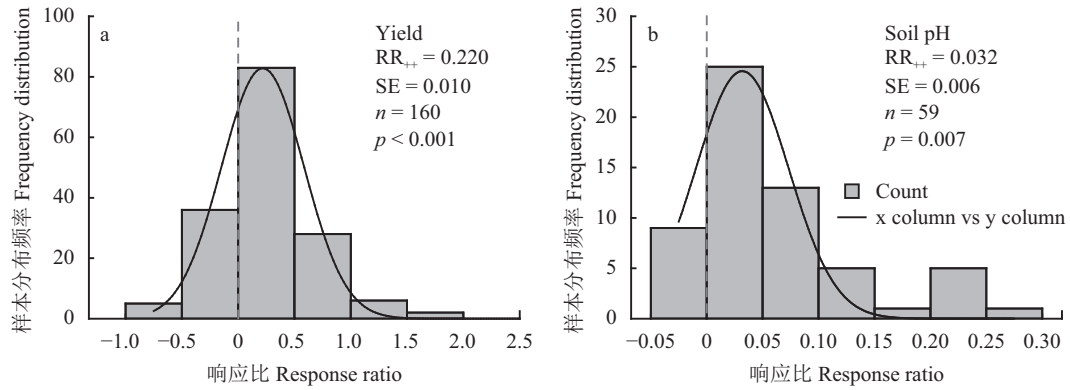


图 1 设施大棚果蔬产量 (a) 及土壤 pH 值 (b) 的样本分布频率

Fig. 1 Data distribution of fruit and vegetables' yields (a) and soil pH (b) in greenhouse

[注 (Note):  $RR_{\pm}$  和 SE 分别代表权重响应比和标准误; 曲线代表数据的高斯分布;  $P < 0.01$  达显著水平。  $RR_{\pm}$  and SE denote the weighted response ratio and standard errors, respectively; The curve is a Gaussian distribution fitted to frequency data;  $P < 0.01$  reached a significant level.]

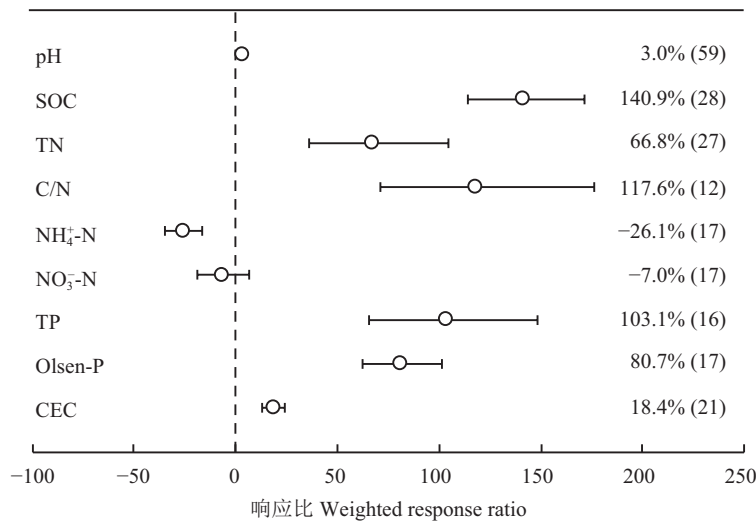


图 2 施用生物质炭对设施土壤性质的影响

Fig. 2 Effects of biochar characteristics on soils properties in greenhouse

[注 (Note): 括号内数字为样本数 Digital in parentheses are the number of samples.]

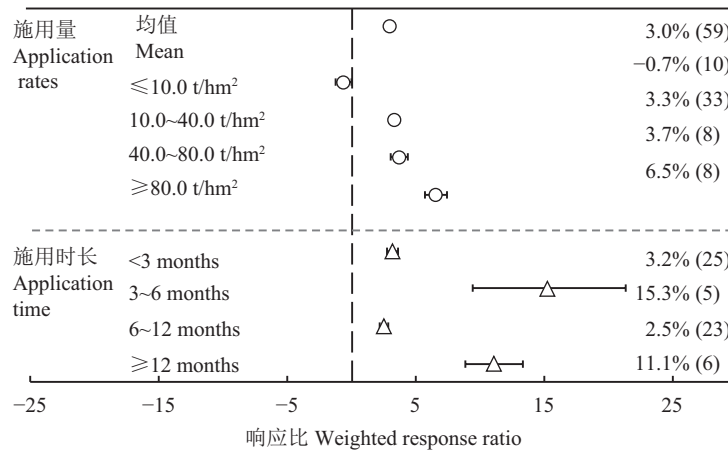


图 3 施用生物质炭对设施大棚土壤 pH 值的影响

Fig. 3 Effect of biochar application on soil pH in greenhouse

[注 (Note): 括号内数字为样本数 Digital in parentheses are the number of samples.]

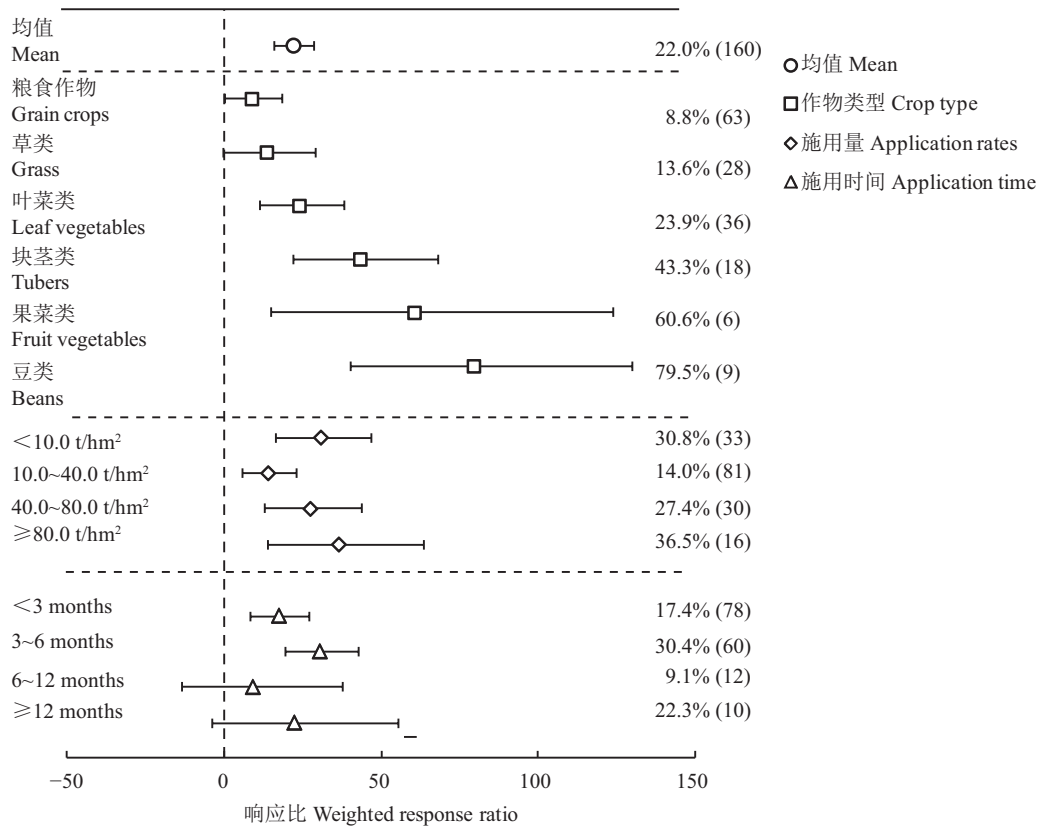


图 4 设施大棚生物质炭施用对主要果蔬产量的影响

Fig. 4 Effects of biochar application on yields of main fruit and vegetables in greenhouse

[注 (Note): 括号内数字为样本数 Digital in parentheses are the number of samples.]

异 (图 4)。当生物质炭的施用量低于  $10.0\text{ t/hm}^2$  时, 大棚果蔬平均增产 30.8%, 施用量为  $10.0\text{--}40.0\text{ t/hm}^2$  时, 增产幅度降至 14.0%, 当施用量超过  $40.0\text{ t/hm}^2$  后, 增产幅度有所提升, 但与低施用量无显著差异。

由图 4 可知, 生物质炭对大棚设施果蔬的增产作用有一定的时间效应。施用生物质炭 3 个月显著增产 17.4%; 6 个月时增产效果达到顶峰, 为 30.4%, 是初期增产效果的 1.7 倍; 6 个月时, 与不施用生物质炭相比, 果蔬产量无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

### 2.3 生物质炭特性对设施大棚果蔬产量的影响

总体而言, 施用生物质炭可平均提高大棚果蔬产量 22.1%, 但不同的生物质炭制备原料对设施大棚果蔬的增产效应也存在差异 (图 5)。畜禽粪便类因富含养分, 其增产效果最好, 可高达 66.4%; 秸秆类次之, 为 31.2%, 碳氮比较高的木材类可增产 19.0%, 壳渣类生物质炭增产效果不显著 ( $P > 0.05$ )。

生物质炭的制备温度也是影响生物质炭增产效果的一个重要因素。分析结果表明, 相对于高温制备, 低、中温度制备的生物质炭有利于设施大棚果蔬的增产 (图 5)。当制备温度低于  $400\text{ }^\circ\text{C}$  时, 大棚果

蔬可增产 20.4%; 制备温度在  $401\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$  时, 增产效应提高至 36.5%; 制备温度继续升高, 增产效应开始下降, 制备温度为  $501\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$  时, 增产 22.8%; 超过  $600\text{ }^\circ\text{C}$ , 施用生物质炭与不施用生物质炭相比, 设施大棚果蔬产量无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

生物质炭的 C/N 由于制备原料的差异而有所不同, 分析结果表明, 随着生物质炭 C/N 值的提高, 施用生物质炭对大棚果蔬的增产效应逐渐降低 (图 5)。C/N 值  $< 20$  时可增产 49.1%, 是 C/N 值  $\geq 300$  时增产效果 (3.0%) 的 16.4 倍。此外, C/N 值分别在  $20\text{--}50$ 、 $50\text{--}100$  时, 分别增产 46.0%、19.3%, C/N 值  $> 100$  时, 无显著增产作用。

施用碱性生物质炭能显著增产 ( $P < 0.05$ ), 施用酸性生物质炭则会引起设施大棚作物减产。如图 5 所示, 当生物质炭的  $\text{pH} < 7$  时, 大棚果蔬减产 17.5%。pH 值在  $9\text{--}10$  时, 可增产 39.1%, 远高于其他 pH 值范围的生物质炭的增产效果。但当 pH 过高, 增产效果会降低, 当生物质炭  $\text{pH} \geq 10$  时, 仅增产 14.1%。生物质炭 pH 值介于  $7\text{--}8$  或  $8\text{--}9$  时, 可分别增产 22.4% 和 21.6%。



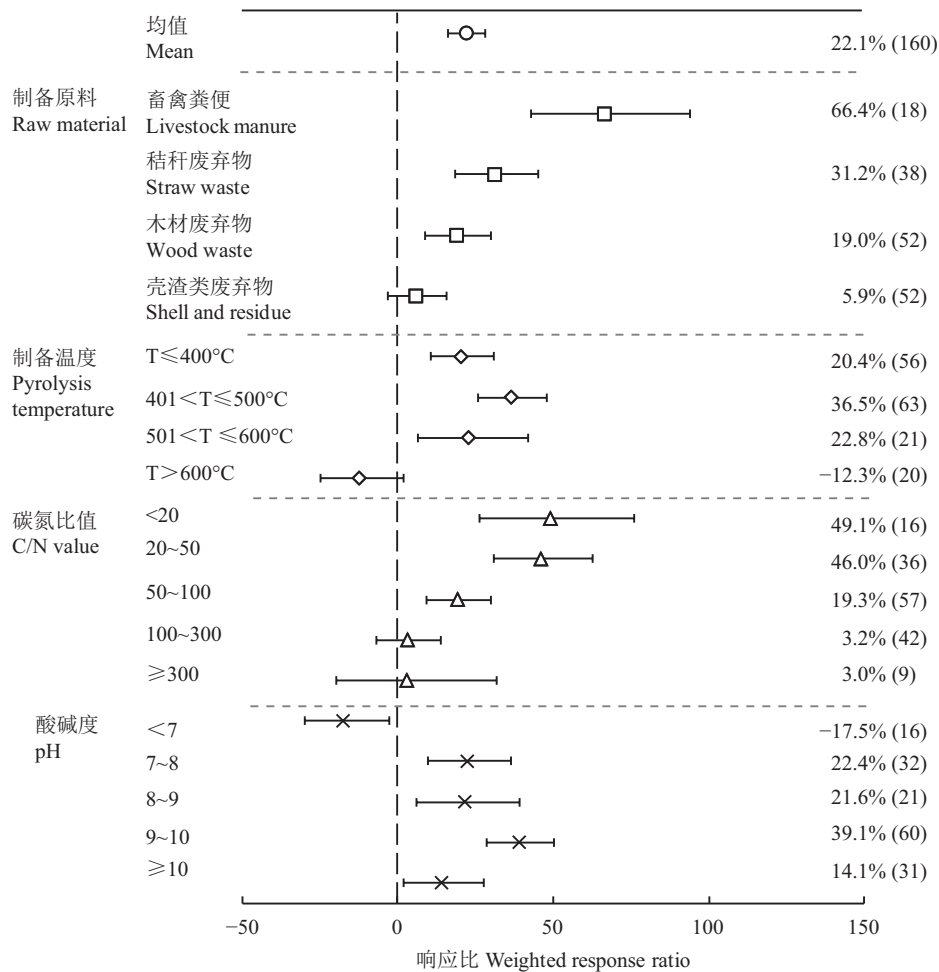


图 5 生物质炭特性对设施大棚果蔬产量的影响

Fig. 5 Effects of biochar characteristics on yields of main fruit and vegetables in greenhouse

[注 (Note): 括号内数字为样本数 Digital in parentheses are the number of samples.]

### 3 讨论

#### 3.1 生物质炭对设施大棚土壤肥力的影响

生物质炭的制备原料来源广泛, 性质差异明显, 是影响生物质炭特性的主要因素之一。本研究结果表明, 不同生物质炭特性对设施土壤肥力的影响存在差异。生物质炭虽然经历了破碎和热解, 但仍保持原材料的基本形貌, 并在化学组成上与原材料的元素配比相似<sup>[18]</sup>。Keri 等<sup>[24]</sup>研究表明, 畜禽粪便生物质炭含大量稳定的芳香族结构及丰富的无机矿物质, 并浓缩了非挥发的矿物质如磷、钾等元素。因此, 畜禽粪便类生物质炭相比用木材、秸秆等原材料制备的生物质炭而言, 保留了畜禽粪便养分含量高的特点<sup>[25]</sup>, 而且因其具有较高的 pH, 是良好的土壤调理剂和有机肥生产辅料<sup>[26]</sup>, 增产效果也最佳。

生物质炭施用后可有效提高土壤养分含量, 特别是对于土壤速效磷含量, 提高幅度可达 80.7%。可

能的原因, 一方面是生物质炭本身灰分含量高<sup>[27]</sup>, 矿物质营养丰富, 提高了土壤养分总量; 另一方面是生物质炭巨大的比表面积对磷具有较强的吸附作用, 能有效固持养分, 减缓磷在土壤中的固定, 增强土壤的供磷能力<sup>[28]</sup>。此外, 由于生物质炭本身的 C/N 高, 生物质炭的输入通常也会导致土壤体系 C/N 值的改变, 从而对土壤微生物的代谢活动和种群数量以及群落结构等产生一系列深远影响<sup>[29]</sup>。何玉亭等<sup>[30]</sup>在研究两种不同生物质炭对微生物群落丰度的影响时发现, 施用 4% 的烟杆生物质炭与桑条生物质炭, 微生物群落最丰富, 当施用量提高到 6% 时, 土壤真菌、放线菌及细菌数量均显著增加, 主要原因是生物质炭施入土壤后, 导致土壤表面积增加, 且其多孔结构为微生物提供活动场所, 使得土壤生态功能得到改善, 微生物的繁殖能力增强<sup>[31]</sup>。且土壤固氮菌、纤维素分解菌数量的增加, 可增强土壤有机氮的矿化, 进而提高土壤养分有效性<sup>[32]</sup>。

生物质炭由于含有矿物元素形成的碳酸盐,其表面富含酸性基团,但一般呈碱性,有利于改良土壤酸性<sup>[14]</sup>,因此,生物质炭的施用具有明显的石灰效应。设施土壤由于连续种植,土壤还存在盐碱化问题,施用生物质炭后,不仅可改良土壤酸性状况,继续施用富含  $K^+$ 、 $Ca^+$  和  $Mg^+$  的生物质炭还可以有效改善设施土壤盐基饱和度<sup>[33]</sup>,从而调节土壤 pH 和降低土壤盐渍化程度。CEC 也是衡量土壤质量的重要指标,高 CEC 可使土壤淋溶性降低,对养分的固定能力增强。本研究表明生物质炭施用后可显著提高土壤 CEC,这主要是由于生物质炭表面含有大量的  $-COOH$  和  $-OH$  等含氧活性基团,这些基团使得生物质炭表面带有负电荷,使其具有较高的 CEC<sup>[27]</sup>。

### 3.2 生物质炭对设施大棚果蔬产量的影响及其作用机理

从整合分析结果可以看出,生物质炭低量施用条件下对设施栽培果蔬增产效果显著。其主要原因是生物质炭主要通过改善土壤理化性质以及养分供应状况来影响果蔬的产量。一方面,生物质炭因其本身含有多种作物生长所必需的营养元素,如 C、N、P、Ca、K、Mg 等可直接提升土壤肥力,从而促进作物生长;另一方面,可通过显著提升土壤 pH,改善土壤酸性,来实现果蔬增产<sup>[34-35]</sup>。本研究发现,随着生物质炭 pH 值的提高,果蔬产量提高幅度先增后减,这可能与设施土壤本身的酸碱度有关<sup>[36]</sup>。当生物质炭 pH 值过高,施入土壤后会导致部分营养元素活性降低<sup>[37]</sup>,抑制植物生长;此外,土壤 pH 也是影响土壤氮转化的重要因素,一般认为土壤 pH 越高,土壤氮挥发越剧烈<sup>[38]</sup>,而土壤氮损失会影响作物增产。杨帆等<sup>[39]</sup>研究发现,添加生物质炭后,红壤 pH 值升高,引起氮挥发增加,使得土壤  $NH_4^+-N$  含量减少 13.0%。张登晓等<sup>[40]</sup>研究结果也表明,与对照相比,添加生物质炭分别降低土壤中  $NH_4^+-N$  和  $NO_3^--N$  60.0% 和 77.0%。可能原因是生物质炭在土壤中释放的有机物质抑制亚硝酸氧化,硝化作用没有进行完全<sup>[41]</sup>,因此产物主要是亚硝氮,导致土壤中  $NO_3^--N$  浓度下降。另外,增产效应也由于生物质炭施用后土壤孔隙度的增大而提高。Singh 等<sup>[42]</sup>在探究生物质炭输入对不同土质碳氮损失的实验中发现,生物质炭的多孔性改善了土壤通气状况,抑制了厌氧条件下氮素转化过程中微生物的反硝化作用,进而使得土壤全氮储量相对增加。

生物质炭的施用量对作物的增产效应也具有一定的影响。本研究表明,生物质炭能有效提高作物

产量,但生物质炭的增产效果随着施用时间延长而下降,这主要是因为,相比新鲜生物质炭,风化炭中的 Ca、Mg、K 等营养元素含量降低<sup>[18]</sup>,且风化过程改变生物质炭输入对土壤生态系统的影响程度<sup>[20]</sup>。因此随着时间推移,生物质炭的增产效果会逐渐下降。本研究发现,生物质炭施入后提高了土壤 CEC,增强了土壤对养分元素的固持能力<sup>[27]</sup>。特别是砂质土壤,对养分的固持能力较差,导致施入的肥料等易从土壤中淋洗出,造成养分的损失,而生物质炭的添加,可将土壤矿物颗粒黏结,形成大的土壤团聚体,在保护生物质炭不被微生物快速分解的同时,还可调节土壤中水分和氧气含量。在黏质土壤中,添加生物质炭后有利于土壤团聚体的形成,也同样有助于土壤结构的改善,从而促进作物的生长<sup>[43]</sup>。牛亚茹等<sup>[44]</sup>研究发现施用不同量生物质炭对黄瓜产量和茎叶干重均没有影响,因其所选试验地土壤肥力较高,黄瓜种植过程中施肥量也较大,这些因素可能削弱了生物质炭的增产效应。而沈盟等<sup>[45]</sup>也发现 3 种不同施用量均可提高番茄产量,其中以低施用量的增产效果最好,高施用量因生物质炭的施加增加大量成本导致最终亏损。

## 4 结论

生物质炭类型及施用量是影响设施土壤肥力与果蔬产量的关键因素。合理施用生物质炭能显著提高设施土壤 pH,改善土壤养分供应状况,从而对果蔬具有显著的增产效果。综合考虑生物质炭制备原料与工艺,以畜禽粪便类为原料,在 400~500℃ 下热解、获得 C/N 值低于 50 的生物质炭,在提高设施果蔬产量方面具有更好的应用前景。生物质炭的施用会增加土壤碱度,引发设施土壤生态环境的改变,包括对土壤微生物结构、作物生长、金属离子活性甚至农药等污染物间接方面的影响及其作用机理,仍有待进一步深入研究。

### 参 考 文 献:

- [1] 王建军. 蔬菜设施栽培技术[M]. 武汉: 中国社会科学出版社, 2010.  
Wang J S. Vegetable facilities cultivation technology [M]. Wuhan: China Social Press, 2010.
- [2] 房毅. 设施农业培育健康蔬菜[J]. 农业知识, 2015, (16): 27-28.  
Fang Y. Enterprise agriculture to cultivate healthy vegetables[J]. Agricultural Knowledge, 2015, (16): 27-28.
- [3] 任晓艳. 白银市日光温室土壤养分动态研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学硕士论文, 2008.  
Ren X Y. Dynamics of soil nutrients in solar greenhouse in Baiyin [D]. Lanzhou: MS Thesis of Gansu Agricultural University, 2008.

- [4] 文方芳. 种植年限对设施大棚土壤次生盐渍化与酸化的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016, (4): 49–53.  
Wen F F. Effects of planting years on soil secondary salinization and acidification in greenhouse[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016, (4): 49–53.
- [5] 唐冬, 毛亮, 支月娥, 等. 上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐含量调查及典型对应分析[J]. 环境科学, 2014, (12): 4705–4711.  
Tang D, Mao L, Zhi Y E, *et al.* Characteristics and typical correspondence analysis of secondary salinized soil salts in Shanghai suburbs[J]. Environmental Science, 2014, (12): 4705–4711.
- [6] 高新昊, 张英鹏, 刘兆辉, 等. 种植年限对寿光设施大棚土壤生态环境的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1452–1459.  
Gao X H, Zhang Y P, Liu Z H, *et al.* Effects of planting years on soil ecological environment of Shouguang greenhouse[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1452–1459.
- [7] IBI. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil[Z]. International Biochar Initiative (IBI–STD–01), 2012.
- [8] 李博, 李巧玲, 范长华, 等. 施用生物质炭与硝化抑制剂对菜地综合温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2651–2657.  
Li B, Li Q L, Fan C H, *et al.* Effects of application of biochar and nitrification inhibitor on greenhouse effect of vegetable field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(9): 2651–2657.
- [9] Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, *et al.* Sustainable biochar to mitigate global climate change[J]. Nature Communications, 2010, 1(5): 56–57.
- [10] 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 application of biomass carbon on physical properties of different types of soils[J]. Zhejiang Agricultural Sciences, 2014, (10): 1617–1619.
- [11] Feng L, Li G T, Lin Q M, *et al.* Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(3): 525–532.
- [12] 卜晓莉, 薛建辉. 生物质炭对土壤生境及植物生长影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 535–540.  
Bu X L, Xue J H. Studies on the effects of biochar on soil habitat and plant growth[J]. Journal of Eco-Environmental Sciences, 2014, 23(3): 535–540.
- [13] Ameloot N, Neve S D, Jegajeevagan K, *et al.* Short-term CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions and microbial properties of biochar amended sandy loam soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57(3): 401–410.
- [14] 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.  
Liu Y X, Wang Y F, Lü H H, *et al.* Effects of different rice straw and bamboo charcoal application on yield, quality and soil physical and chemical properties of small vegetables[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(6): 1438–1444.
- [15] 肖永恒, 李永夫, 王磊磊, 等. 竹叶及其生物质炭输入对板栗林土壤N<sub>2</sub>O通量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 697–706.  
Xiao Y H, Li Y F, Wang Z L, *et al.* Effects of bamboo leaves and their biochar additions on soil N<sub>2</sub>O flux in a Chinese chestnut forest[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(3): 697–706.
- [16] 郭明, 李新. Meta分析及其在生态环境领域研究中的应用[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 911–919.  
Guo M, Li X. Meta-analysis: A new quantitative research approach in eco-environmental sciences[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(5): 911–919.
- [17] 孙向阳. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.  
Sun X Y. Soil science [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010.
- [18] 吴伟祥, 孙雪, 董达, 等. 生物质炭土壤环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
Wu W X, Sun X, Dong D, *et al.* Environmental effects of biochar in soil [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [19] 彭少麟, 郑凤英. Meta分析及MetaWin软件[J]. 生态环境学报, 1999, (4): 295–299.  
Peng S L, Zheng F Y. Introduction of MetaWin software[J]. Ecology and Environmental Sciences, 1999, (4): 295–299.
- [20] Gurevitch J. MetaWin version 2.14. Statistical software for meta-analysis[M]. 2000.
- [21] Adams D C, Gurevitch J, Rosenberg M S. Resampling tests for meta-analysis of ecological data[J]. Ecology, 1997, 78(4): 1277–1283.
- [22] 蔡岸冬, 张文菊, 杨晶晶, 等. 基于Meta-Analysis研究施肥对中国农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 中国农业科学, 2015, (15): 2995–3004.  
Cai A D, Zhang W J, Yang P P, *et al.* Effect degree of fertilization practices on soil organic carbon and fraction of croplands in China—based on Meta-analysis[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, (15): 2995–3004.
- [23] Cao X, Harris W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(14): 5222.
- [24] Keri B C, Patrick G H, Minori U, *et al.* Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar[J]. Bioresource Technology, 2012, 107(2): 419–428.
- [25] Brewer C E, Schmidt-Rohr K, Satrio J A, *et al.* Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems[J]. Environmental Progress and Sustainable Energy, 2009, 28(3): 386–396.
- [26] Amir H, Javier M G, Isabel M, *et al.* Chicken manure biochar as liming and nutrient source for acid Appalachian soil[J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(4): 1096–1106.
- [27] 王怀臣, 冯雷雨, 陈银广. 废物资源化制备生物质炭及其应用的研究进展[J]. 化工进展, 2012, 31(4): 907–914.  
Wang H C, Feng L Y, Chen Y G. Advances in biochar production from wastes and its applications[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(4): 907–914.
- [28] Wardle D A, Nilsson M C, Zackrisson O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus[J]. Science, 2008, 320(5876): 629.
- [29] 宋延静, 张晓黎, 龚骏. 添加生物质炭对滨海盐碱土固氮菌丰度及群落结构的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(8): 2168–2175.  
Song Y J, Zhang X L, Gong J. Effects of adding biomass carbon on



- abundance and community structure of azotobacteria in coastal saline soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(8): 2168–2175.
- [30] 何玉亭, 王昌全, 沈杰, 等. 两种生物质炭对红壤团聚体结构稳定性和微生物群落的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(12): 2333–2342.
- He Y T, Wang C H, Shen J, *et al.* Effects of two biochars on red soil aggregate stability and microbial community[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(12): 2333–2342.
- [31] Rutigliano F A, Romano M, Marzaioli R, *et al.* Effect of biochar addition on soil microbial community in a wheat crop[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 60(20): 9–15.
- [32] Xu N, Tan G G, Wang H Y, *et al.* Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2016, 74: 1–8.
- [33] 陈雪娇, 杨丹丹, 李贵桐, 等. 不同温度生物质炭复混肥对小白菜和樱桃萝卜产量及硝酸盐的影响[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(34): 30–34.
- Chen X J, Yang D D, Li G T, *et al.* Effects of different temperature biomass carbon fertilizer on yield and nitrate of Chinese cabbage and cherry[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(34): 30–34.
- [34] Van Z L, Kimber S, Downie A, *et al.* A glasshouse study on the interaction of low mineral ash biochar with nitrogen in a sandy soil[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(6): 569–576.
- [35] Chan K Y, Zwieten L V, Meszaros I, *et al.* Using poultry litter biochars as soil amendments[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2008, 46(5): 437–444.
- [36] 罗煜, 赵立欣, 孟海波, 等. 不同温度下热裂解芒草生物质炭的理化特征分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(13): 208–217.
- Luo Y, Zhao L X, Meng H B, *et al.* Analysis of physical and chemical characteristics of biomass carbon in thermal cracking of different grasses at different temperatures[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(13): 208–217.
- [37] 罗煜, 赵小蓉, 李贵桐, 等. 生物质炭对不同pH值土壤矿质氮含量的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(19): 166–173.
- Luo Y, Zhao X R, Li G T, *et al.* Effects of biomass carbon on mineral nitrogen content in different pH soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(19): 166–173.
- [38] 蒋朝晖, 曾清如, 方至, 等. 不同温度下施入尿素后土壤短期内pH的变化和氨气释放特性[J]. *土壤通报*, 2004, 35(3): 299–302.
- Jiang C H, Zeng Q R, Fang Z, *et al.* Short-term changes of pH and volatilization of ammonia from urea fertilizer in soil under different temperatures[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3): 299–302.
- [39] 杨帆, 李飞跃, 赵玲, 等. 生物炭对土壤氨氮转化的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(5): 1016–1020.
- Yang F, Li F Y, Zhao L, *et al.* Influence of biochar on the transformation of ammonia nitrogen in soils[J]. *Journal of Agricultural Environmental Sciences*, 2013, 32(5): 1016–1020.
- [40] 张登晓, 周惠民, 潘根兴, 等. 城市园林废弃物生物质炭对小白菜生长、硝酸盐含量及氮素利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1569–1576.
- Zhang D X, Zhou H M, Pan G X, *et al.* Effect of municipal green waste biochar addition on the growth, nitrate content and nitrogen use efficiency of greenhouse pakchoi[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(6): 1569–1576.
- [41] Singh B P, Hatton B J, Balwant S, *et al.* Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1224–1235.
- [42] 刘晓雨. 施用有机物料对农田固碳减排及生产力的影响: 田间试验及整合研究[D]. 江苏: 南京农业大学硕士学位论文, 2013.
- Liu X Y. Effects of soil organic amendment on productivity and greenhouse gas mitigation of croplands: field studies and synthetic analysis [D]. Nanjing: MS Thesis of Nanjing Agricultural University, 2013.
- [43] 牛亚茹, 付祥峰, 邱良祝, 等. 施用生物质炭对大棚土壤特性、黄瓜品质和根结线虫病的影响[J]. *土壤*, 2017, 49(1): 57–62.
- Niu Y R, Fu X F, Qiu L Z, *et al.* Effects of biochar on soil properties, cucumber quality and root-knot nematode disease in plastic greenhouse[J]. *Soils*, 2017, 49(1): 57–62.
- [44] 沈盟, 蒋芳玲, 王珊, 等. 生物质炭施用量对土壤性状和番茄产量的影响[J]. *土壤*, 2017, 49(3): 534–542.
- Shen M, Jiang F L, Wang S, *et al.* Effects of biochar application amount on soil characteristics, yield and fruit properties of tomato[J]. *Soils*, 2017, 49(3): 534–542.