广东农业科学 2021，48（1）：26-34
Guangdong Agricultural Sciences DOI:10.16768/j.issn.1004-874X.2021.01.004

黄庆，刘忠珍，朱根发，魏岚，黄连喜，李翔，黄玉芬，陈伟盛 . 生物质炭基肥料及作物施用技术研究进展［J］. 广东农业科学，2021，48（1）：26-34.

生物质炭基肥料及作物施用技术研究进展

黄　庆[1]，刘忠珍[1]，朱根发[2]，魏　岚[1]，黄连喜[1]，李　翔[1]，黄玉芬[1]，陈伟盛[1]

（1. 广东省农业科学院农业资源与环境研究所 / 农业农村部南方植物营养与肥料重点实验室 / 广东省农业资源循环利用与耕地保育重点实验室，广东 广州 510640；
2. 广东省农业科学院环境园艺研究所，广东 广州 510640）

摘　要：随着生物质炭在农业领域的应用研究不断深入，以生物质炭为载体，与常规化学肥料或有机肥等材料结合的新型肥料—生物质炭基肥料（biochar-based fertilizer）的研制及其在农作物上的试验研究越来越多。相关研究表明，生物质炭基肥料具有诸多优点，如控释 / 缓释养分的释放、改善土壤理化性状、增强抗旱能力、减少养分资源的损失和提高肥料利用率等。深入挖掘生物质炭基肥料的环境友好性和资源节约性潜力日益受到重视。通过综合分析多年来公开发表的生物质炭基肥料试验研究文献，阐述了各种生物质炭基肥料的组配材料、造肥制粒配方与工艺技术，以及生物质炭基肥料在水稻、玉米、小麦、蔬菜、薯类、花生、大豆、烟草、棉花、牧草和果树等作物上的施用技术，尤其是生物质炭基肥料对作物生长发育、产量、农产品品质以及土壤的影响等方面的研究进展。根据试验研究中存在的问题及技术需求，提出今后生物质炭基肥料的研究设想，展望其在土壤环境、作物高产高效以及绿色生态等方面的系统研究方向。

关键词：生物质；炭基肥料；作物；产量；品质；土壤

中图分类号：S147.2；TQ446　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1004-874X（2021）01-0026-09

Research Progress in Biochar-based Fertilizer and Its Application Technology for Crops

HUANG Qing[1], LIU Zhongzhen[1], ZHU Genfa[2], WEI Lan[1], HUANG Lianxi[1], LI Xiang[1], HUANG Yufen[1], GHEN Weisheng[1]

（1.*Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/ Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/ Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou* 510640, *China;*
2.*Environmental Horticulture Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou* 510640, *China*）

Abstract：With the development of the application of biochar in agriculture, more and more new fertilizers-biochar-based fertilizers （BF）, which are based on biochar and combined with conventional chemical fertilizers or organic fertilizers, have been developed and tested on crops. Related researches have shown that, biochar-based fertilizer has the advantages of controlled-release/slow-release of nutrients, improving soil physical and chemical properties, strengthening drought-resistant capacity, reducing the loss of fertilizer nutrient resources and improving fertilizer utilization rate. It has been paid more attention to tap the environmental friendly and resource saving potential of biochar based fertilizer. Based

收稿日期：2020-09-27

基金项目：云浮市云安区花卉苗木产业园科技对接服务项目（202002A02）；广州国家现代农业产业科技创新中心创建项目（粤农农函〔2019〕451 号）；广东省现代农业产业技术体系创新团队项目（2020KJ109，2020KJ148）

作者简介：黄庆（1965—），男，研究员，研究方向为土壤改良与作物高产优质施肥技术，E-mail：wonghenry@126.com

通信作者：刘忠珍（1977—），女，博士，研究员，研究方向为土壤污染治理，E-mail：lzzgz2001@163.com

on the comprehensive analysis of the published literature on biochar based fertilizer experiments, this paper expounds the composition materials, fertilizer formulation and granulation technology of various biochar based fertilizers, as well as the application effects of biochar-based fertilizers on rice, corn, wheat, vegetable, potato, peanut, soybean, tobacco, cotton, forage and fruit trees, especially research progress in the effects of biochar-based fertilizers on the growth, yield and quality of these crops and soil. According to the existing problems and technical requirements in the experimental research, the research ideas of biochar-based fertilizers in the future are put forward, and the comprehensive and systematic research direction on soil environment, high yield and high efficiency of crops and green ecology are prospected.

Key words: biomass; biochar-based fertilizer; crop; yield; quality; soil

近年来，粮食生产和耕地土壤退化之间的矛盾日益突出，根据《中国耕地质量等级调查与评定》报告，全国耕地评定为 15 个等别，1 等耕地质量最好，15 等最差。我国耕地平均质量等别为 9.80 等，质量水平总体偏低，其中中低产地占全国耕地总面积的 67.35%[1]。耕地土壤质量退化问题制约了我国农业的可持续发展，也逐步影响到我国粮食安全。肥料过量施用是导致耕地肥力退化的主要原因之一，因此，农业部于 2015 年 2 月 17 日制定颁布了《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》，提出了推进新肥料新技术应用。国家农业政策围绕“稳粮增收调结构，提质增效转方式”的工作主线，大力推进化肥减量提效，积极探索产出高效、产品安全、资源节约、环境友好的现代农业发展之路。

我国秸秆废弃物每年平均产生量约为 7.35 亿 t，一直以来，大量农作物秸秆处理主要以还田和焚烧，如果没有得到更低碳更优化的合理处理利用，不仅造成了直接的资源浪费，也导致了间接的环境风险，成为全面推进生态建设中必须面对并加以解决的问题[2]。研究表明，作物秸秆不但是优质的土壤有机质碳源，同时也是良好的生物质原材料，秸秆的炭化处理较其他处理方式可以更有效降低氮和磷养分的损失率。不同轮作制下秸秆炭化还田较秸秆直接还田均能提高作物产量和土壤理化性状[3]，说明农作物秸秆炭化比其他形式的资源化更具优势，具有更大的研究价值和市场前景。

生物质炭（Biochar）是以作物秸秆等农林植物废弃物为原料，在绝氧或有限氧气供应条件下，400~700 ℃热解得到的稳定固体富碳产物。国内外关于生物炭在农业上的试验研究主要集中于改良土壤、对土壤环境质量的影响等方面。近年来，随着生物炭应用研究的不断深入，生物炭与肥料结合的研究日益受到重视，先后制定了相关的行业标准——生物质炭基肥料（Biochar based fertilizer）和生物炭基有机肥（Biochar-based organic fertilizer）[4-5]。本文综合分析多年来生物质炭基肥料的组成原材料与制备工艺配方技术，及其在主要农作物上的试验研究结果，以期为研发适用于不同土壤和作物的生物质炭基肥料，为其高效环保施用技术提供参考。

1 生物质炭基肥原材料与制备工艺

Joseph 等[6]研究表明，生物质炭具有复杂的碳晶格结构，具有芳香族和脂肪族结构域、酸性和碱性基团、空位、金属和非金属元素以及自由基。生物质炭也有独立的矿物氧化物、硅酸盐和盐相，以及大小不同的有机分子。施入土壤后存在于植物根际的生物质炭，有效参与“土壤－微生物－植物”连续体的化学和生物过程，包括养分循环、金属螯合和稳定、氧化还原反应和自由基清除等。作为生物质炭基肥料的基本载体，生物质炭的原材料及其制备工艺至关重要，作为生物质炭基肥料的载体成分，它们决定了生物质炭基肥料的理化性状，影响着土壤的供肥保水性，对土壤、肥料养分、作物的产量和农产品品质等产生举足轻重的影响。

1.1 生物质炭原材料与制备温度

制备生物质炭的原材料来源十分广泛，不同来源的生物质理化性状千差万别。根据国际生物质炭协会（IBI）制定的生物质炭标准《IBI Biochar Standards V2.1 Final（2015）》[7]。 生物质原料可以分为“未加工”原料和“加工”原料两大类，未加工原料指直接取自植物界或仅被机械处理，但未经动物体或者人为化学处理过的生物材料。根据近年来公开发表的文献，绝大多数制备生物质炭原材料均属于“未加工”的原料，具体有竹子[8-9]、小麦秸秆[10-13]、玉米秸秆[10,14-18]、水稻谷壳[9,13,19-20]、花生壳[10,13,21]、甘蔗渣[22]、棉花秸秆[21,23-24]、园林废弃物[25]、玉米芯[26]、烟草秸秆[27]等。只有极少部分是所谓被“加工”过的原料，例如猪粪[28]和制糖虑泥[29]

等。可以看出，从植物型的农作物秸秆、园林废弃物，到禽畜粪便、甚至工业有机废弃物等均可以作为生物质炭潜在的制备原料。

温度是热解生物质向生物质炭方向转变的必要条件，不同原料热解炭化温度所得到的生物质炭的理化性状表现出较大差别。制备条件中，裂解温度是影响生物质炭特性的主要因素。一般来说，提高温度可以增加生物质炭的固碳含量。制备温度可以明显影响生物质炭的孔隙度和吸附性能，随着制备温度的提高，生物质炭芳香化程度增强，化学稳定性增强[30]。从一系列文献中可以看出，水稻稻壳炭化温度为 400 ℃[20]，园林废弃树干枝条混合物[25]、玉米秸秆[18]炭化温度为 400 ℃，小麦秸秆[12]、花生壳[31]炭化温度为 350 ℃，甘蔗渣炭化、制糖虑泥炭化温度均为 500 ℃[22,29]，玉米芯[26]炭化温度为 450 ℃。利用流化床热解烟草秸秆制备生物质炭也是一大工艺特色[27]。以生物质炭和膨润土为原料，采用微波辐射法合成可生物降解的缓释 NPK 复混肥，具有较好的保水保肥性[32]。在现有文献中，有不少试验研究所采用的生物质炭基肥料并没有提供生物质炭制备的温度参数。作为组成生物质炭基肥料的主要原材料——农作物秸秆的炭化温度绝大多数采用 350~500 ℃的热解温度，采用较高一点的炭化温度基本上也不会超过 700 ℃[19]。

1.2 生物质炭基肥料的制备工艺

根据中华人民共和国农业行业标准《生物炭基肥料NY/T3041–2016》，生物质炭基肥料分为Ⅰ型和Ⅱ型：Ⅰ型总养分（$N+P_2O_5+K_2O$）≥20%，生物质炭（以C计）≥9%；Ⅱ型总养分（$N+P_2O_5+K_2O$）≥30%，生物质炭（以C计）≥6%[4]。按生物质炭组合的材料类型，生物质炭基肥料可以分为生物质炭基有机–无机复混肥（Biochar–based organic inorganic compound fertilizer）、生物质炭基有机肥（Biochar–based organic fertilizer）和生物质炭基无机肥（Biochar–based inorganic fertilizer）等[33]。

广义上，“生物质炭 + 肥料”都可以称之为生物质炭基肥料，其中生物质炭是一个载体，所含有作物必须的营养成分不多，只在其灰分中含有少量的磷、钾，以及钙、镁、硅等中微量元素。因此，提供作物生长发育所必须的营养成分主要是肥料组分。生物质炭基肥料的肥料组成大多采用“生物质炭 + 复混肥”的方式，部分采用“生物质炭 + 单质化学肥料”的方式[18,20,34–35]，也可以是“生物质炭 + 有机肥 / 生物有机肥”[10]。同时采用生物质炭、化肥和有机肥混合作为生物质炭基肥料的方式也是可行的[19]。更为复杂的是利用生物质炭、氮磷钾肥料和猪粪堆肥制成具有土壤改良效果的生物质炭基肥料[10,36]。

生物质炭基肥料的制备多数采用常规的有机 – 无机复混肥的生产工艺，将生物质炭与有机肥、无机复混肥或单质肥料直接粉碎掺混而成。具体采用的化学氮肥有尿素、氯化铵，同时含有氮和磷素的复合肥磷酸一铵、磷酸二铵，钾肥多数以氯化钾、硫酸钾为主[18,20,34–35]。

生物质炭与肥料混合后可以经过挤压工艺流程进行造粒[16]；用生物质炭对尿素进行包膜制成生物黑炭包裹尿素[23]；采用平底造粒机，将生物质炭对尿素和过磷酸钙颗粒进行包衣，制得类似于有机 – 无机复混生物质炭基肥料产品[37]；通过熔融高压、水溶浸泡等更加复杂的工艺制备生物炭质基肥料[25]；利用糖厂滤泥炭化，虑泥生物质炭与尿素以 5 ∶ 1 的比例吸收尿素产生缓释生物质炭基肥料颗粒[29]。有的试验还添加褐煤[20]、木醋液[15,17,34]、膨润土[32]等强化某种功能的辅助材料。

根据作物的营养需求，生物质炭基肥料中的“肥：炭”按不同比例进行调配，可以是 8 ∶ 2 或者 7 ∶ 3 配比[14]。与普通的复混肥料相似，生物质炭基肥料所含肥分 $N–P_2O_5–K_2O$ 比例不同，氮磷钾总养分也不尽相同。根据不同作物的需肥特点和施肥量，生物质炭基肥料中氮磷钾总养分变幅为 28.8%~51%[13,20–21,28,38–40]。此外，由于造肥制粒工艺技术、结合改土和提质增效的需要，生物质炭基肥料所含的碳量也不尽相同，生物质炭基肥所含 C 量为 18% ~35%[9,16,28,35,38,41]。

从化学组成来讲，生物质炭基肥料是一种有机 – 无机复混肥料。总体上，生物质炭基肥料吸收了无机复混肥和传统有机肥料的长处，同时克服了两者各自的缺点，炭基复混肥料可以达到肥效缓释可控、土壤增碳和农业减排的效果。目前，不少试验研究直接利用市售的生物质炭基肥料产品作为供试材料[28,34,38,40,42–46]。

2 生物质炭基肥料作物施用技术和效果

从已有的试验研究来看，生物质炭基肥料的应用涉及大田作物有水稻、玉米、小麦、花生、马铃薯、甘薯、大豆、棉花、烟草、黑麦草、砀山酥梨和蔬菜等，其中蔬菜作物包括白菜、番茄、辣椒、青椒、朝天椒、小白菜、芹菜和生菜等。根据公开发表的文献，整理出生物质炭基肥料供

试作物、试验方法、炭基肥的组成及其施用技术、施用量和施用效果等（表 1）。

从表 1 可以看出，在水稻、玉米和小麦等粮食作物上的系列试验研究均证明，生物质炭基肥能提高肥料利用率，促进植株对氮磷钾养分的吸收，增加植株各部位的生物量，从而提高作物产量[12,19,28]；在减少施 N 量的情况下，生物炭基肥依然能有效提高水稻植株的吸氮、磷和钾能力，并提高氮素偏生产力[10,47]。生物炭基肥有效提高水稻穗粒数、单穗重和降低瘪粒率[8]；对玉米的穗长、穗粗、出籽率、穗粒数和千粒重均有促进作用[34]；增加小麦的千粒重、每穗粒数及每 667 m² 穗数，同时提高氮肥偏生产力[22,42,49]。值得关注的是，炭基肥还能使水稻根际土壤与根膜电位差增加，从而降低根系养分积累所需的自由能，提高水稻植株养分含量和生物量[11]。

生物炭基肥能有效提高蔬菜作物的光合效率和 SPAD 值[41]，增加植株各部位的生物量[13,31]，从而提高蔬菜作物产量[9, 16,21,23,25,41]；同时，生物炭基肥能有效改善蔬菜收获物的品质，具体表现在提高菜品维生素 C[13,16,21,23,25,41]、可溶性糖[21]和蛋白质含量[13]，降低硝酸盐含量等[9,16,21,23,25,41]。

表 1　生物质炭基肥料作物施用技术和效果

Table 1　Application techniques and effects of biochar-based fertilizer

作物 Crop	试验方法 Method	炭基肥及其施用量 BF and application amount	施用效果 Application effect	文献 Reference
水稻 Rice	小区试验	炭基肥，45%（13 — 17 — 15），生物炭 ≥ 18%，用量 600 kg/hm²	2 个试验点比磷酸二铵＋尿素＋氯化钾处理分别增产 2.3% 和 7.4%；比复混肥料＋尿素常规处理分别增产 1% 和 7%	[28]
	小区试验	竹炭生物有机肥 2500 kg/hm²+ 碳能复合微生物肥料 200 kg/hm²+ 尿素（追肥），用量 200 kg/hm²	提高穗粒数、单穗重，降低瘪粒率效果好于竹炭生物有机肥 2 500 kg/hm²+ 缓释复合肥 100 kg/hm²+ 尿素（追肥）200 kg/hm² 处理	[8]
	小区试验	炭基肥，基施 450 kg/hm²	施氮量减少 19.94%，经济产量提高 6.70%；籽粒与茎叶吸氮量比值提高 11.64%~59.91%；提高氮素偏生产力 33.41%~74.09%	[10]
	袋栽	土壤添加 0.25% 活化麦秸炭基肥：200 g 麦秸炭 +15 g 尿素 +15 g 膨润土 +15 g 磷矿 +5 gFe_2O_3+5 g $FeSO_4.7H_2O$	土壤 Eh 增加 85 mv，根际土壤与根膜电位差增加 65 mv，使植株养分含量和生物量增加	[11]
	2 年小区试验	生物炭 + 测土配方肥 + 厩肥 +$ZnSO_4$	植株对氮、磷和钾的吸收量分别为 107.72、28.16、69.34 kg/hm²	[47]
玉米 Corn	盆栽试验	80% 配方肥 +20% 玉米秸秆炭、70% 配方肥 +30% 玉米秸秆炭 2 个配比的生物质炭基肥料，基施 360 kg/hm²	2 种配方的生物炭基肥，土壤有效磷分别提高了 34.95% 和 24.04%	[14]
	盆栽试验	含 40% 木醋液的生物质炭以 20% 的质量分数与化肥混合得炭基肥，40%（16–10–14），用量 0.8 g/kg 土	最大叶面积比提高 12.54%。地下部生物量提高 9.16%，植株含氮量增加 27.65%，氮肥利用率增加 52.59%	[15]
	小区试验	生物炭 + 有机肥 + 化肥混施：氮、磷和钾用量分别为 240、120、150 kg/hm²	地上部氮、磷、钾素累积量增幅分别为 35.33%、72.18% 和 20.16%；氮、磷、钾肥利用率分别提高 83.72%、351.41% 和 107.85%；穗、茎叶和地上部总鲜重分别增加 24.04%、24.97% 和 24.62%。穗粒数、百粒重和籽粒产量分别增加 20.68%、19.28% 和 25.32%	[19]
	小区试验	炭基肥，45%（25–10–10），用量 750 kg/hm²	生育期缩短了 7 d、株高增加 9.0 cm、穗位高度提升 2.6 cm、穗长增加 0.7 cm、行粒数增加 2.2 粒、百粒重增加 4.0 g、产量达 14 924 kg/hm²，增产率 8.48%	[20]
	盆栽试验	生物炭、小麦秸秆和发酵鸡粪的施用量均为风干土质量的 1.5%。每 kg 土施 N0.20 g、P_2O_5 0.15 g、K_2O 0.20 g	生物炭 + 秸秆、生物炭 + 发酵鸡粪，植株生物量分别提高 51.75% 和 69.33%、株高分别提高 29.72% 和 42.05%	[12]
	小区试验	尿素（23）+ 氯化铵（22）+ 磷酸一铵（10）+ 氯化钾（1）+ 碳粉（40）+ 粘合剂（4）+ 木醋液（7）质量份配比的生物炭基肥 1 080 kg/hm²	穗长、穗粗、出籽率、穗粒数和千粒重分别增加 1.0cm、0.09cm、0.4%、20 粒和 10.6g，增产 10.94%	[34]
	小区试验	玉米秸秆生物炭基肥，45%，（25–10–10），用量 600 kg/hm²	成熟期 SPAD 值增加 7.47%；土壤 pH、有机质、碱解氮、有效钾、钙和钠含量分别提高 12.62%、15.96%、5.83%、3.88%、7.53% 和 22.86%；玉米鞘干重、地上部干重分别增加 9.30% 和 6.31%	[48]
小麦 Wheat	盆栽试验	甘蔗渣生物炭 + 尿素 + 过磷酸钙 + 氯化钾制备的生物炭基肥	与尿素 + 过磷酸钙 + 氯化钾 + 粉煤灰处理比较， 植株 N、P 吸收量分别提高了 19.07% 和 15. 00%	[22]
	小区试验	生物炭基肥，40%（15–15–10），基施 50 kg/667m²	千粒重、每穗粒数及每 667 m² 穗数分别提高 0.5 g、1.2 粒和 0.5 万穗，增产率 5.8%	[42]
	小区试验	棉花秸秆、玉米秸秆、小麦秸秆、稻壳、花生壳和生活废弃物炭化制成的 6 种炭基肥颗粒，37%（18–9–10），基施 300 kg/hm²	增产 20%~35.4%，氮肥偏生产力提高 17.9%~34.4%；显著降低了麦田 N_2O 的排放 56.0%~65.4%	[49]

（续表 1）

作物 Crop	试验方法 Method	炭基肥及其施用量 BF and application amount	施用效果 Application effect	文献 Reference
蔬菜 Vegetable	4 季盆栽试验	花生壳炭 + 海鲜贝壳粉 + 花生壳 + 腐殖酸 + 无机养分 30 d 堆肥，用量占土壤 1.5%	白菜地上部、地下部和总生物量分别比对照提高 153%、219% 和 186%	［31］
	小区试验	50% 复合肥 +50% 竹炭基肥、50% 复合肥 +50% 稻壳炭基肥 2 处理	番茄产量分别提高 8.5% 和 23.2%，番茄氮素农学利用率分别提高 215.5% 和 231.2%；辣椒氮素利用率分别提高 92.6% 和 138.1%；番茄和辣椒果实硝酸盐含量分别降低 18.2%~27.7% 和 32.0%~40.4%	［9］
	大棚小区试验	麦秸炭基肥、稻壳炭基肥、花生壳炭基肥，均为 37%（18–9–10）	麦秸炭基肥使青椒氮素农学利用率、根长、地上部生物量和 Vc 含量分别提高 24.98 kg/kg、10.9%、32.8% 和 51.3%；稻壳炭基肥和花生壳炭基肥处理使青椒 Vc 含量分别提高 69.5% 和 62.4%，可溶性蛋白质含量均提高 64.7%	［13］
	小区试验	生物炭 + 尿素 + 磷酸一铵 + 硫酸钾挤压造粒炭基肥，28.8%（12–6–10.8），生物炭 30%，用量 2 167.5 kg/hm²	朝天椒鲜椒增产 32.8%、干椒增产 31.6%；硝酸盐含量降低 14.4%、Vc 含量提高 19.3%；氮、磷和钾肥表观利用率分别提高 55.0%、10.3% 和 74.1%	［16］
	日光温室小区试验	生物黑炭包裹尿素：等 N 量、减 N20% 和减 N50% 炭基肥 3 处理	番茄 Vc 含量提高 3.26%–9.54%，硝酸盐含量降低 4.24%~15.31%；等 N 量、减 N20% 炭基肥处理，番茄株高分别提高 7.76% 和 4.31%，产量分别提高 4.29% 和 6.43%	［23］
	小区试验	小麦秸秆炭、花生壳炭、棉花秸秆炭 3 种炭基肥，均为 37%（18–9–10），用量 749.6 kg/hm²	小白菜硝酸盐含量降低 35.38%，可溶性糖和 Vc 含量分别提高 31.12% 和 31.55%；小麦秸秆炭基肥减少 18%，小白菜产量提高 45.03%	［21］
	大棚小区试验	水溶浸泡、熔融高压、直接混合 3 生物炭基尿素，氮、磷、钾用量 300、75、150 kg/hm²	芹菜分别增产 18.66%、14.90% 和 10.85%；硝酸盐含量分别降低 48.24%、44.93% 和 31.73%；Vc 含量提高 7.21%~37.02%；氮肥利用率分别提高 9.94%、11.10% 和 6.93%	［25］
	盆栽试验	高量炭基肥 15 t/hm²	生菜产量提高 24.42%，Vc 含量提高 15.79%，净光合速率提高 64.53%，SPAD 值提高 8.48%，硝酸还原酶增加 29.58%，硝酸盐含量降低 10.88%	［41］
花生 Peanut	小区试验	25% 尿素 +22% 氯化铵 +12% 磷酸一铵 +3% 氯化钾 +35% 炭粉 + 木醋液，基施 600 kg/hm²	主茎高、根瘤菌数和叶面积系数分别增加 8.90%、35.84% 和 16.67%；单株果数、出仁率和白果重分别提高 12.8%、8.08% 和 3.89%；增产 16.56%	［35］
	盆栽试验	花生专用炭基肥 36%（10–13–13），C20%，基施 750 kg/hm² 和 1 500 kg/hm²	60–65% 田间持水量，植株地上部分干物质积累量分别提高 52.2% 和 39.9%，产量分别提高 62.0% 和 42.5%，水分生产率分别提高 53.8% 和 9.9%	［38–39］
	小区试验	炭基花生肥，33%（10–13–13），用量 50 kg/667 m²	单株饱果数、百果重、百仁重、出仁率、荚果产量、经济系数分别提高 12.8%、6.9%、2.7%、2.5%、5.2% 和 23.8%	［41］
	4 年微区试验	造粒玉米芯生物炭 1 500 kg/hm²+NPK（55.5–72.0–69.0 kg/hm²），用量 750 kg/hm²	土壤有机碳含量、全氮含量和 pH 分别提高 4.4%、27.9% 和 0.57 个单位	［26］
	小区试验	炭基花生专用肥，36%（10–13–13），用量 N120 kg/hm²、$P_2O_5$105 kg/hm²、K_2O 150 kg/hm²	单株饱果数、单株总果数分别增加 5 .66% 和 8 .31%；单株生产力增加 10.58%，百果质量、百仁质量分别增加 0.25%、1.86%，增产 11.78%	［43］
	4 年定位试验	生物炭基肥 35%（11–11–13），C 6.6%，用量 750 kg/hm²	植株对钾的吸收量增加 28.39%，产量提高 9.80%	［50］
马铃薯 Potato	小区试验	炭基马铃薯专用肥，36%（10–8–18），用量 300、600、900 和 1 200 kg/hm²	茎叶干物质积累量分别提高 21.46%、33.89%、52.11% 和 60.23%，块茎干物质积累量分别提高 2.80%、21.58%、36.26% 和 46.44%；分别增产 26.01%、34.77%、43.39% 和 49.71%	［40］
甘薯 Sweet potato	小区试验	生物炭基肥：39.375 kg/hm²（基肥）+ 39.375 kg/hm²（追施）	单产 53 826.30 kg/hm²，增产 27.90%	［51］
大豆 Soybean	盆栽试验	炭基肥，36%（10–13–13），C20%，肥量 600 kg/hm²	田间持水量 60%~65% 调亏灌溉，植株地上部干重增加 68.59%，水分利用效率提高 55.07%，增产 51.16%	［45］
烟草 Tobacco	小区试验	高碳基肥：用量 1 500、900、600 kg/hm²	改善烟株的农艺性状，提高烤后烟叶的经济性状和品质	［52］
	小区试验	玉米秸秆炭和烤烟专用肥圆盘造粒炭基肥，38%（9–11–18），用量 600 kg/hm²	叶绿素含量、类胡萝卜素含量、挥发性香气物质总含量分别提高 12.0%、20.5% 和 1.2%；烟叶类西柏烷类降解产物含量、生物碱类香气物质含量分别下降 18.9% 和 45.4%	［53］
棉花 Cotton	小区试验	棉秆生物炭 + 磷酸铵 + 尿素 + 硫酸钾 + 硫酸锌 + 硼酸 + 石膏 + 膨润土造粒，32%（11–15–6），用量 919.5 kg/hm²	花蕾数提高 92.3%，果苔数提高 25%，总生物量提高 39%，增产 25.1%	［24］
	小区试验	玉米秸秆炭基肥，用量 525 kg/hm², 追施木醋液 15 kg/hm²	产量提高 15.50%	［17］
黑麦草 Ryegrass	盆栽试验	玉米秸秆炭：磷酸二氢钾 =2:1 炭基肥，用量 20 g/kg 土	株高和地上部鲜量分别增加 34.51% 和 70.59%；根长与根表面积分别增加 40.04% 和 59.86%	［18］
砀山酥梨 Dangshan pear	小区试验	炭基肥，51%（17–17–17），用量 2.7 t/hm²	新梢生长量分别提高 10.3、4.5 cm；新梢粗分别提高 0.37、0.77 cm，百叶鲜重分别提高 8.9、8.5 g	［46］

生物质炭基肥在花生上的施用效果主要体现在提高单株饱果数、百果重、百仁重、出仁率和荚果产量上[35,41,44]，同时在水分胁迫的不利条件下起到一定抗旱作用[38-39]。

目前收集到的文献中，生物质炭基肥在马铃薯、甘薯、大豆、烟草、棉花、牧草和果树等作物上的试验研究较少，总体上均表现在增加植株生物量和提高产量方面[17,18-24,40,45-46,51]；对于烟草，生物炭基肥则起到提高烤烟的经济性状和品质的作用[52-53]。

综上所述，生物质炭基肥料的试验研究在全国各地均有开展，而且适用于不同的地域和土壤类型。试验方法以大田小区为主，少数的保护地小区试验[13,23,25]；其余多为盆栽试验；极少的袋栽试验[11]和微区试验[26]；从试验周期长短来看，有 2 年[47]或 4 年[26,31,50]的定位试验。生物质炭基肥的施用量、施用时期和施用方法，基本沿用作物专用肥和土壤改良剂的技术模式。作物应用效果总体显示为正效应，具体表现在增加作物产量、提高农作物植株的农艺性状、改善农产品品质、提升氮磷钾肥料的利用率、改良土壤理化性状、节水省肥以及低碳减排等方面。

3 展望

国内外公开文献表明，关于生物质炭基肥料制备及其在作物上施用技术的研究不断增多，且有一定的深度和广度，已成为农业资源与环境领域关注的热点。但是，生物质炭基肥料的作物试验大多集中于短期小区、小型的盆栽或者保护地微区试验；生物质炭基肥料的输入对农田生态系统的整体影响尚不明确；关于生物质炭基肥中“炭－肥－土”等之间的互作机理、“土壤－作物－养分”等因素的动态作用机制、以及对土壤微生物和水分胁迫等因素的时空变化研究尚浅。因此，提出以下建议：（1）加大生物质炭基肥料对土壤、作物和环境的系统性研究，进一步开展生物质炭基肥料与传统肥料之间的共通性和差异性、及其养分控 / 缓释规律性的试验研究。（2）探索生物质炭基肥料中“肥－水”耦合的过程及机制。（3）突破更加科学、高效、安全的生物质炭基肥料配方工艺技术，尤其是生物质炭基肥料造粒制肥设备与辅助材料的研发。（4）开展不同地域、不同土壤类型和环境条件下生物质炭基肥料的长期定位研究。结合土壤、作物的需肥特点制定生物质炭基肥料高效环保施用技术规程，为种植业的提质增效做贡献。

参考文献（References）：

[1] 程锋，王洪波，郧文聚.中国耕地质量等级调查与评定［J］.中国土地科学，2014,28（2）:75-82,97. DOI:10.13708/j.cnki.cn11-2640.2014.02.010.
CHENG F,WANG H B, YUN W J. Study on investigation and assessment of cultivated land quality grade in China［J］. *China Land Sciences*, 2014,28（2）:75-82,97. DOI:10.13708/j.cnki.cn11-2640.2014.02.010.

[2] 韦茂贵，王晓玉，谢光辉.中国各省大田作物田间秸秆资源量及其时间分布［J］.中国农业大学学报，2012,17（6）:32-44.
WEI M G, WANG X Y, XIE G H. Field residue of field crops and its temporal distribution among thirty-one provinces of China［J］. *Journal of China Agricultural University,* 2012,17（6）:32-44.

[3] 李敏，韩上，武际，陈峰，桑亚松，王慧，唐杉.农作物秸秆炭化后养分变化及还田效应［J］.中国农学通报，2019,35（16）:95-99.
LI M, HAN S, WU J, CHEN F, SANG Y S, WANG H, TANG S. Crop straw biochar: nutrients change and field returning effects［J］. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019,35（16）:95-99.

[4] NY/T3041-2016 生物炭基肥料［S］.2016.
NY/T3041-2016Biochar-based fertilizer［S］. 2016.

[5] NY/T3618-2020 生物炭基有机肥［S］. 2020.
NY/T3618-2020Biochar-based organic fertilizer［S］. 2020.

[6] JOSEPH S, GRABER E R, CHIA C, MUNROE P, DONNE S, THOMAS T, NIELSEN S, MARJO C, RUTLIDGE H, PAN G X, LI L, TAYLOR P, RAWAL A, HOOK J. Shifting paradigms: development of high-efficiency biochar fertilizers based on nano-structures and soluble components［J］. *Carbon Management*, 2013, 4（3）:323-343. DOI:10.4155/cmt.13.23.

[7] International Biochar Initiative, IBI Biochar Standards V2.1 Final［S］, 2015.

[8] 刘善良，常春丽，蒲加军，蒲加兴，朱永红，向蓉，周涛，张亚飞，蒲加胜.生物炭基肥料在水稻上的应用效果研究［J］.现代农业科技，2019（15）:5-6.
LIU S L, CHANG C L, PU J J, PU J X, ZHU Y H, XIANG R, ZHOU T, ZHANG Y F, PU J S. Application effect of biochar-based fertilizer on rice［J］. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019(15):5-6.

[9] 李大伟，周加顺，潘根兴，张旭辉，李恋卿，刘晓雨，郑聚锋，郑金伟，程琨.生物质炭基肥施用对蔬菜产量和品质以及氮素农学利用率的影响［J］.南京农业大学学报，2016, 39（3）:433-440. DOI: 10.7685 / jnau.201511007.
LI D W, ZHOU J S, PAN G X, ZHANG X H, LI L Q, LIU X Y, ZHENG J F, ZHENG J W, CHENG K. Effect of biochar- based compound fertilizer on the yield, fruit quality and N use efficiency of vegetables［J］. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39（3）:433-440. DOI: 10.7685/jnau.201511007.

[10] 陈琳，乔志刚，李恋卿，潘根兴.施用生物质炭基肥对水稻产量及氮素利用的影响［J］.生态与农村环境学报，2013, 29（5）:671-675.
CHEN L, QIAO Z G, LI L Q, PAN G X. Effects of biochar-based fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency［J］. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013,29（5）:671-675.

[11] CHEW J, ZHU L L, NIELSEN S, GRABER E, DAVID R, MITCHELL

G, HORVAT J, MOHAMMED M, L LIU M, ZWIETEN L V, DONNE S, MUNROE P, TAHERYMOOSAVI S, PACE B, RAWAL A, HOOK J, MARJO C, THOMAS D S, PAN G X, LI L Q, BIAN R J, MCBEATH A, BIRD M, THOMAS T, HUSSON O, SOLAIMAN Z, JOSEPH S, FAN X R. Biochar-based fertilizer: Supercharging root membrane potential and biomass yield of rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 136431.

[12] 张影, 刘星, 焦瑞锋, 李东方, 任秀娟, 吴大付, 陈锡岭. 生物质炭与有机物料配施的土壤培肥效果及对玉米生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017,25(9):1287-1297. DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170115.
ZHANG Y, LIU X, JIAO R F, LI D F, REN X J, WU D F, CHEN X L. Effects of combined biochar and organic matter on soil fertility and maize growth[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(9): 1287-1297. DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170115.

[13] 乔志刚, 付嘉英, 郑金伟, 李恋卿, 潘根兴. 不同炭基肥对青椒生长、品质和氮素农学利用率的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(1):174-179. DOI:10.19336/j.cnki.trtb.2014.01.029.
QIAO Z G, FU J Y, ZHENG J W, LI L Q, PAN G X. Effects of different biochar fertilizer on growth, quality and agronomic N use efficiency of green pepper[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1):174-179. DOI:10.19336/j.cnki.trtb.2014.01.029.

[14] 王智慧, 唐春双, 范博文, 赵长江, 杨克军, 李佐同. 不同配比炭基肥对玉米生长、土壤养分及呼吸的影响[J].黑龙江八一农垦大学学报, 2017,29(3):1-4,28. DOI:10.3969/j.issn.1002-2090.2017.03.001.
WANG Z H, TANG C S, FAN B W, ZHAO C J, YANG K J, LI Z T. Effects of different ratio of carbon basal fertilizer on maize growth, soil nutrient and respiration[J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2017,29(3):1-4,28. DOI:10.3969/j.issn.1002-2090.2017.03.001.

[15] 解秋, 王敏, 张旭辉, 卞荣军, 李恋卿, 潘根兴. 木醋液—生物质炭基肥对玉米苗期生长及氮素利用率的影响[J]. 土壤通报, 2018,49(5):1165-1169. DOI:10.19336/j.cnki.trtb.2018.05.24.
XIE Q, WANG M, ZHANG X H, BIAN R J, LI L Q, PAN G X. Effect of wood vinegar-biochar as base fertilizers on the growth and nitrogen utilization of maize at seeding stage[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(5):1165-1169. DOI:10.19336/j.cnki.trtb.2018.05.24.

[16] 张萌, 魏全全, 肖厚军, 赵欢, 苟久兰, 赵洪, 朱方宇. 不同用量专用生物炭基肥对贵州朝天椒提质增效的影响[J]. 核农学报, 2019,33(7):1457-1464. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2019.07.1457.
ZHANG M, WEI Q Q, XIAO H J, ZHAO H, GOU J L, ZHAO H, ZHU F Y. Effects of different dosage of biochar-based fertilizer on quality and efficiency of hot pepper in Guizhou[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(7):1457-1464. DOI: 10. 11869/j.issn.100-8551.2019.07.1457.

[17] 胡苗苗, 朱新萍, 李典鹏, 赵一, 孙涛, 杨贝贝, 贾宏涛, 王西和. 生物炭基肥和木醋液对干旱区土壤养分及棉花产量的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2018,41(5):369-375. DOI:10.3969/j.issn.1007-8614.2018.05.009.
HU M M, ZHU X P, LI D P, ZHAO Y, SUN T, YANG B B, JIA H T, WANG X H. Effects of biochar-based base fertilizer and wood vinegar on soil nutrients and cotton yield in arid area[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2018,41(5):369-375. DOI:10.3969/j.issn.1007-8614.2018.05.009.

[18] 孙樱萁, 郭建斌, 李子富, 白晓凤, 刘宇. 生物质炭基肥料对黑麦草生长特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016,44(12):117-123. DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.12.016.
SUN Y, GUO J B, LI Z F, BAI X F, LIU Y. Influence of biochar-based fertilizers on growth characteristics of ryegrass[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2016,44(12):117-123. DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.12.016.

[19] 彭辉辉, 刘强, 荣湘民, 张玉平, 田昌, 谢勇. 生物炭、有机肥与化肥配施对春玉米养分利用及产量的影响[J]. 南方农业学报, 2015,46(8):1396-1400. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1191.2015.08.1396.
PENG H H, LIU Q, RONG X M, ZHANG Y P, TIAN C, XIE Y. Effects of biochar, organic fertilizer and chemical fertilizer combined application on nutrient utilization and yield of spring maize[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2015,46(8):1396-1400. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1191.2015.08.1396.

[20] 王粟, 张楠, 钟鹏, 史风梅, 裴占江, 刘杰, 孙彬. 生物质炭基肥对玉米生长发育及产量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2017(3):41-44. DOI:10.11942/j.issn1002-2767.2017.03.0041.
WANG S, ZHANG N, ZHONG P, SHI F M, PEI Z J, LIU J, SUN B. Effects of biochar base fertilizers on maize growth and yield[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2017(3):41-44. DOI:10.11942/j.issn1002-2767.2017.03.0041.

[21] 付嘉英, 乔志刚, 郑金伟, 李恋卿, 潘根兴, 刘福礼, 张旭辉, 郑聚峰, 王家芳, 俞欣妍. 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.
FU J Y, QIAO Z G, ZHENG J W, LI L Q, PAN G X, LIU F L, ZHANG X H, ZHENG J F WANG J F, YU X Y. Effects of different biochar-based fertilizer on nitrate content, yield and quality of cabbage[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(34):162-165.

[22] 康日峰, 张乃明, 史静, 包立, 张传光. 生物炭基肥料对小麦生长、养分吸收及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(6):33-38. DOI: 10.11838/sfsc.20140606.
KANG R F, ZHANG N M, SHI J, BAO L, ZHANG C G. Effects of biochar-based fertilizer on soil fertility, wheat growth and nutrient absorption[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(6):33-38. DOI: 10. 11838 /sfsc. 20140606.

[23] 王育红,肖辉,程文娟,王立艳,潘洁,高贤彪. 炭基肥对设施土壤肥力、番茄产量及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2015,43(16):390-392. DOI:10.13989/j.cnki.0517-6611.2015.16.134.
WANG Y H, XIAO H, CHENG W J, WANG L Y, PAN J, GAO X B. Effects of biochar fertilizer on soil fertility,tomato yield and quality in greenhouse[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(16):390-392. DOI:10.13989/j.cnki.0517-6611.2015.16.134.

[24] 孙宁川, 唐光木, 徐万里, 韩启龙, 罗志明, 高永建. 棉秆炭和炭基专用肥对棉花生长及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2016,53(1):163-169. DOI: 10.6048/j.issn.1001-4330.2016.01.022.
SUN N C, TANG G M, XU W L, HAN Q L, LUO Z M, GAO Y J. The impact of cotton stalk carbon and carbon-based specialty fertilizer on the cotton growth and yield[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2016,53(1):163-169. DOI: 10.6048/j.issn.1001-4330.2016.01.022.

[25] 廖上强, 陈延华, 李艳梅, 张琳, 孙焱鑫 . 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. DOI:10.13254/j.jare.2015.0060.
LIAO S Q, CHEN Y H, LI Y M, ZHANG L, SUN Y X. Effect of biochar-based urea on yield and quality of celery and soil NO3-N content[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015,32(5):443–448. DOI:10.13254/j.jare.2015.0060.

[26] 战秀梅, 彭靖, 王月, 刘轶飞, 陈坤, 韩晓日, 王恒飞, 蔺文成, 李喜研 . 生物炭及炭基肥改良棕壤理化性状及提高花生产量的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2015,21(6):1633–1641. DOI: 10. 11674 /zwyf.2015. 0631.
ZHAN X M, PENG J, WANG Y, LIU Y F, CHEN K, HAN X R, WANG H F, LIN W C, LI X Y. Influences of application of biochar and biochar-based fertilizer on brown soil physiochemical properties and peanut yields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015,21(6):1633–1641. DOI: 10. 11674 /zwyf.2015. 0631.

[27] LI Y L, CHENG J Z, LEE X Q, CHEN Y, GAO W C, PAN W J, TANG Y. Effects of biochar-based fertilizers on nutrient leaching in a tobacco-planting soil[J]. *Acta Geochimica*, 2019, 38(1):1–7. DOI: 10.1007/s11631-018-0307-2.

[28] 王丽 . 生物炭基肥料在水稻上施用效果研究[J]. 农业科技与装备, 2017(2):14–15,18. DOI:10.16313/j.cnki.nykjyzb.2017.02.006.
WANG L. Research on application effect of carbon matrix bio-fertilizer on rice[J]. *Agricultural Science and Technology and Equipment*, 2017(2):14–15,18. DOI:10.16313/j.cnki.nykjyzb.2017.02.006.

[29] XIANG M, LIU F Q, ZHOU S J, TANG Q P, LI K. Investigation of preparation of biochar-based sustained release fertilizer from filter mud of sugar mills and its properties//Advanced Science and Industry Research Center.Proceedings of 2019 5th International Conference on Green Materials and Environmental Engineering(GMEE 2019)[C]. *Advanced Science and Industry Research Center: Science and Engineering Research Center*, 2019:9.

[30] ASCOUGH P, BIRD M I, FRANCIS S M, THORNTON B, MIDWOOD A, SCOTT A C, APPERLEY D. Variability in oxidative degradation of charcoal: influence of production variables and environmental exposure[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 75(9): 2361–2378. DOI:10.1016/j.gca.2011.02.002.

[31] WANG H F, ZHENG H, JIANG Z X, DAI Y H, LIU G C, CHEN L, LUO X X, LIU M H, WANG Z Y. Efficacies of biochar and biochar-based amendment on vegetable yield and nitrogen utilization in four consecutive planting seasons[J]. *The Science of the Total Environment*, 2017(3):593–594. DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.03.096.

[32] AN X F, WU Z S, HAN Y J, YE B C. Eco-Friendly slow-release NPK compound fertilizer based on biochar and bentonite for potential use in agriculture// Proceedings of the 4th International Congress on Advanced Materials(AM2018)[C]. Zhenjiang, 2018:15–18.

[33] 原鲁明, 赵立欣, 沈玉君, 尚书旗, 孟海波 . 我国生物炭基肥生产工艺与设备研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2015,17(4):107–113. DOI: 10.13304 /j.nykjdb.2015.199.
YUAN L M, ZHAO L X, SHEN Y J, SHANG S Q, MENG H B. Progress on biochar-based fertilizer production technology and equipment in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2015,17(4):107–113. DOI: 10.13304 /j.nykjdb.2015.199.

[34] 卢广远, 张艳, 王祥福, 孟彦 . 炭基肥料种类对土壤物理性质及玉米产量的影响[J]. 河北农业科学, 2011,15(5):50–53. DOI:10.16318/j.cnki.hbnykx.2011.05.007.
LU G Y, ZHANG Y, WANG X F, MENG Y. Effects of carbon base fertilizers on soil physical properties and maize yield[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2011,15(5):50–53. DOI:10.16318/j.cnki.hbnykx.2011.05.007.

[35] 朱爱军 . 不同炭基肥料对花生农艺性状与产量的影响[J]. 现代农业科技, 2012(8):58–59. DOI:10.3969/j.issn.1007-5739.2012.08.028.
ZHU A J. Effects of different carbon based fertilizers on agronomic characters and yield of peanut[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2012(8):58–59. DOI:10.3969/j.issn.1007-5739.2012.08.028.

[36] ZHOU Z D, GAO T, ZWIETEN L V, ZHU Q, YAN T T, XUE J H, WU Y B. Soil microbial community structure shifts induced by biochar and biochar-based fertilizer amendment to Karst Calcareous soil[J]. *Soil Science Society of America*, 2019, 83(2): 398–408. DOI:10.2136/sssaj2018.08.0297.

[37] MIKOS-SZYMAŃSKA M, SCHAB S, RUSEK P, BOROWIK K, BOGUSZ P, WYZIŃSKA M . Preliminary study of a method for obtaining brown coal and biochar based granular compound fertilizer[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2019, 10(12):3673–3685. DOI:10.1007/s12649-019-00655-4.

[38] 王淑君, 夏桂敏, 李永发, 王玮志, 迟道才 . 生物炭基肥和水分胁迫对花生生理及产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2017,39(6):827–833. DOI: 10.7505/j.issn.1007-9084.2017.06.014.
WANG S J, XIA G M, LI Y F, WANG W Z, CHI D C. Effects of biochar-based fertilizer and water stress on physiological characteristics and yield of peanut[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2017,39(6):827–833. DOI:10.7505/j.issn.1007-9084.2017.06.014.

[39] 王淑君, 夏桂敏, 李永发, 王玮志, 迟道才, 陈涛涛 . 生物炭基肥和水分胁迫对花生产量、耗水和养分吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2017,31(6):285–290,301. DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.06.044.
WANG S J, XIA G M, LI Y F, WANG W Z, CHI D C, CHEN T T. Effect of biochar-based fertilizer and water Stress on peanut yield, water consumption and nutrition[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017,31(6):285–290,301. DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.06.044.

[40] 任少勇, 王姣, 黄美华, 肖强, 魏翠果, 宋树慧, 蒙美莲, 陈有君 . 炭基肥对马铃薯干物质积累分配和产量的影响[J]. 中国马铃薯, 2013,27(4):215–221.
REN S Y, WANG J, HUANG M H, XIAO Q, WEI C G, SONG S H, MENG M L, CHEN Y J. Effects of Carbon based fertilizer on dry matter accumulation and distribution, and potato yield[J]. *Chinese Potato Journal*, 2013,27(4):215–221.

[41] 徐孟泽, 梁敏, 李苗苗, 高亮, 谢发萍, 王宜伦 . 炭基肥与化肥配施对生菜产量与品质的影响[J]. 农学学报, 2020,10(7):45–49.
XU M Z, LIANG M , LI M M, GAO L, XIE F P, WANG Y L. Effect of combined application of biochar-based fertilizer and chemical fertilizer on yield and quality of lettuce[J]. *Journal of Agriculture*, 2020,10(7):45–49.

[42] 陆万山 . 生物质炭基肥对小麦生物学性状、产量和经济效益的影响[J]. 基层农技推广, 2017,5(12):45–47.
LU W S. Effects of biochar based fertilizer on biological characters, yield and economic benefits of wheat[J]. *Primary Agricultural Technology Extension*, 2017, 5(12): 45–47.

[43] 于立宏, 易祎, 王一博, 王雅维, 高杨, 张宇 . 生物炭基肥料对花生生长及产量的影响研究[J]. 辽宁农业科学, 2017(6):31–34. DOI:10.3969/j.issn.1002–1728.2017.06.006.
YU L H, YI Y, WANG Y B, WANG Y W, GAO Y, ZHANG Y. Study on the effect of biochar based fertilizer on peanut growth and yield[J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2017(6):31–34. DOI:10.3969/j.issn.1002–1728.2017.06.006.

[44] 姜涛, 倪皖莉, 王嵩, 汪清, 赵西拥, 朱晓峰 . 炭基缓释花生专用肥对砂姜黑土夏花生干物质积累及产量的影响[J]. 花生学报, 2018,47(3):75–80. DOI:10.14001/j.issn.1002–4093.2018.03.014.
JANG T, NI W L, WANG S, WANG Q, ZHAO X Y, ZHU X F.Effects of Charcoal–based slow release peanut specific fertilizer on dry matter accumulation and yield of summer peanut in lime concretion black soil[J]. *Journal of Peanut Science*, 2018,47(3):75–80. DOI:10.14001/j.issn.1002–4093.2018.03.014.

[45] 姜雪, 王丽学, 戴皖宁, 栾永鹏, 胡剑 . 炭基肥与调亏灌溉对大豆生长及水分利用效率的影响[J]. 大豆科学, 2020,39(2):235–242. DOI: 10.11861 / j.issn.1000–9841.2020.02.0235.
JIANG X, WANG L X, DAI W N, LUAN Y P, HU J. Effects of biochar based fertilizer and regulated deficit irrigation on growth and water use efficiency of soybean[J]. *Soybean Science*, 2020,39(2):235–242. DOI: 10.11861 / j.issn.1000–9841.2020.02.0235.

[46] 陈怀韦 . 生物质炭基肥在砀山酥梨上的应用效果试验[J]. 安徽农学通报, 2019,25(18):107–108. DOI:10.16377/j.cnki.issn1007–7731.2019.18.047.
CHEN H W. Application effect of biochar based fertilizer on Dangshan pear[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2019, 25(18):107–108. DOI:10.16377/j.cnki.issn1007–7731.2019.18.047.

[47] MEENA H M, PRAKASHA H C. Effect of biochar, lime and soil test value based fertilizer application on soil fertility, nutrient uptake and yield of rice–cowpea cropping system in an acid soil of Karnataka[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2020, 43(17):2664–2679. DOI:10.1080/01904167.2020.1793188.

[48] YIN D W, GUO X D , DING G H , JIN L, MANX C, YANG K J, ZHANG Y F, P ZHANG. Effects of biochar based fertilizer on soil nutrient content and maize yield of acidic soil in Heilongjiang province[J]. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 2019(6):133–149. DOI:10.4236/abb.2019.106010.

[49] 李正东, 陶金沙, 李恋卿, 潘根兴, 刘晓雨, 张旭辉, 郑聚锋, 郑金伟, 王家芳, 俞欣妍 . 生物质炭复合肥对小麦产量及温室气体排放的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(1):177–183. DOI:10.19336/j.cnki.trtb.2015.01.030.
LI Z d, TAO J S, LI L Q, PAN G X, LIU X Y, ZHANG X H, ZHENG J F, ZHENG J W,WANG J F, YU X Y. Effects of biochar–based fertilizers on wheat yield and greenhouse gases emissions[J]. *ChineseJournal of Soil Science*, 2015, 46(1): 177–183. DOI:10.19336/j.cnki.trtb.2015.01.030.

[50] GAO M Y, YANG J F, DU Z D, MU J H, ZHANG Y H. Impact of application of biochar and biochar–based fertilizer on peanuts nutrient absorption and yield//Proceedings of 2017 5th International Conference on Machinery,Materials and Computing Technology(ICMMCT 2017)[C]. 2017.

[51] 杨武娟, 高文川, 徐芦, 王钊, 刘明慧 . 炭基肥及不同施肥方式对甘薯产量影响的研究[J]. 安徽农学通报, 2018,24(21):104–105. DOI:10.16377/j.cnki.issn1007–7731.2018.21.040.
YANG W J, GAO W C, XU L, WANG Z, LIU M H. Study on the effects of carbon based fertilizer and different fertilization methods on sweet potato yield[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2018,24(21):104–105. DOI:10.16377/j.cnki.issn1007–7731.2018.21.040.

[52] 刁朝强, 聂忠扬, 程传策, 胡勇, 吴永琴, 魏光钰, 任春燕 . 高碳基肥施用方法对清镇植烟土壤及烤烟品质的影响[J]. 江西农业学报, 2018,30(6):57–62. DOI: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2018.06.12.
DIAO C Q, NIE Z Y, CHENG C C, HU Y, WU Y Q, WEI G Y, REN C Y. Effects of application technique of high–carbon biochar–based fertilizer on tobacco–planting soil and flue–cured tobacco quality in Qingzhen[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2018,30(6):57–62. DOI: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2018.06.12.

[53] 陈懿, 林英超, 黄化刚, 林叶春, 高维常, 潘文杰 . 炭基肥对植烟黄壤性状和烤烟养分积累、产量及品质的影响[J]. 土壤学报, 2019(2):495–504. DOI:10.11766/trxb201806060133.
CHEN Y, LIN Y C, HUANG H G, LIN Y C, GAO W C, PAN W J. Effect of biochar–based fertilizer on properties of tobacco–planting yellow soil, and nutrient accumulation, yield and quality of flue–cured tobacco[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019(2):495–504. DOI:10.11766/trxb201806060133.

（责任编辑　邹移光）

黄庆，研究员，国家自然资源部土地整治专家、中华农业科技奖评审专家、广东省重大行政决策咨询论证专家、广东省农产品流通协会技术专业委员会专家、广东省地理标志专家、广东省科技咨询专家、广东省农业项目专家、广东省知识产权专家、广东省农业机械化专家、广东省农业科学研究高级专业技术资格评审委员、广东省农业高新技术企业培育创新联盟专家、广东省企业科技特派员。

长期从事作物高产优质平衡施肥技术、南方中低产田土壤酸化诊断与改良技术、耕地土壤重金属污染综合治理修复技术、城乡废弃物无害化处理技术、土壤调理剂等新型肥料的研发与示范推广等工作。主持承担科技部、财政部农业科技转化资金项目“有机－无机土壤调理剂（钙镁肥）产业化及应用推广”等国家、省、市级和广东省农业科学院科技计划项目 30 多项，横向科技成果转化项目 20 多项。获广东省科学技术奖三等奖 2 项，东莞市科学技术奖一等奖 1 项，广东省农业科学院科学技术奖二等奖、三等奖各 1 项。获授权专利 3 件，主持制定广东地方标准 1 项，发表论文 30 多篇。获“广东省高新技术企业培育联盟专家”荣誉。