

刘丽珠, 范如芹, 卢 信, 等. 农业废弃物生物质炭在设施栽培中应用的研究进展[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(6): 1434-1440.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2016.06.037

## 农业废弃物生物质炭在设施栽培中应用的研究进展

刘丽珠<sup>1</sup>, 范如芹<sup>1</sup>, 卢 信<sup>1</sup>, 罗 佳<sup>1</sup>, 周运来<sup>1,2</sup>, 严少华<sup>1</sup>, 张振华<sup>1</sup>

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 2. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225100)

**摘要:** 农业废弃物是制备生物质炭的廉价、优质原材料。本文分析了农业废弃物的特性及其生物质炭的特点, 综述了生物质炭在设施栽培中的作用及其应用研究, 包括改良设施土壤和基质的理化性状及微生态环境, 缓解土传病害和连作障碍, 作为设施土壤和基质的替代物、调理剂和固定剂等。最后指出了目前生物质炭在设施栽培应用中存在的问题及今后研究的方向。

**关键词:** 农业废弃物; 生物质炭; 设施栽培; 栽培基质

中图分类号: X712 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2016)06-1434-07

## Research progress in application of biochar derived from agricultural waste in facility cultivation

LIU Li-zhu<sup>1</sup>, FAN Ru-qin<sup>1</sup>, LU Xin<sup>1</sup>, LUO Jia<sup>1</sup>, ZHOU Yun-lai<sup>1,2</sup>, YAN Shao-hua<sup>1</sup>, ZHANG Zhen-hua<sup>1</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. College of Environmental Sciences and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225100, China)

**Abstract:** Agricultural wastes are low-cost and high-quality raw materials for biochar production. In this review, the characteristics of agricultural wastes and properties of biochar made of agricultural wastes were analyzed. The application situation of biochar and its role in facility cultivation were introduced, including improving physical and chemical characters and ecological environment of soil and growth substrate, alleviating soil-borne disease and continuous cropping obstacles, acting as substitute, conditioner and fixing agent for soil and substrate, etc. The problems in biochar application on facility cultivation were pointed out and the study directions of the future were brought forward.

**Key words:** agricultural waste; biochar; facility cultivation; growth substrate

生物质炭 (Biochar) 是指生物有机材料 (生物

质) 在缺氧或低氧环境中经热裂解后的固体产物, 多为粉状颗粒<sup>[1]</sup>, 每年全球约生产有  $4.1 \times 10^7$  t 生物质炭<sup>[2]</sup>。生物质炭主要成分为碳、氢、氧等元素, 含碳约 70% ~ 80%, 含有大量的烷基和芳香结构, 丰富的孔隙结构以及较大的比表面积, 且表面含有很多含氧活性基团, 是一种多功能新型材料<sup>[3]</sup>。生物质炭不仅可以改良退化土壤增加肥力, 还能吸附土壤或污水中的重金属及有机污染物, 对温室气体减排也有一定的贡献。近年来大量文献报道了利用农林废弃物、工业废弃物以及污水厂污泥等城市有机

收稿日期: 2016-02-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41401259); 农业部农业环境重点实验室开放基金项目; 江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX(15)1003-5]

作者简介: 刘丽珠 (1987-), 女, 江苏张家港人, 硕士, 研究实习员, 主要从事现代农艺与土壤修复研究。(E-mail) liulizhu@jaas.ac.cn。范如芹为共同第一作者。

通讯作者: 张振华, (Tel) 025-84391207; (E-mail) zhenhuaz70@hotmail.com

废物制备生物质炭<sup>[3-5]</sup>。关于生物质炭的制备及应用的相关研究工作正如火如荼地展开,生物质炭在土壤改良、温室气体减排以及修复污染环境方面都表现出应用潜力<sup>[6-7]</sup>。

农业废弃物主要包括种植业废弃物、农产品加工废弃物、畜禽粪便和农村生活废弃物等<sup>[8-10]</sup>。随着全球农业的发展和农产品数量的不断攀升,农业废弃物的排放量呈现日益增长的态势,其合理利用管理成为全球亟待解决的一个重要农业和环境问题<sup>[11-12]</sup>。另一方面,这些废弃物含有丰富的碳和植物所需的营养元素<sup>[13]</sup>,利用这些“放错位置的资源”生产生物质炭,不仅可以解决当今严峻的农业环境污染与资源浪费问题,而且可以为生物质炭的产业化生产提供优质廉价的原材料。

设施栽培与农田相比规模小,易于人为管理和控制,也是系统研究生物质炭在土壤和基质中的转化机理,与土壤有机质的相互作用以及与植物交互作用的一个理想环境。目前,与生物质炭在土壤中的应用相比,关于其在设施栽培中应用的相关报道相对较少。但生物质炭在设施栽培土壤和无土栽培基质中均能起到较好的调控作用。许多盆栽和大棚试验结果表明,施用不同比例生物质炭能提高番茄和甜椒等蔬菜的产量<sup>[14-15]</sup>。一方面利用生物质炭可以保水保肥,便于设施栽培中的日常养分及水分的管理;另一方面设施栽培易产生土传病害、连作障碍、次生盐渍化等问题,而近几年国内外关于利用生物质炭解决此类问题的报道逐渐增加<sup>[16]</sup>。2005年就有学者将城市生活垃圾制备的生物炭施入土壤来降低番茄青枯病<sup>[17]</sup>,证明生物质炭在设施栽培中有很广阔的应用前景。本文就国内外农业废弃物生物质炭化的研究现状、生物质炭在设施栽培中的应用现状及潜力以及今后的研究方向等进行综述与梳理,为进一步推动该领域的工作提供参考。

## 1 农业废弃物生物质炭化

### 1.1 农业废弃物的主要特点

生物质炭原料的大量稳定供应是持续高效生产生物质炭的重要保障,而农业废弃物来源广、年产量高,很好地满足了这一需求。中国每年大约产出农业废弃物 $4.0 \times 10^9$  t,且以每年5%~10%的速度增长。据此计算,到2020年,中国的农业废弃物年产量将超过 $5.0 \times 10^9$  t<sup>[18]</sup>。另一方面,农业废弃物含

有丰富的碳和养分,包括大量的氮、磷、钾、钙、镁、锌、硅等植物生长所需的大量元素及微量元素<sup>[5]</sup>,是一种很好的资源。

原料的生物量及含水率是决定生物质炭产率及理化性状的关键。目前较理想的用于生物质炭化的植物类废弃物主要有作物秸秆、稻麦壳、木薯渣、枯枝落叶、菇渣、椰糠等,它们生物量大且含水量少,但是具有明显的季节性。动物类废弃物原料主要包括畜禽粪便与发酵床垫料、动物尸体等,含水量高且难于运输是影响其作为原料的重要因素。

### 1.2 农业废弃物生物质炭化条件

生物质炭化后成为生物质炭,原料的孔隙结构被很好地保留,故有较强的吸附能力,理化性质也相对稳定。前体原料的类型、裂解温度、压力及氧浓度不同,得到的产物产率和物理化学性状(表面积、孔隙度、持水量、pH、电导率和阳离子交换量)有较大差异<sup>[19-20]</sup>。Kloss等<sup>[21]</sup>发现,与木炭相比,植物残体生物质炭有较高的电导率(EC)和阳离子交换量(CEC)。一般而言,随制备温度的升高,生物质炭产率逐渐降低,pH值和EC升高,灰分含量随之增加<sup>[22]</sup>。有研究结果表明,原料的木质素含量高时,在低于500℃慢速加热和高压裂解条件下获得的产物较多<sup>[4]</sup>。裂解温度低于300℃时,生成的生物质炭稳定性较弱,所含的活性吸附位点较多,微孔分布均匀且孔道规则;温度升至400℃时,生物质炭的微孔分布杂乱无序,极性官能团数量减少且芳香度变高,疏水性更强,比表面积更大;加温至400~500℃时,生物质炭的微孔孔壁坍塌,因而增大了其表面粗糙程度,更加提升了自身的吸附能力。

植物来源的生物质炭所含有有机污染物或重金属污染物的浓度低于其他有机废弃物制作的生物质炭,且具有很高的稳定性,不易被微生物降解。同一温度下,植物来源的生物质炭比动物来源的生物质炭的比表面积大<sup>[22]</sup>。Yuan等<sup>[23]</sup>指出,豆科类植物比非豆科植物秸秆来源的生物质炭具有更高的Ca、Mg和K含量。张伟明等<sup>[24]</sup>的研究结果表明,同一条件下,玉米棒芯炭、玉米秸秆炭、水稻秸秆炭、花生壳炭的Ca、Mg等矿质元素总量和灰分含量依次增加,而含碳量、pH呈现逐渐降低的态势。畜禽粪便由于其氧及灰分含量高,热值低,是一种具有代表性的低品质生物质。张鹏等<sup>[25]</sup>和Marco等<sup>[26]</sup>的研究结果表明,以动物粪便为原料制备的生物质炭,其灰

分含量明显高于植物源制备的生物质炭,并会存留较多的矿物。同一热解温度下,动物来源的生物质炭样品的吸附能力高于植物来源的生物质炭样品,这也可能是前者的灰分高所致。虽然畜禽粪便生物质炭的优点显而易见,但其含有很多芳香烃类和重金属的缺陷对其应用存在一定制约,施用此类生物质炭是否会对土壤造成二次污染仍有待进一步研究<sup>[6]</sup>。

## 2 生物质炭在设施栽培中的应用

### 2.1 生物质炭对设施土壤和基质理化性状及养分释放的影响

生物质炭通过改良土壤和基质的理化性状(pH、孔隙度、容重、持水量和养分含量等)促进植物养分利用并增加作物产量,特别适用于改良退化的设施土壤及基质<sup>[27-28]</sup>。高温(>700℃)烧制的生物质炭大多呈碱性,可作为石灰替代物改良酸性土壤,提高土壤 pH 值;低温下(<300℃)生成的生物质炭一般适用碱性土壤<sup>[29-30]</sup>。生物质炭的加入可以显著改善砂土保水能力<sup>[31-32]</sup>,加入基质可以增加其持水量,弥补其易失水的不足;另一方面,生物质炭黏性和容重低,以农林废弃物制备的炭密度低于 0.3 t/m<sup>3</sup>,可降低黏质土壤容重和硬度,从而显著改善土壤质地<sup>[33]</sup>。另外,与大田相比,温室灌溉有助于进一步利用生物炭的养分吸附属性,并促进与土壤和基质的阳离子交换量。

关于将生物质炭用作基质添加剂以改良基质理化性状的研究国内外已有一些报道。目前来看,生物质炭与其他调理剂联合使用的改良效果更好,添加适当比例的基质添加剂对基质性能及作物生长有积极的影响是研究者的共识<sup>[34-35]</sup>。李志刚等<sup>[36]</sup>发现,生物质炭、硫酸铵和鸡粪按一定比例混合对番茄幼苗的发育促进效果明显,地上及地下生物量及壮苗指数等指标均比不加生物质炭明显提升。Fan 等<sup>[37]</sup>发现,同时添加 0.8 g/L 的高吸水性树脂与 10% 生物质炭,不仅加强了生物质炭的正面效应(增大基质孔隙度、持水量等),同时抑制了生物质炭带来的基质 pH 和电导率的过度升高,最终有效改善了基质栽培空心菜的生长和养分吸收。Zhang 等<sup>[38]</sup>在基质中添加 20% 的生物质炭和 0.7% 的腐殖酸后发现,与不添加任何调理剂相比,观赏植物紫背竹芋能达到最佳生长状态。

生物质炭与肥料混施或复合后对作物生长及产量几乎都表现为正效应<sup>[39-41]</sup>,单施生物质炭就能促进作物生长或增产的情况很少。这缘于肥料消除了生物质炭养分低的缺陷,而生物质炭的加入有效提高了土壤透气能力,同时促使肥料产生缓释效果、降低肥料养分淋失,二者相辅相成、协同作用。近年来,以生物质炭为基质配以其他肥料复合而成的新型肥料备受关注。通过挤压工艺可将尿素、过磷酸钙等作为基础肥料,并以秸秆炭为基质加工成新型复合肥,工艺简单并符合国家标准<sup>[42]</sup>。与纯颗粒尿素相比,生物质炭基尿素肥的缓释性能有显著提高<sup>[43]</sup>。生物质炭基肥在其养分释放完后,仍可发挥其土壤改良剂的作用。此外,生物质炭也可作为微生物肥料接种菌的载体,增加接种菌在土壤及基质中的存活率及对植物的侵染<sup>[44]</sup>。

### 2.2 生物质炭缓解土传病害和连作障碍及对微生物的影响

设施栽培中土传病害及连作障碍的发生日趋严重<sup>[41]</sup>,对此至今仍缺乏经济有效、易于推广的实用技术。Ogawa 等<sup>[45]</sup>研究发现,生物质炭和生物质炭与堆肥混合物均能抑制细菌和真菌引起的土传病害;Jaiswal 等在黄瓜生长的基质中添加温室有机废弃物制成的生物质炭,发现它能促进黄瓜生长并抑制立枯丝核菌引起的黄瓜猝倒病<sup>[46]</sup>。添加生物质炭还可以显著降低连作障碍中油菜体内的硝酸盐、亚硝酸盐的含量,改善设施栽培蔬菜的品质,提高农产品安全性<sup>[47]</sup>。

生物质炭抑制土传病害和连作障碍的可能机理主要包括:第一,提高土壤或植物根际的微生物数量和微生物活性,优化群落结构及丰度,促进菌根真菌在植物根部的侵染与增殖<sup>[48-49]</sup>。邹春娇等对连作 11 茬的黄瓜营养基质施用生物质炭,发现添加生物质炭对连作营养基质中的酶活性、微生物数量及群落结构都有明显的调节作用<sup>[50]</sup>。生物炭能促进土壤有益微生物(如假单胞细菌、芽孢细菌和木霉菌)的生长,这些微生物能分泌多种抗生素,从而抑制土壤病原菌数量<sup>[51]</sup>。第二,保护植物免受化感物质及病原菌分泌的致病因子感染。例如,生物炭可提高叶片叶绿素含量及保护酶活性,减少叶片 MDA 含量,进而缓解对羟基苯甲酸(导致苹果连作障碍的一种酚酸类物质)对平邑甜茶(苹果常用砧木)幼苗的生长胁迫<sup>[52]</sup>。有研究结果表明,生物质炭可吸附



外源添加的化感物质。Rogovska 等<sup>[53]</sup>发现,玉米植株水浸液经生物质炭处理后能显著减轻对玉米种子胚根生长的抑制现象,其原因可能是生物质炭吸附了玉米植株水浸液中的化感物质,进而减轻其对玉米幼芽生长的抑制。第三,生物质炭能诱导植物产生应对多种病害的系统抗性。Meller 等<sup>[54]</sup>和 Elad 等<sup>[55]</sup>利用分子技术发现,施用木材及有机废弃物制备的生物质炭可以激发草莓叶片中茉莉酸/乙烯抗性系统 (ISR) 和水杨酸抗性系统 (SAR) 基因的表达,从而抑制侵染机制完全不同的 3 种真菌病害。

生物质炭的多孔状结构能为细菌、放线菌和真菌的生存繁殖提供良好栖息地,但是不同群体中微生物数量变化对生物质炭的响应各不相同。有报道指出,添加不同量生物质炭可以显著增加土壤中氨氧化古菌、氨氧化细菌和 *nirK* 基因型反硝化细菌等的丰度,提高土壤的硝化能力<sup>[47-48]</sup>。此外,土壤中一些微生物可以将生物质炭转变成腐殖质碳,有利于土壤腐殖质碳的形成。生物质炭中的低碳化合物如醋酸盐和乙烯可以为微生物提供碳源,生物质炭还可引入醛类、酸类、酯类等不稳定碳供微生物使用。有生物质炭存在的情况下,微杆菌科和间孢囊菌的快速生长还会影响无机磷的利用率。Elmer 等<sup>[49]</sup>发现,生物质炭可以通过改善土壤理化性状和生物性状促进溶磷菌根的生长及免受化感物质的毒害。

### 2.3 生物质炭替代无土栽培基质原料

目前农业生产中大量使用的传统无土栽培基质是由有机物料(泥炭、树皮、椰糠、酒糟、菇渣、畜禽粪便等)添加传统材料(主要包括蛭石、珍珠岩、石英砂等)配比而成的混合基质。生物炭作为土壤改良剂或配方基质调节剂已经受到广泛关注,近年来,生物炭作为植物生长配方基质替代原料的报道逐渐出现,主要包括作为无机物料(蛭石、珍珠岩和沼渣)的替代物和泥炭等有机物料的替代物<sup>[56-58]</sup>。目前,由于生物炭自身的特点,很少使用单一生物炭作为基质,以生物炭和其他材料(沼渣、泥炭、菇渣等)混合配制成基质成为主要趋势。

泥炭是公认的优良无土栽培原料,但由于其短期不可再生且价格高,发达国家已陆续禁止对泥炭的开采,因此寻找泥炭替代物是规模化生产配方基质的当务之急。Tian 等<sup>[59]</sup>用生物炭替代泥炭用于观赏植物栽培,植物生长良好。然而,不同来源的

生物炭替代泥炭后对植物的作用差异较大。有学者比较了木炭和麦秸炭替代泥炭用于盆栽基质种植番茄和万寿菊,发现添加生物炭对番茄干质量没有影响,但可以显著增加株高;除了 5% 的木炭,其他添加生物炭的处理都可以显著促进万寿菊生长,对其干质量增加有一定正效应<sup>[60]</sup>。不同温度制成的生物炭替代泥炭做基质对作物生长的影响也有不同,有研究者用修剪下的枝条分别在 300 °C 和 500 °C 下制成生物炭,发现与单纯泥炭相比,泥炭加生物炭的基质中生菜的生物量有显著增加,500 °C 下生成的生物炭优于 300 °C,生物炭替代泥炭的最高比例为 75%<sup>[61]</sup>。

Headlee 等<sup>[62]</sup>曾利用生物炭替代蛭石用于基质生产,发现生物炭可以为植物提供同等于蛭石的养分,使用效果理想。Vaughn 等<sup>[58]</sup>用土豆加工的剩余残体发酵后的产物与生物炭按照 1:1 混合,以水藓泥炭与蛭石 1:1 为对照进行试验,发现土豆残体发酵后产物与酸化后的木屑生物炭和秸秆生物炭混合能促进或不减弱番茄和万寿菊的生长,而与蕓蓼生物炭混合后的基质对番茄和万寿菊的生长有负作用。生物炭添加后过高的 pH 会对中性和碱性基质中作物的生长产生较大的负面影响<sup>[63]</sup>。为了促进生物炭在基质中的应用,如何抑制 pH 的过高增长是关键问题之一。李志刚等<sup>[64]</sup>尝试添加 0.5 g/L 硫酸铵对生物炭过高的 pH 进行调整,发现番茄幼苗各项生长指标均有明显改善。还有学者利用柠檬酸溶液改良生物炭,可以使处理后生物炭 pH 值降至 6 以下<sup>[65]</sup>。

### 2.4 生物质炭用作有害物质固定剂

生物炭可以降低重金属的生物有效性,主要是通过降低植物体内重金属的含量、提高植物的品质来体现。一方面生物炭通过影响土壤和基质的 pH 值、CEC、持水性能等理化性质来降低重金属的移动性和有效性,减少其向植物体内的迁移;另一方面,某些金属离子与生物炭表面官能团能形成特定的金属配合物,这种反应对与特定配位体有很强亲和力的重金属离子在土壤和基质中的固持非常重要<sup>[66-67]</sup>。生物炭还能与植物竞争吸收和吸附基质中生物有效性高的水溶态、交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态重金属,使植株可吸收的重金属理论上讲被降低了。周建斌等<sup>[68]</sup>的试验结果表明,棉秆生物炭能够通过吸附或共沉淀作用来降

低土壤中 Cd 的生物有效性,使在受污染土壤上生长的小白菜可食部分和根部 Cd 的积累量大幅降低。畜禽粪便、发酵床垫料和化工厂废水污泥等农业废弃物加工后做为基质配方原料时,加入生物质炭可以固定其中重金属及芳香类化合物,同时还能吸附杀虫剂及农药,降低其残留量进而提高农产品品质<sup>[8]</sup>。

### 3 研究展望

生物质炭由于具有来源广泛、价格低廉的特点,在设施栽培领域有广阔的应用前景。本文主要总结了生物炭改良设施土壤和栽培基质的理化性状,缓解土传病害和连作障碍以及作为无土栽培基质原料的替代物等方面的研究结果。为了促进这方面研究和实际应用,今后应将更多的研究精力放到以下几个方面。

1:生物质炭化标准化参数。规模化生产生物质炭是一个复杂的过程,各类农业废弃物的分类收集、炭化工艺、后续使用和再生利用都很重要。农业废弃物来源不一,也没有标准化的生物质炭化工艺,各批量间质量存在一定差异,因此应该建立相关的标准化参数体系,在此基础上形成标准化的产业体系,这是高效生产性能稳定的生物质炭并应用推广的关键因素。

2:栽培基质的技术指标优化。要集中力量解决生物质炭作为基质原料的关键技术问题,特别是 pH 和盐分的控制,并把以生物质炭为原料的基质与设施栽培的病虫害防治技术、水肥管理技术等结合起来。从实际应用出发,下一步的研究重点应集中在设施栽培技术与生物炭基质的互相配合上。

3:生物质炭及无土基质的再利用。虽然生物质炭稳定性高且氧化分解速度缓慢,但其老化后对污染物尤其是对天然有机物吸附的能力会减弱,因此对生物质炭施用后的长期效应,特别是环境效应方面的研究亟待开展。另一方面,无土栽培基质含有大量病菌,且经过植物生长和盐分运移等作用后容易产生病虫害,目前尚没有经济简便的基质消毒方法。废弃的基质如果可以用于再生生物质炭,不仅能达到农用废弃物的循环利用目的,还可在再生生物质炭的过程中杀灭基质中的病菌和虫害等,省去了再利用基质繁琐的消毒工作。

### 参考文献:

- [1] LEHMANN J, GAUNT J, RONDON M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: a review [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2): 1812-1836.
- [2] MCHENRY M P. Agricultural biochar production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in Western Australia: certainty, uncertainty and risk [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2009, 129(1): 1-7.
- [3] LEHMANN J, RILLIG M C, THIES J, et al. Biochar effects on soil biota—a review [J]. *Soil Biol Biochem*, 2011, 43(9): 1812-1836.
- [4] CAO X, ZHONG L, PENG X, et al. Comparative study of the pyrolysis of lignocellulose and its major components: characterization and overall distribution of their biochars and volatiles [J]. *Bioresource Technol*, 2014, 155: 21-27.
- [5] MOHAN D, SARSW A T A, OK Y S, et al. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent—a critical review [J]. *Bioresource Technol*, 2014, 160: 191-202.
- [6] SARANYA K, PALANISAMI T, MALLAVARAPU M, et al. Agronomic and remedial benefits and risks of applying biochar to soil: current knowledge and future research directions [J]. *Environment International*, 2016, 87: 1-12.
- [7] KUPPUSAMY S, THAVAMANI P, et al. Bioremediation potential of natural polyphenol rich green wastes: a review of current research and recommendations for future directions [J]. *Environ Technol Innov*, 2015, 4: 17-28.
- [8] 范如芹, 罗佳, 高岩, 等. 农业废弃物的基质化利用研究进展 [J]. *江苏农业学报*, 2014, 30(2): 442-448.
- [9] 范如芹, 罗佳, 高岩, 等. 农业废弃物的基质化利用研究进展 [J]. *江苏农业学报*, 2014, 30(2): 442-448.
- [10] 刘振东, 李贵春, 杨晓梅, 等. 我国农业废弃物资源化利用现状与发展趋势分析 [J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(26): 13068-13070, 13076.
- [11] HANSEN C L, CHEONG D Y. *Agricultural waste management in food processing* [M]. New York: William Andrew Publishing, 2013: 619-666.
- [12] 李鹏, 张俊彪. 农业生产废弃物循环利用绩效测度的实证研究——基于三阶段 DEA 模型的农户基质化管理 [J]. *中国环境科学*, 2013, 33(4): 754-761.
- [13] CANTRELL K B, HUNT P G, UCHIMIYA M, et al. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 107: 419-428.
- [14] ZHANG A, CUI L, PAN G, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2010, 139(139): 469-475.

- [15] GRABER E R, MELLER H Y, KOLTON M, et al. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media[J]. *Plant Soil*, 2010, 337(1-2): 481-496.
- [16] 马 艳, 王光飞. 生物炭防控植物土传病害研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(6): 14-20.
- [17] NEROME M, TOYOTA K, ISLAM T M, et al. Suppression of bacterial wilt of tomato by incorporation of municipal biowaste charcoal into soil[J]. *Soil Microorganisms*, 2005, 59(4): 9-14.
- [18] 陶思源. 关于我国农业废弃物资源化问题的思考[J]. *理论界*, 2013(5): 28-30.
- [19] NOVAK J M, LIMA I, XING B, et al. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand[J]. *Annals of Environmental Science*, 2009, 3: 195-206.
- [20] HUSSEIN K N, HALE S E, et al. Sustainable technologies for small-scale biochar production-a review[J]. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 2015, 5(1): 10-31.
- [21] KLOSS S, ZEHETNER F, DELLANTONIO A, et al. Characterization of slow pyrolysis biochars: effects of feedstocks and pyrolysis temperature on biochar properties[J]. *J Environ Qual*, 2012, 41(4): 990-1000.
- [22] 颜 钰, 王子莹, 金 洁, 等. 不同生物质来源和热解温度条件下制备的生物炭对非的吸附行为[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(9): 1810-1816.
- [23] YUAN J H, XU R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol[J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(1): 110-115.
- [24] 张伟明. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
- [25] 张 鹏, 武健羽, 李 力, 等. 猪粪制备的生物炭对西维因的吸附与催化水解作用[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(2): 416-421.
- [26] MARCO K, PETER S N, MARK G J, et al. Dynamic molecular structure of plant biomass derived black carbon ( biochar ) [J]. *Environ Sci Technol*, 2010, 44(4): 1247-1253.
- [27] BRACMORT K. Biochar: examination of an emerging concept to mitigate climate change[J]. *Congressional research service*, 2010, 5(24): 1-9.
- [28] CHOPPALA G, BOLAN N, MEGHARAJ M, et al. The influence of biochar and black carbon on reduction and bioavailability of chromate in soils[J]. *J Environ Qual*, 2012, 41(4): 1175-1184.
- [29] HOSAIN M K, STREZOV V, CHAN K Y, et al. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar[J]. *J Environ Manag*, 2011, 92(1): 223-228.
- [30] 袁金华, 徐仁扣. 炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(4): 779-785.
- [31] GLASER B, LEHMANN J, ZECH W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-a review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 219-230.
- [32] DUGAN E, VERHOEF A, ROBINSON S, et al. Biochar from sawdust, maize stover and charcoal: impact on water holding capacities(WHC) of three soils from Ghana[C]. SWIFT R, MCKENZIE N. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. Brisbane; Published on DVD, 2010: 1-6.
- [33] 陈温福, 张伟明, 孟 军, 等. 生物炭应用技术研究[J]. *中国工程科学*, 2011, 13(2): 83-89.
- [34] DUMROESE R K, HEISKANEN J, ENGLUND K, et al. Pelleted biochar: chemical and physical properties show potential use as a substrate in container nurseries [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(5): 2018-2027.
- [35] CAO C T N, FARRELL C, KRISTIABSEN P E, et al. Biochar makes green roof substrates lighter and improves water supply to plants[J]. *Ecol Eng*, 2014, 71: 368-374.
- [36] 李志刚, 刘晓刚, 李 健. 硫酸铵与鸡粪配比在含生物质炭育苗基质中的应用效果[J]. *中国土壤与肥料*, 2012, 12(1): 83-88.
- [37] FAN R Q, LUO J, YAN S H, et al. Effects of biochar and super absorbent polymer on substrate properties and water spinach growth [J]. *Pedosphere*, 2015, 25(5): 737-748.
- [38] ZHANG L, SUN X Y, TIAN Y, et al. Biochar and humic acid amendments improve the quality of composted green waste as a growth medium for the ornamental plant *calathea insignis*[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 176(176): 70-78.
- [39] PRENDERGAST-MILLER M T, DUVAL M, SOHI S P. Biochar-root interactions are mediated by biochar nutrient content and impacts on soil nutrient availability[J]. *Eur J Soil Sci*, 2014, 65(1): 173-185.
- [40] ASAI H, SAMSON B K, STEOHAN H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crop Res*, 2009, 111(S1-2): 81-84.
- [41] SCHEER C, GRACE P R, ROWLINGS D W, et al. Effect of biochar amendment on the soil-atmosphere exchange of greenhouse gases from an intensive subtropical pasture in northern New South Wales, Australia[J]. *Plant Soil*, 2011, 345(1): 47-58.
- [42] 马欢欢, 周建斌, 王刘江, 等. 秸秆炭基肥料挤压造粒成型优化及主要性能[J]. *农业工程学报*, 2014, 3(5): 270-276.
- [43] 蒋恩臣, 张 伟, 秦丽元, 等. 粒状生物质炭基尿素肥料制备及其性能研究[J]. *东北农业大学学报*, 2014, 45(11): 89-94.
- [44] KUPPUSAMY S, KRISHNAN P S, KUMUTHA K, et al. Suitability of UK and Indian source acacia wood based biochar as a best carrier material for the preparation of *Azospirillum inoculum* [J]. *International Journal of Biotechnology*, 2011, 4(6): 582-588.
- [45] OGAWA M, OKIMORI Y. Pioneering works in biochar research, Japan[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(7): 489-500.
- [46] JAISWAL A K, ELAD Y, GRABER E R. *Rhizoctonia solanisus*

- pression and plant growth promotion in cucumber as affected by biochar pyrolysis temperature, feedstock and concentration[J]. *Soil & Biochemistry*, 2014, 69(1): 110-118.
- [47] 王晓辉, 郭光霞, 郑瑞伦, 等. 生物炭对设施退化土壤氮相关功能微生物群落丰度的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(3): 624-631.
- [48] DUCEY T F, IPPOLITO J A, CANTRELL, et al. Addition of activated switchgrass biochar to an aridic subsoil increases microbial nitrogen cycling gene abundances[J]. *Appl Soil Ecol*, 2013, 65(2): 65-72.
- [49] ELMER W H, PIGNATELLO J J. Effect of biochar amendments on mycorrhizal associations and *Fusarium* crown and root rot of asparagus in replant soils[J]. *Plant Dis*, 2011, 95(9): 960-966.
- [50] 邹春娇, 张勇勇, 张一鸣, 等. 生物炭对设施连作黄瓜根域基质酶活性和微生物的调节[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1772-1778.
- [51] ELAD Y, RAV DAVID D, MELLER HAREL Y, et al. Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil applied carbon sequestering agent[J]. *Phytopathology*, 2010, 100(9): 913-921.
- [52] 王艳芳, 沈 向, 陈学森, 等. 生物炭对缓解对羟基苯甲酸伤害平邑甜茶幼苗的作用[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(5): 968-976.
- [53] ROGOVSKA N, LAIRD D, CRUSE R M, et al. Germination tests for assessing biochar quality[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4): 1014-1022.
- [54] MELLER H Y, ELAD Y, RAV D D, et al. Biochar mediates systemic response of strawberry to foliar fungal pathogens[J]. *Plant Soil*, 2012, 357(1-2): 245-257.
- [55] ELAD Y, CYTRYN E, MELLER HAREL Y, et al. The biochar effect: plant resistance to biotic stress[J]. *Phytopathol Mediterr*, 2011, 50(3): 335-349.
- [56] MENDEZ A, PZA-FERREIRO J, GIL E, et al. The effect of paper sludge and biochar addition on brown peat and coir based growing media properties[J]. *Sci Hortic*, 2015, 193: 225-230.
- [57] VAUGHN S F, KENAR J A, ELLER F J, et al. Physical and chemical characterization of biochars produced from coppiced wood of thirteen tree species for use in horticultural substrates [J]. *Industrial Crops and Products*, 2015, 66: 44-51.
- [58] VAUGHN S F, ELLER F J, EVANGELISTA R L, et al. Evaluation of biochar-anaerobic potato digestate mixtures as renewable components of horticultural potting media [J]. *Industrial Crops and Products*, 2015, 65: 467-471.
- [59] TIAN Y, SUN X Y, LI S Y, et al. Biochar made from green waste as peat substitute in growth media for *Cala-thea rotundifolia* cv. *Fasciata* [J]. *Scientia Horticultura*, 2012, 143(143): 15-18.
- [60] STEVEN F, VAUGHN, JAMES A, et al. Comparison of biochars derived from wood pellets and pelletized wheat straw as replacements for peat in potting substrates [J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 51(6): 437-443.
- [61] NIETO A, GASCO G, PAZ-FERREIRO J, et al. The effect of pruning waste and biochar addition on brown peat based growing media properties [J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 199: 142-148.
- [62] HEADLEE W L, BREWER C E, HALL R B. Biochar as a substitute for vermiculite in potting mix for hybrid poplar [J]. *Bioenergy Res*, 2014, 7(1): 120-131.
- [63] JAYASINGHE G Y, ARACHCHI I D L, TOKASHIKI Y. Evaluation of containerized substrates developed from cattle manure compost and synthetic aggregates for ornamental plant production as a peat alternative [J]. *Resour Conserv Recy*, 2010, 54(2): 1412-1418.
- [64] 李志刚, 秦 军, 赵 健, 等. 添加硫酸铵的生物质炭型育苗基质使用效果研究 [J]. *中国农学通报*, 2010, 26(24): 295-300.
- [65] 桂成民. 微波热解制备污泥生物炭研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
- [66] CAO X D, MA L N, GAO B, et al. Dairy-manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(9): 3285-3291.
- [67] HUA L, WU W X, LIU Y X, et al. Reduction of nitrogen loss and Cu and Zn mobility during sludge composting with bamboo charcoal amendment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2009, 16(1): 1-9.
- [68] 周建斌, 邓丛静, 陈金林, 等. 棉秆炭对镉污染土壤的修复效果 [J]. *生态环境*, 2008, 17(15): 1857-1860.

(责任编辑: 陈海霞)