

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.001

生物炭基肥增效技术与制备工艺研究进展分析

李艳梅¹ 张兴昌² 廖上强¹ 杨俊刚¹ 张琳¹ 孙焱鑫¹

(1.北京市农林科学院植物营养与资源研究所,北京100097;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌712100)

摘要:生物炭基肥是以生物炭为载体与传统肥料复合而成的新型缓释肥料,其在农业生产及污染防控中的作用得到广泛认可。基于多年研究成果和文献综合分析,阐述了生物炭基肥的研发背景与重要性及生物炭基肥的增效机制,包括:吸持缓释养分、改善土壤理化性质及作物根系生长的水肥气热环境、改善土壤微生物生长的微环境、提供矿质养分及生物刺激物质等。此外,阐述了生物炭基肥在提升作物产量与品质、肥料高效利用与减施增效及环境污染防控等方面的作用;以及产品在制备(调整生物炭来源和炭-肥混合方式)、成型(确定形状,筛选粘接剂和延展剂)、配方(调整基础肥料组成,调整生物炭、水和粘接剂比例)及改性工艺(添加不同比例的高岭土、膨润土、煤炭腐植酸及其复配物的改性材料)方面的最新进展。根据现有问题及技术需求,指出加强新型产品研制及应用基础研究,加强大尺度应用的农业水土、经济、环境等效应及综合评价指标体系研究,及加快应用技术推广是生物炭基肥增效技术领域未来主要研究方向。

关键词:生物炭基肥;增效剂;土壤;作物;污染防控;碳减排

中图分类号: S724 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)10-0001-14

Research Progress on Synergy Technologies of Carbon-based Fertilizer and Its Application

LI Yanmei¹ ZHANG Xingchang² LIAO Shangqiang¹ YANG Jungang¹ ZHANG Lin¹ SUN Yanxin¹
(1. Institute of Plant Nutrition and Resource, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097, China
2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The carbon-based fertilizer, a new type of slow-release fertilizer made from compounding process of traditional fertilizer and biochar carrier, has been widely recognized in role of improving crop production and preventing non-point source pollution. Based on comprehensive analysis of author's research experience and the literature summary in past few years, the research background and application significance of the fertilizer as well as its potential synergistic mechanisms were successively expounded. The mechanisms included: withholding and slow-releasing mineral nutrients; improving soil physical structure and chemical property, and regulating soil moisture, nutrient, vapor, and heat condition for root growth; improving microenvironment for soil microbial growth; and providing mineral nutrients and bio-stimulating substances for plants. Furthermore, the application values of the fertilizer were summarized from three aspects: improving crop's yield and quality, enhancing the fertilizer use efficiency and help reducing fertilizer inputs, and preventing and controlling environmental pollution. Additionally, recent advances in the fertilizer's research and development process were also summarized from four aspects: preparation process (changing feedstock of biochar carrier, and biochar-traditional fertilizer mixing method); forming process (determination of shape, screening of adhesives and extenders); formulation process (adjusting traditional fertilizer's composition, and blending ratio of biochar, water and adhesives); and modification process (adding different proportions of kaolin, bentonite, coal humic acid and their binary or ternary complex). According to the existing problems and technical needs, it can be concluded that the main directions in this research field in the near future

收稿日期:2017-07-04 修回日期:2017-08-10

基金项目:北京市农林科学院青年基金项目(QNJJ201611)、国家重点研发计划项目(2016YFD0201010、2017YFC0504504、2017YFD0800400)、北京市叶类蔬菜产业创新团队项目(BAIC07-2016)、北京市粮经作物产业创新团队项目(BAIC09-2016)和北京博云益达种植专业合作社科技能力提升项目(201654)

作者简介:李艳梅(1983—),女,助理研究员,博士,主要从事废弃物资源化利用和新型肥料等研究,E-mail: liyanmei0101@163.com

通信作者:孙焱鑫(1971—),男,副研究员,博士,主要从事养分资源管理研究,E-mail: Sunyanxin@sohu.com

would be to enhance the research and development of new products and their applied basic research; strengthen the research into their agricultural soil and water effects, economics, environmental impacts, and comprehensive evaluation index system at large-scale application; and speed up application technology popularization.

Key words: carbon-based fertilizer; synergist; soil; crop; pollution control; carbon reduction

引言

我国农业生产中的肥料品种不适宜及施用方法不合理现象比较普遍,不仅导致作物产量与品质提升困难,而且易引起肥料利用率低、生产成本增加及环境污染等问题^[1-3]。在农业部发布化肥零增长行动方案背景下,加强肥料增效关键技术研究及增效肥料产品推广应用成为我国化肥行业结构调整的重要方向^[4]。与此同时,我国农林业每年产生约10亿t的废弃副产物,而用作燃料和肥料的比率却越来越低^[5]。农林废弃物的随意丢弃和田间焚烧不仅存在有机质资源的巨大浪费,而且导致农田面源污染问题日趋严重,并加剧水体和大气的污染风险^[6-7]。生物质热解炭化技术是当前绿色低碳农业的重点发展技术,其炭化产品生物炭的还田利用对农业可持续发展具有重要意义^[8-9]。以农林废弃物作为生物质来源制备的生物炭不仅富含羰基、羧基、羟基等官能团,而且具有来源广、可再生和环境友好的特点,是一种具备多方面优良性能的肥料增效载体^[8,10];将该类生物炭与传统肥料复合制备生物炭基肥的研究已成为农业科学领域的研究热点。

生物炭基肥的应用不仅有利于农业提质增效,还有利于农业面源污染控制及农田土壤固碳减排目标的实现^[11]。更重要的是,生物炭基肥中的养分释放后,残留的生物炭载体仍能够继续发挥土壤改良剂的作用;且能有效避免生物炭直接还田引起的二次扬尘污染及操作不便,以及生物炭改良土壤时大量施入农田带来的经济成本等问题^[12-15]。以农林废弃物生物炭作为肥料增效载体的实践是一项兼顾废弃物资源化利用与新型环保肥料制备的双赢举措,相应的生物炭基肥产品的农业应用对进一步完善现行的生态循环农业模式具有深远意义。但生物炭基肥研究是近年新兴发展起来的研究内容,相关研究仍处于起步发展阶段,文献报道尤其来自权威期刊的报道相对较少,学科发展略显薄弱;近几年,国内学者针对生物炭基肥产品研发及其在农业与环保领域的应用开展了一些有益的探索和思考,但有关作物调控机理研究及大规模示范推广相对缺乏,新型生物炭基肥产品的农田应用评价及市场化推广仍亟待加强。

本文在现有研究基础上,以生物炭基肥炭缓释载体对农作物生产的调控机制为出发点,对生物炭基肥农田应用现状及研发工艺现状进行阐述,并提出生物炭基肥增效技术未来的重点研究方向。

1 生物炭基肥增效调控机制

生物炭基肥增效技术包括物理、化学、生物等技术,其对农作物生产的效应主要通过影响土壤水肥气热及作物水肥吸收的途径来实现,着重于对水和肥这两种作物关键生长因子的控制。生物炭基肥调控效应的实现关键在于炭基载体缓释性能及生物炭调控特性的发挥。

生物炭载体的缓释增效机制主要分为4大类:①吸持缓释养分类,主要包括吸持肥料养分、延缓肥料养分在土壤中的释放、降低肥料养分的损失等。②改善土壤理化性质及水肥气热特征类,主要包括增加土壤有机碳及改良团聚体结构、调控土壤酸碱度、增强土壤水分调节能力、增强土壤养分置换能力、增加土壤疏松度和透气性、调节土壤温度等。③改善土壤微生物特性类,主要包括为微生物提供栖息环境、生存空间及水分养分等。④提供养分及增加生物刺激物质类,主要包括提供大中微量元素、芳香烃及脂肪类化合物。

(1) 生物炭可以吸持和缓释养分

主要原因有:①生物炭表面富含羟基、羧基、羰基等官能团,且较为活跃^[16],能与肥料发生化学反应从而负载一定养分。②生物炭表面部分化学官能团能电离产生电荷,使其具备离子交换吸附能力,通过静电作用吸附养分离子^[17]。③生物炭丰富的孔隙结构使其具有较大比表面积,从而具有较大吸附能力,使其表面能吸持一定养分^[18-20]。生物炭通过负载、吸附和吸持作用,固持肥料氮磷钾养分,减少养分离子从土壤颗粒表面的解离,从而减少矿质养分的径流、淋溶及挥发损失^[21]。

(2) 生物炭可以改善土壤理化性质及作物根系生长的水肥气热环境

主要表现在:①生物炭的富碳特征使其具有增加土壤碳截留、提升土壤碳供应的能力^[22-26]。生物炭还有助于促进土壤团聚体形成,增加大团聚体含量及稳定性,提高土壤及不同粒径团聚体中有机碳

的含量,这有利于土壤障碍因子改良及土壤培肥目标的实现^[27-29]。②生物炭表面的酚基、羧基和羟基,及钾钙钠镁硅的硅酸盐、碳酸盐和碳酸氢盐使生物炭具有碱性特征,施于土壤后能吸附土壤溶液中的 H^+ ,进而增加土壤 pH 值,这种作用在水溶性有机物含量低的酸性土壤中尤其明显^[30-32]。③土壤中添加适量生物炭能有效降低土壤干燥过程中的收缩程度,增加土壤饱和含水量、毛管含水量和田间持水量,增强土壤吸水持水及入渗性能^[20,33-37]。④生物炭含有巨大的比表面积、丰富的囊泡和微孔,这有助于降低土壤容重、增加土壤孔隙度及阳离子交换量^[36,38-39]。⑤生物炭丰富的孔隙结构可增加土壤疏松度和通透性、优化根系生长环境,进而优化根系形态特征、提升根系活力及养分吸收能力^[40-41]。⑥具有调节土壤地表温度的潜力,对土壤起到保温作用,有利于根系发育及养分吸收^[42-44]。

(3) 生物炭可以改善土壤微生物微环境

主要原因有:①生物炭能够为微生物提供栖息场所和生存空间,使其免遭其他土壤生物的侵食^[17,45]。②生物炭能够增加酸性土壤 pH 值,创造有利于微生物生长的环境,从而增加微生物数量,使土壤中微生物群落结构向有利于作物根系生长的方向演替^[46-48]。③生物炭能够为微生物提供不同的碳源和其他营养物质,对微生物群落利用糖类、胺类和酚类碳源能力具有促进作用,使微生物能够旺盛

地生存繁衍,从而促进根系对养分的利用^[49]。④生物炭调节土壤氮素循环,进而直接或间接影响土壤微生物活性、丰度以及多样性,提高微生物碳源的代谢特征^[50-51]。

(4) 生物炭可以提供矿质养分及生物刺激物质

生物炭不仅含有丰富的有机碳组分,而且含有一定量的氮、磷、钾、钙、镁、硅、硫、铁、锰、铜、锌、钼等无机矿物组分^[23-26,52-53],其含有的养分元素可直接输入土壤供作物根系利用,尤其能提高土壤全钾和速效钾含量,促进作物对土壤钾素的吸收^[54-56]。生物炭表面有环化的呋喃类化合物和直链的小分子化合物,其中的 13 种化合物在植物代谢过程中起重要作用,丁子香酚、对羟基苯甲酸丁酯及水杨醇在植物防御机制中具有重要作用,羟基苯甲酸丁酯及水杨醇 2 种有机化合物在植物防御昆虫入侵中发挥重要功能^[57]。

2 生物炭基肥农田应用研究成果

从已有研究来看,生物炭基肥的产品类型有炭基氮肥、炭基复合肥、炭基有机肥、炭基复混肥等,应用对象涉及大田作物小麦、水稻、玉米、花生、马铃薯、棉花等,以及设施蔬菜小白菜、芹菜、青椒、番茄等,其农业应用总体表现为正调控效应,具体体现在增产提质、节肥增效及固碳减排等方面(表 1)^[15, 21, 52, 54, 58-77]。

表 1 生物炭基肥调控目标、应用方法及作用效果

Tab. 1 Regulation goals, techniques and effects of carbon-based fertilizer

调控目标	应用方法	作用效果	文献序号
	炭基硝酸铵,纯 N 量 225 kg/hm ² ;作为基肥一次性施入	小麦产量增加 21% ~ 36%	[15]
	稻壳炭基肥及改性炭基肥,按 150 mg/kg 土装盆	小白菜硝酸盐含量降低 19%,可溶糖、维生素 C 含量分别增加 35% 和 22%	[21]
	炭基复合肥(N、P ₂ O ₅ 、K ₂ O 质量比为 18:9:10)700 kg/hm ² ,基肥施	总养分减少 18% 基础上小白菜增产 45%;硝酸盐含量降低 28%,可溶糖含量提高 22%	[52]
	炭基复混肥(猪粪与化肥配制,N、P ₂ O ₅ 和 K ₂ O 分别为 60、75、105 kg/hm ²),基施	连续施用 3 年后,花生增产 9.4%	[54]
	炭基复合肥,与土壤混匀一次施入	小麦地上部干重增加 8.27%	[58]
	炭基复合肥(N、P ₂ O ₅ 、K ₂ O 质量比 18:9:10)300 kg/hm ² ,作为基肥一次性施入	总养分减少 18% 基础上,小麦产量增加 20% ~ 35%	[59]
	炭基硝酸铵,纯 N 量 225 kg/hm ² ;作为基肥一次性施入	夏玉米增产 17% ~ 59%	[60]
	炭基有机肥,37.5 t/hm ² ,土壤旋耕前均匀撒施	小麦产量增加 8.72%	[61]
	炭基复混肥(猪粪与化肥配制,N、P ₂ O ₅ 、K ₂ O 质量比为 18:9:10),450 kg/hm ² ,基施	减少施氮 19% 基础上,水稻经济产量提高 6.7%	[62]
	炭基复合肥,第 1 次施 160 kg/hm ² ,第 2 次(23 d 后)施 950 kg/hm ²	水稻产量增加 7.7%	[63]
	炭基有机肥,37.5 t/hm ² ,一次性基施	增加水稻抽穗期至成熟期的干物质积累量和产量	[64]
	炭基复合肥(N、P ₂ O ₅ 、K ₂ O 质量比 18:11:11)750 kg/hm ² ,翻耕后与土壤混匀	玉米籽粒产量增加 7.5% ~ 10.0%,持续的年际增产作用	[65]
增产提质	炭基尿素,作为底肥与土壤混合后装盆	玉米增产 14.6%	[66]
	炭基复合肥(N、P ₂ O ₅ 、K ₂ O 质量比为 25:10:10),作为基肥一次性施入耕层	缩短生育周期,改善产量性状;玉米产量增加 8.48%	[67]

续表 1

调控目标	应用方法	作用效果	文献序号
	炭基复合肥, 300 ~ 1 200 kg/hm ² , 基肥撒施	增加马铃薯干物质积累、结薯数和大薯率; 产量增加 26% ~ 49%	[68]
	炭基复合肥(N、P ₂ O ₅ 、K ₂ O 质量比 11:15:6) 919 kg/hm ² , 基肥撒施	增加棉花花蕾数、果苔数和生物量; 产量增加 25%	[69]
	炭基复合肥(N、P ₂ O ₅ 、K ₂ O 质量比 18:9:10) 750 kg/hm ² , 一次性穴施	总养分减量 18% 时, 青椒产量提高 13%; 等养分时, 青椒维生素 C 含量提高 51% ~ 69%	[70]
	炭基尿素 300 kg/hm ² , 30% 用量作为基肥	番茄产量增加 14% ~ 15%, 硝酸盐含量降低 12% ~ 13%	[71]
	炭基尿素 300 kg/hm ² , 50% 用量作为基肥	芹菜产量增加 6.7% ~ 18%, 硝酸盐含量降低 29% ~ 48%	[72]
	炭基复合肥 444 kg/hm ² , 一次性穴施	番茄产量提升 23%, 硝酸盐含量降低 27%	[73]
	炭基尿素 300 kg/hm ² , 40% 用量作为基肥	番茄产量增加 9% ~ 51%, 硝酸盐含量降低 11% ~ 15%	[74]
	炭基尿素 300 kg/hm ² , 一次性基施	番茄产量增加 3.16% ~ 7.27%, 番茄红素含量增加 53% ~ 98%	[75]
保肥增效	炭基硝酸铵, 纯 N 量 225 kg/hm ² ; 作为底肥一次性施入	小麦收获期土壤有机碳和全氮含量分别增加 2.6% ~ 6.6%、28% ~ 32%	[15]
	稻壳炭基肥及改性炭基肥, 按照 150 mg/kg 土装盆	促进小白菜氮磷钾吸收	[21]
	炭基复合肥(N、P ₂ O ₅ 、K ₂ O 质量比 18:9:10) 700 kg/hm ² , 基肥旋施	增加小白菜收获期土壤碱解氮和全氮含量, 增加植株氮素利用率及农学效率	[52]
	炭基复混肥(猪粪与化肥配制, N、P ₂ O ₅ 、K ₂ O 分别为 60、75、105 kg/hm ²), 基施	花生收获期土壤有机质、全钾和速效钾含量明显增加	[54]
	炭基复合肥, 与土壤混匀一次施入	增加小麦生长后期土壤氮磷供给, 使小麦氮磷吸收分别提高 19% 和 15%	[58]
	炭基复合肥(N、P ₂ O ₅ 、K ₂ O 质量比 18:9:10) 300 kg/hm ² , 作为基肥一次性施入	小麦氮肥偏生产力提升 18% ~ 34%	[59]
	炭基复混肥(猪粪与化肥配制, N、P ₂ O ₅ 、K ₂ O 质量比为 18:9:10), 450 kg/hm ² , 基施	水稻籽粒与茎叶吸氮量比值提高 11% ~ 59%, 氮素偏生产力提高 33% ~ 74%	[62]
	炭基有机肥, 37.5 t/hm ² , 一次性基施	土壤全氮、全磷、水溶氮、水溶磷含量分别增加 10%、10%、12% 和 9.7%	[64]
	炭基尿素 300 kg/hm ² , 30% 用量作为基肥	番茄氮肥利用率增加 2.3% ~ 4.0%	[71]
	炭基尿素 300 kg/hm ² , 40% 用量作为基肥	增强番茄叶片光合作用及调节叶片蒸腾强度的作用	[74]
炭基尿素 300 kg/hm ² , 一次性基施	番茄氮肥偏生产力提高 16 kg/kg, 灌溉水生产效率提高 14 kg/mm	[75]	
	炭基硝酸铵, 纯 N 量 225 kg/hm ² ; 作为底肥一次性施入	使小麦氮素利用率显著提升了 8% ~ 24%	[76-77]
固碳减排	稻壳炭基肥及改性炭基肥, 按照 150 mg/kg 土装盆	稻田 CH ₄ 、N ₂ O 和温室气体排放强度分别降低 25% ~ 50%、31% ~ 39% 和 36% ~ 56%	[21]
	炭基复合肥(N、P ₂ O ₅ 、K ₂ O 质量比 18:9:10) 300 kg/hm ² , 作为基肥一次性施入	总养分减少 18% 基础上, 小麦田 N ₂ O 减排 56% ~ 65%	[59]
	炭基有机肥, 37.5 t/hm ² , 土壤旋耕前均匀撒施	全球增温潜势 GWP 降低 36%, 单位产量 GWP 降低 37%	[61]
	炭基复合肥, 第 1 次施 160 kg/hm ² , 第 2 次(23 d 后) 施 950 kg/hm ²	水稻地土壤径流总氮流失量削减 27% ~ 56%	[63]
	炭基复合肥(N、P ₂ O ₅ 、K ₂ O 质量比 18:11:11) 750 kg/hm ² , 翻耕后与土壤混匀	试验玉米地第一年 CH ₄ + N ₂ O 显著降低 27%	[65]
	炭基尿素 300 kg/hm ² , 50% 用量作为基肥	有效增加表层土壤氮素累积, 减少氮素向下层土壤淋失	[72]
	炭基尿素 300 kg/hm ² , 一次性基施	增加耕层土壤氮素累积, 减少氮素深层迁移	[75]

作物产量与品质形成是作物生产极重要的一环, 也是农业生产系统的最后一环^[78]。实现对作物产量和品质的调控, 是生物炭基肥增效技术在农业生产经济效益的体现, 也是生物炭基肥在农业生产中能够得到大面积推广应用的前提条件。大量的盆栽及大田试验证实, 应用生物炭基肥能够促进大

田主要作物的生长发育, 增加其干物质累积及经济学产量。生物炭基肥不仅增加了小麦、玉米和水稻等主粮作物的产量^[13,15,21,58-67], 而且增加了花生、马铃薯和棉花等粮经作物的产量^[54,68-69]。生物炭基肥还有效提升了设施蔬菜的产量与品质, 不仅增加了小白菜、芹菜、青椒和番茄的产量, 而且增加了小

白菜和番茄的可溶糖、芹菜和青椒的维生素 C 含量,及番茄果实中番茄红素的含量,有效降低了小白菜和芹菜叶片、青椒和番茄果实中的硝酸盐含量^[21,52,70-75]。

农业部化肥零增长行动方案的两大关键措施是减少化肥用量和提升化肥利用率,所以减肥增效和新型肥料研发已成为农业研究和产业研发的重点^[79-80]。近年的研究表明,新型炭基缓释肥具有保肥增效的作用。生物炭基肥增加了小麦、花生、水稻收获期土壤有机质含量和氮磷钾全量及速效态含量^[15,54,64],增强番茄叶片光合作用并调节叶片蒸腾强度^[74],促进小麦、水稻、玉米、小白菜、芹菜和番茄的矿质养分吸收,提升了作物的肥料利用率^[15,21,52,58-59,62,71,74-77]和灌溉水生产效率^[75]。甘蔗渣炭基复合肥可在总养分量减少 18% 的基础上,使小麦产量提升 20% ~ 35%^[59];秸秆炭猪粪炭基复混肥可在施氮量减少 18% 的基础上,增加水稻、小白菜和青椒的产量^[21,52,62,70]。更重要的是,生物炭基肥的这种减肥增效作用已经表现出年际持续效应^[65]。

此外,矿质养分流失及气体污染物排放是制约

农业发展的关键因素,由于肥料不合理施用降低了肥料利用率,由此引起的肥料土表残留与深层淋溶、径流及挥发损失等成为当前农业生产亟待解决的问题^[81-82]。如何采取有效的措施来减少肥料养分流失及其引发的环境污染值得思考研究。而据报道,一部分大田试验已经证实生物炭基肥在防控面源污染及固碳减排方面的积极作用。研究发现,生物炭基氮肥与普通氮肥相比,明显减少了设施蔬菜地土壤硝态氮向深层土壤的淋失^[74-75],生物炭基复合肥与普通复合肥相比,明显削减了稻田径流总氮流失^[63]。研究还发现,生物炭基肥显著降低了水稻田 CH₄ 和 N₂O 排放量及温室气体排放强度^[21],并且使小麦田 N₂O 排放量显著减少 56% ~ 65%^[59]、全球增温潜势降低 36%^[61]、玉米田 CH₄ + N₂O 排放量显著降低 27%^[65]。

3 生物炭基肥研发工艺优化

研究表明,调整生物炭物料来源、混合方式、炭基肥制备及改性工艺均会影响作物产量、品质及氮肥利用率(表 2)^[13,21,52,59-60,62-63,70-71,76-77,83-100]。

表 2 生物炭基肥工艺优化、研究方法与作用效果

Tab.2 Process optimizations, research methods and effects of carbon-based fertilizer

工艺优化途径	研究方法	作用效果	文献序号	
物料来源优化	小麦、玉米秸秆和花生壳源	水稻试验	花生壳炭基肥在增产、节氮及减排方面的效果优于小麦秸秆源和玉米秸秆源	[21]
	棉花、玉米和小麦秸秆,花生壳和稻壳源	小麦试验	从提升产量和氮肥偏生产力的角度,花生壳源效果最佳,其次是棉花秸秆源和玉米秸秆源	[59]
	小麦、玉米秸秆和花生壳源	小白菜试验	小麦秸秆炭基肥在化肥减施、提升作物产量及氮肥利用率方面的推广潜力更优	[52,62]
	小麦秸秆、花生壳和稻壳源	青椒试验	小麦秸秆炭基肥增产效果好,稻壳和花生壳炭基肥提升品质效果好	[70]
混合方式优化	掺混型、吸附型和化学反应型	小麦试验	反应型炭基肥处理小麦的氮肥利用率明显优于其他两种炭基肥	[13]
		夏玉米试验	反应型炭基肥处理玉米的产量和氮肥偏生产力最高,其次是吸附型、掺混型	[60]
		小麦试验	反应型炭基肥处理小麦的氮素养分释放效果优于吸附工艺型	[76-77]
水溶型、熔融型和直混型	芹菜试验	水溶型炭基肥增产效果最佳,其次是熔融型、直混型	[71]	
磨具成型参数	肥料试制及分析	生物炭、尿素、碱木质素质量分数为 55% ~ 70%、23% ~ 40%、4% ~ 12%,水 10%,60℃ 密封加热 5 ~ 10 min,磨具成型,45℃ 干燥 2 h 制得炭基肥肥效长,肥料利用率高	[83]	
	沙柱淋溶试验	压强 5.1 MPa、温度 70℃、木质素添加比例 15% 制备的柱状炭基尿素的缓释性能最好	[84]	
	柱状成型参数	沙柱淋溶试验	压强 6 MPa、生物炭与尿素质量比 1:1、水添加 10%、粘接剂 7% 炭基尿素的缓释性能最佳	[85]
制肥工艺优化	肥料试制及分析	基础肥料 70% (N、P ₂ O ₅ 、K ₂ O 质量比为 10:8:10),秸秆炭 16.6%,水 13%,常温制作,符合国家标准	[86]	
	盆栽试验	包衣层质量比 15% 处理玉米的株高、茎粗及产量性能较好	[66]	
	肥料试制及分析	生物炭与尿素质量比 1:1,水和粘接剂添加量分别 15% ~ 25%、10% 制备的炭基肥缓释性较好	[85]	
粒状成型参数	肥料试制及分析	温度 60 ~ 100℃、炭肥比大于 1 时,成粒率大于 95%,干燥 90 min 可达质量平衡,制肥过程氮素损失少	[87]	
	综述	生物炭 20% ~ 60%,粘接剂和水比例分别为 10% 和 15% ~ 25%	[88]	

续表 2

工艺优化途径	研究方法	作用效果	文献序号
改性工艺 优化	肥料试制及分析	木质素-木醋液粘结剂制备的包膜尿素的造粒率和包膜率优于木质素乙醇型	[89-90]
	肥料试制及分析	炭粉、尿素、磷酸二氢钾、胶粘剂质量比约为4:1:1:1时,生物炭基复混肥成粒率和压缩强度最高	[91]
	黑麦草试验	生物炭、磷酸二氢钾、羧甲基纤维素钠(粘接剂)质量比为2:1:0.3的炭基肥促进生长的效果最佳	[92]
	高岭土改性	沙柱淋溶试验 尿素与炭质量比1:5、粒径5~6 mm、水15%、高岭土10%制得炭基尿素成型及缓释性最佳	[93]
	膨润土改性	肥料试制及分析 生物炭与膨润土比例1:2.2,粘接剂质量分数8%、添加量30%,所得炭颗粒肥的整体性能较好	[94]
	高岭土和膨润土改性	小白菜试验 膨润土改性造粒生物炭基肥在提升小白菜品质及养分利用方面的效果优于高岭土型	[21]
	生物炭改性	小麦和青椒试验 磷酸活化改性秸秆生物炭基肥在缓释、增产提效提质方面的效果优于普通秸秆炭基肥	[95]
	生物炭和膨润土改性	樱桃试验 复混肥与改性玉米芯生物炭复合,膨润土做粘接剂制成炭基肥,增产提质低耗节本提效	[96]
		烤烟试验 复混肥与改性烟梗生物炭复合,膨润土做粘接剂制成炭基肥,低耗节本提效	[97]
		水稻试验 生物炭、膨润土和腐植酸占比25%、4%和10%,改性玉米淀粉为粘接剂制备炭基肥的缓释效果较好	[63]
膨润土和腐植酸改性	水稻试验 氮磷钾肥45份、生物炭6~10份,膨润土2~5份和腐植酸3~6份的湿物料造粒制得炭基肥,增产提效明显	[98]	
	水稻试验 按质量分数炭粉50%~70%、膨润土5%~10%、腐植酸5%~15%、混合抑制剂2%~5%,提升了氮肥磷肥利用率	[99]	
	茶叶试验 复混肥与生物炭复合,膨润土、腐植酸和茶籽油为粘接剂制得,能改善茶叶品质,防止土壤板结	[100]	

水稻和小白菜施用研究发现,从化肥减施、提升作物产量及氮肥利用率的目标来看,小麦秸秆炭基肥优于玉米秸秆炭基肥和花生壳炭基肥^[52,62];小麦生产证实,从作物产量与氮肥生产力角度考虑,不同物料来源生物炭基肥的优先度顺序为:花生壳源、棉花秸秆源和玉米秸秆源、稻壳源、小麦秸秆源^[59];青椒试验发现,小麦秸秆炭基氮肥增加作物产量的效果最好,稻壳炭基肥和花生壳炭基肥提升作物品质的效果更佳^[70]。芹菜研究表明,水溶型炭基肥提升作物产量及氮肥利用率的效果最佳,熔融型和直混型的效果次之^[71];小麦和玉米试验发现,硝酸铵与生物炭以化学反应方式混合制备的生物炭基肥的氮素缓释及增效效果最佳,明显优于物理吸附型和直接掺混型^[13,60,76-77]。

基于方便运输和施用便利性的考虑,生物炭基肥成型加工工艺的研究必不可少。目前,生物炭基肥小试和中试阶段主要采用的工艺类型是包膜造粒工艺和柱状成型工艺^[84,87-88,93-94,101-102]。其中,包膜造粒工艺具有能耗低、操作简便和产量高等优点,更适于产业化生产生物炭基肥料^[88,93-94,101]。在包膜造粒和柱状成型工艺中,粘接剂的筛选及优化尤为重要。在生物炭和普通肥料作为基料基础上添加粘接剂能大幅增加成型率,进而提升肥料缓释性能及农用效果,但增效程度也因粘接剂类型不同而存

在较大差异。文献报道的粘接剂类型主要有木质素、羧甲基纤维素钠、淀粉、植物油及其改性产物。木质素是在自然界中储量仅次于纤维素的第二大天然高分子材料,具有无毒、可降解、可再生、化学活性好的优点^[89,103-106],在生物炭基肥制备中的粘接效果较好^[89-90]。羧甲基纤维素钠由天然纤维素或淀粉经化学改性得到,存在粘度和取代度不高的问题,需通过添加酸、碱、醇的方式增强粘接性^[107-109]。淀粉粘接剂由小麦淀粉、玉米淀粉和薯类淀粉等通过煮浆和冲浆方式制得,具有原料易得、价格低廉、无污染、使用方便等优点,但存在易凝胶、初粘力不强及干燥后变脆的缺点^[110],应用时应同时添加无机填料或酸,或采用加热方式来增强其粘接性^[91,111]。植物油粘接剂单独应用存在成型性差的问题,实际应用时也需添加一定量的溶剂、酸或碱进行改性处理以提升其粘接性^[112-113]。对柱状生物炭基尿素的淋溶试验表明,羧甲基纤维素钠和氧化淀粉作为粘接剂的炭基肥的缓释效果优于其他粘接剂^[85];不同粘接剂类型在粒状及无定型生物炭基肥中的对比结果尚不可知。一些报道中,研究人员还通过两种或多种粘接剂的复配混合来增强粘接性能^[114-115]。一项针对颗粒包膜炭基肥粘接剂性能的测试结果显示:在低浓度混合粘接剂中,木质素磺酸钠与淀粉以1:2比例混合的粘接效果最佳,在此基础上继续添加

原粘接剂用量 1/9 的海藻酸钠能进一步增强粘接性^[94]。此外,针对常见木质素粘接剂的研究发现,对木质素进行延展优化处理可提升肥料的粘接和缓释效果。两种木质素延展剂的比较显示:以木醋液作为延展剂改性处理木质素粘接剂制备的炭包膜尿素的包膜率、成粒率、力学及缓释性能均优于乙醇改性处理,因此更适于生物炭包膜肥料的制备,其增强缓释性能的原因在于木醋液通过破坏木质素内部羟基间的分子结构使木质素团状分子结构展开,因而显著提升了对肥料的粘接性^[90]。

一些学者针对生物炭基肥制肥工艺开展了研究。通过工艺研究发现,将尿素、生物炭和碱木质素按不同质量比均匀混合,加入总质量 10% 的水分,在 60 °C 环境中密封加热 5 ~ 10 min 后装入模具压力成型制得的生物炭基肥具有较长的肥效^[83]。沙柱淋溶试验发现,木质素添加比例 15%、成型压力 5.1 MPa、成型温度 70 °C 制备的柱状生物炭基肥的缓释性能较好^[84]。尿素与生物炭质量比 1:1、水和羧甲基纤维素钠添加量分别为 5% ~ 10% 和 7%、成型压力 6 MPa 制备的柱状生物炭基肥的缓释性能较好^[85]。基础肥料(尿素、过磷酸钙和磷酸二氢铵、氯化钾)占比 70%、秸秆炭占比 16.6%、添加水 13%,常温下无需添加胶粘剂即可挤压制成符合国家相应标准的条状生物炭基肥^[86]。生物炭基肥粒状成型工艺中,粘接剂是必不可少的辅助材料,同时应控制好各投入物料的添加比例。生物炭添加比例一般为 20% ~ 60%,粘接剂和水分添加比例分别为 10% 和 15% ~ 25%^[88]。肥芯外包衣层的质量占比会明显影响粒状生物炭基肥的肥效期,25 °C 恒温静水培养试验法和玉米盆栽试验表明,玉米秸秆炭和植物油粘接剂作为粒状生物炭基肥的主要包衣材料,其添加比例调至 15% 时的玉米株高、茎粗及产量性能最好^[66]。挤出造粒法中,干燥温度为 60 ~ 100 °C、炭肥比大于 1,各组肥料干燥 90 min 左右时可获得良好的抗压强度和成粒率(大于 95%)^[87]。淀粉掺加 NaOH 溶液并加热糊化处理制得黏性和流动性较佳的胶粘剂,进而与尿素、磷酸二氢钾和炭粉以 1:1:1:4 的质量比混合制得的生物炭基复混肥颗粒的成粒率(95.6%)和压缩强度(0.026 MPa)均较高^[91]。尿素与生物炭质量比 1:1、水和粘接剂添加量分别为 15% ~ 25% 和 10%,制备的粒状生物炭基肥的缓释性能较好^[85]。通过盆栽试验发现,磷酸二氢钾与玉米秸秆炭、羧甲基纤维素钠以 1:2:0.3 的比例制备的粒状生物炭基肥对温室黑麦草生长的促进效果最佳^[92]。

一些学者又对生物炭基肥的制作工艺进行了改

性探索。膨润土和高岭土因含有微孔矿物结构,有助于增加养分吸持,是较常采用的生物炭基肥改性制剂。一项沙柱淋溶试验发现,尿素与生物炭质量比 1:5、粒径 5 ~ 6 mm、水添加量 15%、高岭土添加量 10% 制备的粒状生物炭基肥的成型效果及缓释性能最佳^[93];生物炭与膨润土比例 1:2.2,粘接剂浓度 8%,粘接剂用量占粉料物料 30%,挤出转速 8 r/min 制得的粒状生物炭基肥在含水率、颗粒抗压强度、圆度、粒度分布和养分释放性能等指标上的整体性能较好^[94]。对比研究发现,膨润土改性造粒生物炭基肥在促进小白菜生长、增加可溶糖和维生素 C 含量、降低叶片硝酸盐累积及提升肥料偏生产力方面的效果均优于高岭土改性造粒工艺制备的生物炭基肥^[21]。针对生物炭载体改性的研究表明,磷酸活化增加了半改性和改性生物炭表面官能团数量及比表面积,从而增强了生物炭的养分吸附和缓释能力;相应的改性生物炭基复合肥与等养分普通秸秆炭基肥相比,表现出增产、增加果实可溶蛋白和降低果实硝酸盐累积的作用^[95]。在复混肥料和改性秸秆炭中添加膨润土制成的颗粒状改性生物炭基肥可满足大樱桃各重要生育期的养分需求,提升了果实产量、品质和肥料利用率^[96];这种颗粒状改性生物炭基肥一次施用即可有效供应烤烟全生育期的养分需求,表现出较好的节本增效、降耗、省工的作用^[97]。膨润土与腐植酸的配合也起到较好的改性增效作用。以氮磷钾颗粒肥料作为肥芯,在肥芯外包覆水稻秸秆生物炭、膨润土和腐植酸的复合粘接剂,制得的炭基缓释肥用于水稻生产明显提升了作物产量和肥料利用率,同时有效控制农业面源污染,肥料增效的原因在于:腐植酸通过在肥料外围形成紧致膜层进而提升了炭基肥的缓释性^[63,98]。一种包含生物炭粉、酸性膨润土、腐植酸、脲酶抑制剂、硝化抑制剂和微肥成分的肥料增效剂被证实能有效提升肥料利用率,降低肥料损失,减轻肥料施用对水体和大气的污染^[99]。以复混肥料为基料,向生物炭和膨润土中添加一定比例的腐植酸和茶籽油,制备的生物炭基肥可有效调节茶树生长过程中的营养供给,防止土壤板结、改善茶叶品质^[100]。

总之,调整生物炭物料来源和添加量、肥料种类与配方、生物炭粉与肥料比例、水添加比例,粘接剂种类、浓度和用量,复配制肥工艺(掺混、吸附、反应、成型等)、外源功能物质及改性工艺等均会影响生物炭基肥的增效性能及农学与环境效应。制备生物炭基肥时应予以综合考虑,以提升生物炭基肥制作工艺及农业应用的科学性和针对性。

4 展望

生物炭基肥是近年来新型缓释肥的一种重要技术产品,也是备受农业及环保领域关注的研究课题。经过近年的研究与应用实践,对生物炭基肥农田应用已经取得一定的成效和进展,在研发工艺方面也开展了一些有益的探索。

根据近年来生物炭基肥研究的进展和实践,结合存在问题,生物炭基肥在未来还需要从以下几方面继续开展研究:

(1)加强生物炭基肥的应用基础研究。对生物炭基肥水肥吸持特性与根系生长的互作机制及其对

作物水肥利用的调控机制进行深入探索。

(2)对新型粘接剂材料及生物炭基肥制作工艺加大研发力度,生物炭、粘接剂及改性剂的作用性能是生物炭基肥缓释技术的根本,新型环保生物炭基肥缓释技术是今后研究的重点。

(3)加快生物炭基肥缓释技术的推广和示范,包括适合不同地域、气候、土壤、栽培和水分管理条件下的生物炭基肥产品、施用量及施用方法等。

(4)生物炭基肥规模应用下的农业水土、经济、环境等效应及综合评价指标体系将是今后重要研究课题。

参 考 文 献

- 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.
ZHANG Fusuo, WANG Jiqing, ZHANG Weifeng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Journal of Soil Science, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)
- YIN G H, GU J, ZHANG F S, et al. Maize yield response to water supply and fertilizer input in a semi-arid environment of Northeast China[J]. Plos One, 2014, 9(1): 1-5.
- 刘兆辉,薄录吉,李彦,等.氮肥减量施用技术及其对作物产量和生态环境的影响综述[J].中国土壤与肥料,2016(4):1-8.
LIU Zhaohui, BO Luji, LI Yan, et al. Effect of nitrogen fertilizer reduction on crop yield and ecological environment: a review [J]. Soil and Fertilizer Sciences, 2016(4): 1-8. (in Chinese)
- 叶丽君.化肥零增长背景下化肥企业的转型方向[J].磷肥与复肥,2016,31(10):1.
YE Lijun. Transformation direction of chemical fertilizer enterprises under zero growth of fertilizer rates [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2016, 31(10):1. (in Chinese)
- 董莘.基于不凝气载热的生物质制油关键装置设计研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2014.
DONG Shen. Design and research of the key instrument of producing bio-oil base on non-condensable gas of load heat [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014. (in Chinese)
- 王晓曼.早熟禾厌氧发酵特性和产气潜力的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.
WANG Xiaoman. Study on anaerobic fermentation and biogas potential of bluegrass [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- 孟军,张伟明,王绍斌,等.农林废弃物炭化还田技术的发展与前景[J].沈阳农业大学学报:社会科学版,2011,42(4):387-392.
MENG Jun, ZHANG Weiming, WANG Shaobin, et al. Development and prospect of carbonization and returning technology of agro-forestry residue [J]. Social Science Journal of Shenyang Agricultural University, 2011, 42(4): 387-392. (in Chinese)
- 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.
HE Xusheng, GENG Zengchao, SHE Diao, et al. Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamic [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 1-7. (in Chinese)
- 张偲何,洪春来,朱凤香,等.农业废弃物资源化利用现状与前景展望[J].现代农业科技,2013(20):209,218.
ZHANG Xihe, HONG Chunlai, ZHU Fengxiang, et al. Present situation and prospect of agricultural waste resource utilization [J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2013(20): 209, 218. (in Chinese)
- 王欣,尹带霞,张凤,等.生物炭对土壤肥力与环境质量的影响机制与风险解析[J].农业工程学报,2015,31(4):248-257.
WANG Xin, YIN Daixia, ZHANG Feng, et al. Analysis of effect mechanism and risk of biochar on soil fertility and environmental quality [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 248-257. (in Chinese)
- 魏春辉,任奕林,刘峰,等.生物炭及生物炭基肥在农业中的应用研究进展[J].河南农业科学,2016,45(3):14-19.
WEI Chunhui, REN Yilin, LIU Feng, et al. Research progress of application of biochar and biochar-based fertilizer in agriculture [J]. Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(3): 14-19. (in Chinese)
- 苗晓杰.稻壳热解活化及炭基缓释氮肥研究[D].广州:华南农业大学,2011.
MIAO Xiaojie. Research on pyrolysis of rice husk and the biochar-based nitrogen fertilizer [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- 张雯.新型生物炭基氮肥的研制及田间应用研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2014.
ZHANG Wen. Study on production of new type of biochar-based nitrogen fertilizer and its field application [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)

- 14 梁恒. 影响生物炭基氮肥氮素释放因素的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.
LIANG Heng. Study on factors affecting nitrogen release from biochar-based fertilizer[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 15 赵军, 耿增超, 尚杰, 等. 生物炭及炭基硝酸铵对土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(8): 2355 - 2362.
ZHAO Jun, GENG Zengchao, SHANG Jie, et al. Effects of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizers on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(8): 2355 - 2362. (in Chinese)
- 16 夏广洁. 生物质炭影响下重金属的吸附行为及生物可给性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.
XIA Guangjie. The sorption behavior and the bioaccessibility of heavy metals affected by biochars [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014. (in Chinese)
- 17 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.
GAO Jingyao, WANG Hongyan, XU Maomao, et al. Research progress on effects of biochar application on soil and crop growth in farmland [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(10): 10 - 15. (in Chinese)
- 18 刘宁. 生物炭的理化性质及其在农业中的应用基础研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2014.
LIU Ning. Physical and chemical properties of biochar and its basic application in agriculture [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 19 勾芒芒, 屈忠义, 杨晓, 等. 生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 137 - 142. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140122&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.022.
GOU Mangmang, QU Zhongyi, YANG Xiao, et al. Study on the effects of biochar on saving water, preserving fertility and tomato yield [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 137 - 142. (in Chinese)
- 20 吴昱, 赵雨森, 刘慧, 等. 秸秆生物炭对黑土区坡耕地生产能力影响分析与评价[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 247 - 256. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20170731&year_id=2017&quarter_id=7&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.031.
WU Yu, ZHAO Yusen, LIU Hui, et al. Analysis and evaluation of influence of straw biochar on soil productivity of sloping land in black soil region [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 247 - 256. (in Chinese)
- 21 钱力. 生物质炭基肥料的试验与改性探索[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
QIAN Li. Field trial and explorations on modified biochar-based fertilizer [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 22 HUFF M D, SANDEEP K, LEE J W. Comparative analysis of pinewood, peanut shell, and bamboo biomass derived biochars produced via hydrothermal conversion and pyrolysis [J]. Journal of Environmental Management, 2014, 146: 303 - 308.
- 23 RAJAPAKSHA A U, VITHANAGE M, ZHANG M, et al. Pyrolysis condition affected sulfamethazine sorption by tea waste biochars. [J]. Bioresource Technology, 2014, 166(166): 303.
- 24 BUDAI A, WANG L, GRONLI M, et al. Surface properties and chemical composition of corncob and miscanthus biochars: effects of production temperature and method [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2014, 62(17): 3791 - 3799.
- 25 NOVAK J M, CANTRELL K B, WATTS D W, et al. Designing relevant biochars as soil amendments using lignocellulosic-based and manure-based feedstocks [J]. Journal of Soils & Sediments, 2014, 14(2): 330 - 343.
- 26 LUO L, XU C, CHEN Z. Properties of biomass-derived biochars: combined effects of operating conditions and biomass types [J]. Bioresource Technology, 2015, 192: 83 - 89.
- 27 侯晓娜, 李慧, 朱刘兵, 等. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 705 - 712.
HOU Xiaona, LI Hui, ZHU Liubing, et al. Effects of biochar and straw additions on lime concretion black soil aggregate composition and organic carbon distribution [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(4): 705 - 712. (in Chinese)
- 28 尚杰, 耿增超, 赵军, 等. 生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1969 - 1976.
SHANG Jie, GENG Zengchao, ZHAO Jun, et al. Effects of biochar on water thermal properties and aggregate stability of Lou soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(7): 1969 - 1976. (in Chinese)
- 29 米会珍, 朱利霞, 沈玉芳, 等. 生物炭对旱作农田土壤有机碳及氮素在团聚体中分布的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8): 1550 - 1556.
MI Huizhen, ZHU Lixia, SHEN Yufang, et al. Biochar effects on organic carbon and nitrogen in soil aggregates in semiarid farmland [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(8): 1550 - 1556. (in Chinese)
- 30 CHINTALA R, MOLLINEDO J, SCHUMACHER T E, et al. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil [J]. Archives of Agronomy & Soil Science, 2014, 60(3): 393 - 404.
- 31 KOGEL-KNABNER I, AMELUNG W. 12.7-dynamics, chemistry, and preservation of organic matter in soils [J]. Treatise on

- Geochemistry, 2014, 13(8):157-215.
- 32 战秀梅,彭靖,王月,等. 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.
ZHAN Xiumei, PENG Jing, WANG Yue, et al. Influences of application of biochar and biochar-based fertilizer on brown soil physicochemical properties and peanut yields[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2015, 21(6):1633-1641. (in Chinese)
- 33 文曼,郑纪勇. 生物炭不同粒径及不同添加量对土壤收缩特征的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1):46-55.
WEN Man, ZHENG Jiyong. Effects of different sizes of biochar and their addition rates on soil shrinkage characteristics[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(1):46-55. (in Chinese)
- 34 田丹. 生物炭对不同质地土壤结构及水力特征参数影响试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
TIAN Dan. The experimental study of influence of biochar on different texture soils structure and hydraulic characteristic parameters[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural university, 2013. (in Chinese)
- 35 王艳阳,魏永霞,孙继鹏,等. 不同生物炭施加量的土壤水分入渗及其分布特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8):113-119.
WANG Yanyang, WEI Yongxia, SUN Jipeng, et al. Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8):113-119. (in Chinese)
- 36 潘全良,宋涛,陈坤,等. 连续6年施用生物炭和炭基肥对棕壤生物活性的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(3):225-232.
PAN Quanliang, SONG Tao, CHEN Kun, et al. Influences of 6-year application of biochar and biochar-based compound fertilizer on soil bioactivity on brown soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-sinica, 2016, 31(3):225-232. (in Chinese)
- 37 魏永霞,刘志凯,冯鼎锐,等. 生物炭对草甸黑土物理性质及雨后水分动态变化的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8):201-207. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20160825&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.025.
WEI Yongxia, LIU Zhikai, FENG Dingrui, et al. Influences of biochar on physical properties of meadow black soil and dynamics changes of soil water after individual rainfall[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8):201-207. (in Chinese)
- 38 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 Yuxue, WANG Yaofeng, LV Haohao, et al. Effects of different application rates of rice straw biochar and bamboo biochar on yield and quality of greengrocery and soil properties[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(6):1438-1444. (in Chinese)
- 39 李秋霞,陈效民,靳泽文,等. 生物炭对旱地红壤理化性状和作物产量的持续效应[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3):208-213.
LI Qiuxia, CHEN Xiaomin, JIN Zewen, et al. Persistent effects of biochar on soil physicochemical properties and crop yields in upland red soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3):208-213. (in Chinese)
- 40 张伟明,孟军,王嘉宇,等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(8):1445-1451.
ZHANG Weiming, MENG Jun, WANG Jiayu, et al. Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(8):1445-1451. (in Chinese)
- 41 李昌见. 生物炭对砂壤土理化性质及番茄生长性状的影响及其关键应用技术研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.
LI Changjian. Influence of biochar on the physical and chemical properties of sandy loam as well as tomato growth[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 42 李昌见,屈忠义,勾芒芒,等. 生物炭对土壤水肥热效应的影响试验研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7):1141-1147.
LI Changjian, QU Zhongyi, GOU Mangmang, et al. The research of biochar's effect on soil humidity, fertility and temperature[J]. Ecology and Environment Sciences, 2014, 23(7):1141-1147. (in Chinese)
- 43 尚杰. 添加生物炭对壤土理化性质和作物生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
SHANG Jie. The effects of biochar on physicochemical properties of Lou soil and crop growth[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- 44 赵建坤,李江舟,杜章留,等. 施用生物炭对土壤物理性质影响的研究进展[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(3):95-101.
ZHAO Jiankun, LI Jiangzhou, DU Zhangliu, et al. Effects of biochar application on soil physical properties; a review[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2016, 32(3):95-101. (in Chinese)
- 45 饶霜,卢阳,黄飞,等. 生物炭对土壤微生物的影响研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(1):53-59.
RAO Shuang, LU Yang, HUANG Fei, et al. A review of researches on effects of biochars on soil microorganisms[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, 32(1):53-59. (in Chinese)
- 46 周之栋,卜晓莉,吴永波,等. 生物炭对土壤微生物特性影响的研究进展[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2016, 40(6):1-8.
ZHOU Zhidong, BU Xiaoli, WU Yongbo, et al. Research advances in biochar effects on soil microbial properties[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2016, 40(6):1-8. (in Chinese)

- 47 李明, 胡云, 黄修梅, 等. 生物炭对设施黄瓜根际土壤养分和菌群的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11):172-178. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20161123&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.023.
LI Ming, HU Yun, HUANG Xiumei, et al. Effect of biological carbon on nutrient and bacterial communities of rhizosphere soil of facility cucumber[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11):172-178. (in Chinese)
- 48 李发虎, 李明, 刘金泉, 等. 生物炭对温室黄瓜根际土壤真菌丰度和根系生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4):265-270. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20170434&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.034.
LI Fahu, LI Ming, LIU Jinquan, et al. Effect of biochar on fungal abundance of rhizosphere soil and cucumber root growth in greenhouse[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4):265-270. (in Chinese)
- 49 李航. 香蕉假茎生物炭对香蕉苗生长及根际微生物的影响[D]. 厦门: 华侨大学, 2016.
LI Hang. Effects of banana caulo biochar on growth of banana seedling and microbial communities of banana seedling rhizosphere [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2016. (in Chinese)
- 50 梁皓. 不同培养方式下生物炭对土壤微生物的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
LIANG Hao. Effects of biochar on soil microbial under different culture conditions [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 51 江琳琳. 生物炭对土壤微生物多样性和群落结构的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
JIANG Linlin. The effect of biochar on soil microbial diversity and community structure [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 52 付嘉英. 生物质炭基肥料的试制及其在蔬菜地的应用探讨[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
FU Jiaying. Trial production of biochar-based fertilizer and its application in vegetable field [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 53 MUKOME F N, ZHANG X, SILVA L C, et al. Use of chemical and physical characteristics to investigate trends in biochar feedstocks[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2013, 61(9):2196-2204.
- 54 杨劲峰, 江彤, 韩晓日, 等. 连续施用炭基肥对花生土壤性质和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(3):68-73.
YANG Jinfeng, JIANG Tong, HAN Xiaori, et al. Effects of continuous application of biochar-based fertilizer on soil characters and yield under peanuts continuous cropping [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2015(3):68-73. (in Chinese)
- 55 杨劲峰, 鲁豫, 刘小华, 等. 施用炭基缓释肥对花生光合功能的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2):408-415.
YANG Jinfeng, LU Yu, LIU Xiaohua, et al. Effects of biochar-based slow-release fertilizer on photosynthetic characters of peanut functional leaves [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(2):408-415. (in Chinese)
- 56 聂新星. 生物炭对土壤钾素有效性及作物生长的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
NIE Xinxing. Effects of biochar on soil potassium availability and crop growth [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- 57 鄂洋. 生物炭表面有机小分子及其活性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2015.
E Yang. Analysis of biochar composition and bioactivity from surface organic small molecule [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 58 康日峰, 张乃明, 史静, 等. 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.
KANG Rifeng, ZHANG Naiming, SHI Jing, et al. Effects of biochar-based fertilizer on soil fertility, wheat growth and nutrient absorption[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2014(6):33-38. (in Chinese)
- 59 李正东, 陶金沙, 李恋卿, 等. 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.
LI Zhengdong, TAO Jinsha, LI Lianqing, et al. Effect of compound biochar-based fertilizer on wheat yield and greenhouse gas emission[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(1):177-183. (in Chinese)
- 60 赵军. 生物质炭基氮肥对土壤微生物量碳氮、土壤酶及作物产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
ZHAO Jun. Effects of biochar-based nitrogen fertilizer on soil microbial biomass carbon and nitrogen, soil enzymes and crop yield [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- 61 冯瑞兴, 何胥, 施洁君, 等. 炭基有机肥对小麦产量及麦季农田温室气体排放的影响[J]. 大麦与谷类科学, 2017, 34(3):6-11.
FENG Ruixing, HE Xu, SHI Jiejun, et al. Effects of organic fertilizer composted with biochar on wheat yield and greenhouse gas emission during wheat-growing season in a rice-wheat double cropping system[J]. Barley and Cereal Sciences, 2017, 34(3):6-11. (in Chinese)
- 62 陈琳, 乔志刚, 李恋卿, 等. 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 Lin, QIAO Zhigang, LI Lianqing, et al. Effects of biochar-based fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2013, 29(5):671-675. (in Chinese)
- 63 周旻旻. 水稻秸秆生物质炭基缓释肥的制备与应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

- ZHOU Minmin. Study on preparation and application of rice straw biochar-based nitrogen fertilizer[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- 64 王海候,陆长婴,沈明星,等. 炭基有机肥对水稻产量及土壤养分的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7):104-106.
WANG Haihou, LU Changying, SHEN Mingxing, et al. Effects of carbon based organic fertilizer on rice yield and soil nutrients [J]. Jiangsu Agricultural Science, 2016, 44(7): 104-106. (in Chinese)
- 65 李晓. 施用生物质炭及炭基肥对温室气体排放、玉米生长及土壤性质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
LI Xiao. Effects of biochar and biochar-based fertilizer amendment on greenhouse gas emission, maize growth and soil properties [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 66 朱晓旭,张忠庆,刘金华,等. 缓释多功能生物质炭包衣尿素的制备及性能研究[J]. 东北农业科学, 2016(5): 56-61.
ZHU Xiaoxu, ZHANG Zhongqing, LIU Jinhua, et al. Preparation of multifunctional slow-released biochar-coated urea and property[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2016(5): 56-61. (in Chinese)
- 67 王粟,张楠,钟鹏,等. 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.
WANG Su, ZHANG Nan, ZHONG Peng, et al. Effects of biochar base fertilizers on maize growth and yield[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2017(3):41-44. (in Chinese)
- 68 任少勇,王姣,黄美华,等. 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(4): 215-221.
REN Shaoyong, WANG Jiao, HUANG Meihua, et al. Effects of carbon based fertilizer on dry matter accumulation and distribution, and potato yield[J]. Chinese Potato Journal, 2013(4): 215-221. (in Chinese)
- 69 孙宁川,唐光木,徐万里,等. 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.
SUN Ningchuan, TANG Guangmu, XU Wanli, et al. 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. (in Chinese)
- 70 乔志刚. 不同生物质炭基肥对不同作物生长、产量及氮肥利用率的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
QIAO Zhigang. Effects of biochar-based nitrogen fertilizer on the growth, yield and nitrogen use efficiency of different crops[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 71 廖上强,陈延华,李艳梅,等. 减量灌溉条件下缓释肥料对番茄产量、品质及硝态氮淋溶的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(6): 70-75.
LIAO Shangqiang, CHEN Yanhua, LI Yanmei, et al. Effect of slow release fertilizer on yield and quality of tomato and $\text{NO}_3\text{-N}$ leaching under reduction irrigation condition[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2015(6): 70-75. (in Chinese)
- 72 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. (in Chinese)
LIAO Shangqiang, CHEN Yanhua, LI Yanmei, et al. Effect of biochar-based urea on yield and quality of celery and soil $\text{NO}_3\text{-N}$ content[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, 32(5):443-448. (in Chinese)
- 73 李大伟,周加顺,潘根兴,等. 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.
LI Dawei, ZHOU Jiashun, PAN Genxing, et al. Effects 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. (in Chinese)
- 74 李艳梅,杨俊刚,孙焱鑫,等. 炭基氮肥与灌水对温室番茄产量、品质及土壤硝态氮残留的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(10): 1965-1972.
LI Yanmei, YANG Jungang, SUN Yanxin, et al. Coupling effects of biochar-based urea and irrigation on tomato yield and fruit quality and soil nitrate content in greenhouse facility[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(10): 1965-1972. (in Chinese)
- 75 LI Yanmei, SUN Yanxin, LIAO Shangqiang, et al. Effects of two slow-release nitrogen fertilizers and irrigation on yield, quality, and water-fertilizer productivity of greenhouse tomato[J]. Agricultural Water Management, 2017, 186: 1-8.
- 76 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.
GAO Haiying, HE Xusheng, CHEN Xinxiang, et al. Effect of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizers on soil chemical properties and crop yield[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(10): 1948-1955. (in Chinese)
- 77 高海英. 一种生物炭基氮肥的特征及其对土壤作物的效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
GAO Haiying. Characteristic of one type of biochar-based nitrogen fertilizer and its influence on the crop growth and soil change [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)
- 78 杨培岭,廖人宽,任树梅,等. 化学调控技术在旱地水肥利用中的应用进展[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(6):100-109. http://www.j-csam.org/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20130619&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/J. ISSN. 1000-1298. 2013. 06. 019.
YANG Peiling, LIAO Renkuan, REN Shumei, et al. Application of chemical regulating technology for utilization of water and fertilizer in dry-land agriculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6):100-109. (in Chinese)
- 79 黄占斌,孙朋成,钟建,等. 高分子保水剂在土壤水肥保持和污染治理中的应用进展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1):

- 125 - 131.
- HUANG Zhanbin, SUN Pengcheng, ZHONG Jian, et al. Application of super absorbent polymer in water and fertilizer conversation of soil and pollution management[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(1): 125 - 131. (in Chinese)
- 80 田玉虎. 合作开发新型肥料,推动化肥零增长[J]. 化工管理, 2016(31):76 - 77.
- TIAN Yuhu. Cooperative development of new fertilizers to promote zero growth of fertilizer[J]. Chemical Enterprise Management, 2016(31):76 - 77. (in Chinese)
- 81 刘宏斌,李志宏,张维理,等. 露地栽培条件下大白菜氮肥利用率与硝态氮淋溶损失研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3):286 - 291.
- LIU Hongbin, LI Zhihong, ZHANG Weili, et al. Study on N use efficiency of chinese cabbage and nitrate leaching under open field cultivation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(3):286 - 291. (in Chinese)
- 82 闫湘,金继运,何萍,等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2):450 - 459.
- YAN Xiang, JIN Ji Yun, HE Ping, et al. Recent advances in technology of increasing fertilizer use efficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(2):450 - 459. (in Chinese)
- 83 秦丽元,蒋恩臣,王秋静,等. 木质素塑化粘结生物炭基尿素及制备方法:中国,201410151997.0[P]. 2014-07-02.
- 84 蒋恩臣,王秋静,秦丽元,等. 柱状生物炭基尿素的成型及性能研究[J]. 东北农业大学学报,2015,46(7): 83 - 89.
- JIANG Enchen, WANG Qiujing, QIN Liyuan, et al. Study on columnar urea based on biochar of molding characteristic and property[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015,46(7): 83 - 89. (in Chinese)
- 85 张伟. 水稻秸秆炭基缓释肥的制备及性能研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2014.
- ZHANG Wei. Study on preparation of rice straw biochar-based fertilizer and its characteristic[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 86 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, 30(5):270 - 276.
- MA Huanhuan, ZHOU Jianbin, WANG Liujiang, et al. Straw carbon based fertilizer granulation molding optimization and its main properties[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5):270 - 276. (in Chinese)
- 87 马谦,蒋恩臣,王明峰,等. 生物质炭基缓释肥的成型特性研究[J]. 农机化研究, 2015(4):242 - 246.
- MA Qian, JIANG Enchen, WANG Mingfeng, et al. Molding characteristics study of carbon-based biomass release fertilizer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(4):242 - 246. (in Chinese)
- 88 原鲁明,赵立欣,沈玉君,等. 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.
- YUAN Luming, ZHAO Lixin, SHEN Yujun, et al. Progress on biochar-based fertilizer production technology and equipment in china[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(4):107 - 113. (in Chinese)
- 89 王秋静. 木质素在生物质炭基肥料中的应用研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2015.
- WANG Qiujing. Study on the preparation and application of lignin in biochar urea [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 90 秦丽元,王秋静,蒋恩臣,等. 改性木质素粘结生物质炭包膜尿素肥料性能试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(5): 171 - 176. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160523&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.023.
- QIN Liyuan, WANG Qiujing, JIANG Enchen, et al. Study on biochar coated urea fertilizer with lignin adhesive modified by different solvents[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(5): 171 - 176. (in Chinese)
- 91 杜衍红,蒋恩臣,王明峰,等. 生物质炭基复混肥造粒用淀粉胶粘剂的合成条件研究[J]. 中国胶粘剂, 2016,44(10):8 - 11.
- DU Yanhong, JIANG Encheng, WANG Mingfeng, et al. Study on the synthetic conditions of starch adhesive for granulation of biomass carbon based compound fertilizer[J]. Chinese Adhesives, 2016,44(10): 8 - 11. (in Chinese)
- 92 孙樱萁,郭建斌,李子富,等. 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.
- SUN Yingqi, GUO Jianbin, LI Zifu, et al. Influence of biochar-based fertilizer on growth characteristics of ryegrass[J]. Journal of Northwest Agricultural and Forestry University: Natural Science Edition, 2016,44(12): 117 - 123. (in Chinese)
- 93 蒋恩臣,张伟,秦丽元,等. 粒状生物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.
- JIANG Enchen, ZHANG Wei, QIN Liyuan, et al. Study on preparation of granular biochar-based urea and property[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014, 45(11): 89 - 94. (in Chinese)
- 94 刘峰. 生物炭颗粒肥挤出滚圆成型装备与试验研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2016.
- LIU Feng. Study on extrusion-spheronization molding equipment and experiments for biochar granular fertilizer[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 95 姚春雪. 改性生物炭基肥料的特性及在生产上的应用[D]. 南京:南京农业大学, 2015.
- YAO Chunxue. Characteristics of modified carbon based fertilizer and its application in crop production[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 96 孟军,兰宇,陈温福. 一种改性生物炭大樱桃专用肥及其制备方法:中国,201410016207.8[P]. 2014-05-14.
- 97 孟军,兰宇,陈温福. 一种改性生物炭烤烟专用肥及其制备方法:中国,201410016157.3[P]. 2014-05-14.

- 98 吴伟祥,冯琪波,周旻旻,等.一种水稻炭基缓释肥及其制备方法:中国,102219604A[P].2011-10-19.
- 99 陈温福,孟军,刘金,等.一种炭基肥料增效剂及其应用:中国,102675001A[P].2012-09-19.
- 100 高进华,解学仕,周丽,等.一种富含生物炭高效茶园专用肥及其生产方法:中国,201610010567.6[P].2016-03-23.
- 101 原鲁明.炭基肥成型设备的设计与试验研究[D].青岛:青岛农业大学,2016.
YUAN Luming. Design and experiment research on biochar-based fertilizer granulation equipment[D]. Qingdao: Qingdao Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 102 任奕林,魏春辉,苑晓辰,等.柱状生物炭基肥成型机设计与试验[J].沈阳农业大学学报,2017,48(3):311-319.
REN Yilin, WEI Chunhui, YUAN Xiaochen, et al. Design and experiment of columnar biochar-based fertilizer forming machine [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(3):311-319. (in Chinese)
- 103 陈倩.新型缓释/控释肥料的研究-木质素肥料增效剂的环境与生物效应研究[D].北京:中国科学院研究生院,2003.
CHEN Qian. Study on new slow release/controlled release fertilizer-Environmental and biological effects of synergist for lignin fertilizer[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- 104 刘纲勇,邱学青,邢德松.工业木质素在木材胶粘剂中应用的研究进展[J].精细化工,2007,24(2):190-193.
LIU Gangyong, QIU Xueqing, XING Desong. Research progress in applications of industrial lignins to wood adhesives[J]. Fine Chemicals, 2007, 24(2):190-193. (in Chinese)
- 105 黄倪丽.木质素在胶粘剂中的应用研究进展[J].粘接,2010,31(3):61-66.
HUANG Xianli. Progress on application research of lignin in adhesive[J]. Adhesion in China, 2010, 31(3):61-66. (in Chinese)
- 106 王飞.木质素/聚己内酯降解塑料的制备及性能研究[D].绵阳:西南科技大学,2015.
WANG Fei. Preparation and characterization of the degradable composites of lignin and PCL[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- 107 戴振刚,陆艺峰.特高粘羧甲基纤维素钠的制备方法:中国,200810177216.X[P].2009-07-08.
- 108 毛丽军.羧甲基纤维素钠的制备方法:中国,201410324681.7[P].2014-10-15.
- 109 颜东,黄娟秀,董新理,等.用纸浆制备高粘度羧甲基纤维素钠的工艺研究[J].湖南工程学院学报:自然科学版,2015,25(2):69-72.
YAN Dong, HUANG Juanxiu, DONG Xinli, et al. Preparation process study on high viscosity sodium carboxymethyl cellulose by using pulp as raw material[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering: Natural Science Edition, 2015, 25(2):69-72. (in Chinese)
- 110 罗发兴,黄强,杨连生.淀粉基胶粘剂研究进展[J].化学与粘合,2003(2):78-80.
LUO Faxing, HUANG Qiang, YANG Liansheng. The study progress of starch adhesives [J]. Chemistry and Adhesion, 2003(2):78-80. (in Chinese)
- 111 李彦明,刘晓霞,李国学,等.淀粉粘结剂在有机复混肥造粒中的应用[J].中国生态农业学报,2007,15(3):29-31.
LI Yanming, LIU Xiaoxia, LI Guoxue, et al. Application of starch adhesive in organic compound fertilizer granulation [J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2007, 15(3):29-31. (in Chinese)
- 112 郑玉婴,吴章宏.植物油残渣制备高强度粘结剂的方法:中国,200410060629.1[P].2005-03-02.
- 113 徐廷旺.甲酯化桐油改性水性聚氨酯乳液的制备及性能研究[D].吉首:吉首大学,2012.
XU Tingwang. Study on preparation and properties of methyl-esterification tung oil-modified water polyurethane emulsion[D]. Jishou: Jishou University, 2012. (in Chinese)
- 114 张廷琴,徐雪松,王志国,等.一种含矮壮素和胺鲜酯混合物的植物生长调节剂:中国,200910227358.7[P].2010-08-25.
- 115 万小瑞,张廷琴,徐雪松,等.一种矮壮素泡腾片剂:中国,102524252 A[P].2012-07-04.