

# 生物炭生产工艺与还田效果研究进展

王雅君<sup>1,2</sup>, 李珊珊<sup>1</sup>, 姚宗路<sup>2</sup>, 赵立欣<sup>2\*</sup>, 邱凌<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 农业部规划设计研究院农村能源与环保研究所, 北京 100125)

**摘要:** 主要对生物炭还田效用、生产还田生物炭的重要工艺条件、生物炭的质量评价参数这3个主要部分进行综述和分析。提出生物炭研究及应用的当前问题, 并对今后的研究趋向和前景进行展望, 认为生物炭的研究仍在起步阶段, 生产原料、设备、工艺多种多样, 土壤类型、农作物也是种类繁多, 因此这一领域的研究难成体系, 施入方法也难以统一。有必要对具体农作物、具体土壤类型生产针对性强的还田生物炭, 而具体的生物炭施用方法有待学者们进一步地研究与总结, 但可以确定的是生物炭在农业领域中的研究应用仍存在巨大潜力。

**关键词:** 生物炭; 还田; 工艺条件; 评价参数; 施用效果

**中图分类号:** S156.2; X71; TK6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2017)05-0017-04

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.05.004

## Study advances regarding production technology of biochar and effects of its returning to field

WANG Ya-jun<sup>1,2</sup>, LI Shan-shan<sup>1</sup>, YAO Zong-lu<sup>2</sup>, ZHAO Li-xin<sup>2\*</sup>, QIU Ling<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Center of Rural Energy and Environmental Protection, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China)

**Abstract:** This paper mainly reviews and analyzes three aspects including the effect of biochar returning to field, the important process conditions producing biochar for returning to field and the quality evaluation parameter of biochar. The current issues of research and application of biochar are presented and the research trend and prospects in the future are predicted. The research and study of biochar is still in its infancy. There are a diversified variety of raw materials, equipments, technologies, soil types and crop species. Therefore, research and study in this area is difficult to develop into a complete system and it is also difficult to find a unified application method. It is essential to produce firmly targeted biochar for specific crops and specific soil types. And specific application methods are needed to be studied and summarized. It is certain that the application research of biochar in the field of agriculture still has great potential.

**Key words:** biochar; returning to field; technological condition; evaluation parameter; effect of application

随着经济发展, 生物质总量随着粮食作物产量的提高而增加<sup>[1]</sup>。由于直接焚烧会出现污染环境、危害健康、影响交通等不良后果, 因此对于农业废弃物的优质转换利用已成为新能源研究领域的重要一环。作为一个农业大国, 中国在自身的农业发展过程中形成了许多农业废弃物的利用方式<sup>[2]</sup>。目前, 农作物废弃物, 如秸秆、稻壳、玉米芯等, 主要用作饲料、肥料、工业原料和建筑材料。

炭化是目前生物质热化学转换几个主要方法之一。生物炭是指有机物在有限氧气供应条件下, 经高温热裂解后生成的固态富碳产物<sup>[3]</sup>。由于其比表面积及孔隙度较大, 具备一定吸附力及抗氧化力, 使其可以广泛应用于农业、能源、环境等领域。

从能源角度, 生物炭可以替代化石燃料, 成为清洁能源。有研究表明, 将合适的生物质(如木炭、竹

炭、板栗壳等)进行热解得到的生物炭非常适合作为燃料使用<sup>[4-5]</sup>, 达到或接近了国家一级精煤的标准。此外, 生物炭具有高度稳定性、多孔性、强吸附性等优良的理化特性, 正逐渐成为土壤学、环境科学和农学等领域的研究热点。现有研究表明, 生物炭输入土壤后可以有效捕捉并存储大气 CO<sub>2</sub>、增加土壤碳汇、减控农田温室气体排放、修复重金属及农药污染、提升农田综合生产力并促进作物生长, 因此农林生物质经炭化后还田有望成为人类应对全球气候变化和粮食安全生产的一条重要途径<sup>[6]</sup>。近年来研究学者对于生物炭在改良土壤、农作物增产等方面都做了大量的研究<sup>[7]</sup>。研究发现, 生物炭具有良好的结构与理化性质, 在改良土壤结构, 促进微生物生存繁殖, 提高作物产量与品质方面有重要作用<sup>[8]</sup>。此外, 生物炭可以平衡土壤酸碱环境, 吸附

收稿日期: 2016-08-31; 修回日期: 2017-03-12

基金项目: 引进国际先进农业科学技术计划(948计划)(2015-Z27)

作者简介: 王雅君(1991-), 男, 博士生, 助理工程师, 从事生物质能源与农业废弃物处理与综合利用方面研究, 815885504@qq.com; 赵立欣(1967-), 女, 博士, 研究员, 研究方向为农村能源, 通讯联系人, zhaolixin5092@163.com。

土壤、水体中的重金属污染与农药化学品残留<sup>[9]</sup>。因此,生物炭在农业上的积极作用越来越受到人们的重视。

## 1 生物炭原料分析

原料是制备生物炭的主要影响因素之一,可以称为生物炭的“先天”因素。不同生物质,其组成成分和工业分析结果肯定不同,朱锡锋等<sup>[10]</sup>对国内外研究进行总结,其中几类常见生物质炭化原料的数据如表 1 所示。生物炭质量主要由木质素、半纤维素和纤维素这 3 类主要物质决定,故不同的生物质类型在相同条件下所制备的生物炭有着显著差异,从结构、挥发物含量、灰分含量、比表面积和 CEC(土壤阳离子交换量)等各方面都表现出不同性能。因此,在生产生物炭过程中,不能使用相同的生产工艺,应根据实际的原料条件和炭化装置寻找到最适合自身生产的一套炭化工艺与方法,达到兼顾生物炭高质量、高产量的目的。

表 1 原料组成成分与工业分析 %

原料种类	组成成分				工业分析			
	木质素	半纤维素	纤维素	其他	水分	灰分	挥发分	固定碳
玉米秸秆	4.6	32.5	32.9	30.0	4.87	5.93	75.90	13.30
麦秆	9.5	22.4	43.2	24.9	4.93	8.90	67.36	19.35
高粱秆	7.6	31.6	42.2	18.6	4.71	8.91	68.90	17.48
稻草	6.3	34.3	39.6	19.8	4.97	13.86	65.11	16.06
核桃壳	53.8	19.9	22.1	4.2	2.25	1.46	82.23	14.06
松针	23.0	6.8	29.7	—	4.54	1.47	77.75	14.10
毛竹	19.6	17.3	35.8	—	6.65	1.07	80.46	11.82

## 2 生产工艺

生物质炭化的生产工艺是受原料自身和炭化装置影响的,对于木质类的生物质废弃物,由于其木质素含量较高,灰分及水分含量较少,故其生物质炭本身的质量与炭得率比秸秆要高,可以通过较高的炭化温度热解制得。而生物质秸秆是生物质资源的主要组成部分,虽然农作物秸秆的炭得率普遍低于木质类生物质,但其优越性体现在本身的资源量很大,且有处理需求。据调查,2009 年全国农作物的秸秆理论资源量为 8.20 亿 t,其中又以玉米秸秆、小麦秸秆和稻草为最主要的 3 类。除原料本身的性质外,生产工艺也严重影响生物炭最终的品质及炭得率。

### 2.1 炭化终温

生物质热裂解是一个复杂的热化学反应过程,包括多个化学反应。如分子键的断裂、异化以及小

分子的聚合等反应。生物炭的产率、结构以及理化特性主要受到裂解温度的影响。提高裂解温度,得炭率、氮氢等元素比例降低,但能促进生物质炭的芳构化,增大比表面积,提高吸附能力,增强表面疏水性<sup>[11]</sup>。

丛宏斌等<sup>[12]</sup>从兼顾生物炭得率与生产率的角度对玉米秸秆、玉米芯、花生壳进行炭化分析并得出结论:玉米秸秆对炭化工艺条件最为敏感,3 类生物质推荐的炭化温度区间分别为 550 ~ 600℃、600 ~ 650℃ 以及 600 ~ 650℃。侯建伟等<sup>[13]</sup>在进行沙蒿热解试验时发现,当温度由 300℃ 升至 900℃ 时,生物炭的产率从 44.57% 降至 25.40%,且降幅最大值出现在 300 ~ 400℃。李飞跃等<sup>[14]</sup>以核桃壳作为生物质炭的生产原料,研究热解温度在 200 ~ 700℃ 时,对炭得率、元素组成、表面官能团分布及稳定性的影响。研究表明,热解温度直接影响了上述参数的变化。温度越高,生物炭的稳定性越强。

### 2.2 升温速率

提高加热速率,固、液、气三相产物均会有很大改变,一般而言,气液两相的产率会大幅提升,而目的产物生物炭的产率会随之下降。因此,为获得高产率的生物炭,需要较低的反应温度及缓慢的反应速率,一般为 0.6 ~ 120.0℃/min。

黄睿等<sup>[15]</sup>研究了不同升温速率下成型生物物质的热解炭化规律,并得出结论:达到最大失重速率时的温度随升温速率的增大而升高,较低升温速率热解有利于成型生物质热解成炭,而且挥发分的析出温度随着升温速率的升高而增加。Hanzade 等<sup>[16]</sup>进行了不同升温速率对榛子壳的热解试验,结果表明,较高的升温速率使得生物炭产生较多的分裂结构,生物炭颗粒中存在较大孔洞,也存在一些小尺寸的颗粒结构。

### 2.3 催化剂及添加剂的使用

催化剂(或添加剂)的使用对热解产气、产生物油以及生物炭的得率与性质都有影响。姬登祥等<sup>[17]</sup>发现,将 NiCl<sub>2</sub> 和 CoCl<sub>2</sub> 加载到 ZnCl<sub>2</sub>-KCl 体系中可以使木屑生物炭得率分别为 46.8% 和 45.1%,而没有施用催化剂的试验组的生物炭得率为 35% 左右。可见,催化剂添加可以大幅提高生物炭得率。Hathaway 等<sup>[18]</sup>发现混合碳酸盐(LiCO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)有利于合成气以及焦炭含量的提升,而焦油量则明显下降。

## 3 得炭质量的讨论

生物炭不同生产目的有着不同的评价指标。以

生产清洁燃料为目的的生物炭,一般以炭得率、热值、能量密度、固定碳、燃烧后灰分等作为生产的评价指标<sup>[19]</sup>。而对于生产还田生物炭而言,“质”和“量”需要同时兼顾。“质”包含碳稳定性、比表面积、孔隙度、炭本身活性金属元素、pH等参数、二噁英含量等;对于生物炭化而言,“量”最重要的指的是生物炭得率。

### 3.1 生物炭得率

生物炭得率在生物炭生产的评价体系中非常重要。前文提到的针对影响因素的评价,生物炭得率也是重要的指标。过高的生物炭生产温度会直接导致生物炭得率降低<sup>[20]</sup>,进而降低生物炭生产率,而炭化温度过低会出现炭化不完全的现象和炭化时间过长的问题,同样会降低生产率。

### 3.2 固定碳及生物炭稳定性

固定碳是指生物炭去除水分、灰分和挥发分后的残留物碳素的百分含量。固定碳随着热解温度的升高而升高。生物炭的稳定性与固定碳在生物炭中的存在形式有关。一般认为,芳香化程度高的生物炭的稳定性更高。

### 3.3 比表面积

比表面积指的是单位质量固体颗粒具有的表面积总和。一般而言,生物炭的比表面积随碳化温度的升高而增加,而生物炭的比表面积越大,对其他物质的附着越有利<sup>[21]</sup>。从改善土壤条件的角度,比表面积大的生物炭施入土壤中,可以改善土壤本身的比表面积,调节土壤容重,有利于水分和营养元素的维持。

## 4 生物炭还田效用

### 4.1 生物炭对 CEC 的促进效果

土壤阳离子交换量(CEC)是指土壤胶体所能吸附到的各种阳离子的总量,是一个衡量养分结合到土壤颗粒上,以及可被植物吸收利用的度量。其在19世纪50年代已经被土壤学家所认识,是评价土壤保肥能力、供肥能力和缓冲能力的重要指标。影响土壤CEC的环境因素很多,有机质、pH、土壤黏粒含量等都会对CEC产生直接影响。施入生物炭后也会对土壤CEC产生影响。Dong等<sup>[22]</sup>发现,相较于直接施入秸秆,施入秸秆炭后的土壤CEC提高了8.7%,而竹材料的生物炭却没有明显效果。

### 4.2 生物炭对土壤酸碱性的影响

土壤酸碱性是土壤质量的重要指标,良好的土壤酸碱性是作物高产的前提。有研究发现,根系活

力随着pH的下降而降低,而且较低的pH会影响到土壤营养物质的转化和释放、营养元素的有效性和土壤保肥能力。一般认为低温制备的生物炭(300~400℃),其pH小于7;而高温制备的pH大于7。Chintala等<sup>[23]</sup>研究在酸性土壤中加入玉米秸秆、柳枝稷、松木热解产生的生物炭,结果表明,3种生物炭加入酸性土壤都会不同程度增加土壤pH。

### 4.3 生物炭对土壤重金属的影响

针对生物炭改良重金属污染的土壤,国内外众多学者进行了不同方面的研究。周建斌等<sup>[24]</sup>应用棉秆炭进行了相关试验,发现将其施于被镉污染的土壤中,生长的小白菜中镉的含量降低了70%左右。

Abdelhafez等<sup>[25]</sup>应用蔗渣炭进行试验后发现,随着生物炭施用量的增加,土壤渗滤液中Pb的浓度逐渐下降。

### 4.4 生物炭对农作物产量的影响

针对生物炭的还田效用,除了作为土壤调节剂以外,其本身的肥料作用也不能被忽视。随着人们对生物炭认识和研究的加深,其已经在水稻、玉米、小麦、大豆、菠菜等农作物上取得效果。由表2可以看出,生物炭的添加普遍提高了作物生物量、株高、产量等参数,但也有研究显示,施加生物炭有时并不会促进作物生长。张哈芝等<sup>[26]</sup>研究发现,生物炭的添加抑制了玉米幼苗的生长。其原因可能是生物炭的添加降低了土壤有效氮的含量,抑制了玉米对有效氮的吸收。因此,对于生物炭的添加量与添加时间有待于学者进一步地研究。

表2 生物炭对农作物产量的影响

生物炭施入情况	作物种类	施入效果
15 t/hm <sup>2</sup>	玉米	增产 150% <sup>[27]</sup>
20 t/hm <sup>2</sup>	玉米	增产 98% <sup>[27]</sup>
20 t/hm <sup>2</sup>	玉米	4年间增产分别为0%、28%、30%和140% <sup>[28]</sup>
20 t/hm <sup>2</sup>	番茄	最高增产 170% <sup>[29]</sup>
10、20、40 g/kg	水稻	平均增产 21.98%, 10 g/kg 最为明显 <sup>[30]</sup>

## 5 结论与展望

农作物秸秆的处理与应用是农村能源、环境发展的刚性要求,热解炭化是大量处理农作物秸秆的方法之一。国内外针对生物质热解炭化进行了大量的研究。

从目前的研究来看,生物炭还田不仅可以提高

土壤阳离子交换量、改善土壤酸碱性,甚至对土壤重金属污染具有一定的修复功能,施加一定量的生物炭可以提高土壤的综合性能,进而提高农作物的产量。

从生产生物炭的角度总结了生物炭生产工艺中的几个重要条件,炭化温度、升温速率、添加剂、保温时间、原料的形状、炭化设备、载气类型等都会影响产炭质量。其中以炭化温度为最重要的工艺参数。众多研究者认为炭化工艺热解炭化温度应在 350 ~ 600℃,炭化速率应控制在慢速热解范围内,以保障生物炭得率。

从生物炭的质量评价参数进行了分析,认为需要同时兼顾生物炭的“质”和“量”。“质”指的是碳稳定性、比表面积、孔隙度、炭本身活性金属元素、pH 等参数;对于生物质炭化而言,“量”最重要的指的是生物得炭率。从生产的角度,要在保证一定的生物炭得率的前提下提高其他参数。

就目前国内外的研究进展来看,已经取得许多炭化生产与生物炭还田方面的经验,生物炭的施入效果已经初见成效。但研究的深度不尽相同,很难形成统一指导生产的方法与生物炭施用方法。究其原因主要是生物炭的研究仍处于初步发展阶段,生产原料、设备、工艺多种多样,施入土壤类型、农作物也是种类繁多,因此这一领域的研究难成体系。针对具体农作物、具体土壤类型生产针对性强的还田生物炭,以及生物炭安全性等有待进一步地研究。

### 参考文献

- [1] 刘广青,董仁杰. 生物质能源转换技术[M]. 北京:化学工业出版社,2009:42-49.
- [2] 陈百明,张正峰. 农作物秸秆气化利用技术与商业化经营案例分析[J]. 农业工程学报,2005,21(10):124-128.
- [3] Lemann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. Mitig Adapt Strat Global Change, 2006, 11(11):403-427.
- [4] 吴琪琳,王光学,韩浩,等. 一种疏松多孔结构板栗壳基生物炭的制备方法:CN,201010216651.6[P] 2010-11-24.
- [5] 庄晓伟,陈顺伟,张桃园,等. 7 种生物质炭燃烧特性的分析[J]. 林产化学与工业,2009,29(S1):169-173.
- [6] 张燕辉,夏人杰. 生物炭还田对固碳减排、N<sub>2</sub>O 排放及作物产量的影响研究进展[J]. 安徽农学通报,2015,21(10):86-88.
- [7] 王瑞峰,赵立欣,沈玉君,等. 生物炭制备及其对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 中国农业科技导报,2015,17(2):126-133.
- [8] 陈温福,张伟明,孟军. 生物炭与农业环境研究回顾与展望[J]. 农业环境科学学报,2014,33(5):821-828.
- [9] Antal M J, Gronli M. The art, science and technology of charcoal production[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 2003, 42: 1619-1640.
- [10] 朱锡锋,陆强. 生物质热解原理与技术[M]. 北京:科学出版社,2014:30-42.
- [11] 罗煜,赵立欣,孟海波,等. 不同温度下热裂解芒草生物质炭的理化特征分析[J]. 农业工程学报,2013,29(13):208-217.
- [12] 丛宏斌,姚宗路,赵立欣,等. 内加热连续式生物质炭化中试设备炭化温度优化试验[J]. 农业工程学报,2015,31(16):235-240.
- [13] 侯建伟,索全文,梁恒,等. 炭化条件对黑沙蒿生物炭产率的影响[J]. 西北农林科技大学学报,2015,43(1):169-174.
- [14] 李飞跃,汪建飞,谢越,等. 热解温度对生物质炭碳保留量及稳定性的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(4):266-271.
- [15] 黄睿,胡建杭,王华,等. 升温速率对成型生物质热解过程的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(12):91-96.
- [16] Hanzade Haykiri-Acam, Serdar Yaman. Effect of the heating rate on the morphology of the pyrolysis char from hazelnut shell[J]. International Journal of Green Energy, 2009, (6):508-511.
- [17] 姬登祥,高明辉. 熔融 ZnCl<sub>2</sub>-KCl 作用下生物质热裂解制生物燃料[J]. 太阳能学报,2015,36(3):647-651.
- [18] Hathaway B J, Honda M, Kittelson D B, et al. Steam gasification of plant biomass using molten carbonate salts[J]. Energy, 2013, 49(1):211-217.
- [19] 何选明,冯东征. 生物炭的特性及其应用研究进展[J]. 燃料与化工,2015,46(4):1-7.
- [20] 王霏,郑武武,郑志峰. 云南松热解及其热解产物的研究[J]. 生物质化学工程,2015,49(4):14-18.
- [21] 孙红文,张彦峰. 生物炭与环境[M]. 北京:化学工业出版社,2013:32-34.
- [22] Dong D, Yang M, Cheng W, et al. Responses of methane emissions and rice yield to applications of biochar and straw in a paddy field[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13:1450-1460.
- [23] Chintala R, Schumacher Thomas E, Mc Donald Louis M, et al. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2013, 41(9):1-9.
- [24] 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(5):1857-1860.
- [25] Abdelhafez A A, Li J, Abbas M H H. Feasibility of biochar manufactured from organic wastes on the stabilization of heavy metals in a metal smelter contaminated soil[J]. Chemosphere, 2014, 117:66-71.
- [26] 张晗芝,黄云,刘刚,等. 生物炭对玉米幼苗生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报,2010,19(11):2713-2717.
- [27] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(2):205-212.
- [28] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. Plant and Soil, 2010, 333:117-128.
- [29] 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]. 农业机械学报,2014, (1):137-142.
- [30] 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, (1):1-8. ■