

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2022.04.003

生物炭改性及其在植物健康管理上的应用

王垚¹, 周肖¹, 周洪江², 王聪²,
梁依佳¹, 杨邵琪¹, 李石力¹, 杨相¹

1. 西南大学植物保护学院, 重庆 400715;
2. 贵州省烟草公司遵义市公司正安分公司, 贵州 遵义 563400

摘要: 生物炭是生物质在高温厌氧条件下通过热化学分解产生的一种富炭、较高稳定性和高度芳香化的固体材料, 因其具有更高的比表面积、孔隙率、呈碱性和丰富的官能团等特点, 被广泛用于土壤重金属污染修复与改良。本文介绍了生物炭的改性方法, 综述了生物炭对农业病虫害防控、作物产质量、土壤改良、温室气体减排以及控释农药、肥料等方面的作用, 分析了现阶段生物炭在农业生产与推广应用中存在的问题, 并对生物炭未来在农业领域应用前景和方向提出了新的见解。

关键词: 生物炭; 农业生产; 植物病害;

应用; 进展

中图分类号:S156.2

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号:2097-1354(2022)04-0021-10

Biochar Modification and Its Application in Plant Health Management

WANG Yao¹, ZHOU Xiao¹, ZHOU Hongjiang², WANG Cong²,
LIANG Yijia¹, YANG Shaoqi¹, LI Shili¹, YANG Xiang¹

1. School of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Zheng'an Branch of Zunyi Company of Guizhou Tobacco Company, Zunyi Guizhou 563400, China

Abstract: Biochar is a carbon-rich, highly stable and highly aromatic solid material produced by thermochemical decomposition of biomass under the conditions of high temperature and anaero-

收稿日期: 2022-07-01

基金项目: 中国烟草总公司贵州省公司揭榜挂帅项目(2022520000240150); 国家烟草专卖局绿色防控重大专项(110202101047LS-07)。

作者简介: 王垚, 硕士研究生, 主要从事纳米农药的制备与靶向控释研究。

通信作者: 杨相, 农艺师。

bic condition. It has been widely used in the remediation of heavy metal contaminated soil and soil improvement for its specific surface area, porosity, alkaline and rich functional groups. In this paper, the modification methods of biochar were introduced. The control effects of biochar on agricultural pest and disease, the promotion of crop growth, and the reduction of greenhouse gas emission, as well as research on controlled-release pesticides and fertilizer were summarized. Besides, the existing problems in production and promotion of application of biochar in agriculture were analysis. Finally, new insights into the future application prospects and directions of biochar in the agricultural field were put forward.

Key words: biochar; agricultural production; plant disease; application; progress

在全球人口持续增长的背景下,预计到2050年全球人口将达到98亿^[1],这将给世界粮食安全带来巨大的挑战。为适应人口增长,满足人们对粮食的需求,现在的农业生产已变得越来越依赖农药、化肥的投入。然而,大量的农药、化肥等化学品的应用给农田生态环境、水体环境、人体健康等方面带来了较大的负面影响。为此,农业绿色可持续发展十分重要,是当今乃至未来的发展趋势^[2]。生物炭是一种可再生资源,近年来一直备受人们关注,在农业生产中扮演着重要的角色。生物炭(Biochar)又称为黑色黄金、生物焦、生物质炭和生物黑炭,是农业废弃物、秸秆、动物粪便和森林残留物等废弃物在限氧或厌氧的高温热解条件下产生的富炭、多孔的固体颗粒^[3]。国内外当前制备生物炭的原材料有花生壳、椰子壳、麦秸、棕榈壳、稻草、橙皮、葡萄茎、西红柿的茎、杏仁壳、西米棕榈皮、棕榈仁壳和大麦秸秆等废弃物^[4]。研究者对生物炭的开发与综合应用主要集中在提高农作物产量与品质、水体与土壤中重金属修复、有机污染物的修复、土壤改良、碳封存和温室气体(GHG)减排等可持续农业与生态环境领域^[5-9],以及制药废水处理、生物柴油产率提高、矿区污染修复、超级电容器制备和新能源源等工业领域^[10-16]。生物炭作为农业废弃物再利用的重要生物资源,具有广泛的应用范围与重要价值,基于此,本文介绍了生物炭的改性方法,综述了生物炭在农业病虫害防控、作物生长、土壤改良及智能控释系统的研究进展和存在问题,并对未来生物炭在可持续发展农业的应用前景和方向进行了展望。

1 生物炭的改性

1.1 酸改性

生物炭的酸改性可以去除生物炭表面的金属和孔隙里的杂质,并引入大量的酸性官能团,如羧基(-COOH)、酚基(-OH)和羰基(-CO-)^[17]。常见的酸改性剂主要分为无机酸(硫酸、硝酸、磷酸)和有机酸(草酸、柠檬酸)^[18],这些酸性改性物质可以提高生物炭的孔隙结构和比表面积,改善生物炭的吸附性能和负载能力。Chu等^[19]利用磷酸(H₃PO₄)对生物炭进行了催化和交联改性,发现H₃PO₄处理可以使生物炭孔隙结构变大、比表面积提高。刘蕊等^[20]发现以玉米秸秆为原材料,利用硝酸(HNO₃)活化改性可以提高生物炭的比表面积、总孔体积、含氧官能团(醇、酚的-OH为主)的数量和表面电位。同样,杨哲等^[21]发现利用硫酸(H₂SO₄)活化改性毛竹得到的改性生物炭的比表面积、孔体积和孔径大小显著提升。总之,利用磷酸、硫酸、硝酸等酸性物质改性生物炭,可以提升生物炭的比表面积、总孔体积、含氧官能团(醇、酚的-OH为主)的数量和表面电位等。

1.2 碱改性

碱改性主要通过提高生物炭的表面积和含氧官能团的数量来改善自身结构。常见的碱改性

剂主要是氢氧化钠(NaOH)和氢氧化钾(KOH). Hamid 等^[22]发现利用 KOH 活化的芒果皮生物炭的表面积(比表面积, BET)显著提高, 并且改性后的生物炭能有效的去除废水中的 Cu^{2+} . 另外, 碱改性生物炭具有特殊的孔隙结构, 也常被用作液体污染物或气态污染物的吸附剂, 如利用聚乙烯和 KOH 对玉米的叶、皮和髓生物炭的改性, 结果发现, 聚乙烯可提高生物炭的高芳香性、高热值和稳定性, 而 KOH 可提高生物炭的 BET, 使生物炭的孔隙结构更加均匀, 孔隙结构更小, 多以微孔结构为主^[23]. NaOH 也是一种常用的碱改性剂, 并且用 NaOH 改性生物炭是一种经济、环保的方式, 碱改性材料可以去除废水中大量重金属, 并且碱改性生物炭吸附重金属能力是未改性生物炭的 2.6~5.8 倍. 研究报道, 山核桃木在缓慢热分解过程中, 加入一定量的 NaOH 进行活化改性, 得到的碱改性生物炭的 BET、阳离子交换能力和热稳定性均有显著提高^[24].

1.3 金属氧化物或金属盐改性

生物炭的金属盐或金属氧化物改性方法主要有两种方法^[25]: ①生物质原料与金属氧化物或金属盐混匀, 然后高温热解合成改性生物炭; ②生物质原料热解后, 再与金属氧化物或金属盐浸泡形成改性生物炭. 生物炭的金属盐或金属氧化物改性中常见的浸渍剂主要有 $FeCl_3$ 、 Fe_2O_3 和 $MgCl_2$ ^[26-28]. 大多生物炭的金属盐或金属氧化物改性后, 一定程度上提高了生物炭的吸附性、催化性和磁性. Liu 等^[29]报道竹柳在高温控氧的条件下制备了竹柳生物炭(BC), 并利用浸渍法制备了纳米 Fe_2O_3 改性生物炭($nFe_2O_3@BC$), 与 BC 相比, $nFe_2O_3@BC$ 可提高对水体中镉的去除能力. Cao 等^[30]报道了落叶生物炭(LBC)负载纳米 MgO, 即 MgO-LBC, MgO-LBC 对水体中除草剂莠去津(AT)吸附量是 LBC 的 1.99~5.71 倍; pH 值为 4 时, MgO-LBC 具有最大的吸附容量, 为 22.4 mg/g. 金属盐或金属氧化物对生物炭改性, 改性生物炭能够提高土壤对营养成分的保留能力并增加农作物的产量, 例如 MgO 改性生物炭通过静电吸引, 沉淀和可交换阴离子作用, 有助于土壤对磷酸盐的吸附, 进而提高土壤中的有效磷含量, 促进水稻的生长(图 1)^[31].

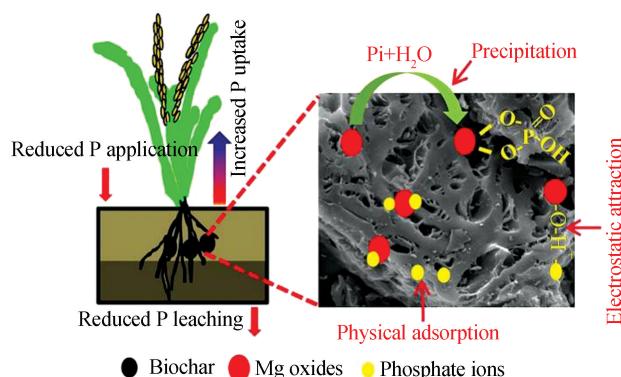


图 1 MgO 改性生物炭促进水稻生长的机制

1.4 生物炭的其他改性

除常用的酸改性、碱改性和金属氧化物改性外, 也可以通过其他的生化方法对不同类型的生物炭进行活化改性. 例如, 利用天然有机高分子聚合物对生物炭进行改性, 其与酸碱和金属盐或金属氧化物改性不同. 天然有机高分子聚合物改性生物炭, 具有更好的吸附容量和吸附效率. 有研究者利用天然多糖壳聚糖对竹生物炭改性, 用于土壤 Cd^{2+} 污染修复, 如壳聚糖改性生物炭对 Cd^{2+} 有显著的钝化作用, 可以降低有害重金属 Cd^{2+} 向农林产品转移富集^[32]. 生物炭的稳定性是其发挥固碳功能、抗御微生物降解和自然氧化的基础, 外源添加矿物可改善生物炭的稳定性^[33]. 比如, 蝙蝠改性水稻秸秆生物炭增加了生物炭中碳的含量(芳香碳)和生物炭的稳定

性,因此,蛭石能够影响生物炭在土壤中炭素降解的速度^[34].

2 生物炭在农业方面的研究进展

2.1 对农业病虫害的防控

寻找和开发绿色、环保、可再生材料用于防控农业病虫害,一直以来都是研究者们探索的方向。生物炭是一种集肥料、改良剂和吸附剂于一体的可再生新型材料,这几年许多学者研究其在农业病害的防控,特别是土传病害的控制研究较多,在虫害防治研究较少。研究报道发现在土壤中添加稻壳生物炭和竹生物炭能够有效降低茎腐病病原菌(*Fusarium graminearum*)的种群数量和侵染几率,从而缓解玉米茎腐病的危害^[35]。与此同时,不同原材料制备的生物炭对同种病害的防控效果差异较大,与稻壳、麦秆生物炭相比,竹制生物炭对大豆根腐尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)的抑制效果最佳,田间防效高达77.41%^[36]。冯慧琳等^[37]研究发现,生物炭能够减少致病性细菌种群的相对丰度,增加促生细菌的相对丰度,从而缓解烟草青枯病的发生。在农业害虫防控方面,生物炭并不能直接杀死植食性昆虫,而是通过影响寄主植物,间接影响植食性昆虫。在复合肥土壤中施加200 g/kg生物炭能显著降低褐飞虱雌虫的生殖力,此外还发现,生物炭和N肥存在显著互作,共同影响褐飞虱的种群数量^[38]。

总而言之,生物炭对农业病害防控的机制差异较大,大体可分为直接作用和间接作用(表1)。其中,直接作用方式为生物炭直接与病原菌接触,抑制病原菌生长、吸附病原菌,降低病原菌密度和抑制病原菌运动性;间接作用方式为生物炭不直接与病原菌接触,而是间接降低病原物产生的毒素、调控根际微生物环境、促进有益微生物生长、改善土壤理化性质和调控根系分泌物等来间接防控病害。

表1 生物炭用于农业病虫害的防控机制

原材料	作物	病害	病原菌	防控机制	参考文献
菊芋	番茄	番茄枯萎病	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>Lycopersici</i>	直接抑制病原菌生长; 调控根际微生物群落、促进番茄招募PGPR, 从而增强作物抗性	[39]
玉米秸秆	烟草	烟草青枯病	<i>Ralstonia solanacearum</i>	直接抑制病原菌生长; 吸附病原菌, 降低病原菌密度; 抑制病原菌的运动性	[40]
花椒籽	烟草	烟草黑胫病	<i>Phytophthora nicotianae</i>	花椒籽提取物芳樟醇和胡椒酮具有较强抑菌作用; 施用于田间具有土壤熏蒸作用	[41]
杨木屑	—	秀丽隐杆线虫	<i>Caenorhabditis elegans</i>	所含的挥发性物质或气味刺激线虫, 使得具有一定趋向性; 影响线虫差异表达基因的多肽、氮素、有机氮化物、酰胺化合物的合成与代谢	[42]
生物炭	甜瓜	甜瓜枯萎病	<i>Fusarium oxysporum</i>	降低土壤中自毒物质对有益菌的影响; 减弱自毒物质对微生物数量和多样性的影响	[43]
松木	番茄	番茄青枯病	<i>Ralstonia solanacearum</i>	促进植物对根系分泌物吸附, 影响病原菌增值; 抑制病原菌泳动能力, 减少病原菌定殖	[44]
小麦	番茄	番茄青枯病	<i>Ralstonia solanacearum</i>	改善土壤理化性质、调控根际有机酸和氨基酸含量, 促进有益微生物生长	[45]
棉花秸秆	棉花	棉花黄萎病	<i>Verticillium dahliae</i> Kleb	吸附固定毒素, 降低毒素浓度	[46]
香蕉茎叶	香蕉	香蕉枯萎病	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i>	改良酸性土壤, 提高土壤酶活性, 优化土壤微生物结构	[47]
水稻秸秆	小麦	小麦赤霉病	<i>Fusarium asiaticum</i>	降低脱氧镰刀菌烯醇毒素含量, 减少赤霉病菌孢子数量	[48]

2.2 优化土壤环境, 促进作物生长发育

生物炭具有丰富的多孔结构, 可改善土壤的物理特性、阳离子交换能力和土壤保水能力^[49-50]。不同的生物炭对不同的植物有着不同的促生作用。例如, Abriz 等^[51]研究发现施用生物炭材料能够显著增加玉米、小麦的产量, 而对水稻和大豆作物促进作用不明显; 同时, 土壤条件的不同, 生物炭增产效果也有一定的影响, 在粗质地和酸性土壤下, 增产效果更好。生物炭能够提高土壤中有效磷的含量来改善土壤营养环境, 而不同原材料制备的生物炭在提高作物产量和土壤营养方面表现不同。研究发现, 鸡粪为原料的生物炭对提高棉花产量和磷素利用率上影响最大, 其次是玉米穗轴为原料的生物炭, 此外, 提高农作物产量还与生物炭的用量有关, 并不是随着生物炭用量增加而产量增加^[52], 其施用量在 0~10 g/kg, 有利于烟草的生长, 用量为 50 g/kg 烟草的生长受到限制^[53]。近年来, 生物炭的应用不只限于单一的应用, 利用 1 350~1 800 kg/hm² 的玉米秸秆生物炭与复合肥混施能够提高土壤腐殖质、有机碳的含量, 改善烟叶综合品质, 促进烤烟生长^[54]。研究报道, 施用生物炭能够影响土壤微生物的群落组成, 从而影响土壤营养含量, 其中, 玉米芯炭、鸡粪炭和棉花秸秆炭能够增加土壤中纤维素分解细菌、固氮细菌及硝化细菌等特殊微量功能菌属的相对丰度^[55]。另外, 生物炭的类型和用量对土壤微生物特性影响较大, Li 等^[56]报道了秸秆生物炭相较于木材生物炭, 可显著提高土壤 pH 和氮素的转化率。生物炭含量(6.0 和 12 t·ha⁻¹)越高, 对土壤 pH、土壤有机炭、总氮、有效磷和有效钾含量的提升效果越好, 更有利于促进革兰氏阳性菌、有益真菌和普通细菌的生长^[57]。Xu 等^[58]分析了 107 篇关于生物炭对土壤微生物群落影响的研究论文, 统计分析结果表明, 生物炭的用量与丛枝菌根真菌丰度、微生物生物量炭和功能丰富度呈正相关关系, 并且随着土壤 pH 的升高, 生物炭对真菌丰度和炭代谢能力的影响减弱。土壤修复方面, 生物炭可改善棉隆熏蒸后对土壤微生态的影响, 提高土壤养分^[59]。

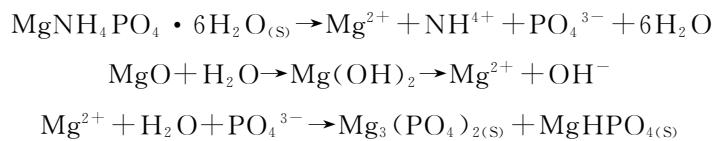
2.3 减少温室气体的排放

农业生产不仅受到气候变化的影响, 其同时也影响着气候变化。据了解, 农业生产和土地利用所释放的温室气体(GHG)约占全球总排放量的 1/4^[60]。2018 年欧盟农业土壤温室气体排放量占总释放量的 37.8%^[61]。为此, 减少温室气体(主要包括 CO₂ 和 CH₄)的排放, 已成为当今各行各业持续关注的焦点。生物炭具有吸附和固碳特性, 可提高土壤的固碳能力, 并有效抑制或减少土壤 CO₂ 的排放。王冠丽等^[62]报道了玉米农田施用生物炭, 能有效降低农田生态系统中温室气体(CO₂、CH₄ 及 N₂O)的累积排放总量, 其中生物炭施用量为 15 t·hm⁻² 效果最明显, 温室气体累计排放量降低了 21.4%。清晰生物炭降低温室气体排放的机制, 对科学、合理、有效的利用生物炭具有重要意义, 廖添怀等^[63]研究发现, 可溶性有机碳(DOC)和游离态粗颗粒有机碳(fcPOC)的含量是影响稻田红壤中 CO₂ 和 CH₄ 累积排放量主要因素。Dong 等^[64]研究发现, 酸性稻田土壤和湿地土壤中施加生物炭, 有利于土壤中甲烷菌的生长, 降低水稻田 CH₄ 的排放。生物炭减少 CO₂ 排放的机制主要有^[65]: ①土壤 pH 值升高使得生物炭表面碱金属与 CO₂ 反应, 生成碳酸盐的沉淀物; ②生物炭对有机物的吸附, 减少了有机物矿化产生 CO₂; ③葡萄糖苷酶和纤维生物糖苷酶两种纤维素酶丰度降低, 降低了 CO₂ 的排放; ④植物生长和植物生物量的增加, 改善了大气和土壤之间的 CO₂ 净交换。

2.4 农用化学品的控释释放

农用化学品(农药、化肥等)在提高农作物产量和品质方面发挥着重要的作用, 然而, 由于自然降解、光解、浸出和地表径流等原因导致利用效率偏低。但具有靶向缓释作用的农药和化

肥,可有效减少农药化肥的施用次数和施用量,降低经济成本以及减少对生态环境的破坏。生物炭具有高比表面积、孔隙率、良好的吸附性能和多种官能团的特点,可作为缓释农药、缓释肥料的载体。Chen 等^[66]利用稻壳生物炭和尿素过氧化氢(UHP)复合物制备了新型生物炭肥料,该生物炭肥料的氮累积释放率显著低于普通肥料,并且以单层吸附的方式固定重金属镉。Luo 等^[67]制备了一种富含 Mg 的生物炭肥料(MBF),该生物炭肥料对 N、P 有较好的缓释性能,N 和 P 的最终累积释放率分别比化肥(CF)低 7 倍和 6 倍,更为重要的是对 N、P 的缓释机理不同,其中 P 的释放受到生物炭表面 MgP 沉淀物 [$MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ 、 $Mg_3(PO_4)_2$ 和 $MgHPO_4 \cdot 7H_2O$] 的溶解度调控以及表面的 MgO 可以捕获沉淀过程中释放的 PO_4^{3-} ,再生成 $Mg_3(PO_4)_2$ 和 $MgHPO_4 \cdot 7H_2O$ 。然而,N 的释放受到生物炭载体的多重效应影响,包括对生物炭表面负电荷对 NH_4^+ 的静电吸引作用、表面官能团与含氮基团形成稳定的氢键和孔隙填充效应,缓释过程中可能发生的反应和作用机制如下:



智能控释系统(ICRS)被认为是高效利用农用化学品的一种可行且经济的方法,目前国内外已有大量的研究者将生物炭制备成响应不同条件的 ICRS(表 2)。从表 2 可知,制备的原料是 ICRS 响应不同条件智能释放的前提条件,制备原理主要是物理吸附和络合反应,智能控释的条件主要有光、pH。

表 2 生物炭作为智能控释载体的响应条件

类型	活性成分	主要原料	制备原理	响应条件	文献
亲水型农药模型	龙胆紫	海藻酸钠、生物炭、 $CaCl_2$	交联反应	pH+离子	[68]
杀虫剂	吡虫啉	酵母生物炭(吸附剂和光热材料)、明胶(温度响应聚合物)	物理吸附、络合反应	光+热	[69]
杀菌剂	多菌灵	磷酸改性生物炭(油菜秸秆)	自发、放热、物理吸附	有机酸类	[70]
除草剂	草甘磷	秸秆生物炭、凹凸棒石、 NH_4HCO_3 、硅油	物理吸附、物理包衣	光(红外)+热	[71]
除草剂/叶面肥	草甘磷/尿素	稻壳生物炭、 TiO_2 、氢硅油	物理吸附	光(紫外线或红外线)	[72]
除草剂/肥料	二氯喹啉酸/ Na_2HPO_4	黑木耳生物炭、 CH_4N_2S 、 $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 、 $NaOH$	静电自组装	pH	[73]
肥料	有益微生物菌种	生物炭、浓 H_2SO_4 、多孔温敏性凝胶	物理混合与负载	土壤温度	[74]

3 应用展望

建设美丽中国,行动上要坚持走生态优先、绿色发展之路,思想上要充分认识到“绿水青山就是金山银山”的深远意义。建设美丽中国,离不开农业绿色发展,农业绿色发展是人类发展的基础,建立农业绿色发展是实现碳达峰、碳中和的重要一环,为此要加快引导农业绿色生产方

式和生活方式,积极构建人与自然和谐共生的农业发展新格局。近年来,生物炭作为一种新兴可再生材料,在农田土壤重金属污染修复、水污染治理、土壤改良和温室气体(GHG)减排以及作为复合材料应用于电化学能源技术领域已经表现出优异的应用价值,其研究与应用也成为了热点。

目前生物炭实际开发与推广应用仍然存在几个方面的问题:①生物炭的改性主要是提高其孔径大小、孔径数量及表面积大小,但在实际研究中,各种改性方法的效果并未进行多方面对比,尚未评价得出最优的改性方法。此外,酸改性、碱改性引入的强酸、强碱改性剂,处理不当易造成不必要的人生安全。因此,需要比较各种改性方法的实际生产和推广应用,筛选并开发出环保、安全和经济的改性方法。②生物炭对烟草青枯病、大豆根腐病等土传病害防控已有报道,但防控机制方面尚未清楚,并且用于其他病害防控的研究较少。从以上文献报道来看,生物炭作为土壤改良剂,主要通过提高酸性土壤pH、改善土壤营养结构和优化土壤微生物结构的方式,进而达到对农业病虫害的防控,其病害防控机制太过于宏观,忽略了生物炭本身的吸附特性,而且在整个防控机制里面没有体现关键生物因子和非生物因子的具体作用。因此,需要详细研究生物炭病害防控机制,探明生物炭土壤改良与微生物结构组成相关性,找出防控病的关键生物因子和非生物因子,其次需要推进对其他病害的研究。③单独施用生物炭减少农业温室气体排放已取得一定的理论和实际进展,但大多数研究仍处于实验室和田间小区试验,与大规模推广应用仍有较大的差距。为此,需要研究能够大范围应用的生物炭材料,降低应用成本,简化推广措施。④目前已有将生物炭制备成缓释肥料和农药,这对肥料和农药的活性成分要求较高,特别是酸性农药,如果直接运用生物炭作为农药载体,在应用过程中易造成农药的分解,降低药效。另外,在制备过程中,需要关注生物炭对肥料和农药的负载量,如果负载量过低,会产生原料的浪费和环境污染问题。因此,在制备缓释肥料和农药过程中,应关注肥料、农药自身的特性,研发出负载量高的生物炭。⑤不同类型的生物炭在促进作物生长、土壤改良和防控病害差异较大,对同一作物、同一病害来说,有些生物炭可能促进植物生长,有利于病害发生,有些生物炭可能抑制植物生长,降低病害发生,因此,针对不同作物和病害,应采用不同生物炭进行处理。

参考文献:

- [1] DE RAYMOND A B, GOULET F. Science, Technology and Food Security: an Introduction[J]. *Science, Technology and Society*, 2020, 25(1): 7-18.
- [2] JALAL F, ARIF M, AKHTAR K, et al. Biochar Integration with Legume Crops in Summer Gape Synergizes Nitrogen Use Efficiency and Enhance Maize Yield[J]. *Agronomy*, 2020, 10(1): 58.
- [3] AYAZ M, FEIZIENÉ D, TILVIKIENÉ V, et al. Biochar Role in the Sustainability of Agriculture and Environment[J]. *Sustainability*, 2021, 13(3): 1330.
- [4] PANWAR N L, PAWAR A. Influence of Activation Conditions on the Physicochemical Properties of Activated Biochar: a Review[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022, 12(3): 925-947.
- [5] 邵光成, 吴世清, 房凯, 等. 生物炭添加提高渍水条件下番茄产量改善品质[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(19): 160-167.
- [6] 郑宇佳. 改性核桃壳炭对水中 Pb^{2+} 的去除及其对土壤中铅的钝化实验研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.
- [7] CHANG Z F, TIAN L P, ZHANG J, et al. Comparative Study on The Relative Significance of Low-/High-Condensation Aromatic Moieties in Biochar to Organic Contaminant Sorption[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 238: 113598.
- [8] KANG M W, YIBELTAI M, KIM Y H, et al. Enhancement of Soil Physical Properties and Soil Water Retention with Biochar-Based Soil Amendments[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 836: 155746.

- [9] 曾唯. 施加生物炭和地膜覆盖对菜地 CH₄ 和 CO₂ 排放的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- [10] YAHYA M A, AL-QODAH Z, NGAH C W Z. Agricultural Bio-Waste Materials as Potential Sustainable Precursors Used for Activated Carbon Production: a Review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 46: 218-235.
- [11] CHEN L L, CHENG P J, YE L, et al. Biological Performance and Fouling Mitigation in The Biochar-amended Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) Treating Pharmaceutical Wastewater[J]. Bioresource Technology, 2020, 302: 122805.
- [12] 严军华, 王舒笑, 袁浩然, 等. 新型花生壳生物炭基催化剂催化酯交换反应[J]. 太阳能学报, 2020, 41(4): 257-263.
- [13] 罗洋, 梁运信, 杨凯德, 等. 不同秸秆炭的制备及其对镉污染黄壤中镉的钝化效果[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(2): 29-33.
- [14] 王旭日. 负载 Fe3C 颗粒的多孔生物炭在锂硫电池中的应用[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2021.
- [15] 赵玉绮. 木质素基生物炭材料的制备及其在超级电容器电极材料中的应用[D]. 常州: 常州大学, 2021.
- [16] 解晓明, 索习东, 王璐瑶, 等. 玉米芯生物炭饼的太阳能水蒸发性能及其应用[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 286-295.
- [17] 杜甜甜, 李梅, 高心雨, 等. 生物炭的改性方法及其在环境领域的研究进展[J]. 四川环境, 2020, 39(5): 186-190.
- [18] RAJAPAKSHA A U, CHEN S S, TSANG D C W, et al. Engineered/Designer Biochar for Contaminant Removal/Immobilization from Soil and Water: Potential and Implication of Biochar Modification[J]. Chemosphere, 2016, 148: 276-291.
- [19] CHU G, ZHAO J, HUANG Y, et al. Phosphoric Acid Pretreatment Enhances The Specific Surface Areas of Biochars by Generation of Micropores[J]. Environmental Pollution, 2018, 240: 1-9.
- [20] 刘蕊, 李松, 张辉, 等. 硝酸改性生物炭对水体中阴阳离子染料吸附特性[J]. 水处理技术, 2019, 45(3): 28-34.
- [21] 杨哲, 胡文勇, 沈良辰, 等. 硫酸改性生物炭对废水中 Cr(VI) 的吸附性能研究[J]. 化工新型材料, 2021, 49(SI): 273-278, 282.
- [22] HAMID S B A, CHOWDHURY Z Z, ZAIN S M. Base Catalytic Approach: a Promising Technique for the Activation of Biochar for Equilibrium Sorption Studies of Copper, Cu(II) Ions in Single Solute System[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2014, 7(4): 2815-2832.
- [23] FAN S C, SUN Y, YANG T H, et al. Biochar Derived from Corn Stalk and Polyethylene Co-Pyrolysis: Characterization and Pb(II) Removal Potential[J]. RSC Advances, 2020, 10(11): 6362-6376.
- [24] DING Z H, HU X, WAN Y S, et al. Removal of Lead, Copper, Cadmium, Zinc, and Nickel from Aqueous Solutions by Alkali-modified Biochar: Batch and Column Tests[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2016, 33: 239-245.
- [25] TAN X F, LIU Y G, GU Y L, et al. Biochar-Based Nano-Composites for The Decontamination of Wastewater: A Review[J]. Bioresource Technology, 2016, 212: 318-333.
- [26] 曹媛, 李晓东, 彭昌盛, 等. 浸渍热解法制备铁改性生物炭活化过硫酸盐去除 2, 4-二硝基甲苯[J]. 环境工程, 2021, 39(11): 135-142, 178.
- [27] XU H J, ZHANG X P, ZHANG Y D. Modification of Biochar by Fe₂O₃ for the Removal of Pyridine and Quinoline[J]. Environmental Technology, 2018, 39(11): 1470-1480.
- [28] YIN G C, TAO L, CHEN X L, et al. Quantitative Analysis on the Mechanism of Cd²⁺ Removal by MgCl²-Modified Biochar in Aqueous Solutions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 420: 126487.
- [29] LIU Q Q, SHENG Y Q, LIU X Z. Efficacy of in Situ Active Capping Cd Highly Contaminated Sediments with Nano-Fe₂O₃ Modified Biochar[J]. Environmental Pollution, 2021, 290: 118134.
- [30] CAO Y, JIANG S Q, ZHANG Y N, et al. Investigation into Adsorption Characteristics and Mechanism of Atrazine on Nano-MgO Modified Fallen Leaf Biochar[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(4): 105727.
- [31] WU L P, WEI C B, ZHANG S R, et al. MgO Modified Biochar Increases Phosphate Retention and Rice Yields in Saline-Alkaline Soil[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 235: 901-909.
- [32] 黄安香, 柏文恋, 王忠伟, 等. 壳聚糖改性竹生物炭对土壤外源污染镉形态分布的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(15): 195-202.
- [33] LIU Y X, GAO C X, WANG Y Y, et al. Vermiculite Modification Increases Carbon Retention and Stability of Rice Straw Biochar at Different Carbonization Temperatures[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 254: 120111.

- [34] 王瑞, 刘玉学, 高诚祥, 等. 蚤石改性水稻秸秆生物炭在土壤中的短期降解[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1954-1962.
- [35] 刘春来, 王爽, 杨帆, 等. 生物炭对玉米茎腐病控害作用及植株生长的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2018(9): 51-54.
- [36] 刘春来, 杨帆, 王爽, 等. 生物炭对大豆根腐病防控效果及植株生长的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2020(8): 49-52.
- [37] 冯慧琳, 付兵, 任天宝, 等. 生物炭对青枯病烟株的根际土壤微生物群落结构调控机制分析[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 173-181.
- [38] 许笠. 生物炭对褐飞虱生活史和稻田优势节肢动物群个体数量的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [39] 金雪. 菊芋秸秆生物炭抑制番茄枯萎病发生的根际微生物学机理[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- [40] 张广雨. 生物炭对烟草青枯病的防效及对土壤微生态的调控[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [41] 王耀晨. 花椒籽炭基有机肥防治烟草黑胫病研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [42] 陈义轩. 土壤菌群、秀丽线虫、番茄立枯病对生物炭输入的响应特征[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [43] 谭磊. 生物炭缓解自毒物质对甜瓜和木霉菌的毒害作用及其对土壤微生物种群的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [44] 谷益安. 土壤细菌群落和根系分泌物影响番茄青枯病发生的生物学机制[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [45] 饶霜. 生物炭对番茄青枯病抗性、土壤微生物活性及有机酸含量的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [46] 马云艳, 顾美英, 徐万里, 等. 棉秆生物炭对大丽轮枝菌生长及毒素作用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 217-224.
- [47] 徐广平, 滕秋梅, 沈育伊, 等. 香蕉茎叶生物炭对香蕉枯萎病防控效果及土壤性状的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(12): 2373-2384.
- [48] 刘悦, 史文琦, 曾凡松, 等. 生物炭对小麦赤霉病的防治效果及产量的影响[J]. 植物保护, 2020, 46(4): 270-274, 281.
- [49] KANG M W, YIBELTAL M, KIM Y H, et al. Enhancement of Soil Physical Properties and Soil Water Retention with Biochar-Based Soil Amendments[J]. Science of the Total Environment, 2022, 836: 155746.
- [50] MUHAMMAD N, GE L Y, KHAN M H, et al. Effects of Different Biochars on Physicochemical Properties and Immobilization of Potentially Toxic Elements in Soil—a Geostatistical Approach[J]. Chemosphere, 2021, 277: 130350.
- [51] ABRIZ S F, TORABIAN S, QIN R J, et al. Biochar Effects on Yield of Cereal and Legume Crops Using Meta-Analysis[J]. Science of the Total Environment, 2021, 775: 145869.
- [52] 王晶, 侯振安. 不同原料生物炭对滴灌棉花产量及土壤磷素利用率的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(11): 2354-2360.
- [53] ZHENG J Y, ZHANG J X, GAO L, et al. Effect of Straw Biochar Amendment on Tobacco Growth, Soil Properties, and Rhizosphere Bacterial Communities[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 20727.
- [54] 李先才, 夏贤仁, 蔡宪杰, 等. 生物炭与复合肥混施对植烟土壤及烤烟生长的影响[J]. 贵州农业科学, 2021, 49(9): 66-75.
- [55] 廖娜. 生物炭对滴灌棉田土壤微生物的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2016.
- [56] LI M, LIU M, LI Z P, et al. Soil N Transformation and Microbial Community Structure as Affected by Adding Biochar to a Paddy Soil of Subtropical China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(1): 209-219.
- [57] LI M, WANG Y M, LIU M, et al. Three-year field Observation of Biochar-Mediated Changes in Soil Organic Carbon and Microbial Activity[J]. Journal of Environmental Quality, 2019, 48(3): 717-726.
- [58] XU W H, WHITMAN W B, GUNDALY M J, et al. Functional Response of the Soil Microbial Community to Biochar Applications[J]. GCB Bioenergy, 2021, 13(1): 269-281.
- [59] 李青杰, 方文生, 张大琪, 等. 棉隆熏蒸联合生物炭和沸石对土壤微生态及土传病原菌的影响[J]. 植物保护, 2022, 48(4): 150-157.
- [60] LABORDE D, MAMUN A, MARTIN W, et al. Agricultural Subsidies and Global Greenhouse Gas Emissions [J]. Nature Communications, 2021, 12: 2601.
- [61] MIELCAREK-BOCHEN SKA P, RZEŽ NIK W. Greenhouse Gas Emissions from Agriculture in EU Countries—State and Perspectives[J]. Atmosphere, 2021, 12(11): 1396.
- [62] 王冠丽, 孙铁军, 刘廷玺, 等. 施用生物炭对干旱区玉米农田碳足迹的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2650-2658.
- [63] 廖添怀, 李欢, 王艳玲. 稻秆及稻秆生物炭添加对稻田红壤有机碳组分及 CH_4 和 CO_2 累积排放量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1598-1609.

- [64] DONG D, YANG M, WANG C, et al. Responses of Methane Emissions and Rice Yield to Applications of Biochar and Straw in APaddy Field[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(8): 1450-1460.
- [65] GUO F C, ZHANG J M, YANG X Y, et al. Impact of Biochar on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands under Various Influent Chemical Oxygen Demand to Nitrogen Ratios[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 303: 122908.
- [66] CHEN L, CHEN Q C, RAO P H, et al. Formulating and Optimizing a Novel Biochar-Based Fertilizer for Simultaneous Slow-Release of Nitrogen and Immobilization of Cadmium[J]. *Sustainability*, 2018, 10(8): 2740.
- [67] LUO W C, QIAN L, LIU W W, et al. A Potential Mg-Enriched Biochar Fertilizer: Excellent Slow-Release Performance and Release Mechanism of Nutrients[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 768: 144454.
- [68] XIANG Y B, LU X, YUE J T, et al. Stimuli-Responsive Hydrogel as Carrier for Controlling the Release and Leaching Behavior of Hydrophilic Pesticide[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 722: 137811.
- [69] MEI M, BAI B, ZHENG D, et al. Application of the Photothermal-Responsive Gelatin-Based Microspheres for Controlled Release of Imidacloprid by Helix-Coil Structural Transition Mechanism[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 652: 129792.
- [70] 钟晓晓. 油菜秸秆生物炭的制备及农药负载—缓释应用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [71] LIU B, CHEN C W, WANG R, et al. Near-Infrared Light-Responsively Controlled-Release Herbicide Using Biochar as a Photothermal Agent[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(17): 14924-14932.
- [72] GAO Y J, CHEN C W, WANG D F, et al. TiO₂/Biochar with Light-Switchable Wettability as A Herbicide Safener and Foliar Fertilizer Adhesive[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8 (2): 1121-1128.
- [73] WANG Y F, PENG Z J, YANG Y Q, et al. Auricularia Auricula Biochar Supported γ -FeOOH Nanoarrays for Electrostatic Self-assembly and pH-Responsive Controlled Release of Herbicide and Fertilizer[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 437: 134984.
- [74] 陈庆, 孙丽枝. 一种由温敏性凝胶控释的微生物肥增效剂及其制备方法: CN105481561A[P]. [2016-04-13].

责任编辑 苏荣艳