

生物炭在农业资源与环境领域中的应用

于衷浦 李飞跃

(安徽科技学院 资源与环境学院 安徽 凤阳 233100)

摘要: 生物炭具有独特的结构特性和理化性能,其在土壤污染修复与治理、农作物增产和品质提升、固碳减排等生态环境领域有着广泛地应用,受到国内外相关领域研究者的关注。原材料的类型及热解温度是影响生物炭结构性能最重要的两个因素,进而影响生物炭的生态环境功能。本文综述了生物炭的农田施用对土壤理化性质及土壤微生物的影响,阐明了生物炭在农业资源与环境领域中的应用潜力及潜在的问题,为生物炭在农业上的应用提供借鉴。

关键词: 生物炭; 土壤修复; 固碳减排

中图分类号: S156 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-8020(2022)02-0171-08

随着经济的快速发展和人民生活水平的显著提高,人们对农产品产地的环境质量越来越重视,农业废弃物的无害化和资源化利用成为关注的焦点。农业废弃物主要包括农业种植产生的作物秸秆、农产品加工产生的副产物、养殖产生的畜禽粪便等。随着时代发展的需求,这些农业废弃物传统地处理处置方法(还田、堆肥等)面临着挑战。近年来,生物质炭化技术被认为是一种有前景的农业废弃物处理新方法^[1]。

生物质炭化技术历史悠久,其原始方法是将秸秆、杂草、稻壳等堆积起来,通过土壤进行覆盖,并在封口处焚烧,在生物质转化过程中能形成简单的高温缺氧环境,最后热解成生物炭。生物炭是经过热解之后富含碳的固体物质,具有较为稳定的结构。它施用于土壤后能够提高土壤 pH 值,提升土壤肥力,防止土壤水分流失^[2-6],改善土壤微生物生存环境,减少农田温室气体排放^[7](见图 1)。数百年前,亚马逊印第安人就发现在土壤中添加生物炭能形成肥沃的土壤,促进作物生长。如今,生物炭的研究已成为国内外学者所关注的焦点,其在农业领域、能源领域、环境领域、功能材料领域的应用已取得一定成果。当前,在“双碳”目标下,我国碳减排压力大,秸秆炭化还

田固碳减排技术入选 2021 年农业农村部引领性技术名单,生物炭在农业领域的应用将更加广泛。

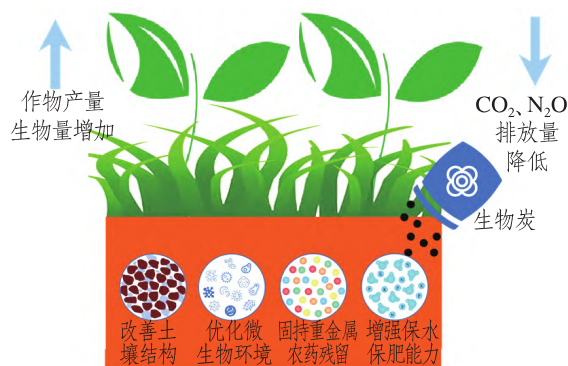


图 1 生物炭在农业资源与环境中的应用

Fig. 1 Application of biochar in agricultural resources and environment

1 生物炭概述

1.1 生物炭的概念及基本性质

生物炭是生物质在高温缺氧条件下,形成一种难以溶解、稳定存在、富碳的固体物质。它具有结构稳定、含碳量高、比表面积大、吸附能力强、生

收稿日期: 2021-10-28; 修回日期: 2021-01-15

基金项目: 安徽省高校拔尖人才项目(gxbjZD2021069); 安徽省重大专项(201903a06020023, 201903a06020001); 安徽省自然科学基金(2008085QD181)

第一作者简介: 于衷浦(1998—),男,天津人,硕士研究生,研究方向为生物炭环境效应。E-mail: yuzhongpu980524@163.com

通信作者简介: 李飞跃(1983—),男,安徽蚌埠人,教授,硕士研究生导师,博士,研究方向为农业碳氮循环。E-mail: lifeiyue0523@163.com

产成本低等优点,在土壤改良、温室气体减排、污染修复等方面都表现出巨大的潜能^[8-10]。近年来,对于生物炭的研究越来越多,主要集中在土壤的改良和环境污染的修复方面^[11-13]。随着研究的深入,对生物炭进行改性,制备功能性生物炭成为新的研究热点。通过对生物炭改性,达到优化比表面积和孔隙结构,提高吸附能力,改善土壤性能等多重功效^[14-15]。

1.2 生物炭的制备

生物炭的制备方法主要有干法热解、微波碳化、水热碳化、高温气化等^[16]。其中,干法热解是制备生物炭最常用的方法之一,其制备温度一般控制在300~700℃。根据生物质炭化过程中加热速率和保温时间,又可以分为快速热解、中速热解和慢速热解^[17]。常用的生物炭原料有农林废弃物(农作物秸秆、竹子、木屑、稻壳等)、动物粪便(牛粪、猪粪等)、市政污泥等^[18-19]。在规模化生物炭的生产中普遍应用的热解设备是回转炭化炉,可以一次性放入固态或固液废弃物混合投入炉中集中炭化处理,制作成本低、操作简单。在实验室中,常用的制备生物炭装置主要包括管式炉、马弗炉等。这些装置占地面积小,易于操作,参数可控,且生产出的生物炭品位高,适合进行科学研究。

1.3 影响生物炭性能的因素

生物炭的理化性质受多种因素的影响,包括原材料、热解温度、保温时间、气体流速等。研究表明,原材料和热解温度是影响生物炭的最重要的两个因素^[20-21]。

1.3.1 原材料

生物炭的原材料来源丰富,理论上以任何形式存在的有机物质皆可成为生物炭的原材料。人类生产生活过程中产生的废弃物,是制备生物炭的常用原材料。例如,秸秆、木屑、畜禽粪便、污泥等^[22]。颜钰等^[23]发现,在相同制备条件下,以植物为原料制备的生物炭相较于以畜禽粪便为原料制备生物炭的比表面积大,以木材和秸秆分别为原材料制作的生物炭所含C、灰分等也存在较大差异。原材料中灰分的含量和种类,在热解过程中通过自身的反应会影响生物炭的物理结构。一般情况下以植物为原材料制备的生物炭含碳量高,畜禽粪便制备的生物炭含碳量少,但产率高、

矿质元素含量丰富。

1.3.2 热解温度

热解温度对于生物炭性能影响显著。简敏菲等^[20]研究表明随着热解温度升高,生物炭产率减小,300~500℃时生物炭质量损失最大,500~700℃时产率下降变化较小,产率相对稳定。李飞跃等^[21]研究表明在制备温度200~500℃时生物炭产率急剧下降,在500℃以上时生物炭产率变化缓慢,随热解温度的升高生物炭的炭比例增加,生物炭的碳含量、灰分和比表面积增加、芳香化程度增强;反之生物炭的产率、H和O的比例及挥发性有机物含量降低。

2 生物炭对农田土壤理化性质的影响

2.1 生物炭对土壤物理性质的影响

生物炭具有独特的结构特征,将其施入土壤后,会影响土壤的持水能力、饱和度和团聚体等物理特性。生物炭含有大量的羧基、羟基等亲水基团以及较大的比表面积,因此具有很强的吸附、持水和改善土壤团聚体的能力^[24]。研究表明,每千克土壤添加20g生物炭,可使田间土壤的保水能力提高15%^[25]。生物炭对土壤持水能力的影响还与土壤类型有关,其中生物炭对沙质土壤的持水能力提高效果明显^[26-28]。此外,生物炭的多孔结构,增加了土壤的孔隙率,降低了土壤容重,进而达到增加土壤水分饱和度的效果^[26]。李兴等^[29]研究表明在沙壤土中随着生物炭添加量的增加,土壤容重减小、孔隙度增加,提高了沙壤土的保水效果。刘园等^[30]田间试验研究表明,施用生物炭可以降低土壤容重10.4%、提高土壤含水量14.5%。此外,施加生物炭可以提高土壤团聚体稳定性^[31]。李倩倩等^[32]研究表明,生物炭施入土壤中对深层土壤影响显著,大于0.25mm的团聚体稳定性增强。

2.2 生物炭对土壤化学性质的影响

2.2.1 pH值

生物炭不仅影响土壤的物理性质,还深刻影响土壤的化学性质。生物炭pH值随着制备温度的升高而升高,热解温度较低时,生物炭自身含有丰富的含氧官能团,形成了酸性物质残留在生物

炭中。随着热解温度的升高,酸性物质挥发,pH值升高;此外,高温使得生物炭中灰分含量增加,导致pH值增加^[33-35]。生物炭施入土壤后,会使土壤中胶体的H⁺发生交换,从而使H⁺浓度降低^[36-38]。研究表明,将生物炭施用于酸性土壤,可以有效改善土壤酸化状况,提高土壤pH值,其改善效果显著^[39]。Chintala等^[40]在酸性土壤中分别加入等量的3种植物源生物炭,土壤pH值均有不同程度的上升。Yuan等^[41]利用多种植物秸秆生物炭对酸性土壤进行改良,结果表明,植物秸秆生物炭均能提升酸性土壤pH值,且豆类植物秸秆生物炭效果更为显著。

2.2.2 阳离子交换量(CEC)

土壤阳离子交换能力(CEC)不仅是评价土壤肥力维持能力的指标,还是影响土壤污染物环境行为的因素。研究表明,生物炭可以提高土壤CEC,固持土壤养分,进而提高土壤肥力^[42]。此外,随着生物炭施用量的增加,其对土壤阳离子的吸附作用也随之增强^[43]。生物炭对CEC的影响主要取决于土壤类型和生物炭类型^[44-45]。

3 生物炭对土壤养分的影响

土壤养分是农作物生长的重要因素,决定着作物的产量和品质。生物炭具有较大的比表面积和丰富的微孔结构,可以作为土壤改良剂,提高土壤养分有效性,进而有利于作物生长发育^[46-48]。研究表明,在土壤中施加生物炭可以减少土壤中养分的淋失,提高氮素利用率^[49]。在较肥沃的土壤中施用生物炭,能够提高速效钾含量^[50-51]。生物炭施用量为30 t·hm⁻²时,玉米的产量可以提高31.4%,土壤全氮含量提高56.6%,土壤有机质提高69.3%^[52],生物炭富含有机碳,既可以增加土壤的有机质含量^[53],又可以提高土壤肥力,还可以固碳减排。此外,Liang等^[54]发现在土壤中添加生物炭,土壤中氮的含量没有明显变化,速效钾含量增加,速效磷含量不变。

4 生物炭对土壤微生物的影响

生物炭对土壤理化性质的影响,一定程度上影响土壤中微生物的活性、数量及多样性,而微生物的改变又在一定程度上影响土壤环境性能。生物炭多孔结构,一方面,为微生物提供了良好的栖

息场所,另一方面,生物炭能固持水分和养分,充分保障微生物的营养,为土壤微生物提供较好的生存条件^[7]。研究表明,施加生物炭会增加真菌在作物根部的繁殖能力^[55]。在一定范围内增加生物炭的施用量,可大大增加土壤微生物的活性和数量。生物炭的施用还可以改变土壤细菌的多样性和根际微生物的组成^[56]。此外,生物炭的孔隙结构可以吸收和储存各种类型和成分的营养物质,为微生物提供所需的能量和养分,以确保其生存所需的养分来源。

研究发现,生物炭连续添加两年后,丛枝菌根菌在小麦根系中增加了20%~40%^[57]。另有研究发现,随着pH的提高,微生物数量有所增加,但真菌和细菌对pH却有不同响应,当pH上升到7左右时,细菌种类增加,而真菌种类变化不一^[58]。

5 生物炭对作物生长发育和产量的影响

生物炭能促进农作物对养分的吸收,有利于农作物的生长发育^[59],但是也有研究表明,生物炭施入土壤中对作物产量没有影响,甚至可能会出现负面效应^[60]。SCHULZ等^[61]研究表明,生物炭对于作物的生长有着促进的作用,生物炭添加的量越多土壤的肥力越高,植物生长越快。然而,也有研究表明,生物炭的施用不仅不会促进作物的生长,如果生物炭的施用量过大,还会降低作物的产量^[62]。张晗芝等^[63]研究表明,生物炭能明显抑制玉米苗期生长。邓万刚等^[64]研究表明,当生物炭施入土壤的比例不匹配时,作物的产量会有一定程度的降低,同时其品质也会受到影响。多数研究已经充分表明,施加生物炭能促进农作物增产,其施用量在合理的范围内,积极效用都是可持续的。

6 生物炭对温室气体排放的影响

化肥的施用是保障我国农作物产量稳定的重要措施,但是化肥过量施用会造成环境污染,进而影响农业绿色健康可持续发展。研究表明,我国化肥施用量所导致的碳排放占农业碳排放量的60%以上^[65-66]。

生物炭施入土壤后,能够抑制土壤自身有机

质的分解矿化,降低土壤 CO_2 的排放。此外,生物炭碱性特征及多孔特性也能减缓土壤中 CO_2 向大气中释放。施用生物炭还可以促进对甲烷(CH_4)的吸收并降低氧化亚氮(N_2O)的排放^[67]。研究表明,生物炭自身的理化性质和结构特点,能够影响土壤硝化和反硝化过程,进而影响 N_2O 排放^[68]。施用生物炭还能减少稻田 N_2O 的排放,由于生物炭的添加提升土壤的 pH 值,利于 N_2O 还原酶的活性,促进 N_2O 的还原^[69]。施加生物炭能提高土壤孔隙度,提高土壤甲烷氧化菌的活性,减少 CH_4 的产生与排放^[70-71]。然而,也有研究表明生物炭也可促进 CH_4 的排放^[72]。

7 生物炭与农业面源污染

大量、长期使用化肥、农药、除草剂等农化产品,导致的农业面源污染,严重影响了我国农业的可持续发展。生物炭不仅能够提高肥料利用率,还能够固持有机无机污染物^[73-74]。可见,生物炭在农村面源污染领域将大有可为。

生物炭本身的结构和官能团影响土壤中养分离子的迁移转化。生物炭对铵根离子和磷酸根离子都具有较好的吸附效果,施入土壤后,它可以减少土壤中 N、P 等养分的流失,提高养分的利用效率,进而能保持土壤的肥力^[73-74],降低农业面源污染的风险。

生物炭对于土壤中的多环芳烃及农药等有机污染物有很强的吸附效果。施加生物炭可以影响多环芳烃的迁移转化^[42]。施用生物炭到土壤中对农药的吸附量提高了 5~125 倍,农药解析率降低 96%^[75]。研究表明,施用少量的生物炭到土壤中增加了土壤对多环芳烃的吸附容量,显著提升了对多环芳烃的吸附效果^[76],降低了潜在的污染风险。生物炭有较大的比表面积和丰富的官能团结构,通过静电吸附、化学吸附使土壤中有机污染物固定在生物炭中,达到改善土壤环境的目的^[77]。

农田重金属污染是农业面源污染的一个重要方面。人类生产生活过程中产生的铜、锌等重金属元素及汞、镉、砷等有毒金属元素,通过不同途径进入土壤,对土壤造成严重的污染。这些金属元素进入植物体内富集,对植物的生长发育造成危害,通过食物链进入人体,进而危害人体健康。

研究表明,在施加生物炭的土壤中,土壤重金属污染物在土壤中存在形式发生了改变。生物炭通过吸附或沉淀作用使其镉的浓度降低,改变了镉的有效性^[78]。通过施加生物炭可以降低土壤中金属离子活性,减少金属离子在作物中的富集效应,进而改善土壤质量和作物品质^[79]。主要机制包括:1) 生物炭表面带面负电荷对重金属阳离子静电吸附。此外,生物炭显碱性,施入土壤后,重金属离子容易形成氢氧化合物沉淀^[80]。2) 生物炭中含有大量的灰分,也能够和重金属离子形成沉淀^[81]。3) 生物炭的比表面积大和官能团丰富特征,能吸附固持重金属离子^[82]。

生物炭对重金属具有较好的吸附性能(表 1)。F. Rozada 等^[83] 研究表明污泥生物炭对于 Pb(II)、Hg(II) 吸附量分别是 64.1 和 175 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$;李赞等^[84] 研究表明大豆和高粱秸秆生物炭对于 Pb(II) 吸附效果较好,并且大豆生物炭的吸附效果优于高粱生物炭,而高温制备生物炭的吸附效果优于低温制备的生物炭;关连珠等^[85] 研究表明玉米秸秆生物炭和松针生物炭对于土壤中 As(V) 有较好的吸附效果;刘阳生等^[86] 研究表明,700 °C 制备的稻秆秸秆生物炭对于土壤中 Pb(II)、Cd(II) 的吸附效果是最好的,吸附量分别是 127 和 60.6 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。这些研究结果表明秸秆生物炭对重金属的吸附有良好的效果,为废弃生物资源化利用以及解决重金属含量超标问题提供了方法。

表 1 不同原材料制备生物炭对重金属的吸附能力
Tab. 1 Adsorption capacity of biochar derived from different raw materials for heavy metals

生物炭类型	热解温度/°C	重金属	吸附量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	参考文献
污泥生物炭	700	Pb(II)、Hg(II)	64.1、175	[83]
大豆秸秆生物炭	650	Pb(II)	66.8	[84]
高粱秸秆生物炭	650	Pb(II)	34.6	[84]
玉米秸秆生物炭	500	As(V)	41.7	[85]
松针生物炭	500	As(V)	23.4	[85]
木屑生物炭	700	Pb(II)、Cd(II)	33、122	[86]
玉米秸秆生物炭	700	Pb(II)、Cd(II)	16.2、39.7	[86]
稻秆秸秆生物炭	700	Pb(II)、Cd(II)	127、60.6	[86]

8 结论与展望

综上所述,生物炭对土壤的改良、土壤环境污染治理、固碳减排等农业资源与环境领域内的综合利用有着较好的效果。但是,我国土壤类型

多,土壤性质差异大,亟需增加生物炭在不同区域土壤施用效果的研究,为全国范围内生物炭应用提供数据支撑。此外,生物炭在农业资源与环境领域中的研究大多停留在短期内,10年甚至更长时间尺度范围内的效应还缺乏数据支撑,还需要做进一步的积累。最后,生物炭施用后对土壤动物的影响研究甚少(例如,土壤中蚯蚓的生长发育),亟需在未来开展相关研究。

参考文献:

- [1] LIANG Y, LI F Y, YANG F, et al. Immobilization and its mechanisms of heavy metal contaminated soils by phosphate-containing amendment and biochar [J]. *Journal of Agro-Environment Science* 2013, 32(12): 2377-2383.
- [2] 钟晓晓,王涛,原文丽,等.生物炭的制备、改性及其环境效应研究进展[J].*湖南师范大学自然科学学报*,2017,40(5):44-50.
- [3] MALYAN S K, KUMAR S S, FAGODIYA R K, et al. Biochar for environmental sustainability in the energy-water-agroecosystem nexus [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2021, 149: 111379.
- [4] SINGH B, SINGH B P, COWIE A L J S R. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment [J]. *Soil Research* 2010, 48(7): 516-525.
- [5] DUBEY A, LAL R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India and Ohio, USA [J]. 2009, 23(4): 332-350.
- [6] 王红兰,唐翔宇,张维,等.施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J].*农业工程学报* 2015, 31(4): 6.
- [7] 关孟欣,彭兰生,陈景阳,等.玉米芯生物炭对污泥蚯蚓粪中微生物种群及 ARGs 的影响[J].*中国环境科学* 2021, 41(6): 2744-2751.
- [8] BIAN B, LV L, YANG D H, et al. Migration of heavy metals in vegetable farmlands amended with biogas slurry in the Taihu Basin, China *Ecological Engineering* [J]. *Ecological Engineering* 2014, 71: 380-383.
- [9] DONG D, FENG Q, MCGROUTHER K, et al. Effects of biochar amendment on rice growth and nitrogen retention in a waterlogged paddy field [J]. 2015, 15(1): 153-162.
- [10] DUAN G, ZHANG H M, LIU Y X. Long-term fertilization with pig-biogas residues results in heavy metal accumulation in paddy field and rice grains in Jiaying of China [J]. *Fertilizers and Soil Amendments* 2012, 58(5): 637-646.
- [11] MENG J, TAO M, WANG L, et al. Changes in heavy metal bioavailability and speciation from a Pb-Zn mining soil amended with biochars from co-pyrolysis of rice straw and swine manure [J]. *Science of the Total Environment* 2018, 633(15): 300-307.
- [12] VITHANAGE M, RAJAPAKSHA A U, AHMAD M, et al. Mechanisms of antimony adsorption onto soybean stover-derived biochar in aqueous solutions [J]. *Journal of Environmental Management* 2015, 151(15): 443-449.
- [13] ZENG X, XIAO Z, ZHANG G, et al. Speciation and bioavailability of heavy metals in pyrolytic biochar of swine and goat manures [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2018, 132: 82-93.
- [14] YANG G X and JIANG H J W R. Amino modification of biochar for enhanced adsorption of copper ions from synthetic wastewater [J]. *Water Research*, 2014, 48: 396-405.
- [15] ZHOU Q, LIAO B H, LIN L, et al. Adsorption of Cu(II) and Cd(II) from aqueous solutions by ferromanganese binary oxide-biochar composites [J]. *Science of the Total Environment* 2018, 615: 115-122.
- [16] 杨仲禹,韩继铨,李解,等.微波辅助碳酸钾活化制备玉米秆基活性生物炭[J].*材料科学与工程学报*, 2015, 33(6): 903-907.
- [17] YU X Y, YING G G, KOOKANA R S J C. Reduced plant uptake of pesticides with biochar additions to soil [J]. *Chemosphere* 2009, 76(5): 665-671.
- [18] 李飞跃,陶进国,汪建飞,等.不同温度下制备花生壳生物炭的结构性质差异[J].*环境工程学报*, 2017, 11(6): 3726-3730.
- [19] 李飞跃,吴旋,李俊锁,等.温度对畜禽粪便水热炭产率及特性的影响[J].*环境工程学报*, 2019, 13(9): 2270-2277.
- [20] 简敏菲,高凯芳,余厚平.不同裂解温度对水稻秸秆制备生物炭及其特性的影响[J].*环境科学学报*, 2016, 36(5): 1757-1765.
- [21] 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.
- [22] LEHMANN J. Bio-energy in the black [J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2007, 5(7): 381-387.
- [23] 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菲的吸附行为[J].*环境科学学报* 2014, 33(9): 1810-1816.
- [24] 高海英,何绪生,耿增超,等.生物炭及炭基氮肥对

- 土壤持水性能影响的研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(24): 207-213.
- [25] A. LAIRDA D, FLEMING P, D. DAVIS D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical mid-western agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 443-449.
- [26] ASAI H, SAMSON B K, STEPHAN 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 Crops Research*, 2009, 111(1): 81-84.
- [27] ZWIETEN L V, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility [J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1): 235-246.
- [28] 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): 6.
- [29] 李兴, 勾芒芒, 屈忠义, 等. 生物炭对土壤水分特征的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(12): 280-283.
- [30] 刘园, KHAN M J, 靳海洋, 等. 秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 849-858.
- [31] 董心亮, 林启美. 生物质炭对土壤物理性质影响的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(12): 1846-1854.
- [32] 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 等. 生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(7): 3388-3396.
- [33] YUAN J H, XU R K, ZHANG H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 3488-3497.
- [34] FIDEL R B, LAIRD D A, THOMPSON M L, et al. Characterization and quantification of biochar alkalinity [J]. *Chemosphere*, 2017, 167: 367-373.
- [35] 于晓娜, 张晓帆, 李志鹏, 等. 热解温度对花生壳生物炭产率及部分理化特性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2017, 51(1): 108-114.
- [36] LIU P, PTACEK C J, BLOWES D W, et al. Control of mercury and methylmercury in contaminated sediments using biochars: A long-term microcosm study [J]. *Applied Geochemistry*, 2018: S0883292718300428.
- [37] TOPOLIANTZ S, PONGE J F, BALLOF S J B, et al. Manioc peel and charcoal: A potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41(1): 15-21.
- [38] 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.
- [39] 张阿凤, 邵慧芸, 成功, 等. 小麦生物质炭对烤烟生长及根际土壤理化性质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 85-93+102.
- [40] CHINTALA R, SCHUMACHER T E, MCDONALD L M, et al. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures [J]. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 2014, 42(5): 626-634.
- [41] YUAN J H, XU R K, WANG N, et al. Amendment of acid soils with crop residues and biochars [J]. *Pedosphere*, 2011, 21(3): 302-308.
- [42] SONG J, PENG P, HUANG W J E S, et al. Black carbon and kerogen in soils and sediments. 1. quantification and characterization [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(18): 3960-3967.
- [43] 杨兰, 李冰, 王昌全, 等. 改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应[J]. 环境科学, 2016(9): 13.
- [44] GASKIN J W, STEINER C, HARRIS K, et al. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2008, 51(6): 2061-2069.
- [45] 陈心想, 耿增超. 生物质炭在农业上的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 167-74.
- [46] LAIRD D, FLEMING P, WANG B, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 436-442.
- [47] AKHTAR S S, LI G, ANDERSEN M N, et al. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 138: 37-44.
- [48] 刘卉, 周清明, 黎娟, 等. 生物炭对植烟土壤养分的影响[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(3): 150-155.
- [49] 柳瑞, ABDUL H, 李恩琳, 等. 减氮配施秸秆生物炭对稻田土壤养分及植株氮素吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2381-2389.
- [50] BARONTI S, VACARI F P, MIGLIETTA F, et al. Impact of biochar application on plant water relations in *Vitis vinifera* (L.) [J]. *Geoderma*, 2014, 53: 38-44.
- [51] ZHAO W, ZHOU Q, TIAN Z, et al. Apply biochar to a-

- meliorate soda saline - alkali land ,improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain[J]. *Science of the Total Environment* , 2020 ,722: 137428.
- [52] 杨浩鹏,李飞跃,周春火,等. 稻壳生物炭对土壤养分、玉米产量及氮素利用率的影响[J]. *安徽科技学院学报* 2020 34(2): 57 - 62.
- [53] M. KIMETUA J and LEHMANN J J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents [J]. *Soil Research* , 2010 48(7): 577 - 585.
- [54] LIANG B ,LEHMANN J ,SOLOMON D ,et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils [J]. *Soil Science Society of America Journal* 2006 70(5): 1719 - 1730.
- [55] WARNOCK D D ,LEHMANN J ,KUYPER T W ,et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil - concepts and mechanisms [J]. *Plant & Soil* ,2007 ,300 (1/2): 9 - 20.
- [56] A. DE TENDER C ,DEBODE J ,VANDECASTEELE B ,et al. Biological ,physicochemical and plant health responses in lettuce and strawberry in soil or peat amended with biochar [J]. *Applied Soil Ecology* 2016 , 107: 1 - 12.
- [57] SOLAIMAN Z M ,BLACKWELL P ,ABBOTT L K ,et al. Direct and residual effect of biochar application on mycorrhizal root colonisation ,growth and nutrition of wheat [J]. *Soil Research* 2010 48(7): 546 - 554.
- [58] ROUSK J ,BAATH E ,PHILIP C BROOKES P ,et al. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil [J]. *Isme Journal* 2010 4(10): 1340 - 1351.
- [59] LEHMANN J ,JR J ,STEINER C ,et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer ,manure and charcoal amendments [J]. *Plant and Soil* ,2003 , 249(2): 343 - 357.
- [60] 赵铁民,李渊博,陈为峰,等. 生物炭对滨海盐渍土理化性质及玉米幼苗抗氧化系统的影响[J]. *水土保持学报* 2019 33(2): 196 - 200.
- [61] SCHULZ H ,DUNST G ,GLASER B. Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility [J]. *Agronomy for Sustainable Development* 2013 33(4): 817 - 827.
- [62] KISHIMOTO S and SUGIURA G. Charcoal as soil conditioner [C]. *Symposium on Forest Product Research , International Achievements for the Future* ,1985 5: 12 - 23.
- [63] 张晗芝,黄云,刘钢,等. 生物炭对玉米苗期生长、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.
- [64] 邓万刚,吴鹏豹,赵庆辉,等. 低量生物质炭对2种热带牧草产量和品质的影响研究初报[J]. *草地学报* 2010(6): 844 - 847.
- [65] 李波,张俊飏,李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. *中国人口·资源与环境* 2011 , 21(8): 7.
- [66] 张灿强,王莉,华春林,等. 中国主要粮食生产的化肥削减潜力及其碳减排效应[J]. *资源科学* 2016 , 38(4): 8.
- [67] 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): 9.
- [68] 何甜甜,刘天,云菲,等. 生物炭对农田 N₂O 排放的影响机制研究[J]. *中国农业科技导报* ,2021 ,23(5): 124 - 131.
- [69] WANG J Y ,PAN X J ,LIU Y L ,et al. Effects of biochar amendment in two soils on greenhouse gas emissions and crop production [J]. *Plant and Soil* ,2012 , 360: 287 - 298.
- [70] 秦晓波,李玉娥,HONG W,等. 生物质炭添加对华南双季稻田碳排放强度的影响[J]. *农业工程学报* , 2015 31(5): 226 - 234.
- [71] TAO P C ,CHEN X M ,JIN Z W ,et al. Long - term effects of biochar application on microbial properties and physicochemical properties in upland red soil ,China [J]. *Chinese Journal of Soil Science* 2017 48(6): 1423 - 1428.
- [72] MIZUTA K ,MATSUMOTO T ,HATATE Y ,et al. Removal of nitrate - nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal [J]. *Bioresource Technology* , 2004 95(3): 255 - 257.
- [73] STEINER C ,TEIXEIRA W G ,LEHMANN J ,et al. Long term effects of manure ,charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil [J]. *Plant and Soil* 2007 291(1/2): 2752 - 90.
- [74] 余向阳,王冬兰,母昌立,等. 生物质炭对敌草隆在土壤中的慢吸附及其对解吸行为的影响[J]. *江苏农业学报* 2011 27(5): 5.
- [75] YANG Y N and SHENG G Y. Enhanced pesticide sorption by soils containing particulate matter from crop residue burns [J]. *Environmental Science & Technology* 2003 37(16): 3635 - 3639.
- [76] CHEN B L ,YUAN M X. Enhanced sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons by soil amended with bio-

- char[J]. *Journal of Soils and Sediments* 2011 ,11(1) : 62 – 71.
- [77] 李晓娜,宋洋,贾明云,等. 生物质炭对有机污染物的吸附及机理研究进展[J]. *土壤学报* ,2017 ,54(6) : 1313 – 1325.
- [78] 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.
- [79] 刘莹莹,秦海芝,李恋卿,等. 不同作物原料热裂解生物质炭对溶液中 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的吸附特性[J]. *生态环境学报* 2012 21(1) : 7.
- [80] 王萌萌,周启星. 生物炭的土壤环境效应及其机制研究[J]. *环境化学* 2013 32(5) : 768 – 780.
- [81] 林珈羽,张越,刘沅,等. 不同原料和炭化温度下制备的生物炭结构及性质[J]. *环境工程学报* ,2016 , 10(6) : 3200 – 3206.
- [82] DONG X ,MA L Q ,ZHU Y ,et al. Mechanistic investigation of mercury sorption by Brazilian pepper biochars of different pyrolytic temperatures based on X – ray photoelectron spectroscopy and flow calorimetry [J]. *Environmental Science & Technology* ,2013 ,47(21) : 12156 – 12164.
- [83] ROZADA F ,OTERO M ,MORÁN A ,et al. Adsorption of heavy metals onto sewage sludge – derived materials [J]. *Bioresource Technology* ,2008 ,99 (14) : 6332 – 6338.
- [84] 李赞,孙宵琦,于瑞雪,等. 不同农作物秸秆生物炭性质及其对重金属铅的吸附特性研究[J]. 2018 50(9) : 78 – 82.
- [85] 关连珠,周景景,张昀,等. 不同来源生物炭对砷在土壤中吸附与解吸的影响[J]. *山东农业科学* , 2013 24(10) : 2941 – 2946.
- [86] 戴静,刘阳生. 四种原料热解产生的生物炭对 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附特性研究[J]. *北京大学学报: 自然科学版* 2013 49(6) : 1075 – 1082.

Biochar Application in the Field of Agricultural Resources and Environment

YU Zhongpu , LI Feiyue

(College of Resources and Environment ,Anhui Science and Technology University ,Fengyang 233100 ,China)

Abstract: Biochar ,due to its unique structural and physicochemical properties ,is widely used in ecological environment fields including soil pollution remediation and treatment ,soil quality and crop yield improvement , carbon sequestration ,and is favored by scholars in related fields at home and abroad. The feedstock and pyrolysis temperature are the two most important factors that determined the structural properties of biochar ,which in turn affect the ecological and environmental fate and functions of biochar. This paper reviews the effects of biochar application on soil physicochemical properties and soil microorganisms ,and investigates the application and potential problems of biochar in the field of agricultural resources and environment ,which provides information and ideas for the application of biochar in agriculture.

Keywords: biochar; agricultural resources and environment; physical and chemical properties of soil

(责任编辑 李维卫)