

蔡名旋, 朱小平, 黑亮, 林贤柯. 利用废弃物制备生物炭资源化研究与应用进展 [J]. 广东农业科学, 2019, 46(3): 85-92.

利用废弃物制备生物炭资源化研究与应用进展

蔡名旋¹, 朱小平¹, 黑亮¹, 林贤柯²

(1. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院 / 水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室, 广东 广州 510611; 2. 华南农业大学资源环境学院, 广东 广州 510642)

摘要: 生物炭制备的原材料来源广泛, 大部分废弃物可以通过炭化手段得到生物炭。生物炭是一种吸附材料, 其结构多孔, 官能团种类多样, 在污染修复、改良土壤等方面有应用前景。综述各种可以制备生物炭的材料、归纳常用的生物炭制备方法和生物炭的表征特性, 总结生物炭在修复污染环境、改良土壤环境和作为新型化肥方面的研究应用, 以找出当前废弃物制备生物炭的资源化应用重点和方向, 并对生物炭在产量化制备、规模化应用方面进行展望。

关键词: 废弃物; 吸附材料; 改良剂; 炭基肥

中图分类号: S156.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X(2019)03-0085-08

Research and Application Progress on the Preparation of Biological Carbon from Waste

CAI Mingxuan, ZHU Xiaoping, HEI Liang, LIN Xianke

(*Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resource Commission/Key Laboratory of the Pearl River Estuarine Dynamics and Associated Process Regulation, Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China;*

2. College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510611, China)

Abstract: Bio-carbon can be prepared from a wide range of raw materials and obtained from most of waste through carbonization. Bio-carbon is a kind of adsorption material with porous structure and diverse functional groups, which has application prospects in pollution restoration and soil improvement. This paper reviewed various materials that can be used to prepare bio-carbon, generalized about the commonly used methods of bio-carbon preparation, and the characterization characteristics of bio-carbon and summarized the research and application of bio-carbon in repairing polluted environment, improving soil environment, and as a new type of fertilizer in order to find out the key points and direction of resource application of bio-carbon preparation from current waste, and made a prospect of the quantitative preparation and large-scale application of bio-carbon.

Key words: waste; adsorption material; improver; carbon-based fertilizer

1993年, Seifrit^[1]提出了生物质转化为生物炭的想法。2006年, Marris^[2]进一步研究生物质制备生物炭的理论, 相关论文引起广泛关注。生物炭是生物质材料在厌氧或无氧条件下不

完全燃烧产生的一种富碳固体材料^[3]。生物炭的制备原材料来源广泛, 有水稻秸秆^[4]、皇竹草秸秆^[5]、玉米秸秆^[6-7]、动物粪便^[8]和污泥^[9]等。制备方法是影响生物炭官能团结构和比表

收稿日期: 2019-02-06

基金项目: 广东省水利科技创新项目(201707)

作者简介: 蔡名旋(1994—), 男, 助理工程师, 研究方向为环境生态学, E-mail: 357635550@qq.com

通信作者: 黑亮(1976—), 女, 回族, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为环境生态学, E-mail: hidige@sina.com

面积大小的直接因素。生物炭的比表面积大,化学性质呈碱性,其官能团结构稳定,在土壤改良、污染修复和固碳减排等方面有广泛应用。其主要表现在缓解土壤有机物、重金属污染和影响碳转化、微生物活动等^[10]。采用不同的炭化方法获得的生物炭,其对污染物的吸附效果有较大差异。目前生物炭制备技术主要有慢速热裂解、快速热裂解、气化热裂解和微波热裂解法等,不同的方法均可制备出具有良好吸附能力的生物炭。如赖长鸿等^[5]利用皇竹草慢速热裂解法制备生物炭,其对Cr的吸附量可达4.64 mg/g。

有研究把生物炭直接施用对受污染的农田进行修复,通过对比发现,生物炭没有足够的营养元素,直接施用不能满足作物正常生长,进而研制出生物炭基肥。生物炭基肥是将生物炭与肥料混合制成的一种肥料,既有生物炭土壤改良和固碳减排的特性,又能给农作物提供足够的养分,是一种环境友好型肥料^[11]。

本文综述了生物炭的制备原材料、制备方法、吸附特性和资源化利用方面的研究进展,并对生物炭的资源化利用前景进行展望。

1 生物炭的制备材料及方法

1.1 制备原材料

大部分具有生物质能的原材料都适合制备生物炭。我国是一个农业大国,每年都产生大量的农业废弃物,这些物质中的生物质能均没有得到资源化利用。以我国三大农作物之一稻谷为例,谷壳约占稻谷的25%,这部分废弃物富含生物质能,是生物炭制备的良好原料。目前制备生物炭常用的原材料分为植物秸秆残渣类、动物粪便类和污泥类。有资料显示,我国每年产生植物秸秆约9亿t、畜禽粪便约38亿t^[12]。这些农业废弃物的生物质能资源化应用前景巨大。

1.1.1 植物秸秆残渣类 植物秸秆是最常见的生物炭制备原材料,植物秸秆制备所得生物炭具有较高的含碳量^[13]。植物秸秆中有丰富的木质素、纤维素和半纤维素,木质素热解主要生成焦炭。谭洪等^[14]研究表明,生物质中的木质素和半纤维素是生成焦炭的主要成分,植物秸秆中有丰富的木质素和半纤维素更利于生成焦炭。吕当振等^[15]的研究也表明了纤维素热解生成挥发分,而木质素则生成焦炭。植物秸秆中木质素和半纤

维素含量决定了所制备生物炭的含碳量。植物秸秆成分决定其产率,利用植物秸秆制备生物炭有较高的产率。

1.1.2 动物粪便类 动物粪便可以制备生物炭,利用动物粪便制备的生物炭的含碳量比植物秸秆生物炭低。陈贵等^[16]将羊粪、牛粪、兔粪、猪粪和水稻秸秆制备生物炭,研究了不同生物炭的特性,结果表明,动物粪便生物炭产率明显低于秸秆生物炭。这是由于动物中的有机物含量比植物秸秆低,炭化生成的固体产物相对少。王煌平等^[17]研究指出,利用动物粪便制备出生物炭,热解温度会影响动物粪便中重金属的特征变化。热解炭化使得动物粪便中的某些重金属固定,降低了有效性。由此可见,利用动物粪便制备生物炭的资源化途径是可行的,但其产率一般。

1.1.3 污泥类 随着城市的发展,城市污水厂的污泥处理量逐年增加,其中80%的剩余污泥没有得到妥善处理,剩余污泥回收资源化已成为研究热点^[18]。污泥制备成生物炭是其资源化利用的新途径。污泥中的重金属、挥发分和水分含量高,有机物含量少,导致其单独热解时的固体产物产率低^[19]。因此可以通过污泥与生物质共热解来制备生物炭。吴姮等^[20]利用市政剩余污泥配合农业废弃物烧制生物炭,发现污泥炭化过程会失重50%~60%,说明将污泥热解炭化可以达到污泥减量化目的。经高温热解处理的污泥制成生物炭,污泥原来的孔隙结构改变,污泥生物炭因而具有吸附能力。丁文川等^[21]制备的富磷污泥生物炭表现出良好的吸附能力,说明污泥炭化后也可以具有一般生物炭的特性。此外,污泥制备生物炭还降低了污泥中重金属的活性和生物有效性^[22]。

1.2 制备方法

1.2.1 常用制备方法 目前生物炭制备的常用方法有限氧慢速热裂解法、限氧快速热裂解法和气化热裂解法等^[23]。其中限氧慢速热裂解法最为常用,其关键是控制生物质炭化环境的升温速率,一般在5~200℃/min范围内,温度控制在600℃以内,同时保持较长的保温时间,得到较高产率的生物炭。葛丽炜等^[24]利用玉米秸秆在不同温度下制备生物炭,热解时间越长,生物炭的产率越低,而生物炭的碳含量随热解温度升高而增加。限氧快速热裂解法则是以极快的升温速率对生物质进行热裂解,其反应一般仅几秒就完成,这种

方法产出物液化率很高,是生物质液化过程,产物以液体油居多,可产出少量生物炭。而气化热裂解法技术的关键是炭化温度,一般温度大于700℃时,生物质会发生气化,生物质转化得到生物炭较少,但产生的气体可作为燃料,是资源化利用生物质的研究途径之一。此外,近年来也有研究采用微波热裂解法制备生物炭,利用微波将废弃物进行内加热,使生物质能均衡加热裂解,加热时间较短,是一种既灵活又简便的新型方法。

1.2.2 改性制备方法 不同的炭化条件对生物炭的孔结构有重要影响,从而影响生物炭的吸附能力。而为了得到对某环境污染物具有选择性和吸附性能突出的生物炭,有学者对生物炭的改性制备方法进行研究。有研究用氯化铁溶液对香蒲生物炭进行活化,经活化改性后的生物炭对氮吸附效果增强^[25]。而把 Fe_3O_4 纳米颗粒物与花生壳混合制备出改性生物炭,则增强其对磷的吸附效果^[26]。Huff等^[27]用氧化剂 H_2O_2 改性制备出松木生物炭,其对亚甲蓝的选择性吸附大大增强。可见,生物炭改性制备是利用金属阳离子、氧化剂和纳米材料等将生物炭原材料活化,使制备出来的生物炭对污染物的吸附量增加,或者对某一污染物有良好的选择性,最终获得对某污染物有固定作用的改性生物炭材料。

2 生物炭特性研究

2.1 比表面积大

由于生物炭的多孔结构,比表面积大,使其具有良好的吸附能力。郭若男等^[28]以花生壳、核桃壳、玉米秸秆为原料制备生物炭,并对生物炭的比表面积进行测定,结果分别为557.59、224.95、251.84 m^2/g ,3种生物炭均对水中阿司匹林有较好的吸附效果,其中花生壳生物炭的效果最优,即比表面积越大其吸附效果越好。这种多孔结构是热解过程产生的,在一定温度范围内,热解温度越高,其比表面积越大^[29]。正是这种多孔结构提供了附着位点,使得生物炭可以吸附污染物。而在实际应用中,这种多孔结构还为土壤微生物提供了生存场所。李明等^[30]研究表明,生物炭的孔隙结构是微生物的栖息环境。

2.2 官能团丰富

生物炭含有丰富的官能团,如羟基、羧基、氨基、羰基等,这些官能团结构是决定生物炭吸

附力的重要因素。研究指出,生物炭中的羟基离子能够与重金属发生钝化作用,从而降低金属离子的有效性^[31]。唐行灿等^[32]研究了施加生物炭对土壤重金属形态的影响,结果表明生物炭中的基团能固定重金属,使重金属离子形成氢氧化物沉淀。生物炭中与重金属发生作用的是含氧基团,如土壤中Pb与生物炭表面的羟基和羰基等含氧基团络合产生 $\text{Pb}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$,从而达到固定Pb的效果^[33]。

3 生物炭的资源化利用

3.1 污染修复剂

3.1.1 对污水中氮和磷的吸附 由于生物炭特殊的多孔结构和丰富的官能团结构,具有很好的吸附能力,利用生物炭吸附污染物、修复受污染环境是近年来的研究热点。生物炭可用于处理污水中的氮、磷等污染物,其吸附规律符合吸附动力学,可认为是单分析层吸附。这种吸附包括了物理吸附和化学吸附。刘项等^[34]以园林绿化废弃物刺桐为原料制备的生物炭对水中磷和氮均有吸附效果,其吸附规律符合吸附动力学,不同温度、不同初始浓度、不同吸附环境的pH值等均能影响其吸附效率。王彤彤等^[35]用柠条改性制备的生物炭对磷有吸附效果,其最大理论吸附量为19.97 mg/g ,研究表明该生物炭对磷有吸附作用包括静电作用、基团作用和络合作用。可见生物炭对磷的吸附存在复杂的物理吸附和化学吸附。

3.1.2 对重金属的吸附 生物炭对重金属的吸附能力表现突出。李金阳等^[36]制备水稻秸秆生物炭,研究其对 Cd^{2+} 的吸附效果,结果表明生物炭的官能团结构有利于吸附更多的金属离子。计海洋等^[37]研究了蚕丝生物炭对 Cd^{2+} 的等温吸附过程,其最大吸附量达97.01 mg/g 。孟雅静等^[38]采用混合原料制备的生物炭对 Cr^{6+} 的去除率达88.74%。其作用机理大致相同,金属离子与生物炭中的官能团发生化学作用,使金属离子生成络合物,从而降低有效性。类似的研究还有很多,郑灵芝等^[39]利用生物炭吸附 Cd^{2+} 的效果良好;朱司航等^[40]发现改性生物炭对As有吸附效果;张连科等^[41]制备的胡麻和油菜秸秆生物炭对污水中的 Pb^{2+} 理论吸附量为220.07、307.59 mg/g 。

3.1.3 对有机污染物的吸附 生物炭可用作吸附

抗生素类污染物。其作用机理是生物炭表面官能团可以与有机物结合,有研究指出生物炭的某些表面官能团使其具有亲水性或疏水性^[42]。类似的研究还有很多,方慕楠等^[43]制备的改性纤维素生物炭对废水中亚甲蓝的吸附率达93.5%。王开峰等^[44]研究发现水稻秸秆生物炭对磺胺二甲基嘧啶和磺胺甲恶唑有良好的吸附效果。此外,生物炭对石油烃类污染物也有吸附效果。孔露露等^[45]将木屑和麦秆生物炭施用在石油烃污染的土壤内,结果发现污染土壤中的多环芳烃浓度明显降低。

3.2 土壤改良剂

生物炭可以提高作物地土壤的pH值,使土壤有机碳含量增加,提高农作物产量。黄连喜等^[46]将花生壳生物炭施用在菜园土壤中,在多次种植蔬菜且监测相关数据后发现,土壤pH值提高16.9%,土壤有机碳提升8.5%,蔬菜产量增加18.7%。生物炭可以控制水土流失。吴昱等^[47]研究发现,适当添加生物炭可以提高土壤孔隙度,从而提高土壤储水能力。生物炭还可以改善土壤微生物生存环境。田小平等^[48]研究田间施用生物炭对土壤微生物的影响,发现施用生物炭明显增加了土壤微生物的群落多样性。杨冬艳等^[49]

也有类似的研究发现,施用生物炭提高了西芹根部的微生物含量。

3.3 新型肥料

在农业生产中,直接施用生物炭无法为农作物提供足够的氮、磷、钾等营养元素,而炭基肥则合理解决了当前生物炭直接施用面临的问题。炭基肥是将生物炭和化肥按照一定的配比混合而成的新型化肥。有研究表明,我国农业生产中全年总施肥量高达1.23亿t^[50],而传统肥料的氮、磷、钾利用率仅10%~50%。施用化肥不仅提高了农业生产的经济成本,同时可能导致土壤环境遭受破坏,而生物炭基肥为农业废弃物资源化利用提供方向,同时控制化肥施用量,提高化肥利用率,减少肥料对土壤环境的破坏^[51]。近年来关于炭基肥对农作物和土壤环境的调控效应研究较多,研究表明,炭基肥农业化应用的成效显著(表1)。在适当施用炭基肥后,农作物的产量提高,同时土壤的养分能得到补充,达到改良土壤的效果。Lehmann等^[59]通过模拟试验计算出生物炭的平均存留时间在700~9000年间,生物炭应用在改良土壤方面的时效性长,但当前研究缺乏长时期的观测数据,无法确定生物炭在土壤中长时间的作用规律。

表1 施用炭基肥对作物及土壤环境的影响

Table 1 Effects of carbon-based fertilizers on crops and soil environment

农作物种类 Type of crops	炭基肥对农作物调控效应 Regulating effect of carbon-based fertilizers on crops	炭基肥对土壤环境调控效应 Regulating effect of carbon-based fertilizers on soil environment	参考文献 Reference
玉米、小麦 Corn, wheat	石灰性潮土上作物有小幅增产	土壤水分含量和田间持水量显著增加	[47]
马铃薯 Potato	试验马铃薯单株茎叶和块茎干物质积累量、公顷干物质积累量增加		[48]
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	增加黄连木地径、树高、冠幅、比叶面积等指标		[49]
玉米 Corn	对干物质积累有促进作用	对土壤呼吸有一定促进作用	[50]
油菜菜 Lettuces	显著减少油菜菜各部位对Cd、Cu、Pb和Zn的富集、增加生物量	改变土壤pH值、有机质、有效磷及速效钾水平增加	[51]
烟草 Tobacco		增加了微生物功能多样性指数和碳源利用能力、提高土壤肥力	[52]
花生 Peanut	提高产量	提高土壤氮磷钾养分含量	[53]

4 展望与建议

废弃物作为原材料制备生物炭的技术日渐成熟,将废弃物制备成吸附材料、土壤改良剂和新型肥料等资源化研究已经取得了一定进展。对今后利用废弃物制备生物炭的资源化发展方向提出以下建议:

我国的废弃物产生量巨大,将秸秆、粪便和

污泥等废弃物进行炭化利用是可行的,植物秸秆废弃物制备生物炭的产率较高,该类生物炭的碳含量高,最适合作为生物炭制备原材料,并且适用于吸附污染物、改良土壤等;而动物粪便和污泥类材料由于其自身带有较高含量的重金属,炭化过程可以达到减量化的目的,但其在作为吸附剂和改良剂方面的资源化应用仍不合适。生物炭的稳定性高,应用时效性长,在改良土壤和污染

修复等方面并没有长时期的观测数据,应进一步长期定位观测,完善生物炭在土壤中存留变化的机制,合理解决当前应用的限制性。

生物炭应用在土壤环境中,可以使土壤微生物群落发生改变,这种改变是不定向性,炭基肥施用在农作物土壤仍需要考虑某些微生物对农作物的危害风险。此外,针对不同的废弃物原材料的资源化应用,应当采取适当的方法进行制备,同时要综合考虑耗时和成本问题。

参考文献 (References) :

- [1] SEIFRITZ W. Should we store carbon in charcoal [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1993, 18(5):405-407.
- [2] Marris E. Black is the new green [J]. *Nature*, 2006, 442(7103):624-626.
- [3] 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. doi:10.13671/j.hjkxxb.2015.0657.
JIAN M F, GAO K F, YU H P. Effects of different cracking temperatures on the preparation of biochar and its characteristics of rice stalks [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(5): 1757-1765. doi:10.13671/j.hjkxxb.2015.0657.
- [4] 陆海楠,胡学玉,刘红伟.不同裂解条件对生物炭稳定性的影响[J].*环境科学与技术*, 2013, 36(8):11-14. doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2013.08.003.
LU H N, HU X Y, LIU H W. Effects of different cracking conditions on the stability of biochar [J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 36(8): 11-14. doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2013.08.003.
- [5] 赖长鸿,颜增光,廖博文,李松蔚,贺鸿志,黎华寿,陈桂葵.皇竹草生物炭的结构特征及其对Cr(VI)的吸附性能[J].*农业环境科学学报*, 2016, 35(6):1188-1193. doi:10.11654/jaes.2016.06.023.
LAI C H, YAN Z G, LIAO B W, LI S W, HE H Z, LI H S, Chen G K. The structural characteristics of Huang Zhucuo biochar and its adsorption performance on Cr(VI) [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1188-1193. doi:10.11654/jaes.2016.06.023.
- [6] 朱银涛,李业东,王明玉,马秀兰,张秋萍,王玉军.玉米秸秆碱化处理制备的生物炭吸附锌的特性研究[J].*农业环境科学学报*, 2018, 37(1):179-185. doi:10.11654/jaes.2017-0917.
ZHU Y T, Li YE D, WANG MG, MA X L, ZHANG Q P, WANG YJ. Adsorption characteristics of biochar prepared by corn stalk alkalization on zinc [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1): 179-185. doi:10.11654/jaes.2017-0917.
- [7] 宋婷婷,赖欣,王知文,方明,杨殿林,居学海,李洁,张贵龙.不同原料生物炭对铵态氮的吸附性能研究[J].*农业环境科学学报*, 2018, 37(3):576-584. doi:10.11654/jaes.2017-1122.
SONG TT, LAI X, WANG ZW, FANG M, YANG DL, JU XH, LL J, ZHANG G L. Study on adsorption properties of ammonium nitrogen with different raw materials [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(3): 576-584. doi:10.11654/jaes.2017-1122.
- [8] 张子豪,袁巧霞,代佩.畜禽粪便与秸秆混合热解制备生物炭研究[J].*华中农业大学学报*, 2019, 38(1):133-138.
ZHANG Z H, YUAN Q X, DAI P. Preparation of biochar by mixed pyrolysis of livestock and poultry excrement and straw [J]. *Journal of huazhong agricultural university*, 2019, 38(1): 133-138.
- [9] 吴诗雪,王欣,陈灿,彭渤,谭长银,张凤,徐雨晴,庄榆佳.凤眼莲、稻草和污泥制备生物炭的特性表征与环境影响解析[J].*环境科学学报*, 2015, 35(12):4021-4032. doi:10.13671/j.hjkxxb.2015.0119.
WU S X, WANG X, CHEN C, PENG B, TANG C Y, ZHANG F, XU Y Q, ZHAUNG Y J. Characterization of biochar derived from water hyacinth, rice straw and sewage sludge and their environmental implications [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(12): 4021-4032. doi:10.13671/j.hjkxxb.2015.0119.
- [10] 朱继荣,孙崇玉,于红梅,束良佐,刘瑞,章丽萍.生物炭对土壤肥力与环境的影响[J].*广东农业科学*, 2014, 41(3):65-69,73.
ZHU J R, SHUN X Y, YU H M, SHU L Z, LIU R, ZHANG L P. Effects of biochar on soil fertility and environment [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(3): 65-69, 73.
- [11] 康日峰,张乃明,史静,包立,张传光.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. doi:10.11838/sfsc.20140606.
KANG R F, ZHANG N M, SHI J, BAO L, ZHANG C G. Effects of biological charcoal fertilizer on wheat growth, nutrient absorption and soil fertility [J]. *Chinese Soil and Fertilizer*, 2014(6): 33-38. doi:10.11838/sfsc.20140606.
- [12] 葛磊.农业废弃物资源化利用现状及前景展望[J].*农村经济与科技*, 2018, 29(21):18-19.
GE L. Present Situation and Prospect of Agricultural Waste Resource Utilization [J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2018, 29(21): 18-19.
- [13] GASKIN J W, STEINER C, HARRIS K, DAS K C, BIBENS B. Effects of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use [J]. *Transactions of the ASABE*, 2008, 51(6): 2061-2069.
- [14] 谭洪,王树荣,骆仲泱,岑可法.生物质三组分热裂解行为的对比研究[J].*燃料化学学报*, 2006(1):61-65.
TAN H, WANG S R, LUO Z Y. Pyrolysis behavior of cellulose, xylan and lignin [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2006(1): 61-65.
- [15] 吕当振,姚洪,王泉斌,李志远,彭钦春,刘小伟,徐明厚.纤维素、木质素含量对生物质热解气特性影响的实验研究[J].*工程热物理学报*, 2008(10):1771-1774.
LV D Z, YAO H, WANG Q B, LI Z Y, PENG Q C, LIU X W, XU M H. Experimental study on the influence of cellulose and lignin content on the pyrolytic gasification characteristics of biomass [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008(10): 1771-1774.
- [16] 陈贵,赵国华,汤银根,张红梅,沈亚强,程旺大,费洪标.不同动物粪便炭化特性比较[J].*江苏农业科学*, 2016, 44(11):485-487. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.11.139.
CHEN G, ZHAO G H, TANG Y G, ZHANG H M, SHEN Y Q, CHEN W D, FEI H B. Comparison of charring characteristics of different animal

- faeces [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(11): 485–487. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.11.139.
- [17] 王焯平, 张青, 栗方亮, 李昱, 罗涛, 翁伯琦, 张潘丹. 热解温度对畜禽粪便生物炭重金属特征变化的影响 [J]. *环境科学学报*, 2018, 38(4): 1598–1605. doi:10.13671/j.hjkxxb.2017.0426.
- WANG H P, ZHANG Q, LI F L, LI Y, LUO T, WENG B Q, ZHANG P D. Effect of pyrolysis temperature on the characteristics change of heavy metals in biochar derived from animal manure [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(4): 1598–1605. doi:10.13671/j.hjkxxb.2017.0426.
- [18] 辛广智. 剩余污泥减量化与资源化研究进展 [J]. *四川化工*, 2019, 22(1): 17–19.
- XIN G Z. The Research Progress on Reduction and Recycling of Excess Activated Sludge [J]. *Sichuan Chemical Industry*, 2019, 22(1): 17–19.
- [19] 李娜, 张惠民, 孟记朋, 陆江银, 王忠科. 污泥与不同生物质共热解制备生物炭及生物炭的土地应用 [J]. *可再生能源*, 2018, 36(10): 1423–1430.
- LI N, ZHANG H M, MENG J P, LU J Y, WANG Z K. Preparation of biochar from sewage sludge with different biomass by co-pyrolysis and its land application [J]. *Renewable Energy Resources*, 2018, 36(10): 1423–1430.
- [20] 吴姮, 张鹏, 杨晨, 王志琛, 胡琬钰. 剩余污泥制备生物炭实验研究 [J]. *山东工业技术*, 2018(3): 225. doi:10.16640/j.cnki.37-1222/t.2018.03.199.
- WU Y, ZHANG P, YANG C, WANG Z C, HU Y Y. Experimental study on Preparation of biochar from excess sludge [J]. *Shandong Industrial Technology*, 2018(3): 225. doi:10.16640/j.cnki.37-1222/t.2018.03.199.
- [21] 丁文川, 杜勇, 曾晓岚, 刘任露. 富磷污泥生物炭去除水中 Pb(II) 的特性研究 [J]. *环境化学*, 2012, 31(9): 1375–1380.
- DING W C, DU Y, ZENG X L, LIU R L. Aqueous solution Pb(II) removal by biochar derived from phosphorus-rich excess sludge [J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(9): 1375–1380.
- [22] 黄燕王, 王晓, 张宏杰, 刘音, 冯雷雨, 严媛媛. 污泥生物炭的研究进展 [J]. *功能材料*, 2017, 48(9): 9024–9029. doi:10.3969/j.issn.1001-9731.2017.09.005.
- HUANG Y N, WANG X, ZHANG H J, LIU Y, FENG L Y, YAN Y Y. Research Progress of Sludge Biochar [J]. *Journal of Functional Materials*, 2017, 48(9): 9024–9029. doi:10.3969/j.issn.1001-9731.2017.09.005.
- [23] 任少云, 程红丹, 张伟平, 张成丽. 生物炭制备方法的研究进展 [J]. *高师理科学刊*, 2017, 37(8): 74–76.
- REN S Y, CHENG H D, ZHANG W P, ZHANG C L. Progress in preparation of biochar [J]. *Journal of Science of Teachers' College and University*, 2017, 37(8): 74–76. doi:10.3969/j.issn.1000-1700.2018.01.014.
- [24] 葛丽炜, 夏颖, 刘书悦, 程鑫, 翟英博, 丁凡. 热解温度和时间对马弗炉制备生物炭的影响 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2018, 49(1): 95–100. doi:10.3969/j.issn.1000-1700.2018.01.014.
- GE L W, XIA Y, LIU S Y, CHEN X, ZHAI Y B, DING F. Effect of Pyrolysis Temperature and Time on Biochar Production in a Muffle Furnace [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2018, 49(1): 95–100. doi:10.3969/j.issn.1000-1700.2018.01.014.
- [25] 张文, 吕欣田, 韩睿, 胡志新. 2 种改性生物炭对水体硝态氮的吸附特性 [J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(3): 253–259. doi:10.11934/j.issn.1673-4831.2018.03.009.
- ZHANG W, Lv X T, HAN R, HU Z X. Adsorption of two modified biochar to nitrate nitrogen in water bodies [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(3): 253–259. doi:10.11934/j.issn.1673-4831.2018.03.009.
- [26] 万霞, 梅昌良, 何俐臻, 贺玉龙, 袁基刚, 王成端. 磁性生物炭的制备、表征及对磷的吸附特性 [J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(3): 1069–1075. doi:10.13637/j.issn.1009-6094.2017.03.050.
- WAN X, MEI C G, HE L Z, HE Y L, YUAN J G, WANG C D. On the synthesis, characterization and phosphate removal of the biocharbased magnetic composites [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(3): 1069–1075. doi:10.13637/j.issn.1009-6094.2017.03.050.
- [27] Huff M D, LEE, J W. Biochar-surface oxygenation with hydrogen peroxide(Article) [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 165: 17–21.
- [28] 郭若男, 李亮霞, 徐一楚, 李晓丽. 生物炭的制备及其对水相中阿司匹林的吸附性能研究 [J]. *水处理技术*, 2017, 43(12): 34–37. doi:10.16796/j.cnki.1000-3770.2017.12.007.
- GUO R N, LI L X, XU Y C, LI X L. Study on preparation of biochar and its adsorption properties for aspirin in aqueous solutions [J]. *Technology of Water Treatment*, 2017, 43(12): 34–37. doi:10.16796/j.cnki.1000-3770.2017.12.007.
- [29] 李力, 刘娅, 陆宇超, 梁中耀, 张鹏, 孙红文. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展 [J]. *环境化学*, 2011, 30(8): 1411–1421.
- LI L, LIU Y, LIU Y C, LIANG Z Y, ZHANG P, SUN H W. Review on Environmental Effects and Applications of Biochar [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(8): 1411–1421.
- [30] 李明, 李忠佩, 刘明, 江春玉, 吴萌. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响 [J]. *中国农业科学*, 2015, 48(7): 1361–1369. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2015.07.11.
- LI M, LI Z P, LIU M, JIANG C Y, WU M. Effects of Different Straw Biochar on Nutrient and Microbial Community Structure of a Red Paddy Soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(7): 1361–1369. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2015.07.11.
- [31] 黄庆, 刘忠珍, 黄玉芬, 黄连喜, 魏岚, 李衍亮, 杨少海, 许桂芝. 生物炭+石灰混合改良剂对稻田土壤 pH、有效镉和糙米镉的影响 [J]. *广东农业科学*, 2017, 44(9): 63–68. doi:10.16768/j.issn.1004-874X.2017.09.010.
- HUANG Q, LIU Z Z, HUANG Y F, HUANG L X, W L, LI Y L, YANG S H, XU G Z. Effects of blended amendment (biochar + lime) on pH, available Cd in paddy soil and Cd content in brown rice [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2017, 44(9): 63–68. doi:10.16768/j.issn.1004-874X.2017.09.010.
- [32] 唐行灿, 陈金林, 张民. 生物炭对铜、铅、镉复合污染土壤的修复效果 [J]. *广东农业科学*, 2014, 41(12): 67–71.

- TANG X C, CHEN J L, ZHANG M. Remediation effects of biochar on soil co-contaminated by copper, lead and cadmium [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(12): 67-71.
- [33] 罗玉虎, 孙婴婴, 王楠. 生物炭修复土壤重金属污染的研究进展[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2019, 4(1): 28-35.
- LUO Y H, SUN Y Y, WANG N. Research progress of biochars in remedying heavy metal-contaminated soils [J]. *Land Development Engineering Research*, 2019, 4(1): 28-35.
- [34] 刘项, 南红岩, 安强. 刺桐生物炭对水中氨氮和磷的吸附[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(1): 66-73. doi:10.13254/j.jare.2017.0111.
- LIU X, NAN H Y, AN Q. The Erythrina Variegata Biochar's Adsorption to NH_4^+ -N and P from Aqueous Solution [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(1): 66-73. doi:10.13254/j.jare.2017.0111.
- [35] 王彤彤, 崔庆亮, 王丽丽, 谭连师, 孙层层, 郑纪勇. Al 改性柠条生物炭对 P 的吸附特性及其机制[J]. 中国环境科学, 2018, 38(6): 2210-2222.
- WANG T T, CUI Q L, WANG L L, TAN L S, SUN C C, ZHEN J W. Adsorption characteristics and mechanism of phosphate from aqueous solutions on Al modification biochar produced from Caragana Korshinskii [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(6): 2210-2222.
- [36] 李金阳, 郭海燕, 沈飞, 邓仕槐. 水稻秸秆及其厌氧消化残渣生物炭对 Cd(II) 吸附性能研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(3): 585-591. doi:10.11654/jaes.2017-1232.
- LI J Y, GUO H Y, SHEN F, DENG S H. Removal of aqueous Cd(II) by biochar derived from rice straw and its anaerobically digested residue [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(3): 585-591. doi:10.11654/jaes.2017-1232.
- [37] 计海洋, 汪玉瑛, 吕豪豪, 刘玉学, 杨瑞芹, 杨生茂. 不同炭化温度制备的蚕丝被废弃物生物炭对重金属 Cd^{2+} 的吸附性能[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1328-1338. doi:10.13287/j.1001-9332.201804.034.
- JI H Y, WANG Y Y, LV H H, LIU Y X, YANG R Q, YANG S M. Cadmium adsorption by biochar prepared from pyrolysis of silk waste at different temperatures [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(4): 1328-1338. doi:10.13287/j.1001-9332.201804.034.
- [38] 孟雅静, 王晓雨, 温海莲, 买兆丰, 吴启康, 肖朝虎. 玉米秸秆与甘蔗渣生物炭的制备及其对 Cr^{6+} 离子的吸附性能研究[J]. 农产品加工, 2018(5): 1-3, 6. doi:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2018.03.001.
- MENG Y J, WANG X Y, WEN H L, MAI Z F, WU Q K, XIAO C H. Preparation of Biochar from Corn Stalk and Bagasse and its Adsorption of Cr^{6+} [J]. *Farm Products Processing*, 2018(5): 1-3, 6. doi:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2018.03.001.
- [39] 郑灵芝, 吾蕴华. 生物炭吸附废水中重金属铅的应用研究[J]. 云南化工, 2018, 45(8): 181-182. doi:10.3969/j.issn.1004-275X.2018.08.077.
- ZHEN L Y, WU Y H. Application of heavy metal lead in biochar adsorption wastewater [J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2018, 45(8): 181-182. doi:10.3969/j.issn.1004-275X.2018.08.077.
- [40] 朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷. 针铁矿改性生物炭对砷吸附性能[J]. 环境科学, 2019(6): 1-14.
- ZHU S H, ZHAO J J, YI Y J, SHANG J Y, CHEN C, QU T. Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution [J]. *Environmental Science*, 2019(6): 1-14.
- [41] 张连科, 刘心宇, 王维大, 李玉梅, 孙鹏, 尚少鹏, 姜庆宏. 油料作物秸秆生物炭对水体中铅离子的吸附特性与机制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 218-226. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2018.07.028.
- ZHANG L K, LIU X Y, WANG W D, LI Y M, SHUN P, SHANG S P, JIANG Q H. Characteristics and mechanism of lead adsorption from aqueous solutions by oil crops straw-derived biochar [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(7): 218-226. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2018.07.028.
- [42] 赵涛. 不同生物炭对水中磺胺类抗生素的吸附及机理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- ZHAO T. Adsorption and Mechanism of Sulfa Antibiotics in Water by Different Biochar [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [43] 方慕楠, 宋驰, 罗琦予, 俞佳祺, 王艺轩, 杨圩. 纤维素制备生物炭及其对亚甲基蓝吸附性能的评价[J]. 山东化工, 2017, 46(22): 163-165.
- FANG M N, SONG C, LUO Q Y, YU J Q, WANG YI X, YANG W. Preparation of cellulose-based biochar by hydrothermal carbonization and its application for methylene blue adsorption [J]. *Shandong Chemical Industry*, 2017, 46(22): 163-165.
- [44] 王开峰, 彭娜, 吴礼滨, 陈睿璇, 黄泽浩. 水稻秸秆生物炭对磺胺类抗生素的吸附研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(9): 61-67. doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2017.09.011.
- WANG K F, PENG N, WU L B, CHEN R X, HUANG Z H. Sorption characteristics of sulfonamide antibiotics by rice straw biochar [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(9): 61-67. doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2017.09.011.
- [45] 孔露露, 周启星. 新制备生物炭的特性表征及其对石油烃污染土壤的吸附效果[J]. 环境工程学报, 2015, 9(5): 2462-2468.
- KONG L L, ZHOU Q X. Characterization of new-prepared biochars and their adsorption effectiveness on petroleum hydrocarbon contaminated soil [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(5): 2462-2468.
- [46] 黄连喜, 魏岚, 李衍亮, 黄玉芬, Nyo Nyo Mar, 许桂芝, 黄庆, 刘忠珍. 花生壳生物炭对土壤改良、蔬菜增产及其持续效应研究[J]. 中国土壤与肥料, 2018(1): 101-107. doi:10.11838/sfsc.20180117.
- HUANG L X, WU L X L, HUANG Y F, NYO N M, XU G Z, HAUNG Q, LIU Z Z. Study on soil quality improvement, vegetable yield increasing of peanut shell biochar and its residual effect [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(1): 101-107. doi:10.11838/sfsc.20180117.
- [47] 吴昱, 刘慧, 杨爱峥, 赵雨森. 黑土区坡耕地施加生物炭对水土流失的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 287-294. doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.034.
- WU Y, LIU H, YANG A Z, ZHAO Y S. Influences of Biochar Supply on Water and Soil Erosion in Slopping Farm-land of Black Soil Region [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 287-294. doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.034.

- [48] 田小平, 王磊, 王蕊, 侯亚红, 乐毅全, 付小花. 秸秆与秸秆生物炭还田对土壤微生物群落结构的影响[J]. 工业微生物, 2017, 47(6): 1-6. doi:10.3969/j.issn.1001-6678.2017.06.001.
TIAN X P, WANG L, WANG H, HOU Y H, LE Y Q, FU X H. Effects of straw and its derived biochar on soil microbial community structure in soil [J]. *Industrial Microbiology*, 2017, 47(6): 1-6. doi:10.3969/j.issn.1001-6678.2017.06.001.
- [49] 杨冬艳, 王学梅, 冯海萍, 谢华. 生物质碳对设施西芹根际微生物及土壤酶活性的影响[J]. 广东农业科学, 2017, 44(1): 82-88. doi:10.16768/j.issn.1004-874X.2017.01.012
YANG D Y, WANG X M, FENG H P, XUE H. Effect of biochar on rhizosphere microorganisms and soil enzyme activity of western celery in greenhouse [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2017, 44(1): 82-88. doi:10.16768/j.issn.1004-874X.2017.01.012.
- [50] 麻坤, 刁钢. 化肥对中国粮食产量变化贡献率的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 1113-1120.
MA K, DIAO G. Study on the contribution rate of chemical fertilizer to the change of grain yield in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 1113-1120.
- [51] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣凤. 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(5): 915-924.
ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, CUI Z L, MA W Q, CHEN X P, JIANG R F. Fertilizer utilization rate of major grain crops in china and ways to improve it [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008(5): 915-924.
- [52] 卢广远, 张艳, 王祥福, 孟彦. 炭基肥料种类对土壤物理性质及玉米产量的影响[J]. 河北农业科学, 2011, 15(5): 50-53.
LU G Y, ZHANG Y, WANG X F, MENG L. Effects of carbon base fertilizers on soil physical properties and maize yield [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2011, 15(5): 50-53.
- [53] 任少勇, 王姣, 黄美华, 肖强, 魏翠果, 宋树慧, 蒙美莲, 陈有君. 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, 27(4): 215-221.
REN S Y, WANG J, HAUNG M H, XIAO Q, WEI C G, SONG S H, MENG M L, CHEN Y J. Effects of carbon based fertilizer on dry matter accumulation and distribution, and potato yield [J]. *Chinese Potato Journal*, 2013, 27(4): 215-221.
- [54] 志庄, 王道金, 厉月桥, 杜旭华, 邵琼, 刘胜辉. 施用生物炭肥对黄连木生长及光合特性的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 992-997. doi:10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.06.013.
ZHI Z, WANG D J, LI Y Q, DU X H, SHAO Q, LIU S H. Effects of biochar fertilizer application on growth properties and photosynthetic and physiological [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(6): 992-997. doi:10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.06.013.
- [55] 王智慧, 唐春双, 范博文, 赵长江, 杨克军, 李佐同. 不同配比炭基肥对玉米生长、土壤养分及呼吸的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2017, 29(3): 1-4, 28. doi:10.3969/j.issn.1002-2090.2017.03.001.
WANG Z H, TANG C S, FAN B W, ZHAO C J, YANG K J, LI Z T. Effects of different ratio of carbon basal fertilizer on maize growth, soil nutrient and respiration [J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2017, 29(3): 1-4, 28. doi:10.3969/j.issn.1002-2090.2017.03.001.
- [56] 刘冲, 刘晓文, 吴文成, 蔡信德, 梁啸, 李云标, 南忠仁. 生物炭及炭基肥对油麦菜生长及吸收重金属的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(10): 3064-3070.
LIU C, LIU X W, WU W C, CAI X D, LIANG X, LI Y B, NAN Z R. Effect of biochar and biochar based fertilizer on growth of *Lactuca sativa* L. and absorption of heavy metals [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(10): 3064-3070.
- [57] 常栋, 马文辉, 张凯, 王晓强, 何晓冰, 许跃奇, 徐放达. 生物炭基肥对植烟土壤微生物功能多样性的影响[J]. 中国烟草学报, 2018(6): 58-66. doi:10.16472/j.chinatobacco.2018.068.
CAHNG D, MA W H, ZHANG K, WANG X Q, HE X B, XU Y Q, XU F D. Effect of biochar fertilizer on microbial functional diversity in tobacco growing soil [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2018(6): 58-66. doi:10.16472/j.chinatobacco.2018.068.
- [58] 杨劲峰, 江彤, 韩晓日, 李丹, 张春芳, 王月, 黄玉茜. 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. doi:10.11838/sfsc.20150312.
YANG J F, JIANG T, HAN X R, LI D, ZHANG C F, WANG Y, HUANG Y Q. Effects of continuous application of biochar-based fertilizer on soil characters and yield under peanuts continuous cropping [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015(3): 68-73. doi:10.11838/sfsc.20150312.
- [59] LEHMANN J, SKJEMSTAD J, SOHI S, CARTER J, BARSON M, FALLOON P, COLEMAN K, WOODBURY P, KRULL E. Australian climate-carbon cycle feedback reduced by soil black carbon [J]. *Nature Geoscience*, 2008(1): 832-835.

(责任编辑 崔建勋)