



张薇,陈雪丽,万书明,等.原料和制备条件对农用生物炭特性影响的研究进展[J].黑龙江农业科学,2021(12):107-113.

原料和制备条件对农用生物炭特性影响的研究进展

张薇^{1,2},陈雪丽²,万书明²,张磊²,常本超²,肖洋¹

(1.黑龙江大学 现代农业与生态环境学院,黑龙江 哈尔滨 150080;2.黑龙江省农业科学院 土壤肥料与环境资源研究所,黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:为促进农业废弃物资源化利用和生物炭在农业中的应用推广,本文通过对目前用于生物炭制备的原料种类及特性、制备工艺对生物炭特性的影响进行综述,分析目前生物炭的生产制备、应用以及风险评估等情况,并提出今后还需加强农用生物炭工艺的标准化,土壤特性与生物炭的关系,以及生物炭作用机理等方面的研究。

关键词:生物炭;理化性质;裂解温度

在我国农业模式由传统模式转变为现代农业的进程中,诸如秸秆、粪便等的农业废弃物的年产量也有所增加^[1]。秸秆中蕴含着丰富的氮素,按照其最低热值($1\text{万 kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)计算,我国每年的秸秆废弃物热值约为同年煤矿产量的 $1/4$ ^[2];因其富含氮素,所以也是潜力巨大的生物肥料资源。由于国民经济水平提升,我国生活废弃物的总量也逐年增长,2020 年我国市政垃圾(生活垃圾、市政污泥等)年产出已达 3.6 亿 t。大量的农业、市政等垃圾的随意排放易造成土壤板结、酸化等环境问题,引发严重的农业面源污染^[3]。因此如何合理利用资源进行资源的转化成为当今热议的话题,在此背景下生物炭应运而生。

生物炭是指生物质(如秸秆、树木枝干、藻类、市政垃圾等)在限氧或无氧状态下经低温或高温($150\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$)条件发生热解作用,生成的一类富含碳素、芳香类化合物的特性稳定的固态黑色粉末状物质^[4]。近年来,生物炭在农业领域多应用于土壤肥力、耕层结构和作物养分吸收等。李传哲等^[5]通过两年大田试验发现,生物炭配施氮肥能够显著降低潮土三相比、土壤紧实度以及土壤容重;因其具有较大的比表面积,较好的亲水性所以显著提高了耕层的孔隙度、最大持水能力、团聚体粒径等,改善土壤物理性质。林少颖等^[6]以树木枝叶、秸秆生物炭配施探究其对土壤养分的

影响,结果表明土壤养分含量均得到显著提高,其中土壤碳(46.5%)、氮(20.2%)、磷(10.2%)提高量均超过 10%。王典^[7]通过生物炭配施钾肥检测其对作物的影响,结果表明可显著提高作物对养分的吸收利用率,生物炭配施肥较常规施肥使作物增产 50.5%。由此可知将制备的生物炭还田,不仅可以保护环境还能保育土壤、改良作物品质及产量,在农业生产活动中具有广阔的应用前景^[8-9]。

由于生物炭的制备材料以及制备条件等因素直接影响生物炭特性,尤其是对生物炭的理化结构以及养分含量等^[10]。但国内外关于生物炭特性的研究报道较少,多集中在农业上的应用,对土壤以及作物产生的影响,忽略了生物炭特性的影响机制,致使其在农业应用中常伴随环境风险。因此,本文通过梳理国内外农用生物炭的相关报道,综述了目前用于生物炭制备的原料种类,生物炭制备裂解温度以及生物炭用于农业生产的关键指标和潜在风险分析等,以期为废弃物资源化利用和生物炭在农业中的应用和推广提供依据。

1 生物炭制备的原料种类及特性

1.1 生物炭制备的生物质原料种类

目前用于生产生物炭的主要原材料包括草本植物、木本植物、水生植物、畜禽粪便以及市政垃圾^[11]。草本植物生物质主要包括作物残留以及产品加工后的副产品^[12]。目前草本生物质来源中用于生物炭生产的农用秸秆主要类型有玉米秸秆、稻麦秸秆等^[13];木本植物生物质用于裂解生产生物炭的主要有可再生树木、林业废弃物如松木^[14]和棕榈废弃物等^[15];水生植物制备生物炭,

收稿日期:2021-08-31

基金项目:中挪国际合作项目:中国可持续粮食生产和土壤健康的养分管理(CHN-17/0019 SINOGRAIN II)。

第一作者:张薇(1997—),女,硕士研究生,从事农业资源利用研究。E-mail:zhangvivi809@163.com。

通信作者:肖洋(1978—),男,博士,副教授,从事水土保持研究。E-mail:xiaoyang@hlju.edu.cn。

通常选用海藻类,海藻炭不仅具备吸附水中重金属的作用,同时藻基生物炭的制备是碳的增汇减排途径之一^[16-17];目前用于生物炭生产的粪便类型主要为鸡粪、猪粪和牛粪等^[18-19];市政污泥作为制备生物炭的原料处于初步探索阶段,在国外污泥生物炭多用于对酸性大红 GR 的吸收,现今合理处理市政污泥对于减少环境污染和合理转换资源具有重要意义^[20-21]。

1.2 生物炭特性

1.2.1 元素含量及稳定性 生物炭主要由非金属元素 C、H、O、N 等,以及金属元素 K、Ca、Na、Mg 等组成,且其组成元素主要受原材料种类影响。由于生物炭的化学稳定性能有效地对碳进行固定,使生物炭具有稳定性高、抗降解能力强等特性。研究表明稳定的碳组分是生物炭能够长期保存的主要原因^[22]。潘根兴等^[23]研究结果表明,在土壤环境中生物炭还可以通过有机结构与矿物质结合形成土壤团聚体的方式降低微生物对其的分解作用从而提高稳定性。李力等^[24]以玉米秸秆为研究对象,将其加入预热的马弗炉中,分别以 350 和 700 °C 厌氧加热 2 h,得出高温裂解条件下生产的生物炭碳含量较高,H 和 O 含量较低,即高温能将生物炭脂肪烃类向芳香烃类转化,从而提高其稳定性。

生物炭中 N、P、K 等以离子形式存在,碱金属多以无机盐形式存在,可以作为土壤养分来源之一^[25]。不同原料的生物炭元素种类、养分供应能力存在差异,通常情况下生物炭养分含量与原材料养分含量呈正相关^[25]。非纤维素类生物炭中的 Ca、Mg、N、P 等元素高于纤维素类生物炭^[26]。同时原料中纤维素含量较多的生物炭的 K 含量相对较高^[27]。研究认为,纤维素炭中的 C 含量高于非纤维素炭,如木材、竹类制备生物炭的 C 含量较高^[28],不同来源生物炭的碳含量表现为木质>草本>污泥^[29-30]。

1.2.2 酸碱性 生物炭的酸碱性是决定其效能的主要因素。由于制备生物炭原料的种类繁多,生物炭 pH 差异较大(pH5~12),与制备温度呈正相关^[31]。吴诗雪等^[32]以水生植物(凤眼莲)、草本植物(稻草秸秆)和市政污泥为原料,以慢速热解法制备生物炭,研究结果表明,温度从 250 °C 逐渐升至 550 °C 过程中,水生植物(凤眼莲)生物炭的 pH 在 7.2~10.5 之间,草本植物(稻草秸秆)生物炭的 pH 随温度变化区间为 6.6~9.8,

市政污泥生物炭的 pH 随温度变化区间为 8.4~12.9,即在此温度区间内不同来源生物炭的 pH 均与温度呈正相关。

生物炭的酸碱性主要受原料中灰分、纤维素量、官能团种类和碱金属含量等影响。通常情况下,生物炭 pH 与原料中灰分、碱性官能团、碱金属含量三者呈正相关,与纤维素含量呈负相关^[31,33]。生物炭呈碱性主要受 3 个因素影响,即无机矿物含量、碱性组分含量和含氧官能团占比。Wang 等^[34]的研究中,在设定温度为 300,450 和 600 °C 制备木本生物炭的过程中发现,随着温度的升高生物炭 pH 变化区间为 7.0~10.4。该研究结果与张明伟等^[31]得出的生物炭 pH 与试验温度呈正相关的观点一致。张明伟等^[31]试验表明当温度从 400 °C 升至 800 °C 时,以猪粪为原料的生物炭 pH 变化区间为 7.5~11.4;当温度从 400 °C 升至 600 °C 时,以 50 °C 的间隔进行热解的市政污泥 pH 从 8.46 升至 11.7。

综上所述,不同来源生物炭的碱性均随裂解温度升高而呈上升趋势,同种制备条件下、不同原料来源生物炭 pH 可表现为草本炭>污泥炭>粪便炭>木本炭^[32,35]。但也有研究结果表明,草本植物与动物粪便生物炭理化性质的不同,尤其是秸秆炭化呈中性,动物粪便呈碱性即使在相同的制备工艺条件下,也会导致生物炭 pH 表现为粪便炭>草本炭>木本炭^[36-37],因此粪便来源和生物质基础性质会导致炭化后的生物炭 pH 存在明显差异。

1.2.3 比表面积 生物质来源不同,导致其通过活性挥发物质、失水以及化学键断裂等裂解过程得到的生物炭结构不同^[38]。生物质在裂解过程中,有机物挥发使矿物和碳骨架形成非对称结构的同时质量下降,导致生物炭自身孔隙中微孔含量增多和低密度性结构的形成^[39]。生物炭表面孔隙大多数小于 2 nm 属于微孔结构,生物炭表面大量的微孔结构能够增加其比表面积^[40]。从而显著提高生物炭的吸附能力,增加土壤酶以及微生物的附着位点;同时能够增加耕层土壤气体含量,改善植被根系部分有氧呼吸^[41-42]。孙强^[43]通过 5 年大田试验,认为玉米秸秆生物炭对土壤结构影响显著,其主要通过降低土壤容重和比重,增加孔隙度,提高土团的稳定能力,以此修正耕层结构。生物炭比表面积主要由原料中灰分含量、纤维素含量和制备温度三因素共同决定;且通常

情况下,生物炭的比表面积与裂解后灰分呈负相关,与原料中纤维素含量呈正相关^[41-42,44]。

通过对比不同草本生物质来源制备的生物炭的物理结构发现,稻秆炭的比表面积最大,即草本炭比表面积可能与制备原料的孔隙结构、疏密程度等有关^[31,40]。颜钰等^[45]以畜禽粪便、秸秆(玉米)和木屑(松树)为原料,分别以低温(250℃)、中温(400℃)制备不同来源生物炭,结果表明不同来源生物炭其比表面积值均随制备温度升高而增大,且在低温、中温环境下均表现为植物炭比表面积高于粪便炭比表面积。计海洋等^[46]的研究结果与之相同。

综上所述,制备环境、材料来源二者均可影响生物炭比表面积大小。且不同生物质来源制备生物炭时其比表面积均与制备温度呈正相关,相同制备条件下其表现为草本>木本>污泥>粪污。

1.2.4 表面官能团 生物炭表面官能团的种类、数量直接影响其理化特征^[46]。在数量方面,裂解温度在100~800℃之间以水稻秸秆为原料的生物炭随着温度升高,其表面官能团种类减少,但含量增多。当裂解温度处于100~300℃时,碱性官能团数量与裂解温度呈正相关;生物炭环状官能团数量与裂解温度呈正相关,因此温度升高生物炭稳定性增强^[47]。当温度从300℃增温到700℃时,其表明碱性官能团含量升高(0.04~0.29 mmol·g⁻¹)的同时酸性官能团含量降低(2.83~0.30 mmol·g⁻¹)^[48]。在种类方面,低温(300℃)、中温(450℃)条件下木本、草本为原料制备的生物炭表面官能团种类均以芳香碳为主,但木本炭中木质素残留量显著高于草本炭;高温(600℃)下制备的生物炭表面官能团主要由芳香碳组成^[49]。

芳香结构是生物炭主要结构,但芳香化程度因官能团不同略有差异,这也是造成生物炭特性不同的主要原因之一。例如阳离子交换量(CEC)是影响生物炭化学特性的基础指标,也是衡量其离子交换能力、吸附性能的重要指标之一^[50],其阳离子交换量主要受制备原料中的蛋白质、脂肪、纤维素等影响,而且生物炭的阳离子交换量由其表面羧基、酮基等多种类型官能团种类、数量决定;其阳离子交换量(CEC)与制备原料中纤维素含量呈负相关,与制备原料中碱金属含量呈正相关^[51-52]。

1.2.5 生物炭的表面吸附特性 不同来源炭的吸附特性主要与其表面官能团、比表面积和表面

孔结构密切相关^[53]。生物炭主要通过静电、 π - π 、氢键孔隙填充等机理吸附有机污染物^[54]。通过Freundlich模型拟合认为木本、草本、粪便三种生物炭吸附能力均与温度(裂解温度为250和400℃)呈正相关,且由于孔填充效应、 π - π EDA(电子供体-受体)反应等致使粪便生物炭吸附能力高于植物来源生物炭^[45]。也有研究表明,裂解温度在300~700℃之间时,吸附性随温度增高而增强,且秸秆炭吸附性大于米糠炭、木本炭^[55]。

因此生物炭的吸附能力与制备原料、裂解温度等呈显著相关关系,该特性是生物炭用于土壤改良、吸附重金属、降低土壤化肥农药残留污染的重要指标。

2 不同制备温度及停留时间对生物炭特性的影响

生物质裂解是指其在高温缺氧或高温限氧情况下,吸收热量后发生一系列长链断裂、大分子物质裂解。其热解主要产物有3种:可燃气体、生物油和固体残渣。生物炭理化性质受温度的影响最大^[56,40],停留时间即物质在某一温度下的反应时间,当温度处于低温与中温的情况下,生物炭表面孔隙数与停留时间呈正相关。而对高温制备的生物炭而言,尤其是对于植物生物质,高温会破坏其纤维素与木质素结构,使其孔隙壁变薄、孔隙减少、灰分增加^[11,31]。

不同制备工艺下生物炭表征不同。目前生物炭的制备方式主要有四大类:慢速热解法、快速热解法、气化法和水热炭化法。

2.1 慢速热解法

慢速热解法即在低温条件下(300~700℃)缓慢升温(0.1~1.0℃·s⁻¹),通过延长滞留期使原料炭化。其制备设备主要有3类:窑式、移动床式、固定床式。Jamieson等^[57]研究表明木本生物质慢速热解法低温制备生物炭,较短时间高温生物炭相对较长时间低温生物炭,其炭产率降低、但灰分含量增加。Xiao等^[58]以稻秆为原料也得出了同样结果,控制升温速率为5℃·min⁻¹,考察生物炭表征与温度的关系,结果表明当温度小于150℃生物炭产率随温度升高产量增加,当温度为150℃时其炭产率达到最高(93.9%);当温度超过150℃后,其炭产率与温度呈负相关,但灰分、pH、芳香化程度三者始终与温度呈正相关。在不同温度下(300,400,500,600和700℃),分

别恒温停留 3 h 制备秸秆炭,结果表明:不同温度制备条件下秸秆炭 pH 均大于 7,当温度处于 300~500 ℃ 之间时 pH 发生显著变化(8.5~10.3),当温度处于 500~700 ℃ 时 pH 变化平缓^[36,59]。

综上所述,慢速热解法制备生物炭,其炭产率随温度升高有先升高再降低的趋势,炭产量、碱性则随温度升高而增高。

2.2 快速热解法

快速热解法即在缺氧环境中,快速升温($1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)至理想温度(常压 500 ℃ 左右),生物质在这一反应过程中其大分子将转化为挥发分(生物油)、气体小分子等物^[60]。由于快速热解升温时间短且反应温度较高,致使其生物炭产率低(12%)、生物油产率高(85%),因此采用此种方式制备生物炭时,通常采用猝灭的方式来提高生物炭产率^[61]。Azargohar 等^[62]以加拿大地区农业废物(小麦稻草和亚麻稻草)、林业废弃物(锯末)和动物粪便(家禽粪便)为原料。温度区间为 400~500 ℃ (反应温度梯度 50 ℃)、采用快速热解法制备生物炭,其结果表明生物炭的 pH、碳含量随温度的升高而增加,且含碳量(70%~80%)远高于原料含碳量。Kim 等^[63]以尖松为原料,设定低温(300 ℃)、中温(400 ℃)和高温(500 ℃)的流化床反应器制备生物炭,结果表明高温生物炭产量较低温生物炭下降 46.3%,且随着温度的升高其芳香结构增加。

因此,利用此种方法制备的生物炭 pH 偏低($\text{pH}2.8\sim3.8$)、水分含量较高(15%~30%)^[40],且快速热解法制备的生物炭随着反应温度和停留时间的增加,其气体和液体的产率升高、芳香结构增加稳定性升高,固体产率降低。

2.3 气化热解法

气化热解法是指在高于 600 ℃ 或气化室加压条件下,在惰性气体氛围中(蒸汽停留时间为 5~30 min),通过控制氧化剂(O_2 、水蒸汽或 CO_2)含量将生物质转化为气体,同时部分生物质被氧化为生物炭的裂解方法。以农林废弃物(松木)、污泥为原料,以低温(600 ℃)或高温(900 ℃)气化裂解技术制备生物炭其结果表明不同来源生物炭焦油转化率均达到 90%。同时生物炭含碳量(木本炭>污泥炭);灰分含量(污泥炭>木本炭);松木炭微孔居多、污泥炭以中、大孔为主,致使木本生物炭比表面积高于污泥炭。同时反应温度升

高,污泥炭活化能提高,松木炭活化能降低;表明在气化反应后期,灰分会抑制分子的扩散和转移^[64]。

现有研究表明通过此方法主要获得以 CO 、 CO_2 、 H_2 为主的气体,所制备的生物炭产率较低,高温气化热解制备炭产率通常是生物质原料的 5%~10%^[65]。气化热解法表现为,高温蒸汽停留时间长,生成物主要为气体能源。

2.4 水热裂解法

水热裂解法指生物质在一定温度(180~800 ℃)、压强(2~10 MPa)和反应时间(4~24 h)在饱和水中发生氨基分子脱水缩合等反应制备生物炭的工艺。Camilo 等^[66]通过纤维素水热炭化法得出:不同温度下制备生物炭过程不同,当裂解温度高于 180 ℃ 时少部分纤维素水解为葡萄糖进而形成芳香结构,当温度大于 200 ℃ 时,剩余纤维素通过分子内聚合等一系列变化从而形成芳香结构。Hoekman 等^[67]分别以松屑、木屑为原料,采用水热裂解法,温度变化区间(215~295 ℃)、温度梯度(20 ℃)的环境下制备生物炭。木材分解速率与温度呈正相关,温度为 255 ℃ 时达到转化率最高,295 ℃ 炭产率减少。因此适当提高反应温度对碳化是有利的。低温水热法用时长反应慢、炭产率高,高温水热法产物以气体为主炭产率低^[31,40];且与直接裂解法对比,其具有亲水性更强、灰分含量低等特性^[68]。

3 生物炭应用中的潜在风险

生物炭作为一种新型可再生能源,可以吸附重金属、增加肥料利用率、改变土壤 pH 和改良土壤理化性质,保育土壤^[42-43]。但已有研究表明生物炭具有内源污染物、土壤生态体系两种环境风险。肥沃土壤施入生物炭后其原有的良好理化环境会被破坏,不仅没有改良土壤,还对作物生长产生抑制作用^[69]。也有研究认为,限养工艺制备生物炭过程中随着反应时间的增加含碳物质经一系列化学反应生成结构稳定的环芳烃(PAHs)等有毒物质;高温致使生物质无机组分受热分解、增高生物炭中含有的重金属相对含量,致使生物炭施入农田系统后可能会导致植物细胞吸收重金属量增多^[69]、作物生长发育不良以及重金属富集等问题^[70]。高温环境下 PAHs 能够发生缩聚反应形成高毒、高环大分子,因此虽然生物炭中 PAHs 的含量与其裂解温度呈负相关^[56,71],但不能够说明高温裂解法会降低生物炭毒性。

4 展望

生物质炭与土壤特性之间的耦合关系试验已经进行了几十年的时间,拥有大量试验数据^[5-8]。但由于生物炭的生产制备、应用以及评估等尚缺少规范的指导性文件或系统研究结果,因此今后还需在以下 3 个方面进行完善。

4.1 生物质炭工艺的标准化

生物炭的特征主要受生产原料、炭化设备和炭化工艺的影响,目前其分类模式不健全,建立健全标准化的分类指标,应考虑生物炭来源、裂解方法、裂解使用温度、停留温度等。以及不同分类指标生物炭的物理结构特征、化学组成特性,在环境中的作用,尤其是对作物产量、养分以及土壤环境的影响机制研究。以期以统一的指标为依据选择系统的制备条件,从而得到特性相对一致的生物炭产品。

4.2 土壤特性与生物炭的关系

不同类型土壤的土壤环境和土壤质量不同,因此亟待出台区域内和跨区域的生物炭施用指南,根据不同土壤,土壤容重、含水量、微生物活性等作用,选择具有针对性的生物炭改善土壤环境。当然这需要在大量规范的试验数据基础上归纳总结形成,从而使农用生物炭更具有针对性和有效性。

4.3 生物炭的潜在风险

生物炭施入后与生态环境之间的耦合关系研究较少,由于其制备原料与制备技术不同其负面影响尚不明确。并且在制备过程中常产生毒性物质(苯环、PAHs、重金属),同时生物炭逐渐老化中特性改变,不同老化程度生物炭对环境影响效应暂不明确。因此在未来研究中应加大关注不同毒性物质、不同时期生物炭与土壤的耦合关系。

参考文献:

[1] 周治. 我国农业秸秆高值化利用现状与困境分析[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(2): 9-16.

[2] 潘根兴, 李恋卿, 刘晓雨, 等. 热裂解生物质炭产业化: 秸秆禁烧与绿色农业新途径[J]. 科技导报, 2015, 33(13): 92-101.

[3] 黎竹. 农业面源污染防治现状及对策建议[J]. 现代化农业, 2019(6): 48-49.

[4] LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for environmental management: Science, technology and implementation[J]. Science and Technology; Earthscan, 2015, 25(1): 15801-15811.

[5] 李传哲, 章欢, 姚文静, 等. 生物炭配施氮肥对典型黄河故道区土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(10): 3424-3432.

[6] 林少颖, 赖清志, 刘旭阳, 等. 秸秆及配施生物炭对福州茉莉园土壤碳、氮、磷、铁含量及其生态化学计量学特征影响[J]. 环境科学学报: 1-15[2021-07-01]. <https://doi.org/10.13671/j. hjkxxb. 2020. 0320>.

[7] 王典. 生物炭对不同土壤上油/棉作物生长及养分效率的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.

[8] 付梦雪, 吴名宇, 韩碧波, 等. 秸秆还田与生物炭配施对麦玉轮作体系产量和氮素利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(8): 89-96.

[9] ALEXANDRE T, FRANCESCO C. Potentials, limitations, co-benefits, and trade-offs of biochar applications to soils for climate change mitigation[J]. Land, 2019, 8(12): 179.

[10] 刘铭龙, 刘晓雨, 潘根兴. 生物质炭对植物表型及其相关基因表达影响的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 789-798.

[11] 李湘萍, 张建光. 生物质热解制备多孔炭材料的研究进展[J]. 石油学报(石油加工), 2020, 36(5): 1101-1110.

[12] 王勇, 孟晓林. 秸秆废弃物的生物学特性及其开发利用[J]. 山西农业科学, 2009, 37(12): 42-44.

[13] 董林林, 王海侯, 陆长婴, 等. 秸秆还田量和类型对土壤氮及氮组分构成的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1143-1150.

[14] MUKHERJEE A, ZIMMERMAN A R, HARRIS W. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars[J]. Geoderma, 2011, 163(3): 247-255.

[15] 王彦飞, 李海普, 杨兆光. 改性棕榈生物炭的制备及其对水体磷酸盐的吸附性能[J]. 科技风, 2020(10): 188-191.

[16] 傅宇, 张鹏, 任俊丽, 等. 热解温度对不同大型海藻基生物炭中重金属特征的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(6): 727-736.

[17] 张翠. 海藻及其生物基材料对典型环境内分泌干扰物的去除作用与影响机制研究[D]. 烟台: 中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所), 2019.

[18] 桂向阳, 刘晨, 许吉宏, 等. 畜禽粪便生物炭的二维红外光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(11): 3606-3612.

[19] 陈金敏, 胡正峰, 邓盾, 等. 粪便生物炭与土壤重金属污染修复的关系[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2019(1): 39-45.

[20] LUO C G, DENG Y W, INUBUSHI K, et al. Sludge biochar amendment and alfalfa revegetation improve soil physicochemical properties and increase diversity of soil microbes in soils from a rare earth element mining wasteland[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(5): 965-972.

[21] 王黛莹. 污泥生物炭的制备及对土壤性质和农作物生长的影响研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.

[22] ZIMMERMANN M, BIRD M I, WURSTER C, et al. Rapid degradation of pyrogenic carbon[J]. Global Change Biology, 2012, 18: 3306-3316.

[23] 潘根兴, 周萍, 李恋卿, 等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 327-337.

[24] 李力, 陆宇超, 刘娅, 等. 玉米秸秆生物炭对 Cd(II) 的吸附机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2277-2283.

- [25] GUL S, WHALEN J K. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2016, 103: 1-15.
- [26] ZHAO L, CAO X D, MASEK O, et al. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 256-257: 1-9.
- [27] CAO X D, HARRIS W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101: 5222-5228.
- [28] ZORNOZA R, MORENO B F, ACOSTA J A, et al. Stability, nutrient availability and hydrophobicity of biochars derived from manure, crop residues, and municipal solid waste for their use as soil amendments[J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 122-130.
- [29] 高海英, 陈心想, 张雯, 等. 生物炭和生物炭基氮肥的理化特征及其作物肥效评价[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(4): 69-78, 85.
- [30] 侯艳伟, 曾月芬, 安增莉. 生物炭施用对污染红壤中重金属化学形态的影响[J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(4): 460-466.
- [31] 张伟明, 修立群, 吴迪, 等. 生物炭的结构及其理化特性研究回顾与展望[J]. *作物学报*, 2021, 47(1): 1-18.
- [32] 吴诗雪, 王欣, 陈灿, 等. 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(12): 4021-4032.
- [33] 周媛. 秸秆生物炭改良土壤和修复重金属污染的效能与机制[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [34] WANG S, GAO B, ZIMMERMAN AR, et al. Physicochemical and sorptive properties of biochars derived from woody and herbaceous biomass[J]. *Chemosphere*, 2015, 134: 257-262.
- [35] 袁帅, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1402-1417.
- [36] YUAN J H, XU R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic ultisol[J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27: 110-115.
- [37] 李宏, 程平, 郑朝晖, 等. 克拉玛依地区主要树种干物质热值与碳含量特征分析[J]. *林业科学*, 2013, 49(9): 29-37.
- [38] LIU Y X, LONAPPAN L, BRAR S K, et al. Impact of biochar amendment in agricultural soils on the sorption, desorption, and degradation of pesticides: A review[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 645: 60-70.
- [39] LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for environmental management: Science and technology[M]. *Earthscan: London & Sterling*, 2009: 416.
- [40] 韦思业, 宋建中, 彭平安, 等. 不同温度制备生物炭的热解产物特征[J]. *地球化学*, 2019, 48(5): 511-520.
- [41] CHEN Y Q, ZHANG X, CHEN W, et al. The structure evolution of biochar from biomass pyrolysis and its correlation with gas pollutant adsorption performance[J]. *Biore-source Technology*, 2017, 246: 101-109.
- [42] 周劲松, 闫平, 张伟明, 等. 生物炭对东北冷凉区水稻秧苗根系形态建成与解剖结构的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(1): 72-81.
- [43] 孙强. 玉米秸秆及其生物炭还田与土壤团聚体关系的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [44] TAN Z X, LIN C S K, JI X Y, et al. Returning biochar to fields: A review[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 116: 1-11.
- [45] 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]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(9): 1810-1816.
- [46] 计海洋, 汪玉瑛, 刘玉学, 等. 生物炭及改性生物炭的制备与应用研究进展[J]. *核农学报*, 2018, 32(11): 2281-2287.
- [47] 徐亮, 王豹祥, 汪健, 等. 不同热解温度制备的水稻秸秆生物炭理化特性分析[J]. *土壤通报*, 2020, 51(1): 136-143.
- [48] CHUN Y, SHENG G Y, CHIOU C T, et al. Compositions and sorptive properties of crop residue-derived chars[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38: 4649-4655.
- [49] 徐东昱, 金洁, 颜钰, 等. X射线光电子能谱与¹³C核磁共振在生物质碳表征中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(12): 3415-3418.
- [50] WEBER K, QUICHER P. Properties of biochar[J]. *Fuel*, 2018, 217: 240-261.
- [51] QAMBRANI N A, RAHMAN M M, WONC S, et al. Biochar properties and eco-friendly applications for climate change mitigation, waste management, and wastewater treatment: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 79: 255-273.
- [52] ANTONONHERREO R, GARCIADDELGADO C, ALONSOIZQUIERDO M, et al. Comparative adsorption of tetracyclines on biochars and stevensite; looking for the most effective adsorbent[J]. *Applied Clay Science*, 2018, 160: 162-172.
- [53] LI L C, ZOU D S, XIAO Z H, et al. Biochar as a sorbent for emerging contaminants enables improvements in waste management and sustainable resource use[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 210: 1324-1342.
- [54] TAN X F, LIU Y G, ZENG G M, et al. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions[J]. *Chemosphere*, 2015, 125: 70-85.
- [55] 戴静, 刘阳生. 四种原料热解产生的生物炭对 Pb²⁺ 和 Cd²⁺ 的吸附特性研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(6): 1075-1082.
- [56] KEILUWEIT M, KLEBER M, SPARROW M A, et al. Solvent-extractable polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar: Influence of pyrolysis temperature and feedstock[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(17): 9333-9341.
- [57] JAMIESON T, SARGER E, GUEGUEN C. Characterization of biochar-derived dissolved organic matter using UV-visible absorption and excitation-emission fluorescence spectroscopies[J]. *Chemosphere*, 2014, 103: 197-204.
- [58] XIAO X, CHEN B L, ZHU L Z. Transformation, morphol-

ogy, and dissolution of silicon and carbon in rice straw-derived biochars under different pyrolytic temperatures[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48 (6): 3411-3419.

[59] 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.

[60] 高新源,徐庆,李占勇,等.生物质快速热解装置研究进展[J].化工进展,2016,35(10):3032-3041.

[61] 林帝出,郭献军,生物质裂解技术分析[J].再生资源与循环经济,2016(7):30-33.

[62] AZARGOHAR R, NANDA S, KOZINSKI J A, et al. Effects of temperature on the physicochemical characteristics of fast pyrolysis biochars derived from Canadian waste biomass[J]. Fuel, 2014, 125(11):90-100.

[63] KIM K H, KIM J Y, CHO T S, et al. Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*) [J]. Bioresource Technology, 2012, 118:158-162.

[64] 陆鹏.废弃物衍生炭基催化剂催化脱除气焦油的研究[D].浙江:浙江大学,2019.

[65] BREWER C E, SCHMIDT-ROHR K, SATROI J A, et al. Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2009, 28: 386-396.

[66] CAMILLO F, NIKI B, MARIA-MAGDLENA T. Morphological and structural differences between glucose, cellulose and lignocellulosic biomass derived hydrothermal carbons[J]. Green Chemistry, 2011, 13(11):3273-3281.

[67] HOEKMAN S K, BROCH A, ROBBINS C. Hydrothermal carbonization (HTC) of lignocellulosic biomass[J]. Energy & Fuels, 2011, 25(4):1802-1810.

[68] 曾淦宁,伍希,艾宁,等.铜藻基生物炭的水热制备及性能表征[J].环境科学学报,2014,34(2):392-397.

[69] 吴丹萍,李芳芳,赵婧,等.生物炭在制备及土壤应用中的潜在环境风险[J].昆明理工大学学报(自然科学版), 2019, 44(1):98-103.

[70] YNG D, ZENG D H, ZHANG J, et al. Chemical and microbial properties in contaminated soils around a magnesite mine in northeast China[J]. Land Degradation & Development, 2012, 23(3):256-262.

[71] HUSSAIN M, FAROOQ M, NAWAZ A, et al. Biochar for crop production: Potential benefits and risks[J]. Journal of Soils & Sediments, 2017, 17(3):685-716.

The Influence of Raw Materials and Preparation Conditions on Agricultural Biochar Characteristics

ZHANG Wei^{1,2}, CHEN Xue-li², WAN Shu-ming², ZHANG Lei², CHANG Ben-chao², XIAO Yang¹
(1. School of Modern Agriculture and Ecological Environment, Heilongjiang University, Harbin 150080, China;
2. Institute of Soil Fertilizer and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: In order to promote the utilization of agricultural waste resources and the application and promotion of biochar in agriculture, this article summarized the types and characteristics of raw materials used for biochar preparation and the influence of preparation processes on biochar characteristics, and analyzed the current production, preparation, application, and risk assessment of biochar. At last, we proposed that in the future, it is necessary to strengthen the standardization of agricultural biochar technology, the relationship between soil characteristics and biochar, and the mechanism of biochar action.

Keywords: biochar; physical and chemical properties; pyrolysis temperature

协办单位

黑龙江省农业科学院水稻研究所
黑龙江省农业科学院克山分院
黑龙江省农业科学院黑河分院
黑龙江省农业科学院绥化分院
黑龙江省农业科学院佳木斯分院
黑龙江省农业科学院牡丹江分院
内蒙古丰垦种业有限责任公司