



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

我国农作物秸秆分布特征与秸秆炭基肥制备应用研究进展

钟磊, 栗高源, 陈冠益, 王一喆, 陈红云, 武文竹, 李金磊, 宋英今, 颜蓓蓓

引用本文:

钟磊, 栗高源, 陈冠益, 王一喆, 陈红云, 武文竹, 李金磊, 宋英今, 颜蓓蓓. 我国农作物秸秆分布特征与秸秆炭基肥制备应用研究进展 [J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 575–585.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0070>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同原料生物炭理化性质的对比分析

孙涛, 朱新萍, 李典鹏, 顾祝禹, 张佳喜, 贾宏涛

农业资源与环境学报. 2017, 34(6): 543–549 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0158>

秸秆生物炭对水稻生长及滩涂土壤化学性质的影响

张继宁, 周胜, 李广南, 孙会峰

农业资源与环境学报. 2018, 35(6): 492–499 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0332>

生物炭不同施加方式对水稻生长及产量的影响

王悦满, 高倩, 薛利红, 杨林章, 李辉信, 冯彦房

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 58–65 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0162>

添加生物质炭改良剂对土壤-烟草中重金属含量的影响

赵建, 朱文彬, 汪玉, 祝乾湘, 彭玉龙, 刘京, 韩小斌, 夏志林, 王慎强

农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 664–672 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0129>

湖北省农田生态系统温室气体排放特征与源/汇分析

谢婷, 张慧, 苗洁, 宋明伟, 曾艳琴

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 839–848 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0494>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

钟磊, 栗高源, 陈冠益, 等. 我国农作物秸秆分布特征与秸秆炭基肥制备应用研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 575–585.

ZHONG L, LI G Y, CHEN G Y, et al. Research progress on the distribution characteristics of crop straws and the preparation and application of straw carbon-based fertilizers in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(3): 575–585.



开放科学 OSID

我国农作物秸秆分布特征与 秸秆炭基肥制备应用研究进展

钟磊¹, 栗高源¹, 陈冠益^{1,2,3*}, 王一喆⁴, 陈红云¹, 武文竹¹, 李金磊¹, 宋英今¹, 颜蓓蓓¹

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 天津商业大学机械工程学院, 天津 300134; 3. 西藏大学理学院, 拉萨 850012; 4. 新苑阳光农业有限公司, 河北 廊坊 065000)

摘要:我国农作物秸秆资源量大, 种类丰富, 分布范围广泛, 碳含量高, 具备良好的资源化潜力。利用秸秆制备的炭基肥是一种土壤肥力改良与修复材料, 具有发达的孔隙结构、较高的比表面积和阳离子交换量, 可有效提升土壤肥力和农作物产量, 成为当下的研究热点。本文综述了我国秸秆资源分布特征、秸秆炭基肥的主要制备技术及其在土壤质地改良方面的研究进展, 指出了炭基肥提升作物产量品质的效应, 旨在为秸秆炭基肥在我国农业生产中大规模推广应用提供参考。

关键词: 秸秆; 生物炭; 炭基肥; 土壤; 作物

中图分类号: S38

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2022)03-0575-11

doi: 10.13254/j.jare.2021.0070

Research progress on the distribution characteristics of crop straws and the preparation and application of straw carbon-based fertilizers in China

ZHONG Lei¹, LI Gaoyuan¹, CHEN Guanyi^{1,2,3*}, WANG Yizhe⁴, CHEN Hongyun¹, WU Wenzhu¹, LI Jinlei¹, SONG Yingjin¹, YAN Beibei¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China; 3. School of Science, Tibet University, Lhasa 850012, China; 4. Xinyuan Sunshine Agriculture Co., Ltd., Langfang 065000, China)

Abstract: In China, straw resources have great potential for utilization owing to high yield, rich variety, wide distribution, and high carbon content. Straw carbon-based fertilizers can improve soil fertility and quality, and thereby increase crop yield, due to their high pore volume, specific surface area, and cation exchange capacity. This article summarizes the distribution characteristics of crop straw resources, the preparation techniques of straw carbon-based fertilizers, and their research progress in soil application in China. We aim to provide a reference for the application of straw carbon-based fertilizers in agricultural production in China.

Keywords: straw; biochar; carbon-based fertilizer; soil; crop

随着集约化农业生产的发展, 以秸秆为代表的农业废弃物产量激增, 全球每年有近 40 亿 t 的产量, 我国每年秸秆产量可达到 9.8 亿 t, 如何高效资源化利用

农业废弃物是当下亟待解决的问题。传统的秸秆利用以直接还田、焚烧或丢弃为主, 不仅利用效率低下, 还会造成严重的环境污染。如何在不造成环境污染

收稿日期: 2021-02-01 录用日期: 2021-06-01

作者简介: 钟磊(1985—), 男, 江西人, 博士, 副教授, 主要从事环境生态学研究。E-mail: lei.zhong@tju.edu.cn

*通信作者: 陈冠益 E-mail: chen@tju.edu.cn

基金项目: 天津市自然科学基金项目(19JCQNJC13900); 河北省重点研发计划项目(18226507D)

Project supported: The Natural Science Foundation of Tianjin, China(19JCQNJC13900); The Key Research and Development Project of Hebei Province, China(18226507D)

的前提下,高效利用秸秆资源成为实现农业可持续发展的研究热点。

生物炭主要是以农业废弃物(如秸秆、动物粪便等)为原料,在厌氧或缺氧的条件下,经一定温度($<700\text{ }^{\circ}\text{C}$)热解产生的含碳量高、具有较大比表面积的稳定固态物质,其成分除了C以外,还包括H、O、N、S以及少量的微量元素^[1]。利用生物炭与肥料掺混、包膜定型以及化学反应等方式制备炭基肥,在农业领域已被广泛研究^[2]。因此,以秸秆为原料制备高品质生物炭控释材料,与肥料混合生产生物炭基肥料,成为利用秸秆资源替代传统化肥的主要途径之一,这不仅有利于农业提质增效,还能降低农田面源污染风险^[3]。2017年4月,农业部办公厅发布了《关于推介发布秸秆农用十大模式的通知》(农办科〔2017〕24号文件),提倡将秸秆炭化还田、土壤改良技术作为重点秸秆农用模式推广。2020年,秸秆炭基肥利用增效技术入选了农业农村部十大引领性技术,极大推进了秸秆炭基肥的市场化进程。本文以秸秆炭化制肥为出发点,对我国农业秸秆的分布特征、生物炭与炭基肥制备技术及相关土壤应用研究进行了阐述,为秸秆的高效资源化利用及炭基肥的制备提供借鉴。

1 我国秸秆的组成结构和分布特征

据统计,2016年我国秸秆产量达9.84亿t,位居世界第一位,且以每年3%的速率增长^[4-5]。当前我国秸秆资源主要为水稻、玉米、小麦秸秆,三大作物秸秆量约占总量的83.51%,油菜、甘蔗等其他作物秸秆作为次要来源占比较小^[6]。钟华平等^[7]的研究表明,我国秸秆资源总量自1949年以来呈线性增长趋势,且以粮食作物秸秆增长为主;随着农业种植结构的调整

和种植技术的提高,次要秸秆来源在1980年后产量才急剧增长。本文以《2020年中国统计年鉴》中主要农产品产量为基础^[8],采用草谷比法^[9]测算了我国2015—2019年间农作物秸秆资源组成分布,结果(图1)表明,这5年间玉米秸秆的年均产量位居第一位,达3.1亿t,占总量的39.73%;水稻秸秆产量次之,为1.9亿t,占比为24.14%;小麦秸秆年均产量1.4亿t,占比为18.55%;而其他作物秸秆产量相较于这3类作物有较大差距,仅豆类、甘蔗、油菜秸秆年均产量超过了2000万t,合计占总量的10.73%;棉花、薯类和花生秸秆的年均产量超过了1300万t;而烟草、甜菜等作物的秸秆年产量均不足1000万t。从秸秆元素组成^[11-12](表1)来看,各类秸秆的O、C元素含量均超过32%,N含量普遍较低。各类秸秆相比,水稻秸秆灰分含量最高,小麦和油菜秸秆有着较高的固定碳含量,小麦和甘蔗秸秆木质素含量较高,甘蔗和玉米秸秆则有着较高的挥发分含量。

秸秆资源的分布与自然地理环境、农业生产和经济条件密切相关,区域差异大。我国秸秆资源主要集中在东北、华东和华中地区,2019年3个地区的秸秆产量为4.82亿t,占全国秸秆总产量的60.70%,华北、西北、西南地区秸秆资源相对较少,分别占总产量的13.06%、8.45%、11.01%。从省域尺度(表2)来看,2019年黑龙江省秸秆产量最大,达到了8650万t,河南和山东的秸秆产量均超过6000万t,3省份秸秆产量占全国秸秆总量的29.11%;吉林、内蒙古、河北、安徽、四川、江苏等10省份的秸秆资源也很丰富,产量均超过了3000万t,合计占该年度全国总量的48.65%;辽宁、云南、江西等9个省份的秸秆年产量在1000万t至3000万t之间,其秸秆资源总和占全国总

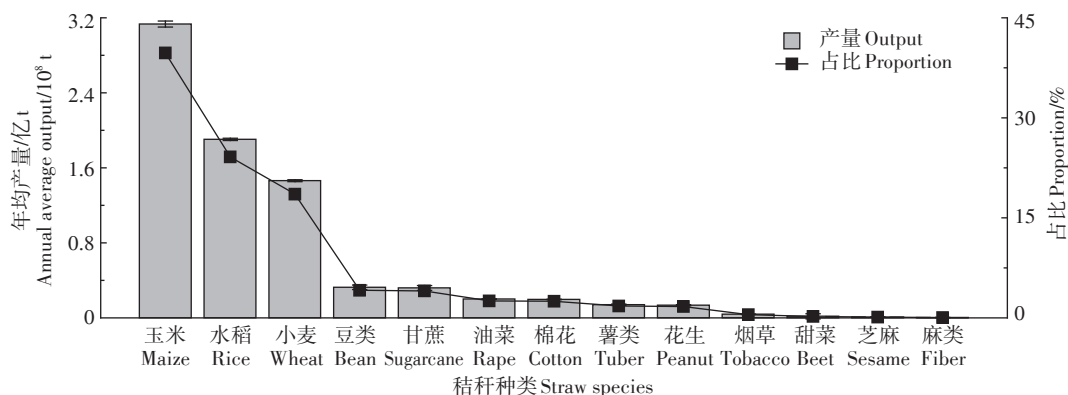


图1 2015—2019我国各类秸秆年均产量及占比

Figure 1 China's average annual output and proportion of various straws during 2015—2019

表1 我国主要秸秆种类元素组分分析^[10-11]
Table 1 Analysis of six kinds of straw element composition^[10-11]

秸秆种类 Straw species	元素含量 Element content/%					物质含量 Substance content/%			
	C	H	O	N	S	挥发分 Volatile matter	固定碳 Fixed carbon	灰分 Ash content	木质素 Lignin
小麦秸秆 Wheat straw	41.52	5.76	36.24	0.61	0.24	66.60	17.78	9.6	14.4
水稻秸秆 Rice straw	40.67	5.73	32.30	0.80	0.01	63.82	15.69	15.29	8.9
玉米秸秆 Maize straw	41.67	5.91	40.53	0.58	0.15	72.90	15.94	6.17	7.39
甘蔗秸秆 Sugarcane straw	48.4	6.5	45.2	—	—	75.2	15.8	9	24.8
油菜秸秆 Rape straw	39.01	5.68	39.08	0.22	0.25	66.31	17.93	3.46	—
豆类秸秆 Bean straw	39.4	5.85	37.42	0.6	0.12	66.31	17.08	5.01	—

表2 2019年我国农作物秸秆产量的省域分布状况
Table 2 Distribution of crop straw production in different
provinces in 2019 in China

农作物秸秆产量/万 t Crop straw yield/10 ⁴ t	省份 Province
>6 000	黑龙江、山东、河南
3 000~6 000	安徽、吉林、河北、内蒙古、四川、江苏、广西、 新疆、湖南、湖北
1 000~3 000	辽宁、云南、江西、广东、山西、陕西、甘肃、 贵州、重庆
100~1 000	浙江、福建、宁夏、天津、海南、青海
<100	上海、西藏、北京

量的19.50%;此外,有9个省份在该年的秸秆产量不足1 000万t,其中上海、西藏、北京等地不足100万t,仅占全国总量的0.20%。

根据我国秸秆的组成结构和分布特征,针对生物炭基肥的开发利用提出以下建议措施:①玉米、小麦和水稻秸秆碳含量较高、养分含量较低且含有一定量的木质素,适合开发生物炭吸附控释材料和土壤修复改良材料;②东北、河南、山东等秸秆产量高的平原地区,适宜建立规模化生产的炭基肥设施及相关企业^[12],并给予相关的政策补贴,大力发展基于秸秆炭基肥还田的循环农业模式;③秸秆产量达到一定规模

但地形条件相对复杂且秸秆不易搜集、运输的地区,应鼓励相关村镇开发小型的移动式炭化设备^[13],实现生物炭基肥的现场制备及还田利用。

2 秸秆炭基肥的制备技术

2.1 秸秆生物炭制备技术

秸秆生物炭的理化性质因秸秆种类的不同而存在差异(表3),相同制备条件下,水稻秸秆生物炭的碳、氮含量更高,比表面积和孔体积更大,对养分具有较强的吸附能力;玉米秸秆生物炭孔隙分布更为密集,层理结构更为明显^[22];甘蔗、玉米秸秆生物炭灰分含量低;小麦、豆类秸秆生物炭具有较高的碳氮比。

生物炭特性除了受到原料种类的影响,热解条件也起到了决定性作用。目前比较常见的制备方式有慢速热解、快速热解、热解气化、水热炭化等(表4)。慢速热解是文献中应用最广的技术,其加热速率较慢,一般为20~100 °C·min⁻¹,反应温度为300~800 °C,制备的生物炭比表面积和碳含量较高,随着热解温度的升高,pH、比表面积和芳香化程度逐渐增加,产率逐渐下降,孔隙结构更加完善^[29];快速热解加热速率更高,约为100~1 000 °C·s⁻¹,其生物炭芳香化程度、含水量和密度也更高,产率和pH偏低^[30];热解气化是

表3 我国主要秸秆生物炭理化性质^[10,14-21]
Table 3 The physical and chemical properties of main straw biochar in China^[10,14-21]

秸秆种类 Straw species	碳含量 Carbon content/%	氧含量 Oxygen content/%	氮含量 Nitrogen content/%	灰分 Ash/%	比表面积 Specific surface area/ (m ² ·g ⁻¹)	总孔体积 Total pore volume/ (cm ³ ·g ⁻¹)	孔径 Pore size/nm
小麦秸秆 Wheat straw	51~53	7~12	0.3~0.5	11~16	4.14~72.98	0.005~0.01	1.6~2.8
水稻秸秆 Rice straw	76~82	14~19	1.7~2.0	28~31	19.25~183	0.008~0.026	4.7~13.7
玉米秸秆 Maize straw	70~76	9~11	0.9~2.0	8~14	4.54~101.21	0.003~0.007	1.5~1.9
甘蔗秸秆 Sugarcane straw	59~69	3~11	0.65~1.5	5~10	28~110	0.007~0.012	12~24
油菜秸秆 Rape straw	69	26	1.18	7~26	3.87~112	0.001~0.03	2~7
豆类秸秆 Bean straw	76~80	2~13	0.53~0.74	13~17	5.3~83.05	0.095	5

表4 不同生物炭制备技术的生物质产物和生物炭的理化性质^[23-28]Table 4 Biomass products and physical and chemical properties of different biochar preparation technologies^[23-28]

制备技术 Preparation technology	制备温度 Preparation temperature/℃	滞留时间 Residence time	固体产率 Solid yield/%	液体产率 Liquid yield/%	气体产率 Gas production rate/%	碳含量 Carbon content/%	pH	比表面积 Specific surface area/(m ² ·g ⁻¹)
快速热解 Fast pyrolysis	400~600	1 s	12	75	12	74	7.7~10.1	40~45
慢速热解 Slow pyrolysis	300~800	>5~30 min	35	30	19~25	95	5.0~10.1	2~180
热解气化 Gasification	750~1 500	10~20 s	10	5	85	45~80	NRA	>170
水热炭化 Hydrothermal carbonization	180~250	1~12 h	<66	5~20	2~5	<70	6.3~6.6	6.6~25
闪蒸炭化 Flash carbonization	300~600	<30 min	37	NRA	NRA	85	NRA	NRA

注:NRA为不易获取数据。

Note:NRA means data is not easily obtained.

在高温和限氧条件下将生物质转化成一氧化碳和氢气的过程,其生物炭产率相对较低,但具有较大的比表面积;水热炭化以水蒸气和生物质反应制备生物炭,需要较低的反应温度和较长的停留时间,水热炭具有较高的产率和更为丰富的含氧、含氮官能团^[23-25];闪蒸炭化加热速率极高,可将热解蒸气迅速冷却得到液体产物^[31]。

对生物炭进行改性处理可使其理化性质得到改善。姚春雪^[32]使用磷酸活化小麦秸秆制备生物炭,发现磷酸改性提高了秸秆生物炭比表面积、表面官能团数量、有效养分含量和阳离子交换量。LI等^[33]发现使用20%的MgO处理的磁性生物炭,表面Mg—O和Fe—O基团的含量增加,其对水溶液中磷酸盐的吸附量达99.5%,高于未改性的生物炭。

2.2 秸秆炭基肥制备技术

当前研究中,秸秆炭基肥的制备方法主要有掺混法、吸附法、化学反应法、混合造粒法和包膜法,基本制备原理如图2所示。掺混法直接将生物炭与化肥快速混合,生产效率最高^[34]。生物炭与肥料的配比是影响其应用效果及场景的主要因素,肥料、生物炭比例为8:2和7:3时,炭基肥在促进玉米植株生长和提高土壤性状方面效果最优;肥炭比为1:1时,炭基肥对土壤氮循环微生物功能群落的正效应最佳^[35-36]。

吸附法是将生物炭在一定浓度的肥料溶液中浸泡制得秸秆炭基肥,又称为固-液吸附型炭基肥。表征结果发现氮素能够进入生物炭的孔隙中,并有效延缓肥料在静态水中和土壤溶液淋溶条件下养分的释放^[37-38]。化学反应法与吸附法类似,是将生物炭和肥料在反应釜中混合,通过加热、搅拌等方式使其充分反应制备生物炭基肥,具体生产方式与选用肥料种类有关。张雯^[2]在反应釜中添加一定比例的硝酸、氨水和生物炭,搅拌反应过程中调节pH值至中性,得到初

产物,干燥后得到反应型炭基肥。EL SHARKAWI等^[39]则使用氨气与生物炭进行反应制备炭基肥。研究表明,反应型炭基肥在提高养分利用率、增加小麦和玉米等作物产量方面的效果均优于掺混型和吸附型炭基肥,而吸附型炭基肥比掺混型炭基肥的施用效果更显著^[2,40-43]。

上述方法制备的炭基肥多为粉状颗粒等未成型的形式,这给炭基肥的运输、贮存、施用等造成诸多不便。混合造粒法将生物炭和一种或多种肥料粉碎成粒度均匀的粉末颗粒,然后通过各类机械成型方式进行造粒,是当前主要的炭基肥生产方法,具体可分为团聚造粒成型和挤压柱状成型两种方式^[44]。团聚造粒是将粉状颗粒在液桥的作用下积聚成小颗粒,而后通过设备转动使积聚的小颗粒在重力作用下成型;挤压柱状成型则是在机械外力作用下,将粉状的炭基肥直接挤压成型,其产品具有更高的机械强度、生产效率和缓释性能^[45]。不同的原料配比对造粒的机械强度也有一定的影响,马欢欢等^[46]研究发现,使用70%的基础肥料、16.6%的秸秆生物炭、13%的水制备挤压柱状炭基肥时,常温下不需要黏合剂即可达到国家标准。

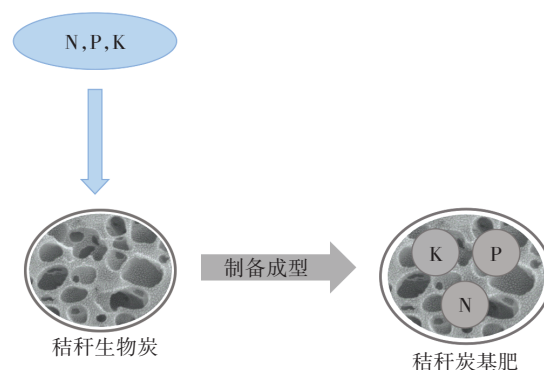


图2 秸秆炭基肥制备原理

Figure 2 Schematic diagram of straw carbon-based fertilizer

包膜法是以细粉颗粒生物炭为膜层,对速效性颗粒肥料进行包裹,制备得到炭基肥,施用后可逐渐释放养分供给作物,能够有效减少肥料养分在土壤中分解、挥发、冲蚀,提高养分利用率^[47]。但使用生物炭进行包膜的炭基肥多为细粉状颗粒,难以运输,使用其他包膜材料及黏合剂对炭基肥进行成型处理,可提高其机械强度。苑晓辰等^[48]以乙基纤维素为成膜材料,戊二醛为交联剂,邻苯二甲酸二乙酯作为增塑剂,吐温80为乳化剂,采用溶液共混法制备炭基肥包膜材料,经测试其机械强度、渗透率、吸水率等特性均达到作为炭基肥包膜的要求。

在包膜成型和混合造粒成型技术中,黏合剂起到了非常重要的作用,在生物炭和肥料的基础上添加黏合剂能大幅提高炭基肥的成型率和农用效果,成型效果主要与黏合剂的类型有关。当前的黏合剂主要有木质素、羧甲基纤维素钠、淀粉等。木质素储量大、无毒,可降解再生,是良好的炭基肥黏合剂^[49];羧甲基纤维素钠由天然纤维素或淀粉经化学改性而成,使用时需添加酸、碱、醇以增加其黏合性能,其实际黏结效果最优^[50];淀粉黏合剂由小麦、玉米和薯类淀粉通过煮浆和冲浆的方式制备,其原料来源广泛,价格低廉且无污染,但存在易凝胶、初始黏合力不强、干燥后变脆等问题,使用时需要添加无机填料、酸或通过加热方式来增加其黏合性能。

随着对秸秆炭基肥研究的深入,大量的新型炭基肥制备技术开始涌现。廖上强等^[51]采用熔融高压合法,使熔融尿素在一定压力下进入生物炭孔隙中,与普通尿素相比,芹菜对该生物炭基肥的氮肥利用率提高了9.97个百分点,且效果优于掺混型和包膜型炭基肥。CHEN等^[52]在原料中添加聚乙烯醇和聚乙烯吡咯烷酮制备炭基肥,表征结果发现其具有较少的亲水羟基,对养分的包裹更紧密。AN等^[53]利用微波热解技术,将棉花秸秆、肥料和膨润土的混合物共同热解制备炭基肥,其生产效率和孔隙结构均有较大改善。DE AMARAL等^[54]在共同热解制备炭基肥的基础上接种促进磷矿溶解的菌株,生物炭的孔隙结构可保护菌株免受土壤中捕食者的侵害,从而增加土壤中解磷细菌丰度,提高土壤速效磷含量。WEN等^[42]利用微波辐射将高分子机制引入到秸秆炭基肥中,发现当炭基肥施用量为1%和2%时,土壤持水量分别增加了19.3%和31.56%。BAKI等^[55]则通过将生物炭、过硫酸铵、亚甲基双丙炔酰胺、氯化钙与丙烯酸和丙烯酰胺接枝共聚,合成一种新型水凝胶炭基肥,来增加

土壤的持水保水性能。

以上研究表明,生物炭基肥的性能及应用场景主要受到秸秆生物炭和炭基肥制备技术的影响:①在原料选择上,我国秸秆来源主要是玉米、小麦和水稻,其生物炭具有较高碳氮比、孔隙度和比表面积,养分固持能力强,为炭基肥制备提供了优良的生物炭来源。②在生物炭制备方面,制备方法的差异对生物炭的产率、养分含量及比表面积影响巨大,为提升生物炭的控释性能往往需要提升生物炭的比表面积或关键官能团的相对丰度。总体而言,由于热解温度较高,热解和气化技术制备出来的生物炭孔隙度较为发达且具有很好的物理控释性能,但存在产率低和能耗高的技术瓶颈^[51];而水热炭化技术制备的生物炭养分含量较高且具有丰富的化学官能团,能耗也相对较低,但存在生物炭孔隙度不够发达、废液产生量大的问题。因此为追求高品质的生物炭产品,单纯以生物炭为生产目标可能会存在资源浪费及生产成本过高的问题;开展炭气或炭油联产技术可以在追求高品质生物炭材料的同时,高效利用秸秆资源,节省企业的运行成本。③在生物炭基肥技术方面,传统的掺混、吸附、包膜、反应法制备技术已相对成熟,控释性能基本与生产成本成正比,市场上主要的生物炭基肥料也以掺混型和包膜型炭基肥为主,但目前的炭基肥往往还是以养分的控释为主要目的,并没有很好地发挥生物炭的功能性特征,如污染物固持、改善土壤结构、调节土壤pH等功能,因此,未来在利用高品质生物炭作为控释材料的同时,可以考虑我国农田土壤的特征及状况,开发高品质且具备土壤改良或修复功能的生物炭基肥。④传统的控释肥生产技术的提升空间相对有限,而控释效果更好的吸附型、反应型炭基肥也因运输、生产等问题未得到广泛应用,今后应加强新型炭基肥制备技术研发,在减少成本的同时实现性能的突破,确保炭基肥制备条件和秸秆种类与实际使用相适应。

3 秸秆炭基肥应用进展

目前,关于秸秆炭基肥的研究在我国已十分广泛,除针对制备成型方法进行改良外,其高效应用也逐渐成为研究热点。炭基肥在土壤中的作用主要为以下三类:①土壤修复;②土壤改良及肥力提升;③提升作物产量和品质。研究表明,生物炭基肥利用其优良的理化性质不仅可以显著提升土壤质地和肥力,增加作物产量和品质,而且能有效地对污染物进行固持,起到修复改良土壤的作用(图3)。

3.1 土壤污染修复应用研究

目前我国农田重金属主要来源于矿业开采、工业固废及污水排放,重金属在土壤中的富集对作物及人体健康构成重大威胁。生物炭丰富的孔隙结构和巨大的比表面积使其具备土壤重金属修复能力^[56]。CHEN等^[57]在500℃下制备的水稻秸秆生物炭对 Cd^{2+} 的最大吸附量可达到 $4.247\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,而由其制备的炭基肥对 Cd^{2+} 的吸附量提高了48.98%($5.970\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),大量的表面含氧官能团和较高的离子交换量发挥了主要作用。我国重金属污染主要集中在华中和华东等粮食主产区,水热炭化制备的炭基肥富有含氧官能团,更有利于土壤修复,而对于西南、华南等地Cd、Pb污染密集的酸性红壤,高温热解的水稻秸秆炭基肥因其较高的pH,可促进 $\text{Cu}(\text{II})$ 、 $\text{Cd}(\text{II})$ 和 $\text{Pb}(\text{II})$ 沉淀物的形成,有效降低其在土壤中的含量^[58-59]。

我国农用土壤有机污染物主要来源于农药残留、生活污水和工业废水,其在土壤中的迁移转化可直接影响土壤健康。研究发现,生物炭对土壤中多环芳烃、阿特拉津和乙草胺等有机污染物具有良好的吸附去除效果^[60-61]。秸秆炭基肥比生物炭具有更优良的

土壤修复性能,选用水稻、玉米等孔隙结构丰富的炭基肥可进一步降低有机污染物对作物的危害。陈璐^[62]将水稻秸秆生物炭造粒制备成炭基肥,增加了其表面含氧官能团数量,优化了孔隙结构,在1%和4%施用量下使毒死蜱的去除率分别提高了4.33、9.67个百分点。邢泽炳等^[63]发现,添加1%的生物炭即可对土壤中的敌草隆产生显著的吸附作用,且随着炭化温度升高、生物炭比表面积的增大和孔隙结构的改善,去除效果将会进一步提高。我国华东、华中等地,蔬菜种植业对农药需求量大,土壤中农药残留量高^[64],适宜使用官能团更多、比表面积更大的高温热解炭基肥,以有效保障蔬菜产区土壤健康。

3.2 土壤改良及肥力提升应用研究

土壤肥力是保证粮食生产的根本。当前我国华中、华东等地区土壤有机质和养分含量高,对外源肥力需求较小,但长期不合理施肥导致土壤氮、磷淋失严重^[65-66];东北地区因连年耕作导致土壤肥力下降,西南、西北等地土壤基础地力水平低,综合肥力提升空间大^[67-68]。

炭基肥优良的控释吸附能力,能有效增加其对土

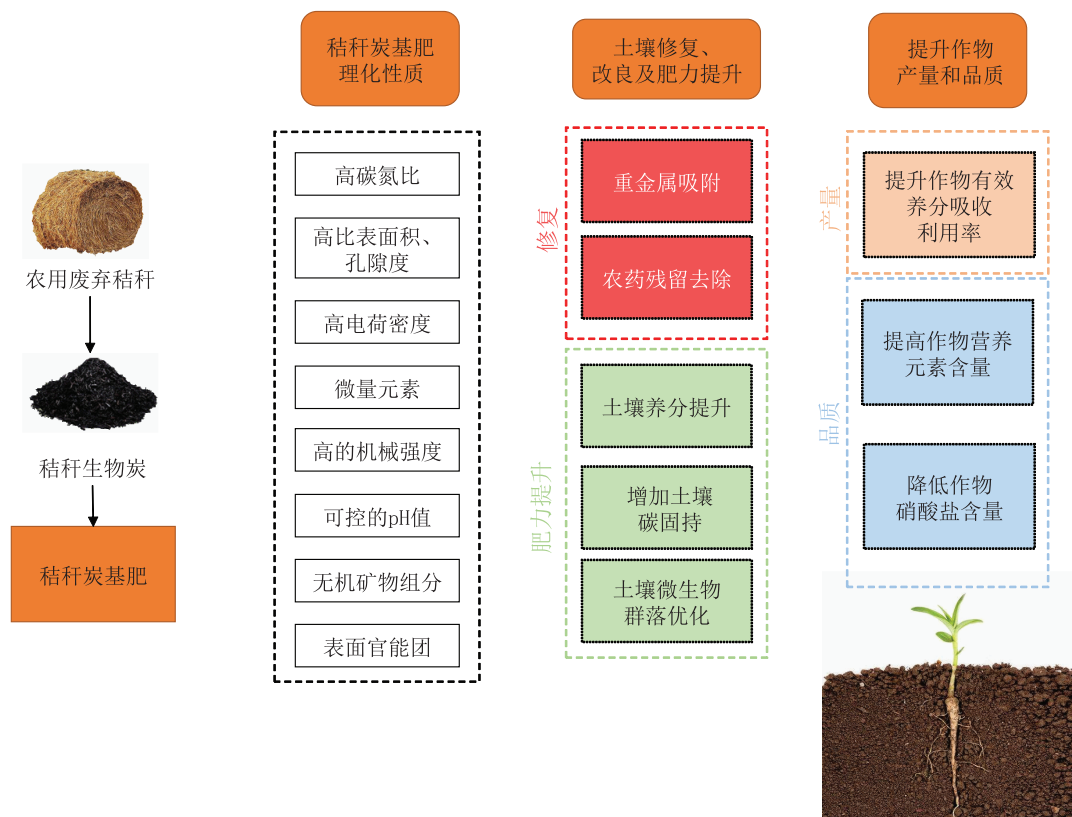


图3 秸秆炭基肥对土壤质量及作物产量和品质的改良效应

Figure 3 Effects of straw carbon-based fertilizer on soil quality and crop yield and quality

壤养分的固持,而固持效果受到制备方法的影响,如生物炭占比、改性处理方式等。PUGA等^[69]在农田土壤中施用生物炭含量为51%、40%、29%的炭基肥,研究发现高生物炭含量的炭基肥在增加土壤碳含量及氮固持、减少 CH_4 和 N_2O 排放方面效果最优。李露等^[70]研究也证明,配施 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭基肥比 $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 能更好地降低常年稻麦轮作土壤中 CH_4 和 N_2O 的排放。GONZÁLEZ-CENCERRADO等^[71]使用二氧化碳活化处理炭基肥,使土壤尿素和硝酸盐的损失量减少了69%和63%,极大降低了水体富营养化的风险。此外,过量施肥还导致土壤硝态氮、速效磷大量累积,造成土壤盐碱化等问题,施用炭基肥可提高土壤线虫总数量,并抑制植食性线虫数量,进而提升盐碱化土壤的健康程度^[72-73]。华东、华中等地区适宜使用包膜型、反应型等控释能力强的炭基肥,也可通过对秸秆炭进行改性处理,进一步优化其缓释性能;而对于华南、西南等地的酸性土壤,宜选择热解温度高、灰分含量大的包膜型炭基肥,在改良土壤酸度的同时充分减缓肥料中养分的释放。

炭基肥具备较高的养分含量,可使土壤肥力保持在较高水准^[74]。康日峰等^[75]发现施用炭基肥可提高云南红壤中土壤有机质、碱解氮和有效磷含量,且随着施用量的增加效果更为显著。李昌娟等^[76]在多年生茶园酸化红壤中施用生物炭和炭基肥,发现50 d内施用炭基肥的土壤速效磷、速效钾含量比施用生物炭的土壤高8.72%和9.42%。土壤有机碳、微生物量、酶活性是评价土壤肥力的重要指标,炭基肥还可通过改善土壤理化性质和微生物特性间接提升土壤肥力。MACCARTHY等^[77]在灌溉水稻种植体系中施用炭基肥,使土壤有机碳含量提高了32%。CHEN等^[78]研究发现,玉米秸秆炭基肥的施用对东北耕作土壤团聚体的作用有限,但能显著促进细颗粒有机物的积累,更有利于增加土壤有机碳含量。ZHOU等^[79]在贵州砂壤土中施用炭基肥,发现土壤微生物生物量碳、氮、磷分别增加60.05%、87.64%和307.85%,土壤细菌的丰度和多样性指数提高了33%和3%,改善了土壤养分状况。LIAO等^[80]的研究则证明炭基肥可增加氨氧化古菌(AOA)基因拷贝数,促进稻田土壤硝化作用,并对土壤反硝化功能基因丰度产生抑制作用,进而提升土壤氮循环的速率。李彩斌等^[81]研究证明,施用水稻秸秆炭基肥可提高贵州黄壤过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性,且随炭基肥中生物炭比例的增加,土壤脲酶活性表现为递增趋势。这可能是由于炭基肥的多孔结

构为微生物提供了繁殖环境,表面丰富的官能团有效吸附肥料中养分,减少养分淋失,为土壤酶促反应提供了更多的底物。对于东北、西北等土壤肥力较低的地区^[67-68],适宜选用吸附型、反应型等肥效高的秸秆炭基肥,在改良土壤的同时,提升当地主要作物种植土壤的养分含量。

3.3 秸秆炭基肥对作物产量品质的提升作用

秸秆生物炭的施用在提高作物产量和品质方面具有重要的促进作用。生物炭对作物的影响因作物种类、秸秆炭类型及施用量的不同而有所差异。ISWARAN等^[82]研究发现,在大豆和绿豆田施用等量生物炭的条件下,绿豆产量提高了20%,而大豆产量提高了50%。不同炭基肥类型对作物生长影响不同,胡茜等^[83]在同一稻田中施用 $110\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的小麦、水稻、玉米生物炭,水稻地上部干物质质量分别提高了91.24%、109.52%、121.00%。付嘉英等^[84]在小白菜土壤施用 $749.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 掺混型小麦、棉花、花生秸秆炭基肥,发现小麦秸秆炭基肥在增加小白菜的产量、降低小白菜中硝酸盐含量方面性能最优。而对于同一种秸秆,不同方式制备的炭基肥对作物效应也有差异,刘文秀^[85]的研究表明,相较于掺混型,造粒成型炭基肥对玉米产量、籽粒总质量等指标提升效果更佳,且随着施用量增加差异更为显著。YAO等^[86]对吸附型小麦秸秆炭基肥进行酸化处理,改良后的炭基肥使青椒产量提高了45%,并使青椒的维生素C含量从 $236.99\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 提高到 $278.28\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。综合以上分析,对于我国东北、华东等粮食主产区,使用造粒成型炭基肥不仅节约生产和运输成本,而且能有效保证粮食的产量和品质;而华东、西北等蔬菜生产基地硝态氮、速效磷累积严重,使用改性处理的新型炭基肥更有利于降低蔬菜硝酸盐含量。

4 总结与展望

对我国秸秆产量及组成特征的分析表明,以秸秆制备的炭基肥可根据作物类型和土壤条件针对性选择秸秆种类及制备方法进行土壤修复、改良,提升作物对有效养分的吸收利用,达到增加作物产量和品质的目的,具备非常好的市场前景及应用价值。然而,我国秸秆种类和区域间产量存在较大差异,增加了规模化利用秸秆资源的难度。现有秸秆生物炭和炭基肥制备技术难以保证性能和生产应用之间的平衡,新型炭基肥生产技术尚不成熟,各区域实际土壤状况对炭基肥功能性要求的差异尚未解决,为使秸秆炭基肥

今后更好地得到应用,应进一步加强以下几个方向的研究:

(1)根据我国秸秆资源的分布特征,形成不同区域秸秆资源化及生物炭制备技术指南及政策支持,形成相匹配的秸秆炭及其炭基肥产业,助力秸秆炭基肥产业及循环农业的发展。

(2)高品质的生物炭往往资源化利用效率较低,应大力发展秸秆炭气联产技术,在生产高品质生物炭及相关肥料的同时,制备和生产高品质燃气,可以有效提升秸秆资源的利用效率,提升企业的经济效益并促进行业的发展。

(3)加大对新型炭基肥技术的研发力度,突破传统制备技术瓶颈,在提升炭基肥控释性能的基础上,应针对不同区域土壤现状及需求,开发功能型生物炭基肥料。

参考文献:

- [1] 陈温福,张伟明,孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16):3324-3333. CHEN W F, ZHANG W M, MENG J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16):3324-3333.
- [2] 张雯. 新型生物炭基氮肥的研制及田间应用研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2014. ZHANG W. Development and application of biochar-based slow released nitrogenous fertilizer[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.
- [3] 李艳梅,张兴昌,廖上强,等. 生物炭基肥增效技术与制备工艺研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10):1-14. LI Y M, ZHANG X C, LIAO S Q, et al. Research progress on synergy technologies of carbon-based fertilizer and its application[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(10):1-14.
- [4] 石祖梁,王飞,王久臣,等. 我国农作物秸秆资源利用特征、技术模式及发展建议[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(5):8-16. SHI Z L, WANG F, WANG J C, et al. Utilization characteristics, technical model and development suggestion on crop straw in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21(5):8-16.
- [5] 卫洪建,杨晴,李佳硕,等. 中国农作物秸秆资源时空分布及其产率变化分析[J]. 可再生能源, 2019, 37(9):1265-1273. WEI H J, YANG Q, LI J S, et al. Analysis of spatiotemporal and density changes of crop straws resources in China[J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(9):1265-1273.
- [6] 谢光辉,王晓玉,任兰天. 中国作物秸秆资源评估研究现状[J]. 生物工程学报, 2010, 26(7):855-863. XIE G H, WANG X Y, REN L T. China's crop residues resources evaluation[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2010, 26(7):855-863.
- [7] 钟华平,岳燕珍,樊江文. 中国作物秸秆资源及其利用[J]. 资源科学, 2003(4):62-67. ZHONG H P, YUE Y Z, FAN J W. Characteristics of crop straw resources in China and its utilization[J]. *Resources Science*, 2003(4):62-67.
- [8] 国家统计局. 中国统计年鉴 2020[M]. 北京:中国统计出版社, 2020:4-5. National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2020 [M]. Beijing:China Statistics Press, 2020:4-5.
- [9] 毕于运,高春雨,王亚静,等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12):211-217. BI Y Y, GAO C Y, WANG Y J, et al. Estimation of straw resources in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(12):211-217.
- [10] WANG H, XU J, SHENG L. Preparation of straw biochar and application of constructed wetland in China: A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020:123131.
- [11] SALINA F H, MOLINA F B, GALLEGOS A G, et al. Fast pyrolysis of sugarcane straw and its integration into the conventional ethanol production process through pinch analysis[J]. *Energy*, 2021, 215:119066.
- [12] 李长生,李茂松,马秀枝,等. 黄淮海地区农田污染对粮食生产的制约及防治对策[J]. 自然灾害学报, 2006(S1):286-291. LI C S, LI M S, MI X Z, et al. Restrictions of farmland's pollution in Huang-Huai-Hai area on grain production and its prevention and control measures[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2006(S1):286-291.
- [13] 汪海波,秦元萍,余康. 我国农作物秸秆资源的分布、利用与开发策略[J]. 国土与自然资源研究, 2008(2):92-93. WANG H B, QIN Y P, YU K. Distribution, utilization, distribution and exploitation tactics of crop stalk resources in China[J]. *Territory & Natural Resources Research Study*, 2008(2):92-93.
- [14] HU E, SHANG S, WANG N, et al. Influence of the pyrolytic temperature and feedstock on the characteristics and naphthalene adsorption of crop straw-derived biochars[J]. *BioResources*, 2019, 14(2):2885-2902.
- [15] RAJABI H, MOSLEH M H, MANDAL P, et al. Sorption behaviour of xylene isomers on biochar from a range of feedstock[J]. *Chemosphere*, 2021, 268:129310.
- [16] LI B, YANG L, WANG C Q, et al. Adsorption of Cd(II) from aqueous solutions by rape straw biochar derived from different modification processes[J]. *Chemosphere*, 2017, 175:332-340.
- [17] TAN Z, ZHANG X, WANG L, et al. Sorption of tetracycline on H₂O₂-modified biochar derived from rape stalk[J]. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 2019, 31(1):198-207.
- [18] JIA Y, HU Z, MU J, et al. Preparation of biochar as a coating material for biochar-coated urea[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 731:139063.
- [19] LI G, CHEN F, JIA S, et al. Effect of biochar on Cd and pyrene removal and bacteria communities variations in soils with culturing ryegrass (*Lolium perenne* L.)[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265:114887.
- [20] 廖芬. 不同生物质来源生物炭品质差异及对甘蔗氮素利用效应[D]. 南宁:广西大学, 2018. LIAO F. Quality analysis of biochar derived from different sources biomass and the effect on sugarcane nitrogen utilization[D]. Nanning:Guangxi University, 2018.
- [21] 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. ZHONG X X. Application of biochar prepared from rape straw for pesticide loading-release[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.
- [22] AMELOOT N, GRABER E R, VERHEIJEN F G, et al. Interactions

- between biochar stability and soil organisms: Review and research needs[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64(4):379-390.
- [23] JUDY L, KYOUNG S R, CLAUDIA K, et al. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis[J]. *Biofuels*, 2(1):71-106.
- [24] MEYER S, GLASER B, QUICKER P. Technical, economical, and climate-related aspects of biochar production technologies: A literature review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(22):9473-9483.
- [25] REZA M T, ROTTLE E, HERKLOTZ L, et al. Hydrothermal carbonization (HTC) of wheat straw: Influence of feedwater pH prepared by acetic acid and potassium hydroxide[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 182:336-344.
- [26] ASENSIO V, VEGA F A, ANDRADE M L, et al. Tree vegetation and waste amendments to improve the physical condition of copper mine soils[J]. *Chemosphere*, 2013, 90(2):603-610.
- [27] MICHAEL J A, MORTEN G. The art, science, and technology of charcoal production[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2003, 42(8):1619-1640.
- [28] BRIDGWATER A. The production of biofuels and renewable chemicals by fast pyrolysis of biomass[J]. *International Journal of Global Energy Issues*, 2007, 27(2):160-203.
- [29] XIAO X, CHEN B, ZHU L. Transformation, morphology, and dissolution of silicon and carbon in rice straw-derived biochars under different pyrolytic temperatures[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(6):3411-3419.
- [30] 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, 125:90-100.
- [31] 修双宁, 易维明, 李保明. 秸秆类生物质闪速热解规律[J]. 太阳能学报, 2005(4):538-542. XIU S N, YI W M, LI B M. The flash pyrolysis for agricultural residues[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2005(4):538-542.
- [32] 姚春雪. 改性生物质炭基肥料特性及在生产上的应用[D]. 南京:南京农业大学, 2015. YAO C X. Characteristics of modified biochar-based fertilizers and its application in production[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [33] LI R, WANG J J, ZHOU B, et al. Recovery of phosphate from aqueous solution by magnesium oxide decorated magnetic biochar and its potential as phosphate-based fertilizer substitute[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 215:209-214.
- [34] STEINER C, GARCIA M, ZECH W. Effects of charcoal as slow release nutrient carrier on N-P-K dynamics and soil microbial population: Pot experiments with ferralsol substrate[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009:325-338.
- [35] 王智慧, 唐春双, 范博文, 等. 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. WANG Z H, TANG C S, FAN B W, et al. Effects of different ratio of carbon basal fertilizer on maize growth, soil and respiration[J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2017, 29(3):1-4, 28.
- [36] SHI Y, LIU X, ZHANG Q. Effects of combined biochar and organic fertilizer on nitrous oxide fluxes and the related nitrifier and denitrifier communities in a saline-alkali soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 686:199-211.
- [37] 高海英, 何绪生, 陈心想, 等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10):1948-1955. GAO H Y, HE X S, CHEN X X, et al. Effects of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizer on soil chemical properties and crop yield[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(10):1948-1955.
- [38] NAEEM M A, KHALID M, AON M, et al. Combined application of biochar with compost and fertilizer improves soil properties and grain yield of maize[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2018, 41(1):112-122.
- [39] EL SHARKAWI H M, TOJO S, CHOSA T, et al. Biochar-ammonium phosphate as an uncoated-slow release fertilizer in sandy soil[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2018, 117:154-160.
- [40] 赵军. 生物质炭基氮肥对土壤微生物量碳氮、土壤酶及作物产量的影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016. ZHAO J. Effect of biochar-based slow-released nitrogenous fertilizer on soil microbial biomass and soil enzymes and crop yield[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [41] LIU X R, LIAO J Y, SONG H X, et al. A biochar-based route for environmentally friendly controlled release of nitrogen: Urea-loaded biochar and bentonite composite[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1):1-12.
- [42] WEN P, WU Z, HAN Y, et al. Microwave-assisted synthesis of a novel biochar-based slow-release nitrogen fertilizer with enhanced water-retention capacity[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5(8):7374-7382.
- [43] ZHANG W, JIANG L, XU C, et al. Biochar and biochar-based nitrogenous fertilizers: Short-term effects on chemical properties of soils[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2018, 20(7):1555-1561.
- [44] 魏春辉, 任奕林, 苑晓辰, 等. 柱状竹炭基肥挤压造粒成型工艺的研究[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(5):947-952. WEI C H, REN Y L, YUAN X C, et al. Research on extrusion granulation forming process of columnar bamboo charcoal based fertilizer[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2017, 44(5):947-952.
- [45] MAGRINI-BAIR K A, CZERNIK S, PILATH H M, et al. Biomass derived, carbon sequestering, designed fertilizers[J]. *Annals of Environmental Science*, 2009, 3:217-225.
- [46] 马欢欢, 周建斌, 王刘江, 等. 秸秆炭基肥料挤压造粒成型优化及主要性能[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5):270-276. MA H H, ZHOU J B, WANG L J, et al. Straw carbon based fertilizer granulation molding optimization and its main properties[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(5):270-276.
- [47] 钟雪梅, 朱义年, 刘杰, 等. 竹炭包膜对肥料氮淋溶和有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006(S1):154-157. ZHONG X M, ZHU Y N, LIU J, et al. Influence of bamboo-charcoal coating on N leaching and effectiveness of fertilizers[J]. *Journal of Agro-Environ-*

- mental Sciences*, 2006(S1):154–157.
- [48] 苑晓辰, 任奕林, 彭春晖, 等. 一种生物炭基肥包膜材料的制备及特性研究[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(1):110–116. YUAN X C, REN Y L, PENG C H, et al. Preparation of the coating material for a biochar-based fertilizer and analysis of its property[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2018, 45(1):110–116.
- [49] 王秋静. 木质素在生物质炭尿素肥料中的应用研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015. WANG Q J. Study on the preparation and application of lignin in biochar urea[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015.
- [50] 张伟. 水稻秸秆炭基缓释肥的制备及性能研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014. ZHANG W. Study on production and properties of fertilizer based on rice straw biochar[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014.
- [51] 廖上强, 陈延华, 李艳梅, 等. 生物炭基尿素对芹菜产量、品质及土壤硝态氮含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(5):443–448. LIAO S Q, CHEN Y H, LI Y M, et al. Effects of biochar-based urea on the yield and quality of celery and soil $\text{NO}_3\text{-N}$ content[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(5):443–448.
- [52] CHEN S, YANG M, BA C, et al. Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by biochar-based waterborne copolymers[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 615:431–437.
- [53] AN X, WU Z, YU J, et al. Coprolysis of biomass, bentonite, and nutrients as a new strategy for the synthesis of improved biochar-based slow-release fertilizers[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(8):3181–3190.
- [54] DE AMARAL L A, DE SOUZA C A A, DE ALMEIDA L R, et al. Selected bacterial strains enhance phosphorus availability from biochar-based rock phosphate fertilizer[J]. *Annals of Microbiology*, 2020, 70(1):1–13.
- [55] BAKI M, ABEDI-KOUPAI J. Preparation and characterization of a superabsorbent slow-release fertilizer with sodium alginate and biochar[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018, 135(10):45966.
- [56] 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. WANG M M, ZHOU Q X. Environmental effects and their mechanisms of biochar applied to soils[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(5):768–780.
- [57] CHEN L, CHEN Q, RAO P, 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.
- [58] JIANG J, XU R K, JIANG T Y, et al. Immobilization of $\text{Cu}(\text{II})$, $\text{Pb}(\text{II})$ and $\text{Cd}(\text{II})$ by the addition of rice straw derived biochar to a simulated polluted Ultisol[J]. *Journal of Hazardous materials*, 2012, 229:145–150.
- [59] LI Z, LI L, CHEN G P J. Bioavailability of Cd in a soil-rice system in China: Soil type versus genotype effects[J]. *Plant and Soil*, 2005, 271(1):165–173.
- [60] SPOKAS K, KOSKINEN W, BAKER J, et al. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil[J]. *Chemosphere*, 2009, 77(4):574–581.
- [61] 邹刚华, 戴敏洁, 赵凤亮, 等. 原料和温度对热带农林秸秆生物炭多环芳烃的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(1):144–150. ZOU G H, DAI M J, ZHAO F L, et al. Effect of feedstock and temperature on the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) of biochar produced from tropical agroforestry wastes[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34(1):144–150.
- [62] 陈璐. 生物炭基肥对土壤镉铅和毒死蜱的吸附与钝化[D]. 上海: 上海交通大学, 2019. CHEN L. Passivation and adsorption of biochar-based fertilizer to cadmium, lead and chlorpyrifos in soil[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [63] 邢泽炳, 杜颖, 郭玉明, 等. 柠条生物炭对土壤中敌草隆的吸附性能[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(6):550–554. XING Z B, DU Y, GUO Y M, et al. Adsorption ability of *Caragana korshinskii* Kom biochar to diuron in soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(6):550–554.
- [64] 赵玲, 滕应, 骆永明. 中国农田土壤农药污染现状和防控对策[J]. 土壤, 2017, 49(3):417–427. ZHAO L, TENG Y, LUO Y M. Present pollution status and control strategy of pesticides in agricultural soils in China: A review[J]. *Soil*, 2017, 49(3):417–427.
- [65] LIU J, YANG Y, GAO B, et al. Bio-based elastic polyurethane for controlled-release urea fertilizer: Fabrication, properties, swelling and nitrogen release characteristics[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209:528–537.
- [66] 王桂良. 中国三大粮食作物农田活性氮损失与氮肥利用率的定量分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. WANG G L. Quantitative analysis of reactive nitrogen losses and nitrogen use efficiency of three major grain crops in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [67] 张淑香, 张文菊, 沈仁芳, 等. 我国典型农田长期施肥土壤肥力变化与研究展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6):1389–1393. ZHANG S X, ZHANG W J, SHEN R F, et al. Variation of soil quality in typical farmlands in China under long-term fertilization and research expedition[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6):1389–1393.
- [68] 李建军. 我国粮食主产区稻田土壤肥力及基础地力的时空演变特征[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015. LI J J. The temporal and spatial evolution characteristics of paddy soil fertility and basic soil fertility in the main grain production areas of China[D]. Guiyang: Guizhou University, 2015.
- [69] PUGA A P, GRUTZMACHER P, CERRI C E P, et al. Biochar-based nitrogen fertilizers: Greenhouse gas emissions, use efficiency, and maize yield in tropical soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 704:135375.
- [70] 李露, 周自强, 潘晓健, 等. 氮肥与生物炭施用对稻麦轮作系统甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5):1095–1103. LI L, ZHOU Z Q, PAN X J, et al. Combined effects of nitrogen fertilization and biochar incorporation on methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in rice-wheat annual rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(5):1095–1103.

- [71] GONZÁLEZ-CENCERRADO A, RANZ J P, JIMÉNEZ M T L F, et al. Assessing the environmental benefit of a new fertilizer based on activated biochar applied to cereal crops[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711:134668.
- [72] 黄绍文, 王玉军, 金继运, 等. 我国主要菜区土壤盐分、酸碱性和肥力状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4):906-918. HUANG S W, WANG Y J, JIN J Y, et al. Soil salinity, pH and nutrients in soils in main vegetable production regions in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2011, 17(4):906-918.
- [73] 杨贝贝, 朱新萍, 赵一, 等. 生物炭基肥施用对棉田土壤线虫群落结构的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4):66-71. YANG B B, ZHU X P, ZHAO Y, et al. Effect of biochar based application on soil nematode community structure in cotton field[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(4):66-71.
- [74] LI H, LI Y, XU Y, et al. Biochar phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus availability[J]. *Chemosphere*, 2020, 244:125471.
- [75] 康日峰, 张乃明, 史静, 等. 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. KANG R F, ZHANG N M, SHI J, et al. Effects of biochar-based fertilizer on soil fertility, wheat growth and nutrient absorption[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(6):33-38.
- [76] 李昌娟, 杨文浩, 周碧青, 等. 生物炭基肥对酸化茶园土壤养分及茶叶产质量的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(2):387-397. LI C J, YANG W H, ZHOU B Q, et al. Effects of biochar based fertilizer on soil nutrients, tea output and quality in an acidified tea field[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(2):387-397.
- [77] MACCARTHY D S, DARKO E, NARTEY E K, et al. Integrating biochar and inorganic fertilizer improves productivity and profitability of irrigated rice in Ghana, west Africa[J]. *Agronomy*, 2020, 10(6):904.
- [78] CHEN K, PENG J, LI J, et al. Stabilization of soil aggregate and organic matter under the application of three organic resources and biochar-based compound fertilizer[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(10):3633-3643.
- [79] ZHOU Z, GAO T, VAN ZWIETEN L, et al. Soil microbial community structure shifts induced by biochar and biochar-based fertilizer amendment to karst calcareous soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2019, 83(2):398-408.
- [80] LIAO J, LIU X, HU A, et al. Effects of biochar-based controlled release nitrogen fertilizer on nitrogen-use efficiency of oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1):1-14.
- [81] 李彩斌, 符德龙, 曹廷茂, 等. 炭基复混肥配方对土壤酶和烤烟生理、养分积累及产量的影响[J]. 湖南农业科学, 2019(7):48-50, 54. LI C B, FU D L, CAO T M, et al. Effects of carbon-based compound fertilizer formula on soil enzymes activity and characteristic of physiology, nutrient accumulation and yield of flue-cured tobacco[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2019(7):48-50, 54.
- [82] ISWARAN V, JAUHRI K, SEN A. Effect of charcoal, coal and peat on the yield of moong, soybean and pea[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1980, 12(2):191-192.
- [83] 胡茜, 赵远, 张玉虎, 等. 生物炭配施化肥对稻田土壤有效氮素以及水稻产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(15):108-112. HU Q, ZHAO Y, ZHANG Y H, et al. Effects of biochar blended with chemical fertilizer on available nitrogen in paddy soil and yield of rice[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(15):108-112.
- [84] 付嘉英, 乔志刚, 郑金伟, 等. 不同炭基肥料对小白菜硝酸盐含量、产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(34):162-165. FU J Y, QIAO Z G, ZHENG J W, et al. Effects of different biochar-based fertilizer on nitrate content, yield and quality of cabbage[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(34):162-165.
- [85] 刘文秀. 生物炭基肥料对玉米和菠菜生长的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016. LIU W X. Effect of biochar-based fertilizers on the growth of corn and spinach[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2016.
- [86] YAO C, JOSEPH S, LI L, et al. Developing more effective enhanced biochar fertilisers for improvement of pepper yield and quality[J]. *Pe-dosphere*, 2015, 25(5):703-712.