

# 生物炭的研究现状与农业推广应用分析

闻艺, 王昌梅\*, 张无敌\*, 徐锐, 王润, 宋荣平, 何姝彦, 李静秋, 刘安琪, 马敏, 刘青松, 孔令熙, 张成昊, 李扬 (云南师范大学能源与环境科学学院, 云南昆明 650500)

**摘要** 在加快推动以清洁低碳为导向的新一轮能源变革、减少二氧化碳排放与实现绿色生态可持续发展的背景下, 我国生物质能产学研结合得更加紧密, 生物炭的研究日益成熟, 在大力呼吁与促进生物炭从实验室推广向产业化、生物炭产品投入农业使用的过程中, 还存在需要解决的标准化问题。综述生物炭的性状特征、制备方法、应用现状, 指出农业推广应用需要评估环境、生物风险, 展望生物炭在未来农业推广中的应用前景。

**关键词** 生物炭; 研究现状; 农业推广; 应用分析

中图分类号 S156.2 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)22-0010-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.22.003



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Research Status and Analysis in Agricultural Extension Application of Biochar

WEN Yi, WANG Chang-mei, ZHANG Wu-di et al (School of Energy and Environment Science, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500)

**Abstract** In the background of promoting the clean and low carbon oriented new energy revolution to reduce carbon emissions and to realize the sustainable development of green ecological, China's biomass energy production, education and research are more closely combined, the research of biochar matures, the research on biochar is becoming more and more mature. In the process of calling for and promoting biochar from laboratory to industrialization and agricultural use of biochar products, there are still some problems that need to be solved. The characteristics, preparation methods and application status of biochar were reviewed, and the problems existing in the agricultural application were analyzed. Meanwhile, the application prospect of biochar in future agricultural extension was prospected.

**Key words** Biochar; Research status; Agricultural extension; Application analysis

自工业化以来, 日益严重的粮食危机、环境污染和气候变暖等问题逐渐成为制约各个国家和地区经济、社会和生态环境可持续发展的“瓶颈”。如何化解这些危机, 成为各国政府和科学家们共同关注的焦点。生物炭的研究和应用在此背景下应运而生。生物炭是木材、粪肥或树叶等生物质在缺氧或者无氧的条件下, 经过热解得到的一类高度芳香化的、化学性质稳定的高含碳量的固体物质<sup>[1-3]</sup>。定义直接或者间接地涉及生物炭的制备条件和在土壤中的应用。与传统的木炭不同, 生物炭是以碳储存和应用用于环境为目的的, 而木炭是生物质作为燃料和能源而进行的碳化产品<sup>[4]</sup>, 二者的主要区别在于最终应用。目前常见的生物炭种类包括秸秆生物炭、木质类生物炭以及固体废弃物类生物炭等。

我国是农业大国, 每年农业活动会产生大量的水稻、玉米、小麦、棉花、油菜等作物秸秆。《关于编制“十三五”秸秆综合利用实施方案的指导意见》指出, 2015年我国秸秆总量约为10.4亿t, 是2002年秸秆总量的近2倍<sup>[5]</sup>。传统的秸秆焚烧会带来严重的大气污染、降低土壤肥力, 危害人体健康和影响农业可持续发展; 并且由于秸秆在土壤中易降解, 改良效果不持久, 导致温室气体增加<sup>[6]</sup>。基于此, 可将废弃农作物、废弃农业副产物等制备形成生物炭, 以期获得更大的

生态、经济效益, 实现可持续发展与绿色生态循环。

## 1 生物炭的研究现状

**1.1 生物炭的性状特征** 生物炭是生物质在限氧环境下通过热化学转化得到的产物。农作物秸秆数量多、来源广, 是制备生物炭的主要原料<sup>[7]</sup>。生物炭的表面官能团结构赋予了生物炭诸多的表面化学性质。表面官能团结构主要包括羟基、环氧基、羧基、酰基、羰基、醚、酯基、酰胺基、磺酸基、氨基等, 研究者对生物炭上多种官能团结构进行了不同角度的研究<sup>[8-9]</sup>。

Qian等<sup>[10]</sup>研究认为, 生物炭表面带电, 是因为起源于生物炭脂肪性/芳香性表面及其表面官能团的质子化或者解离, 能够形成像土壤一样的双电层结构, 同时其表面电性受pH的影响较大。

还有研究者对不同原料制备的生物炭进行了研究(表1)。由表1可知, 即使是同一种原料, 制备生物炭的时间和温度不同, 所获得的生物炭特性的灰分含量、碳含量以及pH值等都各不相同; 不同原料制备的生物炭, 其性质差异特别明显。

**1.2 生物炭的制备工艺** 生物炭的制备方法可分为热解、汽化、水热碳化、瞬时碳化等<sup>[15]</sup>, 另有分类方法分为批式制备与连续制备。我国目前多数采用的是地窖、砖窑等传统的堆埋裂解方式, 这种批式制备的设备构造简单、易于实施、成本也比较低, 但是也导致产率低、耗能高、没有热量回收、生产不能连续等一系列问题<sup>[16]</sup>。

韦忠业<sup>[17]</sup>证实了热解温度和原料种类对生物炭的物理化学性质和结构均有重要影响, 同时热解温度的影响要比原料种类的影响要大。结果还发现, 低温(<300℃)下制备的生物炭的产率较高, 并且可较好保留原料中对于改善土壤质

**基金项目** 云南省国际科技特派员项目(2015IA022); 云南省农村能源工程重点实验室基金项目(2017KF03); 云南师范大学大学生科学研究训练项目(ky2018-142); 2019年度大学生创新训练项目; 云南师范大学2020年度研究生科研创新基金项目。

**作者简介** 闻艺(1998—), 女, 浙江杭州人, 硕士研究生, 研究方向: 生物质能与环境工程。\*通信作者: 王昌梅, 讲师, 博士, 硕士生导师, 从事生物质能与环境工程研究; 张无敌, 研究员, 博士生导师, 从事生物质能与环境工程研究。

**收稿日期** 2021-03-05; **修回日期** 2021-05-18

量有很大益处的官能团,如羧酸、羟基和羰基等;而在 500 ℃ 以上,表面的活性官能团基本上被去除,生物炭以稳定的高度芳香化碳结构物质为主,较适用于封存。林肖庆等<sup>[18]</sup>以竹片、山核桃壳、水稻及油菜秸秆 4 种生物质为原料进行热重分析,研究结果表明,在低温段(300~400 ℃),生物质材料中的纤维素、木质素等组分对生物炭产率影响较明显;400 ℃ 以上则是灰分含量对生物炭产率影响较大。黄玉威<sup>[19]</sup>用 31 种原料制备的生物炭研究表明,随着碳化温度升高,不同原

料对生物炭产率影响逐渐减小;不论是低温碳化阶段还是高温碳化时期,原料差异对于生物炭产率的影响都较小。肖欣<sup>[20]</sup>对多种生物质原料在不同裂解温度下制备生物炭的极性、疏水性、表面电性、芳香性等物理化学性质进行了研究,发现生物炭在一定温度下的产率取决于生物质材料来源,而生物炭的稳定性则主要由炭化温度决定,且温度越高性质越稳定。综上可知,生物炭物理化学性质与裂解温度有重要的关联。

表 1 原料、温度以及制备时间对生物炭部分基本性质的影响

Table 1 The influence of raw materials, temperature and preparation time on the basic properties of biochar

原料 Raw material	制备时间 Preparation time//h	制备温度 Preparation temperature// ℃	W//%			
			灰分 Ash	C	pH	
干污泥 <sup>[11]</sup> Dry sludge	2.0	500	61.66	27.44	7.30	
	3.0	500	64.89	29.19	6.87	
	4.0	300	44.50	30.99	6.91	
	4.0	400	62.57	27.48	6.69	
水稻秸秆 <sup>[12]</sup> Rice straw	4.0	500	63.71	29.02	7.44	
	4.0	700	67.66	28.22	11.12	
	2.0	300	—	—	5.73	
	2.0	400	—	—	9.14	
	2.0	500	—	—	10.01	
	2.0	700	—	—	10.81	
	2.0	500	75.00	15.70	8.96	
蚯蚓粪 <sup>[13]</sup> Vermicompost	2.0	500	75.00	15.70	8.96	
	橡木屑 <sup>[14]</sup> Oak chips	0.5	400	1.80	69.76	7.72
		1.0	400	1.98	69.48	8.16
		1.5	400	2.09	69.57	8.37
		2.0	400	2.55	68.83	8.47

**1.3 生物炭的应用场景** 生物质炭目前广泛应用为土壤改良剂<sup>[21]</sup>。2017 年农业部发布的《农业部办公厅关于推介发布秸秆农用十大模式的通知》中推荐“秸-炭-肥还田改土模式”秸秆资源化利用方法。即将具有丰富的孔隙结构、高度难降解性和碱度特性的秸秆生物炭用以改善土壤肥力,可有效减少温室气体等的产生,同时完善土壤持续的固碳能力。众多学者发表文章强调生物炭的固碳效应并进行关于生物炭在土壤环境中的研究<sup>[22-24]</sup>。进一步研究发现,生物炭在土壤改良及污染修复等方面也展现出巨大潜力<sup>[25-27]</sup>。

总体来说,生物炭在农业领域的应用是广泛且相对成熟的。生物炭可以直接还田<sup>[28-35]</sup>,也可以作为载体生成更加绿色环保可持续的生物炭基肥<sup>[36-40]</sup>与生物炭基农药<sup>[41-42]</sup>。在农业领域,生物炭基的复合材料也在监测农药中得到推广与应用。在环境保护与治理方面,生物炭以及通过不同方式改性处理之后的生物炭副产品在吸附土壤和水环境中的重金属元素污染方面有较好的潜力<sup>[43-47]</sup>。

在一些已经成熟的生物质能运用技术中,生物炭作为新的催化剂与添加剂,也有大量学者探究其添加效果与作用机理<sup>[48-53]</sup>。例如在厌氧发酵技术中添加不同比例的生物炭,对于厌氧发酵的周期和甲烷产量会产生一定的影响。此外,在电化学领域,现行的锂离子电池对环境污染问题不容忽视,急需对锂离子电池进行技术革新<sup>[54]</sup>,而生物炭凭借优异的

性能、廉价性、易获得性、环境友好等优点脱颖而出,对于生物炭作为负极材料制作锂离子电池的研究也在不断深入与发展<sup>[55]</sup>。

今后,在探索更多原料来源的生物炭同时,也应对生物炭应用场景的扩展进行探索。

## 2 生物炭对土壤特征的影响研究现状

**2.1 对土壤理化性质影响** 在土壤中施入生物炭会达到改良土壤内部结构、提高土壤保水能力的目的。数据表明,土壤中添加生物炭后保水能力达到 18%<sup>[56]</sup>。直径小的生物炭与土壤颗粒结合在一起形成微小团粒结构可增强水分子在土壤中的附着力。生物炭还能降低土壤水分蒸发,保持土壤收缩程度、内部结构,提高土壤持水能力<sup>[57]</sup>;也为传统酸性土壤改良提供了一种新的方向,在改良酸性土壤的同时,也为废弃物资源化利用提供了更多可能<sup>[58]</sup>。

**2.2 对作物产量影响** 廖萍等<sup>[59]</sup>通过田间试验发现生物炭作为酸化土壤改良剂对提高南方双季稻区水稻产量、改良土壤酸化和增加农民收入效果较好。肖和友等<sup>[60]</sup>采用炭化炉法制备以烟叶、烟秆和玉米秸秆为原料的生物质炭,田间试验发现添加生物质炭能提高烟叶的叶绿素含量、促进烟草生长。陈心想事成<sup>[61]</sup>发现生物炭与肥料混合使用比单施肥料水稻增产更多。唐光木等<sup>[62]</sup>研究发现在新疆灰漠土施用生物炭量使得作物增产。

但是,也有研究表明,在低于 400 °C 的温度下生产的生物炭具有较低的 pH、CEC 和表面积,因此可能不适合提高土壤肥力<sup>[63]</sup>。Liu 等<sup>[64]</sup>综合 36 篇相关文献的研究结果进行 Meta 分析指出,生物炭施用对氮素淋失会产生先正面后负面的效果。

利用生物炭理化性质影响土壤的 pH、土壤碳氮比、土壤保水率等,可对作物的生长周期、果实发育成熟度、产物营养元素比产生影响,但作用机理并不明确,作用效果也存在差异性。小剂量生物炭施加会产生增产、减少氮素淋失等效果,但超过阈值会对土壤微生态、作物产量、作物质量产生负面影响。

**2.3 对土壤修复影响** 秸秆生物炭在改善土壤通气性、改良土壤酸性、提高土壤阳离子交换量及促进土壤微生物生长方面具有较好的效果。生物炭的添加能够显著降低土壤交换性 H<sup>+</sup> 和 Al<sup>3+</sup>,有效减弱活性酸的补充能力,对土壤的酸性改善明显<sup>[65-67]</sup>。

**2.3.1 施入生物炭影响土壤的固氮作用。**农业温室气体排放主要是作物在土壤中释放 CO<sub>2</sub>,数据统计<sup>[68]</sup>,我国仅秸秆每年的总产量就达 7 亿多 t。用丢弃的秸秆制作生物炭不仅能够降低环境污染,还可以减少化肥的使用量<sup>[69]</sup>。与秸秆还田对比,生物炭施入土壤后就变成碳的净汇<sup>[70]</sup>。

**2.3.2 生物炭对于盐碱地土壤的改良具有较好潜力。**郑悦<sup>[71]</sup>对大庆地区盐碱地施加生物炭后土壤养分得到改善,土壤 pH 值降低,水稻也增产了。张芙蓉等<sup>[72]</sup>对上海地区盐渍土的改良对比试验也显示,与施用有机肥相比,生物炭显著降低了盐渍土壤的电导率。

在不同地区的盐碱地,生物炭对土壤的改良效果均显著,但其长期还田效应仍不明确,还需要基于田间试验进行长期大量的数据观测。

### 3 生物炭农业推广应用的机遇与挑战

**3.1 应用机遇** 2016 年国家发展改革委印发的《关于编制“十三五”秸秆综合利用实施方案的指导意见》指出,要促进农作物秸秆的综合利用,到 2020 年在全国建立较完善的秸秆还田社会化服务体系,秸秆综合利用率达到 85% 以上<sup>[73]</sup>。

秸秆焚烧会导致大气污染、降低土壤肥力,危害人体健康和影响农业可持续发展。秸秆在土壤中易降解,改良效果不持久。而用废弃农作物、农业副产物等制备生物炭,可获得更大的生态、经济效益,实现可持续发展与绿色生态循环,受到国家政策大力提倡和鼓励。

中共十八大以来,中国发展进入新时代,中国的能源发展也进入新时代<sup>[74]</sup>。我国要坚持创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念,加快推动以清洁低碳为导向的新一轮能源变革,共建清洁美丽世界。

#### 3.2 应用瓶颈与挑战

**3.2.1 生物炭使用潜在的环境风险。**长期或过量施用生物炭,可能会对土壤有机碳的质量产生负面影响,减弱土壤有机质活性,从而影响农业土壤质量。Shen 等<sup>[75]</sup>发现富含重金属和不含污染物的生物炭均有固定重金属的作用,但前

者会增加轻度污染土壤中重金属的积累。

生物质原料中的各类重金属、有机物等在制备过程中形成小颗粒固体,会对大气环境与周围土壤生态产生影响。Kus'mierz 等<sup>[76]</sup>对生物炭工厂附近收集的土壤样品进行 PAHs 含量分析,发现 16 种多环芳烃的含量总和在 1.80 ~ 101.3 μg/g 范围内,超过欧洲许多国家的允许范围;土壤中的 PAHs 潜在来源很可能与生物炭生产过程相关,与该土壤接触的人群患癌风险较高。研究表明,粉粒状形态生物炭颗粒与人体呼吸系统和心血管系统疾病具有显著相关性,易跟随气流通呼吸道、皮肤等途径进入人体产生健康风险<sup>[77]</sup>。

生物炭在还田应用中不可避免地产生土壤重金属的富集与超标。生物炭施加后因其颗粒小、分布广泛,造成施加容易、捡出来难现状。在后续处理中,富含重金属以及高度熟化后的生物炭该如何处理也是具有生态风险的问题。

生物炭使用长期效果不明确,短期会产生生态、健康风险,因此在推广过程中要谨慎,有待进一步探究。

**3.2.2 施用生物炭导致成本增加。**凌遵学等<sup>[78]</sup>发现虽然一次性施用足量的生物炭基尿素可替代常规分次施肥,节省施肥次数及施肥用工数,但单位面积施肥成本高,其虽节省工费,但生物炭基尿素单价高,并需配施磷、钾肥,单位面积的成本反而高于现行使用的缓释剂。因此,生物炭在推广过程中还需辅以元素配比指导,借助政府和村集体科技补贴加强生物炭在农业领域的推广普及。

**3.2.3 生物炭品质标准化不完备。**目前生物炭有以下 4 种典型类型:壳基生物炭、糖基生物炭、淀粉基生物炭、纤维基生物炭。即使在制备原料品类与制备工艺相同的情况下,由于制备仪器、原料生长地域等变量,制备的生物炭理化性质也具有差异性。一些非常规原料制备的生物炭,大多还处于实验室小批量生产阶段,未形成工业化流水线生产。生物炭的标准与界定还没有完备的文件指导,不同用途的生物炭制备方式和品质未得到标准化规定。

不同原料制备的生物炭因其灰分与表面官能团的不同而具有不同的特性与功能。例如,壳基生物炭之一的大闸蟹壳生物炭,其为高灰分原料制备的生物炭富含磷元素,研究发现蟹壳生物炭对重金属铅的吸附性较好<sup>[79]</sup>。

不同类型生物炭具有不同功能,定向制备生物炭的需求应运而生。未来可以通过规定原料、温度、压力等制备条件对生物炭组分进行控制,从而得到满足特定功能的生物炭,故而相应标准的制定完善迫在眉睫。

#### 4 生物炭农业推广应用的展望

(1) 亟待出台生物炭相关标准,对不同温度、原料、压强等制备条件下的产品进行理化性质分析,制定出合格标准线,对生物炭组分含量等基本数据进行规范。标准化文件可使试验数据对比更直观,使得生物炭产品产业化路径更清晰。

(2) 科研人员不断扩展生物炭的制备原料与应用场景。例如目前大家熟知的林业废弃物,除了焚烧也有一部分进行

厌氧发酵处理,但是基于林业废弃物大多木质素含量较高、发酵周期较长特点,将其通过碳化的方式进行再次利用,可能取得比厌氧堆肥发酵产沼气更高效的经济效益。

(3) 面对生物炭作用机理不清晰的现状,政府部门要在政策与资金上帮扶乡镇企业,多进行田间试验,找到作物生长所需的土壤与元素需求条件。在推广应用,应通过与他人的横向数据比较和生物不同周期的纵向数据比较分析,不断优化试验条件,力求摸清相对稳定的生物炭作用机制,将试验成果推广转化、落地实践,转化为农民经济收入,改善农村人居生活条件与生活水平。

通过生物炭标准制定、政策的支持、科技人员实践几方面的协调配合,生物炭在农业领域的推广应用具有很好的前景。

### 参考文献

[1] 陈再明,陈宝梁,周丹丹.水稻秸秆生物炭的结构特征及其对有机污染物的吸附性能[J].环境科学学报,2013,33(1):9-19.

[2] 杜桂姚.纳帕海高原湿地生物炭的制备及理化性质研究[D].昆明:昆明理工大学,2014.

[3] 范行军.气溶胶中类腐殖质的分离定量、化学表征和来源分析研究[D].广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所),2015.

[4] 黄艳芳,马正飞,姚虎卿.活性炭吸附CO<sub>2</sub>与其微孔体积的关系[J].燃料化学学报,2008,36(3):343-348.

[5] 郭冬生,黄春红.近10年来中国农作物秸秆资源量的时空分布与利用模式[J].西南农业学报,2016,29(4):948-954.

[6] 游东海.秸秆直接还田效果及秸秆热解制成生物炭还田模拟研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2012.

[7] WANG M M, ZHU Y, CHENG L R, et al. Review on utilization of biochar for metal-contaminated soil and sediment remediation[J]. J Environ Sci, 2018, 63(1):156-173.

[8] RAO B V S K, CHANDRA MOULI K, RAMBABU N, et al. Carbon-based solid acid catalyst from de-oiled canola meal for biodiesel production[J]. Catal Commun, 2011, 14(1):20-26.

[9] MAO J D, JOHNSON R L, LEHMANN J, et al. Abundant and stable char residues in soils: Implications for soil fertility and carbon sequestration[J]. Environ Sci Technol, 2012, 46(17):9571-9576.

[10] QIAN L B, CHEN M F, CHEN B L. Competitive adsorption of cadmium and aluminum onto fresh and oxidized biochars during aging processes[J]. J Soil Sediment, 2015, 15(5):1130-1138.

[11] YAN F, SCHUBERT S, MENGEL K. Soil pH changes during legume growth and application of plant material[J]. Biol Fert Soil, 1996, 23(3):236-242.

[12] TANG C, UNKOVICH M J, BOWDEN J W. Factors affecting soil acidification under legumes. III. Acid production by N<sub>2</sub>-fixing legumes as influenced by nitrate supply[J]. New Phytol, 1999, 143(3):513-521.

[13] 王章鸿,郭海艳,沈飞,等.热解条件对生物炭性质和氮、磷吸附性能的影响[J].环境科学学报,2015,35(9):2805-2812.

[14] WANG D, AI J, SHEN F, et al. Improving anaerobic digestion of easy-acidification substrates by promoting buffering capacity using biochar derived from vermicompost[J]. Bioresour Technol, 2017, 227:286-296.

[15] MEYER S, GLASER B, QUICKER P. Technical, economical, and climate-related aspects of biochar production technologies: A literature review[J]. Environ Sci Technol, 2011, 45(22):9473-9483.

[16] 罗煜,赵立欣,孟海波,等.不同温度下热裂解芒草生物质炭的理化特征分析[J].农业工程学报,2013,29(13):208-217.

[17] 韦思业.不同生物质原料和制备温度对生物炭物理化学特征的影响[D].广州:中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所),2017.

[18] 林肖庆,吕豪豪,刘玉学,等.生物质原料及炭化温度对生物炭产率与性质的影响[J].浙江农业学报,2016,28(7):1216-1223.

[19] 黄玉威.生物炭微观解剖结构表征及理化性质研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2018.

[20] 肖欣.生物炭的多级结构特征、构效关系及其吸附作用研究[D].杭州:浙江大学,2018.

[21] 王玲丽,黄谷城,罗毅,等.生物质炭现今的发展综述[J].江西化工,2018(2):51-52.

[22] LEHMANN J. A handful of carbon[J]. Nature, 2007, 447(7141):143-144.

[23] MARRIS E. Putting the carbon back; Black is the new green[J]. Nature, 2006, 442(7103):624-626.

[24] WOLFF D, AMONETTE J E, STREET-PERROTT F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change[J]. Nat Commun, 2010, 1:1-9.

[25] 解钧.农田土壤中莠去津和乙氧氟草醚污染的生物炭修复研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2020.

[26] 王睿.新型生物炭对设施菜地吡虫啉和啉虫脒的强化降解研究[D].泰安:山东农业大学,2020.

[27] 蒋靖伯伦,杨再磊,马雯琪,等.生物炭对草铵膦污染农田土壤呼吸的影响[J].新疆农业大学学报,2019,42(6):444-450.

[28] 赵海成,郑桂萍,靳明峰,等.连年秸秆与生物炭还田对盐碱土理化性状及水稻产量的影响[J].西南农业学报,2018,31(9):1836-1844.

[29] 黎嘉成,高明,田冬,等.秸秆及生物炭还田对土壤有机碳及其活性组分的影响[J].草业学报,2018,27(5):39-50.

[30] 罗梅,田冬,高明,等.紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应[J].环境科学,2018,39(9):4327-4337.

[31] 徐国鑫,王子芳,高明,等.秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J].环境科学,2018,39(1):355-362.

[32] 田冬.农田生态系统碳收支对秸秆与生物炭还田的响应[D].重庆:西南大学,2017.

[33] 田冬,高明,黄蓉,等.油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应[J].环境科学,2017,38(7):2988-2999.

[34] 侯亚红,王磊,付小花,等.土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制[J].环境科学,2015,36(7):2655-2661.

[35] 郑悦.生物炭与秸秆还田对盐碱地水稻土壤理化性状及产量的影响[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2015.

[36] 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.

[37] 刘冲,刘晓文,吴文成,等.生物炭及炭基肥对油菜菜生长及吸收重金属的影响[J].中国环境科学,2016,36(10):3064-3070.

[38] 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):14-19.

[39] 战秀梅,彭靖,王月,等.生物炭及炭基肥改良棕壤理化性状及提高花生产量的作用[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1633-1641.

[40] 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.

[41] 张牡丹.几种外源物缓解环境胁迫对植物生理影响的研究[D].兰州:西北师范大学,2019.

[42] 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.

[43] 陈坦,周泽宇,孟瑞红,等.改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果[J].环境科学,2019,40(4):1842-1848.

[44] 李冉,孟海波,沈玉君,等.改性生物炭对猪粪堆肥过程重金属钝化效果研究[J].农业环境科学学报,2018,37(10):2304-2311.

[45] 胡红青,黄益宗,黄巧云,等.农田土壤重金属污染化学钝化修复研究进展[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1676-1685.

[46] 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,2016,37(9):3562-3574.

[47] 董双快,徐万里,吴福飞,等.铁改性生物炭促进土壤形态转化抑制植物砷吸收[J].农业工程学报,2016,32(15):204-212.

[48] 张振,杨红,尹芳,等.核桃壳生物炭对厌氧干发酵的影响[J].云南农业大学学报(自然科学),2020,35(5):885-891.

[49] 王粟,李家磊,史凤梅,等.玉米秸秆生物炭与牛粪混合厌氧发酵工艺优化[J].黑龙江农业科学,2020(6):87-93.

[50] 李丹妮,张克强,梁军锋,等.三种添加剂对猪粪厌氧干发酵的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(8):1777-1785.

[51] 章钦,罗景阳,操家顺,等.生物炭对剩余污泥厌氧发酵产酸的影响[J].环境科技,2019,32(1):1-6.

[52] 许彩云,靳红梅,常志州,等.麦秸生物炭添加对猪粪中温厌氧发酵产气特性的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(6):1167-1172.

[53] 陈真.温度对生物炭介导的鸡粪厌氧消化产气特性的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2015.

[54] 杨宇,梁精龙,李慧,等.废旧锂离子电池回收处理技术研究进展[J].矿产综合利用,2018(6):7-12.

[55] 代镜涛,杨瑛.生物炭材料制备锂离子电池负极的研究[J].湖北农机化,2020(10):44-45.

[56] 花莉,张成,马宏瑞,等.秸秆生物质炭土地利用的环境效益研究[J].生态环境学报,2010,19(10):2489-2492.

- [12] 程浩淼,成凌,朱腾义,等.新烟碱类农药在土壤中环境行为的研究进展[J].中国环境科学,2020,40(2):736-747.
- [13] 方加贵,余祥文,郑莉,等.新型烟碱杀虫剂对石榴蚜虫的防效试验初报(英文)[J].农业科学与技术:英文版,2016,17(7):1663-1666.
- [14] 袁家瑜,韩攀,王导,等.3种新烟碱类杀虫剂对月季长管蚜的室内毒力测定实验初报[J].南方农业,2020,14(2):155-157.
- [15] 徐晓勇.反抗性新烟碱杀虫剂的开发[J].科技创新导报,2016,13(1):164-165.
- [16] 谭海军.新烟碱类杀虫剂环氧虫啉及其开发[J].世界农药,2019,41(4):59-64.
- [17] KUDELSKA M M, LEWIS A, NG C T, et al. Investigation of feeding behaviour in *C. elegans* reveals distinct pharmacological and antibacterial effects of nicotine[J]. Invertebrate neuroscience, 2018, 18(4): 1-14
- [18] MACHADO P A, FU H, KRATOCHVIL R J, et al. Recovery of solanesol from tobacco as a value-added byproduct for alternative applications[J]. Bioresource technology, 2010, 101(3): 1091-1096.
- [19] YAN T J, ZHAO G J, WU F G, et al. Research progress on solanesol extraction from tobacco wastes[J]. Mini-reviews in organic chemistry, 2020, 17(1): 113-121.
- [20] 杜家文,黄建忠,江贤章.辅酶 Q10 生物合成代谢调控策略研究进展[J].生物工程,2020,6(1):135-137.
- [21] 柳华贵,方建军,金陵,等.茄尼醇转化高产辅酶 Q<sub>10</sub> 菌株的分离鉴定与发酵条件的研究[J].微生物学报,2008,48(2):157-163.
- [22] QIN B K, LIU L, PAN Y Y, et al. PEGylated solanesol for oral delivery of coenzyme Q<sub>10</sub> [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2017, 65(16): 3360-3367.
- [23] QI H M, ZHANG Q B, ZHAO T T, et al. Antioxidant activity of different sulfate content derivatives of polysaccharide extracted from *Ulva pertusa* (Chlorophyta) *in vitro* [J]. International journal of biological macromolecules, 2005, 37(4): 195-199.
- [24] 马玉兰,侯天德,张继,等.茄尼醇的抗氧化实验研究[J].食品研究与开发,2011,32(2):8-12.
- [25] XIONG Y, HOU T, LIU L, et al. Solanesol derived therapeutic carriers for anticancer drug delivery[J]. International journal of pharmaceutics, 2019, 572: 1-13.
- [26] 朱侠.活性氧在牙周炎中病理作用的研究进展[J].智慧健康,2020,6(9):71-72.
- [27] 张蕊,汪显国,任晓斌,等.茄尼醇对大鼠实验性牙周炎的影响[J].中国民族民间医药,2018,27(6):31-40.
- [28] 陈保汉,张君,余荷秀,等.医药中间体茄尼醇的体外抗菌活性研究[J].齐鲁药事,2007,26(9):558-559.
- [29] 王玲娜,姚佳欢,马超美.绿原酸的研究进展[J].食品与生物技术学报,2017,36(11):1121-1130.
- [30] WANG Z Y, LAM K L, HU J M, et al. Chlorogenic acid alleviates obesity and modulates gut microbiota in high-fat-fed mice[J]. Food science & nutrition, 2019, 7(2): 579-588.
- [31] HE X Y, ZHENG S J, SHENG Y, et al. Chlorogenic acid ameliorates obesity by preventing energy balance shift in high-fat diet induced obese mice [J]. Journal of the science of food and agriculture, 2021, 101(2): 631-637.
- [32] 周佳彬,陈俊,刘臣,等.绿原酸对人胶质瘤细胞 U251 的抗肿瘤活性及其促凋亡机制[J].肿瘤防治研究,2019,46(5):389-394.
- [33] 张希,许旭东,田瑜,等.绿原酸衍生物的合成及体外抗肿瘤活性研究[J].中草药,2020,51(4):937-942.
- [34] 陈昱敏,许斯华,张泽,等.绿原酸对变形链球菌抑制作用的体外实验研究[J].赣南医学院学报,2019,39(4):341-342,346.
- [35] 石英.绿原酸在水产饲料中的应用研究进展[J].山东畜牧兽医,2018,39(3):83-85.
- [36] 李乃顺,冷向军,李小勤,等.绿原酸对草鱼鱼种生长、非特异性免疫和肉质的影响[J].水生生物学报,2014,38(4):619-626.
- [37] 朱原,李欣泽,郝贺,等.甜叶菊绿原酸发酵液对雏鸡肠道菌群的影响[J].饲料工业,2020,41(13):27-33.

(上接第 13 页)

- [57] 吴昱.施加生物炭对黑土区坡耕地土地生产力的影响[D].哈尔滨:东北林业大学,2019.
- [58] 刘怀优.生物炭在酸性土壤改良中的应用[J].生物化工,2020,6(4):126-129,142.
- [59] 廖萍,汤军,曾勇军,等.生物炭和石灰对酸性稻田水稻产量、土壤性状和经济效益的影响[J].中国稻米,2019,25(1):44-48.
- [60] 肖和友,李宏图,杨勇,等.烟草废弃物生物炭对植烟土壤、烤烟生长及经济效益的影响[J].湖南农业科学,2018(6):36-39,43.
- [61] 陈心想,何绪生,耿增超,等.生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J].生态学报,2013,33(20):6534-6542.
- [62] 唐光木,葛春辉,徐万里,等.施用生物黑炭对新疆灰漠土肥力与玉米生长的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(9):1797-1802.
- [63] LEHMANN J. Bio-energy in the black[J]. Frontiers in ecology and the environment, 2007, 5(7): 381-387.
- [64] LIU Q, ZHANG Y H, LIU B J, et al. How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis[J]. Plant and soil, 2018, 426(1/2): 211-225.
- [65] 李贞霞,任秀娟,祁雪娇,等.辣椒秸秆生物炭对酸化土壤交换性能及酶活性的影响[J].西北农业学报,2019,28(1):117-124.
- [66] 王义祥,辛思洁,叶菁,等.生物炭对强酸性茶园土壤酸度的改良效果研究[J].中国农学通报,2018,34(12):108-111.
- [67] 孙贇, MUHAMMAD SHAABAN, 何志龙, 等. 生物质炭对茶园土壤改良及茶叶品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(6): 9-14.
- [68] 毕于运. 秸秆资源评价与利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [69] SMITH P, MARTINO D, CAI Z C, et al. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture[J]. Agriculture ecosystems & environment, 2007, 118(1/2/3/4): 6-28.
- [70] 王丽渊. 生物炭对植烟土壤主要性状及烤烟生长的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014.
- [71] 郑悦. 生物炭与秸秆还田对盐碱地水稻土壤理化性状及产量的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2015.
- [72] 张芙蓉, 赵丽娜, 张瑞, 等. 生物炭对盐渍化土壤改良及甜瓜生长的影响[J]. 上海农业学报, 2015, 31(1): 54-58.
- [73] 《关于编制“十三五”秸秆综合利用实施方案的指导意见》印发[J]. 再生资源与循环经济, 2016, 9(12): 7.
- [74] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 新时代的中国能源发展[N]. 人民日报, 2020-12-22(010).
- [75] SHEN X, HUANG D Y, REN X F, et al. Phytoavailability of Cd and Pb in crop straw biochar-amended soil is related to the heavy metal content of both biochar and soil[J]. Journal of environmental management, 2016, 168(1): 245-251.
- [76] KUS'MIERZ M, OLESZCZUK P. Biochar production increases the polycyclic aromatic hydrocarbon content in surrounding soils and potential cancer risk[J]. Environmental science and pollution research, 2014, 21(5): 3646-3652.
- [77] 蔡婧. 城市个体黑碳暴露特征与儿童呼吸道健康效应关系研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- [78] 凌遵学, 张仁仁. 生物炭基尿素对棉花性状、产量及经济效益的影响[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(6): 58-60.
- [79] 郭海艳. 蟹壳生物炭对水体富磷除铅性能及其机理研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017.