

生物炭在农业领域应用的研究进展与前景

翁福军, 卢树昌

(天津农学院 农学与资源环境学院, 天津 300384)

摘要:生物炭是生物质在高温缺氧条件下热裂解的产物。其具有多孔性、高阳离子交换量(CEC)和低容重特征,对土壤性状改良、环境污染修复和作物生长等方面都有一定的积极作用。生物炭的农业应用作为一种农业碳汇减排和提高土壤生产力技术途径已得到广大学者的关注。现从土壤性状改善、作物生长、生态环境效应方面综述了生物炭的研究进展,基于生物炭的研究方法、范围、内容及推广应用等方面存在的几大问题,展望了生物炭今后的研究趋向与前景,指出生物炭在农业领域中的研究应用存在巨大潜力,以期生物炭在农业领域的有效应用与推动现代农业可持续发展提供遵循依据。

关键词:生物炭;农业;生产;环境;应用

中图分类号:S 154.2;S 131.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)08-0199-05

21 世纪,人地矛盾突出问题日趋严重,由此造成农业土壤质量退化的问题越来越受到人们重视。其中,农业土壤碳库问题对土壤肥力质量、环境质量退化的影响成为人们关注的焦点。如何减少土壤碳的排放、补充汇集碳于土壤之中得到国内外学者广泛研究。Sombroek^[1]对亚马逊河地区的黑色土壤研究引起了全球众多学者对生物炭(biochar)的广泛关注。2007 年,生物炭在澳大利亚第一届国际生物炭会议上取得统一命名^[2]。广义上,生物炭属于黑炭范畴,是由生物质在无氧或缺氧条件下经过高温裂解产生的一种碳质材料^[3]。常见生物炭的种类包括秸秆炭、木炭、草炭、竹炭等^[4]。

生物炭主要由芳香结构、烷基和单质碳组成的复杂化合物,其表面含有羧基、羟基和芳香环等官能团,一般含 C 量在 60% 以上,除 C 元素还含有 H、O、N、S 等元素^[5-7]。具有自身容重小,多孔性,比表面积大,呈碱性和

高 CEC 等特性^[8-10]。但是,原材料不同、制备工艺条件的差异也会导致生物炭比表面积、结构与碳素含量等理化性状差异显著^[11]。以木本植物为材料制作的生物炭,其含碳量明显高于畜粪类生物炭,而灰分含量明显低于后者^[12-13],并且原料中木质素含量高的原料与生物炭的产出是成正比的^[14-15]。

美国、巴西、澳大利亚等国家在生物炭生产工艺与应用研究方面处于世界领先地位。英国洛桑试验站于 2009 年在 Woburn 农场启动了有关生物炭的长期定位试验计划^[16]。巴西研究组织机构 EMBRAPA 开展的生物炭项目已进入了实施推广阶段,目标是创造更多的“肥沃高碳黑土”。我国研究生物炭起步较晚。中国农业大学在 2010 年 6 月 12 日成立了中国首个生物炭网络中心,这将为生物炭在国内的研究与应用起到一定的积极推动作用。据研究文献显示,全球关于生物炭的期刊科研论文数从 2000 年的几篇上升到 2009 年的 80 篇以上。尤其在 2010 年以后,关于生物炭的研究越来越多。据不完全统计,2010 年至今有关生物炭的科技论文达到 2 000 余篇,其中约 75% 的研究涉及农业领域方面。国内外的科研工作者相继对生物炭在土壤改良、作物生长、生态环境效应及其自身性质等方面进行了大量研

第一作者简介:翁福军(1991-),男,硕士研究生,研究方向为农田土壤与作物生长环境关系。E-mail:wengfujun@126.com.

责任作者:卢树昌(1970-),男,博士,教授,现主要从事农田土壤质量与植物营养等教学与科研工作。E-mail:lsc9707@163.com.

基金项目:天津市科技支撑重点计划资助项目(13ZCZDNC00500)。

收稿日期:2014-11-10

Abstract: Molecular marker is of great significance in the study of genetic distance of pomegranate and pomegranate breeding. This paper reviewed the advancement of molecular marker in pomegranate, studied on the differences of genetic diversity in the world by comparing 4 kinds of common molecular markers in pomegranate research, and aimed at providing reference for the future research on molecular markers and a theoretical basis on the introduction and development of germplasm resources of pomegranate.

Keywords: pomegranate; molecular marker; genetic diversity; research progress

究,并取得了一些重要研究成果。

现基于国内外研究文献,分析生物炭在农业生产领域应用状况,提出研究应用的主要问题所在,并对其研究前景进行展望,以期为生物炭在农业生产中的合理应用与推动现代农业可持续发展提供理论依据。

1 生物炭在农业方面的研究与应用

1.1 改良土壤性状方面的研究与应用

1.1.1 土壤物理性状 生物炭对土壤改良功能源于南美亚马逊盆地黑土(Terra Preta)的发现及研究^[3]。由于生物炭具有低容重的特性,施入土壤可以有效降低土壤容重,改善土壤孔隙度,并且其亲水性官能团可以增加土壤持水量^[17]。有试验表明,当生物炭用量为 50 g/kg 和 200 g/kg 时,其对较低肥力水平土壤的持水量、团粒数量和容重均产生明显影响,但对较高肥力土壤,生物炭仅对土壤容重产生明显影响^[18]。另外,生物炭对土壤温度也有一定的影响。生物炭自身的黑色具有一定吸热效果,可提高土壤温度。但黄剑^[19]对华北平原进行 4 年定位试验得出生物炭施用对土壤温度无显著影响。这表明,生物炭对地温的影响在不同季节存在差异,深冬初春季节地温偏低的时期,增施生物炭对提高地温的作用会更明显。

1.1.2 土壤化学性状 Novak 等^[20]研究发现,生物炭施入酸性土壤中会使 pH 值增加,但是对碱性土壤 pH 值的影响不显著;陈红霞等^[21]在华北平原地区进行了 3 年定位试验表明,施用生物炭有效提高了土壤 CEC。也有试验指出生物炭对较低 CEC 与酸性土壤的 CEC 改善作用十分明显,但对石灰性土壤的 CEC 没有明显作用^[22]。这与生物炭表面带有羧基、羟基、苯酚环等官能团,使生物炭具有很高的阳离子交换量有关^[23]。我国农田土壤有机质含量偏低,低于 15 g/kg 的耕地占耕地总面积的 65%^[24]。柯跃进等^[25]试验结果显示,添加生物炭可提高土壤总有机碳含量,并指出低温裂解生物炭对土壤有机碳增加的贡献高于高温裂解生物炭。同样,张晗芝等^[26]试验结果表明,施用生物炭量与土壤有机质含量呈极显著线性相关,原因是生物炭促进了土壤有机分子聚合,有利于土壤有机质的形成。高德才等^[27]试验证明,少量生物炭对土壤氮淋洗影响不明显,而生物炭添加量达 2% 及以上时,土壤总氮含量与 NH_4^+ 淋洗显著降低,其添加量达 4% 及以上时,土壤 NO_3^- 淋洗显著降低。Magrini-Bair 等^[28]也认为施用生物炭可对旱地土壤氮素具有缓释作用。刘方等^[29]研究发现生物炭可以有效提高设施菜田土壤的有效氮、有效磷及有效钾的含量。另外,Oguntunde 等^[30]报道,土壤施用生物炭后对可交换态钙、镁、钾、钠和有效磷均有所升高。生物炭对土壤氮磷变化的影响,与生物炭具有较大比表面积、带

有大量负电荷,增强土壤吸附性能有关^[31]。

1.1.3 土壤生物性状 由于生物炭的施入,改变了土壤酸碱状况和通气条件,土壤微生物种群结构发生变化。如土壤慢生根瘤菌科、放线菌等微生物种类丰度升高,而链霉菌科与微单孢菌科等微生物种类的丰度均降低^[32-33]。目前试验研究表明,生物炭表面的空隙可以为微生物提供有利的活动场所,会促进土壤微生物的生长与繁殖,如土壤中施加生物炭会增强蚯蚓的活动性^[34-35]。同样,生物炭施用可提高土壤微生物的生物量。但是,生物炭的工艺对土壤微生物的影响差异很大^[36]。据研究发现,不同温度热裂解下的生物炭对微生物量影响不同。如 450℃ 下的生物炭会增加土壤微生物量,而再升高热裂解温度生物炭对微生物量作用不明显^[37]。可见,生物炭对土壤微生物的影响因素十分复杂,其作用机制需要进一步的研究。

1.2 生物炭对作物生长的影响

据报道,施用生物炭可以促进作物生长提高作物产量。生物炭在海棠作物试验表明,添加 80 g/kg 的生物炭显著提高了海棠的株高、鲜重、光合参数和抗氧化酶含量,并且通过生物炭吸附作用降低了土壤酚类物质和海棠幼苗疾病的发生^[38]。水稻作物上试验结果显示,施入生物炭后,水稻生育前期的根系根长、体积、活跃吸收面积和总吸收面积均提高,并且水稻生育后期根系衰老延缓^[39]。小麦作物试验研究表明,生物炭高量施入土壤后,促进了小麦群体叶面积指数^[40]。同样,果树中试验表明,施加生物炭对提高库尔勒香梨叶片中 N、Ca、Mg、Fe、Zn、Cu、Mn 元素含量效果较好^[41]。Jeffery 等^[42]研究发现,在土壤中施加生物炭可以提高作物产量,增产达 10%。勾芒芒等^[43]进行了番茄盆栽试验发现,施加生物炭后番茄产量显著提高,最高增产幅度达 170%。同样,生物炭对菜豆^[44]、玉米^[45]、水稻^[46]等作物也有增产效果。

但是,也有研究显示,施加生物炭与提高作物生长的关系不是正相关。张晗芝等^[26]研究提出,施加生物炭对玉米苗期生长是抑制的,其原因是由于生物炭具有高 C/N 比,会降低土壤有效氮含量,抑制了玉米对有效氮的吸收。

1.3 生物炭在农业生态环境效应方面的研究进展

1.3.1 对农田温室气体排放影响 农田中 CO_2 与 N_2O 等温室气体的排放对气候的影响是明显的,降低这类气体的排放日益得到关注。将生物炭施入土壤中可增加土壤中的“C 库”,并且由于生物炭的稳定性很高,可以将 C 元素长期封存在土壤中,这将有利于减缓温室效应^[47]。国外比较关注有关生物炭的碳汇减排方向^[48]。International Biochar Initiative(ABI)向联合国气候变化公约及联合国沙漠治理委员会提交了建议报告,建议将生

生物炭作为实现碳汇减排的重要材料,并积极努力将生物炭列入碳减排贸易产品^[49]。陆海楠等^[50]对生物炭进行了室内培养试验发现,不同处理的生物炭均会降低土壤CO₂的释放率,并且发现进行水洗的生物炭效果更佳。生物炭的施用一方面可降低氮素淋洗,另一方面通过土壤通气状况的改善抑制了微生物对氮素的反硝化作用,从而减少了氮氧化物的排放^[51]。Rondon等^[52]试验表明,在土壤中施加生物炭可显著降低N₂O的排放。并有试验得出,在稻田中采用生物炭与氮肥配合施用比单施生物炭对N₂O的抑制量高19%~23%^[53]。但随着生物炭量的增加对N₂O的抑制呈增-降-增趋势^[54]。Maris^[55]指出生物炭技术是解决全球气候问题的有效途径。Lehmann^[56]提出利用生物炭技术可以每年降低10亿t温室气体。随后利用生物炭技术在碳汇减排方面的应用逐渐引起了广泛学者的关注^[57]。

1.3.2 在修复环境污染中的作用 生物炭具有比表面积大、负电荷多、官能团丰富等特点,使其具有很强的吸附能力,能够吸附和固定环境中的重金属,可以成为对环境中重金属的“吸附剂”或者“钝化剂”^[58-59]。朱庆祥^[60]研究表明,在土壤中施用生物炭,有效降低了Pb、Cd的浓度,土壤重金属被“钝化”。同时,盆栽试验结果显示,加入生物炭可以有效的降低黑麦草从土壤中对多环芳烃(PAHs)的富集^[61]。生物炭还可以吸附土壤中农药等有机污染物,随着作用时间的延长,仍会有大量残留农药被吸附^[62]。Song等^[63]研究表明,生物炭施入量越高,对六氯苯(HCB)的挥发抑制作用越强。不同酸碱条件与生物炭制备工艺,生物炭对土壤污染修复不同。Hual等^[64]发现生物炭可以通过提高土壤pH值,从而降低重金属在土壤中的有效性,对重金属产生钝化、固定作用。有研究试验采用200℃工艺下制备的生物炭可吸附680 mmol/kg的Pb²⁺,是商品活性炭吸附量的6倍^[65]。因此,向污染土壤中添加生物炭已成为降低有机物污染的有效手段。

2 研究应用存在的主要问题

当前主要的试验研究类型有室外田间试验,室内盆栽与土柱试验,其中以室内试验为主,田间定位试验做的不多。并且对一些试验结果分析还不够透彻,对生物炭具体的作用机制方面缺乏深入的研究。

大多试验时间相对较短,缺少中长期定位试验的研究。尤其试验研究多集中于大田生产体系,在设施生产体系的研究还远远不够。

生物炭的应用有一定局限性。生物炭会增加土壤的碱化程度。pH值的升高会引起土壤生态环境的一系列改变,如土壤微生物结构、作物生长、金属离子活性及农药等污染物水解都会产生影响,尤其是对南方适宜酸

性条件下植物生长的影响。

当前对生物炭在农业方面的研究以改良土壤性状为主,对地上作物的影响多体现在产量方面,缺乏对作物具体生理生化指标的微观研究;对地下土壤中微生物结构变化的影响机制同样需要进一步研究。

目前,在国内还没有实现生物炭的大面积推广应用,还是主要停留在试验研究的阶段。主要是由于目前还没有一套比较完善的生物炭产业链,生物炭作为生产加工的副产品并没有引起企业的重视。加工的生产设备也大多从国外进口,不易于在农户中间推广。从国家政策扶持方面来看,大面积推广生物炭应用需要政府经济、政策上扶持。

3 研究趋向及前景

我国生物炭产业应该建立在以废弃资源循环利用的基础之上,以避免环境污染为基础,保障粮食安全为前提,从根本上解决资源的浪费问题,利用生物炭还田技术实现碳汇减排。我国年产大田作物的秸秆产量可达到6.5亿t,全国年秸秆还田量超过1亿t,约占秸秆总量的20%,而被浪费的秸秆量超过50%^[66-67]。每年由于农田秸秆的随意放置而造成的面源污染COD总量约为488万t,占2013年全国工业生产和生活排放的COD总量的20.7%^[68]。将这些农业废弃物加工成生物炭既可以减少资源的浪费又可以避免农业废弃物所带来的二次污染。我国研究生物炭领域的带头人陈温福院士在2006年提出了“农林废弃物炭化还田技术”理念。我国全部稻田面积3 043.2万hm²^[69],秸秆产量为12 t/hm²,以秸秆碳含量40%、转化率30%计算,若将全部秸秆加工成生物炭,可增加土壤碳汇43.8 Tg(×10⁶t)以上。可见,生物炭在碳汇减排方面的潜力巨大。

生物炭的制备方法不同,生产的生物炭理化性质差异较大。我国土壤类型复杂多样,应根据不同类型土壤筛选和制备适宜的生物炭。生物炭的生产应有一套完善的标准体系,为生物炭能够在我国顺利的推广做好理论基础。

今后应加强生物炭施入土壤后对整个土壤生态系统包括土壤微生物、土壤理化性质、作物根部生长以及土壤污染修复系统的研究。

就目前的试验研究结果方面来看还存在着许多歧义。应大力开展定位联网合作模式,使研究成果共享,这会对生物炭未来的发展奠定大量的数据基础。

应加强对生物炭负面效应的研究,为生物炭进一步推广做好相关的理论基础及预防措施,避免产生不可扭转的恶性循环。

参考文献

- [1] Sombroek W G. Biomass and carbon storage in the Amazon ecosystems [J]. *Intersiencia*, 1992, 17: 269-272.

- [2] 何绪生,耿增超,余雕,等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报, 2011(2):1-7.
- [3] Antal M J, Gronli M. The art science and technology of charcoal production[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 2003, 42: 1619-1640.
- [4] 张明伟. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
- [5] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. Black carbon in soils: the use of benzene carboxylic acids as specific markers[J]. Org Geo Chem, 1998, 29(4): 811-819.
- [6] 张阿凤, 潘根兴, 李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2459-2463.
- [7] Goldberg E D. Black Carbon in the Environment: Properties and Distribution[M]. New York: John Wiley Press, 1985.
- [8] Gerard C, Zofia K, Stavros K, et al. Relations between environmental black carbon sorption and geochemical sorbent characteristics[J]. Environ Sci Technol, 2004, 38(13): 3632-3640.
- [9] Busschei W J, Novak J M, Evans D E, et al. Influences of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand[J]. Soil Science, 2010, 175(1): 10-14.
- [10] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, et al. Oxidation of black carbon by biotic and a biotic processes[J]. Organic Geochemistry, 2006, 37: 1477-1488.
- [11] Bridgewater A V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass[J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 91(2/3): 87-102.
- [12] Marco K, Peter S N, Mark G J, et al. Dynamic molecular structure of plant biomass derived black carbon (biochar)[J]. Environ Sci Technol, 2010, 44(4): 1247-1253.
- [13] 王群. 生物质源和制备温度对生物炭构效的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [14] Demirbas A. Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues[J]. Anal Appl Pyrol, 2004, 72: 243-248.
- [15] Fushimi C, Araki K, Yamaguchi Y, et al. Effect of heating rate on steam gasification of biomass. Thermo gravimetric-mass spectrometric (TG-MS) analysis of gas evolution[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2003, 42: 3929-3936.
- [16] 潘根兴, 张阿凤, 邹建文, 等. 农业废弃物生物黑炭转化还田作为低碳农业途径的探讨[J]. 生态与农村环境学报, 2010(4): 394-400.
- [17] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3/4): 443-449.
- [18] 黄超, 刘丽君, 章明奎. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2011, 37(4): 439-445.
- [19] 黄剑. 生物炭对土壤微生物量及土壤酶的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [20] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. Soil Science, 2009, 174: 105-112.
- [21] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2930-2934.
- [22] Zwieter L V, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, 327: 235-246.
- [23] Singh B P, Hatton B J, Singh B, et al. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2010, 39(4): 1224-1235.
- [24] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(5): 282-289.
- [25] 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 等. 水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其CO₂释放的影响[J]. 环境科学, 2014(1): 93-99.
- [26] 张哈芝, 黄云, 刘钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2713-2717.
- [27] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2014(6): 54-61.
- [28] Magrini-Bair K A, Czernik S, Pilath H M, et al. Biomass derived, carbon sequestering, designed fertilizers[J]. Annals of Environmental Science, 2009, 3(1): 217-225.
- [29] 刘方, 冯仕江, 张雷一, 等. 生物质炭对喀斯特山区连作蔬菜地土壤有效养分及水分的影响[J]. 北方园艺, 2014(7): 158-162.
- [30] Oguntunde P G, Fosu M, Ajayi A E, et al. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2004, 39(4): 295-299.
- [31] Lehmann J, Silva J P, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. Plant and Soil, 2003, 249(2): 343-357.
- [32] Anderson C R, Hamonts K, Clough T J, et al. Biochar does not affect soil N-transformations or microbial community structure under ruminant urine patches but does alter relative proportions of nitrogen cycling bacteria[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2014, 191: 63-72.
- [33] Craig R A, Leo M C, Tim J C, et al. Biochar induced soil microbial community change: Implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus[J]. Pedobiologia, 2011, 54: 309-320.
- [34] Pietikainen J, Kiikkila O, Fritze H. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus[J]. Oikos, 2000, 89(2): 231-242.
- [35] Grossman J M, Oneill B E, Tsai S M, et al. Amazonian an throsols support similar microbial communities that differ distinctly from those extant in adjacent, unmodified soils of the same mineral[J]. Microb Ecol, 2010, 60(1): 192-205.
- [36] Gaskin J, Steiner C, Harris K, et al. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use[J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2008, 51: 2061-2069.
- [37] Chan K Y, Van Z L, Meszaros I, et al. Using poultry litter biochars as soil amendments[J]. Australian Journal of Soil Research, 2008, 46: 437-444.
- [38] Wang Y F, Pan F B, Wang G H, et al. Effects of biochar on photosynthesis and antioxidative system of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings under replant conditions[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 175: 9-15.
- [39] 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(8): 1445-1451.
- [40] 曾爱. 生物炭对壤土土壤理化性质及小麦生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [41] 刘茂, 柴仲平, 盛建东, 等. 施用有机肥对库勒勒香梨叶片营养元素及果实产量、品质的影响[J]. 北方园艺, 2014(10): 159-163.
- [42] Jeffery S, Verheijen F G, Avander V M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems and Environmental, 2011, 144: 175-187.
- [43] 勾芒芒, 屈忠义, 杨晓, 等. 生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究[J]. 农业机械学报, 2014(1): 137-142.
- [44] Yan G Z, Kazuto S, Satoshi F. The effects of bamboo charcoal and phos-

phorus fertilization on mixed planting with grasses and soil improving species under the nutrients poor condition[J]. Journal of the Japanese Society of Revegetation Technology, 2004, 30(1): 33-38.

[45] Kimetu J M, Lehmann J, Ngoze S O, et al. Reversibility of soil productivity decline with matter of differing quality along a degradation gradient [J]. Ecosystems, 2008, 11(5): 726-739.

[46] Hidetoshi A, Benjamin K S, Haefele M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. Field Crops Research, 2009, 111: 81-84.

[47] Xie Z B, Xu Y P, Liu G, et al. Impact of biochar application on nitrogen nutrition of rice, greenhouse-gas emissions and soil organic carbon dynamics in two paddy soils of China[J]. Plant Soil, 2013, 370: 527-540.

[48] Sánchez M E, Lindao E, Margaleff D, et al. Pyrolysis of agricultural residues from rape and sunflowers: Production and characterization of bio-fuels and biochar soil management[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2009, 85(1/2): 142-144.

[49] Lehmann J. A handful of carbon[J]. Nature, 2007, 443: 143-144.

[50] 陆海楠, 胡学玉, 陈威. 生物炭添加对土壤 CO₂ 排放的影响[A]//农业部环境保护科研监测所、中国农业生态环境保护协会. 农业环境与生态安全-第五届全国农业环境科学学术研讨会论文集[C]. 农业部环境保护科研监测所、中国农业生态环境保护协会, 2013: 5.

[51] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems-A review [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11(2): 403-427.

[52] Rondon M, Ramirez J, Lehmann J. Charcoal additions reduce net emissions of greenhouse gases to the atmosphere. In: Proceedings of the 3rd USDA Symposium on Greenhouse Gases and Carbon Sequestration in Agriculture and Forestry. Baltimore[M]. MD: University of Delaware Press, 2005.

[53] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China[J]. Agriculture, ecosystems and Environment, 2010, 139(4): 469-475.

[54] 罗焯. 芦竹制备生物炭的特性表征及对土壤 N₂O 排放的抑制[D].

青岛: 中国海洋大学, 2012.

[55] Marris E. Black is the new green[J]. Nature, 2006, 442: 624-626.

[56] Lehmann J. A handful of carbon[J]. Nature, 2007, 447: 143-144.

[57] Sohi S, Lopez-Capel E, Krull E, et al. Biochar, climate change and soil: a review to guide future research [R]. CSIRO Land and Water Science Report, 2009.

[58] Hartley W, Dickinson N M, Riby P, et al. Arsenic mobility in brownfield soils amended with green waste compost or biochar and planted with Miscanthus [J]. Environmental Pollution, 2009, 157: 2654-2662.

[59] Houben D. Heavy metal mobility in contaminated soils as affected by plants, amendments and biochar. Implications for phytostabilization[D]. Belgium: Universite catholique de Louvain, 2013.

[60] 朱庆祥. 生物炭对 Pb、Cd 污染土壤的修复试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.

[61] 花莉, 陈英旭, 吴伟祥, 等. 生物质炭输入对污泥施用土壤-植物系统中多环芳烃迁移的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(8): 2419-2424.

[62] 余向阳, 王冬兰, 母昌立. 生物质炭对敌草隆在土壤中的慢吸附及其对解吸行为的影响[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(5): 1011-1015.

[63] Song Y, Wang F, Bian Y, et al. Bioavailability assessment of hexachloro benzene in soil as affected by wheat straw biochar[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 217-218: 391-397.

[64] Hual L, Wu W, Liu Y. Reduction of nitrogen loss and Cu and Zn mobility during sludge composting with bamboo charcoal amendment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2009, 16: 1-9.

[65] Cao X D, Ma L N, Gao B, et al. Dairy-Manure Derived Biochar Effectively Sorbs Lead and Atrazine[J]. Environ Sci Technol, 2009, 43: 3285-3291.

[66] 中华人民共和国农业部. 中国生物质资源可获得性评价[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.

[67] 石元春. 中国生物质原料资源[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 16-23.

[68] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.

[69] 孟军, 陈温福. 中国生物炭研究及其产业发展趋势[J]. 沈阳农业大学学报(社会科学版), 2013(1): 1-5.

Prospect and Research Advance in Biochar Application in Agricultural Fields

WENG Fu-jun, LU Shu-chang

(College of Agriculture and Resources and Environment, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384)

Abstracts: Biochar is the product of pyrolysis of biomass at high temperature under anoxic condition. Porous, high cation exchange capacity (CEC) and low bulk density are main features of biochar, and it has a positive effect on improvement of soil properties, remediation of environmental pollution and crop growth, etc. As a technology way of reducing agricultural carbon emission and enhancing soil productivity, the agricultural application of biochar has received attentions from scholars. Based on soil improvement, crop growth and ecological environment effects, the research advances on biochar application were reviewed in agricultural fields. Finally, the research prospects and huge potential of biochar in the agricultural fields were pointed through several problems on research methods, scope, content and application of biochar. This study would aim to provide basis of effective use of biochar in agricultural fields and promotion to sustainable development of modern agriculture.

Keywords: biochar; agriculture; production; environment; applications