

生物质炭改良土壤及对作物效应的研究进展*

王典¹ 张祥¹ 姜存仓^{1**} 彭抒昂²

(1. 华中农业大学资源与环境学院 武汉 430070; 2. 华中农业大学园艺林学学院 武汉 430070)

摘要 生物质炭是作物秸秆等有机物质在限制供氧的条件下加热而成。生物质炭具有养分含量丰富、碱性和高稳定性等特点,因此可以降低土壤酸度,有效截留土壤养分,并在一定程度上促进养分吸收而提高作物产量。本文主要综述了生物质炭制备的影响因素及其施用后对土壤理化性质、作物生长发育和养分吸收等方面的影响。由于生物质炭在国内外的研究仍处于起步阶段,研究过程中所采取的方法、所用不同来源的生物质炭以及研究的具体对象等不尽相同,研究的结果显示生物质炭在某些方面的作用仍存在不同结论。目前,生物质炭的研究多集中在表面宏观现象上,对其深入的机理研究仍较欠缺,因此,需要科技工作者的进一步探索,文章最后阐述了未来对该领域研究的一些观点。

关键词 生物质炭 土壤理化性质 作物生长 养分吸收 生物量炭

中图分类号: S156.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2012)08-0963-05

Biochar research advances regarding soil improvement and crop response

WANG Dian¹, ZHANG Xiang¹, JIANG Cun-Cang¹, PENG Shu-Ang²

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract Biochar is produced by heating crop residues and other organic substances under limited oxygen conditions. Because biochar is rich in nutrients and highly alkaline and stable, it has been reported to effectively reduce soil acidity, retain soil nutrients, promote nutrient uptake and enhance crop yield. This paper reviewed progress in biochar research, which (domestic or international) is at infancy stage. Because of the different methods of biochar research and various biomass carbon resources for different crops, great controversies have existed about the different roles of biochar. At present, biochar research has mainly focused on surface phenomena. As the study of such mechanism was still inadequate, researchers were required to make further explorations in this field. This review also discussed some strategies and areas for future biochar research.

Key words Biochar, Soil physiochemical property, Crop growth, Nutrient uptake, Biomass carbon

(Received Mar. 30, 2012; accepted May 31, 2012)

亚马逊盆地中部黑土在经历了几千年的历史演变过程中依然是世界上最肥沃的土壤之一,其中起关键作用的是一种叫做生物黑炭的物质。生物黑炭具有的多环芳香结构使其具有很强的化学和生物稳定性^[1],黑土中的关键成分是木炭,也称为生物质炭(Biochar)^[2]。生物质炭是作物秸秆等有机物质及其衍生物在限制供氧的条件下受热而成,也叫热裂解。我国是一个农业大国,年产秸秆 5×10^8 t以上,生物质炭施入土壤中不仅能提高养分利用率、减少

养分淋失,而且可以缓解由于养分淋失引起的环境问题,同时也为我国庞大秸秆资源的有效利用提供了一条新途径^[3]。生物质炭产品还可进一步提高碳负效应来缓解气候变化^[4]。然而,生物质炭的使用仍存在诸多争议,包括其在土壤改良方面的效果以及其是否会在土壤剖面移动^[5]等。研究表明,在高度风化低肥力土壤中,生物质炭可以在土壤肥力和生产力上起到积极作用^[6]。虽然生物质炭可以结合养分离子、降低土壤酸度、吸附有毒金属离子、改善土

* 中央高校基本科研业务费专项资金(2011PY048, 2011PY150)和现代农业产业技术体系项目资助

** 通讯作者:姜存仓(1976—),男,博士,副教授,主要从事植物营养机理与高效施肥研究。E-mail: jcc2000@mail.hzau.edu.cn
王典(1989—),女,硕士研究生,主要从事植物营养机理研究。E-mail: wangdian1988@webmail.hzau.edu.cn

收稿日期: 2012-03-30 接受日期: 2012-05-31

壤结构,但在肥力较高的土壤中还未观察到生物质炭的直接效应。这方面的研究,有待于更完善的评估体系^[5],才能更有效地推广使用生物质炭。本文结合国内外有关生物质炭的最新研究进展,重点阐述了其制备的影响因素及其在土壤理化性质、植物生长发育和养分吸收等方面的影响。

1 生物质炭制备的影响因素

生物质炭的性质受原材料、热解温度及速度影响非常大。不同的生产环境得到不同性状的生物质炭,从而会产生不同的土壤改良效果^[7]。生物质炭呈碱性,且裂解温度越高,pH越高^[8]。生物质炭之所以呈碱性,是因其含有一定量灰分,矿质元素如钠、钾、钙、镁等以氧化物或碳酸盐的形式存在于灰分中,溶于水后呈碱性^[9]。生物质炭中营养元素含量与其来源物料中元素的含量呈直线相关。Yuan和Xu^[10]比较了由油菜秸秆、小麦秸秆、玉米秸秆、稻草、稻糠、大豆秸秆、花生秸秆、蚕豆秸秆和绿豆秸秆制备的生物质炭的元素含量,发现由于4种豆科植物秸秆中钙、镁和钾含量高于5种非豆科植物残体,4种豆科秸秆制备的生物质炭中钙、镁和钾的含量也明显高于5种非豆科植物残体制备的生物质炭。Gaskin等^[11]指出热解温度对生物质炭的质量尤其是表面化学性质和孔径大小影响非常大,生物质炭的碳含量和养分浓度受制备生物质炭的原材料类型影响较大。畜禽粪便、草本植物及禾本科植物生产的生物质炭均具有较高的灰分含量和较低的含碳量,然而木本植物生物质炭具有较低的灰分含量和较高的含碳量,因此木本植物生物质炭的pH相对较低。不同温度及升温速度下对生物质进行热裂解均可产生生物质炭,只是生物质炭的产量、性质和特点有所不同,其中尤以慢速热裂解的生物质炭产率最高^[7,12]。

2 生物质炭对土壤理化性质的影响

2.1 生物质炭对土壤物理性质的影响

植物残体收获时从土壤生态系统中带走了大量植物营养物质,即使加入化肥、有机肥和其他土壤调理剂也弥补不了持续的作物残体带走的营养成分。这种现象会导致土壤有机质减少,土壤结构退化,阳离子交换量(CEC)减少,土壤保持养分和水分的能力降低,土壤生产力下降等一系列土壤退化现象。生物质炭作为热解过程的副产品,可以把生物质的木质纤维素转变成液体能源产物,然后施入到生物质来源的土壤^[13-15],由于在热解过程中,原材料中大部分钙、镁、钾、磷和微量元素以及几乎一

半的氮、硫已经进入到生物质炭中,因此其作为土壤改良剂可以返还大部分养分到土壤中,提高土壤生产力^[16-17]。

生物质炭对土壤理化性质的改善效果与生物质炭施用量和土壤肥力水平有关。当生物质炭用量为 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,其对土壤物理性质的影响不明显。但当生物质炭用量为 $50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $200\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,其对肥力水平较低土壤的水稳定性团聚体数量、容重和饱和持水量均产生明显影响,但对肥力水平较高的土壤,生物质炭仅对土壤容重产生明显影响,对水稳定性团聚体数量和田间持水量的影响不显著^[18]。黄超等^[18]指出生物质炭在肥力水平较低土壤上的改良效果明显高于肥力水平高的土壤,且效果随其用量的增加而更好,而在肥力水平较高的土壤中,高量施用生物质炭($200\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)却可导致土壤微生物生物量下降。

生物质炭作为土壤改良剂,普遍被认为具有很高的稳定特性难于分解,可有效提高土壤肥力,服务于生态系统^[19]。生物质炭对土壤物理性质改善可以归纳为提高土壤孔隙度^[20-21]和表面面积^[22],降低土壤的拉伸强度进而提高根部熔深^[23],降低土壤容重,在重力排水平衡上可以保持更多的水,有更大水截留潜力和表面积^[22]。

2.2 生物质炭对土壤化学性质的影响

我国南方热带亚热带地区分布着大面积的酸性土壤,pH低、铝毒和肥力低使得在此类土壤上生长的植物产量低^[24]。生物质炭一般呈碱性且富含多种养分元素,可通过影响土壤化学性质对土壤进行改良。Yuan等^[10]利用9种植物材料低温热解生产生物质炭,然后施用于酸性土壤上,结果表明分别加入 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 该生物质炭的9个土壤处理的pH均得到提高,生物质炭的石灰效应与其碱度有关,并且发现土壤pH和生物质炭的碱度有强烈线性相关关系;而在生产生物质炭的原材料中,豆科植物生物质炭相对非豆科植物生物质炭在酸性土壤改良上有更大的石灰效应。袁金华等^[24]通过室内培养试验研究加入 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 稻壳炭对酸性红壤和黄棕壤的改良效果,结果表明,加入稻壳炭后,红壤和黄棕壤的pH、土壤交换性盐基数量和盐基饱和度均较不加稻壳炭的对照处理有不同程度增加,有效截留了土壤养分以保持土壤肥力;同时添加生物质炭的处理钙和镁的有效性有了很大提高,土壤交换性酸也有降低趋势。但也有研究表明在玉米苗期,生物质炭增加了土壤有机碳和全氮的含量,但对土壤全磷、有效磷以及pH没有影响^[25]。Glaser等^[26]认为,生物质炭进入土壤后,其芳香结构边缘在生物和(或)非生物的氧化作用下能形成羧基官能团,进一步增加对阳离

子的吸附值。土壤 CEC 的形成主要与土壤有机质含量和黏粒含量有关,因此在有机质较低的土壤中,施用生物质炭对提高土壤 CEC 的作用特别明显,而在有机质高的土壤中,由于土壤本身已具有较高 CEC,生物质炭对提高土壤 CEC 的作用相对较弱^[18]。Laird 等^[27]做的生物质炭养分淋洗试验表明,生物质炭加入到美国中西部典型农业土壤中可以持续降低该土壤的养分淋洗量,因此认为生物质炭是减少养分淋洗的良好土壤改良剂;生物质炭也可以提高土壤的阴阳离子交换量(CEC 和 AEC)^[28]和土壤 pH^[29]。

生物质炭可以提高土壤钾的淋洗量,但对不同土壤类型的影响效果不相同。钾淋洗量随炭粉施用量的增加而增加,不施用生物质炭粉(CK)、施用生物质炭粉 27 000 kg·hm⁻²、施用生物质炭粉 54 000 kg·hm⁻²、施用炭基缓释肥 375 kg·hm⁻² 的砂土和棕壤的钾累积淋洗量分别为黑土的 2.7 和 1.9 倍、4.3 和 2.2 倍、2.3 和 1.9 倍、4.1 和 1.7 倍,说明生物质炭粉在砂土中的短期效果最明显^[30]。

郭伟等^[31]基于华北高产农田 3 年的定位试验研究发现,施用生物质炭与 CK 处理相比,在 0~7.5 cm 和 7.5~15 cm 两个土层之间碱解氮的质量分数没有显著差异,但施用生物质炭处理明显增加了土壤耕层全氮的质量分数。因此认为这一结果意味着施用生物质炭对提升华北高产粮田耕层土壤基础肥力有积极作用。生物质炭可提高土壤中氮含量的原因可能为:一方面,生物质炭中含有少量氮,氮的质量分数约为 0.5%;另一方面,施用生物质炭可改善土壤通气状况,抑制了氮素微生物的反硝化作用,从而减少了氮氧化物(NO_x)的形成和排放,进而使得土壤中全氮储量相对得到增加^[31]。Zhang 等^[32]基于稻田试验也发现,单一施用生物质炭使得 N₂O 的排放量减少了 21%~28%,而生物质炭与氮肥的配合施用使 N₂O 的排放减少了 40%~51%。因此生物质炭和氮肥配施对提高土壤氮素的效果更加显著。

3 生物质炭对作物生长发育及养分吸收的影响

3.1 生物质炭对作物生长发育的影响

生物质炭可通过改良土壤理化性质,如提高土壤 pH、磷有效性和 CEC,降低交换态 Al³⁺含量等途径来间接影响作物生长发育,然而生物质炭对作物的改良效果受生物质炭类型、施用量、土壤类型和植物种类等因素影响较大。有研究表明生物质炭类型和施用量影响小麦种子萌发和苗期生长^[33]。Uzoma 等^[34]把牛粪生产的生物质炭施用于生长在沙土的玉米上,施用量分别为 0、10 t·hm⁻²、15 t·hm⁻² 和 20 t·hm⁻²,结果显示,玉米产量基本随着生物质炭施用量的增加

而增加,但 15 t·hm⁻² 处理比 20 t·hm⁻² 处理产量高。Major 等^[35]在 Colombian Savanna 土壤单施 0、8 t·hm⁻² 和 20 t·hm⁻² 生物质炭的 4 年研究结果显示,第 1 年玉米产量无显著提高,但是 20 t·hm⁻² 处理在第 2 年、第 3 年和第 4 年的产量分别比对照提高了 28%、30% 和 140%。Asai 等^[36]在老挝地区的试验表明,生物质炭的应用可提高低磷有效性地区的粮食产量,还可提高对氮或氮磷化肥的响应,但却降低了叶片 SPAD 值。何绪生等^[37]研究表明,生物质炭与肥料混施或复合后对作物生长及产量均表现为正效应,原因是肥料消除了生物质炭养分低的缺陷,而生物质炭赋予肥料养分缓释性能的互补和协同作用。生物质炭延缓肥料在土壤中的养分释放,降低养分损失,提高肥料养分利用率,生物质炭是肥料的增效载体,因此生物质炭与肥料混施,对作物的增产效果会更显著。

生物质炭对作物生长的作用仍有一些争议。张晗芝等^[25]通过试验发现,生物质炭对玉米苗期的生长有显著抑制作用,但随着玉米的生长发育,这种抑制作用逐渐消失。Nguyen^[38]报道生物质炭(气化蔗渣生物质炭)对玉米出苗率影响不明显,而玉米株高和生物量与生物质炭用量呈负线性关系。邓万刚等^[39]通过试验得出,与对照相比,处理(炭土比为 0.1%、0.5%和 1.0%)在一定程度上降低了海南花岗岩砖红壤上王草第 2 次刈割产草量和柱花草第 1 次刈割产草量;同时也造成王草和柱花草品质下降。Gundale 等^[40]在田间土壤上加砂混匀,再分别施 0%、0.5%、1.0%、2.0%和 5.0%山火产生的炭和室内生产的炭(2 种松树),然后种植禾本科牧草,发现施山火产生的炭显著促进植物生长,而室内生产的炭显著抑制植物生长。同样有研究表明,在肥力较高的土壤中,高量施用生物质炭会对黑麦草的生长产生轻微抑制作用^[18]。究其产量下降的原因可能是 pH 增加使 pH 敏感植物产量下降,或是 pH 引起微量元素缺乏症^[41];也可能是因为生物质炭具有很高的碳氮比,一部分生物质炭的分解导致了氮固定^[42]。也有人推测实验室中低温生产的生物质炭可能含有有毒物质抑制植物生长或是提供生物有效炭的来源激发了氮固定。也有研究表明,木炭对植物的有益或有害影响只表现在第 1 个生长周期,因此认为木炭对植物的影响是短暂的^[43]。但大多只是推测结果,生物质炭的作用机理仍需进一步探索。

目前还无法推导出通用的最佳施炭量范围,需要综合考虑生物质炭的材料、制炭条件(温度和氧气)、土壤性质、施肥状况、水分状况和作物品种等诸多因素才能更好地了解生物质炭对作物生长的影响。

3.2 生物质炭对作物养分吸收的影响

生物质炭在提高作物对养分的吸收方面也有一定影响。Van Zwieten 等^[44]表明生物质炭的应用显著提高了作物对土壤氮的吸收。Chan 等^[23]在萝卜上施用生物质炭的研究显示,随着生物质炭量的增加,萝卜对氮的吸收也随之增加。刘世杰等^[45]报道在一定生物质炭用量范围内,玉米对氮、磷、钾的吸收量随着生物质炭用量的增加而增加,0.4%、1.0%、2.0%和 4.0%施用量处理的玉米钾吸收量分别增加 0.98%、26%、69%和 140%,增长率几乎呈直线上升。但当超过一定量时,反而抑制了玉米对氮、磷的吸收。

生物质炭可以提高土壤养分的有效性,进而提高作物吸收养分的效率。生物质炭对作物的积极影响主要是生物质炭对土壤的有效改善^[46]。在磷有效性低的土壤中施入生物质炭,可以提高植物磷的有效性,这是提高产量的关键因素^[36]。比较黑炭土和铁铝土发现,黑炭土中磷、钙、锰和锌的有效性更高,尽管黑炭土的碳氮比较高,使得一部分氮固定,但相对铁铝土,黑炭土仍有较高的氮含量。黑炭土中养分有效性较高,但养分淋洗较低,这就是黑炭土保持持久肥力的一个重要原因。另外生物质炭的加入进一步提高了植物生长和养分有效性,降低了养分淋洗^[47]。生物质炭当中的绝大多数阳离子不是以静电作用力吸附而是以溶解性盐存在,因此植物可直接吸收利用^[48]。但也有学者得出,田间盆栽试验玉米收获时,生物质炭对玉米植株干物质质量,氮、磷养分的吸收量没有显著影响^[25]。Glaser 等^[49]试验结果表明,养分吸收和淋失比随着炭的施入而增加,因此认为炭主要通过产生交换性复合物来吸附养分。

4 生物质炭的未来研究

目前生物质炭在国际、国内仍处于起步阶段,研究使用的生物质炭多种多样,研究手段也不尽相同,因此研究结果相对缺乏可比性;不同材料、温度等条件制备的生物质炭性质差异很大^[37],而且生物质炭在制备过程中会产生少量有毒有机物,因此施用于作物之前要进行风险评估,也有学者提出必须开展生物质炭标准研究和全国多点联网研究^[9]。

虽然很多研究表明生物质炭在短期内对土壤改良有一定的效果,但其长期效应仍需进一步研究。而且目前的研究大多是室内模拟和小规模田间试验,在大规模推广应用之前还需考虑其大批量及廉价制备问题^[50]。生物质炭对土壤植物的效应研究上,目前多集中于宏观现象研究,其作用机理仍需进一步探索,如果摸清其改良土壤和植物的作用机理,就

可以更好地调节生物质炭加入土壤的比率和生产出更优性质的生物质炭来更好地服务人类^[51]。

参考文献

- [1] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. The "Terra Preta" phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics[J]. *Naturwissenschaften*, 2001, 88(1): 37-41
- [2] 刘霞. 生物炭能否给地球降降温?[N]. *科技日报*, 2009-7-12(002)
- [3] 周志红, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J]. *地球与环境*, 2011, 39(2): 278-284
- [4] 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
- [5] Jones D L, Edwards-Jones G, Murphy D V. Biochar mediated alterations in herbicide breakdown and leaching in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(4): 804-813
- [6] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management[M]//*Biochar for environmental management, science and technology*. London: Earthscan, 2009: 1-12
- [7] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, et al. Using poultry litter biochars as soil amendments[J]. *Soil Research*, 2008, 46(5): 437-444
- [8] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 3488-3497
- [9] 谢祖彬, 刘琦, 许燕萍, 等. 生物炭研究进展及其研究方向[J]. *土壤*, 2012, 43(6): 857-861
- [10] 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(1): 110-115
- [11] Gaskin J W, 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(6): 2061-2069
- [12] Sadaka S, Boateng A A. Pyrolysis and Bio-oil[M]. Cooperative Extension Service, University of Arkansas, US Dept. of Agriculture and county governments cooperating, 2009: 1-6
- [13] Fowles M. Black carbon sequestration as an alternative to bioenergy[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2007, 31(6): 426-432
- [14] Lehmann L. Bio-energy in the black[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(7): 381-387
- [15] Laird D A. The charcoal vision: A win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(1): 1-4
- [16] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1719-1730
- [17] Cheng C H, Lehmann J, Engelhard M H. Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(6): 1598-1610
- [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] 张晗芝. 生物炭对土壤肥力、作物生长及养分吸收的影响[D]. 重庆: 西南农业大学, 2011
- [20] Steiner C, Blum W E H, Zech W, et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil[J]. Plant and Soil, 2007, 291(1/2): 275-290
- [21] Yanai Y, Toyota K, Okazaki M. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2007, 53(2): 181-188
- [22] 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
- [23] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. Soil Research, 2008, 45(8): 629-634
- [24] 袁金华, 徐仁扣. 稻壳制备的生物质炭对红壤和黄棕壤酸度的改良效果[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 472-476
- [25] 张晗芝, 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
- [26] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35(4): 219-230
- [27] Laird D, Fleming P, Wang B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3/4): 436-442
- [28] 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
- [29] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, et al. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes[J]. Organic Geochemistry, 2006, 37(11): 1477-1488
- [30] 邢刚, 张庆忠, 王绍斌, 等. 施用秸秆炭对土壤钾淋洗量的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(18): 8644-8646
- [31] 郭伟, 陈红霞, 张庆忠, 等. 华北高产农田施用生物质炭对耕层土壤总氮和碱解氮含量的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(3): 425-428
- [32] 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
- [33] Solaiman Z M, Murphy D V, Abbott L K. Biochars influence seed germination and early growth of seedlings[J]. Plant and Soil, 2012, 353(1/2): 273-287
- [34] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(2): 205-212
- [35] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during four years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. Plant and Soil, 2010, 333(1): 117-128
- [36] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. Field Crops Research, 2009, 111(1/2): 81-84
- [37] 何绪生, 张树清, 余雕, 等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(15): 16-25
- [38] Nguyen H Y N. Effect of bio-char on the growth of maize (*Zea mays*) in two types of soil[J]. Mini-project, 2008, 10: 1-11
- [39] 邓万刚, 吴鹏豹, 赵庆辉, 等. 低量生物质炭对2种热带牧草产量和品质的影响研究初报[J]. 草地学报, 2010, 18(6): 844-847, 853
- [40] Gundale M J, Deluca T H. Charcoal effects on soil solution chemistry and growth of *Koeleria macrantha* in the ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem[J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, 43(3): 303-311
- [41] Isobe K, Fujii H, Tsuboki Y. Effect of charcoal on the yield of sweet potato[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1996, 65(3): 453-459
- [42] Warnock D D, Lehmann J, Kuyper T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil-concepts and mechanisms[J]. Plant and Soil, 2007, 300(1/2): 9-20
- [43] Deenik J L, Diarra A, Uehara G, et al. Charcoal ash and volatile matter effects on soil properties and plant growth in an acid Ultisol[J]. Soil Science, 2011, 176(7): 336-345
- [44] Van Zwieten L, 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(1/2): 235-246
- [45] 刘世杰, 龚森. 黑碳对玉米生长和土壤养分吸收与淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 79-82
- [46] Hossain M K, Strezov V, Chan K Y, et al. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*)[J]. Chemosphere, 2010, 78(9): 1167-1171
- [47] Lehmann J, Da 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
- [48] 张文玲, 李桂花, 高卫东. 生物质炭对土壤性状和作物产量的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(17): 153-157
- [49] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. Black carbon in soils: The use of benzenecarboxylic acids as specific markers[J]. Organic Geochemistry, 1998, 29(4): 811-819
- [50] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 779-785
- [51] Knowles O A, Robinson B H, Contangelo A, et al. Biochar for the mitigation of nitrate leaching from soil amended with biosolids[J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(17): 3206-3210