

网络出版时间:2013-01-14 16:13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130114.1613.015.html>

生物质炭在农业上的应用

陈心想,耿增超

(西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 生物质炭是由生物质在完全或部分缺氧的条件下经过热裂解、炭化产生的一类高度芳香化、难溶性的固态物质。近年来,生物质炭作为土壤改良剂、肥料缓释载体在农业上的应用越来越广泛。为促进生物质炭在农业上的研究及应用,从生物质炭性质的影响因素,生物质炭对土壤物理性质、化学性质和微生物的影响,以及生物质炭对作物生长和产量的影响等方面进行了阐述和分析,并提出未来生物质炭在农业应用方面的研究方向。

[关键词] 生物质炭;影响因素;土壤性质;作物生长

[中图分类号] S156.2

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2013)02-0167-08

Application of biochar in agriculture

CHEN Xin-xiang, GENG Zeng-chao

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Biochar is an insoluble solid matter with high aromatization produced by biomass pyrolysis in completely or partially hypoxic conditions. In recent years, biochar is widely used in agriculture as a soil amendment and controlled-release carrier for fertilizers. In order to boost the study and utilization of biochar in agriculture, this study summarized the factors that affect properties of biochar and its effects on soil physical and chemical properties, amount of microorganisms in soil, and growth and yields of crops. The future research issues were also suggested.

Key words: biochar; influence factors; soil properties; crop growth

我国是一个农业大国,年产作物秸秆 8×10^8 t 以上^[1],而以作物秸秆为主的广泛存在的生物质(biomass)是制备生物质炭(biochar)的主要原料。生物质炭是由生物质在完全或部分缺氧的条件下经热裂解、炭化产生的一类高度芳香化、难溶性的固态物质^[2]。根据原料的来源不同,生物质炭分为木炭、竹炭、秸秆炭、稻壳炭、动物粪便炭等^[3-4]。通常认为,生物质炭属于黑炭(black carbon)范畴的一种,而黑炭包含了生物质略微炭化到燃烧后黑烟颗粒的炭化物质,其对全球碳循环所起作用较大^[5]。近年

来,用生物质热裂解生产生物质炭已成为农业研究的热点之一,而且由于在生产过程中消耗了大量生物质资源,因此生物质炭有助于我国庞大的秸秆资源的有效利用。

目前,全球对生物质炭科学研究的重视,源于对巴西亚马孙盆地中部黑土(Terra preta de indio)的认识,黑土是古人类刀耕火种形成的一种特殊的肥沃土壤,至今仍是全球最肥沃的土壤之一。然而,在20世纪80年代以后,全球对生物质炭的性质,以及将其用作土壤改良剂及固碳剂的研究才相继展开。

[收稿日期] 2012-05-31

[基金项目] 林业局“948”项目“林果木生物质综合转化技术引进”(2009-4-64);农业部“948”项目“生物炭技术引进及消化”(2010-Z19);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2010JM5004);陕西省攻关项目“高效生物炭基缓释肥配方及施用技术研究”(2010K02-12-1)

[作者简介] 陈心想(1986—),女,山东临沂人,在读硕士,主要从事废弃生物质肥料资源化利用研究。

E-mail: xinxiang20073975@163.com

[通信作者] 耿增超(1963—),男,陕西韩城人,教授,主要从事森林土壤及农业废弃物转化研究。E-mail: gengzengchao@126.com

目前,生物质炭作为一项低碳产品常被用作碳汇剂,为减缓全球气候变化做出了重要贡献^[6-8],而且为废弃生物质利用、生物能源生产、土壤改良培肥、肥料创新、温室气体减排等提出了综合解决方案,从而引起了人们极大的兴趣。

国内外在生物质炭对土壤肥力和作物生长的影响方面开展了广泛研究,并取得许多进展^[9-10],已经扩展到了生态系统高度^[11]。生物质炭常被用作土壤改良剂^[12-13],可以改善土壤性质,促进养分吸收,从而提高作物产量,满足我国对粮食不断增长的消费需求。生物质炭施入土壤后不仅能够提高养分利用率、减少养分淋失,还可以缓解由养分淋失而引起的环境问题^[14]。此外,生物质炭还可以作为吸附剂以消除农业污染。有研究结果表明,生物质炭可以通过吸附或共沉淀作用,显著降低重金属污染物、除草剂、农药等在植物体内的积聚^[15]。尽管如此,目前生物质炭在农业上的应用仍存在争议,包括生物质炭对土壤改良的效果以及生物质炭是否会在土壤剖面内移动^[16],只有针对土壤、作物和生物质炭性质进行具体分析后,才能促进生物质炭在农业上的合理应用。为此,本文回顾和综述了国内外有关生物质炭在农业上的最新研究成果,重点阐述了其对土壤理化性质及微生物、作物生长和产量等方面的影响,并提出了生物质炭在农业应用方面的研究方向。

1 生物质炭性质的影响因素

目前,学界普遍认为,作物秸秆等生物质转化为生物质炭最主要的影响因素为:制备生物质炭原料本身的性质和热解过程中的环境条件,如温度、空气、湿度等^[17]。不同生物质类型或炭化条件所制备的生物质炭,在结构、pH、挥发物含量、灰分含量、持水性、表观密度、比表面积和阳离子交换量等理化性质上表现出不同的性能,从而会产生不同的环境效应和环境应用^[18]。

生物质炭的组成元素主要为碳、氢、氧等,其碳含量为 70%~80%^[19],其次是灰分(包括钾、钙、钠、镁、硅等),因其碳组分高度芳香化而具有热稳定性。生物质种类和来源决定了生物质炭的化学成分,木本植物生物质炭通常碳含量高,而矿质养分含量低;厩肥及秸秆则与之相反^[20]。生物质炭中矿物质含量一般是畜禽粪便最高,木本植物最低,草本植物居中^[21],而碳含量则相反。研究表明,对生物质炭中碳含量以及养分有效性有重要影响的是原料本身的

性质^[22]。如阔叶树和针叶树的凋落物经高温热解制成的生物质炭,灰分含量分别为 6.38% 和 1.48%,阔叶树凋落物制备的生物质炭中的养分如 Ca、Mg、K 含量要比针叶树的高,将二者施入土壤后改善土壤 pH 和阳离子交换量的效果不同^[23]。生物质原料还影响生物质炭的 pH。由于畜禽粪便灰分含量往往很高,因此制成的生物质炭 pH 比木炭或秸秆炭的高,400 °C 下家禽粪便炭的 pH 为 9.2^[24],而木炭 pH 为 7.67^[25]。生物质炭还具有发达的孔隙结构和巨大的比表面积,其大小与生物质原料的种类有关。据日本学者报道,采用 850 °C 将竹材和椰子壳炭化 1 h 后,竹炭比表面积为 370 m²/g,而椰子壳炭则为 410 m²/g^[3]。

生物质炭的产量在很大程度上受热解过程中温度的影响,同时温度也影响生物质炭的性质^[22]。生物质炭的元素组成由最终炭化温度决定。随着炭化最终温度的升高,生物质炭中碳含量增加^[3],氢、氧等含量减少^[3],挥发性有机物含量减少^[26-27],从而 pH 随裂解温度的升高而升高^[28]。一般而言,生物质炭的比表面积随裂解温度升高而增加,如木炭从 200 °C 的 2.3 m²/g 增加到 700 °C 的 247 m²/g,畜禽粪便炭从 200 °C 的 3 m²/g 增加到 500 °C 的 14 m²/g^[29]。但有些生物质材料在裂解温度高时比表面积反而下降,如稻壳炭^[28],所以分析生物质炭的性质要综合考虑生物质原料类型及裂解条件等。

2 生物质炭对土壤性质的影响

生物质材料经裂解、炭化制得生物质炭还田后,由于其本身含有的、可供作物直接吸收利用的养分含量并不多,因此生物质炭只能明显提高养分贫瘠土壤的养分含量,而对肥力较高的土壤养分含量影响相对较小。生物质炭对土壤的改良作用主要是通过改变土壤的物理性状和结构,促进土壤生物化学与物理化学的交互作用,促进微生物的生长和活性,从而提高土壤肥力。

2.1 生物质炭对土壤物理性质的影响

衡量土壤生产力的重要指标之一是土壤水分含量及其有效性,而生物质炭可以吸附和保持水分,并且增强土壤水分的渗透性^[30]。生物质炭对土壤物理性质,如田间持水量、透水性、体积质量的影响,一方面取决于土壤质地,另一方面还取决于生物质炭的颗粒度、比表面积、密度、施用量等。生物质炭表面还可以吸附土壤有机分子,从而可提高土壤的养分吸持容量及持水容量^[22]。土壤的田间持水量随

着生物质炭施用量的增加而增大^[30-31]。研究表明,在含黑色炭丰富的亚马逊土壤中,田间持水量比周围无炭土壤增加了 18%^[32]。因生物质炭比表面积(通常 200~400 m²/g)比砂质土(沙粒表面积 0.01~0.1 m²/g)的大,故生物质炭易改善砂质土壤持水量^[32-34],但对壤土、黏质土持水量的影响通常不明显。因此,生物质炭可以有效提高干旱地区砂质土的保水能力^[35]。说明生物质炭能改善土壤持水性能,降低土壤水渗漏损失,从而减少养分的淋失。此外,生物质炭还可以促进土壤团聚体的形成^[36],增加土壤水稳定性团聚体数量^[31]。

生物质炭发达的多孔结构使土壤表层的孔隙度增大,体积质量降低,使土壤结构得到改善。研究表明,随着生物质炭施用量的增加,土壤体积质量呈下降趋势^[31,37],这与 Laird 等^[38]和 Chen 等^[39]的研究结果一致。在陕西塬土的盆栽试验也显示,土壤体积质量随着生物质炭用量的增加而增大,但是尚未达到显著水平^[40]。这有助于解决因长期过量施用化肥而引起的土壤板结问题,改善土壤性质,提高土地生产力。总体而言,生物质炭对土壤物理性质的改善作用与生物质炭施用量和土壤肥力水平有关。

2.2 生物质炭对土壤化学性质的影响

2.2.1 土壤酸碱度 由于生物质炭的灰分中含有一定的矿质元素如 K、Ca、Mg 等,其以氧化物或碳酸盐形式存在,溶于水后显碱性,故大多数生物质炭都呈碱性。生物质炭提高酸性土壤 pH 值的机理可能是,其提高土壤碱基饱和度,降低可交换铝水平,消耗土壤质子^[41-42]。研究发现,以造纸废物为原料生产的生物质炭,作为土壤改良剂施在酸性铁质土中,使土壤 pH 增加了 1.5 个单位,达到统计显著,但对碱性钙质土壤 pH 作用不显著^[41]。还有研究表明,生物质炭对砂浆水稻土 pH 变化的影响不显著^[43],但红壤 pH 显著提高^[31],并在高用量时达显著水平,这可能与原始土壤 pH 有关。因此,生物质炭可以改良我国南方热带、亚热带地区铝毒和肥力低下的酸性土壤。

2.2.2 土壤阳离子交换量(CEC) 土壤 CEC 与土壤粘粒含量、矿物类型、有机质及 pH 有关,因而需要研究生物质炭对土壤 CEC 的影响。生物质炭比表面积大,可以增强土壤对阳离子的吸附能力^[44],增加耕层土壤 CEC^[37,45]。由于阳离子交换性能提高,导致营养物质的缓慢释放及有机质的稳定化,从而有效促进植物对营养成分的吸收,即可以潜在地降低养分淋洗。华北平原高产农田 3 年定位试验研

究表明^[37],与对照相比,高量秸秆炭(4 500 kg/hm²)和炭基缓释肥(750 kg/hm²)处理的 CEC 值分别增加 24.5%和 14.7%,且差异显著($P < 0.05$)。生物质炭对土壤 CEC 的影响主要与土壤和生物质炭类型及其施用量有关。在高度风化的热带土壤中投入低量生物质炭可以增加土壤 CEC,大量施用时可使 CEC 提高 50%,从而提高土壤保肥能力和缓冲性能^[32]。生物质炭能够明显改善低 CEC、酸性土壤的 CEC,但对石灰性土壤 CEC 的作用不明显^[41],这可能与原土壤高 CEC 有关。此外,生物质炭对土壤 CEC 改善作用与其在土壤中的老化时间有关^[33],随着生物质炭在土壤中作用时间的延长,其在生物和非生物的作用下氧化产生诸如羧基等类的官能团,增大其电荷量或 CEC,从而使土壤 CEC 显著增大^[46]。

2.2.3 土壤养分 土壤养分是衡量土壤肥力高低的重要指标之一,其含量的高低直接影响作物的生长及产量。研究发现,生物质炭具有固碳、贮存养分、提高土壤肥力的能力^[22]。一方面,生物质炭具有较大的比表面积,施入土壤后可以吸附多种离子,但它对养分是一种选择性吸持^[47],对 NH_4^+ 、 NO_3^- 吸附作用较强^[48]。室内培养试验结果表明,生物质炭通过离子交换而吸附土壤中的 NO_3^- 、 NH_4^+ ,从而显著增加土壤中有效氮比例^[49]。与之不同,在华北高产农田连续 3 年施用生物质炭后,耕层土壤中碱解氮的含量虽有下降,但不显著^[50]。此外,生物质炭能够明显提高土壤有效磷、钙、镁含量,但对氮和钾的作用不显著^[51],与已报道的生物质炭增加土壤有效 P、K、Mg 和 Ca 含量的研究结果一致^[52]。在氮贫瘠的土壤上,由于施加生物质炭后土壤中 C/N 值提高,从而限制了土壤氮素利用率,进而短期内降低了作物的生长量^[32]。此外,生物质炭也可以吸附阴离子,同时还可以吸附农药和重金属^[53],减少土壤和环境污染。因此,生物质炭可以减少养分和污染物的淋失^[22],提高肥料利用率,促进作物生长和提高产量,保护生态环境。

生物质炭富含有机碳,可以增加土壤有机碳含量^[31,41]、土壤有机质^[48,54]或腐殖质含量,生物质炭本身的种类和性质以及作用土壤的性质决定了其对土壤有机质的影响程度^[41]。对肯尼亚西部某处土壤的研究表明,加入生物质炭之后该地土壤的有机碳矿化量减少,且已存在的有机碳的稳定性上升^[41]。然而,也有研究结果显示,生物质炭通过激发效应促进了土壤有机质的分解释放,通过提高土

壤微生物的活性而促进土壤腐殖质的分解^[55]。另有研究表明,生物质炭还可以显著改变土壤有机物质的组成,降低土壤活性较高的有机物质(胡敏酸和富里酸等)比例^[31]。

2.3 生物质炭对土壤微生物的影响

土壤微生物是土壤碳库中最为活跃的组分,对施用生物质炭的响应也比其他有机质更快。生物质炭对土壤微生物的影响主要表现在土壤微生物组成的变化和土壤微生物量的增减 2 个方面。

生物质炭的多孔性和表面特性以及对水肥的吸附作用都为土壤微生物提供了良好的栖息环境^[56],为土壤有益微生物提供保护,进而增加微生物数量及活性,特别是丛枝状菌根真菌(AMF)或泡囊丛枝状菌根真菌(VAM)^[57]。前人利用磷酸脂胺法研究发现,施用生物质炭后,土壤中真菌和革兰氏阴性菌的生物量明显增加^[58]。也有研究表明,生物质炭可以增强作物根部真菌的繁殖能力,促进植物根瘤菌的生物固氮,改变土壤硝化微生物菌群活性^[59]。生物质炭可以调控土壤微环境的理化性质,影响土壤微生物的生长和代谢,微生物繁殖的同时也会改变作物生长的微环境,对作物生理生化过程产生重要影响。

土壤微生物群落结构的变化从另一方面反映了生物质炭对土壤微生物组成的影响。近年来,一些学者在研究微生物群落结构变化对生物质炭的响应时,利用了分子生物学和生物化学技术^[60]。Pietikainen 等^[61]使用 PLFA 技术分析了施用生物质炭的土壤微生物群落结构,认为生物质炭对微生物群落结构影响较大,主要是有利于个体较小且生长速度较快的微生物生长。Grossman 等^[62]比较观察了含生物质炭和不含生物质炭的土壤中微生物群落的种类,发现含有生物质炭的土壤不论种类和用途其微生物种类基本相同,且与不含生物质炭的土壤中微生物种类明显不同,说明生物质炭对微生物的群落分布具有一定的控制作用。

土壤微生物量的变化是表征土壤微生物对生物质炭响应的重要指标之一。Liang 等^[63]通过生物质炭的长期效应发现,生物质炭显著提高了土壤微生物量。有研究结果表明^[64],施用生物质炭显著提高了土壤微生物量碳水平,且增幅随着生物质炭用量的增加而增大,这与吕伟波^[65]和黄超等^[31]的研究结果一致。然而,黄超等^[31]同时指出,生物质炭会降低高肥力土壤的微生物量碳水平,下降幅度随其用量的增加而增大。此外,生物质炭还可以增加土壤

中接种菌的存活率及其对植物的侵染^[32],这也是人们将其用作微生物肥料接种菌载体的原因。生物质炭的相对稳定性使它并不能很好地直接被土壤微生物利用,其对土壤微生物的影响可能主要是基于对土壤环境的改变。然而,土壤环境的改变以及土壤微生物的活动反过来也能影响生物质炭,故生物质炭和土壤微生物的相互作用机理有待进一步深入探究。

3 生物质炭对作物生长的影响

生物质炭不仅可以用作土壤调节剂,而且还能起到肥料的作用。生物质炭具有良好的物理性质和养分调控功能,施入土壤可以显著促进种子萌发和植物根系生长,从而提高作物生产力及作物产量^[36]。目前,关于生物质炭对土壤肥力和作物生长影响的研究多集中在风化土及典型热带贫瘠土壤上^[66-67],生物质炭对作物生长的影响可分为促进作用^[65-70]、抑制作用或无影响^[71]。

不同的生物质炭施用量对作物产量有很大的影响,一般在生物质炭用量较低时提高作物生物量,用量较高时会降低作物生物量。在黄色铁铝土(Xanthic ferralsol)进行的田间试验表明,在生物质炭施用量为 135.2 t/hm² 时,豇豆的生物量是对照的 2 倍^[32]。然而,采用沙壤土的盆栽试验结果表明,在生物质炭用量为 30 和 60 t/hm² 时,黑麦草(*Lolium perenne*)的生物量分别比对照增加了 20% 和 52%;在生物质炭用量为 100 和 200 t/hm² 时,黑麦草的生物量反而比对照降低了 8% 和 30%^[72]。另有研究发现,生物质炭能显著提高低肥力土壤上黑麦草的产量,增加幅度随生物质炭用量的增加而增大;而在高肥力土壤上生物质炭对黑麦草产量的影响不显著,当生物质炭用量达到 200 g/kg 时,生物质炭对黑麦草的生长甚至产生了轻微的抑制作用,产量有一定下降^[31]。

作物对不同性质的生物质炭的响应也不同。有研究显示,一般而言,在施用 500 °C 裂解的生物质炭后,作物生物量显著高于施用其他温度的生物质炭($P < 0.05$),而生物质炭原料类型变化致使作物生物量的增幅是热解温度的 8 倍^[73]。温室盆栽试验结果表明,动物粪便炭使玉米生物量增加 43%,玉米秸秆炭增加 30%,而食物残渣炭减少 92%,与对照差异都达到显著水平($P < 0.05$)^[73]。

在不同土壤上种植同种作物对施入生物质炭的响应也不同。研究发现,在碱性钙质土壤上施入由

造纸废物高温热解得到的生物质炭后,小麦和萝卜的干质量减产;而在酸性铁质土壤上,施入该生物质炭后,小麦和萝卜的干质量显著增加,在酸性淋溶土上施用以农业残余物为原料制得的生物质炭后,萝卜的干质量显著增加^[40]。

在同一土壤上,不同类型的作物对生物质炭的响应也不同。在 Dehli 土中施用等量生物质炭(500 kg/hm²)时,豌豆的生物量增加 60%,大豆和绿豆的产量分别增加了 50%和 22%^[74]。这可能是由于施用生物质炭增加了土壤中养分特别是氮肥的有效性。而在火山灰土(Volcanic ash soil)上的田间试验结果表明,当生物质炭用量分别为 5 和 15 t/hm²时,大豆和玉米均表现出减产效应^[34]。

近期研究表明^[32,52,74],如果生物质炭和其他有机或无机肥料配合施用,作物增产效果更佳。有研究显示,在施用无机肥料的同时添加生物质炭,野草植株对地表的覆盖率比单独施用无机肥料时提高了 46%^[75]。与单施无机肥料相比,生物质炭和无机肥料配施后,谷物的产量提高了 2 倍^[76]。盆栽试验结果表明,施用生物质炭显著提高了菠菜产量和生物量,增幅为 2.5%~57.3%,施用生物质炭的增产效果随着施氮量的增加而降低,生物质炭与化肥配施对菠菜增产效果最好^[77]。

4 研究展望

国内外现有的研究表明,当生物质炭施入土壤后,其在封存碳的同时,还可以改善土壤理化性质、提高土壤肥力、促进作物生长,从而提高作物产量。生物质炭的最佳施用范围因土壤类型和性质、作物种类、土壤肥力状况和矿质肥管理而变化。然而,目前对生物质炭的农用研究仍存在不足,有待进一步深入开展,主要表现为以下几个方面。

1) 关于生物质炭的多数研究的周期均较短,其中一些研究在温室或实验室中进行,且一些研究结果存在相互冲突现象。目前,国内外已开展了一些生物质炭长期效应的田间试验,但仍存在不足,如生物质炭作为土壤改良剂的合理施用方法,以及生物质炭改良土壤、促进作物生长的最佳施用量等。因此,对生物质炭施用后长期效应的田间试验研究亟待开展。

2) 我国土壤类型众多,而不同类型的生物质炭在不同土壤上的表现不同,应根据各地实际情况,对其进行全国多点和联网研究,并进行长期定位试验,寻求适合当地土壤的生物质炭类型及其生产条件。

3) 由于土壤酶活性与土壤的生物、物理及化学性质紧密联系,因此已经被作为一个重要的生物活性指标应用于土壤肥力、土壤自净能力的鉴定和土壤质量的评价。目前,虽然关于生物质炭对一些土壤酶活性的影响国外已有报道,但相对较少,因此亟需进行生物质炭对土壤酶活性影响的进一步探究。

4) 鉴于现有研究报道的作物对生物质炭施用量反应存在差异,故需要进一步探索其原因或机理。此外,生物质炭与肥料配合施用几乎都是正效应。因此,研究生物质炭肥料缓释载体及其与肥料合理配施是研究者需要进一步解决的问题。

志谢:感谢农业部黄土高原农业资源与环境修复重点开放实验室和农业部西北植物营养与农业环境重点实验室在试验期间给予的帮助。

[参考文献]

- [1] 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. (in Chinese)
- [2] Antal M J, Gronli M. The art, science, and technology of charcoal production [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003, 42(8): 1619-1640.
- [3] 刘玉学,刘 微,吴伟祥,等. 土壤生物质炭环境行为与环境效应 [J]. 应用生态学报,2009,20(4):977-982.
Liu Y X, Liu W, Wu W X, et al. Environmental behavior and effect of biomass derived black carbon in soil: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(4): 977-982. (in Chinese)
- [4] Cao X D, Harris W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(14): 5222-5228.
- [5] Shrestha G, Traina S J, Swanston C W. Black carbon's properties and role in the environment: A comprehensive review [J]. Sustainability, 2010, 2(1): 294-320.
- [6] Woolf D, Amonette J E, Street-Prorot F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change [J]. Nature Communications, 2010, 1: 1-9.
- [7] Lee J W, Hawkins B, Day D M, et al. Sustainability: The capacity of smokeless biomass pyrolysis for energy production, global carbon capture and sequestration [J]. Energy & Environment Science, 2010, 3(11): 1695-1705.
- [8] Robert K G, Gloy B A, Joseph S, et al. Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic, and climate change potential [J]. Environment Science & Technology, 2010, 44(2): 827-833.
- [9] 邱 敬,高 人,杨玉盛,等. 土壤黑碳的研究进展 [J]. 亚热带资源与环境学报,2009,4(1):88-94.
Qiu J, Gao R, Yang Y S, et al. Advances on research of black

- carbon in soil [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2009, 4(1): 88-94. (in Chinese)
- [10] Ogawa M, Okimori Y. Pioneering works in biochar research, Japan [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48: 489-500.
- [11] 宋延静, 龚 骏. 施用生物质炭对土壤生态系统功能的影响 [J]. *鲁东大学学报: 自然科学版*, 2010, 26(4): 361-365.
Song Y J, Gong J. Effects of biochar application on soil ecosystem functions [J]. *Ludong University Journal: Natural Science Edition*, 2010, 26(4): 361-365. (in Chinese)
- [12] Tenenbaum D J. 黑色的希望: 生物炭 [J]. *资源与人类环境*, 2010(7): 55-57.
Tenenbaum D J. The black hope: Biochar [J]. *Resources Environment Inhabitant*, 2010(7): 55-57. (in Chinese)
- [13] Xu R K, Yuan J H. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol [J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(1): 110-113.
- [14] 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.
Zhou Z H, Li X Q, Xing Y, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soil [J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(2): 278-284. (in Chinese)
- [15] Spokas K A, Koskinen W C, Baker J M, 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.
- [16] 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.
- [17] Katyal S, Thambimuthu K, Valix M. Carbonisation of bagasse in a fixed bed reactor: Influence of process variables on char yield and characteristics [J]. *Renewable Energy*, 2003, 28: 713-725.
- [18] Saran S, Elisa L C, Evelyn K, et al. Biochar, climate change and soil: A review to guide future research [R]. Newcastle, Britain: CSIRO Land and Water Science Report, 2009: 5-6.
- [19] Lehmann J, Rondon M. Bio-char soil management on highly weathered soils in the humid tropics [M]// Uphoff N, Ball A S, Fernandes E, et al. *Biological approaches to sustainable soil systems*. Boca Raton: CRC Press, 2006: 517-530.
- [20] 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, 27(2): 1-7.
He X S, Geng Z C, She D, et al. Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamic [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2): 1-7. (in Chinese)
- [21] NSW Government. Biochar: What are the prospects [EB/OL]. Science and Innovation. (2009-10-09) http://www.dpi.nsw.gov.au/_data/assets/pdf_file/0017/302264/I-and-I-NSW-Biochar.pdf.
- [22] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: A review [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11: 403-427.
- [23] 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.
Zhang A F, Pan G X, Li L Q. Biochar and the effect on C stock enhancement, emission reduction of greenhouse gases and soil reclamation [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2459-2463. (in Chinese)
- [24] Hatton B J, Singh B. Influence of biochars on N₂O emission and nitrogen leaching from two contrasting soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1224-1235.
- [25] Singh B, Singh B P, Cowie A L. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48: 516-525.
- [26] Laird D A, Brown R C, Amonette J E, et al. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar [J]. *Bioprocess & Biorefining*, 2009, 3: 547-562.
- [27] Granatstein D, Kruger C, Garcia-Perez M, et al. Biochar and pyrolysis: Renewable soil carbon and energy [J]. *Sustaining the Pacific Northwest, Food, Farm & Natural Resource Systems*, 2009, 7(4): 1-4.
- [28] 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: 3488-3497.
- [29] Keiluweit M, Nico P. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (Biochar) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44: 1247-1253.
- [30] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield [J]. *Field Crop Research*, 2009, 111: 81-84.
- [31] 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.
Huang C, Liu L J, Zhang M K. Effects of biochar on properties of red soil and ryegrass growth [J]. *Journal of Zhejiang University: Agricultural & Life Science*, 2011, 37(4): 439-445. (in Chinese)
- [32] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoals: A review [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 219-230.
- [33] 何绪生, 张树清, 余 雕. 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.
He X S, Zhang S Q, She D, et al. Effects of biochar on soil and fertilizer and future research [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(15): 16-25. (in Chinese)
- [34] Dugan E, Verhoef A, Robinson S, et al. Bio-char from sawdust, maize stover and charcoal: Impact on water holding capacities (WHC) of three soils from Ghana [C]// Brisbane, Australia: 19th World Congress of Soil Science. *Soil Solutions for a Changing World*, 2010: 9-12.
- [35] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipps N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar applica-

- tion to temperate soils; A review [J]. *Plant and Soil*, 2010, 337:1-18.
- [36] Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, et al. Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectroscopy [J]. *Geoderma*, 2005, 128: 116-129.
- [37] 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.
- Chen H X, Du Z L, Guo W, et al. Effects of biochar amendment on cropland soil bulk density, cation exchange capacity, and particulate organic matter content in the North China Plain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11): 2930-2934. (in Chinese)
- [38] 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: 443-449.
- [39] Chen Y, Shinogi Y, Taira M. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48: 526-530.
- [40] 高海英, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究 [J]. *中国农学通报*, 2011, 27(24): 207-213.
- Gao H Y, He X S, Geng Z C, et al. Effects of biochar and biochar-based nitrogen fertilizer on soil water-holding capacity [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(24): 207-213. (in Chinese)
- [41] Zwieten L Van, 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.
- [42] Masulili A, Utomo W H, Syechfani M S. Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil: I. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in west Kalimantan, Indonesia [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2010, 2(1): 39-47.
- [43] 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.
- Zhang H Z, Huang Y, Liu G, et al. Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seedling stage [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(11): 2713-2717. (in Chinese)
- [44] Topoliantz S, Ponge J F, Ballof S. Manioc peel and charcoal: A potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41: 15-21.
- [45] 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: 1719-1730.
- [46] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, et al. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes [J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37: 1477-1488.
- [47] Palumbo A V, Porat I, Phillips J R, et al. Leaching of mixtures of biochar and fly ash [C]//World of Coal Ash (WOCA) Conference. Lexington, KY, USA, May 4-7, 2009, <http://www.flyash.info/>.
- [48] Kimetu J M, Lehmann J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(7): 577-585.
- [49] Ding Y, Liu Y X, Wu W X, et al. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2010, 213: 47-55.
- [50] 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.
- Guo W, Chen H X, Zhang Q Z, et al. Effects of biochar application on total nitrogen and alkali-hydrolyzable nitrogen content in the topsoil of the high-yield cropland in north China Plain [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(3): 425-428. (in Chinese)
- [51] 周桂玉, 窦森, 刘世杰. 生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(10): 2075-2080.
- Zhou G Y, Dou S, Liu S J. The structural characteristics of biochar and its effects on soil available nutrients and humus composition [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10): 2075-2080. (in Chinese)
- [52] Lehmann J, Pereira da Silva Jr J, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthroisol and a Ferralsoil of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments [J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343-357.
- [53] Mohan D, Pittman C U J, Bricka M, et al. Sorption of arsenic, cadmium, and lead by chars produced from fast pyrolysis of wood and bark during bio-oil production [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, 310: 57-73.
- [54] 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.
- Hua L, Zhang C, Ma H R, et al. Environmental benefits of biochar made by agricultural straw when applied to soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(10): 2489-2492. (in Chinese)
- [55] Wardle D A, Nielsson M C, Zackrisson O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus [J]. *Science*, 2008, 320: 629.
- [56] Kolb S E, Fermanich K J, Dornbush M, et al. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2009, 73(4): 1173-1181.
- [57] Matsubara Y, Hasegawa N, Fukui H. Incidence of Fusarium root rot in asparagus seedlings infected with arbuscular mycorrhizal fungus as affected by several soil amendments [J]. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 2002, 71(3): 370-374.
- [58] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar a-

- mendment on soil carbon balance and soil microbial activity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(6): 1301-1310.
- [59] Rondon M A, Lehmann J, Ramirez J, et al. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar additions [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43(6): 699-708.
- [60] Khodadad C, Zimmerman A R, Green S J, et al. Taxa-specific changes in soil microbial community composition induced by pyrogenic carbon amendments [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43: 385-392.
- [61] Pietikainen J, Kiikkilä 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.
- [62] Grossman J M, O'Neill B E, Tsai S M, et al. Amazonian anthrosols support similar microbial communities that differ distinctly from those extant in adjacent, unmodified soils of the same mineralogy [J]. *Microb Ecol*, 2010, 60(1): 192-205.
- [63] Liang B, Lehmann J, Sohi S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil [J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(2): 206-213.
- [64] 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.
Huang J. The effect of biochar application on soil microbial biomass and soil enzymes [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012. (in Chinese)
- [65] 吕伟波. 生物炭对土壤微生物生态特征的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
Lu W B. Effect of biochar on soil microbial biomass, respiration and community structure [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [66] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J. 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: 275-290.
- [67] Johannes L, Stephen J. Biochar for environmental management: Science and Technology [M]. UK and USA: Earthscan, 2009: 68-73.
- [68] Haefele S M, Konboon Y, Wongboon W. Effects and fate of biochar from rice residues in rice based systems [J]. *Field Crops Research*, 2011, 121(3): 430-440.
- [69] Peng X, Ye L L, Wang C H. Temperature and duration dependent rice straw derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 112(2): 159-166.
- [70] Uzomal K C, Inoue M, Andry H. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition [J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(2): 205-212.
- [71] 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*, 2011, 43(6): 857-861.
Xie Z B, Liu Q, Xu Y P, et al. Advances and perspectives of biochar research [J]. *Soils*, 2011, 43(6): 857-861. (in Chinese)
- [72] Baronti S, Alberti G, Genesio L, et al. The Italian Biochar Initiative (ITABI): Effects on soil fertility and on crops production [R]. Newcastle-Gateshead, UK: 2nd International Biochar Conference-IBI, 2008.
- [73] Rajkovich S, Enders A, Hanley K, et al. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(3): 271-284.
- [74] Iswaran V, Jauhri K S, Sen A. Effect of charcoal, coal and peat on the yield of moong, soybean and pea [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1980, 12(2): 191-192.
- [75] Major J, Steiner C, Dittmann A, et al. Weed composition and cover after three years of soil fertility management in the central Brazilian Amazon: Compost, fertilizer, manure and charcoal applications [J]. *Weed Biology and Management*, 2005, 5: 69-76.
- [76] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, et al. Microbial response to charcoal amendments of highly weathered soil and Amazonian dark earths in central Amazonia: Preliminary results [M]//Glaser B, Woods W I. Amazonian dark earths: Explorations in time and space. Heidelberg: Springer, 2004: 195-212.
- [77] 张万杰, 李志芳, 张庆忠, 等. 生物质炭和氮肥配施对菠菜产量和硝酸盐含量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(10): 1946-1952.
Zhang W J, Li Z F, Zhang Q Z, et al. Impacts of biochar and nitrogen fertilizer on spinach yield and tissue nitrate content from a pot experiment [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10): 1946-1952. (in Chinese)