

生物炭与农业环境研究回顾与展望

陈温福, 张伟明, 孟 军

(沈阳农业大学 辽宁省生物炭工程技术研究中心, 沈阳 110866)

摘要:本文综合分析、评述了生物炭在农业环境领域应用的主要研究进展,从生态安全和可持续发展视角,探讨了生物炭对农业生态环境系统的重要影响和潜在价值,并对其应用前景进行了客观、深入、综合的分析。认为生物炭在治理农业面源污染、提升耕地质量、修复重金属污染农田、应对气候变化、维持和稳定农业生态系统功能及保障农业环境安全等方面具有重要意义和应用价值。结合我国农业发展现状,提出了未来生物炭在农业环境领域的研究方向和发展重点,旨在为生物炭的应用及产业化发展提供参考。

关键词:生物炭;农业生态系统;环境污染

中图分类号:X705 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)05-0821-08 **doi:**10.11654/jaes.2014.05.001

Biochar and Agro-ecological Environment: Review and Prospect

CHEN Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun

(Shenyang Agricultural University, Biochar Engineering Technology Research Center of Liaoning, Shenyang 110866, China)

Abstract: Biochar has already been a hotspot in agriculture, energy and environment. In this paper, the influences of biochar on soil, crops, agricultural eco-system, and food security of China were reviewed comprehensively. Biochar has showed important roles in controlling non-point source pollution, improving soil quality, increasing soil production, alleviating climate changes, and maintaining agro-ecosystem stability. The prospect of biochar industrialization and development in China was also proposed.

Keywords: biochar; agro-ecosystem; environmental pollution

进入 21 世纪,人类受“粮食、环境、能源危机”的影响日趋严重,各国政府、专家、学者等都在寻找应对这些危机的“灵丹妙药”,但收效甚微。正当其时,生物炭以其独特的结构和理化特性、丰富的材料来源与广泛的应用价值逐渐走入人们的视野,并以“黑色黄金”之美誉为学界认可,成为热点研究领域之一。

在作物生产领域,科学家从不同方向进行了有益的探索,初步证明生物炭所具有的良好结构与理化性质在改良土壤结构和理化性质、促进微生物生存繁衍、提高作物产量与品质等方面具有重要作用^[1-5]。在农业环境领域,生物炭对土壤酸碱环境、土壤与水体重金属污染、农药及化学品残留等农业有机污染、农

田温室气体排放等不良环境所具有的积极改良、修复或缓解作用也得到了越来越多的认可^[1,3,6-9]。

在农业生产中,我们不可否认、也必须清醒地认识到农业生态环境的重要性。“土壤-作物-环境”相互依存,不可分割。特别是在我国,农业资源严重不足,过度开发已导致生态失衡,环境污染加剧已是不争的事实。任何资源与环境的提前“支取和消费”,都是对子孙后代的不负责任!因此,确保农业环境安全,对于实现农业可持续发展至关重要。生物炭技术契合了“低碳、环保、可持续”等现代农业发展理念,在治理土壤污染、保护农业环境、维持生态系统平衡、促进农业环境良性循环和可持续发展等诸多方面,都将具有重要的作用和意义。

本文在综合分析并总结近年生物炭与环境领域研究进展的基础上,重点评述了生物炭对农业生态环境的影响,并提出了进一步发展方向和建议,以期生物炭在农业环境领域的应用及其产业化提供参考。

收稿日期:2014-03-25

基金项目:农业部公益性行业(农业)科研专项(201303095);辽宁省高校重大科技平台建设项目(生物炭工程技术研究中心)

作者简介:陈温福(1955—),男,中国工程院院士,教授,从事稻作科学研究和生物炭技术开发与应用研究。

E-mail:wfchen5512@163.com

1 生物炭概念、元素构成及其功能基础

生物炭(Biochar)一般是指农林废弃物等生物质在缺氧条件下热裂解而形成的稳定的富碳产物^[1]。虽然其语义形式在国内外相关报道中表述不同,诸如“生物质炭”、“黑炭”、“生物黑炭”、“生物质焦”等,但对其构成与功能基础的认识是较为一致的。归纳起来有以下3点。

一是生物炭富含稳定的碳元素,主要由芳香烃和单质碳或具有类石墨结构的碳构成,理化性质稳定,抗生物分解能力强。这是生物炭具有“碳封存”功能、可还田改土并具有可持续和累积发挥作用的基础。

二是生物炭具有丰富的微孔结构,比表面积大,吸附能力强,表面官能团丰富。生物炭施入土壤后,一方面可降低土壤容重,促进土壤微团聚体的形成,改善土壤结构和水、肥、气、热状况。另一方面可为土壤微生物提供庇护场所,促进微生物群落的繁衍生息。同时具有增加土壤阳离子交换量、提高化肥利用率、消减养分淋溶损失和水体污染的作用。

三是生物炭含有植物生长所必需的大量元素和中微量元素,可为作物生长发育提供一定必要的补充,进而减少化学肥料的投入。

生物炭这些结构与功能特性,使其在农业、环境、可持续发展等诸多领域均可发挥作用。不仅如此,生物炭产业的兴起,有可能实现农林废弃生物质利用方式的根本性转变,由此带来巨大的环境、生态和社会经济效益。

2 生物炭与农业环境研究

2.1 生物炭与农业面源污染

农业面源污染是影响农业环境可持续发展的重要因素。在我国,由于化肥、农药、除草剂等化工产品长期、大量、不适当地使用和粗放管理导致的农业面源污染,已经严重影响到农业生产的可持续发展。虽然现在已注意到问题的严重性并提出了一些治理方法,但治理方式往往存在“成本高、难度大、收效缓及有生态风险”等不足之处,难以真正在生产实践中大面积推广应用。近年来,国内外相关研究表明,生物炭对减少土壤养分流失、提高肥料利用率、削减有机污染和农药残留、抑制污染物富集、降低污染物生物有效性等方面都具有积极作用^[10-21]。因此,生物炭技术或许为解决上述问题提供一条新路。

研究表明,生物炭表面的官能团及其多微孔结构

对土壤养分离子平衡与调控具有重要的影响。特别是对铵离子有很强的吸附性,有利于降低氮素挥发,减少养分流失,提高土壤肥力^[10-11]。土柱淋滤模拟实验结果表明,以1%炭土质量比将生物炭施入土壤, NH_4^+-N 淋溶量减少15.8%, NO_3^--N 淋溶量减少19.2%^[12]。将生物炭应用于黑钙土和紫色土,发现氮素的淋失大幅降低。50 t·hm⁻²和100 t·hm⁻²的施用量,使黑钙土区氮素淋失分别降低了29%和74%,紫色土区分别降低了41%和78%。有报道认为,生物炭对磷酸根离子也有很强的吸附能力^[15]。生物炭对氮、磷等营养元素的吸附性在酸性和砂质土壤中表现更为明显,可减少养分流失,延长供肥期,因而对作物生长更为有利^[16-17]。

生物炭对包括多环芳烃类和染料类污染物特别是农药在内的有机污染物也具有强的吸附、解吸和迟滞作用,进而影响其迁移、转化与生物有效性^[18-19,22]。研究表明,生物炭对有机污染物的吸附作用是普通土壤的400~2500倍,施用少量的生物炭即可大幅提高土壤对有机污染物的吸附容量^[21],并表现出较强的剂量效应^[23]。在污泥-土壤体系中,应用生物炭可明显减少多环芳烃向植物体的转移数量,用含炭污泥堆肥处理黑麦草,植株中多环芳烃累积量比普通污泥降低了27%~34%,有效降低了潜在的污染风险^[24]。当木屑生物炭在土壤中的添加量达到5%时,就会对莠去津、乙草胺^[25]、毒死蜱^[26]等产生明显的吸附作用,且表现出与施炭量、生物炭表面积及微孔特性成正相关。在黑土、黄壤、红壤、紫色土和潮土中施用生物炭,可提高土壤对CAP的吸附活性,吸附常数 $K_{F,b}$ 分别降低了96.9%、90.6%、91.3%、68.5%和34.6%^[27]。生物炭在增强对农药吸附的同时,也减少了解吸量,延缓了解吸。研究表明,生物炭对敌草隆的吸附表现与炭量、时间呈正相关,当施用量为1%时,吸附56 h敌草隆的解吸率仅为1.81%^[28]。在为期4个月的实验中,添加1%生物炭处理的六氯苯、五氯苯和1,2,4,5-四氯苯的残留率分别为68.2%、61.3%和58.0%,显著高于对照处理的29.9%、18.0%、5.2%^[29]。

生物炭吸附有机污染物的作用与制炭温度有关。随着炭化温度的升高,等温吸附曲线由线性变为非线性,吸附机制表现为:分配作用→分配作用+表面吸附作用→表面吸附作用。分配作用部分与有机污染物的 $\lg K_{ow}$ 呈正相关,而表面吸附则与污染物的疏水性、分子大小及其与生物炭极性匹配性有关^[30]。已有证据表明,疏水作用、电荷转移和孔填充作用是较高温下

制备的生物炭具有高吸附能力的主要原因^[31]。不同温度条件下制成的生物炭其孔径分布、比表面积和官能团等是影响其对有机污染物吸附的主要因素。生物炭在吸附苯时会发生孔隙膨胀现象,并发生吸附-脱附的不可逆过程^[32]。同时,不同热解温度下制备的生物炭,在不同土壤上的应用效果亦有差异,因制备温度、土壤类型不同而表现各异^[23,33]。

2.2 生物炭与农田温室气体排放

在农田生态系统中,土壤碳库的剧烈变化与人类从事的农业生产活动密切相关。据有关资料统计,目前全球农业及退化土壤的碳汇能力仅为历史水平的50%~66%,碳损失达420亿~750亿t^[34]。长期的刀耕火种、翻耕促产等掠夺式农业生产活动,特别是大量焚烧秸秆,耕地只种不养,造成土壤有机质的大量损失,同时也明显加剧了农田温室气体排放,使农田成为重要的排放源^[35]。据测算,全球土壤每年向大气释放的碳量约为68~100 Pg(注:Pg为碳储量单位,1Pg=1亿t),是化石燃料燃烧碳排放量的10倍以上^[34,36]。

生物质变成生物炭以后,就其本身而言,所存储的碳是相对稳定的,如不重新焚烧,增加碳排放的风险几乎为零。而生物炭还田对土壤所产生的作用,诸如改善土壤结构,促进土壤微团聚体形成,增加土壤水、气、热融通^[37-40]以及对功能微生物数量和群落的潜在影响等^[41-44],都将对降低土壤矿化速率,提高有机质含量,促进土壤碳库的形成、固定和周转等产生重要影响,进而影响土壤的温室气体排放。据Woolf等^[45]测算,在不危及人类粮食安全、生存环境及土壤保护的情况下,生物炭每年减排温室气体的潜力可达目前人类温室气体排放总量的12%。

实验结果显示,生物炭施入土壤后具有“主动减排”功能^[46]。在施氮条件下使用生物炭,连续两年显著降低了稻田土壤的N₂O排放和稻田痕量温室气体的综合温室效应,降幅达66%,且高炭量(40 t·hm⁻²)添加的处理表现更明显,并具有持续性^[47]。与秸秆直接还田相比,稻田秸秆炭化后还田的CH₄排放量减少了14.7%^[48]。以20 g·kg⁻¹的标准向牧草地和大豆土壤施用生物炭,N₂O排放量分别降低了80%和50%,CH₄的释放过程则受到明显抑制^[49]。生物炭对NO₂、CH₄等温室气体排放的抑制作用^[50-51]可能是生物炭对土壤修复作用造成的^[52-53],如增加土壤通气性、减缓反硝化作用、降低氮素循环效率等^[54]。亦有研究者认为,生物炭能吸附土壤有机质作为甲烷菌的抑制剂,从而抑制

CH₄及其氧化产物的排放。来自实验室条件下的研究表明,在生物炭-土壤-水体系中,CO₂、N₂O和CH₄的减排总量与生物炭的质量呈显著正相关,这在一定程度上验证了生物炭有可能是通过降低土壤有机质矿化速率来实现增汇减排的假设^[25]。

2.3 生物炭与农业碳汇

将农作物秸秆等农林废弃物制备成生物炭而取代焚烧,可以有效地减少农田温室气体排放,增加“农业碳汇”。生物炭对土壤生态系统碳汇效应的研究最早可追溯到对亚马逊流域黑土“*Terra preta*”碳平衡的调查分析^[55]。此后,随着对生物炭结构与性质的研究不断深入,发现生物炭有可能是土壤腐殖质中高度芳香化结构组成成分,是化学性质更稳定、可以在土壤中长保持的土壤碳库。亦有研究者认为,生物炭是某些土壤有机质的组成部分,对稳定土壤有机碳库具有重要作用^[56-57]。实践证明,在灰漠土中施用生物炭可显著提高有机碳储量,改变有机碳组分,提高土壤生产力^[58]。一项在红壤水稻土上施用生物炭的研究结果表明,生物炭有效地降低了有机碳矿化速率和累积矿化量,无炭处理区(对照)的累积矿化量分别比添加0.5%和1.0%生物炭的处理区高10.0%和10.8%^[59]。在土壤中输入不同量的椰壳炭,发现在施炭量为1%~8%范围内,平均每增加1%,土壤有机碳量约增加5.9 mg·g⁻¹^[60]。

由于生物炭结构与理化性质的特殊性,截至到目前,还没有能够精确测定生物炭在土壤及环境生态系统中确切周转周期的方法^[61],因此,我们经常会看到截然不同的研究结果。例如,章明奎等^[62]发现,在淹水条件下玉米秸秆中有机碳降解半衰期为0.88年,生物炭的降解半衰期为17.6~21.1年,同时发现生物炭的稳定性与制炭生物质本身性质有关,一般是随含碳量的增加而增加。另一项将生物炭和秸秆置于恒温恒湿条件下培养的研究则发现,生物炭分解的速度很慢,换算其周转周期约为1400年,而在相同条件下秸秆的周转周期仅为7年^[63]。在特定环境条件下,生物炭可以发生一定程度的分解或降解^[2,64-66],只是时间相对较长,难以精确计算。高度芳香化和疏水性脂族碳结构使生物炭具有热稳定性和生物化学稳定性^[57,67-68],一般情况下,土壤中的生物炭可能会发生物理性迁移,但不会发生明显的化学变化,存在时间可达数百年或更长^[69]。

因此可以认为,生物炭是一个长期、稳定的土壤碳库,容量巨大^[70]。秸秆或其他生物质炭化还田,应是

一种高效的“农田碳汇”形式,而且在提高土壤碳积累的同时,有助于维持土壤 C/N 平衡和农田生态系统平衡,成为耕地可持续生产的重要物质基础。

3 生物炭与重金属污染农田修复

国内外研究表明,生物炭可吸附土壤或水中的重金属离子如 Cd、Pb、Cu 等,减少这些重金属离子的富集,降低其生物有效性^[71]。在含 Cd²⁺水溶液中添加 6 g·L⁻¹ 用不同材料制备的生物炭,对水溶液中 Cd²⁺ 的去除率均在 90% 以上。其中玉米秆炭对溶液 Pb²⁺ 的去除率达 90.30%,麦秆炭和花生壳炭的去除率为 52% 和 47%^[72]。在镉污染稻田施用生物炭 2~3 年后,土壤 pH 分别提高了 0.16~0.65 和 0.26~0.60,有机质含量提高了 26.2%~50.4% 和 29.2%~51.2%,镉的赋存形态由有效态向潜在有效态或无效态转变,生物可利用性和生态毒性显著降低^[73]。在铜、锌污染的红壤水稻土施用生物炭,土壤中有效态铜、锌含量明显下降,并且随着生物炭用量的增加下降幅度增大^[74]。在海南和广西 3 种可变电荷镉污染土壤中施用稻秆炭,发现这 3 种土壤的阳离子交换量(CEC)和土壤 pH 值均显著提高,土壤胶体 Zeta 电位向负值方向位移,土壤对 Cd(II) 的静电吸附量明显增加^[75]。对污水条件下土壤复合污染(Zn、Cd、Pb、Cu)的研究表明,施用生物炭使土壤中交换态 Zn、Cd、Pb、Cu 分别降低了 0.15%~24.11%、1.22%~16.09%、0.47%~21.51%、3.05%~77.3%,生态风险评价(TCLP)显示,施炭后生态风险均有不同程度的降低,而且随着施炭量的增加降幅增大,土壤 pH 值、有机质含量、铵态氮含量和硝态氮含量则明显提高^[76]。

在有生物炭存在的条件下,土壤中重金属污染物存在形式的变化直接影响其生物有效性。研究表明,棉秆炭通过吸附或共沉淀作用降低了镉的生物有效性,小白菜可食部分的镉含量降低了 49.43%~68.29%,根部降低了 64.14%~77.66%^[77]。

制备生物炭的热解温度,生物炭的 pH 值、颗粒细度、有机碳与无机物组分等,都会不同程度地影响生物炭对重金属的吸附^[78-80]。特别是土壤 pH 值的升高,可能促使重金属离子形成碳酸盐或磷酸盐等发生沉淀,亦或增加了土壤表面某些活性位点,降低了重金属离子的活性,从而增加了对重金属离子的吸附。另一方面,生物炭表面的官能团也有可能与具有很强亲和力的重金属离子结合形成金属配合物,从而降低重金属离子的富集程度^[81-83]。

4 生物炭与土壤改良和农村环境建设

现代农业的发展已不仅仅是单纯满足在资源刚性约束条件下追求单位产出最大化的单一性发展模式,而是逐渐注重资源、环境与人文的和谐发展,互利共赢,从而实现经济效益、社会效益和生态效益的最大化。毫无疑问,生物炭技术从其兴起、发展、形成,一直到付诸实践;从理论探索、技术创新、产业发展,一直到产品的推广应用,都充分体现了这一核心理念。

生物炭技术很有可能从根本上解决大量农林废弃物的高效资源化利用问题,同时避免因焚烧秸秆产生的环境污染,有效地解决生物质随意丢弃、堆放造成的农村“脏、乱、差”等人居环境劣化问题,促进人与自然、社会与环境的和谐发展^[84]。

建国 60 余年来,我国在发展农业方面取得了巨大成就,用占世界 9% 的耕地,养活了世界 22% 的人口。特别是近年来,粮食生产总量连续多年突破万亿斤大关,为稳定粮食价格、促进经济快速发展和维护社会安定做出了突出贡献。在这巨大成绩和连年丰收的背后,不仅仅是强大的政策保障、巨大的生产投入和领先的科技支撑,还有大量使用化肥、耕地得不到休闲、只种不养的掠夺式生产方式!土壤酸化、沙化、盐碱化、粘重板结、有机质含量下降、土层变薄、水体富营养化等形势严峻。因此,稳定耕地数量、提升和保护耕地质量、挖掘产能潜力成为确保国家粮食安全的必然选择。建立在生物炭技术基础上的生物质炭化还田,对于改善耕地质量、提高作物产量、维持农田生态系统平衡与稳定、促进“土壤-环境-作物”的和谐与可持续发展都将具有重要意义和广阔的应用前景。

5 展望

近年来,国内外有关生物炭方面的研究迅猛发展,生物炭在环境领域的效应也有一定研究证实,但无论从宏观层面还是微观视角来看,仍有许多问题有待于我们去思考和解决。

在宏观层面,纵观目前相关研究,在一些关键问题上还存在一定争议,这与生物炭的选材、制备工艺条件及其应用的土壤环境等因素密切相关,也是一些研究结果相悖或无法重复的主要原因,同时也增加了同类、共性研究的对比分析、评价难度。因此,制定行业或专业性制炭、用炭、测炭标准及分析方法和评价体系就成为未来生物炭相关研究的必然选择。在温室气体排放领域,生物炭的主动减排效应仍有待于更多

的试验研究来验证,需要在大幅度、宽范围条件下的稳定的、可靠的试验数据支撑,也需要对生物炭固碳减排潜力、效益进行综合分析、评估,明确生物炭在碳排放领域的作用、地位和前景。而在“农田碳汇”和环境保护领域,在注意到生物炭的积极、乐观效应的同时,也应该注意到生物炭大规模应用的生态影响,有必要对大量、长时间生物炭输入的环境安全性进行科学评价,如是否会在一定时间后发生分解并产生温室气体或其他物质、能否改变生物多样性、是否对生态系统平衡产生风险等。生物炭的碳含量较高,大量施用势必会大幅提升土壤碳库容,而生物炭被认为是土壤腐殖质中高芳香化结构的组成部分^[70],因此生物炭可能大幅度提高土壤有机质含量,从而培育和稳定土壤有机库,成为构筑可持续利用土壤的前提^[70]。但是,生态环境系统中的碳库形成具有“长期、平衡、稳定”的显著特点,生物炭的高碳量、持续人为输入是否会改变原本自然存在的碳循环路径和碳库收支走向,进而影响生态环境系统,同样也值得我们去深思和探索。

从微观角度,更有许多待解之“题”。诸如生物炭吸附一种或多种有机污染物、重金属的过程、机制,吸附位点的具体位置和稳定性,能否再次释放或产生次生污染?被吸附的有毒、有害物质随时间变化能否被有效转化或固化变成不会释放的潜在污染“源”?生物炭能否在土壤中降解,通过何种途径降解,降解后如何转化、迁移等等。生物炭留给我们的探索空间和未解之“题”还很多很多。

虽然生物炭的长期、大面积应用效果还有待于时日考证,其生态风险也需要进行长期、系统、全面的评估,但生物炭所具有的突出优势已在农业及环境污染治理等领域彰显出巨大潜力。科学合理、适地适时地选择和应用生物炭技术,是发挥生物炭巨大潜能与应用价值的客观要求。基于农业生态环境系统所具有的复杂性、脆弱性、敏感性和长期性特点,有必要高度关注生物炭技术及其有可能带来的对资源与环境的短期和长远效应,充分考虑资源与环境的承载能力,恰当地发挥生物炭技术在农业生态环境系统建设中的作用,为构建“生态、和谐、安全、低碳和可持续”的农业环境发展模式探索出一条新路。为此,若干理论与技术问题和利用原则有待于进一步研究,包括:

(1)制备生物炭的设备、工艺和选材问题。生物炭的环境效应与其结构和理化性质密切相关,因不同条件科学地选择适用的生物炭是极其必要的。这对制备生物炭的设备、工艺和材料等提出了更高的要求。因

此,加强相关设备和技术创新、优化制炭工艺、合理选择制炭材料以生产出适于不同需求的生物炭,就成为实现生物炭大面积推广应用的基础。同时,应遵循“生态、安全、循环、可持续、效益最大化”原则,对生物质炭化后的有毒物质含量、环境应用风险、累积反馈效应等进行全面、系统地分析和综合评估,建立基于环境安全的生物炭应用标准,使生物炭在农业及农业环境领域“可用、可控、可循”。

(2)生物炭的“适地、适时、适用”问题。从现有研究结果和发展状况来看,生物炭是修复农业环境污染,促进资源与环境可持续发展,低碳、环保、生态可行技术途径之一。但在实际应用中,方法是否科学、合理,应用是否得当等,都会影响应用效果。因此,生物炭应用于农业环境领域应坚持“适时、适地、适用”的原则,严格掌控环境风险,注意与农业生产方式的结合。

(3)生物炭环境应用理论和调控机理研究问题。由于生物炭研究起步较晚,对一些关键的理论与调控机制问题还缺少足够的认识,如不同条件下生物炭对污染物的吸附过程,生物炭“质-效”、“量-效”关系及其机理等,还有待于深入探讨。

大自然赐予人类赖以繁衍生息的环境,但人类对自然的过度消费和破坏却使环境难以为继,令我们不得不承受来自大自然的严酷惩罚。生物炭这一新兴技术在促进“炭-碳”转化过程中,实现了“丰馈自然、物境和谐”的美好愿景。“穷田恶水”还是“沃土蓝天”?绝不仅仅是生存的需要,更是一种历史的选择和责任!保护生态环境刻不容缓,实现可持续发展任重而道远。

参考文献:

- [1] Antal M J, Gronli M. The art, science and technology of charcoal production[J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 2003, 42: 1619-1640.
- [2] Goldberg E D. Black carbon in the environment: Properties and distribution[M]. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- [3] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: Analysis distribution, implications, and current challenges[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 777-794.
- [4] Washington J, Joseph J, Pignatello. Sorption hysteresis of benzene in charcoal particles[J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37(2): 409-417.
- [5] Robert W K, Ramer, Elizabeth B, et al. Identification of black carbon derived structures in a volcanic ash soil humic acid by Fourier transform cyclotron resonance mass spectrometry[J]. *Environ Sci Technol*, 2004, 38(12): 3387-3395.
- [6] Titirici M M, Thomas A, Yu S, et al. A direct synthesis of mesoporous carbons with bicontinuous pore morphology from crude plant material by hydrothermal carbonization[J]. *Chemistry of Materials*, 2007, 19: 4205-

- 4212.
- [7] 陈温福, 张伟明, 孟 军, 等. 生物炭应用技术研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 83-89.
CHEN Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun, et al. Researches on biochar application technology[J]. *Engineering Sciences*, 2011, 13(2): 83-89.
- [8] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitig A-dapt Strategy Global Change*, 2006, 11(2): 403-427.
- [9] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalies in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 3488-3497.
- [10] Kei M, Toshitatsu M, Yasuo H, et al. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95: 255-257.
- [11] Steiner C, Glaser B, Teixeira W G, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and areola[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2008, 171: 893-899.
- [12] 邢 英, 李心清, 王 兵, 等. 生物炭对黄壤中氮淋溶影响: 室内土柱模拟[J]. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2483-2488.
XING Ying, LI Xin-qing, WANG Bing, et al. Effects of biochar on soil nitrogen leaching: A laboratory simulation test with yellow soil column [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(11): 2483-2488.
- [13] 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 Zhi-hong, LI Xin-qing, XING Ying, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soil[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(2): 278-284.
- [14] Lehmann J, da Silva Jr 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: 343-357.
- [15] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, 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: 275-290.
- [16] Mehner M P. Soil organic carbon, biochar, and applicable research results for increasing farm productivity under Australian agricultural conditions[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011, 42(10): 1187-1199.
- [17] Clough T J, Condon L M. Biochar and the nitrogen cycle: Introduction [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1218-1223.
- [18] Song J Z, Peng P A, Hang W L. Black carbon and kerogen in soil and sediments: Quantification and characterization[J]. *Environ Sci Technol*, 2002, 36(18): 3960-3967.
- [19] Comelissen G, Gustaffon O, Bueheli T, et al. Extensive sorption of organic compounds to black carbon, coal, and kerogen in sediments and soil: Mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation, and biodegradation[J]. *Environ Sci & Technol*, 2005, 39(18): 6881-6895.
- [20] Allen-King R M, Grathwohl P, Ball W P. New modeling paradigms for the sorption of hydrophobic organic chemicals to heterogeneous carbonaceous matter in soils, sediments and rocks[J]. *Advances in Water Resources*, 2002, 25: 985-1016.
- [21] Yang Y N, Sheng G Y. Enhanced pesticide sorption by soils containing particulate matter from crop residue burns[J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37(16): 3635-3639.
- [22] Braida W J. Sorption hysteresis of benzene in charcoal particles[J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37(2): 409-417.
- [23] Chen B L, Yuan M X. Enhanced sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons by soil amended with biochar[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(1): 62-71.
- [24] 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.
HUA Li, CHEN Ying-xu, WU Wei-xiang, et al. Effect of bio-charcoal on the trans of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil-plant system with composted sludge application[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(8): 2419-2424.
- [25] 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.
- [26] 余向阳, 张志勇, 张新明, 等. 黑碳对土壤中毒死蜱降解的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5): 1681-1684.
YU Xiang-yang, ZHANG Zhi-yong, ZHANG Xin-ming, et al. Effect of charcoal the degradation of chlopyrifos in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5): 1681-1684.
- [27] 王廷廷, 余向阳, 沈 燕, 等. 生物质炭施用对土壤中氯虫苯甲酰胺吸附及消解行为的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(4): 1339-1345.
WANG Ting-ting, YU Xiang-yang, SHEN Yan, et al. Impact of biochar amendment on the sorption and dissipation of chlorantraniliprole in soils[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(4): 1339-1345.
- [28] 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.
YU Xiang-yang, WANG Dong-lan, MU Chang-li. Role of biochar in slow sorption and desorption of diuron in soil[J]. *Jiangsu J of Agr Sci*, 2011, 27(5): 1011-1015.
- [29] 宋 洋, 王 芳, 杨兴伦, 等. 生物质炭对土壤中氯苯类物质生物有效性的影响及评价方法[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 169-174.
SONG Yang, WANG Fang, YANG Xing-lun, et al. Influence and assessment of biochar on the bioavailability of chlorobenzenes in soil[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(1): 169-174.
- [30] 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.
CHEN Zai-ming, CHEN Bao-liang, ZHOU Dan-dan. Composition and sorption properties of rice-straw derived biochars[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(1): 9-19.
- [31] 张桂香, 刘希涛, 孙 可, 等. 不同温度下制备的玉米秸秆生物炭对西玛津的吸附作用[C]. 北京, 2011: 119-122.
ZHANG Gui-xiang, LIU Xi-tao, SUN Ke, et al. Sorption of simazine to

- corn straw biochars prepared at different temperatures[C]. Beijing, 2011: 119–122.
- [32] Zhu D Q, Kwon S, Pignatello J J. Adsorption of single-ring organic compounds to wood charcoals prepared under different thermochemical conditions[J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39(11):3990–3998.
- [33] Yang X, Guo Y G, Rai Y, et al. Reduced plant uptake of pesticides with biochar additions to soil[J]. *Chemosphere*, 2009, 76(5):665–671.
- [34] Watson R T, Noble I R, Bolin B, et al. Land use, land-use change, and forestry[D]. Cambridge, U K: Cambridge University Press, 2000.
- [35] 金琳, 李玉娥, 高清竹, 等. 中国农田管理土壤碳汇估算[J]. 中国农业科学, 2008, 41(3):734–743.
JIN Lin, LI Yu-e, GAO Qing-zhu, et al. Estimate of carbon sequestration under cropland management in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(3):734–743.
- [36] Lichter J S H, Barron C E. Soil carbon sequestration and turnover in a pine forest after six years of atmospheric CO₂ enrichment[J]. *Ecology*, 2005, 86:1835–1847.
- [37] Deluca T H, Mackenzie M D, Gundale M J, et al. Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in Ponderosa pine forests [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70:448–453.
- [38] Rondon M, 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, 43:688–708.
- [39] 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.
- [40] 花莉, 张成, 马宏瑞, 等. 秸秆生物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 Li, ZHANG Cheng, MA Hong-rui, et al. Environmental benefits of biochar made by agricultural straw when applied to soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(10):2489–2492.
- [41] Saito M, Marumoto T. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi: The status quo in Japan and the future prospects [J]. *Plant and Soil*, 2002, 244:273–279.
- [42] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, et al. Long term effects of mature, 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.
- [43] Pietikainen J, Kiikkila O, Fritze H. Charcoal as a habitat for microbes and its effects on the microbial community of the underlying humus[J]. *Oikos*, 2000, 89:231–242.
- [44] Xiao B H, Yu Z Q, Huang W L, et al. Black carbon and kerogen in soils and sediments; 2. Their roles in equilibrium sorption of less-polar organic pollutants[J]. *Environ Sci and Technol*, 2004, 38(22):5842–5852.
- [45] Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change [J]. *Nature Communications*, 2010, 1(5):1–9.
- [46] Johannes L. Bioenergy in the Black[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(7):381–387.
- [47] 张斌, 刘晓雨, 潘根兴, 等. 施用生物炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23):4844–4853.
ZHANG Bin, LIU Xiao-yu, PAN Gen-xing, et al. Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23):4844–4853.
- [48] 彭华, 纪雄辉, 吴家梅, 等. 生物黑炭还田对晚稻 CH₄ 和 N₂O 综合减排影响研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(11):1620–1625.
PENG Hua, JI Xiong-hui, WU Jia-mei, et al. Integrated effect of decreasing CH₄ and N₂O emission by biochar incorporated to paddy field on late rice[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(11):1620–1625.
- [49] Rondon M, Ramirez J A, Lehmann J. Greenhouse gas emissions decrease with charcoal additions to tropical soils[C]. Baltimore, 2005.
- [50] Roberts K G, Gloy B A, Joseph S, et al. Life cycle assessment of biochar systems; Estimating the energetic, economic, and climate change potential[J]. *Environ Sci Technol*, 2010, 44(2):827–833.
- [51] Renner R. Rethinking biochar[J]. *Environ Sci Technol*, 2007, 41(17):5932–5933.
- [52] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems a review[J]. *Mitig Adapt Strat for Glob Change*, 2006, 11:403–427.
- [53] Woods W L. Amazonian dark earths: Wim Sombroek's vision[M]. Berlin: Springer, 2008.
- [54] Chen Y, Shinogi Y, Taira M. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality[J]. *Soil Res*, 2010, 48(7):526–530.
- [55] Emma M. Black is the new green[J]. *Nature*, 2006, 442:624–626.
- [56] Xin S, Liang L J, Dong Q Z. Investigating roles of organic and inorganic soil components in sorption of polar and nonpolar aromatic compounds[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158:319–324.
- [57] Glaser B, Balashov E, Haumaier L, et al. Black carbon indensity fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31:669–678.
- [58] 马莉, 吕宁, 冶军, 等. 生物炭对灰漠土有机碳及其组分的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8):976–981.
MA Li, LÜ Ning, YE Jun, et al. Effects of biochar on organic carbon content and fractions of gray desert soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(8):976–981.
- [59] 匡崇婷, 江春玉, 李忠佩, 等. 添加生物炭对红壤水稻土有机碳矿化和微生物生物量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(4):570–575.
KUANG Chong-ting, JIANG Chun-yu, LI Zhong-pei, et al. Effects of biochar amendments on soil organic carbon mineralization and microbial biomass in red paddy soils[J]. *Soils*, 2012, 44(4):570–575.
- [60] 花莉, 金素素, 唐志刚. 生物炭输入对土壤 CO₂ 释放影响的研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(11):6501–6503, 6540.
HUA Li, JIN Su-su, TANG Zhi-gang. Effect of bio-charcoal on release of carbon dioxide in soil[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2012, 40(11):6501–6503, 6540.
- [61] 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, 2009; 1-56.
- [62] 章明奎, 顾国平, 王 阳. 生物质炭在土壤中的降解特征[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2012, 38(3):329-335.
ZHANG Ming-kui, GU Guo-ping, WANG Yang. Degradation characteristic of different biochar materials in soil environments[J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences)*, 2012, 38(3): 329-335.
- [63] 叶丽丽, 王翠红, 周 虎, 等. 添加生物质黑炭对红壤结构稳定性的影响[J]. 土壤, 2012, 44(1):62-66.
YE Li-li, WANG Cui-hong, ZHOU Hu, et al. Effects of rice straw-derived biochar addition on soil structure stability of an ultisol [J]. *Soils*, 2012, 44(1):62-66.
- [64] Seiler W, Crutzen P J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning[J]. *Climatic Change*, 1980, 2:207-247.
- [65] Druffel E R M. Comments on the importance of black carbon in the global carbon cycle[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 192:197-200.
- [66] Shindo H. Elementary composition, humus composition, and decomposition in soil of charred grassland plants[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1991, 37:651-657.
- [67] 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.
- [68] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: Analysis distribution, implications, and current Challenges[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3):777-794.
- [69] 张旭东, 梁 超, 诸葛玉平, 等. 黑碳在土壤有机碳生物地球化学循环中的作用[J]. 土壤通报, 2003, 34(4):349-355.
ZHANG Xu-dong, LIANG Chao, ZHUGE Yu-ping, et al. Roles of black carbon in the biogeochemical cycles of soil organic carbon [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(4):349-355.
- [70] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447:143-144.
- [71] Hua L, Wu W X, Liu Y, et al. 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.
- [72] 刘莹莹, 秦海芝, 李恋卿, 等. 不同作物原料热裂解生物质炭对溶液中 Cd²⁺和 Pb²⁺的吸附特性[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1):146-152.
LIU Ying-ying, QIN Hai-yi, LI Lian-qing, et al. Adsorption of Cd²⁺ and Pb²⁺ in aqueous solution by biochars produced from the pyrolysis of different crop feedstock[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 2(1):146-152.
- [73] 杨亚鸽, 崔立强, 严金龙, 等. 镉污染土壤生物质炭修复的化学稳定机制[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(5):2044-2046, 2057.
YANG Ya-ge, CUI Li-qiang, YAN Jin-long, et al. Chemical mechanism in amendment of cadmium contaminated paddy soils by biochar [J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2013, 41(5):2044-2046, 2057.
- [74] 匡崇婷. 生物质炭对红壤水稻土有机碳分解和重金属形态的影响 [D]. 南京:南京农业大学, 2011.
KUANG Chong-ting. Influence of biochar amendments on decomposition of soil organic carbon and morphology of heavy metal in red paddy soil[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [75] 蒋田雨, 姜 军, 徐仁扣, 等. 稻草生物质炭对3种可变电荷土壤吸附 Cd(II)的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(6):1111-1117.
JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, et al. Effect of biochar from rice straw on adsorption of Cd(II) by variable charge soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(6):1111-1117.
- [76] 许 超, 林晓滨, 吴启堂, 等. 淹水条件下生物炭对污染土壤重金属有效性及养分含量的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6):194-198.
XU Chao, LIN Xiao-bin, WU Qi-tang, et al. Impacts of biochar on availability of heavy metals and nutrient content of contaminated soil under waterlogged conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6):194-198.
- [77] 周建斌, 邓丛静, 陈金林, 等. 棉秆炭对镉污染土壤的修复效果[J]. 生态环境, 2008, 17(5):1857-1860.
ZHOU Jian-bin, DENG Cong-jing, CHEN Jin-lin, et al. Remediation effects of cotton stalk carbon on cadmium(Cd) contaminated soil[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(5):1857-1860.
- [78] 丁文川, 朱庆祥, 曾晓岚, 等. 不同热解温度生物炭改良铅和镉污染土壤的研究[J]. 科技导报, 2011, 29(14):22-25.
DING Wen-chuan, ZHU Qing-xiang, ZENG Xiao-lan, et al. Biochars from different pyrolytic temperature amending lead and cadmium contaminated soil[J]. *Science & Technology Review*, 2011, 29(14):22-25.
- [79] 逢雅萍, 黄 爽, 杨金忠, 等. 生物炭促进水稻土镉吸附并阻滞水分运移[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11):107-114.
PANG Ya-ping, HUANG Shuang, YANG Jin-zhong, et al. Promotion of biochar on adsorption of cadmium and retardation on water transport in paddy soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(11):107-114.
- [80] 陈再明, 方 远, 徐义亮, 等. 水稻秸秆生物炭对重金属 Pb²⁺的吸附作用及影响因素[J]. 环境科学学报, 2012, 32(4):769-776.
CHEN Zai-ming, FANG Yuan, XU Yi-liang, et al. Adsorption of Pb²⁺ by rice straw derived-biochar and its influential factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(4):769-776.
- [81] Uchimiya M, Lima I M, Klasson K T, et al. Contaminant immobilization and nutrient release by biochar soil amendment: Roles of natural organic matter[J]. *Chemosphere*, 2010, 80(8):935-940.
- [82] Cao X D, Ma L N, Gao B, et al. Dairy-manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(9):3285-3291.
- [83] Keiluweit M, Kleber M. Molecular-level interactions in soils and sediments: The role of aromatic π -systems[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(10):3421-3429.
- [84] 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 Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16):3324-3333.