

# 生物炭应用技术研究

陈温福, 张伟明, 孟 军, 徐正进

(辽宁生物炭工程技术研究中心, 沈阳 110866)

**[摘要]** 对生物炭研究历史、现状、存在的问题及产业化前景进行了综合分析与评述,重点阐述了生物炭在能源、环境、农业等领域的应用价值与重要作用。认为生物炭在应对气候与环境变化、固碳减排、保障能源安全和粮食安全等方面都具有重要应用价值和现实意义。文章提出了以农林废弃物资源化利用为基础的生物炭研究发展方向、建议和产业化开发与应用的技术途径。为推动生物炭工程技术创新与产业化发展提供参考依据。

**[关键词]** 生物炭;气候变化;能源替代

**[中图分类号]** TK6 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2011)02-0083-07

## 1 前言

生物质炭化技术是公认的解决气候变化问题的可行技术措施之一,具有原材料来源广泛、生产成本低、生态安全、无污染、可大面积推广等显著特点。生物质炭化后产生的生物炭应用于生态与环境领域,可以固碳减排,是一种有效的“碳汇”技术,与农、林业相结合,可解决农林废弃物污染与温室气体排放问题。生物炭施入农田,可有效改善土壤理化性质,增加作物产量,促进农业可持续发展。应用于能源领域,可成为替代煤、石油、天然气的清洁能源。生物炭进一步加工成活性炭,可用于重金属污染吸附、水质净化等。

生物炭的综合利用在很大程度上可以解决可持续发展、节能降耗、环境保护与治理等领域面临的复杂问题,有助于构建低碳高效经济发展模式,对保障国家环境、能源、粮食安全意义重大。适逢国家推出战略性新兴产业发展规划,笔者针对现阶段生物炭在农业、环境、能源等领域的应用研究与开发进展作简要的综述,以期为促进生物炭产业的快速发展提供参考。

## 2 生物炭应用技术研究概述

到目前为止,“生物炭”还没有十分确切的定义。但广义上可以认为是黑碳的一种,通常是指以自然界广泛存在的生物质资源为基础,利用特定的炭化技术,由生物质在缺氧条件下不完全燃烧所产生的炭质。国外将其定义为 biochar<sup>[1]</sup>,一般指生物质如木材、农作物废弃物、植物组织或动物骨骼等在缺氧和相对温度“较低”( < 700 ℃)条件下热解而形成的产物<sup>[1, 2]</sup>。常见的生物炭包括木炭、竹炭、秸秆炭、稻壳炭等。它们主要由芳香烃和单质碳或具有石墨结构的碳组成,含有 60% 以上的碳元素,还包括 H、O、N、S 及少量的微量元素<sup>[3]</sup>。生物炭可溶性极低,具有高度羧酸酯化和芳香化结构<sup>[4, 5]</sup>,拥有较大的孔隙度和比表面积<sup>[6]</sup>。这些基本性质使其具备了吸附力、抗氧化力和抗生物分解能力强的特性,可广泛应用于农业、工业、能源、环境等领域。图 1 为生物炭微观结构,采用“颗粒炭化炉”生产新工艺制备的生物炭保留了完整的孔隙结构。

炭的制备是人类在长期生产实践中摸索出来的一项古老的实用技术,历史悠久,应用广泛。最常见的制炭方法是将杂草、秸秆、枯枝、落叶等堆积起来,

**[收稿日期]** 2010-12-06; **[修回日期]** 2010-12-13

**[作者简介]** 陈温福(1955—),男,辽宁法库县人,中国工程院院士,沈阳农业大学教授,博士生导师,从事稻作科学研究和生物炭技术开发与应用研究;E-mail:wfchen5512@yahoo.com.cn

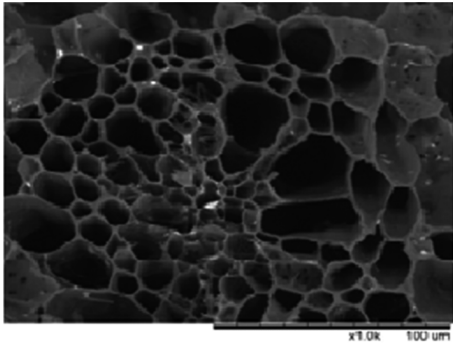


图1 生物炭微观结构

Fig. 1 Microstructure of biochar

用薄层泥土覆盖,在封口处点火薰烟,或者以“窑”的形式将生物质加温,在缺氧环境条件下燃烧,使其裂解而形成生物炭(俗称“闷炭”)。

千百年前,人们就开始将生物炭用于燃料、防腐剂、火药等诸多领域,我国唐代大诗人白居易的“卖炭翁”诗开篇就是“卖炭翁,伐薪烧炭南山中”。这是当时制炭与应用的真实写照。随着生物炭应用与需求的不断扩大,用传统方法大规模生产生物炭已经不切实际。近代,研究人员已发明并掌握了包括高温分解法在内的较为先进的制炭技术,生产效率和炭质均有所提高。新的制炭技术除了能够获得生物炭以外,还可以通过收集、过滤等手段,得到混合的可燃气和液态焦油等副产品,广泛应用于生活能源、发电、工业原料等领域。

早在20世纪80年代,就已经有学者对生物炭进行过一系列较为深入的研究。但生物炭真正在世界范围内产生重要影响并受到广泛关注,则源于近年来全球气候变暖与能源、粮食危机日益蔓延的大背景。现在,许多国家和国际科研机构都相继展开了与生物炭有关的研究,并取得了明显的进展。

### 3 生物炭应用技术研究进展

#### 3.1 生物炭在环境领域的应用

进入21世纪,气候变化问题作为人类社会可持续发展所面临的重大挑战,已引起各国政府与科学家的高度关注。随着我国经济持续、快速的发展,温室气体排放量的增加难以避免,我国在相关国际谈判中面临的政治、经济与外交压力也越来越大。CO<sub>2</sub>等温室气体排放量日益成为影响和制约国家社会经济和可持续发展的一个重要因素。如何在经济高速增长的同时,找到有效的节能减排技术措施,缓

解减排压力,促进经济与环境的全面、协调、可持续发展,是当今我国乃至全世界面临和亟待解决的重要问题。

除了对现有能源技术进行低碳改造外,大力发展和应用新型能源是有效的途径之一。在众多能源性资源中,生物质资源具有来源广泛、易集中处理、低污染、可再生等特点,应用潜力巨大。据统计,1999年我国仅作物秸秆一项,资源总量就已达约6.4亿t<sup>[7]</sup>,目前更是已超过7亿t。但是,其中有33%~40%被废弃在田间或露天焚烧<sup>[8]</sup>,不仅造成了生物质资源的严重浪费,破坏了土壤结构、使生产能力下降,还导致了严重的环境污染,威胁交通运输和人们的生产、生活安全。

如果将这些废弃的生物质资源通过炭化技术制备成生物炭,则可在很大程度上解决上述问题。美国康奈尔大学教授Lehmann曾在*Nature*杂志上撰文指出,植物通过光合作用吸收CO<sub>2</sub>,合成并转化成碳水化合物储存在植物体内,可以在无氧或缺氧条件下将这些植物体热解处理,炭化后得到的生物炭可重新施入并封存于土壤中,以达到固碳的目的。这是一个净的“负碳”过程,可以大大降低大气中CO<sub>2</sub>的含量,进而解决因温室气体排放所引起的全球气候变暖问题。Lehmann乐观地估计,生物炭每年最多可吸收10亿t温室气体,超过2007年排放总量85亿t的10%<sup>[9]</sup>。

生物炭通过固定生物质中的碳,对大气、土壤循环、陆地碳储存等都有重要影响。有学者认为,生物炭可能是唯一的稳定性碳源,是改变土壤碳库自然平衡、较大程度提高土壤碳库容量的技术方式<sup>[10]</sup>。也是解决CO<sub>2</sub>排放、缓解温室效应的一条重要的可行途径。

生物炭不仅是大气CO<sub>2</sub>的一个长期“碳汇”,在全球碳循环中具有重要作用,同时也被认为可能是碳平衡中“迷失碳汇”的重要部分<sup>[11]</sup>,生物质炭化还田很有可能成为人类解决全球气候变化问题的一条重要途径<sup>[9,12]</sup>。

除了碳封存,生物炭直接还田还可大幅度减少农田土壤中氧化氮等温室气体的排放<sup>[13]</sup>。Rondon等<sup>[14]</sup>以20g/kg标准向牧草地与大豆土壤中添加生物炭,发现这两种土壤的N<sub>2</sub>O排放量分别降低了80%和50%,CH<sub>4</sub>的释放过程也受到明显抑制。但是,目前还缺少大规模试验和统计数据支持,具体的贡献率和确定性机制、机理还有待于深入探讨。

生物炭具有孔隙度好、比表面积大、吸附能力强的特点,进一步加工成生物活性炭以后,可应用于污水处理、水质净化、废气处理等环境领域。工业废水是重要的环境污染源,研究表明,生物活性炭对废水中无机重金属离子具有较好的选择性吸附能力<sup>[15]</sup>,在净化水质,处理饮用水与微污染水方面有良好的效果。如采用“臭氧-生物活性炭工艺”,可高效去除水中溶解性有机物和致癌突变物。这项技术以净化水质效果好、出水安全、优质而受到广泛重视<sup>[16]</sup>。三卤甲烷、卤代烃、游离氯、氨基甲酸酯类杀虫剂及某些重金属等,都可通过此种方法有效地去除,且不易产生二次污染<sup>[17]</sup>。生物活性炭应用于烟气及环境中污染废气治理,可吸附 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 等污染气体,进而起到脱硫、脱硝作用。Wey 等<sup>[18]</sup>研究了炭载金属铜和铈脱硫剂的脱硫性能,效果良好。邱琳等<sup>[19]</sup>则证明用碳酸钠溶液改性的活性炭脱硫,比普通纯活性炭脱硫剂的硫容提高近 30 %。

在环保领域,生物炭广泛应用于固碳减排、污染治理、水体净化等诸多方面,对适应新时期经济发展模式,促进环境与资源的循环和可持续发展,都具有重要意义。

### 3.2 生物炭在农业领域的应用进展

农林业生产过程中的废弃生物质通过炭化技术制备成生物炭,用作土壤改良剂返还给农田,可有效改善土壤理化性质与微生态环境,修复污染土壤,提高土壤生产性能、作物产量和品质。这种“取之于农,用之于农”的循环经济模式,有利于促进农、林业的可持续发展。

早在 19 世纪,生活在亚马逊河流域的人们就发现了一种特殊的“黑土壤”(Terra Preta)并开始在农业上使用,当地人将其称为“印第安人黑土”<sup>[12,20]</sup>。这种土壤含有丰富的生物炭及其他有机物质,具有很强的恢复土壤生产力的能力。Renner 指出,千百年来,亚马逊原住居民所制造的含有生物炭的黑土壤,其黑碳含量是周围土壤的 70 倍,且远高于其他区域<sup>[21]</sup>,其中富含的碳元素使土壤的肥沃度维持了数千年<sup>[22]</sup>。这些存在于土壤中不断累积的生物炭,随着时间与土壤的变迁,在提高作物产量,维持土壤生产能力等方面扮演了重要角色。

生物炭本身所具有的微孔结构与极强的吸附力,使其可以吸附更多的养分离子。生物质炭化还田以后,其本身实际可供作物利用的养分含量并不多,但它可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而提高土壤肥力<sup>[23-25]</sup>,间接地提高作物养分利用效率,从而对作物生长起到积极的促进作用<sup>[26-28]</sup>。在低纬度地区的田间试验表明,农田土壤施用 20 t/hm<sup>2</sup> 以上的生物炭大约可减少 10 % 的肥料施用量<sup>[29]</sup>。同时,生物炭有效地吸附 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 与 NH<sub>3</sub>,减少了土壤中氨的挥发<sup>[10]</sup>,进一步促进了农业减排。

Steinbeiss 等利用磷酸脂肪酸法研究发现,生物炭明显增加了土壤中真菌和革兰氏阴性菌的生物量<sup>[30]</sup>。Warnock 等<sup>[31]</sup>的研究表明,土壤中施入生物炭以后,作物根部真菌的繁殖能力增强,刺激了微生物群落发生变化。生物炭保持了原有生物质的结构,具有大量微孔,为微生物栖息和繁殖提供了一个良好的“避难”场所,减少了微生物之间的生存竞争<sup>[32]</sup>,并为它们提供了不同的碳源、能量和矿物质营养,使它们可以旺盛地生存和繁衍<sup>[31,33]</sup>。生物炭的微孔特性也使其具备了类似“海绵”一样的作用,可较好地保持水分与空气的融通性,为微生物的生长与繁殖提供不可多得的良好环境条件。微生物的繁殖同时也改变了作物生长的微环境,对作物生理生化过程产生重要影响。

生物炭在土壤中所起到的综合作用,有利于促进作物生长,提高作物产量。Steiner 等<sup>[22]</sup>在巴西亚马逊河流域土壤中以 11 t/hm<sup>2</sup> 的标准添加生物炭,经过 2 年 4 个生长季后发现,水稻和高粱的产量累积增加约 75 %。Kishimoto 等研究表明,当以 500 kg/hm<sup>2</sup> 的标准向火山灰壤土中施加生物炭时,大豆产量增加了 51 %<sup>[34]</sup>。Iswaran 等以 500 kg/hm<sup>2</sup> 标准向 Dehli 土中添加生物炭,发现豌豆的生物量增加了 60 %,大豆的产量增加了 50 %,绿豆的产量增加了 22 %<sup>[35]</sup>。刘世杰等<sup>[36]</sup>研究发现,黑碳能够促进玉米苗期生长,其株高、茎粗分别比对照增加 4.31 ~ 13.13 cm 和 0.04 ~ 0.18 cm。生物炭的存在不仅增加了玉米对氮、磷尤其是钾元素的吸收,也减少了铵离子、钾离子、钙离子等养分的淋溶。

在受污染土壤中添加生物炭,可降低污染物的生物有效性,表现出土壤修复与促进作物生长的双重效果。周建斌等研究了棉秆炭对镉污染土壤的修复效果以及镉污染土壤上小白菜对镉的吸收,结果表明,棉秆炭能够通过吸附或共沉淀作用降低土壤镉的生物有效性,其中小白菜可食部分镉质量分数降低了 49.43 % ~ 68.29 %,根部降低 64.14 % ~ 77.66 %<sup>[37]</sup>。张伟明等研究了在污灌区重金属污

染土壤中添加秸秆炭对水稻生长的影响,结果表明,不同秸秆炭处理均促进了水稻的生长,提高了水稻光合速率,显著增加了水稻产量<sup>[38]</sup>。Spokas 等用木屑制成的生物炭添加进土壤,发现当土壤中这种生物炭含量达到5%时,对莠去津、乙草胺两种除草剂的吸收量会明显增加<sup>[39]</sup>。

生物炭所具有的微孔结构丰富、比表面积大、吸附力强等特性,使其成为生产长效缓释肥料的优良基质。近年来,沈阳农业大学“辽宁生物炭工程技术研究中心”完成了多种以生物炭为基质的专用缓释肥的设计与研发,目前已进入市场开发与推广阶段。试验表明,炭基缓释肥具有提高地力、缓释效果好、环保高效等特点,在大田试验中表现出明显的增加产量和提高品质的效果,显著地促进了马铃薯、花生、大豆等作物的早发快长,同时,减少了养分的淋溶损失和化学肥料的面源污染,维持了土壤的可持续生产能力。

生物炭来源于农业,亦可广泛应用于农业。深入研究、开发、利用生物炭,是合理、高效利用废弃生物质资源,解决三农问题的重要技术措施,对农业高效、生态、环保、可持续发展具有重要意义。

### 3.3 生物炭在新能源领域的开发与利用

长期以来,我国经济的高速发展是建立在高耗能、高排放、高污染的能源结构之上,是难以持续发展方式。与日俱增的能源危机已成为制约经济、社会发展的瓶颈。随着化石燃料的日益枯竭<sup>[40]</sup>,积极开发和利用新的替代能源,优化能源产业结构,建立多种能源并存的新体系已成当务之急。

生物质能是地球上唯一可再生的碳源,在环境保护、资源利用等方面具有特殊优势,被认为是人类未来能源和化学燃料的重要来源<sup>[41-43]</sup>,极具开发潜力。生物质能的研究与开发对象一般是指农、林业废弃物如稻壳、木屑、花生壳、秸秆等,也包括一些能源植物、水生植物、部分工业和生活废弃物等。这些生物质具有蕴藏量大、分布广泛、易获取、可再生、成本低等显著特点。通过生物质能转换技术可高效生产各种清洁能源,替代煤炭、石油和天然气等,是能源领域“开源节流”的重要途径。

生物质能源利用技术主要包括直接燃烧、液化、气化、固化等。这些技术各有所长,但在实际操作中,普遍存在生产成本低、应用局限性大、利用效率低、很难大面积推广等问题。随着低成本制炭工艺的日臻完善,生物炭将有可能逐渐成为生物质能高

效利用的主要形式。但由于可供制炭的农林生物质分布在广大农村,数量庞大而分散,收集、储运和加工都存在难以克服的困难。因此,到目前为止,生物炭产业仍处于停滞状态。

近年来,沈阳农业大学“辽宁生物炭工程技术研究中心”经过潜心研究,发明了“颗粒炭化炉”生产新工艺,彻底解决了生物炭制备中的“瓶颈”问题,将农林废弃生物质收集、储运、异地集中炭化和深加工,变为农林废弃生物质在产地就地炭化、集炭异地深加工或就地深加工,彻底解决了集中炭化与农林生物质分散、收集、储运困难之间的矛盾,使农林废弃生物质大规模炭化、利用成为可能。该技术不需要昂贵的生产设备和高额的制造成本,生产过程中几乎不需要外加能源,也不排出“三废”。可在广大农村小到农户,大到村镇广泛建立中、小型制炭厂,实现农林废弃生物质的产地炭化。用该项技术生产的生物炭燃烧性能好,具有发热值高、清洁、无污染等特点。塑型后生产出的“炭化生物质煤”具有较高的堆密度与强度,便于储藏、运输,且清洁环保,燃烧效率高,可替代燃气、煤炭等不可再生能源,广泛用作农村分散供热、供暖的新能源,也可用于城市集中供暖、发电等。在实际使用中,炭化生物质煤易于点燃、无烟无味、无污染、残渣少、重量轻、热值高,燃烧与使用性能均优于同类燃料,是可以代替木柴、原煤、液化气等普通燃料的可再生的新型能源,市场开发潜力巨大。

以我国年产秸秆7亿t、林业废弃生物质3.5亿t测算,全部制炭后其热值相当于2.25亿tce,价值1800亿元人民币,可填补我国燃煤缺口的一半以上。从减排角度考虑,如果开发成土壤改良剂或缓释肥,按照伦敦市场2007年交割的碳排放价格17欧元/t计算,可实现减排价值超过300亿元人民币。可以预见,随着化石能源的日益枯竭,化石燃料价格将大幅度上扬,生物质能源的可再生、低成本优势将越来越突出。结合我国国情,大力开发应用以农林废弃生物质为原料的炭化生物质煤,将成为我们的必然选择(见图2)。

## 4 生物炭技术与开发应用前景

在粮食危机、能源危机、环境危机日益突显的大背景下,适应低碳经济发展的需要,以前瞻性眼光看待和加强生物炭应用基础研究、技术创新及其产业化开发,已成为国内外备受关注的热点问题。

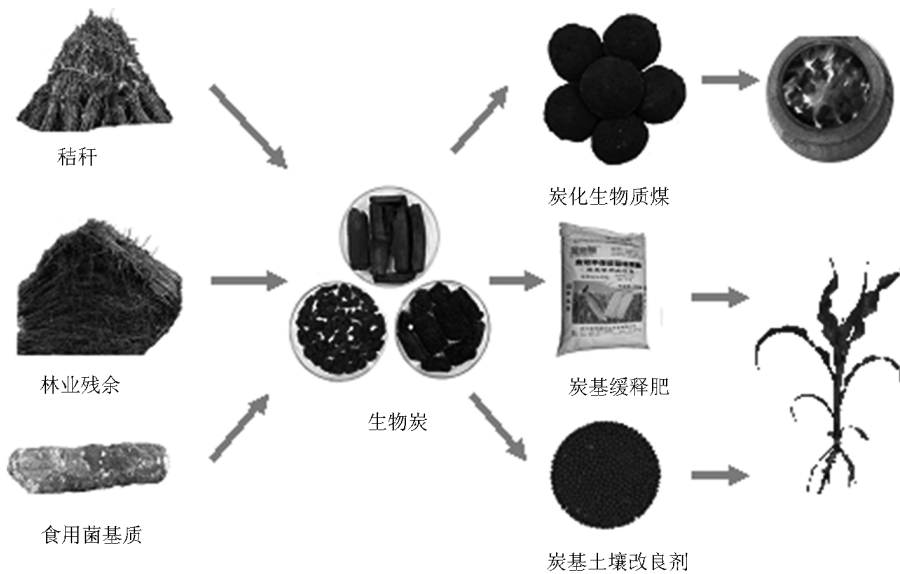


图2 生物炭应用技术框架

Fig. 2 Schematic of biochar application technology

#### 4.1 在解决全球生态环境和可持续发展中发挥作用

生物炭在解决全球生态环境和可持续发展问题中的作用已经得到普遍认可。包括英国、美国在内的诸多国家已经开展了与生物炭有关的大量系统、深入的研究,美国和英国已先后成立了专门的“生物炭研究中心”,在理论与技术研究方面取得了一定进展。

经过长期不懈的努力,我国在生物炭研究与开发领域也已积累了一定的工作基础。特别是在利用农林废弃生物质制备生物炭技术创新及其产业化开发应用方面,已走在了世界前列。2010年,“辽宁生物炭工程技术研究中心”在沈阳农业大学成立。该中心发明的小型化、低成本、可分散“炭化炉”和简单实用的炭制备新工艺,彻底解决了大型化、高成本、大规模工厂化集中制炭难以克服的原料储运问题,使数量庞大、分散、不易储运的农林废弃生物质就地炭化、加工成为可能,为生物炭产业化开发和大规模推广应用提供了行之有效的新途径。

#### 4.2 加强基础理论与技术创新研究,构建生物炭理论与技术体系

目前,对生物炭在环境、能源、农业等领域作用机理方面的基础和应用基础研究并不多见,特别是生物炭在土壤碳循环、大气碳循环中的地位与作用方面的研究还刚刚起步,亟待加强相关基础理论与技术创新研究,拓宽研究领域,探索生物炭作用规

律,丰富和完善生物炭理论与技术体系,创新应用技术,加大成果转化力度,促进生物炭产业的健康发展。

鉴于生物炭在能源、环境、农业等领域中所起到的重要作用和所具有的重大意义,国家应在产业政策、科技规划、应用推广等方面,对生物炭研究与开发给予高度重视,在政策、资金、科研投入等方面给予倾斜,包括组织针对生物炭领域重大科学技术问题的专项研究、生物炭综合开发与应用技术体系构建、国家生物炭工程技术研究平台建设等,为保障国家粮食安全、能源安全、环境安全,促进社会经济可持续发展提供技术支撑。

#### 4.3 促进生物炭产业的健康发展

加强国际间交流与合作,拓宽生物炭研究平台,着力解决生产实际与应用中出现的的关键技术问题,研究与评估生物炭在固碳减排工程技术领域的地位、作用、效果和效益,增大我国在国际碳排放问题上的话语权。同时,开展生物炭国际市场准入制度研究,积极参与国际碳市场竞争,提高国际影响力,促进低碳经济模式的健康发展。

## 5 结语

由于燃油紧缺,人们发明了用玉米生产乙醇替代汽油(乙醇汽油)。这是用一种稀缺资源(粮食)替代另一种稀缺资源(石油),无疑会使全球“饥饿危机”雪上加霜,也映衬出富国与富人对穷国与穷

人的漠视! 由于煤炭紧缺,我们发明了“炭化生物质煤”替代煤炭。本质上这是利用可再生的农林废弃物(生物质)替代另一种稀缺资源(煤炭),不仅不会加剧全球“饥饿危机”,而且有利于实现农林废弃物的资源化利用,对于应对气候与环境变化、固碳减排、保障能源安全和粮食安全都具有重要意义和广阔的发展前景!

变碳为炭,造福人类! 生物炭是一项利国利民的朝阳产业,建议国家将其纳入“十二五”战略性新兴产业发展规划,给予重点支持。

## 参考文献

- [1] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: A review [J]. *Mitig Adapt Strat Global Change*, 2006 (11): 403 - 427.
- [2] 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.
- [3] Goldberg E D. *Black Carbon in the Environment: Properties and Distribution* [M]. New York: John Wiley Press, 1985.
- [4] Washington J Braid, Joseph J Pignatello. Sorption hysteresis of benzene in charcoal particles [J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37 (2): 409 - 417.
- [5] Kramer R W, Kujawinski E B, Hatcher P G. Identification of black carbon derived structures in a volcanic ash soil humic acid by Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry [J]. *Environ Sci Technol*, 2004, 38 (12): 3387 - 3395.
- [6] Gerard Cornelissen, Zofia Kukulska, Stavros Kalaitzidis. Relations between environmental black carbon sorption and geochemical sorbent characteristics [J]. *Environ Sci Technol*, 2004, 38 (13): 3632 - 3640.
- [7] 中华人民共和国农业部中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 52.
- [8] 中国农业部, 美国能源部项目专家组. 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: 1 - 22, 78 - 79, 101 - 106.
- [9] Lehmann J. A handful of carbon [J]. *Nature*, 2007, 443: 143 - 144.
- [10] 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: Fertiliser, manure and charcoal amendments [J]. *Plant and Soils*, 2003, 249: 343 - 357.
- [11] 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 - 793.
- [12] Marris E. Black is the new green. *Nature* [J]. 2006, 442: 624 - 626.
- [13] Johannes L. Bioenergy in the black [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5 (7): 381 - 387.
- [14] Rondon M, Ramfrez J, Lehmann J. Charcoal additions reduce net emissions of greenhouse gases to the atmosphere [C] // *Proceedings of the 3rd USDA Symposium on Greenhouse Gases and Carbon Sequestration in Agriculture and Forestry*. Maryland, 2005: 208.
- [15] Tomaszewska M, Mozia S. Removal of organic matter from water by PAC/UF system [J]. *Water Res*, 2002, 36 (16): 4137 - 4143.
- [16] Lehtola M J, Miettinen L K. Changes in content of microbially available phosphorus assimilable organic carbon and microbial growth potential during drinking water treatment processes [J]. *Water Res*, 2002, 36 (15): 3681 - 3690.
- [17] 谢志刚, 刘成伦. 活性炭制备及其应用进展 [J]. *工业水处理*, 2005, 25 (7): 10 - 12, 17.
- [18] Wey M Y, Fu C H, Tseng H H, et al. Catalytic oxidization of SO<sub>2</sub> from incineration flue gas over bimetallic Cu - Ce catalysts supported on preoxidized activated carbon [J]. *Fuel*, 2003, (82): 2285 - 2290.
- [19] 邱琳, 宁平, 任丙南. 浸渍法改性活性炭脱硫 (H<sub>2</sub>S) 研究 [J]. *贵州化工*, 2005, 19 (2): 19 - 21.
- [20] Tenenbaum D. Biochar: Carbon mitigation from the ground up [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2009, 117 (2): 70 - 73.
- [21] Renner R. Rethinking biochar [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41 (17): 5932 - 5933.
- [22] 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.
- [23] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review [J]. *Biol Fert Soils*, 2002, 35: 219 - 230.
- [24] 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 charcoal [J]. *Plant Nutr Soil Sci*, 2008, 171: 893 - 899.
- [25] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, 70 (5): 1719 - 1730.
- [26] Wardle D A, Zackrisson O, Nilsson M C. The charcoal effect in Boreal forests: Mechanisms and ecological consequences [J]. *Oecologia*, 1998 (3), 115: 419 - 426.
- [27] 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 - 793.
- [28] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. The “Terra Preta” phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics [J]. *Natur Wissens Chaften*, 2001, 88 (1): 37 - 41.
- [29] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, et al. Agronomic values of green waste biochar as a soil amendment [J]. *Soil Research*, 2007, 45: 629 - 634.
- [30] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41 (6): 1301 - 1310.
- [31] Warnock D D, Lehmann J, Kuyper T W, et al. Mycorrhizal respon-

- ses to biochar in soil concepts and mechanisms[J]. *Plant Soil*, 2007, 300: 9 – 20.
- [32] Ogawa M. Symbiosis of people and nature in the tropics[J]. *Farming Japan*, 1994, 28(5): 10 – 34.
- [33] 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.
- [34] Kishimoto S, Sugiura G. Charcoal as a soil conditioner[J]. *International Achievements for the Future*, 1985, 5: 12 – 23.
- [35] Iswaran V, Jauhari 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.
- [36] 刘世杰, 窦 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.
- [37] 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.
- [38] 张伟明, 张庆忠, 陈温福. 镉污染土壤中施用秸秆炭对水稻生长发育的影响[J]. *北方水稻*, 2009, 39(2): 4 – 7.
- [39] Spokas K A, Koskinen W C, Baker J M, et al. Impacts of wood-chip bio char additions on greenhouse gas production and sorption /degradation of two herbicides in a Minnesota soil[J]. *Chemosphere*, 2009, 77(4): 574 – 581.
- [40] McLaren J S. Crop biotechnology provides an opportunity to develop a sustainable future[J]. *Trends in Biotechnology*, 2005, 23: 339 – 342.
- [41] Minow a T, Zhen F, Ogi T. Liquefaction of cellulose in hot compressed water using sodium carbonate; products distribution of different reaction temperatures[J]. *Chem Eng Jpn*, 1997, 30(1): 186 – 190.
- [42] 李俊峰, 时璟丽, 王仲颖. 欧盟可再生能源发展的新对策及对我国的启示[J]. *可再生能源*, 2007, 25(3): 1 – 2.
- [43] 周中仁, 吴文良. 生物质能研究现状及展望[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(12): 12 – 15.

## Researches on biochar application technology

Chen Wenfu, Zhang Weiming, Meng Jun, Xu Zhengjin

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

[**Abstract**] Comprehensive analysis and commentary were conducted on biochar research history, present situation, the existing questions and the industrialization prospect in this article which especially expounds the application value and vital role of biochar in energy, environment, agriculture and other areas. We considered that biochar is of important application value and practical significance in combating climate and environment change, carbon sequestration and mitigation, ensuring energy and food security. Then, directions of biochar research, constructive advices, technology approach of industrialization development and application were proposed on the basis of agricultural and forestry residue resource utilization, to provide references to promote biochar engineering technology innovation and industrialization development.

[**Key words**] biochar; climate change; energy alternation