

# 从废弃物处理到生物质制造业： 基于热裂解的生物质科技与工程

潘根兴<sup>1,2</sup>, 卞荣军<sup>1</sup>, 程琨<sup>1</sup>

1. 南京农业大学农业资源与生态环境研究所/生物质绿色工程技术中心, 南京 210095
2. 金华生物质产业科技研究院, 金华 321000

**摘要** 新近发展的生物质热裂解炭化工程技术在安全处置废弃物的同时, 可实现生物质分离、分质和分质资源化综合利用, 在低碳、环保、循环处理生物质废弃物上具有突出的比较优势, 成为新型绿色工程技术。通过发展和完善适于不同类型废弃物的热裂解炭化工程技术系统, 一个以生物质基的新能源、新肥料和新材料为关键产品的新兴生物质产业呼之欲出。基于天然有机质的结构-功能关系、颗粒有机质的团聚体强化作用和生物质炭材料的生态系统工程师效应等3大原理, 生物质产业提供了改良土壤、化肥替代和环境治理的新型农业资源, 而服务于未来绿色农业发展。中国废弃物生物质产业可达到3亿 t生物质炭材料规模, 其发展需要新的生物质科技与工程学科的支撑, 需要工程技术的研发创新和相关标准制定的推进。

**关键词** 生物质; 热裂解; 生物质材料; 绿色农业; 生物质工程

绿色发展已经贯穿中国新时期国民经济发展战略布局, 而废弃物治理及其资源化利用是国家绿色发展战略的核心组成部分。2016年中央1号文件明确提出国家“继续实施农业废弃物资源化利用支持政策”, 工信部发布了《工业绿色发展规划(2016—2020年)》; 继后, 国家发展改革委员会等6部委颁布了《关于推进农业废弃物资源化利用试点的方案》, 明确了政府购买服务以激励和支持农业环境服务产业; 2016年11月, 国务院常务会议讨论批准了《“十三五”生态环境保护规划》, “发展资源节约循环利用关键技术和生态治理修复成套技术, 大力实施大气、水、土壤污染防治行动计划, 加强生态保护和修复, 加快实施一批生态环境保护重大工程”等被列为重大战略任务。在2016年11月底, 国务院印发《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》, 确定“绿色低碳”列为到2020年10万亿元规模的国家战略性新兴产业, 并且明确提出通过优化产业结构、发展自主知识产权、形成全球竞争性产业高地的战略目标。与此配合, 国务院于2016年12月发布了《关于建立统一的绿色产品标准、认证、标识体系的意见》。一个政府绿色发展战略主导下的绿色低碳环保产业将成为21世纪新兴实体产业。

农业是废弃物产出的源头, 也是废弃物治理的难点。农业部一直致力于废弃物治理与农业绿色发展的紧密结合和协同。2016年6月, 农业部编制提出了《全国绿色食品产业发展规划纲要(2016—2020年)》; 在实施化肥减量计划的基础上, 农业部于2016年底提出“果菜茶化肥替代行动”, 并将农业废弃物循环绿色技术列入2017年财政部和农业部总计140亿元财政补助计划中<sup>[1]</sup>。2017年4月, 系统地提出了“畜禽粪污资源化利用行动、果菜茶有机肥替代化肥行动、东北地区秸秆处理行动”等农业“五大绿色行动”计划。农业部与财政部、国家发改委等多部门联动, 2017年初启动实施北方十省市秸秆资源化利用试点计划。

这些规划和行动计划提出了安全、循环、绿色低碳农业技术的巨大需求, 生物质循环产品将成为农业绿色发展的核心产品。因此, 如何从供给侧改革出发, 创新技术-工程-模式的产业发展路径, 加快集成配套产业体系构建, 是实现废弃物处理和农业绿色生产双赢的关键。为此, 本文讨论生物质热裂解技术的农业废弃物处理和生物质产业的发展问题, 为我国农业和环境绿色发展提供科学和技术依据, 并为生物质产业化提供政策和路径参考。

收稿日期: 2017-08-10; 修回日期: 2017-10-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41371298); “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFD0200802)

作者简介: 潘根兴, 教授, 研究方向为农业资源与环境、生物质炭与绿色农业, 电子邮箱: panggenxing@aliyun.com

引用格式: 潘根兴, 卞荣军, 程琨. 从废弃物处理到生物质制造业: 基于热裂解的生物质科技与工程[J]. 科技导报, 2017, 35(23): 82-93; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.23.013

## 1 生物质热裂解作为生物质废弃物处理的技术原理

### 1.1 生物质(资源): 生物质是地球生态系统生命过程的普遍产物

在人类生产和生活中的生物质废弃物直接或间接来自土地生产,其主体都是生物完成或终止生命活动后的残余(留)的生物质机体物质,是生物质生产经收获、利用后的剩余物。按其来源可以分为原生生物质残余、次生生物质残余和处理(加工)生物质残渣(表1)。其中,原生生物质是植物有机体残余,他们是直接通过植物光合作用由无机物合成的生物质有机体,例如秸秆是作物收获后剩余的植物体残余;

次生生物质,是原生或初次生物质经动物或微生物转化而剩余的未能利用的生物质残余物。例如猪粪和牛粪等是植物组织经动物过腹转化,其未能利用部分作为残余物排泄;而生活污水是微生物分解了废弃物中有机物后,未能完全分解的有机物质连同微生物机体的残余物;而处理生物质(残余)是植物、动物甚或微生物(例如菌类)生物产品加工处理后的生物质残渣物,一般经过了不同的物理和化学处理。特别地,食品加工废弃物是农产品、园产品和畜产品等加工提取后的渣粕残余,是加工转化后的动植物生物质残余。另外,病死牲口是死亡动物遗体生物质残余。

表1 废弃物生物质资源分类

Table 1 Classification of waste biomass resources

主要类型	代表性生物质	分布	特性	产出
原生生物质	秸秆/林木废弃物 (包括果壳、稻壳等)	农业、林业、园林	高热值、结构有机质、养分含量补登	分散收集
次生生物质	动物粪尿、污泥	养殖业、废水处理	低热值、高含水、养分富集	点状集中
处理生物质	菌渣、药渣、蔗渣等	食品加工消费业	热值、水分和养分不等	点状集中

### 1.2 生物质热裂解反应: 生物质代谢与天然有机质转化的自然界反应

自然界普遍存在生物质热解反应。自然界生物质残余在高温环境中的分解过程属于有机质自然降解的一种基本途径。这一过程起自生物质干燥脱水,在高温环境中干物质发生有机基团转化反应,组分解离且以不同相态产物析出。在这一反应过程生物质接触高温时得以进行,挥发成分为 $H_2$ 和 $CH_4$ 等还原态气体逸失及焦油残余,留下固体炭质残余物—炭(图1)。温度越高,挥发分逸失越多,炭质得率越低,但炭质中有机碳越富集,分子聚合度越高。自然界火山爆发、森林火灾和秸秆焚烧时都会伴随发生生物质热裂解。热裂解是地球或表层土壤中高度聚合或缩合的有机物如沥青、黑炭(碳黑)等物质的来源。在森林和草原生态系统中,黑炭(black carbon)是储存稳定态(惰性)有机碳的主要形式,而调节着碳生物地球化学循环。这一过程实际上也是人类现代石

化工业的基本反应原理。热裂解与燃烧的差别是无氧条件,与水解的差异是无水存在且不添加如硫酸等化学强分解剂。

## 2 生物质废弃物热裂解工程

### 2.1 废弃物生物质处理适于热裂解解决

生物质热裂解转化只占自然界有机质转化的很小一部分,速度慢、发生随机、产物分散、不能满足人类生产和生活生物质废弃物资源化处理要求。人类农业生产和生活消费产生了规模巨大、产出集中的生物质废弃物,例如作物收获后的秸秆、园林的枯枝落叶、屠宰和食品加工业的残体残渣、养殖业的动物粪便和死亡遗体以及食物消费的厨余和生活垃圾,加上城镇废水处理的污泥等。这些完成和终止了生命过程的生物质残余,其主要成分是来生物组织的有机质,富含生命元素C、N、P、K及其他矿质营养成分,并携带尚未利用的生物质能,因而具有资源化利用的价值。但是,人类生产和生活产生的上述生物质废弃物,因产业来源不同而含有各种潜在有害物质,例如秸秆中的病虫害生物、农药残留,动物遗体和粪便含有病原或疫病生物、兽药和抗生素残留以及饲料中添加的Cu和Zn等重金属元素残留,生活垃圾或污泥中含有各种人类药物残留、生活品带入的化学品特别是Pb等重金属残留。正是因为这些潜在污染物的存在和环境风险的考量,生物质废弃物处置成为农业环境保护的重大任务。

生物质热裂解恰恰可以满足这些环境风险物质的有效去除或除害。废弃物生物质热裂解工程技术源于自然界热裂解基本原理,通过特定反应器的水分、温度、氧气、速率等条件控制,人为使废弃物生物质发生快速高效的热裂解,来获取一定规模的能源、炭质和养分,同时达到安全处置的要求。废弃物生物质热裂解工程系统由原料处理模块、炭化窑

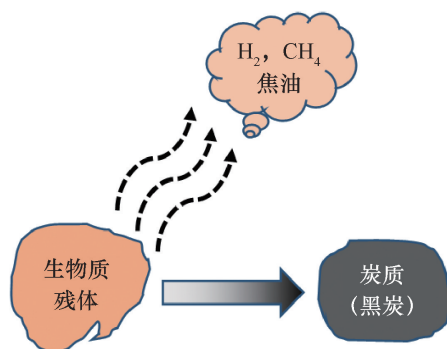


图1 自然界生物质热裂解基本反应原理

Fig. 1 Simplified depiction of pyrolysis process of natural biomass

核心模块和产物分离产出模块等构成(图2),经过初步脱水的生物质废弃物在密闭(隔离自由空气而缺氧)反应器中经受高温(>300℃)热解,病原微生物被杀灭,药残等有机污染物分子被破坏,生物残体有机质被破解且部分小分子有机物被聚合或缩合,矿质元素离析而化合为矿物质,同时重金属元素被吸附、螯合而钝化。产物进一步经受冷却分离,挥发性有机分子被挥发析出成为可燃气体作为能源使用(部分经过气热转换后转化为热能回用于废弃物干燥脱水);而非可燃气体挥发分冷却为生物质液体(木醋液),大量固态残渣即成为生物质炭析出系统。由此,这些不同相态的物质分离纯化提取后分别得到生物质能源、生物质炭和木醋液等产物,再进行集中利用<sup>[2]</sup>。

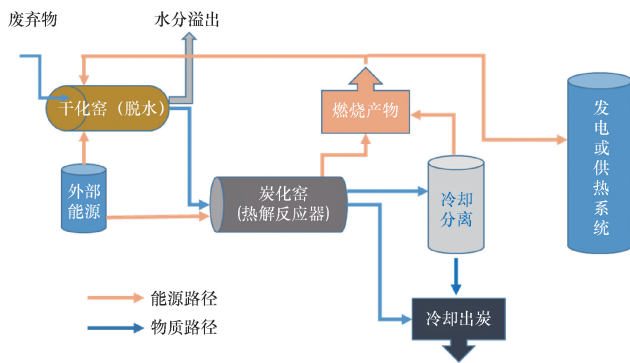


图2 废弃物生物质热裂解工程技术基本结构  
Fig. 2 Basic structure of waste biomass pyrolysis technology

通过工艺的不断改进和完善,可以将木醋液回用于热解反应器出炭系统冷却,而循环于所产出的生物质炭,进一步与化学养分复合用于制造生物质炭基肥<sup>[3]</sup>;木醋液还可直接用于浸提所产出的生物质炭,提取可溶性有机质(DOM),生产商品液体有机肥<sup>[4]</sup>;而提取后的生物质炭保留了良好的孔隙结构和表面活性,可作为污染治理剂/土壤改良剂等环境材料<sup>[5]</sup>;而生物质可燃气体通过蒸汽锅炉实现气热转换,提供工业蒸汽(例如蒸汽造粒制肥)或民用供热使用。通过生物质热解,使废弃物中生物质实现了分离、分质和分质化,构成生物质废弃物的安全处理和产物的交叉偶联利用有机结合的循环、绿色和高效的资源化工业生产系统,发展了大规模生物质热解工业化绿色工程技术(图3)。

## 2.2 生物质热裂解绿色工程技术的优越性

与分解去除废弃物而达到净化的传统环保工程不同,生物质热裂解工程的目标是废弃物中污染物安全、减量、除害基础上的生物质资源最大化和最优化利用。其关键是保持、转化和分离废弃物中生物质机体物质,通过废弃物热裂解处理,达到不同性质生物质资源的解析、分离、提取,而分别加以增值利用。特别是,这种生物质热裂解工程是通过非化工、非破坏性消解,杀灭废弃物中所含的病原菌和抗生素、转

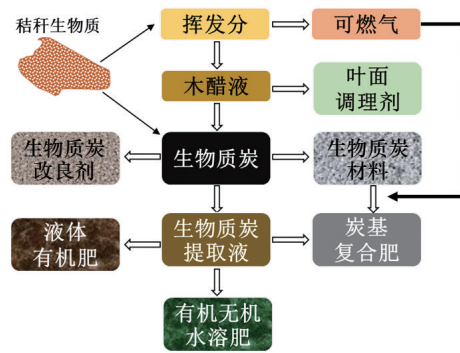


图3 废弃物生物质热裂解产物分离、分质、分质利用绿色工程技术及多联产产业链

Fig. 3 Green engineering technology and industry chain of waste biomass pyrolysis system

化农药、兽药或人类药品等有机残留为有机质、钝化重金属(降低重金属的化学和生物有效性),但保留和转化了有益的生物质组分,且进一步分离出能源、养分和有机质,形成不同性质和相态的新物质加以分质利用(图4),提炼或制造生物质可燃气体能源、生物质炭固体和生物质液体等各种生物质资源物质。这一路径可以理解生物质转化循环的绿色工程技术的本质。

该工程技术核心是最大程度保留和利用生物质,形成分离增值新产品,从而发展为加工制造产业。生物质热裂解技术处理废弃物,原料物质经转化全部实现产品化,其能源和有机质以及养分实现最大程度的循环利用。除了能源回收而用于处理的自身能量供应外,可以通过气热电转化提供外部能源服务。生物质热裂解工程的规模化发展使废弃物处理成为生物质炭为核心的生物质新材料产业。其中,产出大量生物质炭,首先可用于生产生物质炭基肥而替代化学肥料<sup>[6]</sup>;其次,提供了土壤改良的新材料,用于重金属污染农田可持续治理<sup>[7]</sup>、用于盐碱土快速改良<sup>[8-9]</sup>且具有大量用于矿山废弃地、侵蚀退化土地的快速恢复和生态重建的资源潜力。这一处理模式,避免了废弃物处理的大量能源损耗或排放(例如堆肥中的甲烷排放,秸秆还田分解的CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排

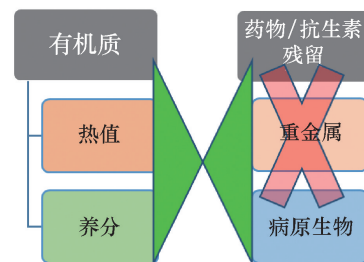


图4 基于废弃物热裂解安全处理的生物质绿色工程技术

Fig. 4 Green engineering pyrolysis technology for bio-waste safety treatment

放),而生物质炭作为稳定性有机质归还土壤,服务于农业固碳减排<sup>[10]</sup>。国家发改委于2013年将此项工程技术列入第一批33项低碳关键技术目录<sup>[11]</sup>。农业部已将秸秆炭化还田改土列为秸秆资源利用的关键模式之一<sup>[12]</sup>,并出台了炭基肥行业标准(NY/T 3041—2016)。

现有的各种生物质废弃物处理和利用技术及其途径主要是反应物温度、氧压和反应时间的差异(图5)。沼气能源化和堆沤有机肥化等处理属于常温、厌氧或部分厌氧,反应时间在天至周的尺度,不利于工业化;焚烧处理(例如直燃式发电),完全好氧条件,反应温度很高,反应时间在秒-分时间尺度,适于工业化,但主要利用了能源而损失了养分和有机质的结构,而热裂解技术在限氧条件下进行,反应温度在数百度至千度的温度条件。其中气化是高温(750~1000℃)、闪速(反应时间在秒尺度)、部分好氧下的热解;而绝氧下高温闪速的热解产物主要是挥发分有机质液体,表现为生物质油化。而炭化的反应条件是限氧(介于绝氧与好氧间)、反应时间在小时尺度、温度在350~750℃,得到的固相、液相、气相产物均衡,利于生物质资源的充分利用和产物的深加工增值利用<sup>[3]</sup>。通过调节控制热解反应器系统的温度、氧压、反应时间等条件,生物质废弃物的热解处理可以达到规模、速率、产率及产品性能的最优组合,而实现大规模工业化生产。

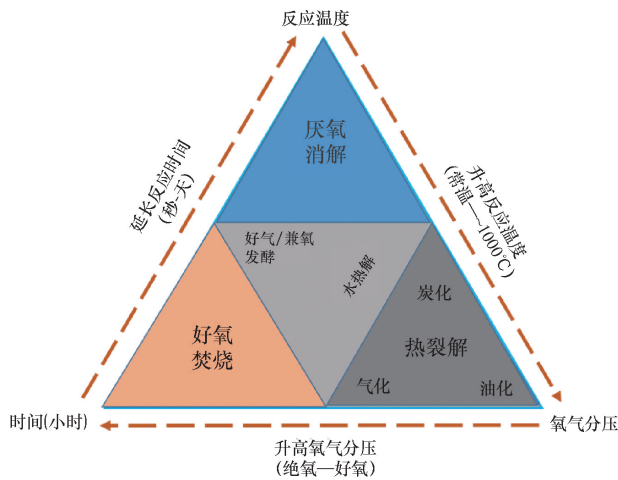


图5 生物质废弃物处理的主要技术途径及其反应的温度、氧压和时间等条件的差异

Fig. 5 Comparison of reaction temperatures, oxygen pressures and times of different bio-waste treatment technologies

潜在环境风险最小化是废弃物生物质热裂解技术的竞争性优势。以秸秆为例,常规的沼气等厌氧消解技术(anaerobic digestion,简称AD技术)或好氧/兼氧发酵技术(aerobic fermentation,简称AF技术)都在常规的低温环境条件(例如发酵温度一般不超过75℃)下,不能有效去除废弃物中存在的病原菌、药残等,这也是秸秆还田常常导致减产的主要原因

素<sup>[13-15]</sup>。特别是抗生素等风险性新型污染物,秸秆、猪粪等堆肥有机肥中高达100~2000 μg/kg,其施用已经成为我国普遍的抗生素污染问题<sup>[16]</sup>,这也是最近中国有机肥中抗生素检测标准的出台背景(GB/T 32951—2016);而生物质热裂解可以有效去除猪粪中抗生素,含土霉素近100 μg/kg的猪粪炭化后其残留仅存0.7 μg/kg<sup>[17]</sup>;另外,废弃物制取的有机肥含有的重金属生物有效性较高,其中的Cd可能还高于无机Cd<sup>[18]</sup>。但生物质炭化可以达到钝化重金属,特别是Cd的钝化效果高达88%<sup>[19]</sup>。因此,生物质热裂解炭化是迄今为止废弃物中有害物质去除率最高的废弃物安全处理而循环利用的技术(图6)。

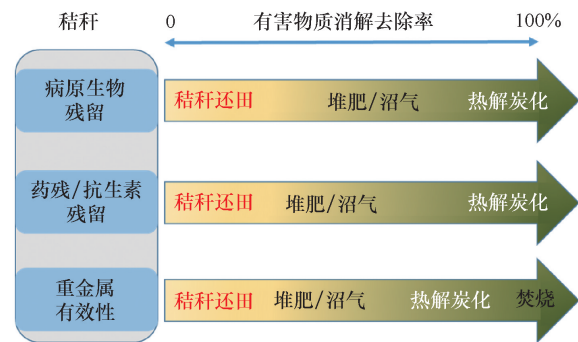


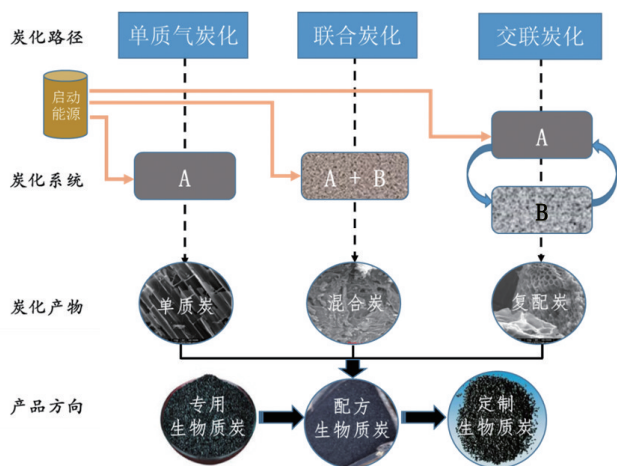
图6 不同技术途径的生物质废弃物中有害物质去除程度比较(以秸秆为例)

Fig. 6 Degrees of elimination of hazardous materials for different bio-waste (crop straw) treatments

### 2.3 分类热裂解炭化工程技术与不同类型废弃物生物质产业发展

目前,国内生物质热裂解工程技术已经发展出单质气炭化、联合炭化和交联炭化等不同工艺技术路线,可以满足各类废弃物生物质热裂解炭化和生物质炭的规模生产及产品创新(图7)。农作物秸秆和林木废弃物,富含木质和纤维素,自身所含热量较高,适合气炭联产。例如北京三聚环保新材料股份有限公司正在推进的万吨级秸秆热裂解炭基肥生产技术<sup>[20]</sup>。这里,热裂解炭化产生的热量除了循环用于原料加热脱水外,其富余部分可以通过生物质可燃气体的分离纯化并气热电源转化,供应外部使用。例如,在北方可以用于取暖,或者大规模工业化下用于蒸汽发电上网;而得到的生物质炭具有良好结构且富含养分,可用于制造炭基肥广泛用于农业化肥替代<sup>[21]</sup>。

但是,次生生物质残余,例如养殖业废弃物和污泥等废弃物含水量很高,需要在初步脱水(例如叠螺机脱水)将含水量降低到50%~60%,再采用外部能源辅助生物质热裂解炭化。这可以有两种炭化技术路线和方式。其一是联合炭化路线,将高热量废弃物生物质A(例如木质壳类、木屑、秸秆颗粒等)与目标处理废弃物B按一定比例混合进行共热裂解炭化,炭化产生的能源通过与炭化炉偶联的燃烧器气热转换为热能,循环用于生物质混料干燥。这种技术降低了待处理生物



注:A,高热值原生生物质;B,低热量高含水次生或处理生物质。  
气炭化:高热值生物质废弃物(A)在一个炭化系统中的单质炭化,适合大规模连续集中炭化处理,产出单质生物质炭;联合炭化:炭化系统中高热值废弃物(A)与低热量高含水生物质(B)的混料炭化,适合业主就地废弃物炭化;交联炭化:炭化系统由高热值废弃物(A)与低热量高含水生物质(B)的单质料炭化炉偶联构成,交替循环炭化。

图7 生物质热裂解三种炭化技术路线

Fig. 7 Three major routes of engineered pyrolysis and biochar production system for representative bio-wastes

质的含水量,提高了炭化效率,得到了物理性质改善的混合生物质炭,弥补了原料本身的不足。浙江金华生物质产业科技研究院开发的污泥和猪粪炭化工艺及联合炭化窑采用了这种路线<sup>[22]</sup>。

另一种路线是交联炭化,炭化系统由高热值废弃物(A)与低热值高含水废弃物(B)的单质料炭化炉偶联构成,交替循环炭化。高热值废弃物(A)炭化产生的可燃气体经过燃烧器转化为热能,导入低热值高含水废弃物(B)炭化炉,提供热能使之完成炭化,两个并联的炭化炉相互交替循环,得到的生物质炭产物可以单质分别使用或者复合使用。具有代表性的是江苏张家港天源环保机械有限公司开发的箱式炭化系统。联合炭化和交联炭化的技术关键:一是通过燃烧器气热转换使生物质能源内部循环利用,用以弥补待处理废弃物热量不足,故生产系统免除了生物质可燃气体的分离、提纯和冷却的复杂系统,降低了生产线的工业成本。二是通过生物质混合炭化或者交联炭化,得到的生物质炭产品既可以是混合的,也可以是复合的,满足炭化产业的生物质炭配方化使用或目标用户的定制,这为生物质炭产业提供了设计、制造生物质炭材料的广阔空间(图7)。这也是生物质废弃物处理朝着生物质炭化的生物质能源和生物质材料的制造业发展的技术基础。

### 3 废弃物处理走向生物质制造业:科学价值与社会服务

#### 3.1 基于天然有机物结构和功能关系的生物质材料

自然界的有机质是不同生物体的生命代谢过程剩余物集合。天然有机物的分子量、组分和结构组成十分复杂,既因生物机体来源和分解程度而异,又因环境条件和生态系统物种组成及其数量而异。从小分子的烷烃酸、甾醇、糖类、单体酚到大分子的半降解蜡质、软木脂、纤维素、木质素等,其有机质分子的元素组成与比例、碳和氮同位素丰度和不同碳链长度的分子比例,都带有生物标志物分子特征<sup>[23]</sup>。研究对比发现,生物质热裂解技术所得产物化学分子组成与天然产物组成具有一定的相似性<sup>[4,24]</sup>。来源于不同生物体的小分子有机质因其结构不同,所具有的生物功能也不尽相同。有些起到植物激素的作用,能够促进生物生长(故又称为促生素)<sup>[25]</sup>,有些起到生物拮抗作用或化感作用,可以抑制主体外的生物的生长或代谢过程,是生物抑制剂或化感物质(如各种毒素)有些则是有机营养物质(如氨基酸、氨基糖等)等,在自然界这些物质的存在调节和控制着各种生物的协调生长和活动,维持生态系统稳定。

生物质热裂解技术就是类似生物质自然降解,将生物质中各类有机质加以工程解析,释放为不同的有机质分子加以分离利用。具体地,将生物质有机质转化为可分解的游离有机质-挥发分和固态的颗粒有机质-生物质炭。生物质中部分小分子有机质经受聚合、缩合成为更大的分子,纤维素、木质素等转变为以芳香烃为主要架构的复杂大分子,以生物质炭颗粒产出。转化为简单有机质的挥发分,经冷却分离为高热值的可燃气体(例如 $CH_4$ )而进一步用于能源转化利用,部分简单有机质冷却后以液态-木醋液产出。木醋液及生物质炭中吸附的可溶态有机质,含有生物质自身代谢产物和新转化的有机分子,数量达数百种,主要为大分子生物多聚体、小分子有机酸或中性有机物、腐殖化复杂有机物和结构性组织片段等(图8),含有不同数量的植物刺激素、杀菌剂、营养素等功能物质,可以分离提取而利用为植物叶面调理剂和功能性液体有机肥<sup>[4,26]</sup>。故生物质液体具有促生抑病增产优质的良好作用。总之,生物质热裂解提供了分离利用其结构性炭质颗粒和可溶性有机物而单质或分别循环利用的产业机遇,即生物质炭固体新材料和生物质有机质液体,可以衍生出各种用途的新产品。

特别地,生物质热裂解生产的固体和液体有机质具有特定的有机化合-键合结构,发挥特殊的微生物介导的地球化学循环功能。生物质炭中可溶性小分子酚类化合物承担电子供给者,而传递给 $N_2O$ 使其还原;而中性的醌基化合物又可接受电子,使硝酸盐还原,减少硝态氮的形成和环境污染;而固体多孔结构的芳香烃碳架又起着电子摆渡(electronic shuttle)的作用,来回传递电子而调适着氧化还原反应进程和方

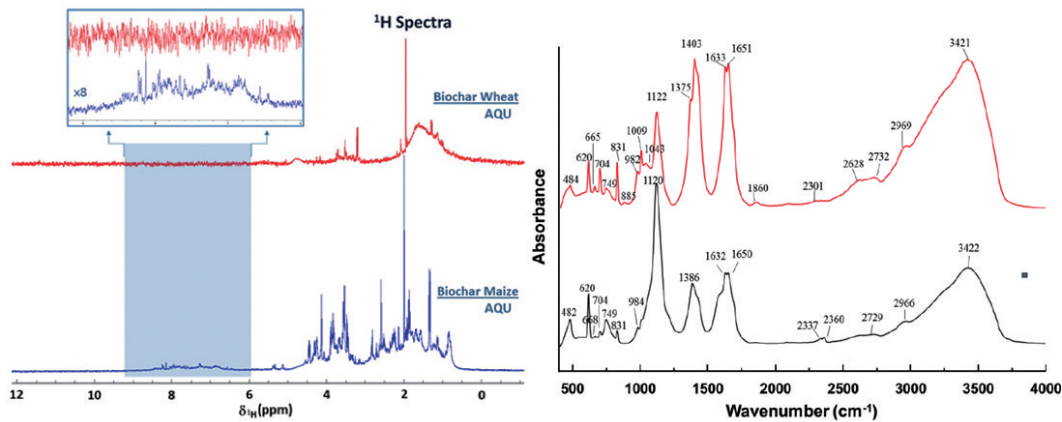


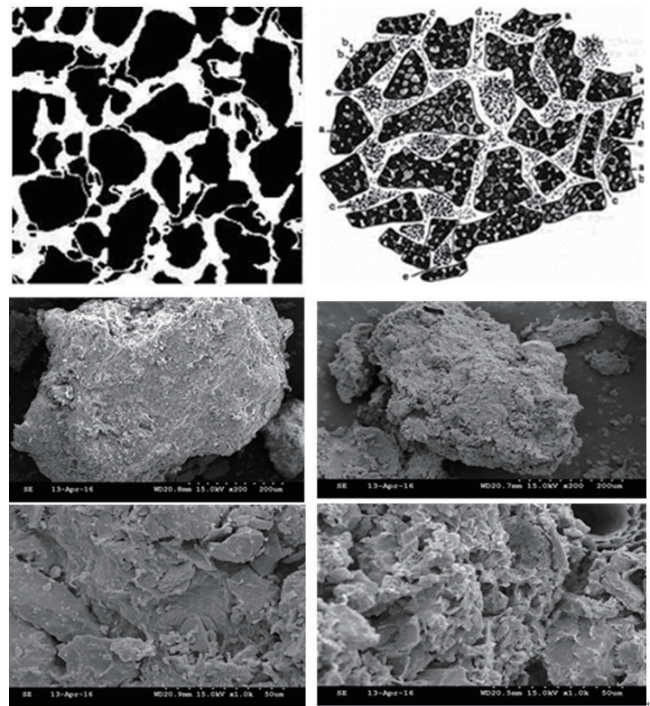
图8 热裂解生物质炭的提取液有机组成(左:核磁共振谱鉴定;右:红外波谱仪鉴定)  
 Fig. 8 Molecular composition of biochar extraction (left: LC-MS; right: Infrared spectroscopy)

向。这些是生物质炭既可以显著减弱硝化作用,又极大地降低 $N_2O$ 排放的基本原理<sup>[28-29]</sup>,也可能是热解液体有机质刺激生物代谢、降低硝酸盐积累的机制<sup>[30]</sup>。生物质热解产物新材料提供了补充多种有机质促进土壤微生物生长和活性,增强土壤和植物生物功能的人类调节途径。

### 3.2 基于土壤团聚体功能理论的生物质炭材料

土壤中普遍存在可溶性有机质和颗粒态有机质,前者主要提供微生物的食物和能源,后者主要起着胶黏土壤矿物质而形成团聚体的作用。大量颗粒态有机质的存在,使土壤分散颗粒胶结为更大的团聚体(图9),有机质和团聚体构成互为协调、互相促进的共同体<sup>[31]</sup>,既可以满足不同大小土壤微生物和动物的栖居和协调生活,又可以满足水分-养分-有机碳的富集储存,其丰富的有机质、极高的孔隙度和多样化的微生境使稳定的团聚体成为自然界的“宝贝”。其发挥着稳定土壤、储存和供应生命资源(C-N-H<sub>2</sub>O,有机质、养分和水分)、庇护和保障生物多样性、缓冲与调节化学品及其化学反应等多种功能,是土壤的生态系统功能和社会、经济、文化价值的根本<sup>[32]</sup>。而热裂解产物的固体炭质-生物质炭主要是芳香烃骨架物质,作为颗粒态有机质进入土壤,极大地促进土壤团聚体形成作用,快速改善团聚体稳定和生物活性,提升土壤保持碳氮水和生物活性的能力,从而快速和显著提升土壤生态系统功能服务(图2)。生物质炭土壤团聚体促进功能是服务于快速土壤改良、污染治理和生态恢复的核心原理。

生物质炭的团聚体作用对于发展生物质炭基环境修复材料具有特殊意义。当前,污染农田环境修复任重道远,但至今尚无专门和有效的普适性修复材料。而生物质炭材料促进了土壤的团聚体作用,提高或改善了土壤的物理、化学和生物功能,特别是增大了颗粒表面积和吸附量,吸附捕获的重金属可以进一步被生物质炭土壤团聚体封闭固定,达到纳米孔隙封存的可持续钝化<sup>[33]</sup>。并且,通过改善土壤肥力,保持和促进了作物生产,可以满足污染土壤的边修复、边生产、



注:左,矿质土壤;右,生物质辅助土壤;上,分散土壤矿质颗粒与富有机质的团聚体;中,矿质与生物质炭富足土壤的团聚体外貌;下,矿质和生物质炭辅助土壤的团聚体显微结构。注意生物质炭辅助土壤的海绵状团聚体和丰富多孔显微结构。

图9 从矿物质到团聚体的土壤功能发育与生物质炭的作用  
 Fig. 9 Effect of biochar on soil aggregate development

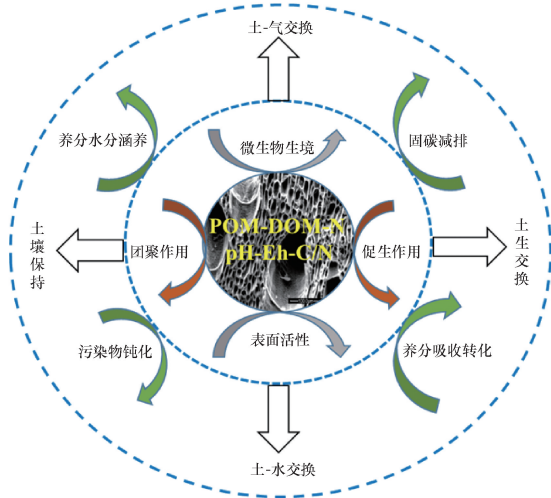
边改土。通过生物质炭的多功效作用达到环境治理修复,称得上无可比拟的可持续环境污染治理途径<sup>[34]</sup>。另外,海绵城市已经是城市生态环境建设的主要发展方向之一,但城市土壤覆盖薄、肥力差、环境功能削弱,生物质炭在海绵城市建设中具有不可比拟的优势。生物质炭材料覆盖,可以快速重建城市土壤覆被,快速再造土壤团聚体促进土壤吸水入渗、促

进污染物吸持和钝化,既可以用来修复城市棕地土壤,又可以推进海绵城市建设,推进城市生态环境可持续建设。

### 3.3 作为生态环境工程师的生物质炭农业和环境新材料

当前人类社会面临的气候变化、环境污染、食品安全、生态系统退化和生物多样性丧失都与土壤退化密不可分<sup>[35]</sup>。土壤有机质的损失是这种退化最重要和普遍的全球趋势<sup>[36]</sup>。人类生产和经济活动占用了大量土壤、封闭了大面积土壤、削弱了土壤的生态系统功能。土壤是不可再生的自然资源,失去土壤的自然庇护,人类的可持续生存面临前所未有的挑战<sup>[37]</sup>。为了控制气候变化,增加和稳定土壤有机质已成为最关键的技术需求<sup>[38]</sup>。富含结构性有机质和促进土壤团聚体作用的生物质炭为控制和逆转全球土壤退化提供了新的绿色工程新材料。

大量的研究证明了生物质炭的生态系统和环境工程师的极好作用。生物质炭材料添加到土壤中,快速提升了土壤团聚体直径、含水量和微生物量(提高幅度在15%~25%)<sup>[39-40]</sup>,大幅度降低了农田温室气体排放(幅度在25%以上)<sup>[41-42]</sup>,相对提高氮肥利用率15%~30%以上<sup>[43]</sup>,提高作物产量平均10%<sup>[44]</sup>;生物质炭用于蔬菜等作物,可以大幅度(25%~35%)提高产量和品质(例如维生素、可溶蛋白质),特别是大幅度(30%~50%)降低蔬菜中硝酸盐含量<sup>[45]</sup>;生物质炭可以持续钝化污染农田中重金属,特别是Cd,籽粒中Cd降低25%以上<sup>[5]</sup>,并且可以多年有效<sup>[33]</sup>;还证明生物质炭可减缓植物病虫害侵袭<sup>[46]</sup>,阻抑植物对有机污染物的吸收,例如中药材植物对抗生素残留的吸收积累<sup>[47]</sup>。这些都指示了生物质炭在土壤和生态系统中的工程师作用(图10),调节着土壤中无机-有机-生物相互关系、土壤中有机质-养分-结构关系、环境中污染



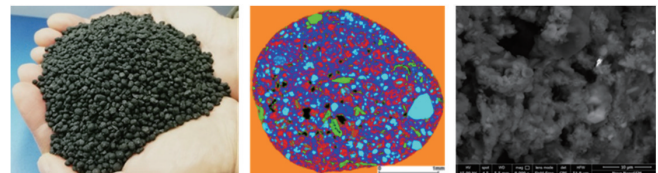
注:内圈为生物质输入后土壤过程变化,红色箭头表示最显著的直接变化,灰色表示次要显著的变化;外圈为这些过程变化引起的生态系统效应。

图10 生物质炭施于农业土壤中的生态系统工程师效应

Fig. 10 Effects of biochar as ecosystem engineer following amendment to soil

物的吸持-捕获-固定关系,土壤中微生物-根系-植物生长关系,从而控制土壤中生物化学反应(如氮素转化)和植物生长环境与营养条件,从而保障农业生产的安全、优质、低碳发展,服务于生态环境质量和人类健康生活。

生物质炭生态工程师作用可以应用于创新肥料和施肥技术。协同发挥生物质炭的有机营养作用与团聚体发育作用,创新了炭基有机无机复合肥,制成了化肥养分于生物质炭载体的团聚体颗粒肥料,简称炭基肥(图11)。其中兼有固定和活性的有机质,生物质炭的固定态有机质碳架起着载体的作用,实现了炭质-矿物质-化肥养分的团聚体结合,延缓了化肥的快速溶解释放,提高了养分的缓效性,从而显著减少化肥用量;所含的活性有机质,能促进植物根系活性,促进植物生长的代谢,增进植物健康;最后,化肥养分吸收利用后,生物质炭归还于土壤,增加土壤有机质,利于改善土壤肥力。炭基肥在减少化肥用量的同时,又能显著减少农田温室气体排放<sup>[6,48]</sup>。炭基肥结合生物质液体有机肥,可能创新发展出基肥与追肥一体化及地上与地下施肥一体化的新技术模式。因此,生物质炭载体复合肥料将成为农业肥料的新革命<sup>[49]</sup>。



(a) 肥料颗粒外貌 (b) 肥料颗粒的扫描透射电子显微镜假彩色影像,红色显示生物炭颗粒,亮蓝色是矿物质颗粒,而深蓝色是背景 (c) 扫描电子显微镜下的颗粒内部结构,显示松软的团聚体化和丰富的孔隙

图11 一种基于团聚体功能原理的生物质炭基有机无机复合肥料

Fig. 11 Biochar compound fertilizer designed based on functions of soil aggregates

### 3.4 创新材料为核心的生物质制造业与社会服务

通过生物质炭增碳改土促生的生态系统工程师效应,生物质炭材料可以在污染环境修复、废弃土地生态恢复和劣地改良利用和城市生态系统服务中发挥巨大作用。因此,从生物质热裂解过程的科学认识出发,创新了生物质有机质化、有机质功能化、材料团聚体化的分离、分质与分质利用途径,并通过科学认识、技术发展、工程创新构建了从生物质废弃物到生物质制造业的新产业的核心原理。具体地,结合生物质资源的原料化(高效的收集、预处理及成型化)、生物质资源分质化(生物质热裂解处理技术及工业化设备与生产系统)和生物质材料产品的分质利用(生物质能源、生物质肥料、生物质环境材料)而构成废弃物处理与生物质资源最佳

利用的产业化体系,通过生物质处理设备、生物质材料产品及生态环境应用服务,并结合因地制宜的产业模式和灵活的市场运作等全方位的创新,构建一个跨资源-环境-生态,农业-工业-环境服务产业的生物质新产业。其主要创新的服务产品包括:

1) 生物质新能源:回收利用生物质热裂解产出的挥发分有机质及其热值的资源循环产品。包括生物质可燃气成分的直接利用(CHP气热电转化,气热转换供热)和对焦油的进一步裂解而生产能源产品和绿色化工产品,后一方向仍在发展中。

2) 生物质新肥料:回收利用热裂解产物中生物质有机质和养分的循环利用技术产品。其中生物质炭作为结构性有机质用以制造炭基有机无机团聚体复合肥;而活性有机质用于制造促生抗逆优质的叶面肥料或有机无机水溶肥。

3) 生物质新材料:回收生物质炭纳米结构性有机质,通过矿质-有机复合团聚体的结构功能优化而服务于环境修复或生态修复的生物质资源循环新产品。包括用于水体污染的颗粒碳载体,园林基质、城市覆盖土壤和土壤改良剂、污染修复剂等。

生物质制造业的理念是“源于生命,还于自然,反哺生态,惠利环境”,通过废弃物生物质的热裂解处理和分离利用,创新生物质材料,用于恢复改善土壤,增加生态系统功能和健康,提高环境缓冲(减缓气候变化、钝化污染物和缓冲水分),在安全处理的同时保证植物(包括农作物)生产的安全、低碳、绿色。例如,生物质炭肥作为生物质材料应用的首要方向,显示在农业化肥减量、果菜茶化肥替代和有机肥提升中的巨大潜力,而生物质炭作为环境材料同时兼有修复环境、恢复生物活性、增进生态系统功能等多效能。因此,基于废弃物热裂解的生物质产业展现多功能、多服务和多收益的绿色发展光明前景(图12)。

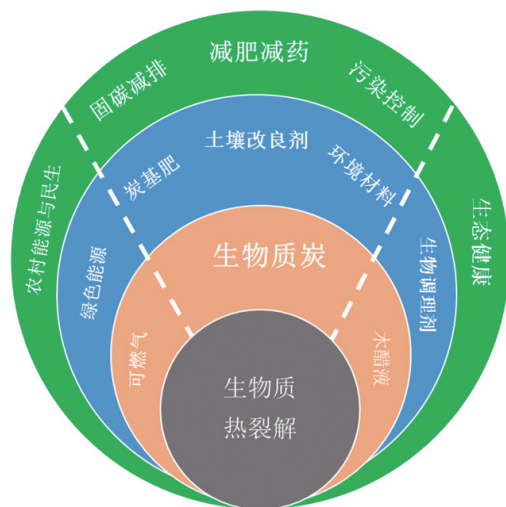


图12 生物质产业的多联产、多功效、多服务与多收益示意

Fig. 12 Diagram of multiple benefits of biomass industrialization

#### 4 生物质产业的发展趋势与科技及政策的需求

“十三五”期间,一个以安全、绿色、低碳为中心的废弃物资源化循环大产业呼之欲出。这凸显以解决废弃生物质资源化循环出路为目的,以绿色产品市场应用为途径的生物质科技需求。以秸秆为例,生物质废弃物热裂解处理和生物质炭为核心的生物质产业面临前所未有的发展机遇。尽管仍未有全面评估各种废弃物处理及资源化的温室气体排放和减排效应,但是生物质热解回收生物质能源和生产生物质炭的减排潜力估计达到全球每年10亿t CO<sub>2</sub>当量<sup>[50]</sup>。据2016年10月在南京召开的国际生物质炭协会董事局会议预测,至2050年,全球生物质废弃物炭化处理规模可达40亿t,生物质炭生产将达10亿t规模,产值2000多亿美元。一个以生物质能源和生物质材料偶联生产的生物质产业将成为全球新兴制造业<sup>[51]</sup>。

从废弃物绿色工程技术转化服务于生物质-有机质-土地生产力-生态系统服务的资源化需求出发,从重建农业-畜牧业-人类生活的物质和能源绿色闭合循环出发,一个以废弃物生物质炭化与生物质分离利用为关键技术的生物质产业已经呈现为“21世纪”朝阳产业。作为一个跨行业、跨学科的新产业,一个以新型装备技术为龙头、以产品创新应用和服务为出口、标准化工程化产业模式为载体、资本-技术-政府-农民协同融合为组织机制的农业生物质产业结构正在萌动中。以生物质能源、生物质肥料和生物质材料三位一体的新型生物质制造业将在未来中国绿色发展中扮演关键的角色。为推进这个产业的可持续发展,目前急需解决的关键科技和政策问题包括:

1) 生物质产业科技与工程的学科融合。生物质废弃物绿色转化及其工程技术发展,呼唤一个全新的生物质科技与工程新学科领域,呼唤从本科、专业硕士、博士和博士后的专业性全链式人才培养结构,而支撑生物质绿色工程产业技术发展;这需要整合农学、农业资源环境、环境科学与工程、农业工程以及市政工程等相关学科,发展生物质科技与工程新学科(群),开设生物质科技与工程专业学位新领域,培养科学技术和工程技术专门人才。同时,建设生物质科技与工程的行业或国家科技平台(中国石化行业协会已率先批复建设“秸秆高值化综合利用工程研究中心”,2016),“产业定制”新学科、新专业、新平台模式,引领生物质科技与工程发展和高端人才培养,担负起装备研发、产品研发、测试与质标、试验与评价服务、信息集成与推广等科技和工程发展重任,支撑我国生物质产业可持续发展。

2) 生物质加工和热裂解设备工程创新。设备工程技术一直是农业废弃物处理的短板,目前仍是生物质产业发展的瓶颈。尽管我国已经开发出万吨级秸秆生物质热裂解工业化生产技术<sup>[21]</sup>,其规模化生物质热裂解装备的创新水平也已暂居国际领先<sup>[52]</sup>。但是适于不同规模需求、投入产出高效、轻便智能的生物质处理与热裂解产业装备仍亟待开发,特别是业主型气炭化能源与生物质炭联产系统,适于园林管护区的

园林废弃物就地处理与热解系统,猪粪和污泥的业主型就地干化炭化系统,用于食品加工和消费废弃物处理的业主型撬装式热解炉等新技术仍有待创新和配套发展。生物质废弃物原料化处理设备,例如行走式秸秆/园林废弃物收集破碎打包设备,小型低能耗农户用秸秆颗粒机,以及生物质炭材料加工机具等,具有广泛的开发和应用前景。当前,急需改变诸如秸秆撒草和打包等设备主要依赖发达国家进口的局面,呼吁国家加强支持废弃物处理相关机具和设备的创新制造,为生物质产业的硬件条件奠定基础。

3) 相关标准的制定和规范是生物质产业发展的必要条件。生物质产业从源头到产品,需要一套切实可行的技术标准或规范来保证产业技术的可靠性及其产品的可持续应用。例如废弃物产出到生物质原料的标准,对行业产出废弃物进行含水量及有害物质含量及其集运的标准化,不但可以规避废弃物的无序产出,还有利于加工和制造的有序发展,设备的研发和应用。加快加工和处理设备的标准化,用来规范加工过程的成本、能耗和环保。例如,对秸秆和林木废弃物的颗粒化标准和对生物质热裂解及产物分离利用的标准,规定资源总循环利用率、规定能耗与温室气体排放标准,以及对产物例如生物质炭材料规定有机质含量、潜在有害污染物含量、养分含量以及颗粒形态、密度等标准。另外,应用行业的相关标准也将反推生物质产业的发展。例如有机肥安全质量标准、果菜茶化肥替代肥料(安全质量)标准、环境材料污染物钝化标准等。同时,土壤改良标准与土壤改良剂标准、污染农田修复质量标准与环境污染修复材料标准、城市生态环境(例如海绵城市)与土壤覆盖标准等,将大大推动废弃物生物质材料的农业和环境应用,从而助推废弃物生物质产业的快速发展。例如,2017年3月起实施的《有机肥料中土霉素、四环素、金霉素与强力霉素的含量测定高效液相色谱法》的标准,必将反推生物质炭化在废弃物抗生素残留安全上的推广应用。农业部2017年颁布了首个生物质炭基肥标准;中国石油化工行业协会已经备案生物质炭基复合肥、生物质炭材料、生物质土壤改良剂及生物质液体有机肥等标准,是朝着废弃物绿色安全低碳产业化发展的制度保障。

## 5 结论

当前,绿色发展理念已经贯穿中国社会和经济发展的各行业中,国家相关政策的引导和生物质科技与工程的整合,将强力推动我国生物质废弃物处理产业的大发展。废弃物生物质炭化与以生物质炭基肥为基础的农业和环保绿色新材料产业,被认为是继化肥、品种后的第3次绿色革命<sup>[2]</sup>。中国农业面临耕地质量与农产品安全的巨大挑战,10亿t秸秆、3亿多t畜禽废弃物、2亿多t生活污水和1亿多t园林废弃物的处置与资源化任务艰巨。发展生物质热裂解为基础的

物质产业,最大可形成年产3亿t生物质炭的规模,产值可达万亿规模,可为农业炭基肥、土壤改良、污染土壤修复、矿山废弃土地复垦和盐碱土改造,未来的海绵城市土壤重建、乡村环境和工程生态护理等,提供大量生物质炭材料资源。中国急需加快发展生物质科技与工程,加快科学研究和技术创新集成,抢占全球生物质产业科技制高点,并引领全球的生物质新产业发展。

## 参考文献(References)

- [1] 中华人民共和国农业部. 农业部、财政部发布2017年重点强农惠农政策[EB/OL]. (2017-03-23) [2017-08-08]. [http://www.moa.gov.cn/zwllm/zcfg/nybgz/201703/t20170323\\_5535315.htm](http://www.moa.gov.cn/zwllm/zcfg/nybgz/201703/t20170323_5535315.htm).  
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. The Ministry of agriculture and the Ministry of Finance issued the policies to strengthen agriculture and benefit farmers[EB/OL]. (2017-03-23)[2017-08-08]. [http://www.moa.gov.cn/zwllm/zcfg/nybgz/201703/t20170323\\_5535315.htm](http://www.moa.gov.cn/zwllm/zcfg/nybgz/201703/t20170323_5535315.htm).
- [2] 潘根兴, 李恋卿, 刘晓雨, 等. 热裂解生物质炭产业化: 秸秆禁烧与绿色农业新途径[J]. 科技导报, 2015, 33(13): 92-101.  
Pan Genxing, Li Lianqing, Liu Xiaoyu, et al. Industrialization of biochar from biomass pyrolysis: A new option for straw burning ban and green agriculture of China[J]. Science and Technology Review, 2015, 33(13): 92-101.
- [3] Joseph S, Graber E R, Chia C, et al. Shifting paradigms: Development of high-efficiency biochar fertilizers based on nano-structures and soluble components[J]. Carbon Management, 2013, 4(3): 323-343.
- [4] Lou Y, Joseph S, Li L, et al. Water extract from straw biochar used for plant growth promotion: An initial test[J]. BioResources, 2016, 11(1), 249-266.
- [5] Bian R, Chen D, Liu X, et al. Biochar soil amendment as a solution to prevent Cd-tainted rice from China: results from a cross-site field experiment[J]. Ecological Engineering, 2013, 58: 378-383.
- [6] Zheng J, Han J, Liu Z, et al. Biochar compound fertilizer increases nitrogen productivity and economic benefits but decreases carbon emission of maize production[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 241: 70-78.
- [7] 潘根兴. 农田重金属污染可持续治理: 案例研究[EB/OL]. (2015-09-19) [2017-08-08]. <http://research.iae.ac.cn/web/ShowArticle.asp?ArticleID=5070>.  
Pan Genxing. Sustainable management of soil heavy metal contamination: Case studies[EB/OL]. (2015-09-19) [2017-08-08]. <http://research.iae.ac.cn/web/ShowArticle.asp?ArticleID=5070>.
- [8] Lashari M S, Liu Y, Li L, et al. Effects of amendment of biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution on soil quality and wheat yield of a salt-stressed cropland from Central China Great Plain[J]. Field Crops Research, 2013, 144: 113-118.
- [9] Lashari M S, Ye Y, Ji H, et al. Biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution alleviated salt stress and improved leaf bioactivity of maize in a saline soil from central China: A 2-year field experiment[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(6):

- 1321-1327.
- [10] Cheng K, Zheng J, Nayak D, et al. Re-evaluating the biophysical and technologically attainable potential of topsoil carbon sequestration in China's cropland[J]. *Soil Use and Management*, 2013, 29(4): 501-509.
- [11] 中华人民共和国国家发展改革委员会. 国家重点推广的低碳技术目录[EB/OL]. (2014-08-25) [2017-08-08]. [http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201409/t20140905\\_625018.html](http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201409/t20140905_625018.html).  
National Development and Reform Commission, Peoples Republic of China. A catalog of state approved key low carbon technologies for out reaching[EB/OL]. (2014-08-25) [2017-08-08]. [http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201409/t20140905\\_625018.html](http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201409/t20140905_625018.html).
- [12] 中华人民共和国农业部. 农业部办公厅关于推介发布秸秆农用十大模式的通知[EB/OL]. (2017-04-27) [2017-08-08]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/201705/t20170503\\_5593248.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/201705/t20170503_5593248.htm).  
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. A recommendation of ten types of crop straw recycling in agriculture[EB/OL]. (2017-04-27) [2017-08-08]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/201705/t20170503\\_5593248.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/201705/t20170503_5593248.htm).
- [13] 杨沫. 我国玉米秸秆还田主要问题及对策[J]. *农业科技与装备*, 2016, 1: 65-66.  
Yang Mo. Main problems and countermeasures of maize straw returning to field in China[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2016, 1: 65-66.
- [14] 宫秀杰, 钱春荣, 于洋, 等. 我国玉米秸秆还田现状及效应研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(9): 10-13.  
Gong Xiujie, Qian Chunrong, Yu Yang, et al. The current situation and research progress of maize straw returning to field in China[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(9): 10-13.
- [15] 乔地. 紧急刹住秸秆还田风[EB/OL]. (2013-09-29) [2017-08-08]. [http://digitalpaper.stdaily.com/http\\_www.kjrb.com/kjrb/html/2013-09/29/content\\_226500.htm?div=-1](http://digitalpaper.stdaily.com/http_www.kjrb.com/kjrb/html/2013-09/29/content_226500.htm?div=-1).  
Qiao Di. It's emergency to stop following straw incorporation [EB/OL]. (2013-09-29) [2017-08-08]. [http://digitalpaper.stdaily.com/http\\_www.kjrb.com/kjrb/html/2013-09/29/content\\_226500.htm?div=-1](http://digitalpaper.stdaily.com/http_www.kjrb.com/kjrb/html/2013-09/29/content_226500.htm?div=-1).
- [16] 赵文, 潘运舟, 兰天, 等. 海南商品有机肥中重金属和抗生素含量状况与分析[J]. *环境化学*, 2017, 36(2): 408-419.  
Zhao Wen, Pan Yunzhou, Lan Tian, et al. Analysis of heavy metals and antibiotics content in Hainan commercial organic fertilizers[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(2): 408-419.
- [17] 崔亚男. 猪粪不同处理对土霉素残留、土壤性质和小白菜生长与品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.  
Cui Yanan. Effects of different manure treatments on oxytetracycline residues, soil properties, growth and quality of cabbage[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [18] 董同喜, 张涛, 李洋, 等. 畜禽粪便有机肥中重金属在水稻土中生物有效性动态变化[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(2): 621-629.  
Dong Tongxi, Zhang Tao, Li Yang, et al. Bioavailability dynamics of heavy metals in manure and their effect on uptake of rice[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(2): 621-629.
- [19] 马彪. 生物质炭化下原料与产物性质的关系及规模化生产系统的评价[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.  
Ma Biao. The relationship between biomass and biochar properties under biomass carbonization and the evaluation of large-scale production system[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [20] 陈首龙. 利用秸秆生产炭基复合肥[EB/OL]. (2017-05-23) [2017-10-26]. <http://www.zgsuixian.gov.cn/a/xinwenzhongxin/suixianxinwen/shizhengxinwen/2017/0523/28837.html>.  
Cheng Shoulong. Use crop straw for biochar based compound fertilizer production[EB/OL]. (2017-05-23) [2017-10-26]. <http://www.zgsuixian.gov.cn/a/xinwenzhongxin/suixianxinwen/shizhengxinwen/2017/0523/28837.html>.
- [21] 胡日查, 高敏娜. 内蒙古首个炭基复合肥项目一期工程顺利完工. [EB/OL]. (2017-10-17) [2017-10-26]. [http://www.nmgzx.gov.cn/xwdt/ssxw/201710/t20171017\\_78763.html](http://www.nmgzx.gov.cn/xwdt/ssxw/201710/t20171017_78763.html).  
Hu Richa, Gao minna. The first biochar based compound fertilizer project in Inner Mongolia was successfully completed [EB/OL]. (2017-10-17). [2017-10-26]. [http://www.nmgzx.gov.cn/xwdt/ssxw/201710/t20171017\\_78763.html](http://www.nmgzx.gov.cn/xwdt/ssxw/201710/t20171017_78763.html).
- [22] 陈浩洋. 金锅“变废为宝”引来32位国际学者-污泥、秸秆甚至猪粪都可以热解炭化为活性炭[EB/OL]. (2016-10-26) [2017-08-08]. <http://www.jhnews.com.cn/2016/1026/701480.shtml>.  
Chen Haoyang. The company of Jinguo attracted 32 global researchers for its technology of pyrolyzing sewage sludge, crop straw and manure into biochar[EB/OL]. (2016-10-26) [2017-08-08]. <http://www.jhnews.com.cn/2016/1026/701480.shtml>.
- [23] Kleber M, Nico P S, Plante A, et al. Old and stable soil organic matter is not necessarily chemically recalcitrant: Implications for modeling concepts and temperature sensitivity[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 1097-1107.
- [24] 周萍, 潘根兴, Piccolo A, 等. 南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究. IV. 颗粒有机质热裂解-气相-质谱法分子结构初步表征[J]. *土壤学报*, 2011, 48(1): 112-124.  
Zhou Ping, Pan Genxing, Piccolo A, et al. SOC enhancement in major types of paddy soil under long-term agro-ecosystem experiments from South China. IV. Molecular characterization of particulate organic carbon by Thermochemolysis-GC/MS[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(1): 112-124.
- [25] Yao Y, Gao B, Chen J, et al. Engineered biochar reclaiming phosphate from aqueous solutions: mechanisms and potential application as a slow-release fertilizer[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(15): 8700-8708.
- [26] 娄颖梅, 潘根兴, 李恋卿, 等. 一种多效有机叶面调理剂的制备方法及应用: 104370595A[P]. 2015.  
Lou Yingmei, Pan Genxing, Li Lianqing, et al. A preparation method and application of multiple-effect organic foliage conditioner:1043705-95A[P]. 2015.
- [27] Sun J, Drosos M, Mazzei P, et al. The molecular properties of biochar carbon released in dilute acidic solution and its effects on maize seed germination[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 858-867.
- [28] Cayuela M L, Sánchez-Monedero M A, Roig A, et al. Biochar and denitrification in soils: when, how much and why does biochar reduce N<sub>2</sub>O emissions[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: e1732.
- [29] Cayuela M L, Zwieter L, Singh B P, et al. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture*

- Ecosystems and Environment, 2014, 191: 5-16.
- [30] Graber E R, Tsechansky L, Lew B, et al. Reducing capacity of water extracts of biochars and their solubilization of soil Mn and Fe[J]. European journal of soil science, 2014, 65(1): 162-172.
- [31] Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 68: A4-A9.
- [32] Banwart S, Black H, Cai Z, et al. Benefits of soil carbon: Report on the outcomes of an international scientific committee on problems of the environment rapid assessment workshop[J]. Carbon Management, 2014, 5(2): 185-192.
- [33] Bian R, Joseph S, Cui L, et al. A three-year experiment confirms continuous immobilization of cadmium and lead in contaminated paddy field with biochar amendment[J]. Journal of hazardous materials, 2014, 272: 121-128.
- [34] 卞荣军. 城市和农业废弃物生物质炭的农田环境效应及安全性与可持续性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- Bian Rongjun. Sustainable effect of biochar from municipal biowaste and crop straw on land environment and safety[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [35] Smith P, Cotrufo M F, Rumpel C, et al. Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils[J]. Soil Discussions, 2015, 2(1): 537-586.
- [36] Smith P, House J I, Bustamante M, et al. Global change pressures on soils from land use and management[J]. Global Change Biology, 2016, 22: 1008-1028.
- [37] FAO, ITPS. Status of the World's Soil Resources (SWSR)—Main Report[M]. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, 2015.
- [38] Paustian K, Lehmann J, Ogle S, et al. Climate-smart soils [J]. Nature, 2016, 532(7597): 49-57.
- [39] Omondi M O, Xia X, Nahayo A, et al. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data [J]. Geoderma, 2016, 274: 28-34.
- [40] Zhou H, Zhang D, Wang P, et al. Changes in microbial biomass and the metabolic quotient with biochar addition to agricultural soils: A meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 239: 80-89.
- [41] Zhang A, Cui L, Pan G, 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.
- [42] Zhang A, Bian R, Pan G, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. Field Crops Research, 2012, 127: 153-160.
- [43] Zhang D, Pan G, Wu G, et al. Biochar helps enhance maize productivity and reduce greenhouse gas emissions under balanced fertilization in a rainfed low fertility inceptisol[J]. Chemosphere, 2016, 142: 106-113.
- [44] Liu X, Qu J, Li L, Zhang A, et al. Can biochar amendment be an ecological engineering technology to depress N<sub>2</sub>O emission in rice paddies?—A cross site field experiment from South China[J]. Ecological Engineering, 2012, 42: 168-173.
- [45] 吉春颖, 卞荣军, 张登晓, 等. 一种降低蔬菜硝酸盐含量的方法: 102948321A [P]. 2013.
- Ji Chunying, Bian Rongjun, Zhang Dengxiao, et al. The application method to decrease the concentration of nitrate in vegetables: 102948321A [P]. 2013.
- [46] Hou X, Meng L, Li L, et al. Biochar amendment to soils impairs developmental and reproductive performances of a major rice pest *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae)[J]. Journal of Applied Entomology, 2015, 139(10): 727-733.
- [47] 潘志平, 郭栋, 陈建清, 等. 生物质炭施用对药园土壤及三七腐霉病残留的影响[J]. 中药材, 2016, 39(11): 2431-2436.
- Pan Zhiping, Guo Dong, Chen Jianqing, et al. Effect of biochar amendment on procymidone residue in soil and root of panax notogin seng in a medicine herb plantation[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2016, 39(11): 2431-2436.
- [48] Qian L, Chen L, Joseph S, et al. Biochar compound fertilizer as an option to reach high productivity but low carbon intensity in rice agriculture of China[J]. Carbon Management, 2014, 5(2): 145-154.
- [49] Joseph S, Anwar H M, Storer P, et al. Effects of enriched biochars containing magnetic iron nanoparticles on mycorrhizal colonisation, plant growth, nutrient uptake and soil quality improvement[J]. Pedosphere, 2015, 25(5): 749-760.
- [50] Woolf D, Lehmann J, Lee D R. Optimal bioenergy power generation for climate change mitigation with or without carbon sequestration[J]. Nature Communications, 2016, 7: 13160.
- [51] 刘晓雨, 潘根兴, 孟军. 生物质炭产业化应用及农业可持续管理[J]. 国际学术动态, 2016, 2: 17-19.
- Liu Xiaoyu, Pan Genxing, Meng Jun, et al. Biochar industrialization and sustainable agricultural management[J]. International Academic Development, 2016, 2: 17-19.
- [52] ProNatura. China leader in green agriculture fighting climate change with biochar[EB/OL]. (2015-08-30).[2017-08-08]. <http://www.pronatura.org/wp-content/uploads/2015/08/EN30-China-leader-in-biochar-2015.pdf>.

## From biowaste treatment to novel bio-material manufacturing: Biomaterial science and technology based on biomass pyrolysis

PAN Genxing<sup>1,2</sup>, BIAN Rongjun<sup>1</sup>, CHENG Kun<sup>1</sup>

1. Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, Center of Biomass and Green Engineering Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China
2. Institute of Science and Technology for Bioeconomy, Jinhua 321000, China

**Abstract** For green development, novel technology for biowaste treatment is urged in China. Recent development of engineered biomass pyrolysis allows separation, differentiation and valorized utilization of resources associated with waste biomass, with safe reduction of potential pollutants. Such novel green technology has competitive privileges in carbon-saving, environmental safety and overall recycling over the conventional technologies. Further development of viable engineered systems for various types of biowastes will bring about a new sector of biochar-based novel biomaterial manufacture including bioenergy, biochar fertilizers and bio-nanomaterial. Such a new sector will play the roles of natural organic matter from structure to functionality, soil aggregation, and biochar as an ecosystem engineer. The development will serve the green development of China's agriculture and environment with large amount of biochar and associated biomaterials for chemical fertilizer substitution, environment pollution control and soil improvement. A potential biochar production of 0.3 billion ton per year is anticipated in the near future, which demands new science and technology of biomass and biochar, new standardization of biowaste treatment and biomaterial as well as novel production systems. Support is urged from the central government to push science and technology development so as to lead the global trend of the new bioeconomy for green development in 21<sup>st</sup> century.

**Keywords** biomass feedstock; pyrolysis; novel biomaterial; green agriculture; biomass engineering

(责任编辑 祝叶华)