



农作物秸秆炭化还田-土壤改良产业化技术

研究与发展报告

南京三聚生物质新材料科技有限公司

南京农业大学生物质绿色工程技术中心

北京三聚绿能科技有限公司

石油和化工行业秸秆生物质高值化利用工程研究中心

二零一七年七月

导 读

- 有机质是土壤的核心功能物质,而团聚体是土壤的关键功能结构;
- 有机质缺失是土壤肥力低、退化严重、环境质量差的限制因子;
- 缺少资源化利用产业技术,是推行秸秆还田改土增效的突出瓶颈;
- 生物质热裂解是低碳、安全、环保的秸秆综合利用最优技术途径;
- 热裂解产物分离、分质、分质利用是生物质产业化的核心技术;
- 炭基复合肥、炭基土壤改良剂和炭基环境材料等产品创新是秸秆生物质产业的结构支柱;
- 大规模秸秆热裂解和生物质炭生产的工业化集成系统是秸秆生物质产业的关键支撑;
- 工艺、标准、技术服务和产业模式是生物质产业的全面保障.

农作物秸秆炭化还田-土壤改良产业化技术

总体研究报告

前言

本项目技术是继 2012 年通过教育部鉴定的“生物黑炭固碳减排及绿色农业技术研究与应用”（鉴字[教字 BP2012] 第 011 号）基础上，南京农业大学对秸秆生物质炭农业效应及农业应用产品的试验研究，南京三聚生物质新材料科技有限公司和北京三聚绿能科技有限公司对秸秆炭化装备和秸秆炭基肥工程技术的工业化试验、开发和集成配套，以及秸秆炭化产业全链式技术服务体系构建，而形成的“农作物秸秆炭化与生物质炭基肥工业化生产技术及应用”成果，旨在为国家秸秆资源化利用的新型产业化途径和商业化模式提供可推广、可复制和可持续的解决方案。

一. 项目需求：秸秆炭化与炭基肥作为秸秆资源化利用的产业化途径

自 2006 年以来，特别是 2009 年哥本哈根联合国第 21 届气候变化大会以来，生物质因巨大固碳减排潜力和明显的土壤培肥与作物增产潜力，日益被接受为既服务于食物安全又服务于气候变化减缓的实用技术（Lehmann 2015. EarthScan），欧美科学家模型评估全球生物质炭化及农业应用固碳减排可以达到每年 10 亿吨 CO₂ 当量的减排潜力（Woolf et al., 2010），将生物质炭用于农业成为全球社会的呼声（Nature 2015），联合国环境规划署通过全球环境机制(GEF)特别设立了生物质炭土壤可持续管理全球示范项目（UNEP/GEF, 2014），国际生物质炭协会预测，至 2030 年，一个生物质能源与生物质炭偶联循环的生物质产业可达万亿美元规模，生物质炭产量将达每年 10 亿吨，一个从农业秸秆等废弃物资源化出发服务于农业、能源、环境和生态建设的生物质新产业将成为 21 世纪后期的朝阳产业。

我国农作物秸秆资源总量已达 10 亿多吨。尽管政府一直致力于秸秆的“五料化”利用，特别是秸秆还田，被认为是资源循环、增碳肥土的有效途径，但受制于紧张的农时，以及工业化和城镇化下紧张的农民劳动力，秸秆还田越来越难以被农民接受而难以推行；据估计，至 2015 年，我国农作物秸秆资源利用率平均不到 80%，如果加上直接还田的部分，没有被利用的秸秆资源占 35%以上，总计达 4 亿多吨。我国秸秆资源中，有 1/4 以上产自华北和东北农业区，这些地区秸秆焚烧可能占到 40%，我国政府在实行秸秆禁烧上采取了全球最严厉的管制政策，采取了上至卫星监控下至蹲点监督的严密管控，配合了秸秆补助、农机补助、有机肥补助等禁、管、督、促多管齐下的政府机制，但秸秆还田收效十分有限，至今未能解决秸秆禁烧问题。因此，必需发展其他资源化替代性机制，特别是离田加工处理增值途径，才能使秸秆禁烧突出重围，由管控走向产业发展。

另一方面，我国农田的肥力和环境问题一直制约着我国农业可持续发展。我国农田的土壤有机质数量低于欧美国家约 1/3 以上，是耕性差、保水保肥弱的根本所在。我国 2/3 面积的农田其有机质含量还在 1.5%以下，离欧洲的临界水平 3.5%差了 200%以上，因而提升耕地有机质成为我国农业的长远任务。如何快速提高有机质含量，改善土壤肥力一直是农业科技的核心内容；由于耕地地力低下，养分报酬率低，导致化肥施用量日益增加，成为农业温室气体和水体污染的来源，因而减肥也日益上升为我国农业的国策之一。我国每年化肥施用量在 7500 万吨以上，主要是纯化学肥料，有机肥不到 15%，有机无机复合肥更少（1500 万吨），有机无机复合肥料在未来增产减肥中具有巨大的竞争力。

农作物秸秆是农田有机质的来源，且含有大量肥料残余的养分（秸秆养分残留达到化肥施入量的 1/4 以上），又含有热值；相对于秸秆还田，生物质炭化在去除了秸秆中潜在有害成分（病虫害残余、农药残留）外，将生物质转化为稳定有机质，将秸秆养分保留于炭质，将热值通过挥发分提取出生物质可燃气，将无形的秸秆还田转化为有型产品；如果说秸秆还田是零碳（碳中和技术），那么秸秆炭化循环是实实在在的固碳减排技术。然而，通过农民个体业主炭化还田的技术路径不适用于我国分散的个体农户，而大量购买生物质炭用于还田又不符合中国农民或业主的经营实力；因此，由分散秸秆到集中炭化，由直接大量施用生物质炭到生物质炭基肥施用成为解决大规模秸秆炭化服务农业的关键技术和途径。

二. 本研究的目的、总体思想与技术途径

我国政府绿色发展理念已经贯穿国民经济各行业，绿色发展体系基本构成，国家公布了绿色发展 5 大战略行动，农业部相继提出实施减肥减药、果菜茶化肥替代、加快东北秸秆治理等战略措施，秸秆资源化利用以及在华北和东北 10 个省市示范，秸秆炭化肥料还田也已经正式列为农业部秸秆资源化十大模式之一。为此，在 2012 年鉴定中提出的生物质炭绿色农业产业链理论框架基础上，本成果着重解决如下 3 个问题：

1. 秸秆工业化炭化与农业生物质炭生产技术及集成系统，发展热解与分离集成、产能与效能协调的大规模连续性工业化系统；

2. 炭化产物与生物质炭的增值化产品创新，农业生物质炭的质量与炭化工艺条件及提取分质利用的技术和产品创新，保证高效炭基肥创新与农业增产增效技术与产品生产的标准化；

3. 秸秆炭化与生物质炭基肥产业的产业模式及全链式技术服务体系，支撑和保证秸秆炭化工业化生产的可持续运行。

总体思想是：

成果技术的基本依据是，我国秸秆资源规模和集中产出的主要在我国东部的华北和东北以及西北的新疆等地区，这些地区农业为主要经济来源，土壤质量较差，干季长，土地资源丰富，秸秆资源集中而有效供给，就业劳动力丰富，产品受体市场大且稳定，秸秆循环产品消纳量大，热能和生物质炭及炭基肥均可以产品销售；

技术发展的总体思想是：充分发挥生物质炭的土壤改良和肥料增效功能，研发符合当地秸秆产出和农业结构的规模化秸秆炭化技术和生产体系，完善炭化产物的分离和分质利用技术，生产优质农用生物质炭，进一步创新土壤改良剂、秸秆炭基肥等增值产品，并完善产业技术服务，形成秸秆炭化及炭基肥工业化生产技术及应用模式，产业化复制而构建新型生物质产业体系。

技术路线：

本成果形成中贯彻了从基础研究出发、面向生产应用实际问题，解决技术瓶颈，构建一体化全链式技术体系；通过产学研政紧密合作，以科技为先导，企业为主体，绿色农业市场为目标，探索构建规模化秸秆生物质炭化与生物质炭肥料

(材料)生产集成体系和产业发展体系,成为秸秆全循环资源化技术模式和多联产多服务的工业化生产经营企业模式,为大规模处理农作物秸秆和发展绿色农业提供范例(图1)。

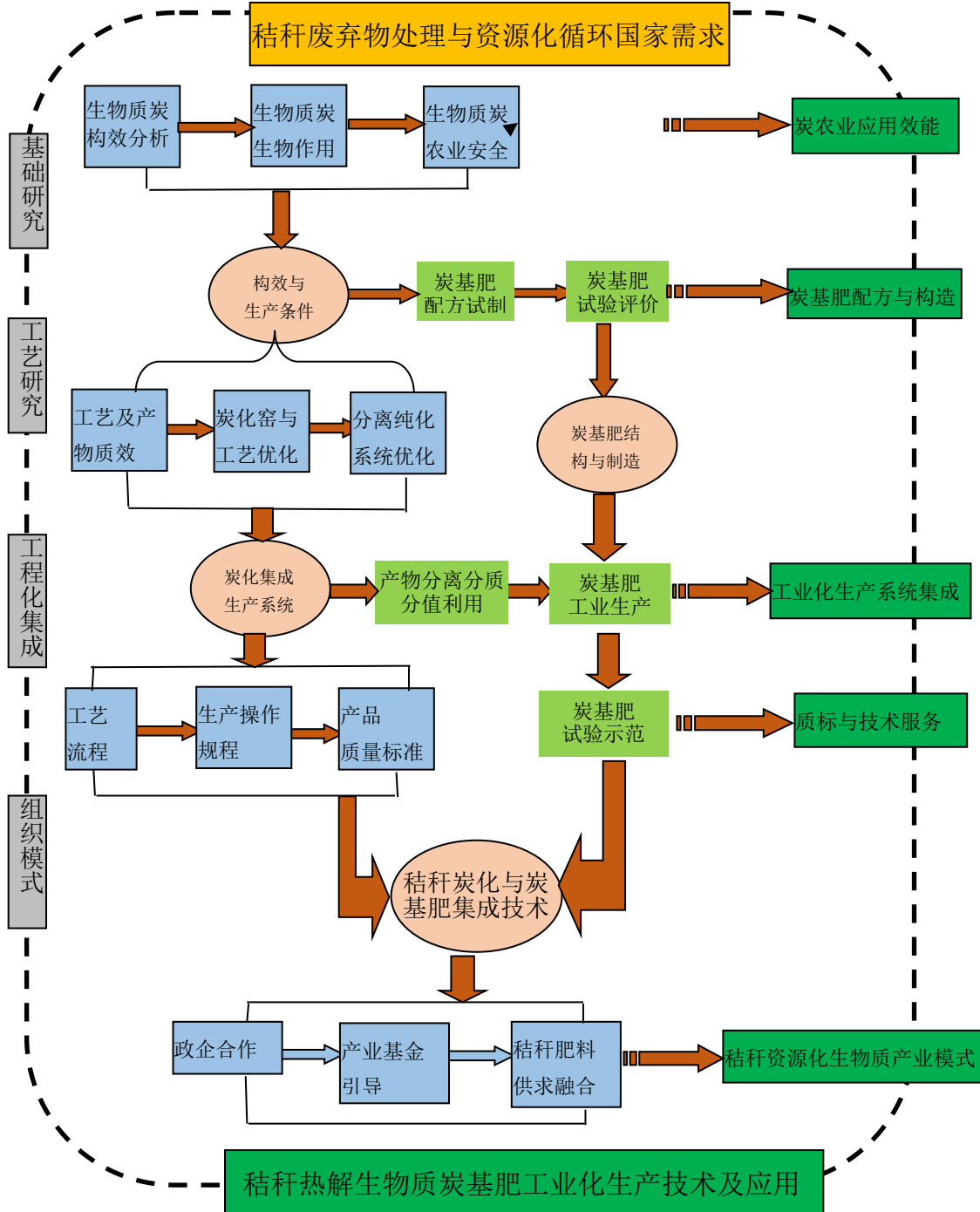


图1 项目研究与技术发展的实施路线(橙色园框为产业化技术模块,蓝色图框为研发进程,浅绿色图框为产业化技术研发进展)

三、研究的组织和实施

项目成果的技术研发历经 5 年多，循序渐进一次完成了如下四大研发工作：

1. 秸秆生物质炭性质和功效与生产条件的关系研究与工业化炭化生产线试验与集成配套体系研发；2. 生物质炭材料的土壤改良、增产与减排及环境治理作用的进一步试验观测与产品开发研制；3. 炭基肥的设计、配方和工业化试制生产与试验示范研究；4. 秸秆炭化工业化生产及炭基肥应用的产业技术服务体系与支撑体系构建研究。

本项目成果有一系列国家、行业、企业的科技发展项目支撑，包括(按年份倒序)：

(1) 生物质炭基有机无机复混肥研制与示范，国家重点研发计划项目子课题，2017.01-2021.12. 150 万元；

(2) 黄淮农区秸秆生物质炭化还田推广应用，农业部财政项目（农村能源），2016.7-2017.12，120 万元；

(3) 程琨. 南部农业优化发展区生物炭产业模式研究，中国工程院咨询研究项目子课题，2017.1-2017.12，15 万元；

(4) 中国东盟（10+1）废弃物生物质炭可持续农业技术及应用交流与合作，财政部亚专资项目，2016.1-2017.12，75 万元；

(5) 南方主要粮食作物秸秆生物炭农田固碳减排研究，中国工程院咨询研究项目，2015.01-2015.12, 15 万元；

(6) 生物质炭与土壤可持续管理，联合国环境规划署全球环境基金，2015-2018，63 万元；

(7) 旱地生物质炭应用技术，“十二五”农村领域国家科技支撑计划课题(2013BAD11B00)，2013.01-2016.12，78 万元；

(8) 生物炭修复重金属污染农田关键技术研究，公益性行业(农业)科研专项经费项目课题（201303095-11），2013.01-2017.12，125 万元；

(9) 土壤生物炭固碳增肥与污染阻控协同技术及示范，科技支撑计划子课题(2015BAC02B01)，2015-2017，106 万元；

(10) 秸秆热裂解生物质炭资源和能源利用技术途径的潜力分析评价，教育部博士点基金重点领域项目(20120097130003), 2013.01-2015.12,40 万元；

(11) 生物质炭绿色农业技术转化与示范, 科技部农业科技成果转化资金项目(2013GB23600666), 2013.01-2015.8, 60 万元;

(12) 秸秆生物质炭对农田土壤有机碳保持作用及机制, 国家自然科学基金项目(41371298), 2014.01-2017.12, 80 万元;

(13) 农业生物炭输入对农田土壤有机碳固定的影响及其微生物学机制研究, 国家自然科学基金项目(41371300), 2014.01-2017.12, 70 万元;

(14) 生物质炭施用对水稻根系形态及根际土壤性质的影响研究, 国家自然科学基金项目(41501310), 2016.01-2018.12, 24 万元;

(15) 添加生物质炭对污染稻田土壤 Cd 有效性及水稻吸收影响的后效应研究, 国家自然科学基金项目(41501353), 2016.01-2018.12, 24 万元;

(16) 典型污染耕地生物质炭修复技术研发与应用示范, 江苏省耕地质量提高与污染防治示范研究—典型地区耕地污染修复与防治示范项目子课题, 2016.6-2018.6, 50.2 万;

(17) 生物质炭会规模化综合利用技术服务, 北京三聚环保新材料股份有限公司, 2016-2017, 150 万元;

(18) 生物质炭基复合肥关键技术及其产业化, 北京三聚环保新材料股份有限公司, 2016-2017, 150 万元;

(19) 南京市秸秆综合利用规划编制, 南京市农业委员会, 60 万元;

(20) 江苏省有机类固体废弃物资源化利用协同创新中心秸秆团队项目, 2012.01-2016.12. 90 万元.

在国家自然科学基金、教育部基础研究项目等项目支持下, 主要围绕秸秆等生物质废弃物性质、功效与炭化条件的关系研究, 探索和明确农业生物质炭化效率和生物质炭构效关系随炭化工艺条件的变化, 为不同原料的炭化生产提供工艺选择依据; 通过科技部“十二五”农业科技支撑计划课题, 农业部行业项目及财政资助项目和江苏省固体废弃物资源化协同中心等资助, 开展了秸秆等生物质炭的土壤改良、重金属钝化、农产品安全生产的各项功能表现的试验观测, 及其在旱地和水田、在粮食和经济作物以及中药材等的表现差异, 摸索生物质炭的功效与适用性利用的关系, 探索农业试验示范效果及产品应用方法, 以及试验控制及观测指标等技术内容, 通过国家自然科学基金和工程院项目探讨生物质炭土壤

和作物功效的机理和最优功效技术配方方案，通过科技部、农业部和联合国推广和示范项目，开展不同生物质炭产品农业应用的示范及农民认知推广，探讨秸秆炭化与生物质最可接受与推广模式及方案；通过科技部和南京三聚公司进行工业化试验、产品创制与工业生产及应用的联网试验和示范，完善秸秆炭化的工程化和全链式技术服务模式，最后集成为“农作物秸秆炭化与生物质炭基肥工业化生产技术及应用”系统技术，成为产业化发展的核心技术。

我们的研究和技术发展，首先追踪国际生物质科技前沿，紧跟国家绿色发展步伐，服务政府秸秆禁烧和资源化行动，深化产学研协作攻关，支撑企业产业发展，推进秸秆资源化循环。上述研究和技术开发首先面向国家绿色发展需求对科技创新的急迫需求，一方面积极参与国家（发改委、农业部、财政部和环境保护部）及主管部门对秸秆禁烧和资源化利用的调研、咨询和政策制定的各类相关活动，如：2012-2014 年间的国家绿色能源示范县计划，2013-2015 年间国家发改委、财政部、农业部等 5 部委的秸秆利用调研，2015-2016 年农业部秸秆资源化示范计划的调研讨论。与此同时，积极介入国际生物质炭领域交流和合作，特别是结合参与的国际生物质炭协会和亚洲中心的工作，联合国环境规划署项目和财政部亚专资项目，联合国土壤资源报告及世界土壤年活动以及 IPCC 第五次气候变化评估报告及温室气体清单工作组等国际行动，获取土壤提质、减缓气候变化及农业废弃物治理等方面对有机质、对废弃物处理、对温室气体减排的需求和技术发展信息，指导产业科技的创新方向；通过生物质炭绿色农业协作网，选择骨干企业构成技术-设备-工程-市场联合一体化全链式技术开发集成，进一步布设全国多地联网式试验示范，促进秸秆炭化企业落地发展，组成全国分布式秸秆炭化产业格局，初步奠定了秸秆炭化工业化生产和炭基肥生产应用的全国产业网络，也提供了国家农业废弃物高效循环利用的绿色产业发展模式。

四. 主要研究与技术发展进展:

1. 完成秸秆生物质炭化生物质炭的性质及效能评价, 明确炭化适宜工艺要求:

(1) 分析和试验研究了秸秆生物质炭的性质与原料及工艺的关系

首先, 我们分析了 2009 年以后全球文献报道的生物质炭性质差异。各类植物源原料中, 农作物秸秆生物质炭的 pH、钾含量和灰分较高, 而有机碳、氮磷含量和比表面积与 CEC 适中, 总养分可以高达 5%, 阳离子交换量(CEC)可达一般土壤的数倍, 农业应用前景优于其他来源生物质。这构成我们秸秆炭化还田改土的资源化循环的理论依据(表 1)。另外, 分析还表明, 与国际上研究应用较多的污泥源生物质炭比较, 秸秆等植物源生物质炭的潜在污染物含量降低了一个数量级(芳烃类有机物稍高外), 符合有机肥的环境质量标准(表 2), 农业应用的环境风险无虞。

表 1 不同原料生物质炭理化性质(平均值±95%置信区间)比较

原料	pH (H ₂ O)	比表面积 (m ² /g)	灰分 (%)	CEC (cmol/kg)	有机碳 (%)	全氮 (%)	全磷 (%)	全钾 (%)
林木	8.2±0.2 (320)	164.4±24.1 (275)	7.84±1.1 (396)	20.9±3.3 (127)	72.6±1.3 (478)	0.6±0.1 (478)	0.4±0.1 (149)	0.7±0.2 (143)
农作物	9.5±0.2 (272)	109.2±1.7 (202)	23.6±1.7 (311)	70.4±15.5 (134)	61.1±1.6 (406)	1.3±0.1 (370)	0.7±0.1 (171)	3.3±0.5 (137)
草	8.7±0.3 (147)	63.4±2.3 (109)	17.9±2.3 (207)	98.6±82.7 (18)	63.9±1.8 (272)	1.2±0.1 (246)	0.4±0.1 (48)	1.7±0.4 (52)
渣类	8.8±0.3 (97)	71.3±4.1 (83)	23.1±4.1 (111)	56.6±62.67 (17)	59.2±3.0 (148)	2.7±0.3 (138)	1.2±0.5 (57)	1.2±0.3 (51)

括号中为文献报道样品数

表 2 全球报道的生物质炭的潜在污染物含量比较 (mg/kg)

	PAHs	As	Cd	Pb	Cu	Zn
污泥	1.0±0.4 (19)	10.4±5.2 (27)	3.7±0.8 (82)	131.9±31.8 (77)	322.5±79.0 (64)	911.8±489.1 (65)
植物	4.7±2.0 (69)	0.9±0.42 (20)	1.0±0.5 (41)	13.7±5.1 (61)	41.9±16.1 (52)	83.6±23.9 (58)

括号中为文献报道样品数.

其二, 分析了报道中的炭化温度分布情况。炭化生产的生物质炭差异广泛, 但各项性质以一定温度区间下较优, 且较为均衡, 特别是农业中重要的养分含量。因此, 中温慢速炭化成为农业秸秆生物质炭化的生产条件的依据。

(2) 试验分析了不同秸秆中温炭化产物分布及性能变化

采用文献上公认的中温炭化条件对不同类型秸秆进行了炭化试验,分析测试生物质炭得率及功能性质。采自南京周边的小麦、水稻、玉米、稻壳、玉米芯、花生壳、甘蔗渣及木屑和芦苇等秸秆原料的生物质炭得率均在 35%以上,其中灰分在 20%以上(花生壳和玉米芯低于 10%),总有机碳可高达 60%以上(仅水稻秸秆较低),挥发分占 20%以上,总可溶性有机碳溶度在 1.6-2.3g/kg 间,总比表面积在 20m²/g 以上,阳离子交换量在 50-80 cmol/kg 间(除油菜秆、芦苇和稻壳外),孔度较大。这些性质表明,中温慢速炭化的得率高,有机质品质佳,含可溶性活性有机物高,可以做到品质优良的农业生物质炭,达到改良土壤和承载养分的功能。



图 2 各种秸秆原料和炭化得到的生物质炭

这些不同生物质炭的比表面积及 CEC 等性质,在结构及孔度上得到充分反映(图 3)。小麦和玉米秸秆生物质炭具有直通的纳米孔隙,稻壳具有蜂窝状纳米细孔隙系统,但水稻秸秆孔隙常常不连贯,与其硅等矿物质灰分较高有关。这种孔隙系统可以保水保肥,作为水分和养分的载体,具有农业土壤的改良和肥力提升的潜在作用。

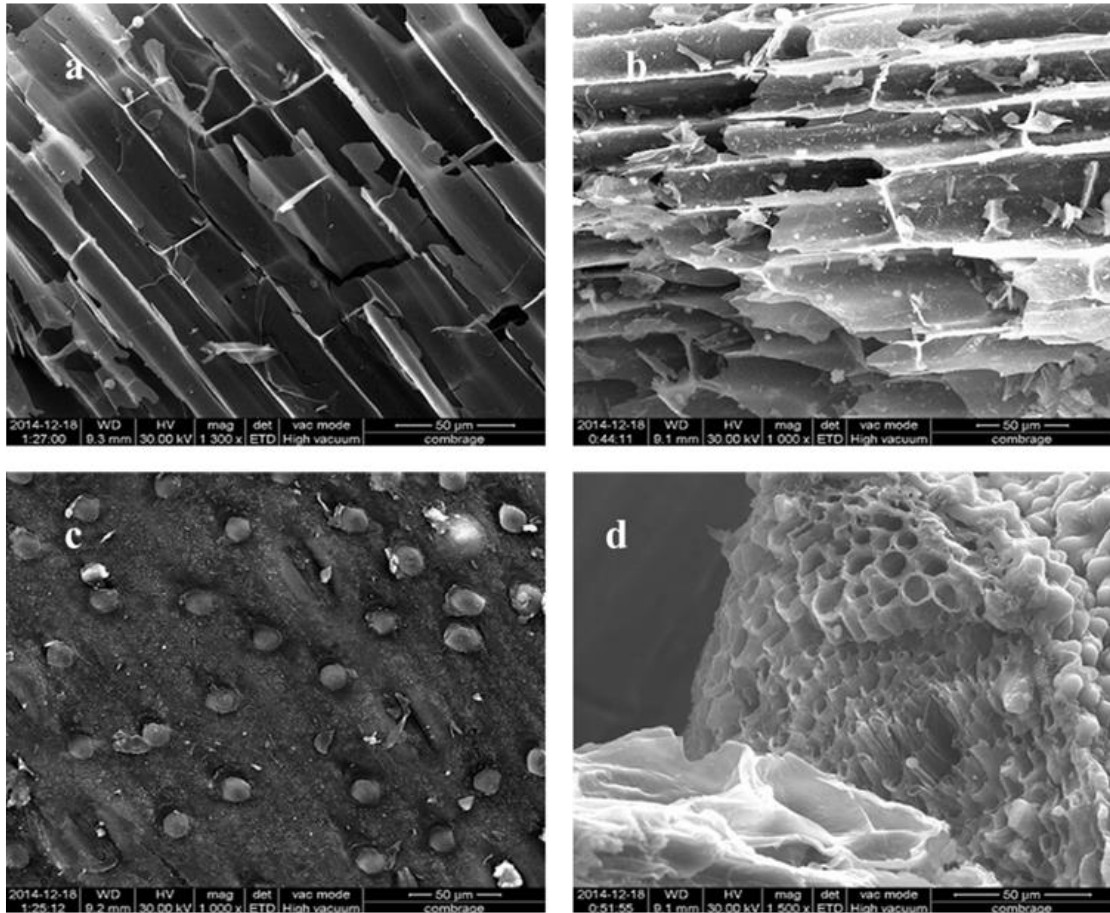


图3 中文慢速炭化生成的生物质炭的扫描电镜微结构 (a, 小麦秸秆; b, 玉米秸秆; c, 水稻秸秆和 d, 稻壳), 图中显示微空隙孔径在数纳米到数十纳米。

(3) 分析评价了秸秆中温慢速热裂解炭化生产效能, 提供工艺条件选择依据

我们进一步在中温慢速炭化条件下进行了系统对玉米、小麦、稻秸和稻壳炭化的产物平衡和物质循环的评价。含水量较低的秸秆炭化后, 可燃气得率和生物质炭得率均高于 35%, 热解木醋液得率在 20% 上下。得到的生物质炭总有机碳高于 50%, 固定态碳占 90% 左右, 磷钾的回收较高, 秸秆养分在生物质炭中的养分总回收循环率最低为氮 (平均 65%), 最高为钾 (平均达 93%) (图 4)。因此, 秸秆炭化是农业养分的优化循环方式。考虑到中国未利用秸秆还田分解或者就地焚烧, 生物质炭化将秸秆生物质回收并固定为生物质炭重新还田, 该 4 种主要农作物秸秆炭化利用每年固碳可达 3 亿吨 CO_2 当量 (Bian et al., 2016)。十分显著的减排潜力也是秸秆炭化还田改土增碳减排的理念依据, 这反映在我们 2016 年提交中央的“生物质炭化应对全球千分之四计划”的内参建议中。

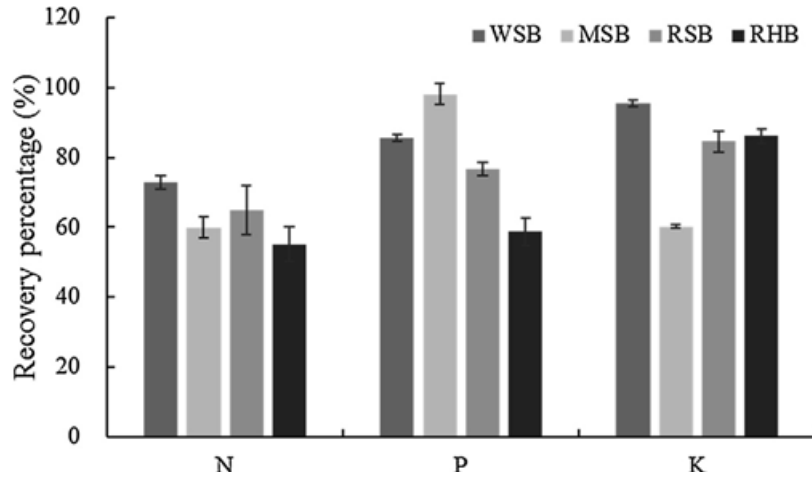


图 4 秸秆炭化中生物质炭养分回收循环率 (WSB, MSB, RSB 和 RHB 分别为小麦秸秆、玉米秸秆、水稻秸秆和稻壳炭化的生物质炭)

生产系统中温度控制对生成的生物质炭性能有影响, 秸秆炭化不同温度下的产物得率及成分决定炭化温度选择。对比研究了不同秸秆原料两种中温热解下秸秆炭化机产生物质炭的得率及其性质和功能的变化。研究数据显示, 水稻和小麦秸秆得率和总有机碳含量得率都较高, 有机碳总量数据也十分理想, 且养分都有富集。因此, 从物理性质和养分含量角度, 秸秆炭化温度拟维持在中温区域范围, 不但反应加快, 而且保证生物质炭性质优良。这是我们提出的在实际生产中, 在中温范围内选择反应温度的出发点。

2. 深入研究了秸秆生物质土壤改良与生物及生态系统功能改善效应, 明确生物质炭的促生作用 (促进生长与机体健康作用), 利于农产品安全生产

(1) 进一步阐明了生物质炭土壤改良效应: 结构、团聚体及养分的改善作用

研究了文献报道的生物质炭施用下土壤物理性状的变化。统计表明, 生物质炭添加下, 土壤团聚体直径和孔隙度提高平均都达 8%, 而有效水含量提高 15%, 饱和导水率提高 25%。这说明施用生物质炭可以显著改善土壤物理结构, 而提高土壤吸水和保水率, 有利于旱地土壤增墒保墒持墒 (Omandi 等 2016)。

对低肥力的华北褐土 (山西忻州) 的试验, 生物质添加 (1%), 土壤结构由大块状向团块状演变 (图 5), 土壤酥松, 土壤墒情改善, 土壤含水量平均增加 3-4%。同时, 我们观察到玉米根系生长发达, 根长增加了 2 倍, 根容积增加了 3 倍, 这会促进玉米的水分和养分的吸收 (图 6)。当前, 土壤侵蚀和过度耕作, 土壤的结构退化十分普遍而严重, 生物质炭的这种显著的土壤改良效应提供了快

速改良我国低产土壤的基本技术途径和适用生产资料。

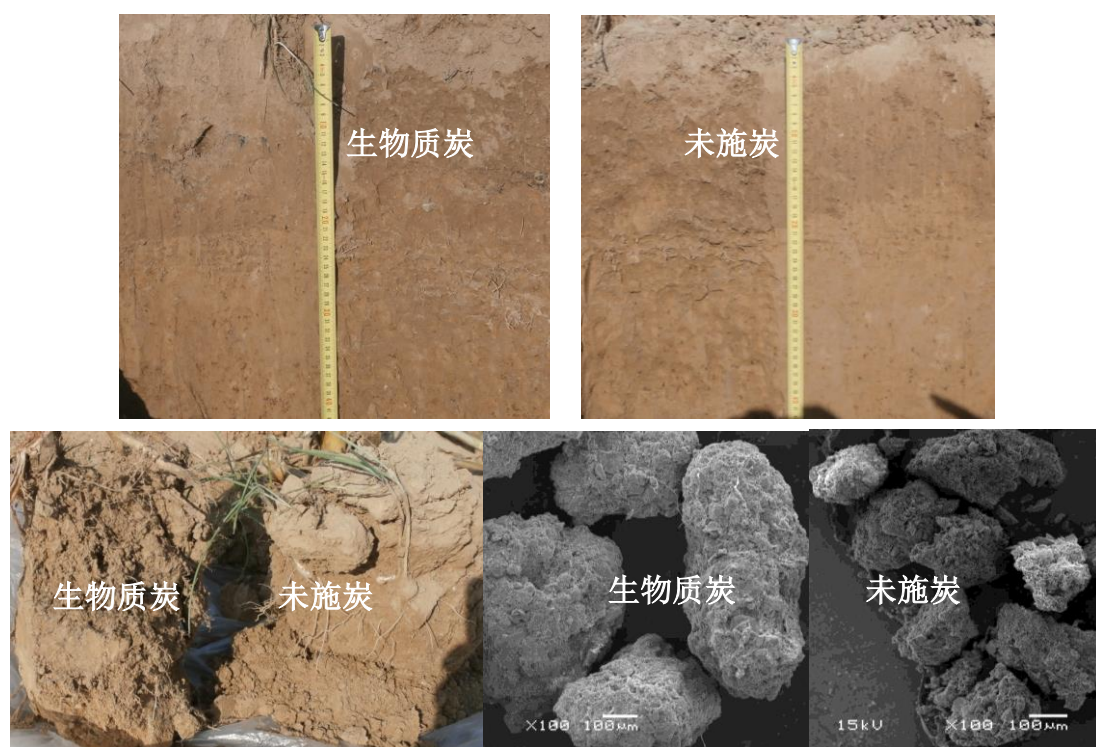


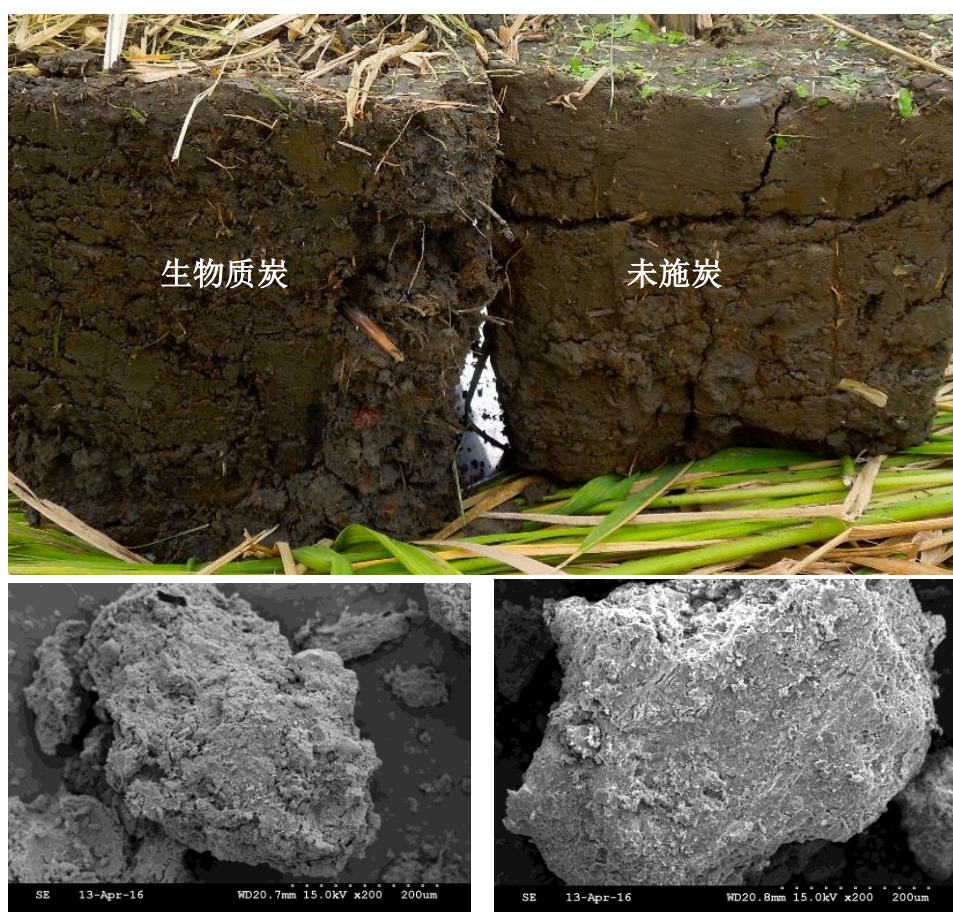
图5 褐土施用生物质炭后的土壤剖面（墒情，上）与土壤结构（下左）及水稳性团聚体（下右）的变化。



图6 低产褐土生物质炭施用下玉米根系生长变化。

水稻土土壤结构尽管其水分保蓄意义不如旱地土壤,但对水稻根系生长和养分循环和生物生长仍然具有重要意义。施炭5年内,稻田土壤酥松,土壤结构稳定,无开裂,宜耕性好,同时不易跑水跑肥(图7)。水稳性团聚体平均直径从268 μm 提高到352 μm ,微团聚体内部孔隙十分丰富,可以调节氧化还原电位,利于微生物活动和养分周转。

生物质炭在提高土壤有机质含量的同时,快速改良土壤的物理结构,特别是结合生物质炭的丰富的纳米孔隙和所含的活性有机质,可能可以利用来改良障碍土壤,特别是我国广泛分布的盐碱土。对华北地区残余盐碱土的试验研究,采用了以生物质炭为核心,发展了固体与液体联合,结构有机质和活性有机质协同,物理、化学与生物改良并进的盐碱土改良技术,改良当年土壤结构由板片状向团块状转化,耕层盐分快速消减,根系生长促进,从而使当年小麦玉米达到中产(图8和9,表3)。其后的观测表明,这种改良作用在第二年效果更为显著,而且观察到植物盐分胁迫显著降低,微生物活性显著增强。



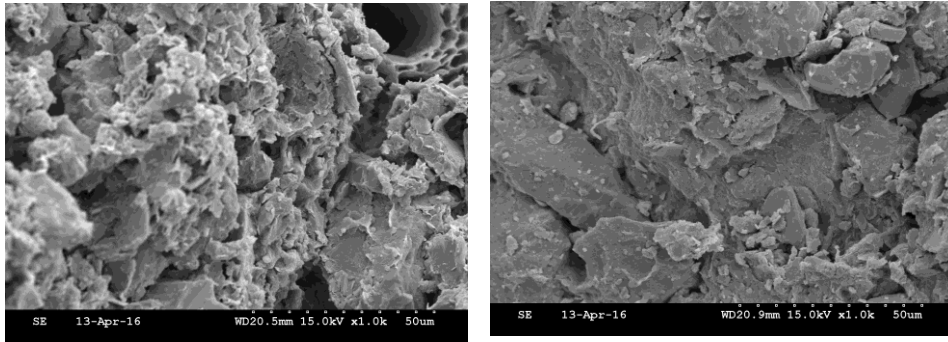


图7 江苏宜兴水稻土施炭后土壤结构(上)、水稳性团聚体(中)及其微观结构(下)的变化。



图8 河南商丘故黄河残余盐碱土生物质炭综合改良后土壤结构由板片状(左)向团块状(右)的变化。注意添加炭下的酥松土壤和团块状土块

表3 盐碱土生物质综合技术改良当年的土壤性质变化与当年的小麦产量

处理	pH (H ₂ O)	容重 (g/cm ³)	SOC (g/kg)	总盐分 (g/kg)	速效磷 (mg/kg)	小麦产量 (t/hm ²)
未施炭	8.23±0.06a	1.34±0.05a	5.93±0.21b	9.21±0.39a	24.95±0.59b	3.6±0.3b
施炭改良	7.94±0.02b	1.20±0.05b	8.53±1.14a	5.63±0.55b	51.91±1.89a	4.9±0.4a

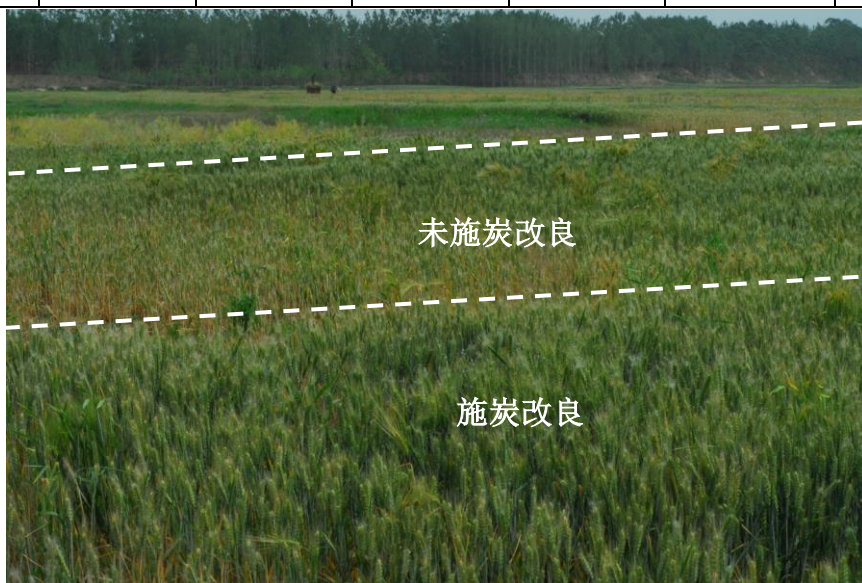


图9 盐碱土(河南商丘)生物质综合改良小麦生产现场(2014)

(2) 深入分析了生物质炭的土壤生物及生态系统效应，揭示其利于生物健康的促生作用

研究了全球发表的生物质炭农业应用文献，统计表明，生物质炭施用下普遍提高了土壤的微生物生物量碳（平均增加 25%），而降低了土壤呼吸商和代谢商（后者平均降低 15%）。代谢商的降低，支持了微生物生境的改善，这与上面生物质炭对土壤结构和团聚体的改善密切相关。统计分析还提示，农业应用中秸秆和养殖业粪便的生物质的生物效应优于林木或污泥等来源的生物质炭，并且以粘土中、贫瘠土壤中效果为佳。因此，生物质炭农业应用还将促进土壤中生物活性和多样性，促进上生态系统服务功能。这项研究首先确立了生物质具有促进微生物生长和微生物健康的作用，代谢商的降低也支持了生物质炭作为稳定有机质的存在而消减了土壤呼吸 CO₂ 排放，消减了土壤 CO₂ 碳源的强度 (Zhou et al., 2017)。

进一步采样分析生物质炭施用多年后的稻田和旱地土壤微生物区系和生物量的变化。早先我们采用 PCR-DGGE 检测到生物质炭施用提高了水稻土土壤微生物生物量（氮）和基因拷贝数 20-50%，降低了真菌的丰度和活性，细菌香浓指数提高了 0.4-1.0，硝化和固氮菌增加普遍且幅度大，而反硝化细菌变化不明显。施炭下细菌微生物区系结构朝着低碳代谢和多样性群落发展 (Chen et al., 2015)，同时提示促进了氮素周转微生物的丰度及多样性，这可能与施炭下 N₂O 氮素排放损失减少、氮素利用率提高有关。后来，又对宜兴长达 5 年的生物质炭一次施用的稻田土壤进行总体和活性功能群微生物的宏基因组测序分析，表明真菌无论是总体还是活性功能群其丰度均明显降低，但细菌的总体和活性功能群丰度均显著升高，尤其活性功能群丰度增加更甚，同时伴随土壤微生物酶活性的显著提高（图 10）。在活性功能细菌中，以多聚体有机质、芳香烃有机质和胺基化合物为基质的细菌群落选择性增加，体现了微生物在施炭土壤中的基质适应性变化 (Chen et al., 2017)。这个研究再次证实生物质炭促进了细菌群落向低碳代谢发展，生物质炭基质适应性细菌提高了相对优势，与土壤呼吸下降和代谢商降低和氮素利用效率提高相呼应（表 4 和 5）。对生物质炭技术改良盐碱土试验分析表明，改良后土壤微生物生物量碳氮大幅度（50-100%）提高，主要是细菌基因丰度提高，而土壤中 C, N, P 转化的酶活性提高了 30-40%，而且第二年提高幅度高于改良第一年（表 6）。土壤的养分得到改善，氮转化中铵例子浓度提

高而硝态氮浓度降低，对于植物吸收利用效率更高（Lu et al., EJSB, 2016）。

表 4 施生物质炭 5 年稻田土壤微生物呼吸与微生物生物量比较

处理	土壤呼吸		微生物生物量 (mg kg ⁻¹)		代谢商
	田间通量	本体培养	碳	氮	
对照	22.44±1.20	32.92±2.07	558.0±17.88	30.63±3.18	2.47±0.22
生物质炭 (0.8%)	15.40±2.87	29.00±0.83	579.4±10.78	39.46±1.55	2.09±0.04
生物质炭 (1.5%)	11.68±2.07	25.63±1.23	620.8±12.67	43.51±3.40	1.72±0.09
<i>F</i> value	6.42	6.19	5.13	5.41	6.94
<i>P</i> value	0.032	0.035	0.050	0.045	0.028
SE	3.05	2.08	19.94	4.01	0.20
LSD	8.90	6.06	58.22	11.70	0.59

注：土壤呼吸单位：田间通量，mg CO₂-C m⁻² h⁻¹；本体培养，mg CO₂-C kg⁻¹ 土。代谢商单位：mg CO₂-C g⁻¹ 微生物 h⁻¹。

表 5 施生物质炭 5 年稻田土壤微生物酶活性比较

处理	脱氢酶	β-葡萄糖苷酶	酸性磷酸酶	碱性磷酸酶
对照	0.91±0.06	54.40±1.40	674.1±9.49	220.8±13.70
0.8%炭	1.72±0.24	50.55±0.88	651.9±9.06	341.8±26.67
1.5%炭	2.01±0.19	43.09±0.97	639.7±15.97	401.3±39.30
<i>F</i> value	10.10	27.17	2.14	10.39
<i>P</i> value	0.012	0.001	0.199	0.011
SE	0.25	1.56	16.88	40.36
LSD	0.74	4.56	49.29	117.9

单位：脱氢酶，μg TPF g⁻¹ 土 h⁻¹；其他酶，μg pNP g⁻¹ soil h⁻¹；

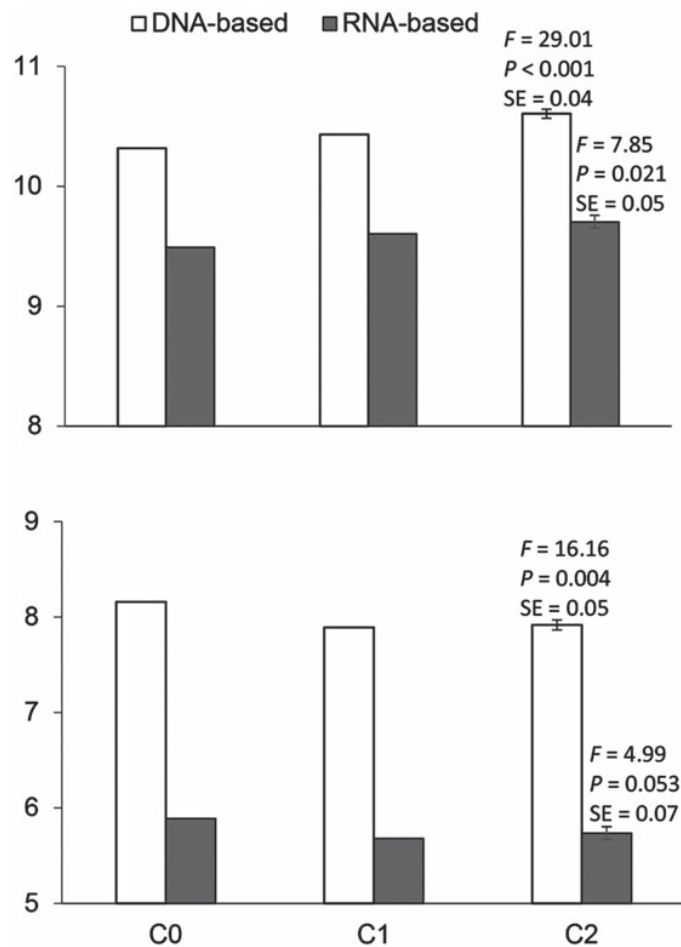


图 10 施炭下水稻土细菌（上）和真菌（下）总体（空框）和活性（黑框）微生物群落丰度的变化（纵轴为基因拷贝数的对数）

表 6 盐碱土生物质炭技术改良后土壤微生物生物量、酶活性及氨硝浓度的变化

土 壤 [¶]	微生物生物量		土壤酶活性*			NH ₄ ⁺ -N (μg g ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N (μg g ⁻¹)
	(mgC kg ⁻¹)	(mgNkg ⁻¹)	脲酶	转化酶	碱性磷酸酶		
0	176.6±5.06c	16.4±0.8c	1.81±0.1c	36.0±3.0b	0.92±0.0b	141.1±8.0c	177.9±0.7a
1	309.5±6.8b	29.4±2.2b	2.35±0.1b	43.0±2.0a	1.1±0.1a	167.9±2.2b	154.8±1.0b
2	475.6±7.8a	34.1±2.1a	2.59±0.0a	47.0±3.6a	1.2±0.0a	190.9±16a	139.0±3.8c

¶: 0, 1, 2 分别代表未施炭和施炭改良 1 年和 2 年后采样测定; *, 酶活性单位: 每 24 小时每个干土转化底物的 mg 数。

我们还对改良土壤上生长的玉米进行了生物健康分析评价, 采集了生长其玉米剑叶, 分析了叶面积指数、叶片生理活性 (表 7)。生物质炭技术改良的盐碱土中, 玉米叶面积指数增加 60%-150%, 叶绿素含量提高 8-28%, 而叶片汁液中

表征胁迫的生理指标脯氨酸和丙二醛含量分别降低 70-90%和 14-19%，相反汁液 P（营养指标）增加了 50-78%。这些说明，生物质炭改良后，盐碱土对作物的胁迫大部或基本消除，植物恢复健康。尽管 Graber 等（2015）通过盆栽试验证明了生物质炭土壤施用可改善植物的生理活性，但我们首次提供了野外土壤-作物系统的证据，揭示了生物质炭可以消除不良逆境对植物生长的生理胁迫，恢复良好的营养和生长活性。

表 7 生长于生物质炭改良盐碱土的玉米剑叶生理指标变化

土壤	叶面积指数 (m ²)	叶绿素 (mg/l)	脯氨酸 (mole/g)	丙二醛 (mole/g)	汁液 P (mmole/g)
0	2.89±0.69	9.13±0.50	142.4±5.6	33.92±2.29	97.96±12.43
1	4.77±0.57	9.61±0.74	46.5±4.4	29.24±0.93	144.5±30.9
2	6.08±0.66	12.27±1.50	24.6±2.8	27.39±2.17	176.7839±28.6

¶: 0, 1, 2 分别代表未施炭和施炭改良 1 年和 2 年后采样测定；

类似于盐碱土中生物质炭改良效应，生物质炭加木醋液用于玉米幼苗盆栽培养，玉米幼苗和根系的过氧化物酶活性明显提高 14-20%左右，氧化物歧化酶活性提高 8-20%，而丙二醛含量显著降低（20-40%幅度），根系和叶片的生理活性明显得到促进（董娟，等 2015）。类似的生物效应也在葡萄幼苗试验、水稻秧苗试验均观察，生物质炭施用下，根系生长和根系活力的显著提升，跟 ATP 含量明显升高，幼苗的生根快、细根量增多，初生幼叶叶绿素含量明显提高（蔺海红等，2013）。在多地田间试验中观察到，施用生物质炭投入中的植物感病或虫害明显减少。尽管病虫害发生发病的捕捉和现场鉴定十分困难，但实验室研究支持了一些昆虫产生对生物质炭的趋避反应，从而减少病害和虫害的产生。因此，生物质炭对于土壤-植物-微生物-病虫害生物系统的影响可能是重要的方面。

从上述研究中得到启示，秸秆生物质炭与土壤中，对于土壤微生物具有总体促进，其活性群落响应更快，而生物活性得以明显升高，而部分区系的改变，向高资源利用、低碳代谢和排放微生物区系结构转变。土壤酶活性，特别是脲酶和磷酸酶的活性升高，以及植物生理活性的提高生物质炭对土壤生物健康和生物功能改善的综合表现，这些可帮助理解生物质土壤施用提供作物生长和抗逆性、增强作物养分吸收和转运，而利于作物高产高效。

(3) 试验明确了生物质炭施用对于农产品绿色安全生产的保障作用

继续对宜兴、湖南和河南的重金属污染土壤的生物质治理试验进行了多年的跟踪。2009年一次性施用秸秆生物质炭后，持续5年内观察到重金属有效性降低，形态由交换性、酸可提取态向氧化物和残渣态转变，有效性减低幅度在5-40%水平，在湖南和江苏宜兴，有效态Cd的大幅度降低使污染土壤的水稻的籽粒Cd水平控制在0.4mg/kg（WHO推荐食品安全标准）（Bian et al., 2013; Cui et al., 2016）。结合低Cd品种，水稻籽粒Cd吸收减少了70-80%，同时还增加了籽粒产量5%左右（Chen et al., 2016）。这种效应一方面是生物质炭对有效态Cd的吸附、捕获和固定，并可能封闭于纳米孔隙的土壤中而减少植物接触吸收的机会（Bian et al., 2014）。另外，发现低镉品种水稻在生物质炭施用下大大降低了由根系到地上部的Cd吸收转运（Chen et al., 2016），这提示生物质炭对重金属植物吸收具有化学钝化阻隔和生物阻隔双重作用（这可能提示由于生物质炭下根膜发育而成为通过通过根系的壁垒）。我们将生物质炭Cd钝化阻隔技术与常规钝化剂在宜兴污染稻田进行对比试验，当年水稻收成与籽粒Cd含量以生物质炭处理最优，生物质炭钝化作用至少可以3年有效（Bian et al., 2014），特别是作为环境修复材料使用时，既可保持农田修复中进行农业生产，又可以提升土壤肥力，提供一种边生产边治理，边修复污染边提升地力的可持续治理型途径（潘根兴，2015，重金属污染修复高峰论坛；潘根兴，2017，环境修复材料交流会）。

表8 某污染田不同技术处理的产量、籽粒Cd

处理技术	水稻产量 (t/公顷)	籽粒 Cd(mg/kg)
对照（不用改良剂）	7.18±0.56	0.72±0.30
石灰（1.5吨/公顷）	7.11±0.60	0.43±0.10
钢渣硅肥（1.5吨/公顷）	7.17±0.67	0.51±0.02
生物质炭（20吨/公顷）	7.29±0.20	0.39±0.02

与N₂O温室气体排放显著降低一样，生物质炭可以大幅度降低土壤硝化作用与硝酸根和亚硝酸根的积累，消除或降低N素的环境风险和亚硝酸盐的健康风险。在旱地试验中，普遍观察到土壤硝酸盐含量显著降低（Larshari et al., 2015）。我们采用小白菜作为对比植物，施用生物质炭2%，与不施生物质炭对比，叶面

积由 712cm² 提高到 1093 cm²，同时叶片硝酸盐含量由 480mg/kg 降低到 158 mg/kg，降硝能力达到 200%！与之伴随的是土壤中硝酸盐和铵盐浓度的降低，铵硝比由 0.16 下降到 0.13。这种减氮抑硝效应，在多次的蔬菜试验中均十分显著。因此，生物质炭可作为食用蔬菜降硝的一个根本途径（张登晓等，2014），同时也有助于降低肥料的硝酸盐环境流失风险。

研究了生物质对于根茎类中药材重金属吸收积累和农药残留积累的影响。根茎类药材对重金属吸收富集明显，以三七为例，比较分析了有机肥、钙镁磷肥和生物质炭对一年三七主根 Cd 的吸收。结果表明，在 Cd 含量 7.99mg/kg 的土壤中，猪粪有机肥部改变产量和土壤有效态 Cd，较小幅度降低了主根 Cd 吸收；而生物质炭施用，不但显著增加了主根生物量(>40%)，土壤有效态 Cd 降低了 50% 多，而 Cd 吸收积累减少了 20% 多（表 9）。在相似土壤上，进一步进行了生物质炭对农药残留的吸收积累研究。分别在三七苗移栽的一年内采样分析停药期和施药期三七主根的腐霉利农药残留。结果表明，三七主根由对照的 4.06g/根，到猪粪厩肥下的 4.35g/根，到生物质炭下 5.24g/根，增产达 30%；而正常农药喷施下，腐霉利土壤残留喷药器高于停药期，但生物质处理下腐霉利土壤残留是猪粪和对照的 5 倍左右，但是三七主根中的残留仅为对照的 2/3 和猪粪的一半，总残留不到 20mg/kg（表 9）。由此看来，生物质炭作为有机质补充土壤，钝化了重金属，捕获了农药残留，而减少了主根对农药残留的吸收（图 11）。这里也提示，生物质炭对污染物在土壤中的捕获和阻隔作用而减少了作物的接触吸收。

类似的效应也存在于作物对有机污物的吸收。最近对生物质炭施用下土壤有机污染物作物吸收的试验研究表明（彭碧莲等，2017），施用生物质炭降低了小白菜对 PAHs 的吸收，幅度介于 14–49%，且麦秸炭>猪粪炭>污泥炭。且对高环 PAHs 的吸收抑制作用强于低环 PAHs。以小麦秸秆炭为例，小白菜对 4~6 环的高分子量 PAHs 的吸收抑制率高达 68%，同时小白菜增产达 22%。因此，施用生物质炭可作为一种降低污染土壤中作物吸收 PAHs，同时又保障作物产量的有效技术途径。

结合上面的讨论，对于块茎类中药材和茎叶类蔬菜等经济作物来说，生物质炭在促生增产的同时，可以大幅度减少农药残留等有机污染物作物吸收和农产品中的积累，而达到大幅度消减农产品食品安全风险。因此，生物质炭在农产品绿

色安全生产中具有十分重要的应用前景。遗憾的是，我们还没有详实的资料能说明生物质炭在抗生素等新型潜在毒性污染物吸收积累上的影响。

表 9 云南某三七基地污染地不同有机处理下三七主根生物量及 Cd 残留的变化

处理	主根重量 (g)	主根 Cd (mg/kg)	土壤有效 Cd(mg/kg)
对照	7.29±1.88b	4.15±0.64a	1.14±0.18a
猪粪有机肥	6.49±0.52b	3.36±0.40b	0.92±0.13a
生物质炭	10.85±0.87a	3.12±0.24c	0.55±0.32b

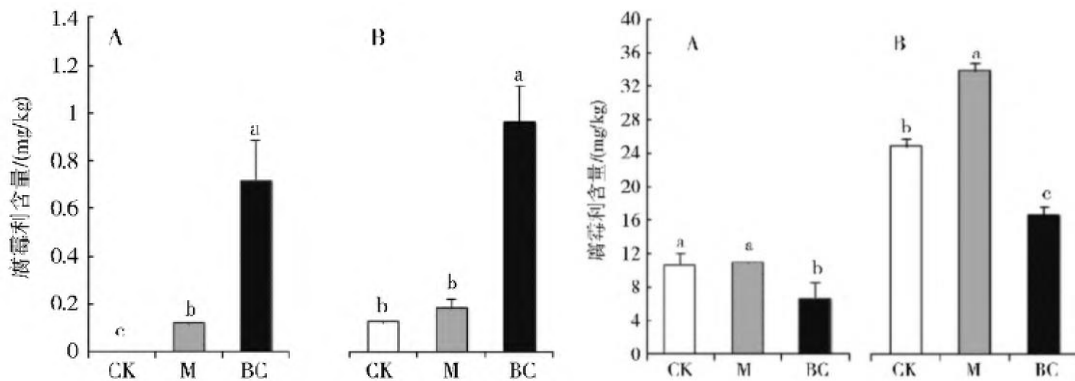


图 11 云南某三七基地生物质炭与厩肥施用下土壤（左）和三七主根（右）腐霉利残留

3. 深入试验研究生物质炭用于肥料的农业生产效应，明确炭基肥的减氮增效减排增收作用，创新开发生物质炭新型有机无机复合（混）肥，试验示范证实了良好的农业效应

(1) 在证实生物质炭普遍提高氮素利用率而增产减氮减排效应基础上，提出生物质炭配合施肥途径

前期的文献研究提示，生物质炭施用下作物平均增产幅度达 10% (Liu et al., 2014)，带来氮肥利用率的提高。对团队已进行了多种、多地和多年的水稻、小麦、玉米、蔬菜的盆栽和田间试验资料进行了深度挖掘，揭示生物质炭施用农田中农作物不同程度增产的同时，氮素农学利用率普遍提高（表 10）。因此，生物质炭可用来提高化肥利用率，减少化肥施用量。

表 10 试验中不同作物生物质炭施用下化肥氮素利用率的变化

作物	增产幅度	AE _N 提高幅度	Reference
水稻	~12%	~43%	Huang et al 2013

小麦	~18%	~28%	周家顺等；韩继明等
玉米	5-15%	5-58%	张阿凤等，李晓等
蔬菜	22->100%	25-65%	陈琳等；吉春颖等；张登晓等，
块根块茎类	15-50%	/	陈建清等；潘志平等；

根据《科技导报》（2015）论文资料更新。

通过对一个褐土玉米地的 2 年（2012 年比 2011 年夏季降雨明显增多）试验，比较了生物质炭配合不同肥料施用结构的增产效应和氮素利用率变化。表明不施炭土壤中，配方施肥 2011 年增产不显著，2012 年增产 8.2%；而施炭土壤中，配方施肥与常规施肥比较，2011 年增产达到 10.1%，而受夏季滞水影响的 2012 年，增产达到增产高达 30.5%（表 11）。配方施肥与常规施肥相比，不施炭下氮素偏生产力提高了 30.6%（2011）和 43.2%（2012），但施炭土壤中，提高了 52.6%（2011）和 79.4%（2012）。也就是说，施用生物质（20 吨/公顷）大大提高了配方施肥的增产效应和氮素农学利用率，2011 年净提高 22%，而逆境条件的 2012 年净提高 36%！同时，试验还揭示，配方施肥 N_2O 排放系数低于常规施肥，且低于国际默认排放系数（1%），但配方施肥的氮肥 N_2O 排放系数在生物质炭配合下仍显著降低（2011 年和 2012 年分别降低 0.57 和 0.34 g N_2O -N/kg N），生物质炭结合施肥的温室气体减排潜力巨大。该研究提供了生物质炭与配方施肥相结合实现增产减氮抗逆的坚实依据，奠定了创新生物质炭基配方肥料的理论基础。

表 11 山西忻州褐土玉米生物质炭与肥料配合施用的 2 年的玉米产量、氮素偏生产力和排放系数的变化

指标	年份	不施炭		施炭	
		常规	配方施肥	常规	配方施肥
玉米产量 (t/ha)	2011	8.71±0.55a	9.06±0.58a	9.61±0.56b	10.58±0.53a
	2012	8.50±0.82b	9.23±1.75a	8.49±1.71b	11.06±1.26a
氮素偏生产力 (kg 籽粒 kg ⁻¹ N)	2011	17.38±1.10b	24.99±1.61a	19.17±1.12b	29.19±1.47a
	2012	16.95±1.63b	25.47±4.84a	16.95±3.40b	30.50±3.47a
氮肥排放系数 (g N_2O -N/kg N)	2011	4.77±0.93a	2.82±0.32b	3.13±0.74a	2.56±0.10b
	2012	6.01±0.54a	3.97±0.46b	4.17±0.59a	3.83±1.02a

小写字母表示常规施肥与配方施肥的差异。

(2) 测试了表土秸秆生物质炭配合肥料的农田效应，明确了秸秆生物质炭基肥应用的可行性，为创制生物质炭基肥提供了施肥结构及肥料配方依据

根据前述的生物质炭施用农田的减氮效应及生物质炭-配方施肥效应，以配合生物质炭、减少氮肥为主进行生物质炭基肥配方试验。设计了 N-P₂O₅-K₂O 养分含量和相应配比的添加生物质炭混合制肥，进行农田试验。首先，进行了生物质炭原料选择试验，对小麦秸秆、玉米秸秆、花生壳等 3 种原料的生物质炭与化肥混合制作炭基复混肥，与等养分含量 45% 的 BB 肥进行等实物量施肥水稻田间对比试验（表 12）。表明，增产在 7% 以上，化肥氮素农学利用率提高 30% 以上，且有利于提高水稻经济系数和氮素向籽粒的转运富集，效果以小麦秸秆生物质炭复混肥较好（陈琳等，2013）。

进一步对同种工艺不同秸秆炭基肥的稻田生产和温室气体排放进行了田间监测，证明了不同秸秆生物质基肥在配合氮肥(等量追肥)下对中肥力沙质水稻土，起到了比化肥复混肥(BB 肥，N-P₂O₅-K₂O/15-15-15) 含量 45% 养分)的增产和减排效果，与 BBF 相比，产量增加 15-33%，甲烷和 N₂O 排放均显著降低（降低幅度>30%）（Qian et al. 2014），当然，秸秆生物质炭间存在差异，比表面积较大、孔隙率较高和 C/N 比较低的生物质炭的增产减排效果较好。生物质炭秸秆原料是稻田炭基肥效果的一个主要因素。

表 12 秸秆炭基复混肥与 BB 肥的水稻对比试验（安徽池州，2012）

肥料		总施氮量 (kgN/公顷)	水稻产量 (kg/公顷)	籽粒收获 系数	N 偏生产力 (kg 籽粒/kgN)
BB 肥		210	8.2c	0.24b	39.1c
生物质 炭基肥	小麦秸秆	168	11.4a	0.28a	68.0a
	玉米秸秆	168	8.8cb	0.26ab	52.1b
	花生壳	168	10.3b	0.28a	60.5ab

试验明确了炭基肥的缓效性，减少追肥化肥施用。在安徽池州选择中肥力水稻土，进行炭基肥和 BB 肥不同施肥结构的对比试验。在炭基肥养分含量远低于 BB 肥含 N-P₂O₅-K₂O 养分含量 45% (15-15-15) 的情况下，不同量的基肥和尿素追肥水稻试验（表 13）。结果表明，生物质炭等实物量配合尿素基肥施用，不追肥，节省了氮肥 38kg/公顷（还未计磷钾肥），肥料产量与常规的 BB 肥追肥尿

素的模式相同。而等养分施用外加尿素追肥的模式，并没有增加产量。因此，追加施肥成为了奢侈施肥。该试验说明，炭基肥氮素有效利用率高，后期也提供了氮素供应，不同生育期土壤中保持的铵态氮与追肥处理没有显著差异（图 12）。该试验提供了炭基肥高效长效的实证，成为本技术炭基肥施肥模式的理论基础。

表 13 不同炭基肥施肥模式与常规化肥模式对比试验结果（安徽池州，2013）

施肥方案	基肥 (kg/ha)	追肥 (kg/ha)	稻谷产量 (吨/ha)	氮素偏生产力 (kg 籽粒/kgN 肥)
对照（不施肥）	0	0	8.70±0.40b	/
常规	BB 肥 375 + 尿素 150	尿素 150	10.63±0.47a	54.72±2.42b
炭基肥配施方案 1	炭基肥+尿素 150	0	10.26±0.61a	75.18±4.47a
炭基肥配施方案 2	炭基肥+尿素 150	150	10.20±0.19a	48.60±0.67c

进行旱地作物生物质炭基肥大田试验，探索了其增产及减排的效应幅度，展现了生物质炭基肥在旱地作物的应用前景。试制了棉花秸秆(CBF)、玉米秸秆(MSF)、小麦秸秆(WSF)、稻壳(RHF)、花生壳(PHF)和生活废弃物(HWF)等 6 种原料的炭基复合肥，以当地常规化肥(CF)施用为对照，研究不同生物质炭复合肥对小麦产量及麦田温室气体排放的影响。

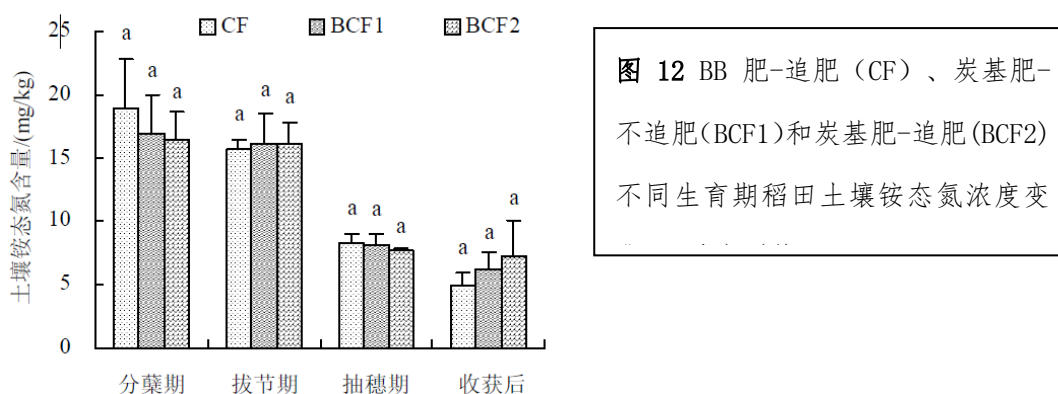


图 12 BB 肥-追肥 (CF)、炭基肥-不追肥(BCF1)和炭基肥-追肥(BCF2)不同生育期稻田土壤铵态氮浓度变化

该试验中，常规氮肥（含氮 17%）的基肥施用量 356 kg hm^{-2} ，炭基复合肥基肥施用量 300 kg hm^{-2} ，后期均追施等量的复合肥及尿素。结果表明：施用 6 种生物质炭复合肥均显著提高了小麦的产量，增产幅度达 20% ~ 35.4%，氮肥偏生产力也显著提高 17.9% ~ 34.4%，其中花生壳、棉花秸秆和玉米秸秆炭基复合肥处理下的小麦产量和氮肥偏生产力显著高于生活废弃物和小麦秸秆炭基复合肥。同时，生物质炭复合肥均显著降低了麦田 N_2O 的排放，减排幅度达到 56.0% ~ 65.4%。施用生物质炭复合肥，麦田温室气体排放强度 (GHGI) 降低 68.0% 以上

(表 14)。由此可见，生物质炭复合肥的旱地增产减氮减排上潜力显著。

表 14 生物质炭旱地小麦试验（江苏常熟，2013）

基肥	总施氮量 (kgN hm ²)	小麦产量 (t/ha)	氮素偏生产力 (kg 籽粒/kgN)	N ₂ O 排放 (kgN ₂ O hm ⁻²)
化肥	182.71	2.57 ± 0.13d	13.82 ± 0.69d	7.98 ± 0.57a
棉花秸秆	173.63	3.45 ± 0.25a	18.44 ± 1.34a	3.51 ± 0.51b
玉米秸秆	173.63	3.45 ± 0.10a	18.44 ± 0.53a	2.91 ± 0.49b
小麦秸秆	173.63	3.05 ± 0.05c	16.30 ± 0.27c	3.21 ± 0.16b
稻壳	173.63	3.40 ± 0.35ab	18.17 ± 1.87ab	3.30 ± 1.19b
花生壳	173.63	3.48 ± 0.08a	18.57 ± 0.40a	2.76 ± 0.34b

同时，在我国北方典型农区（河南新乡）进行旱地玉米生物质炭基肥试验，明确了旱地玉米生物质炭基复肥减肥减排增产增收双赢效果。选择河南新乡某地的农户玉米地（石灰性潮土，pH 8.05，有机质含量 1.46%），进行了与化肥复合肥的对比试验示范，供试玉米品种为当地常规品种新引 3564，设计了总施肥量 225 kgN/ha 全量化肥尿素，不同配方的炭基（小麦秸秆生物质炭）复合肥和尿素配比对照，各处理磷钾肥与当地常规相同。结果表明(表 15)，减氮 20%的化肥与炭基肥复合施肥，产量与全量化肥复合肥相同，而同样施入全量氮素，无论是化肥与炭基复合肥复合施肥，还是全量生物质炭基复合肥施肥，产量比全量复合肥增产 5.2%-10.3%。同时，生物质炭基肥处理的氮素农学效率显著提高，每公斤氮素增加产量在 1.4-5.0 公斤。同时，测定了温室气体排放，计算了单位产量的排放强度和经济投入产出比，与全量化肥对照，全量生物质炭复合肥增产每亩 77 公斤，减少排放 17 公斤 CO₂ 当量，每吨玉米产量减少投入 21 元，每元肥料投入成本增加收益 0.7 元，提升经济效益 40%。

表 15 不同施肥下土壤有机质、产量与氮素效率

氮肥分配	施氮量 (kg/ha)	土壤有机碳 (%)	产量 (t/ha)	氮素效率 (kg 籽粒/kgN)	经济收益 (千元/ha)
无肥	0	8.49±0.19c	8.58±0.21c	-	-
CF100	225	8.56±0.13c	11.24±0.11b	11.80±0.50c	16.4±0.20bc
BCF-CF1	180	8.75±0.09bc	11.11±0.17b	12.43±0.82bc	16.1±0.39
BCF-CF2	225	8.82±0.13b	11.83±0.40a	14.26±1.76b	17.1±0.69b
BCF100	225	9.14±0.14a	12.40±0.32a	16.88±1.43a	18.3±0.56a

这个试验一方面证实了旱地炭基肥替代化肥体现了增产增效减排减肥的良好效果，同时还证明了旱地作物生产中，生物质炭基肥可以全替代化肥（全部养分以炭基肥形态施入，后期不追肥或少追肥），这进一步坐实了炭基肥的长效和缓效作用，如果避免追肥，则减肥和节支效益将更加显著。这些研究认识到通过大规模炭基肥替代化肥，可以大幅度降低我国农业化肥温室气体排放量，产生的碳减排规模效益具有应用于碳交易而获得附加经济效益的潜力。

(3) 试验了炭基肥对于多种蔬菜的增产和品质效应，明确炭基肥用于替代蔬菜生产的化肥的巨大潜力

2013 年，首次在安徽池州某农业园区进行了不同秸秆炭基肥与化肥的小白菜对比试验。试验采用生物质炭与化肥混合制成的生物质炭基肥料进行全基肥田间试验，比较炭基肥料对蔬菜硝酸盐积累的影响以及不同原料生物质炭基的肥效差异。选择小麦秸秆、花生壳、棉花秸秆等 3 种原料中温慢速热解生产的生物质炭，与化学养分制备为养分含量为 37%的炭基复混肥，与总养分 45%的普通复合肥（BB 肥，N-P₂O₅-K₂O 养分配比为 15-15-15，%）对照，常规栽培小白菜，成熟收割分析。结果表明，在总养分含量比普通复合肥减少 18%的条件下，花生壳炭基肥和棉花秸秆炭基肥增产效果不明显，而小麦秸秆炭基肥小白菜增产高达 45%，单株重提高 36%，同时小白菜硝酸盐含量显著降低了 35%，可溶性糖和维生素 C 含量提高了 30%以上（图 13）（付嘉英等，2013）。同地的辣椒试验表明，小麦秸秆炭基肥青椒产量提高 13.3%，且单果鲜重显著提高 33.7%，维生素含量提高 50%，辣椒增产结果相似，但花生壳炭基肥和棉花秸秆炭基肥尽管增产不显著，仍能大幅度（>60%）提高辣椒的 Vc 和可溶性蛋白质和酒石酸等品质指标（乔志刚 等，2014）。

表 16 等实物量(750kg/ha)小麦秸秆炭基肥(WBCF)、花生壳炭基肥(PBCF)、稻壳炭基肥(RBCF)和 BB 肥(CF)一次性基肥施用与对照(不施肥)青椒品质变化

处理	维生素 C (mg·kg ⁻¹)	可溶性糖 (g·kg ⁻¹)	可溶性蛋白 (g·kg ⁻¹)	苹果酸 (g kg ⁻¹)	酒石酸 (g kg ⁻¹)
WBCF	547.77±113.08ab	33.38±6.08a	1.14±0.18b	1.10±0.12a	1.24±0.14a
RBCF	588.06±154.82a	30.92±6.49a	1.68±0.35a	1.10±0.03a	1.23±0.03a
PBCF	613.60±50.04a	32.16±5.77a	1.68±0.29a	1.24±0.19a	1.39±0.21a
CF	362.01±133.78b	37.11±3.82a	1.02±0.21b	1.13±0.03a	1.26±0.04a
CK	350.67±122.08b	31.76±2.21a	1.28±0.10ab	1.22±0.10a	1.38±0.11a

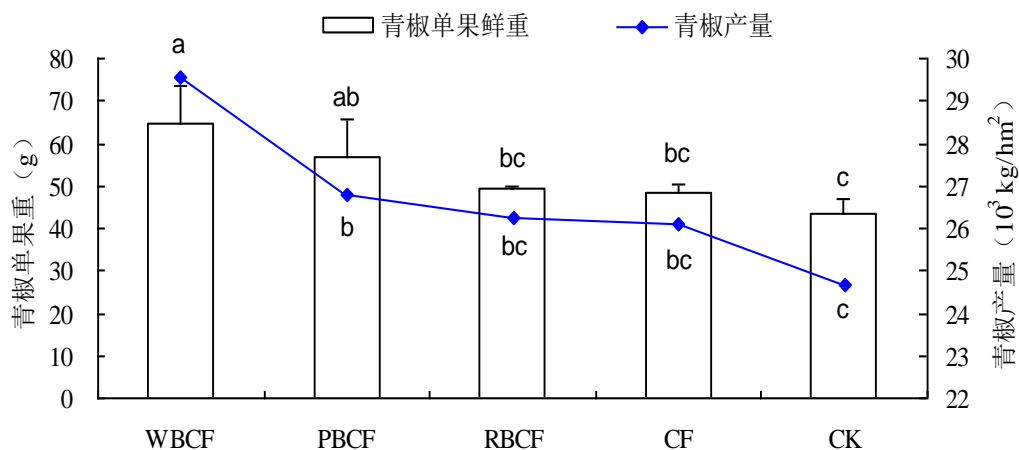


图 13 等实物量(750kg/ha)小麦秸秆炭基肥(WBCF)、花生壳炭基肥(PBCF)、稻壳炭基肥(RBCF)和 BB 肥(CF)一次性基肥施用与对照(不施肥)青椒单果重和产量的变化

因此，不同秸秆炭基肥蔬菜肥效迥异，且对产量和品质的影响可能受不同因素制约。花生壳和棉秆炭基肥有机质和磷钾含量较低，灰分较高，全替代化肥的蔬菜增产不显著，但可以利用来大幅改善蔬菜品质，这提供了下一步配方生物质炭基肥的依据。而小麦秸秆炭基肥既能增产又能优质，有望成为增产降硝提质的蔬菜替代性炭基肥。

进一步进行了化肥半替代比较试验。在南京江宁蔬菜产区选择辣椒和番茄菜地进行田间试验，施肥量为实物量 889 kg/ha，处理包括不施肥对照，复合肥全量以及复合肥(CF) 50%替代为猪粪有机肥(M)、竹炭有机肥(BF)和小麦秸秆炭基肥(SF)。与化学复合肥全量对比，炭基肥 50% 替代，炭基肥番茄和辣椒分别增产 8.5%和 26.3%，而番茄和辣椒果实维生素分别提高 66%和 19%，降低番茄和辣椒果实硝酸盐含量分别达 22%和 29% (表 17)。这里，猪粪有机肥和竹炭有机肥 50%替代也不同程度增产和提高了果实的品质，尽管幅度小于炭基肥替代(李大伟等，2016)。因此，蔬菜生产中，炭基肥至少可以替代 50%化肥，而蔬菜炭基肥还可以适当增加有机质但减少钾素和氮素。对于蔬菜来说，炭基肥替代不但增产，而且有利于改善蔬菜品质，这将是蔬菜生产中肥料施用的新方向。

表 17 番茄和辣椒化肥 50%替代有机肥及炭基肥的产量和品质变化 (2014, 南京江宁)

施肥模式	产量		维生素 C		果实 NO ₃ ⁻¹	
	番茄	辣椒	番茄	辣椒	番茄	辣椒
NF	56.3±1.0d	7.91±0.34c	24.4±2.2	223.2±9.8c	85.2±8.8c	92.1±5.2bc
CF	62.6±1.1c	9.75±0.53b	53.0±10.4b	278.2±6.5a	116.3±12.1a	142.5±18.3a
CF/M	76.7±0.7a	9.97±0.28b	56.7±8.4b	265.8±8.6ab	102.5±12.4ab	96.6±9.3b
CF/BF	67.9±1.3b	9.99±0.31b	69.0±12.1b	313.4±26.9a	98.7±6.7b	82.1±9.6c
CF/SF	77.1±1.2a	12.31±0.82a	87.9±11.8a	331.9±31.9a	91.4±6.3bc	80.6±10.2c

4. 研究开发了秸秆生物质炭基复合肥，试验明确不同作物的肥效表现，提出工艺和配方方案，成功实现工业化生产炭基肥。

(1) 对文献报道的炭基肥实验结果统计，阐明炭基肥不同作物的增产效应

截至 2016 年 1 月 1 日，文献报道炭基肥专利多达 50 多个，报道的冠名炭基肥的市售商品 38 个，炭基肥试验研究报道 27 个。搜到的 4 个炭基肥发明专利，都是采用实验制备秸秆生物质炭，并破碎为 0.5-1.5mm 颗粒，添加比例介于 28.5-35.5%，总养分和有机质属于高（养分）含量复合肥类型。但没有报道肥料的物理性质和有机质组成，也没有说明肥料的颗粒、孔度和稳定性。

市售冠名“炭基肥”的相关产品，有机质含量大多介于 25%-45%，而售价由 650 元/吨到 19600 元/吨不等，养分含量与有机质含量存在较大差异，生物质炭的来源和性质不清楚。如果把应用生物质炭的所有商品（基质、育苗土和营养土）统计在内，售价大多在每吨 3000 元以上，有的高达 10000 元/吨。

对包括所有的盆栽与田间试验及示范的报道结果的统计（图 14），可见炭基肥相对于化肥复合肥具有增产作用，不同作物的平均增产幅度顺序为：水果~蔬菜>粮食作物。

可以看出，炭基肥都含有较高含量的有机质，但养分含量差异较大，使得炭基肥农业效应评价存在不确定性。但是，炭基肥总体增产效应明显，特别是蔬菜施用的增产幅度>10%，且变异较小(变异系数 87%)，相比之下，水稻、玉米增产式微，且变异性巨大。看来，炭基肥在园艺生产上的应用潜力显著很显著。另外，市场上生物质炭产品五花八门，良莠不齐，标准缺失，炭基肥称号尚没有明确界定，不利于生物质炭化与炭基肥的商品化推广。因此，工业化、标准化是炭

基肥产业的必然趋势。

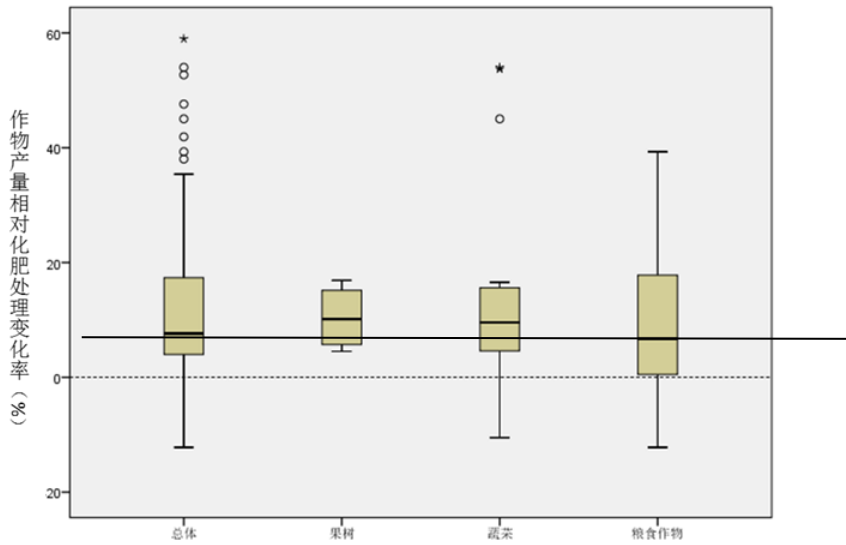


图 14 文献报道的炭基肥相对于化肥复合肥的增产效应（许筱韵等，2016）

(2) 生物质炭基结构的配方复合肥试制和肥效试验

基于前述的生物质炭土壤改良效应和活性有机质促生健康效应，利用纳米孔隙的结构性养分保持和可溶性有机质的快速促根促生优势，联系到观潮到的小麦（玉米）生物质炭的炭基肥肥效试验的良好表现，我们以小麦秸秆中温慢速热解生物质炭为基材，添加活性有机质（炭化产物-木醋液），与尿素、磷酸钙（铵）和氯化钾养分肥料原材按照养分配比复配，通过蒸汽条件下炭材料与养分及矿物质复合，转轂造粒试制炭基肥。测试表明，所制备的炭基肥为稳定的颗粒状复合肥，显微结构为微团聚体状，氮素和磷素养分发生与炭质的化学键结合，形成有机态养分，延缓更新和释放，成为潜在缓释的炭基肥（图 15）。所含的孔隙具有吸水保墒涵养水分和生物学的潜在功效。

经过核磁共振波谱仪和显微电子镜检，显示在炭基肥中尿素的酰胺键和磷铵的氮磷键与炭基团的结合而改变化学位移（图 16）（红色是尿素基团改变，蓝色是磷铵基团改变）。红外光谱也显示，复合的尿素具有近似聚丙烯酰胺的结构（图 17），说明简单的酰胺态经蒸汽反应后转变为更复杂的酰胺态，而延长了微生物降解的氮素分解和释放。这种炭基肥还保持了生物质炭的结构有机质，保持了原有的多种矿物质养分（图 18），加上所含的孔隙具有吸水保墒涵养水分和生物学的潜在功效，是一种有机无机复合、结构和活性有机质兼备、养分多元而有利于保持养分、水分和生物活性的新型复合肥料，开创了肥料新品种，形成了化肥提升

改造的新方向 (Joseph et al., 2013)。

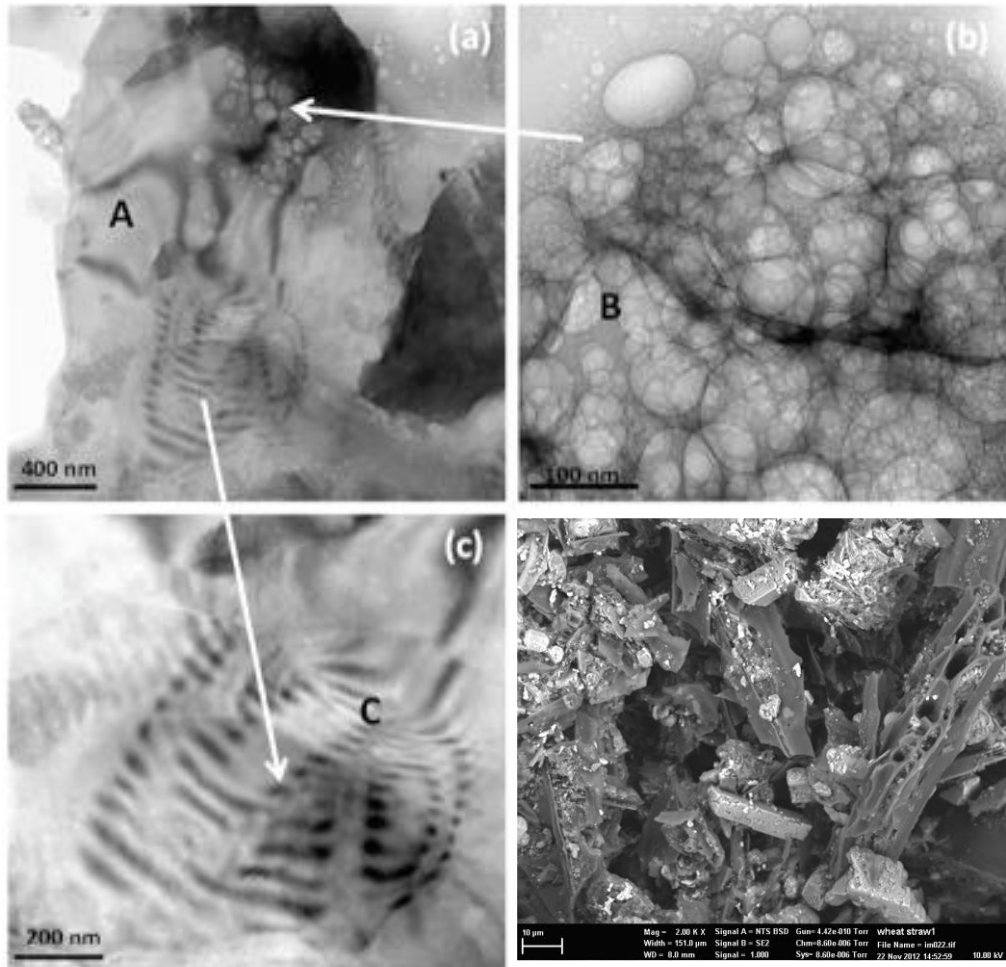


图 15 蒸汽造粒制备的小麦秸秆炭基复合肥 (a, 示明纳米-微米尺度的孔隙及周边的养分与炭基架; b, 复合融聚的养分颗粒; c, 碳架的纳米微孔隙; d, 炭基肥中观构造, 酥松多孔)

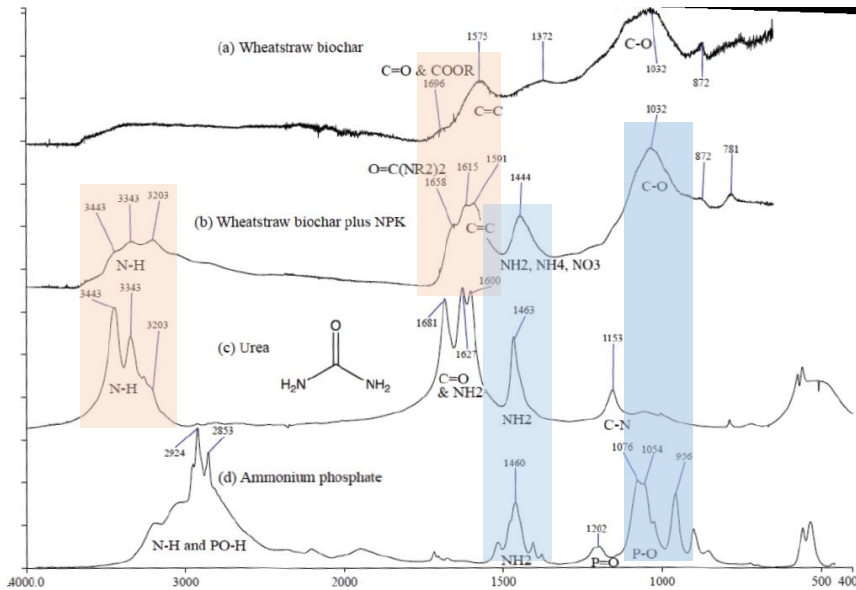


图 16 制备的小麦秸秆炭基肥 (b) 与小麦生物质炭 (a)、尿素 (c) 和磷铵 (d) 的核磁共振谱对比。显示在炭基肥中尿素的酰胺键和磷铵的氮磷键与炭基团的结合而改变化学位移 (黄色是尿素基团改变, 蓝色是磷铵基团改变)。

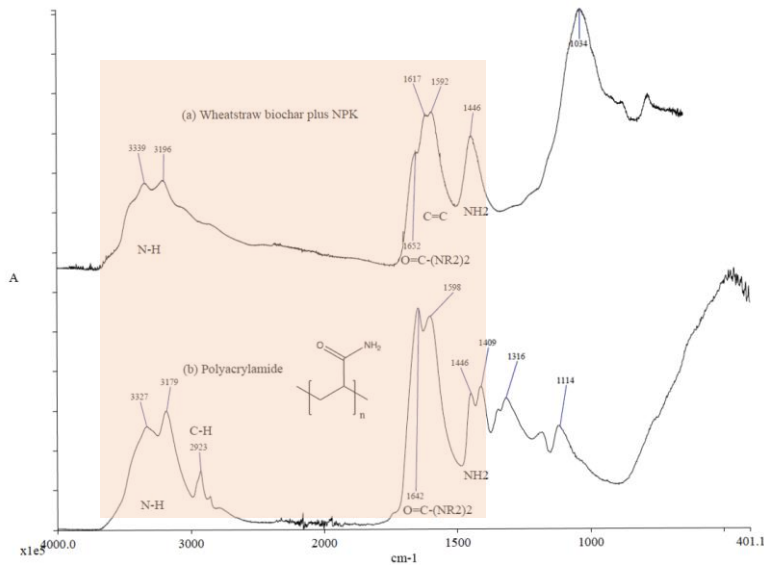


图 17 小麦秸秆炭基肥的傅里叶转换红外图谱 (a, 小麦秸秆生生物质炭基肥; b, 聚丙烯酰胺)

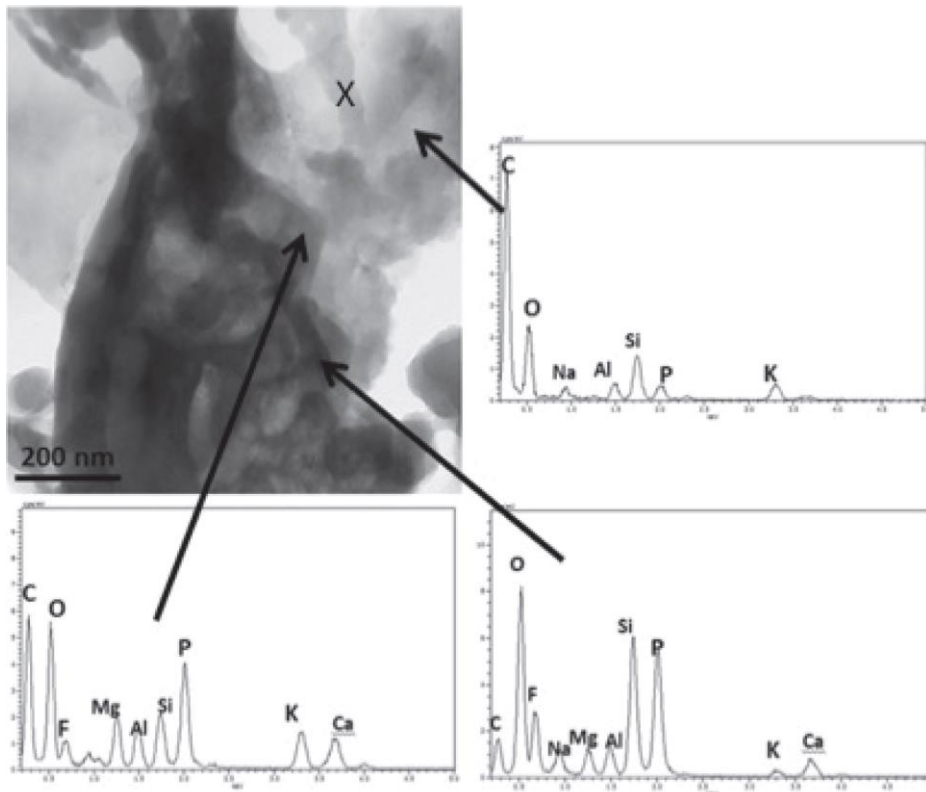


图 18 小麦秸秆炭基肥透射电镜能谱分析。示明微米颗粒炭基肥内部养分的多种元素的存在，其中峰的高度表示养分的相对丰度。显示 C,P,K 作为主要元素（该镜检条件下氮素峰不出现），Si, Ca 和 Mg 次要元素。

2015 年 4 月在公司所在地六合区进入试验示范，试验评价秸秆生物质炭基肥在土壤培肥、土壤质量提升和作物增产方面的应用前景，同时评估“秸秆-生物质炭-生物质炭基肥”这一秸秆资源利用模式的可行性。本示范试验包括三个处理（表 18）：1) 对照（CK），只施用化学肥料，肥料种类和用量与当地农户用

量相同；2) 生物质炭与化学肥料配合施用 (BC)，其中生物质炭作为基肥，在水稻插秧前 10 天一次性施用，施用量为每亩 1 吨，化学肥料施用量和种类与对照相同；3) 生物质炭基肥 (BCF)，炭基肥作为基肥一次性施用。生物质炭为小麦秸秆热裂解生物质炭，含水量为 30%。在水稻插秧前 10 天，撒施于农田表面，耙平均匀后再用旋耕机耕入至 15cm 深度。炭基肥与复合肥施用方法相同。

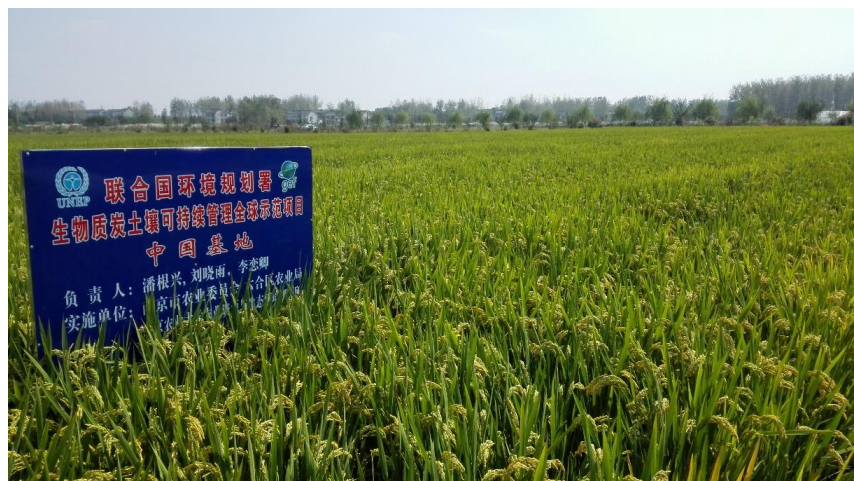


图 19 六合冶山镇石柱林村秸秆炭化还田-炭基肥示范田实况

该试验示范纳入六合区农业局承担的“秋熟作物高产增效创建万亩示范片”创建计划，试验示范田在位于该区冶山镇石柱林村的核心区进行（图 19），各示范技术农田面积总 50 亩。选取各 1 块大田（在 15 亩以上）进行跟踪监测，水稻品种为武运粳 3 号，于 2015 年 4 月 20 日机插秧，11 月 8 日成熟，实际收获为 11 月 21 日。植保和灌溉等生产管理各田块一致，当地农技服务部门全程跟踪。

表 18 不同示范处理的施肥量及肥料投入情况对比

示范处理	施肥量 (kg/亩)	施氮量(kg/亩)	总氮磷钾 (kg/亩)	产量(kg/亩)
常规复合肥	35kg 复合肥+50kg 尿素	32.9	53.9	701.7
炭基复合肥	40kg+5kg 尿素	22.1	40.4	720.0
	氮肥产量 (kg 谷/kgN)	总养分产量 (kg 谷/kg 养分)	稻谷收益 (元/亩)	肥料成本 (元/亩)
常规复合肥	25.0	14.7	2105.1	149.5
炭基复合肥	33.0	19.4	2160.0	79.5

注：所用复合肥总养分 (N-P-K) 量为 25%；生物质炭有机质 65%，含 N 0.8%，含 K 1.2% 及 P 0.6%；炭基肥。生物质炭为小麦秸秆中温碳化所制得，炭基肥为小麦秸秆生物质炭与化肥混合复合制得，均在南京勤丰秸秆科技有限公司制备生产。

这个示范中，总施肥量化肥区最高，炭基复合肥最低，但收获的水稻产量是

生物质炭基肥改良加复合肥最高，增产 9%。炭基复合肥施氮量减少 20%，总施肥量减少 28%，但与全量化肥平产。炭基复合肥只施了 40kg/亩，外加尿素追肥 5kg，每公斤肥料出产 19.5kg 稻谷。据测算，施用本技术的炭基肥是化肥复合肥效益的 2 倍，这显示十分显著的减肥节支增效效果！

(3) 生物质炭基肥区域性示范与大规模应用前景

2016 年，分别在东北、内蒙、华北和华东等区进行了第一代炭基肥的玉米和水稻生产试验示范（图 20）。按施肥量与当地常规化肥施用量相等，进行炭基肥基肥施用试验示范，作物生育期全程观察作物长势，收获期进行实产专收专测。炭基肥养分（N-P₂O₅-K₂O）总含量 40%，对照的化学复合肥为 45%（N-P₂O₅-K₂O 为 15-15-15），特殊地点可能有差异。试验所在地区的土壤为当地典型耕作土壤，作物品种为当地主栽品种，田间管理均与当地常规一致。试验地土壤肥力各地间差异较大，土壤从酸性到石灰性或微碱性，有机质含量从 1.5% 到 5.1%，速效养分含量差异幅度较大。



图 20 2016 年炭基肥区域示范试验地区分布

各示范点当地农户常规施肥的水稻产量介于 462.8 kg/亩~663.1kg/亩间。施用炭基肥的水稻产量介于 488.9 kg/亩~725.51 kg/亩间。水稻增产在 26-89kg/亩间，6 个示范点的平均增产幅度为 9.32%，炭基肥增产效应十分突出。3 个玉米示范点均位于东北区，玉米产量介于 620-760kg/亩间，其中 2 个地点炭基肥处理每亩增产在 15-38kg 间。水稻增产效应南方高于北方，有机质含量低的土壤高于有机质较高的土壤。但在基础养分较高的双鸭山，水稻和玉米均获得高幅度增产，提

示生物质炭作为缓效肥仍能充分发挥土壤的基础肥力，可能有助于高产再高产。

炭基肥主要是通过影响作物的穗重和千粒重等因素来影响作物产量的。从水稻来看，施用炭基肥水稻千粒重比常规化肥提高 4.79%~14.6%，穗重比常规化肥提高 15.6-29.2%。从田间观察的结果来看，炭基肥料表现出显著的促进水稻根系生长的作用，炭基肥水稻根重比化肥提高约 19.2%-67%（图 21）。

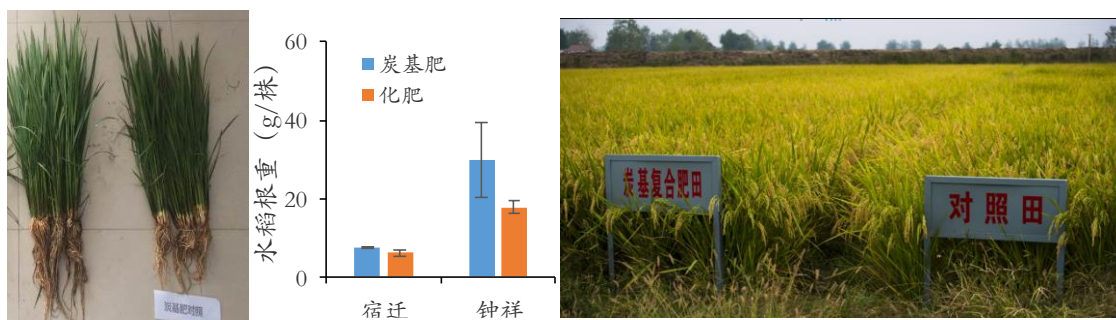


图 21 炭基肥与对照的水稻根形态对比（左）和根生物量对比（中）及收获前长势（右）

从生物质炭对玉米产量构成因素的影响来看，生物质炭基肥料主要通过提高穗长、粒重等途径来提高玉米的产量。与化肥相比，生物质炭基肥料显著提高穗长 3.3%-13.8%，平均提高 7%；穗重提高 5.6%-14.3%（平均 9.2%）。玉米籽粒千粒重提高了 5.5%-17.6%（平均 10.1%）。同时，黑龙江绥化安达试验玉米的秃尖率相对较高，而施用炭基肥料可显著降低秃尖率（图 22），而有利于增产。



图 22 施加生物质炭基肥与化肥对比玉米田间长势与玉米穗形态对比

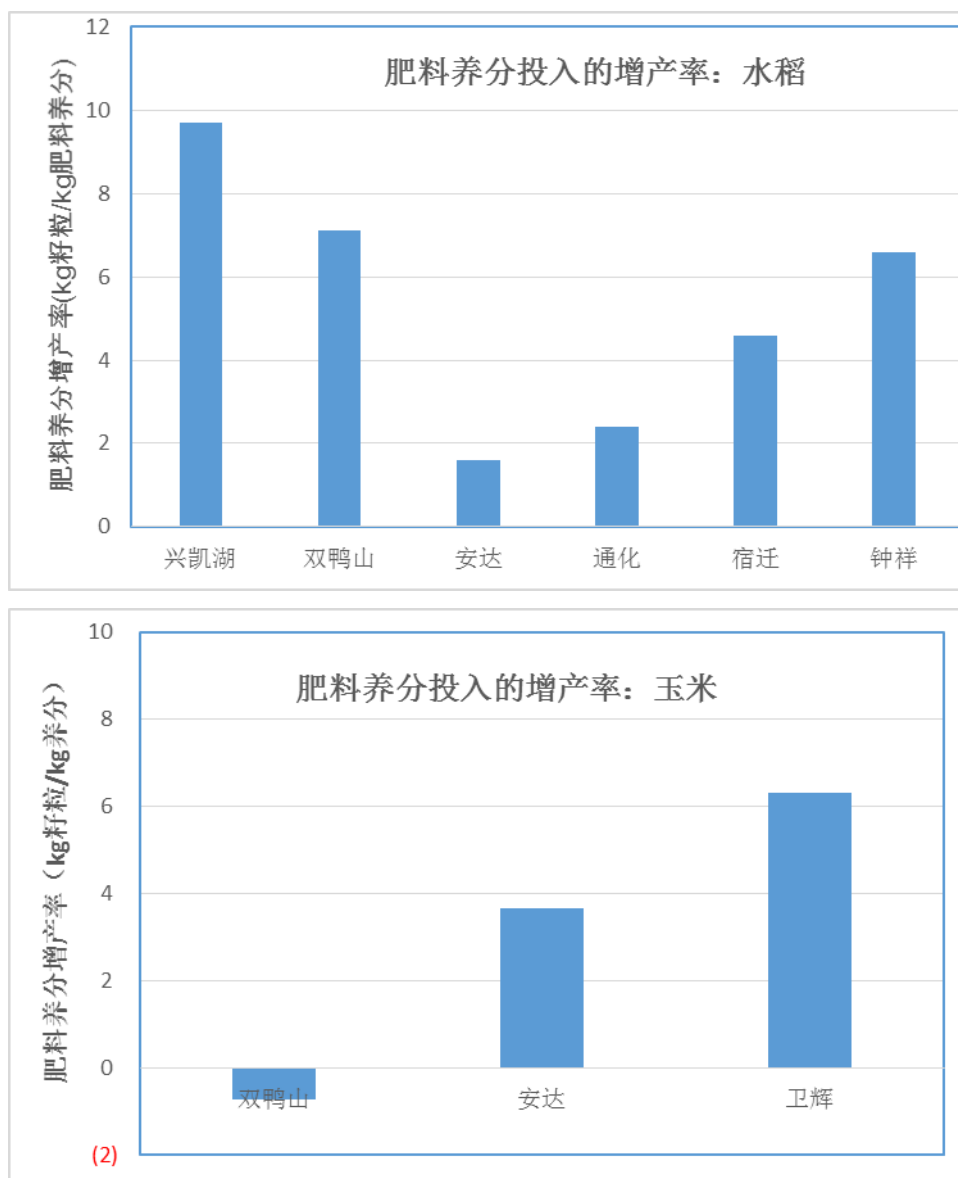


图 23 炭基肥处理下肥料投入养分的籽粒增产率（上，水稻；下，玉米）

炭基肥增产增效显著。图 23 是水稻和玉米的肥料养分投入的产量效益。对于水稻来说，炭基肥每公斤养分比化学复合肥增产 1.6kg-9.7kg 间，平均每公斤肥料养分投入多产出 5.3kg 稻谷；而用于玉米时，每公斤养分增产在 0-6kg 间，每公斤肥料养分投入平均多生产玉米 3.1kg。

炭基肥施用成本效益提高。2016 年国家粳稻收购价每公斤 3.0 元，玉米收购价 1.4 元每公斤；炭基肥等量施用下每公斤养分投入比化学复合肥水稻多增收 16 元，玉米增收只 5.2 元；6 个地点的水稻增收可达 78-268 元/亩；3 个玉米示范点中，两地点炭基肥增收分别 21 元和 48 元/亩，炭基肥投入的经济效应十分显著。

炭基肥减肥减排效果显著。水稻应用本技术炭基肥，平均每亩减少化肥养分 2.0kg，玉米每亩平均减少 2.5kg，平均分别减少了 8% 和 10%。炭基肥与化学复

合肥相比，每吨水稻产量平均减少化肥养分 6.5 公斤，玉米平均减少 5.4kg。按炭基肥中养分的配比比例，炭基肥化肥养分的平均温室气体碳成本（化肥生产过程能耗等产生的温室气体排放量）为 2.73kg CO₂ 当量。如果我国水稻和玉米生产全部实行炭基肥作为基肥，可减少化肥 250 万吨之多，占我国总化肥用量 6000 万吨的 5%。因此，推广炭基肥的农业温室气体减排贡献十分显著（两者减排之和占全国农业源温室气体的 1-2%），产生潜在的自主减排交易额（假设每吨 CO₂ 当量 25 元）1.75 亿元（表 19）。因此，在全国推广应用炭基肥替代化肥具有突出优势，市场潜力巨大！

表 19 炭基肥的化肥减量和减排量估计（参照 2015 年农业统计数据）

主要作物	面积 (亿亩)	产量 (亿吨)	减肥量(百万吨)		减排量(百万吨 CO ₂ e)	
			面积计	产量计	面积计	产量计
水稻	4.5	2.1	0.85	1.3	2.3	3.6
玉米	5.5	2.2	1.3	1.2	3.7	3.2

2016 年的试验示范对于农业新肥料开发及施用提供了有益的启示。对于水稻来说，炭基肥施用增产的主要因素是增多分蘖和增加穗重，可以从促进根系生物学功能角度进行修饰和改良以提升未来肥料效益；其次，土壤肥力不同，炭基肥作物增产效应不同。特别是在磷钾养分限制的土壤中，炭基肥显示改善磷素和钾素有效性，增加作物磷素和钾素吸收的有益作用；炭基肥的多效、缓效和持效是保证增产稳产的内在优势。炭基肥通过化肥养分与有机质、矿物质的复合，提高了保蓄缓效能力，后期养分供应得到改善，这是普通炭混合肥不能达到的效果。

（4）秸秆炭化产物液体有机质的利用与液体有机肥的开发与试制

注意到前期试验研究中，炭化产物木醋液及生物质炭中所含可溶性有机物的有效作用。在前期明确了木醋液的成分含有小分子有机酸和挥发分溶解物，以及酚类物质，具有表面活性和杀菌等作用（闫钰等，2012），制成了木醋液为基础的叶面调理剂产品，获得发明专利技术授权（陈琳等，2013）。进一步研究了采用热水和 KOH 提取生物质炭得到的溶解性有机质，表明其成分含多种功能的有机物质。其中疏水有机质含量较低，而亲水有机质包括类腐殖酸物质、碳架物、中性化合物和小分子有机酸，部分可溶性矿质（表 20 和 21）。可以配制特定养分的液体有机有机肥，来通过叶面调理达到增产优质作用。

表 20 小麦和玉米秸秆生物质炭浸提液的有机质浓度

材料	总 DOC (mg/L)	疏水 DOC (mg/L)	亲水 DOC(mg/L)				
			生物多聚体	类腐殖质	碳架物	中性大分子	小分子有机酸
SW	566	54.3	8.49	376	78.7	43.6	4.0
SM	303	29.4	15.1	183	37.0	20.0	9.1

表 21 生物质炭浸提液的矿质营养

秸秆炭	pH	EC mS/cm	Eh	K (g/L)	P (mg/L)	Fe (mg/L)	Ca (mg/L)	Mn (mg/L)
SW	9.6	5.59	29	1.12	45.2	5.55	276	1.1
SM	9.5	6.62	35	1.27	19.7	4.35	108	0.35

SW, 小麦秸秆生物质炭; SM, 玉米秸秆生物质炭。

首先对这种提取液稀释后作为叶面喷施调理剂, 以小白菜为受体植物, 进行了田间试验。每 15L/亩, 每 3 天喷施一次, 生育期间供喷施 10 次, 研究了不同秸秆炭提取液不同稀释倍数 (25, 50 和 100 倍) 下小白菜产量、品质和养分含量的影响 (Lou et al 2016)。与喷水的对照相比, 两种炭提取液的效应都与稀释倍数有关。稀释倍数 50 倍以下, 都没有表现出有益效应, 这可能与浓度高影响了植物叶片的渗透压有关, 而玉米生物质炭提取液的稀释倍数要高于小麦生物质炭, 看来与电解质浓度 (玉米炭高于小麦炭) 有关。K、Cu、Zn 等矿质养分的叶片浓度随稀释倍数降低, 而叶片品质指标与 N、P, 及 Fe 和 Ca 等养分浓度随稀释倍数递增而增加。各项性质权衡来看, 作物秸秆生物质炭提取液稀释 50 倍效果较好, 但某些电解质浓度较高的提取液以较高倍数取值 (实践上可以采取 80 倍)。

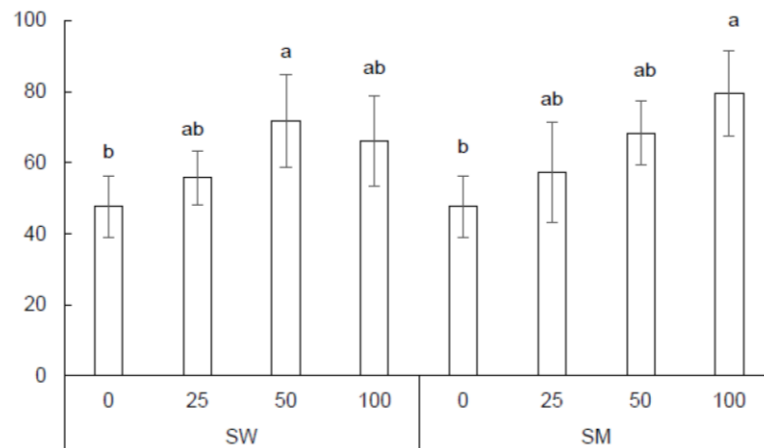


图 24 小麦 (SW) 和玉米 (SM) 秸秆生物质炭热水溶性有机质喷施对小白菜产量 (g/小区)

的影响随稀释倍数的变化。

试验表明，小麦炭喷施 50 倍和玉米喷施 100 倍下，两种炭提取液对小白菜增产分别达 30% 和 58%，对可 K, P 和 Fe 等养分的提高在 10% 以上，硝酸盐含量降低 25% 以上，溶性蛋白质含量提高 50% 以上，而对叶片维生素含量的提高幅度高达 200%（表 22）。因此，生物质炭提取液 80-100 倍稀释下喷施对小白菜的产量及健康品质的提升效应极为显著，可以用于蔬菜高产优质生产建设。并同时可能对于茶叶等其他以茎叶生物质生产为主的农产品具有显著的增产和优质作用，因此在园艺生产上具有极大的推广应用潜力！

表 22 生物质炭提取液喷施下小白菜品质的变化 (Lou et al. 2016)

	叶面积 (cm ²)	Vc (mg/kg)	NO ₃ ⁻¹ (mg/kg)	可溶蛋白 质(g/kg)	K (g/kg)	P (g/kg)	Fe (g/kg)
CK	725.0±115.8	42.2±5.4	119.3±11.3	5.3±0.3	36.9±1.98	5.1±0.14	0.63±0.04
SW	1205±296.6	117.7±3.4	90.8±10.9	7.9±1.4	42.2±2.63	5.7±0.72	0.82±0.15
SM	1127.6±146.5	121.5±4.0	87.5±10.5	8.6±0.1	41.2±1.48	5.3±0.39	0.76±0.18

将小麦慢速热解生物质炭制备 KOH 提取液，稀释 500 倍，中药材茅苍术小苗移栽后灌根，并生育期喷施 6 次，茅苍术根茎产量增加 15%，苍术素含量提高 10%，并且提高了根茎中 Fe, Cu, Zn 等微量元素含量 10% 以上（刘贝等 2016）。对于三七的应用试验也得到了相似的结果。因此，对于根茎类中药材，生物质炭提取液可以与生物质炭配合，作为增产优质的技术推广。

并且，另外的研究提出了生物质炭稀酸提取物对于植物的效应。我们的试验表明稀酸提取的物质较为复杂，而其植物效应小麦和玉米生物质炭间大相径庭。温度也是一个影响提取液生物效应的重要因素。

如果说生物质炭物质分为结构态有机质、挥发分有机质（可以热水或稀碱提取的有机质）和灰分，那么这些不同物质的生物效应如何也是分质利用的问题。前面的试验研究认识到，生物质炭中的灰分养分元素、小分子有机物和结构有机碳均是可能增加作物产量的重要原因。如果将生物质炭经水洗和灰化处理，分离出生物质炭碳骨架（Washed BC）、生物质炭浸提液（BC Extracts）、生物质炭灰分（BC Ash）与未分离的生物质炭对比，其植物效应是否存在较大差异尚在研究中。

根据以上对生物质炭的固液气等三项产物的鉴定和性质与功效，我们对热裂解不同产物的循环利用设计如下技术路线：用木醋液外冷生物质炭，补充生物质炭含水量且提供可溶性有机质，做土壤改良剂或修复产品；木醋液作为浸提剂提取活性有机质，经专做配方高浓度液体有机肥（发明专利 2016 年授权）；而脱灰和活化的生物质炭作为环境材料，改性为吸附盾材料作为农药、污染物阻隔剂。生物质炭经热能转化后的蒸汽作用，生产吸附性炭产品。可以根据纳米粒径和可溶性有机质水平，并考虑潜在污染物含量，将生物质炭分为食品、饲料、肥料和基质等材料使用，这样实现了秸秆生物质最高的循环利用（图 25）。当然，这些不同产物的生产和产品的处理都必须有相应的标准和规范，可以根据原料和工艺条件进行适当的调配或控制来实现多种产品的联产和应用。

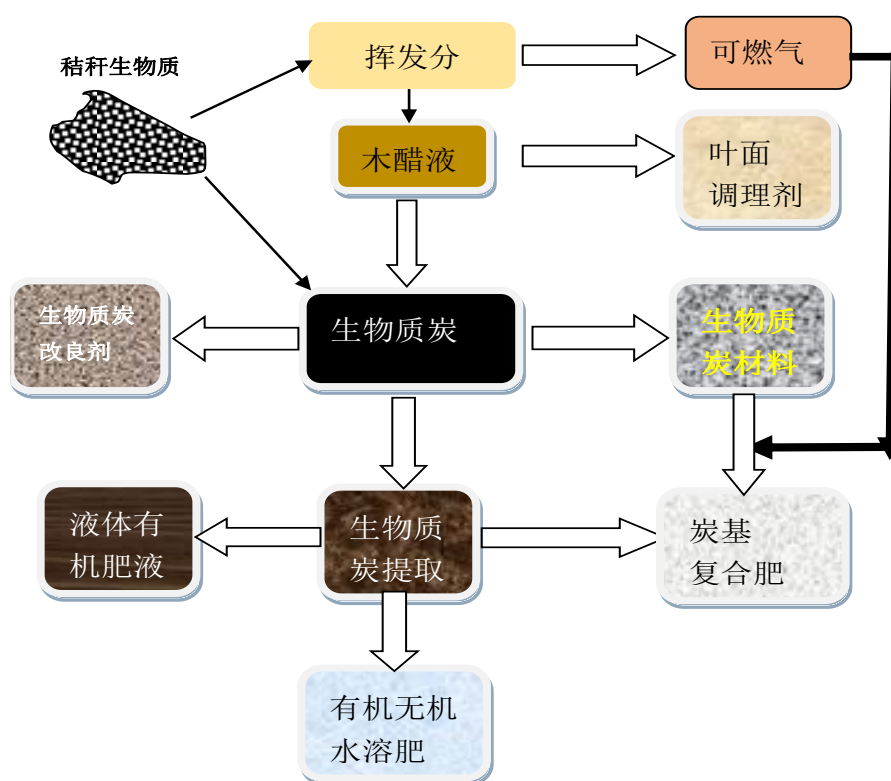


图 25 秸秆生物质热裂解产物分离、分质、分质利用技术途径和产品产业链

(5) 优化炭基肥的试制及商品化生产

2015 年-2016 年，在前期试验基础上，结合土壤学有机质-矿物质复合形成的团聚体对碳氮水和微生物的保持和协调作用的理论认识，进一步探索创制类团聚体结构的炭基肥。试验了秸秆与矿物质存在炭化，进一步与养分复配造粒，以探索结构更为优良的炭基肥。我们尝试了将秸秆生物质与矿物质、化肥养分共炭化而制备炭基肥（图 26），但得到的养分总量大为减少（炭化中氮素损失）、

工序复杂且炭质量分数低,尽管盆栽结果显示与化肥复合肥相比蔬菜增产近 10% (Yao et a., 2015)。因此,这个共炭化制备炭基肥方案在实际生产中被排除。

基于 2016 年的田间试验,进一步从养分含量配比、肥料成型稳定等方面进行了养分形态配合、复合材料筛选及炭原料筛选的工艺试验,并结合土壤团聚体功能理论特别是水稻土研究中团聚体内颗粒态物质与生物活性关系的认识,将生物质炭在蒸汽下经受活化,再与化学养分肥料、矿物质材料复合,制备有机无机肥,再配以一定辅剂和稳定剂,做成稳定的团聚化生物质炭基复合肥(图 27),作为生物质-矿质复合材料的炭基肥,并一次性工业化生产成功。

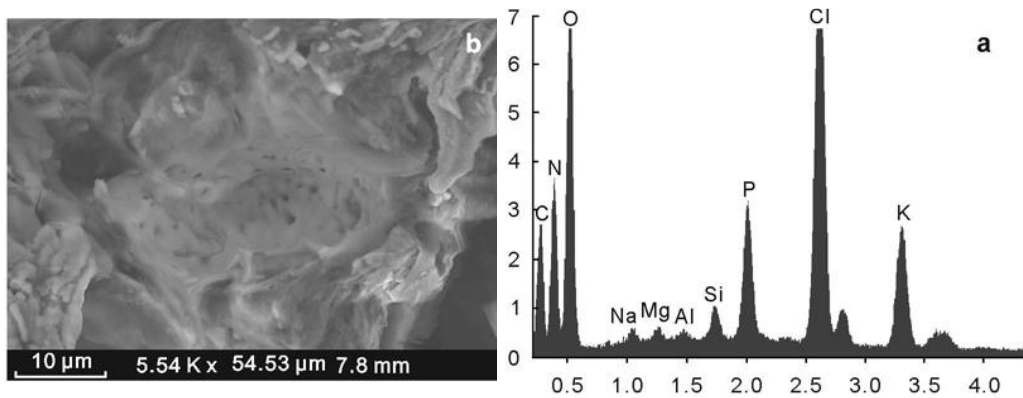


图 26 秸秆、矿物质和养分共炭化制备的炭基肥(左,簇状团聚体炭基肥颗粒;右,肥料颗粒中 N, P, K 的主要成分)。

炭基肥采用的生物质炭原料是特定工业化炭化生产线生产的作物秸秆生物质炭,兼有稳定性和活性有机质,配合适量稳定剂,将化肥养分实现物理复合和化学结合,经特定转鼓滚筒造粒工艺成为颗粒均匀、稳定性好、无味无臭的有机无机复合肥颗粒(图 28)。炭基肥中水溶性磷占有有效磷的比例明显高于国家高浓度复合肥标准(60%, GB 15063 - 2009)。成品炭基肥具有较好的硬度和肥料颗粒稳定性,克服了以往炭基肥料的结块、成粒性差等缺陷。显微研究表明,新型炭基肥颗粒均匀,内部具有微孔构造(图 28),炭、矿质、养分分布均一,氮素与炭质及矿物质结合,并具有多种其他养分(图 28-29)。内部含有孔隙系统,且除了主要养分外还带有多种矿质养分(图 29),释放试验表明,肥料养分缓释性明显。新型炭基肥已在 2017 年夏季作物进行区域性大规模田间示范试验,反映效果良好,投入商业化生产。

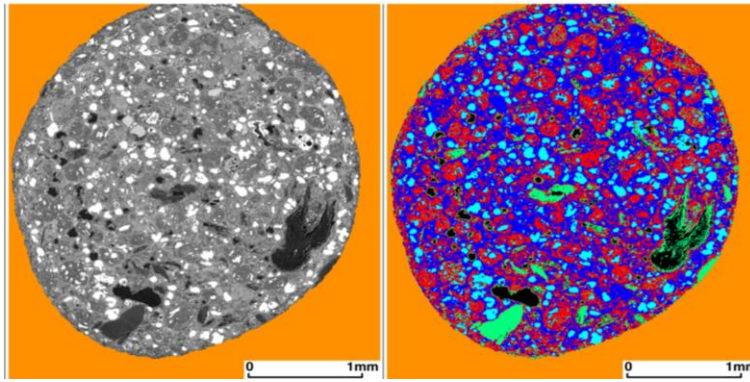


图 27 炭基有机矿质复合肥颗粒及其中炭-矿物质-养分的良好配合。

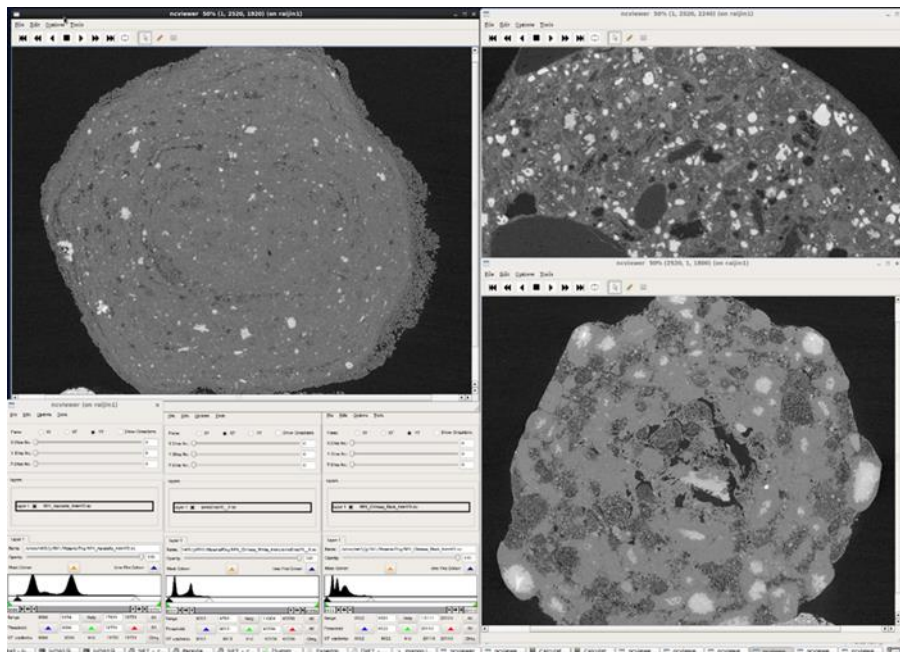


图 28 炭基肥的颗粒团聚体形貌（左上）、透射电镜下颗粒局部（右上）颗粒的全透视镜像（右下）。显示生物质炭、矿物质和养分的嵌套式分布，内含微米级吸水孔隙。左下图显示炭基肥养分成分的能谱峰。

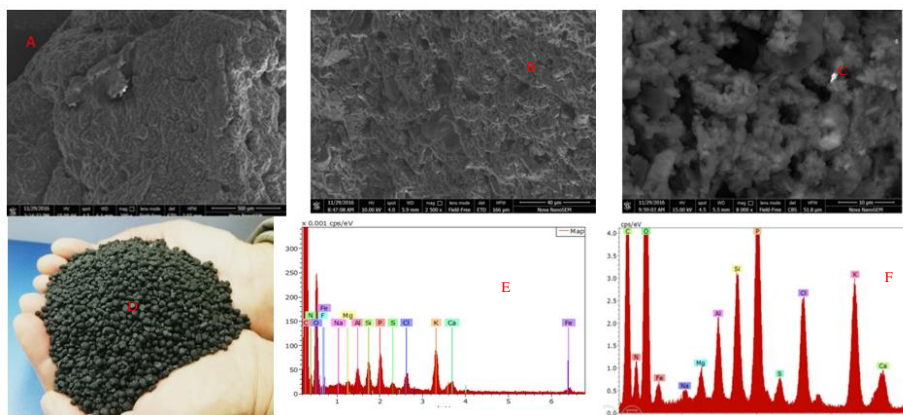


图 29 生物质炭-矿质复合肥及其微观结构（a, 颗粒局部；b, 颗粒内部；c, 颗粒内部放大；d, 颗粒外形；e, 外部的成分能谱分析；f, 内部的成分能谱分析）

5. 成套化开发了万吨级秸秆生物质炭化和炭基肥制造集成生产系统线，研究构

建了工业化技术服务体系和产业模式，

5.1 试验研究改进了生物质炭化系统的优化设置

配套完善由炭化系统、喷淋净化系统、沉降分离系统和生物质炭输送系统偶联构成的生产集成系统，完成了大规模秸秆炭化工业设备一体化集成。多次的试验和运行，产物测试和再调整，逐步达到系统优化。具体工作主要包括了炭化系统改造完善，产物分离、纯化和疏松系统改进和完善，以及工艺流程及相关参数控制的优化，保证了炭化效率和分离纯化效率。

5.2 工业化连续式热解炭化转窑集成生产系统的测试

所试验开发配套和优化形成的大规模（年处理秸秆 1-3 万吨）生物质热裂解炭化转窑集成工业生产系统见图 30。经过改造升级后的长期连续生产运行调试，整套设备能平稳运行，安全可靠，炭化效率符合设计要求，年处理量达到 1.5 万吨规模。对玉米秸秆和稻壳进行了多次长达 72 小时的连续炭化运行测试，运行效果达到预期目标。稻壳和玉米秸秆炭化产物性质见表 23。



图 30 本技术研制开发的万吨级秸秆生物质热解炭化转窑生产系统（左）及产物分离提取利用系统（右）

表 23 稻壳和玉米秸秆炭化产物性质

原料	生物质可燃气组成，%						燃气热值 kcal/m ³	木醋液 pH	炭水分 %	炭灰分 %
	CO	CO ₂	CH ₄	CnHm	H ₂	O ₂				
稻壳	30.6	24.4	14.8	0.79	6.3	0.58	2657	5.0	36.0	42.8
玉米秸	28.2	36.5	16.7	1.61	8.9	0.64	2983	4.5	28.6	36.7

5.3 大规模秸秆生物质热裂解炭化与炭基肥工业化生产的技术服务体系构建

(1) 本技术研发的秸秆生物质炭化集成生产系统，创新了热解产物分离分质分

值利用技术，实现了有机质、能源和养分的有效分离和增值利用，形成了以生物质能源、生物质肥料和生物质材料为支柱产品，及其产品的进一步深加工的一系列农业应用产品，构成了秸秆生物质的多联产系统，从而服务于绿色农业和农村能源发展，提供了农业副产物产业化和农村就业扶贫的新机遇（图 31）。

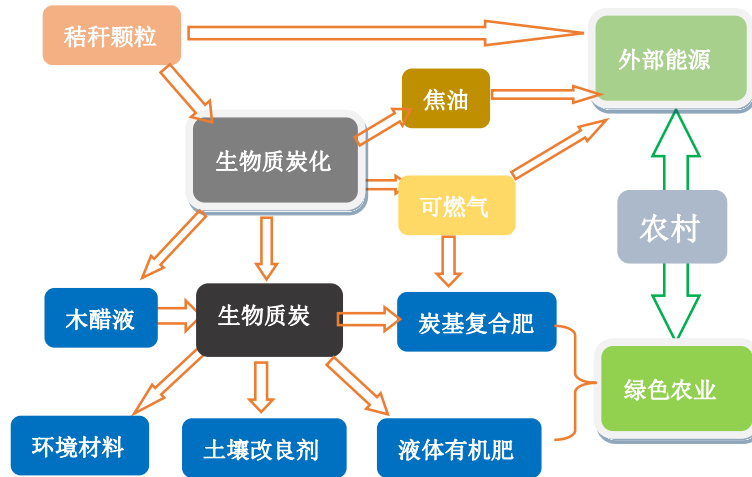


图 31 秸秆生物质热解技术形成的生物质能源和生物质材料多联产体系

(2) 本技术研发和编制了工艺生产规范（附录）和农业生物质炭、生物质炭基复合肥、生物质液体肥和土壤改良剂等企业标准，提交备案，健全了质量标准体系，为秸秆生物质炭化多联产企业提供依据。

(3) 本技术成果还构建了就地展示性示范、代表性农区精细试验性典型示范，结合就地企业的测土配方小屋和科技发展平台的检测检验服务，通过秸秆综合利用研究中心新建了生物质肥料、生物质能源和生物质材料的研发中心，为产业前沿发展的提供了质标体系支撑与科技展示支撑坚实平台（图 32）。

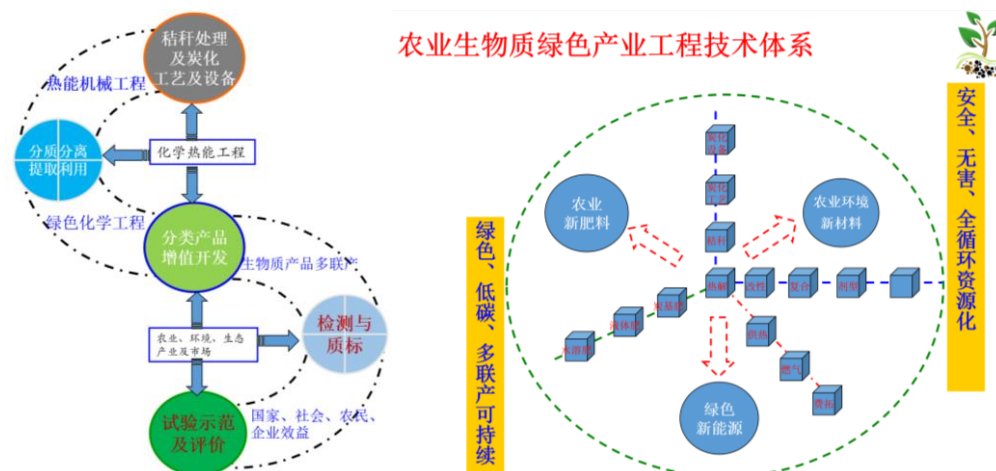


图 32 企业构建的科技平台功能（左）及新产品创新研发体系（右）

五. 本技术成果研究结论及展望

本项目历经 5 年，对秸秆炭化-生物质炭土壤改良-生物质炭基肥研究和技术发展得到的主要结论如下：

- 生物质热裂解炭化是秸秆资源化综合利用的绿色工程技术，通过分离、分质、分质利用产品的创新，实现了秸秆资源的安全、低碳、绿色循环，可以做到“取之于农，反哺农业、惠及农民、服务农村”；
- 生物质炭化得到的生物质炭及其衍生产品具有沃土又促生、增产又优质、减肥又增效的独特农业效能，开发的炭基肥和土壤改良剂为生物质绿色产品，结合可燃气能源利用，秸秆炭化可以构成生物质能源、生物质肥料和生物质材料多联产生物质产业；
- 开发的大规模秸秆热裂解炭化工业生产系统，处理规模可达万吨以上，物料平衡、投入产出平衡优化，生产可控安全、环保无排放，为秸秆综合利用工业化和生物质产业提供了设备和生产模式，符合可复制、可推广、可持续发展的产业发展要求，为解决我国数亿吨秸秆的资源化利用提供了解决方案；
- 形成和构建的技术服务体系、标准质量体系和市场模式为秸秆热裂解生物质产业提供了科技基础，健全了研究、试验、示范和培训的全链式服务体系，为秸秆生物质产业长远发展奠定了科技保障和运行机制。

秸秆热裂解生物质炭绿色农业应用是解决我国秸秆与环境困境的一条根本出路，也是农业减肥减排增产优质的关键技术途径。农业部已经将本技术开发的秸秆炭化还田改土路径正式列为秸秆资源化的十大模式之一。遵循我国政府农业五大绿色发展战略，通过产业化政策的合理引导，发展秸秆生物质产业化与工业化，不但可以为国家绿色能源和资源循环经济提供产业支持，而且可能为解决农业污染、农产品安全和农业生产可持续等国家长远需求提供产业化解决途径！

本技术的未来发展方向，是与养殖业废弃物处理、农产品加工废弃物处理和消费及生活废弃物处理产业接轨，发展多产品、多模式、多效能的生物质产业，创新农业肥料新产品和施肥新模式，并创新服务于环境污染治理、废弃或边缘土地复垦以及城镇生态环境服务的生物质新材料和新技术，全面支撑我国农业和环境的可持续发展，构建一个多联产与多功能、大规模与大服务的生物质新产业，并引领国际生物质废弃物处理及相关产业科技发展。