

专题综述

曹志洪. 生物炭与污染土壤修复及烟草行业的研发进展 [J]. 中国烟草学报, 2019, 25 (3). CAO Zhihong. Biochar and soil remediation technologies and their research development in tobacco industry [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2019, 25(3). doi: 10.16472/j.chinatobacco.2019.058

生物炭与污染土壤修复及烟草行业的研发进展

曹志洪

中国科学院南京土壤研究所, 南京市北京东路71号, 210008

摘要: 本文就生物炭的原料与制备工艺, 组分与结构特性, 生物炭与农业生产、固碳减排和抗生素、重金属、有机物污染土壤的修复, 及生物炭技术在烟草行业的研究和应用的进展做了综述, 并提出了烟草行业继续开展生物炭制备与研发的几点建议。

关键词: 生物炭; 农业利用; 固碳减排; 土壤修复; 烟草行业

“碳”是化学元素“C”(Carbon)的中文名称, 左旁“石”表示它不是金属元素。可见“碳”字是现代化学传入我国时创造和流行的汉字。

碳元素(C)在周期表的序数是6, 原子量为12。石墨、金刚石、足球烯(C₆₀)等是碳单质同素异形体。含C元素的化合物种类、数量极其繁多: 从最简单的含一个C的一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO₂), 碳酸(H₂CO₃), 碳酸氢铵(NH₄HCO₃)及碳酸盐等各种无机物, 到只含一个C元素的甲烷(CH₄), 甲酸(CH₂O₂), 尿素[CO(NH₂)₂]等各种有机物; 而含两个及以上C元素结构极其复杂的所有生命物质是生物多样性的根本所在。

而“炭”这个汉字在我国使用数千年了, 如木炭、竹炭、骨炭等早就出现在技术和文学著作中。如“卖炭翁, 伐薪烧炭南山中……夜来城外一尺雪, 晓驾炭车辗冰辙。”, 这是唐代大诗人白居易所作、千百年来众口传诵的诗。经现代分析技术测定这些“炭”是一类化学成分不纯、性质不恒定但含碳(C)元素很高的有机炭(生物炭)。“炭”无论是竹的或木的历来都是用以取暖、烧烤的。现今市场上仍然有用古窑技术烧制的竹炭或果木炭供应, 除了传统的用作烧烤或火锅燃料外, 更有作为冰箱除臭剂, 房屋装修后室内空气净化剂(甲醛吸附剂)等新品面市, 甚至还有食品级竹炭在饼干、面包、花生、药剂中添加的产品等。

黑炭(Black carbon)是自然的生物炭, 在土壤、

底泥(河流、湖泊、海洋沉积物)中广泛存在^[1], 如我国7000年前马家浜时期的古水稻土^[2-3]和50年~2000年时间序列水稻土^[4]以及亚马孙流域的黑土里都有发现^[5-6], 认为含有大量黑炭是这类土壤肥力常新、可持续利用的原因之一。这些黑炭的成因是多次的森林火灾、或年复一年的焚烧秸秆(火耕)时有部分有机质不完全燃烧所致^[2-7]。埋藏古水稻土层黑炭含量达2.0~3.3 g/kg, 明显高于其他土层^[3-4]。

现今推崇和本文所说的“生物炭”则是指利用废弃的有机物经厌氧热解后形成的一类难溶性、高度芳香化、非常稳定、富含碳素的固态物质^[5-7]。

笔者就制备生物炭的原料与工艺, 生物炭的组分、结构和特性, 生物炭与农业生产、生物炭与气候变化和全球生态安全、生物炭与环境保护和土壤修复、生物炭应对抗生素泛滥、烟草行业生物炭的研究与应用进展等方面做一综述。

1 原料与制备工艺

1.1 原料

历史上烧炭的原料主要是“伐薪”获得的, 就是在竹林或树林里选择茎围合适的竹子、树木, 砍伐加工成适宜的形状, 就地风干待用。一般是在山坡上挖一个炭窑烧出来的。好的原料才能烧制出燃烧值高、外观漂亮、有竹、木、果清香气味的炭、使用时干净、舒适, 才会受到市场欢迎。本文讨论的生物炭当然不

作者简介: 曹志洪, 中国科学院二级研究员, 长期从事土壤学与植物营养学, 土与水生态、环境保护, 水稻、烤烟等作物栽培土宜与施肥, 及土壤修复的基础与应用研究, Email: zhcao@mail.issas.ac.cn

收稿日期: 2019-02-26; **网络出版日期:** 2019-05-15

是、也不允许直接砍伐全球都要严格保护的森林（或木或竹）为原料的。否则不仅毁坏了地球的肺，也引起水土流失，毁了生态环境、并与必须使用林木的产业竞争资源。

土壤学界所推崇的，气候变化科学、环境科学、生态学界赞同的，也逐渐被社会认可的现代生物炭产业，必须是利用各种有机废弃物为原料制备生物炭及其延伸产品、并最终归还土壤、实现生态循环，使土地资源可持续利用。这是变废为宝、保护地球、实践“绿水青山就是金山银山”的壮举。

现将各类废弃有机物—生物炭的原料介绍如下：

(1) 农作物秸秆：2009年全国农作物秸秆总量为8.4亿吨^[8-9]（按多数秸秆风干后的含水量15%左右计）。其中玉米秸秆占32.3%，稻草25%，麦秸18.3%，棉秆3.2%等。但农作物秸秆呈零星分布，体积大，收集和运输的成本很高，虽有环境和社会效益，没有政策性补助和先进的技术设备、降低收集和运输成本，那么以秸秆为原料的生物炭企业都难以为继。

(2) 畜禽排泄物：随着我国城乡人民生活水平的提高，对肉，奶，蛋的需求不断增加，畜禽养殖业呈蓬勃发展、畜禽排泄物也急剧攀升，2008年总排放量达到30亿吨^[10-11]。养殖方式从原来的散养为主转变为集约、专业、规模化养殖场为主。出于市场需求新鲜食品和运输成本考虑，大部分规模化养殖场都分布在我国经济发达、人口稠密的东部地区^[11]。这里本来耕地不足，畜禽粪便的环境风险更大：是水、土壤和大气的主要污染物之一，还含有重金属和大量抗生素及超级细菌，对人类健康威胁更是严重。畜禽粪尿（不必干湿分离）与辅料混合经厌氧热解制备生物炭循环利用是安全可行的处置办法（详见本文第六节）。在国家还没有出台严禁畜禽粪便经普通发酵堆肥还田的政策和条例前，养殖企业是不会自觉地采用生物炭技术的。

(3) 生活污水：是生活污水处理厂残留物，由有机残片、细菌菌体、无机颗粒、胶体等组成的复杂、非均质混合物。一般情况下处理1万吨生活污水可产生含水率80%的污泥5~8吨，按平均计2018年全国生活污水产量可3658万吨^[12]。目前污泥的处置方法是：填埋，堆肥，自然干燥和焚化。2016年全国这4种处理分别占为73%，16.9%，6.7%和3.4%^[12]。显然是不可持续的了，因为已没有土地供继续填埋，其他三种办法会导致重金属、抗生素的二次污染。制备生物炭应则是安全可行的。

(4) 生活垃圾：根据中国再生资源回收利用协会2017-06-21公布的资料，全国城乡生活垃圾年产生量达4.28亿吨（按每人每天产生垃圾1.13公斤计）。其中城市为2.58亿吨，农村乡镇为1.7亿吨，垃圾分类必须在全国推广和坚决执行，以除去金属、小电器、玻璃、陶瓷、砖瓦等，剩下的主要是动植物残渣—厨余垃圾，果皮，废纸，塑料袋，包装盒（箱），及少量的衣物和家具等。现在处置的方法主要是填埋、发电（焚烧）等，但对大气的二次污染很严重，受到所在地群众的反对。若把有机垃圾组分在密闭的制炭炉内热解成生物炭，理论和实践上证明没有二次污染问题。

(5) 其他：农产品加工副产品，园林废弃物，果园更新及修剪的的树干和枝叶，菌菇产业的废弃物，食品、饮料、制糖、榨油、中药业下脚料等等。总量没有可靠的统计，但在特定的地域、场区，有几万吨到几十万吨不等。不少已经作为生物质颗粒的原料，把还没利用的那些制备生物炭是可行的。

综上，生物炭是利用有机废弃物为原料的，是变废为宝社会效益和生态效益为主的环保产业。因此，必须尽量减少原料收集的成本，才有微利和持续经营的可能。各级政府在管理政策的优惠和财经上补助是生物炭产业发展的关键。

1.2 工艺和设备

无论是古代传统的烧炭窑、还是现代生物炭的工艺在理论上都是厌氧环境下有机质的热解过程：利用有机质本身的热能在厌氧条件下燃烧，有部分变成灰，一半左右变为炭。

工艺：传统烧炭（木或竹）的工艺是：在自然生长的树林或竹林里选择粗细适宜的树木或竹子：伐薪—截短（或劈开）—风干—装进炭窑—点火烧炭—并立即封门（暗烧）—冷却几天后—出窑—炭（成品）。是不连续生产的。

现代规模的生物炭烧制工艺有间歇式^[13-14]和连续式^[15-17]两类。

间歇式工艺：原料粉碎过筛—定量输入炭炉—厌氧热解—冷却—出炭。

连续式工艺：原料粉碎过筛—连续地定量输入炭化炉—厌氧热解—连续出炭（冷却）—成品包装。

物料在内腔被热解成炭，将收集的焦油和可燃气体在线输入外腔作为能源，理论上原料本身产生的能量可以完成炭化，启动时点火升温要用生物质颗粒为外部能量，在连续运行状态下不再需要再补充更多的外部能量。同时还有200℃左右的余气可用于烘干等

其他需求。冷却水是循环使用的。除了冒出无色水气外无任何有害气体或污水排放。

现代生物炭热解温度还有低温烘培(200~300℃)^[14]和中高温(400~700℃)^[15, 17]热解两类。工艺、原料相同、热解温度不同,生物炭的结构和性质也有差异^[18-20]。

生物炭的产率取决于原料组成、进料和出料的速度。快速、高温能得到30%的生物炭(20%的合成气和50%的生物油)。而慢速分解可以产生50%的炭和较少的可燃气体和生物油。从节省能源看,连续式比间歇式更好。

设备:土窑烧制木炭的设备简单,可在山坡挖掘出立式的炭窑或在平地上挖掘出卧式的地窑都行,加上封门用的防火水泥版或石板等。

现代生物炭连续生产设备主要由三部分组成:炭化炉(燃烧室和炭化室),烟气净化,原料粉碎、混合和传送系统和成品冷却、传输及包装系统。目前市场上有很多类型、产能不一的成套设备供应。生物炭企业可根据处理物料的外观、含水量多寡,规模等选择合适的型号和配套系统。浙江华腾牧业有限公司的养猪场使用中科院城市环境研究所研制的小型(3吨/日生物炭)连续生产的生物炭炉,运转3年来稳定可靠。

2 生物炭的组分、结构和特性

2.1 生物炭的组分

生物炭由65%~95%(wt)碳,3%~20%由钾、磷、

钙、镁、硅、锰、锌等氧化物和含氮化合物组成的灰分,少量的挥发分等三部分组成^[5-7, 18-21]。因原料及热解温度不同而有差异。例如含碳量是木质>草质>畜禽粪便>生活污水;炭化温度低的>温度高的;而灰分含量则反之:污泥>畜禽粪便>草质的>木质的,而且是温度高的>温度低的。

笔者的合作团队用猪粪与不同辅料(1:1.5)混合制备生物炭,混合后原料含水量分别是:(猪粪+砻糠)27%,(猪粪+稻草)48%,(猪粪+木屑)36%,(猪粪+竹屑)47%,而纯猪粪为67%。炭化炉中部温度为640℃,运行稳定,温度变化较小。原料输送螺旋的频率为9.5Hz,炭化炉进料螺旋频率为16.0Hz,炭化炉运行频率为40.0Hz。各种生物炭的pH值,含水率,及各组分(元素)的含量见表1。

结果表明,虽然原料含水率差异较大,但生物炭含水率变化不大,在3%~5%之间;pH值都呈碱性。混料生物炭比纯猪粪生物炭pH值高,而混料生物炭的灰分含量较纯猪粪炭的低;其中添加木屑和竹屑的生物炭灰分低于添加砻糠和稻秆的;生物炭含碳量则以猪粪+竹屑和猪粪+木屑的高。这都与辅料(稻草,竹屑,木屑)本身的含碳量和燃烧值高低有关:因为纯猪粪、草本(稻草)含碳量和燃烧值比木质化程度高的竹屑和木屑的要低。生物炭含氮量以纯猪粪炭最高,添加稻秆和竹屑的比添加木屑和砻糠的高;炭化过程的浓缩富集是生物炭磷钾含量比其原料的高原因。

表1 不同配比猪粪生物炭的pH^{*}及组分

Tab.1 pH and composition of pig manure biochar with different component proportions

项目	pH	H ₂ O/%	C/%	灰分 /%	TN /%	TP/%	TK/%	TS/%
猪粪砻糠炭	10.6	3.0	52.2	37.0	0.69	0.76	1.56	0.17
猪粪稻秆炭	10.8	3.4	46.6	43.0	0.84	1.25	3.15	0.45
猪粪木屑炭	9.6	3.2	72.6	16.0	0.74	1.20	0.59	0.12
猪粪竹屑炭	9.2	4.4	75.5	14.0	0.89	1.31	1.17	0.12
纯猪粪炭	8.6	4.6	36.0	48.0	2.38	1.21	2.43	0.74

注: *生物炭pH的测定方法:去离子水:风干生物炭=20:1,浸泡24h后,双层滤纸过滤,用酸度计测定此过滤液的酸度。

生物炭含有一定氮、磷、钾、硫等植物必须的养分,所含钾素和磷素的有效性应与其原料中的区别不大。氮素在炭化过程中有些损失,残留的氮素形态也有变化、其有效性应比原料中的氮素要低。

分析表明生物炭的C/N比很高,例如:纯猪粪炭为16.0,猪粪稻秆炭为55.5,猪粪竹屑炭为94.4,猪粪木屑炭为98.1,当然是微生物难以立即利用的氮

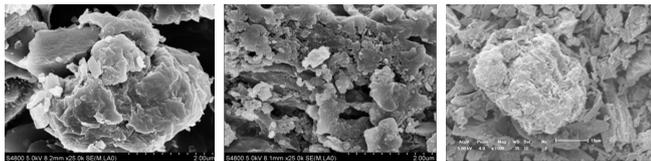
素形态为主。所以生物炭中的氮素对作物的有效性应比它原料中的氮素要低。这就是为什么仅靠生物炭本身的氮素等养分是满足不了作物需求的。只有在极度贫瘠的土壤上,单独施生物炭才可能有一定肥效,产量也不会高。一般必须通过与其他肥料配合,再加上生物炭具有的保持土壤养分、水分、促进通气、改良土壤结构及激发微生物活力等多种功能的综合作用下,

效果会比不加生物炭单独使用有机肥或有机无机复合肥的好的多(详见本文第三部分:农业上应用的效果)。

2.2 生物炭的结构

生物炭主要有碳素组成,具有洋葱状、开放性的孔隙,是呈蜂窝状由大、中、小孔构成的多孔结构。因制备生物炭原料、温度、厌氧条件、进料速度等不同而有差异,其结构也呈现多样性(图1)。生物炭表面有大量芳香族官能团为主的含氧基团,多孔结构使其有巨大的比表面积和吸附性能,这是生物炭天然的物理化学特性^[6-7, 17-20, 23-24]。

不同猪粪生物炭的红外谱图(图2)表明在 3420 cm^{-1} 出现的宽峰为-OH(羟基)的特征峰,是来源于原料中碳水化合物及水的羟基。在 1604 cm^{-1} 的峰是芳香环中C=C(烯键),C=O(羰键)的伸缩振动以及-COO-(羧基键)的反对称伸缩振动。 1446 cm^{-1} 处的吸收峰为碳水化合物和脂肪族化合物中-CH₂基(亚甲基)的剪式变形振动及脂肪族和木质素中-CH₃(甲基)的和C-H(季甲基)的不对称变形振动。可见各猪粪生物炭中有机官能团含量很丰富。纯猪粪炭(粉红色线)中存在的 2932 cm^{-1} 为-CH₂(亚甲基)的和C-H(季甲基)的反对称伸缩振动, 2847 cm^{-1} 为-CH₃(甲基)的和-CH₂(亚甲基)



Note: 左:猪粪竹屑炭,中:猪粪炭,右:棉秆炭。
left: pig manure and bamboo, medium: pig manure, right: cotton stalk.

图1 生物炭的电镜照片¹

Fig.1 Electron micrograph of biochar

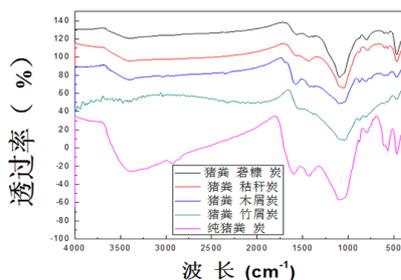


图2 各种猪粪生物炭的红外谱图²

Fig.2 Infrared spectrum of various pig manure biochars

¹ 由吕豪豪和杨生茂,张进等提供。

² 由吕豪豪和杨生茂提供。

的及C-H(季甲基)的对称伸缩振动。这两个峰仅在纯猪粪炭中,说明其有机质含量更高。

2.3 生物炭的物理、化学特性

如前所述生物炭具有的多孔结构故容重很低,空隙率高,存在大小不一的孔隙,使其既有持水孔隙,也有通气孔隙。这些物理特性是生物炭在土壤中既能保水、也保持通气,满足土壤中植物根系、小动物和微生物等对水、氧气、和营养的需求。生物炭的多孔结构使其比表面积很大,如 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热解的栎树炭和竹炭的比表面积分别为 $154.6\text{ m}^2/\text{g}$ 和 $137.7\text{ m}^2/\text{g}$,棉秆炭的比表面积达到 $224.12\text{ m}^2/\text{g}$ 。生物炭的多孔特性和巨大的比表面积使其有很高的吸附性能,木屑生物炭的比表面积是普通木炭的2.5~3倍,吸附能力是普通木炭的10倍以上。

生物炭含一定的灰分,其表面又有丰富的碱性基团,所以一般都呈碱性,pH值为7.1~12之间,这因原料,炭化温度及炭化时间等不同而有差异^[6-7, 17-20, 23, 24]。

表2是鸡粪与不同辅料配比的原料在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热解下连续生产的生物炭的理化性质。辅料是木屑、稻草(粉碎后)、砻糠、竹屑4种,鸡粪及各种辅料的含水量分别是84.15, 11.46, 10.21, 8.95, 7.99%。结果表明,鸡粪与等量(1:1)竹屑、稻草、砻糠混合烧制生物炭其持水孔隙率、通气孔隙率,CEC等指标均以竹屑、稻草两种辅料混合的较好,而与砻糠混合的稍差。可能与砻糠含大量硅有关。鸡粪与两倍木屑混合烧制的生物炭虽也有不错的性能,但成本比其他的要高。

3 农业应用的效果

天赐阳光,雨水,空气,万物得以土中生。土壤学家认为一切有机物及其废弃物都是土壤产出的。即使是人造纤维、塑料等合成的有机物都是石油或煤化工的延伸产品,本质上也是远古的植物或动物转化而来。为了维护土壤可持续利用和绿色发展、确保人类恒久生存,不论是自然的还是人工合成的有机废弃物都必须科学地循环归还给土壤。这样才能有‘绿水青山’的生态环境、洁净新鲜的空气,也才会有‘金山银山’的收获。

通过制做堆肥—让作物的残茬、畜禽粪便、死亡的动植物遗体和生活垃圾等等经过堆沤、发酵、腐熟,然后将堆肥施于土地,或者把秸秆有机物作为生活燃料、将‘草木灰’作灰肥施于土地,这就是上世纪70年代前我国传统的循环农业模式—基本上还是‘有机农业’。尽管当时的产量不很高,但数千年

表 2 鸡粪与不同辅料配比烧制的鸡粪生物炭的理化性质

Tab.2 Physical and chemical properties of pure chicken manure and calcined chicken ma-nure biochar with different component proportions

项目	鸡粪 / 木屑	鸡粪 / 竹屑	鸡粪 / 稻草	鸡粪 / 砻糠
质量 /kg	70.8/145	20/20	19.4/19.6	19.6/20
质量比	1/2	1/1	1/1	1/1
pH (炭 / 水比为 1 : 20)	10.44	10.48	10.56	10.36
EC/ (ms/cm)	1.14	0.81	2.41	2.05
容重 / (g/cm ³)	0.07	0.14	0.08	0.17
总孔隙率 /%	65.07	107.24	79.18	34.42
饱和吸水倍率 /%	58.47	93.48	71.03	17.63
持水孔隙度 /%	29.86	60.90	32.53	17.12
通气孔隙度 /%	28.61	32.53	38.50	10.51
大小孔隙比	1.04	1.87	0.84	1.63
CEC (mmol/100g)	144.44	103.85	97.21	41.31

来既维持了一定的地力、也养活了几亿中国人。现今农村有煤炭液化气做生活燃料, 既没人把秸秆作为生活燃料, 也没有农民愿意通过艰苦劳动去节制和使用有机堆肥。买化肥或商品有机肥用是常态。可是, 当今的畜禽粪便既含有重金属也有大量抗生素和抗性基因, 沿用传统的堆肥技术制备的‘商品有机肥’, 最高的发酵温度超一般不过 75℃, 即使有达到 100℃的, 能杀死常见的病菌、寄生虫卵和杂草种籽, 解决不了重金属、更不能杀灭抗生素和抗性基因。所以, 继续使用现由有的‘商品有机肥’必然会对土壤、水体和大气造成二次污染, 经食物链, 威胁和危害人畜的健康^[25-28]。只有把有机废弃物制备成生物炭归还土地, 才是解决有机废弃物重金属和抗生素污染的科学选择^[29]。

3.1 增加产量、提高品质, 改良土壤

生物炭以其致密的多孔结构, 丰富的表面官能团, 大量的表面电荷, 强大的吸附功能作为农业土壤的改良剂和肥料使用已有不少报道。有直接把生物炭归还土壤做肥料的, 例如古代中国农民直接将稻草在田间焚烧, 把灰和炭留在田间称谓“火耕”, 来年春天直接用水漫灌再撒播水稻种子叫做“水褥”^[2-4]。亚马孙河流域的先民也是从森林大火过后土地的肥力提高或“火耕刀种”中得到启发, 使用焚烧林草后得到的‘黑炭’直接施于土地, 年复一年地逐渐形成肥沃的黑土“Terra Protia”^[5-7, 24]。看来对古代贫瘠的土壤直接使用生物炭是有提高肥力和改良土壤作用的。

近年来的文献表明, 生物炭直接作为肥料使用的仅 50% 有增产效应, 30% 没有什么影响, 而 20% 则

是减产的^[29]。如前所述, 生物炭虽然含有少量氮素和较高的磷和钾, 但其 C/N 比高, 所以氮素作用有限。这就是只有十分贫瘠的土壤上, 或缺磷钾的土壤上才会有一定效果。当然, 其 CEC 很高的特性、有吸附养分、水分和促进通气等功能的综合作用下也会起到一定增产效果的。作物的产量与使用生物炭的方法、时间、气象条件和病虫害及作物本身都有关系, 增产或减产都不是单一因子决定的。生物炭直接使用对酸性土壤具有提高土壤 pH 的显著效果、但对碱性土壤 pH 则影响不大, 对无结构、板结、透气通气性差的土壤具有十分明显的改善效果, 大大促进团粒结构的形成和激发微生物的活力。由于其很大的比表面积和强的 CEC, 提高土壤保水保肥的作用尤为突出^[29-35]。进而也提高了肥料利用效率, 减少化肥流失量, 具有防治面源污染的作用。

将生物炭与有机肥或无机肥相配合制成生物炭有机肥或生物炭有机无机复合肥、或根据特定土壤和作物配制成专用肥料使用, 那就能使两者相得益彰, 增产、提质和改良土壤的效果更佳, 维持效益的时间更长、而且投入的成本更低^[29-35]。根据国家有关标准和企业自身制作精品的要求, 浙江华腾牧业有限责任公司生产的‘佳华牌生物炭有机肥’, 获得了‘国环认证’、是适用于有机农业的生物炭有机肥, 质优价廉, 三年来已经在长三角地区的有机蔬菜、有机食品农场广泛应用, 取得了可喜的生态、社会效益和一定的经济效益。

3.2 生物炭提高有机肥和复合肥效果的机理

生物炭有机肥或生物炭有机无机复合肥比普通的

有机肥、有机无机肥的效果更好, 学界认为其机理是生物炭具有的一系列物理、化学、生物学特性, 使其有调节土壤酸度, 降低土壤容重; 增加土壤团粒结构并改善其稳定性, 调节土壤有机质风化率; 提高土壤阳离子交换量, 改善土壤保肥保水能力, 减少土壤水分和养分的流失; 提供土壤微生物优良居所, 激发土壤微生物活力和多样性, 提升土壤固氮能力; 增加土壤磷钾含量、促进土壤磷有效性等功效, 充分显示其作为土壤改良剂和肥料组分的强大潜力^[29-36]。

4 生物炭的固碳减排及污染土壤的修复

生物炭在农林业上可直接或做为肥料组分归还土壤, 实现物质循环、既可提高作物产量、改善农产品品质, 同时也改善土壤物理、化学和生物学性质、提高土壤肥力质量、实现可持续利用的功效。气候变化学界则普遍认为生物炭技术是固碳减排应对气候变化的利器, 土壤与环境科学界认为生物炭是修复重金属等无机物、农药和石油等有机物污染土壤与场地、及抗生素和抗性基因等生物污染土壤和场地的修复剂。

4.1 固碳减排

生物炭的制备过程把光合作用产物(有机废弃物)的30%~50%转化为炭, 归还土壤后其大部分可长期封存于土壤中, 固定了大量本应排放的二氧化碳和其他温室气体: 这是因为有机废弃物堆放在地表自然风化腐解过程(如堆肥制作时的发酵)、直接填埋后、或将堆肥施入土壤后都要继续被微生物分解在释放出养分的同时并不断排放二氧化碳、甲烷和氮氧化物等温室气体的。生物炭施入土壤后, 不仅其本身可长期保存, 并以强大的吸附性能和多孔结构, 可将原土壤有机质分解所产生的温室气体吸附保留住, 减少了温室气体排放。生物炭“生命周期分析”表明, 生物炭技术是固碳减排最有效、经济、和可行的, 是‘碳负性’(Carbon negative)的。估计生物炭本身减少向大气排放的二氧化碳每年就达几十亿吨。因此生物炭技术是目前解决全球气候变化问题的利器^[6-7, 36-41]。

虽然也有专家认为在一定条件下, 土壤中的生物炭也会继续分解排放二氧化碳的^[42], 笔者认为其数量很少, 不可与生物炭技术固碳减排的正效应相提并论。

4.2 土壤修复

2018年12月5日是世界土壤日, 由中国科学院土壤研究所、中国土壤学会等在南京召开了以土壤污染防治为主题的“第一届全国土壤修复大会”。与会的专家、学者、企业代表和各级领导达1800余人。

与会者的积极性、发言或提交的论文、参加展览的盛况是空前的, 也有一些外国厂商进场参与, 证明国内外对中国土壤修复市场的重视和关心。很多报告、论文(墙报)和展品都提及或展示了生物炭在土壤修复上的作用机理、技术及效果, 相关的产品也是耳目一新。

4.2.1 重金属污染

生物炭制备过程的温度达400~600℃, 厌氧热解反应本身对有机废弃物(如污泥、畜禽排泄物, 垃圾等)所含的重金属可起到钝化和减量作用^[20-21]。生物炭施入土壤后改变了土壤酸度、提高了pH, 加上其表面有大量含氧功能团也对重金属起的钝化作用, 使土壤重金属的活性大大降低; 生物炭强大的吸附功能对重金属起到吸附固定作用, 能延缓或阻止植物对重金属的吸收, 从而实现了安全生产^[5-6, 20-21, 43-48]。在重金污染场地的修复中生物炭也被广泛地使用。

4.2.2 有机污染

农田使用农药、除草剂、杀虫剂后残留在土壤和植株的叶、果上, 有机污染物严重地威胁到食物链的安全和人畜的健康。石化企业, 油库, 加油站、农药厂, 有机化工厂等搬迁留下的有机污染场地更是城市土地开发利用面临的严重问题。生物炭对这些有机污染物有较好的修复效果^[49-52]。

4.2.3 抗生素和超级细菌污染

自青霉素问世并有效治疗肺结核以来, 抗生素在治愈以及防治传染病上的贡献, 是人类医学史上具有里程碑意义的成就。但是, 随着抗生素的大量生产、使用、甚至滥用, 抗生素和抗性基因(耐药性)污染已经成为一个全球性突出的环境健康问题。调查发现大量使用抗生素导致大型养殖场周边土壤中微生物抗性基因ARG(s)的增加^[53]。

2013年我国抗生素使用总量达到16.2万吨, 52%用于养殖业(饲料添加剂和防病抗病注射等), 畜禽吸收利用的只是很少部分, 有70%~90%最终被排出体外。畜禽粪污是抗生素和抗性基因最大的携带者。传统发酵堆制的‘商品有机肥’含有大量的抗生素和抗性基因, 施入土壤和流失到水体, 势必诱导出大量对抗生素具有抗性基因的新微生物。抗生素进入土壤不仅可破坏土壤微生物的生态平衡, 也会富集在植物体内进入食物链; 随着渗透、流失等进入水体。环境中抗生素所带来的生态风险、对人畜健康的威胁实际上比重金属、农药等无机物和有机物污染的风险更大, 是不容忽视的人类安全问题。

2015年在我国首先发现对黏菌素具有耐药性的

基因“mcr-1”一即‘超级细菌’，接着世界各地也陆续发现^[54-56]，世界各地的猪鸡牛羊肉均有抗生素和抗性基因检出，国外市场的麦当劳和肯德基等已开始禁用含抗生素和抗性基因的畜禽产品。2017年复旦大学关于江浙沪儿童普遍暴露于多种抗生素威胁的报告称：1000多幼儿和小学生的血样中100%地检出多种抗生素存在，有些是给畜禽用的！中科院广州地化所抗生素研究团队发表的全国抗生素污染图，认为我国餐桌上的鸡鸭鱼肉蛋全部沦陷。

超级细菌—“mcr-1”的出现预示着人类最后防线的失守，世卫组织前总干事陈冯富珍表示：医学将有‘回到黑暗时代的风险’。英国政府认为到2050年超级细菌将导致全球1000万人死亡，超过癌症的死亡率。

宋宏彬团队首次报道了在猪粪中检出了对多粘菌素类药物耐药的福氏志贺菌株，介导多粘菌素耐药基因mcr-1是通过质粒结合转移的方式水平转移至其他肠道菌^[55]，沈建忠团队通过多年跟踪研究，探明了mcr-1在家禽产业链可沿着“孵化场-养殖场-屠宰场-超市”这一链条传播，含有该基因的细菌可被苍蝇等环境媒介携带污染食物链，表明养殖场的排泄物是临床耐药菌的最初来源^[56]。

如何从源头解决畜禽排泄物携带的抗生素、抗性基因的问题？有人认为可以通过简单的堆肥发酵或使用‘特殊的微生物’来消除^[57-59]，笔者以为这是很值得商榷的。在这些试验研究中，虽然有些抗生素抗性基因是减少了，当然没有也不可能是全部被消除，因为堆肥的温度无论如何不能达到完全消除抗生素和抗性基因高温要求。所以使用畜禽粪便有机肥越多，土壤中的抗生素抗性基因含量也就越高^[60]。其二，即使发酵后确实消除了一些抗生素抗性基因，那么肯定是产生了更强大的耐某些抗生素抗性基因的新物种或新基因。这种抗性更强的新微生物或新抗性基因对人畜和生态系统健康和安全的威胁岂不是更大吗？

研究证明，在400℃中温下烧制的鸡粪生物炭中虽然大多数抗生素抗性基因已被杀死，但仍有一些耐高温的抗性基因存在；只有到600℃以上烧制的生物炭中才完全消除了抗生素抗性基因（论文送待发表）。

因此，畜禽排泄物、生活污水、医院和药厂的废弃物、生活垃圾等携带有抗生素和抗性基因的有机废弃物都应该也只能通过烧制生物炭再循环利用才是安全的。中国科学院生态环境中心的朱永官团队用猪粪生物炭有机肥与普通猪粪堆肥为对照的三年田间试验结果证明：使用猪粪生物炭有机肥处理的土壤、地

下水和植株中均没有测到抗生素抗性基因，而对照（普通堆肥）处理的土壤、地下水 and 植株中则有较高含量^[61]。

5 烟草行业对生物碳的研究与应用

在国家现行的专卖体制下，烟草行业对国民经济仍有重要的贡献。我国烟草生产（烤烟种植和卷烟生产）及供销都是在国家烟草专卖局和中国烟草总公司统一部署计划下开展的。全国有植烟面积约100万公顷以上，这些烟田的土壤改良、肥力提升、连作障碍的治理，烟草秸秆的科学处置，及植烟土壤和烟株、烟叶重金属、农药污染的防治等都与生物炭技术和生物炭产品有密切关系。竹木炭进一步用蒸汽处理制成‘活性炭’，其用途更广泛，如吸附，脱色，除臭，污水处理和烟气脱硫等等。活性炭添加在卷烟滤嘴中，用以吸附主流烟气的有害物质、提高卷烟安全性的研究和实践曾是热门课题之一^[62-65]。国家烟草专卖局还制订了活性炭在卷烟中的使用标准^[66]。

5.1 烤烟秸秆、复烤厂废弃物的制备生物炭

2015年我国约有107万公顷烤烟生产面积，按烤烟秸秆生物产量每公顷2250~3000 kg计，全国每年有烤烟秸秆300万吨^[67]，烟草秸秆有较高的营养成分和有机质，但直接还田的很少，因为它在田间不易腐烂（烟草纤维素很难被微生物分解），更携带有各种病虫害而影响后季的烤烟生产。田间焚烧秸秆被严格禁止，大部分烟草秸秆只好抛撒在路边、渠道或河滨。虽然国家局及各地的烟草公司都鼓励将烤烟秸秆经传统发酵法制备有机肥，并在一些地市示范，可是制作成本高达1350元/吨，仅秸秆的收集费用就是750元/吨，显然是不可能长期经营的^[67]。曾有利用烟秆制取优质活性碳的报道^[68]，那么烤烟秸秆制作生物炭更是可行的，只是与制做烟秆有机堆肥一样存在着收集和运输成本高的问题。

初步调查认为，卷烟企业中适合制备生物炭的有机废弃物是不多的，无需考虑。主要是打叶复烤厂中剔除的无使用价值的烟叶（霉烂烟叶、青烟、严重烤红烟叶），将把烟加工为片烟过程中形成的长梗，短梗、梗末和烟末等有机废弃物的数量是较大的。如无更有价值的去路，则是制备生物炭的合适原料。因为这是集中在复烤厂的，又相当干燥，既没有收集和运输的费用，也不需要烘干就可直接制备生物炭。这种资源究竟多大，是否需要制备生物炭？

如果打叶复烤的出片率为60%~70%，长短梗、梗末和烟末为23%~35%，另有5%~7%的水分和损耗。

那么 2018 年全行业复烤投料为 174.4 万吨左右, 以烟梗比例 (含长梗, 短梗和梗末) 平均 15%~20%, 烟末比例 0.6% 计算, 那么烟梗约为 35 万吨, 烟末为 1 万吨左右。

当然, 复烤企业也是分散在各地的, 每个企业承担的复烤烟叶数量也大小不一, 其废弃物料数量也各异。例如:

某工业企业 A, 2017 年投料量为 207.5 万担, 无使用价值烟叶 0.25%, 共 0.52 万担; 长短烟梗 12.33%, 共 25.58 万担; 烟灰 1.58% 共为 3.28 万担, 三者合计 29.38 万担。

复烤厂 B, 2017 年投料 53.78 万担, 无使用价值烟叶 0.09%, 共 0.05 万担; 长短烟梗 7.62%, 共 4.1 万担; 烟灰 1.64% 共 0.88 万担。三者合计 5.03 万担。

复烤公司 C, 2018 年投料 100 万担, 碎片比例 0.5%, 0.5 万担。长短梗都要运回中烟公司, 废弃烟梗比例约 5% 左右, 则是 5.0 万担。两者合计 5.5 万担。

打叶复烤厂 D, 把烟加工为片烟, 出片率为 65% 左右, 烟梗率约为 25%, 烟末 10%。产生的烟梗少量用于配方和薄片、梗片的生产, 很大部分由复烤厂自行处理: 有燃烧作为能源的, 有制生物炭或有机肥的, 也有提取烟碱的。如有丢弃, 复烤厂让下游公司处理烟梗, 则还要支付处理费约 200 元 / 吨。

当然, 即使是同一个复烤厂, 每年的废弃料也不同。或因为技术进步, 或制薄片、梗片的需求量不同而有变化。所以要选择合适的企业和地点, 开发烟草行业的生物炭才可行。

烟草行业建设第一个生物炭企业和生物炭基肥工程研究中心的是贵州省毕节市烟草公司^[69], 足见该公司的领导人是有创新思维和前瞻考虑的, 是属于敢于担当和‘第一个批吃螃蟹’的人, 值得点赞。该生物炭企业当初设计目标主要是利用毕节地区最大的烤烟生产基地威化县大面积烟田所废弃的大量烟草秸秆, 以及毕节复烤厂的废弃烟梗等为原料的。但是在经营一段时间后烟杆收集和运输的困难还是出现了, 仅靠复烤厂的烟梗烟末满足不了原设计的生物炭产量的。于是转而使用一些本地农副产品加工企业的下脚料 (如酒厂的酒糟、菇场的菌菇包等) 才能维持运行。毕节地区烟杆生物炭有机肥或生物炭有机无机复合肥等产品在烤烟生产上的效果还是明显的。

5.2 生物炭在烤烟生产上的应用

生物炭直接使用或通过与其它有机肥、无机肥配合使用作为烟草专用肥料或植烟土壤的改良剂、重金属和农药污染植烟土壤的修复剂等自 2010 年前后开

始就有文献报道^[69-82], 现叙述于后。

5.2.1 对烤烟产质量的影响

盆栽和大田的试验证明, 无论生物炭是单独使用, 还是生物炭与其他有机肥或无机肥配合使用, 都能显著促进烤烟植株地上和地下部分的生长, 增加烟草干物质积累, 提高烟叶产量; 植烟土壤物理化学性质的变化 (通气和透水、空隙扩大, 提高根际土壤 pH), 改善了土壤的生物学特性。提高了氮肥利用率, 促进了烤烟生长过程中钾的吸收, 提高烤后烟叶的含钾量; 降低了打顶后烤烟对磷、氮元素的吸收效率; 对烤后烟叶品质 (两糖比, 钾氯比, 燃烧性等更佳) 亦有显著的正面影响^[69-74], 因而可以适当降低化肥的用量, 为实现农村农业部 and 生态环境保护部提出的减肥目标做贡献。

5.2.2 植烟土壤的改良

生物炭单独或与有机肥、无机肥配合使用, 生物炭本身的碱性, 以及吸附土壤中的 H⁺ 质子和 AL+3 离子, 提高了强酸性植烟土壤 (尤其是根际土壤) pH, 减少了烤烟对重金属离子的吸附及其毒性, 有利于烤烟的正常生长; 生物炭增强了土壤保肥保水性, 提高持水效率 (土壤含水率、毛管持水量都有增加), 减少了氮磷养分的流失, 有利于控制水体面源污染; 生物炭调节了土壤呼吸速率, 改善了植烟土壤的生物学特性, 提高了土壤有机质含量和活性, 改善了土壤碳库质量; 扩大土壤微生物多样性和土壤酶活性, 提高了土壤氮磷钾养分的有效性^[75-78], 生物炭对烟区土地整治后的土壤微生物具调控效应, 以加速土壤熟化^[79]。

5.2.3 植烟土壤重金属污染的修复

生物炭单独使用, 或与有机、无机肥配施, 提高植烟土壤特别是根际土壤的 pH, 降低重金属的活性, 同时其强大的比表面和吸附性能, 限制了烟根对重金属的吸收, 抑制了重金属在烟叶的富集和毒性, 从而降低汞, 铜, 镉等的危害; 保护了多种酶活性, 增强烟株对重金属的抗性, 使烟叶重金属含量下降, 保证了烟株的健康和烟叶的安全^[80-82]。

6 结论与展望

生物炭技术将废弃的有机物进行安全处理, 变废为宝; 生物炭及其延伸产品在循环经济和土壤可持续利用、调控化肥用量、生态环境保护与污染场地修复、固碳减排应对全球气候变化, 特别是在消除畜禽粪污携带的抗生素和抗性基因对环境安全和人类健康的威胁上的作用和意义是肯定的。生物炭产业是有益于生

态安全和人类健康的新业态, 理应受到全社会的支持, 烟草行业当然也不列外。我国烟草行业有强大的经济和科技实力, 建议在生物炭技术上继续开展以下几方面研究与示范:

1) 田间烟杆的起杆、打捆、收集的机械化智能化设备, 最大限度地降低成本, 实现烟杆生物炭还田; 也可对其他作物秸秆收集做贡献;

2) 根据各烟区土壤、气候、烤烟品种特点研究生物炭有机肥和生物炭有机无机专用肥的配方和使用技术, 确保和扩大其正面结果, 防止或减少可能的负面反应;

3) 利用复烤企业废弃烟梗制备优质的烟梗生物炭(应保留其烟草特有的香气), 研究其直接在卷烟上使用的新技术, 为卷烟的降焦减害做贡献等等。

致谢: 笔者对中科院南京土壤研究所史学正研究员的团队、庄舜尧研究员的团队、中科院城市环境研究所朱永官研究员的团队、汪印研究员的团队、刘超祥研究员的团队; 浙江农林大学吴胜春、曹玉成教授的团队, 浙江科技学院张进教授的团队, 浙江农科院杨生茂研究员的团队在生物炭制备、田间试验、实验室分析和电镜照片等方面提供的合作; 上海烟草集团有限责任公司程森研究员, 中国烟草学报的艾继涛编辑、四川中烟李东亮研究员和湖南复烤厂刘洪标高工等提供的复烤厂烟梗(长梗, 短梗)和烟末的调查数据; 以及浙江省华腾牧业有限责任公司在猪粪生物炭的试验、示范, 生产和生物炭有机肥和生物炭有机无机复合肥的研制及市场化等所做的努力等一并表示衷心的感谢。没有上述学者和单位的支持和帮助, 笔者关于生物炭的研究和本文之撰写都难以完成。

参考文献

[1] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soil and sediments, analysis, distribution, implications and current challenges [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(13):777-793.

[2] Cao Z H, Ding J L, Hu Z Y, et al. Ancient paddy soils from the Neolithic age in China's Yangtze River Delta[J]. *Die Naturwissenschaften*, 2006, 93(5):232-236.

[3] 曹志洪. 中国灌溉稻田起源与演变及相关古今水稻土的质量[M]. 北京: 科学出版社, 2015:162-165.
CAO Zhihong. Origin and evolution of irrigated rice fields and related ancient and present paddy soils quality in China [M]. Science Press, Beijing, 2015:162-165.

[4] Lehndorff E, Roth P J, Cao Z H, et al. Black carbon accrual during 2000years of paddy-rice and non-paddy cropping in the Yangtze River Delta, China[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(6):1968-1978.

[5] Glaser B, Balashov E, Haumaier L, et al. Black carbon in density fraction of anthropogenic soils of Brazilian Amazon region [J]

Organic Geochemistry 2000, 31: 669-678.

[6] Emma M. Black is the new green [J]. *Nature*, 2006, 442: 624-626.

[7] Lehmann J. A handful of carbon [J]. *Nature*, 2007, 447: 143-144.

[8] 孙永明, 李国学, 张夫道, 等. 中国农业废弃物资源现状与发展战略 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21(8): 169-173.
SUN Yongming, LI Guoxue, ZHANG Fudao, et al. Status quo and development strategy of agricultural waste resources in China [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2005, 21(8): 169-173.

[9] 毕于远, 高春雨, 王亚琴. 中国秸秆资源数量估算 [J]. *工程学报*, 2009, 2(12): 211-217.
BI Yuyuan, GAO Chunyu, WANG Yaqin. Estimation of straw resource quantity in China [J]. *Journal of Engineering*, 2009, 2(12): 211-217.

[10] 孙铁珩, 宋雪英. 中国农业环境问题与对策 [J]. *农业现代化*, 2008(6): 646-652.
SUN Tiehang, SONG Xueying. Agricultural environmental problems and countermeasures in China [J]. *Agricultural Modernization*, 2008 (6): 646-652.

[11] 甘露, 马君, 李世桂. 规模化养殖业环境污染问题与对策 [J]. *农机化研究*, 2006(6): 22-24.
GAN Lu, MA Jun, LI Shigui. Environmental pollution problems and countermeasures of large-scale aquaculture [J]. *Research on Agricultural Mechanization*, 2006(6) : 22-24.

[12] 朱茜. 2018年中国污泥处理处置产业行业现状分析与前景预测 [R/OL]. [2018 02.24]. <https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/180224-b4a1ce29.html>.

ZHU Qian. China sludge treatment and disposal industry status analysis and prospect forecast in 2018[R/OL]. Report from Foresight Research Institute (Baidu) [2018-02-24]. <https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/180224-b4a1ce29.html>.

[13] 张巍. 生物质秸秆炭化炉的结构设计与试验研究 [D]. 石河子大学, 2013年.
ZHANG Wei. Design and experimental study of biomass straw carbonization furnace[D]. 2013 Master's Thesis of Shi Hezi University.

[14] 陈红红. 低温热解炭化特性研究及中试炭化炉的开发 [D]. 南京师范大学, 2016年 硕士学位论文.
CHEN Honghong. Research on carbonization characteristics of low temperature pyrolysis and development of pilot carbonization furnace [D]. 2016 Master's Thesis of Nanjing Normal University.

[15] 何键, 郭大伟, 谢善良. 连续式秸秆炭化炉的设计 [J]. *农业科技与装备*, 2013(3):39-40.
He Jian, Guo Dawei, Xie Shanliang. Design of continuous straw carbonization furnace [J]. *Agricultural Technology and Equipment*, 2013 (3): 39-40.

[16] 张丽, 魏正英, 张海春, 等. 高效连续式生物质炭化炉的研制与试验 [J]. *农机化学报*, 2016, 37(7):195-198, 221.
ZHANG Li, WEI Zhengying, ZHANG Haichun, et al. Study on the design and test of high efficiency continuous biomass carbonization furnace [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, 37 (7): 195-198, 221.

[17] Gul shamim, Whalen J K, Thomas B W, et al. Physical-chemical properties and microbial response in biochar amended soils: Mechanisms and future directions [J]. *Agricultural ecosystem & Environment*, 2015, 206:46-59.

[18] 张本升, 江泽慧, 任海清, 等. 竹炭微观构造形貌表征 [J]. *竹子研究汇刊*, 2006(4):1-8.
ZHANG Bensheng, JIANG Zehui, REN Haiqing, et al. Morphological characterization of bamboo charcoal microstructure [J]. *Bamboo Research*, 2006, 25 (4): 1-8.

- [19] 袁帅, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭的类型理化性质及其研究展望 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5):1402-1417.
YUAN Shuai, ZHAO Lixin, MENG Haibo, et al. The main type of biochar and their properties and its prospect research [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(5):1402-1417.
- [20] Jin J, Li Y, Zhang J, et al. Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016: S0304389416307725.
- [21] Wang X, Li C, Zhang B, et al. Migration and risk assessment of heavy metals in sewage sludge during hydrothermal treatment combined with pyrolysis[J]. Bioresource Technology, 2016: S0960852416313360.
- [22] Subedi R, Taupe N, Pellissetti S, et al. Greenhouse gas emissions and soil properties following amendment with manure-derived biochars: Influence of pyrolysis temperature and feedstock type[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 166:73-83.
- [23] 孙涛, 朱新萍, 李典鹏, 等. 不同原料生物炭理化性质的对比分析 [J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(6):543-549.
SUN Tao, ZHU Xiping, LI Dianpeng, et al. Comparison of Biochar Characteristic from Different Raw Materials [J]. Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(6):543-549.
- [24] 吕豪豪, 刘玉学, 杨生茂. 生物质炭化技术及其在农林废弃物资源化利用中的应用 [J]. 浙江农业科学, 2015, 56 (1): 19-22.
LV Haohao, Liu Yuxue, Yang Shengmao. Biomass carbonization technology and its application in resource utilization of agricultural and forestry waste [J]. Zhejiang Agricultural science, 2015, 56 (1): 19-22.
- [25] 常学秀, 施晓东. 土壤重金属污染与食品安全 [J]. 环境科学导刊, 2001, 20(z1):21-24.
CHANG Xuexiu, SHI Xiaodong. Soil heavy metal pollution and food safety [J]. Environmental science guide, 2001, 20(z1):21-24.
- [26] 万会利. 浅谈土壤重金属污染对食品安全的影响及应对措施 [J]. 现代化农业, 2016(9):33-34.
WAN Huili. Impact of soil heavy metal pollution on food safety and countermeasures [J]. Modern agriculture, 2016(9):33-34.
- [27] 胡旭, 李璐, 张钦发, 等. 环境激素类污染物对食品安全的影响分析 [J]. 食品工业, 2014(9):230-234.
HU Xu, LI Lu, ZHANG Qinfa, et al. Analysis of the impact of environmental hormone pollutants on food safety [J]. Food industry, 2014(9):230-234.
- [28] 王谨, 韩剑众. 饲料中重金属和抗生素对土壤和蔬菜的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2008 24(4):90-93.
WANG J, HAN Jianzhong. Effects of heavy metals and antibiotics in feed on soil and vegetables [J]. Journal of ecology and rural environment, 2008 24 (4) : 90-93.
- [29] 原鲁明, 赵立欣, 沈玉君, 等. 我国生物炭基肥生产工艺与设备研究进展 [J] 中国农业科技导报 2015,17(4):107-113.
LU Ming, ZHAO Lixin, SHEN Yujun, et al., Progress on production technology and equipment of biochar based fertilizer in China [J] China agricultural science and technology herald, 2015 17 (4) : 107-113.
- [30] 刘玉学, 唐旭, 杨生茂, 等. 生物炭对土壤磷素转化的影响及其机理研究进展 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6):1690-1695.
LIU Yuxue, TANG Xu, YANG Shengmao. Review on the effect of biochar on soil phosphor transformation and mechanisms [J]. Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(5):1690-1695.
- [31] 牛亚茹, 付祥峰, 邱良祝, 等. 施用生物炭对大棚土壤特性、黄瓜品质和根结线虫病的影响 [J]. 土壤, 2017,49(1):57-62.
NIU Yaru, FU Xiangfeng, QIU Liangzhu, et al. Effect of biochar on soil properties, cucumber quality and root-knot nematode disease in plastic greenhouse [J]. Soils, 2017, 49(1):57-62.
- [32] WU Weixiang, YANG Min, FENG Q, et al. Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment[J]. Biomass & Bioenergy, 2012, 47(4):268-276.
- [33] Leigh D Burnell, Franz Zehetner, Nicola Rampazzo, et al. Long term effect of biochar on soil physical properties [J]. Geoderma, 2016, 282:96-102.
- [34] Agegnehu G, Bass AM, Nelsen PN, et al. Biochar and biochar-compost as soil amendments: Effects on peanut yield, soil properties and greenhouse gas emissions in tropical North Queensland, Australia[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 213:72-85.
- [35] 陶朋闯, 陈效民, 靳泽文, 等. 生物炭于氮肥配施对旱地红壤土壤微生物量碳、氮和碳氮比的影响 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 231-235.
TAO Pengchuang, CHEN Xiaomin, JIN Zewen, et al. Application of biochar with nitrogen fertilizer on soil microbial biomass carbon, nitrogen, and ratio of carbon/nitrogen on land red soil [J]. Soil and Water Conservation, 2016, 30 (1) : 231-235.
- [36] Johannes Lehmann, et al. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation[J]. Science and Technology; Earthscan, 2015, 25(1):15801-15811(11).
- [37] 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]. ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY, 2010, 44(2):827-833.
- [38] Stewart C E, Zheng T Y, Botte J, et al. Co-generated fast pyrolysis biochar mitigation greenhouse gas emission and in-crease carbon sequestration in temperate soils [J] Global change Biology Bioenergy 2013, 5(2):153-164.
- [39] 张明江, 龙健, 李娟, 等. 生物质炭对茂兰喀斯特森林土壤呼吸与有机碳的影响 [J]. 土壤, 2018, 50(2):333-340.
ZHANG Mingjiang, LONG Jian, LI Juan, et al. Effects of biomass on soil respiration and organic carbon in Maolan karst forest [J]. Soil, 2018, 50 (2):333-340.
- [40] 张阿妍, 潘根兴, 李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28 (12): 2459-2463.
ZHANG A Y, PAN G X, LI L Q. Biochar and the effect on C stock enhancement, emission reduction of greenhouse gases and soil reclamation [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28 (12): 2459-2463.
- [41] Spokas K A, Koskineno W C, Baker J M, et al. Impacts of woodshop biochar additions on greenhouse gas production and sorption/ degradation of two herbicides in a mineral soil [J]. Chemosphere, 2009,77(4):574-581.
- [42] 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 Mingkui, GU Guoping, WANG Yang. Degradation characteristics of biomass carbon in soil [J]. Journal of Zhejiang University (agricultural and life sciences edition), 2012, 38(3): 329-335.
- [43] CAO X D, Harries W. Properties of dairy manure derived biochar pertinent to its potential use in remediation [J]. Biore-source Techno, 2010, 101(14):5222-5228.
- [44] 李力, 刘娅, 陆宇超, 等. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展 [J]. 环境化学, 2011, 30(8): 1411-1421.
LI Li, LIU Ya, LU Yuchao, et al. Review on progress of

- environmental effects and application of biochar [J]. *Environmental chemistry*, 2011, 30(8): 1411-1421.
- [45] 李江遐, 吴林春, 张军, 等. 生物炭修复土壤重金属污染的研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2015, 24(12):2075-2081.
LI Jiangya, WU Linchun, ZHANG Jun, et al. Research progress of biochar remediation of soil heavy metal pollution [J]. *Journal of ecological environment*, 2015, 24(12):2075-2081.
- [46] 陈玲桂. 生物炭输入对农田土壤重金属迁移的影响研究 [D]. 浙江大学, 2013.
CHEN Linggui. Effect of biochar input on heavy metal migration in farmland soil [D]. Zhejiang University, 2013.
- [47] 丁华毅. 生物炭的环境吸附行为及在土壤重金属镉污染治理中的应用 [D]. 厦门大学, 2014.
DING Huayi. Environmental adsorption behavior of biochar and its application in soil heavy metal Cadmium pollution control [D]. Xiamen University, 2014.
- [48] 李玉双, 胡晓钧, 宋雪英, 等. 城市工业污染场地土壤修复技术研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(10):6119-6122.
LI Yushuang, HU Xiaojun, SONG Xueming, et al. Research progress of soil remediation technology for urban industrial con-taminated sites [J]. *Anhui agricultural science*, 2012, 40(10) : 6119-6122
- [49] 李春平, 吴骏, 罗飞, 等. 某有机化工污染场地土壤与地下水风险评估 [J]. *土壤*, 2013, 45(5): 933-939.
LI Chunping, WU Jun, LUO Fei, et al. Risk assessment of soil and groundwater in a certain organic chemical pollution site [J]. *Soil*, 2013, 45(5) : 933-939.
- [50] 唐行灿, 张民. 生物炭修复污染土壤的研究进展 [J]. *环境科学导报*, 2014, 33(1):17-26.
TANG Xingcan, ZHANG Min. Research progress of biochar remediation of contaminated soil [J]. *Environmental science guide* 2014, 33 (1) : 17-26.
- [51] 金梁, 魏丹, 李玉梅, 等. 生物炭对有机无机污染物的修复作用与机理研究进展 [J]. *土壤通报*, 2016, 47(2):505-510.
JIN Liang, WEI Dan, LI Yumei, et al. Progress in research on the remediation effect and mechanism of biochar on organic and inorganic pollutants [J]. *Chinese soil science*, 2016, 47(2):505-510.
- [52] 李晓娜, 宋祥, 王芳, 等. 生物炭对有机污染物的吸附剂激励研究进展 [J]. *土壤学报*, 2016, 54(6):1313-1324.
LI Xiaona, SONG Xiang, WANG Fang, et al. Research progress on the adsorption and mechanism of biochar on organic pollutants [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 54 (6) : 1313-1324.
- [53] 吴楠, 乔敏, 朱永官. 猪场土壤中 5 种四环素抗性基因的检测和定量 [J]. *生态毒理学报*, 2009, 4(5):705-710.
WU Nan, QIAO Min, ZHU Yongguan. Detection and quantification of five tetracycline resistance genes in pig soil [J]. *Journal of ecotoxicology*, 2009, 4(5):705-710.
- [54] Tada Tatsuya, Nhung Pham Hong, Shimada Kayo, et al. Emergence of colistin-resistant *Escherichia coli* clinical isolates harboring *mcr-1* in Vietnam.[J].*International Journal of Infectious diseases*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijid.2017.07>.
- [55] LIANG B, Roberts A P, Xu X, et al. Characterization of a transferable plasmid-borne *mcr-1* in a colistin-resistant *Shigella flexneri* isolate [J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 2018, 84 (8): AEM.02655-17.
- [56] Shen Yingbo , Zhou HongWei, Xu Jiao, et al. Environmental factors associated with high incidence of *mcr-1* carriage in humans across China [J].*Nature Microbiology*, 2018, 3 (9): 1-10.
- [57] 邹威, 罗义, 周启星. 畜禽粪便中抗生素抗性基因 (ARGs) 污染问题及环境调控 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33 (12): 2281-2287.
ZOU W, LOU Y, ZHOU QX. Contamination of antibiotic resistance gene (ARGs) in livestock and poultry feces and its environmental regulation [J]. *Journal of agricultural and environmental sciences*, 2014, 33 (12): 2281-2287.
- [58] 张俊亚, 魏源送, 陈梅雪, 等. 畜禽粪便生物处理与土地利用全过程中抗生素和重金属抗性基因的赋存与转归特征研究进展 [J]. *环境科学学报*, 2015, 35 (4): 935-946.
ZHANG J Y, WEI YX, CHEN M X, et al. The occurrence and regression of antibiotic and heavy metal resistance genes in livestock and poultry manure during the whole process of biological treatment and land use [J]. *Journal of environmental science*, 2015, 35 (4): 935-946.
- [59] 孟海波, 丁京涛, 沈玉君, 等. 一种高效去除畜禽粪便中抗生素的处理方法 [P]. CN 108503399A 2018 09.07.
MENG Haimbo, DING Jingtao, SHEN Yujun, et al. A treatment method for highly efficient removal of antibiotics in livestock and poultry feces CN 108503399A [P]. 2018.09.07.
- [60] 张兰河, 王佳佳, 高敏, 等. 施用畜禽粪便有机肥土壤抗生素抗性基因污染状况 [J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32 (4): 664-669.
ZHANG Janhe, WANG Jiajia, GAO Min, et al. Contamination of antibiotic resistance genes in soil fertilized with livestock and poultry manure [J]. *Journal of ecology and rural environment*, 2016, 32 (4): 664-669.
- [61] Xue ZHOU, Min QIAO, Jian QIANG, et al. Turning Pig Manure into Biochar can Effectively Mitigate Antibiotic Resistance Genes as Organic Fertilizer [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 649: 3482-3493.
- [62] 于涛, 张杰, 曹建华, 等. 活性炭纤维在卷烟滤嘴方面的应用研究进展 [J]. *中国烟草学报*, 2009, 15(4): 82-86.
YU Tao, ZHANG Jie, CAO Jianhua, et al. Advances in the application of activated carbon in cigarette filter[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2009, 15 (4): 82-86.
- [63] 余其昌, 黄菲, 陈森林, 等. 臭氧改性对活性炭表面性能的影响及在卷烟中的应用 [J]. *烟草科技*, 2017,50(11):27-38.
YU Qichang, HUANG Fei, CHEN Senlin, et al. Effect of ozone modification on surface properties of activated carbon and its application to cigarette filter [J]. *Tobacco Science & Technology*, 2017, 50 (11): 27-38.
- [64] 解晓翠, 常纪恒, 于川芳, 等. 炭在卷烟滤嘴中的应用研究综述 [J]. *郑州轻工业学院学报 (自然科学版)*, 2012, 27 (2): 40-45.
XIE Xiaocui, CHANG Jiheng, YU Chuanfang, et al. Review of the application research of activated carbon in cigarette filter[J]. *Journal of Zhengzhou University of Light Industry(Natural Science Edition)*, 2012, 27 (2): 40-45.
- [65] 杨继亮, 岳贤田, 周建斌. 活性炭对卷烟烟气中汞和铅的吸附 [J]. *工程学报*, 2016, 1(1):68-73.
YANG Jiliang, YUE Xiantian, ZHOU Jianbin. The adsorption of Hg and Pb in the cigarette mainstream smoke by activated carbon [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2016, 1 (1): 68-73.
- [66] 国家烟草专卖局. YC/T 265—2008 烟用活性炭 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
State Tobacco Monopoly Administration. YC/T 265-2008 Activated Carbon for Cigarette Use [S]. Beijing: Standard Press, 2008.
- [67] 韩非, 王瑞. 烟草秸秆生物有机肥产业化绿色发展的现状与策略 [J]. *中国烟草学报*, 2016, 22(3):126-132.
HAN Fei, WANG Rui. Status quo and development of tobacco stalks organic fertilizer industrialization [J]. *Acta Tabacaria Sinica*,

- 2016, 22 (3):126-132.
- [68] 彭金辉, 张利波, 张世敏, 等. 综合利用烟杆废料制取优质活性炭[J]. 林产化学与工业, 2002, 22(3):85-87.
PENG Jinhui, ZHANG Limin, ZHANG Shimin, et al. Preparation of activated carbon from from tobacco stems [J]. Chemis-try and industry of forest products, 2002, 22(3): 85-87.
- [69] 吴清海. 烟草行业生物炭基肥工程研究中心在毕节挂牌成立 [N/OL]. 东方烟草报, 2018- 01-24[2019-02-26]. http://www.eastobacco.com/pub/web/ycny/kjxy/201801/t20180124_474721.html.
- [70] 管恩娜, 曾志坤, 杨波, 等. 生物质炭对植烟土壤质量及烤烟生长的影响 [J]. 中国烟草科学, 2016, 37 (2): 36-41.
GUAN Enna, ZENG Zhikun, YANG Bo, et al. Effects of biomass carbon on soil quality and flue-cured tobacco growth [J]. China tobacco science, 2016, 37 (2): 36-41.
- [71] 葛少华, 丁松爽, 杨永锋, 等. 生物炭与化肥配施对土壤氮素及烤烟利用的影响 [J]. 中国烟草学报, 2018, 24(2):84-92.
GE Shaohua, DING Songshuang, YANG Yongfeng, et al. Effects of biochar fertilizer nitrogen application on soil nitrogen and flue-cured tobacco utilization [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2018, 24 (2): 84-92.
- [72] 吴嘉楠, 彭桂新, 杨永锋, 等. 生物炭与氮肥配施对土壤生物特性和烤烟但素吸收的影响 [J]. 中国烟草学报, 2018, 24(3):53-61.
WU Jianan, PENG Guixin, YANG Yongfeng, et al. Effects of mined biochar and nitrogen fertilizer on biological characteristics of soil and nitrogen absorption of flue-cured tobacco[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2018, 24 (3): 53-61.
- [73] 叶协锋, 李志鹏于晓娜, 等. 生物炭用量对植烟土壤碳库及烤后烟叶质量的影响 [J]. 中国烟草学报, 2015, 21(5):33-41.
YE Xiefeng, LI Zhipeng, YU Xiaona, et al. Effects of biochar content on soil carbon pool of tobacco planting and quality of cured tobacco leaves [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2015, 21(5):33-41.
- [74] PAN JH, ZHUANG SY, SHI XZ, et al. Effect of soil amendment with Biochar on growth yield and output of Flue-cured Tobacco in Southern Anhui Province [J]. Agricultural Science and Technology, 2015, 16(12):2682-2687, 2702.
- [75] 陈懿, 陈伟, 高维常, 等. 生物炭对烤烟根系生长的影响及其作用机理 [J]. 烟草科技, 2017 (6):26-32.
CHEN Yi, CHEN Wei, GAO Weichang, et al. Effects of tobacco stalk biochar on root growth of flue-cured tobacco and its ac-tion mechanism [J]. Tobacco science and technology, 2017(6) : 26-32.
- [76] 于晓娜, 周涵君, 章晓范, 等. 基于盆栽实验的施用烟杆生物炭对植烟土壤呼吸速率的影响 [J]. 烟草科技 2017, 50(12):29-37.
YU Xiaona, ZHOU Hanjun, ZHANG Xiaofan, et al. Effects of application of tobacco stalk biochar on respiration rate of to-bacco-planting soil based on pot experiment [J]. Tobacco science and technology, 2017, 50 (12): 29-37.
- [77] 叶协锋, 于晓娜, 李志鹏, 等. 两种生物碳对植烟土壤生物学特性的影响 [J]. 中国烟草学报 2016, 22(6):78-84.
YE Xiefeng, YU Xiaona, LI Zhipeng, et al. Effects of two kinds of biological carbon on biological characteristics of tobacco soil [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2016, 22 (6): 78-84.
- [78] 叶协锋, 周涵君, 李志鹏, 等. 生物炭类型对植烟土壤碳库及烤后烟叶质量的影响 [J]. 中国烟草学报, 2018, 24(1):77-85.
YE Xiefeng, ZHOU Hanjun, LI Zhipeng, et al. Effects of biochar types on soil carbon pool and quality of cured tobacco leaves [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2018, 24(1):77-85.
- [79] 王梦雅, 苻云蓬, 黄婷婷, 等. 等碳量添加不同有机物料对土壤有机碳组分及土壤呼吸的影响 [J]. 中国烟草学报, 2018, 24(2):65-73.
WANG Mengya, FU Yunpeng, HUANG Tingting, et al. Effects of several materials added with different carbon content on soil organic carbon components and soil respiration[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2018, 24(2): 65-73.
- [80] 邓建强, 谭军, 施河丽, 等. 生物炭对土地整治区土壤微生物调控效应 [J]. 中国烟草学报, 2018,24(3):46-52.
DENG Jianqiang, TAN Jun, SHI Heli, et al. Effects of biochar on soil microbial regulation in soil remediation areas [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2018, 24(3): 46-52.
- [81] 韩毅, 陈发元, 赵铭钦, 等. 生物炭与有机无机肥配施对烟草和土壤汞含量及保护酶活性的影响 [J]. 山东农业科学, 2016, 48(8) :74-79.
HAN Yi, CHEN Fayuan, ZHAO Mingqin, et al. Effects of biochar combined with organic and inorganic fertilizer on mercury content and protective enzyme activity in tobacco and soil [J]. Shandong agricultural science, 2016, 48(8): 74-79.
- [82] 许跃奇, 赵铭钦, 尤方芳, 等. 生物炭与常规施肥对烟草生长及镉污染吸收的影响 [J]. 土壤, 2016(3):510-515.
Xu Yueqi, ZHAO Mingqin, YOU Fangfang, et al. Effects of biochar and conventional fertilization on tobacco growth and cad-mium pollution absorption [J]. Soil, 2016(3):510-515.
- [83] 周涵君, 于晓娜, 秦焱鹤, 等. 施用生物碳对 Cd 污染土壤生物特性及土壤呼吸速率的影响 [J]. 中国烟草学报, 2017, 23(6):61-68.
ZHOU Hanjun, YU Xiaona, QIN Yihe, et al. Effects of biochar application on biological characteristics and soil respiration rate of Cd contaminated soil [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2017, 23 (6): 61-68.

Biochar and soil remediation technologies and their research development in tobacco industry

CAO Zhihong

Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: Research and investigation in raw materials, production process, components and structural characteristics of biochar are reviewed. The application of biochar in agricultural production, CO₂ sequestration and mitigation, remediation of soil contaminated by antibiotics, heavy metals, and organics pollution were discussed. Progresses of research and application of biochar in tobacco industry were also reviewed. Suggestions on further research and application of biochar technology in tobacco industry were proposed.

Keywords: biochar; agricultural application; Csequestration and mitigation; soil remediation; tobacco industry