

田间“限氧喷雾”制备生物炭技术与炭质表征^①

校亮^{1,2}, 韦婧¹, 袁国栋³, 毕冬雪^{1,2},
王洁^{1,2}, 冯丽蓉^{1,2}, 沈冠华³

1. 中国科学院烟台海岸带研究所/海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东烟台 264003;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 肇庆学院环境与化学工程学院, 广东肇庆 526061

摘要: 生物炭具有改良土壤、固碳减排、吸附重金属和有机污染物等方面的有益作用, 但其农业和环保应用面临着成本过高这一瓶颈问题. 在田间直接将生物质转化为生物炭, 可节省原材料收集与炭品运输等环节的费用, 降低使用成本. 可通过喷雾技术在田间限氧条件下实现生物炭的制备, 其工艺如下: 物料在槽内经逐层压实后, 采用单向引燃、逐次喷雾的方式辅助竹柳和棉秆成炭; 采用多位点引燃、逐层喷雾的方式辅助芦苇成炭. 制炭期间, 土槽中的侧壁开孔方管起通气和限氧作用以控制适燃, 铁质密网起限氧、防尘和提供喷雾通道等作用以控制成炭. 采用该技术制备的生物炭表现出了较好的同槽均质性和异槽同质性, 成炭率达 30%, 制备得到的炭含有丰富的羧基(0.71~1.43 mol/kg)、酚羟基(0.43~1.09 mol/kg)官能团, 且具有较大的比表面积(45.5~83.2 m²/g). 田间“限氧喷雾”技术为生物炭的制备提供了新的思路和技术选项, 也为其农业和环保应用创造了条件.

关键词: 田间限氧炭化; 喷雾技术; 生物炭制备; 表面官能团; 比表面积

中图分类号: S216

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2019)06-0015-06

当前, 我国农田已不堪重负, 良田沃土退化、土壤污染、耕地地力下降、养分贫瘠等问题凸显, 存在严重的生态环境和食品安全隐患. 为应对这些问题, 近年来, 诸如护耕、休耕、农田涵养水源以及土壤增碳等计划逐步启动和实施^[1-4]. 在土壤增碳方面, 被学术界誉为“黑色黄金”的生物炭, 已成为调理土壤健康的环境功能材料. 它是由生物质在缺氧条件下经高温裂解生成的孔状固体物质, 有较大的比表面积、较多的含氧活性基团及一些植物营养元素^[5]; 其不仅具有改善土壤性质、提升土壤肥力、减轻土壤污染等农艺和生态功能^[6-10], 也是增加土壤碳汇、减少 N₂O 和 CH₄ 等温室气体排放的技术选项之一^[11-12].

《全国农业可持续发展规划(2015—2030年)》首次将“生物炭改良土壤”明确写入扶持政策范畴, 与秸秆还田、深耕深松、积造施用有机肥和种植绿肥同列^[13]. 可见秸秆炭化还田已具备市场化条件, 建设生物炭产业是践行秸秆炭化还田理念的体现. 但是目前生物炭产业在我国尚处于培育阶段, 其制造多见于采用热裂解技术和水热炭化法在实验室和小型炭炉中进行^[14-17], 应用实例也多见于科研用途, 未能在农业生产中大规模推广使用, 这主要是因为面临着使用成本过高这一瓶颈问题^[18-19]. 若能在田间直接将秸秆转化为生物炭, 并应用于退化土壤的改良与污染环境的修复, 不仅能够节省秸秆收集与前处理、制炭场地与设备运维、成品运输等环节费用, 大幅降低制炭成本, 又能够为提升地力、净化土壤、固碳减排等做出新的有益贡献^[20].

本研究以黄河三角洲地区常见的农林生物质(棉花秸秆、芦苇、竹柳)为原料, 探究将其在田间直接转

① 收稿日期: 2018-09-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200303); 山东省重点研发计划项目(2016CYJS05A01-1); 国家自然科学基金青年基金项目(41501522).

作者简介: 校亮(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事土壤改良与修复材料的研究.

通信作者: 袁国栋, 特聘教授, 博士.

化为生物炭的技术,以期获得性能稳定的生物炭产品.目的在于有效地降低生物炭的制备和使用成本,并为其制备和应用提供新的技术选项和思路——田间原位炭化还田.

1 试验材料与分析方法

1.1 供试材料与试验地点

本研究依托黄河三角洲地区,以当地林业局 2016 年冬季在林场、农田和滩地收集的该地区常见的竹柳、棉秆与芦苇等农林废弃物为生物质原料,于 2017 年 8 月,在东营市河口区仙河镇黄河三角洲综合训练基地农业开发利用试验场开展了田间“限氧喷雾”制备生物炭的方法探究试验.

1.2 田间限氧制炭设备^[21]

农林生物质田间限氧制炭槽体结构示意图如图 1.

- 1) 制炭土槽,规格:600 cm×30 cm×30 cm(长×宽×高);
- 2) 侧壁开孔的方管,方管规格:600 cm×10 cm×10 cm(长×宽×高),壁面开方孔,方孔规格:10 cm×10 cm(边长×边长),每面 3~4 个,方孔均匀分布在方管侧壁,通气孔率为 4.33%^[22];
- 3) 铁质密网:规格 650 cm×80 cm,格网规格:0.2 cm×0.2 cm;
- 4) 喷雾装置:农用电动可调压式喷雾器;
- 5) 测温仪器:非接触式红外测温仪,型号:DT8833(北京华盛昌),量程:50~800 °C,分辨率:0.1 °C;
- 6) 其他辅助设备:铁锹、铁锚、砖块、固体酒精等.

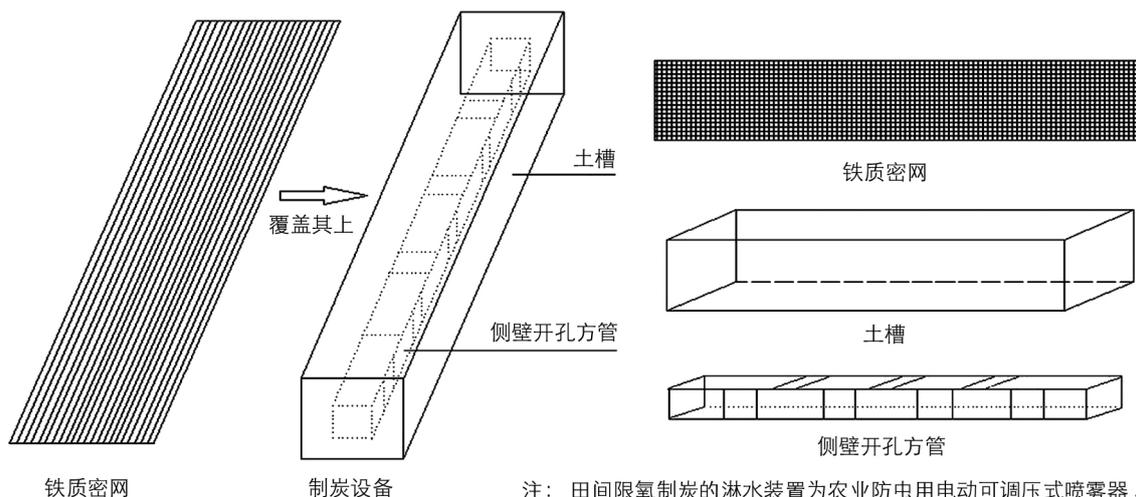


图 1 田间制炭槽体结构示意图

1.3 生物炭的表征分析^[23-24]

1) 成炭率:生物炭的产率用炭化处理前、后物料干质量差的百分比进行计算;2) 灰分含量:生物炭样品在马弗炉中经 800 °C 条件下灰化处理 4 h 后其残余灰渣含量占总物料质量的百分比;3) pH 值:生物炭与去离子水 1:5 混合(w/v, 160 r/min 下震荡 24 h),静置,离心,过滤,待体系平衡后用 pH 计(Five Easy Plus, METTLER TOLEDO)测定;4) 元素组成:元素分析仪(Vario Micro cube, 德国 Elementar);5) 官能团含量:酸碱滴定法;6) 比表面积的测定用氮气吸附 BET 法在全自动比表面积和孔径分布分析仪(AutosorbIQ, 美国 Quantachrome)上进行.

2 田间制备生物炭的方法

2.1 田间“限氧喷雾”制炭的思路起源

生物炭最早发现于巴西亚马逊河流域,这里分布着一层深厚而富碳的肥沃土壤,其农作物产量明显高于附近其他土壤.研究发现,这种土属人为土,是前哥伦比亚印第安人为了提高土壤肥力把各种农林垃圾

烧成炭后施到土壤中,使得此区域的土壤成为整个亚马逊流域中最优质的土壤之一^[25-28]。这一发现激发了人们对生物炭研究的兴趣,揭开了生物炭研究的序幕。

本文田间“限氧喷雾”制炭的思路源于森林火灾生成的黑炭及关中平原一带农民针对冬季果树修剪后残枝落叶堆肥的启示。森林火灾被雷雨浇灭后会留下黑炭;在关中平原种植经果林的地区,农民在果园挖槽起垄,将冬季从果树上修剪下来的残枝落叶填入槽内并点燃,再将垄上土壤轻覆在槽面,待来年春天灌水,加速沤肥,以提升地力。春耕时可观察到土壤中混有焦黑色的粒状多孔物质,由此可见,在有火及水的情况下在田间制备生物炭是有可能的。

基于上述思路,我们设计了田间“限氧喷雾”制炭技术,经过多次实践筛选限氧方式和喷雾控温条件,并将制备得到的生物炭进行实验室表征,明确其特征性质。

2.2 田间“限氧喷雾”制炭的技术方法

1) 在田间挖掘 600 cm×30 cm×30 cm(长×宽×高)的简易土槽,填充生物质原料(竹柳/棉秆/芦苇)至土槽体积的 2/3 处,压实。2) 随后将侧壁开孔的方管置于槽体的物料之上并居中放置(方管在物料填充至槽体 2/3 体积铺设,为较优的铺设部位。试验发现,方管填充至槽体中部不利于淋水后距离槽面 1/3 体积物料的燃烧,主要是由于淋水后槽面物料湿度增加,若通风不佳,则不利于燃烧)。3) 继续填充农林废弃物直至与槽面平齐,压实。4) 将铁质密网平铺在槽面之上,用砖块固定。其中,侧壁开孔方管起到通气、限氧的作用,一方面解决了槽内深部秸秆燃烧的需氧问题,另一方面也有效控制了空气与物料的接触面积,调节物料的燃烧状况。铁质密网不仅为生物炭生成后的喷雾操作提供了通道;同时,喷雾过程会在铁质密网的格状微网表面生成水膜,限制了槽内物料与外界空气的接触面积,起到了限氧的作用;此外,铁质密网上在喷水操作过程中生成的水膜还可起到防止烟尘扬起的作用。田间“限氧喷雾”制备生物炭过程如图 2。

对于竹柳、棉秆等木质素物料,多为不规则柱状枝条,直径介于 0.5~3.0 cm 间,填充过程虽经多次压实,但依旧存在较大空隙,其制炭引火过程采用单侧引燃的方式进行。具体操作为,自槽体一端用固体酒精引燃物料,受热压差作用,明火会以类似于“退潮”的方式自引燃端向槽体另一端蔓延;适燃秸秆自火头部位约 5~8 cm 会发生弯曲上翘,并在重力作用下折断跌落;此时,开启电动喷雾器阀门,手持喷杆将喷头伸至跌落物上,喷杆的倾斜角度介于 45°~60°之间,均匀喷雾至跌落的物体上,该物质便会由发黑泛红状态经短暂水雾后生成焦黑色的固态多孔物质。喷雾过程自引燃端至槽体另一端依据秸秆燃烧进程逐次进行,直至槽内秸秆全部生成生物炭后结束,此过程约需 1.5~2 h,需水约 8 L。

对于芦苇等纤维素类物料,多为规则的柱状中空/中虚壳体,直径在 0.3~0.5 cm 之间,填充压实后较为致密,空隙较少,单侧引火后燃烧部位仅为与空气接触面,



图2 田间限氧喷雾制炭

且短时间后会自动熄灭。该类物料的制炭引火过程采用多位点引燃的方式进行。具体操作为,采用直径为 3 cm 的铁锚在槽面的铁质密网上沿槽长方向对称于侧壁开孔方管每隔 50 cm 钻取网孔 1 个,共计 22 个网眼,将固体酒精灌入网眼并引燃,火焰会迅速蔓延至槽内与空气接触的物料界面;此时,开启电动喷雾器阀门,调节喷杆角度,将喷头垂直放置在距离物料界面约 20~30 cm 处,并均匀喷雾至火焰上。火焰变小、暗火内延,并逐层引燃了槽体深部的秸秆。此燃烧过程中无明火,多见于红色蓬松状物质向槽内深部秸秆蔓延。这一现象的发生主要缘于如下作用:其一,喷雾器高压喷雾后火焰收缩,表层燃烧的秸秆温度降低、湿度增加,而深部秸秆则较为干燥、容易引燃,引起暗火内延现象的发生;其二,表层秸秆燃烧后与深层秸秆间产生热压差,加之侧壁开孔方管的通气作用,加剧了热压差的形成和空气流通,进一步促进了槽体深部秸秆的内燃。待芦苇秸秆自表层至内芯逐层受暗火引燃成炭后,均匀喷雾至火红色物质上,该物质便会

经短暂水雾后生成焦黑色的固态蓬松物质, 此过程约需 3 h, 需水约 10 L.

采用非接触式红外测温仪探测结果显示, 同槽物料不同部位的炭体(每 1 m 槽长内探测 1 次、共计 6 次)和同一物料分批入槽制得的炭(同一物料在同一槽体内以相同填充量分 6 次制炭)的成炭温度较为均一. 竹柳秸秆的成炭温度介于 323~375 °C, 棉花秸秆的成炭温度介于 450~460 °C, 芦苇秸秆的成炭温度介于 230~241 °C. 一般而言, 物源一致的情况下, 生物炭的性质主要受成炭温度影响^[29-31]. 数据表明, 田间限氧制炭的成炭温度表现出了较好的同槽均一性和异槽同质性, 我们进一步对制备得到的生物炭进行实验室表征和性能比较分析, 以明确采用此方法是否可获得性质稳定的生物炭产品.

3 生物炭的表征与比较分析

表 1 展示了农林生物质在田间经“限氧喷雾”技术制备的生物炭产品的基本理化性质, 它们都呈现出了碱性 pH 值(7.99~9.21), 这与传统用高温裂解装置制备的生物炭相似. 同时, 采用田间“限氧喷雾”技术制备的生物炭也表现出了较高的成炭率(26.3%~34.1%), 保存了较多的营养元素 N(0.44%~0.63%). 更为重要的是, 获得的生物炭产品的比表面积大(45.5~83.2 m²/g), 含有丰富的表面官能团: 羧基量介于 0.71~1.43 mol/kg, 酚羟基量介于 0.43~1.09 mol/kg. 因此, 它们具备吸附剂的基本属性和较大的阳离子交换能力. 本研究制炭过程中成炭温度较为稳定, 说明采用该技术制备的生物炭质地较为均一. 此外, 生物质炭的成炭率在 30%左右, 也就是说, 与秸秆直接焚烧相比减少了约 1/3 的 CO₂ 排放量. 生物炭的基本理化性质分析结果表明, 采用田间“限氧喷雾”技术制备生成的炭质材料是不同于秸秆直接燃烧生成的草木灰的. 该方法的关键意义在于能够为生物炭的制备提供新的思路和技术选项, 也首次证明了可以采用简单易行、成本低廉的方法在田间制备出生物炭.

表 1 田间制备生物炭的基本理化性质

样品名称	成炭温度/ °C	成炭率/ %	pH	元素组成/%				—COOH 量/ /(mol·kg ⁻¹)	—OH 量/ /(mol·kg ⁻¹)	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)
				N	C	H	S			
竹柳炭	330±43.1	34.1±2.7	8.08±0.02	0.44±0.01	42.24±1.96	1.43±0.08	0.31±0.03	1.25±0.07	1.09±0.01	83.2
棉花炭	453±3.7	30.1±1.0	9.21±0.03	0.63±0.02	43.49±1.55	1.78±0.04	0.60±0.17	0.71±0.02	0.44±0.03	45.5
芦苇炭	237±3.2	26.3±3.4	7.99±0.02	0.58±0.01	32.49±0.03	1.21±0.03	0.59±0.05	1.43±0.02	0.43±0.03	82.5

4 结论与展望

我国理论生物质资源大约为 50 亿 t/年, 其中农作物秸秆 10 亿多 t^[20], 其可再生性和有害物质含量低等属性使得生物质还田具有营养元素和有机质循环利用等生态学意义, 但由于影响下季作物生长及病虫害增加等原因, 秸秆还田实际上不容易推广, 而秸秆炭化还田可提供新的技术选项; 此外, 随着新时代生态文明建设步伐的加快, 城市园林废弃物处理问题也面临挑战.

本文提出的在田间制备生物炭的技术, 主要通过“限氧喷雾”过程实现生物炭的制备. 其中, 竹柳和棉花等木质素类物料采用单向引燃、逐次喷雾成炭的方式进行, 芦苇等纤维素类物料采用多位点引燃、逐层喷雾成炭的方式进行. 该方法成炭率高, 且操作简单、易学, 制成的生物炭产品性能稳定, 含有丰富的表面官能团和较大的比表面积.

原材料的收集、运输及炭生产设备的购置与运行费用对生物炭生产商是一笔不少的开支(每吨生物炭成本大于 1 000 元), 而炭成品的运输费进一步提高了生物炭的成本. 高成本无疑限制了生物炭的规模化使用. 田间“限氧喷雾”制炭技术突破了传统高温裂解技术需要建立工厂和炭炉来制备生物质炭的局限, 规避了原材料和生物质炭产品的运输费用、省去了仓储成本、不需要昂贵的设备, 制炭效率大幅提升且不再受场地的限制. 该技术有望让农民在自己的地里用自家的农林生物质废弃物制备出低成本生物炭(200 元/t), 用于当地农业生产和土壤改良, 做到就地取材、就地制备、就地使用, 帮助实现提升地力、减轻污染等国家战略目标, 也可将生物炭产品外销, 变废为宝, 增加农村就业, 提高农民收入, 服务乡村振兴战略.

参考文献:

- [1] 彭凌,丁恩俊,谢德体. 中国耕地数量变化与耕地保护政策关系的实证分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(11): 103-110.
- [2] 江娟丽,杨庆媛,阎建忠,等. 耕地休耕的研究进展与现实借鉴 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(1): 165-171.
- [3] 李晶,张薇薇. 关中-天水经济区农田生态系统涵养水源价值量时空变化 [J]. 华南农业大学学报, 2014, 35(3): 52-57.
- [4] 程琨,潘根兴. “千分之四”土壤增碳计划对中国的挑战与应对策略 [J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(5): 457-464.
- [5] ANTAL M J, GRØNLI M. The Art, Science, and Technology of Charcoal Production [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003, 42(8): 1619-1640.
- [6] LEHMANN J, RILLIG M C, THIES J, et al. Biochar Effects on Soil Biota-A review [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43(9): 1812-1836.
- [7] GUL S, WHALEN J K, THOMAS B W, et al. Physico-chemical Properties and Microbial Responses in Biochar-amended Soils: Mechanisms and Future Directions [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 206: 46-59.
- [8] JEFFERY S, BEZEMER T M, CORNELISSEN G, et al. The Way Forward in Biochar Research: Targeting Trade-offs Between the Potential Wins [J]. Global Change Biology Bioenergy, 2015, 7(1): 1-13.
- [9] TAN X F, LIU Y G, ZENG G M, et al. Application of Biochar for the Removal of Pollutants from Aqueous Solutions [J]. Chemosphere, 2015, 125: 70-85.
- [10] WU W D, LI J H, LAN T, et al. Unraveling Sorption of Lead in Aqueous Solutions by Chemically Modified Biochar Derived from Coconut Fiber: A Microscopic and Spectroscopic Investigation [J]. Science of the Total Environment, 2017, 576: 766-774.
- [11] LEHMANN J. Bio-energy in the Black [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2007, 5(7): 381-387.
- [12] Wu M X, Feng Q B, Sun X, et al. Rice (*Oryza sativa* L.) Plantation Affects the Stability of Biochar in Paddy Soil [J]. Scientific Reports, 2015(5): 2045-2322.
- [13] 中华人民共和国农业农村部.《全国农业可持续发展规划(2015-2030年)》[R/OL]. (2015-05-28). http://www.moa.gov.cn/nybgb/2015/liu/201712/t20171219_6103855.htm.
- [14] MOHAN D, PITTMAN C U, STEELE P H. Pyrolysis of Wood/biomass for Bio-oil: A Critical Review [J]. Energy and Fuels, 2006, 20(3): 848-889.
- [15] WU W D, LI J H, NIAZI N K, et al. Influence of Pyrolysis Temperature on Lead Immobilization by Chemically Modified Coconut Fiber-derived Biochars in Aqueous Environments [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(22): 22890-22896.
- [16] LIBRA J A, RO K S, KAMMANN C, et al. Hydro-thermal Carbonization of Biomass Residuals: a Comparative Review of the Chemistry, Processes and Applications of Wet and Dry Pyrolysis [J]. Biofuels, 2011, 2(1): 71-106.
- [17] KANG S M, LI X L, FAN J, et al. Characterization of Hydrochars Produced by Hydro-thermal Carbonization of Lignin, Cellulose, D-xylose, and Wood Meal [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(26): 9023-9031.
- [18] 袁帅,赵立欣,孟海波,等. 生物炭主要类型、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.
- [19] MAROUSEK J, VOCHOZKA M, PLACHY J, et al. Glory and Misery of Biochar [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2017, 19(2): 311-317.
- [20] 王亚静,王飞,石祖梁,等. 基于农业供给侧结构性改革背景的秸秆资源与利用研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(6): 13-20.
- [21] 袁国栋,校亮. 一种可移动式田间原位限氧制备生物炭的设备与方法: 201711395117.4 [P]. 2017-12-22.
- [22] INYANG M, GAO B, PULLAMMANAPPALLIL P, et al. Biochar from Anaerobically Digested Sugarcane Bagasse [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(22): 8868-8872.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 258-260.
- [24] 王群. 生物质源和制炭温度对生物炭构效的影响 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [25] HARDER B. Smoldered-Earth Policy: Created by Ancient Amazonian Natives, Fertile, Dark Soils Retain Abundant Carbon [J]. Science News, 2006, 169(9): 133-133.

- [26] MARRIS E. Putting the Carbon Back: Black is the New Green [J]. *Nature*, 2006, 442(7103): 624-626.
- [27] LEHMANN J. A Handful of Carbon [J]. *Nature*, 2007, 447(7141): 143-144.
- [28] RENNER R. Rethinking Biochar [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(17): 5932-5933.
- [29] KATYAL S, THAMBIMUTHU K, VALIX M. Carbonisation of Bagasse in a Fixed Bed Reactor: Influence of Process Variables on Char Yield and Characteristics [J]. *Renewable Energy*, 2003, 28(5): 713-725.
- [30] LEHMANN J, GAUNT J, RONDON M. Biochar Sequestration in Terrestrial Ecosystems: A Review [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2): 395-419.
- [31] YUE Y, LIN Q M, XU Y Q, et al. Slow Pyrolysis as a Measure for Rapidly Treating Cow Manure and the Biochar Characteristics [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2017, 124: 355-361.

Biochars Made in the Field Using Coupled Oxygen-Limiting and Mist-Spraying Technique and Their Properties

XIAO Liang^{1,2}, WEI Jing¹, YUAN Guo-dong³, BI Dong-xue^{1,2},
WANG Jie^{1,2}, FENG Li-rong^{1,2}, SHEN Guan-hua³

1. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation/

Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai Shandong 264003, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Environmental and Chemical Engineering, Zhaoqing University, Zhaoqing Guangdong 526061, China

Abstract: Biochars have a range of functions from improving soil properties and remediating contaminated soils to reducing greenhouse gas emission from soil and increasing carbon content in soil. Their large-scale application, however, has been constrained by high costs of production and transportation. To solve this problem, a novel method has been developed for biochar production in the field with a coupled oxygen-limiting and mist-spraying technique. Agricultural and forest residues are placed in a soil trough and compacted layer by layer, a steel square tube with multiple holes is imbedded in the biomass, and an iron mesh is put on the top of it. The tube has the function of adjusting ventilation and oxygen supply to maintain flame temperature during biomass burning; and the mesh allows for the formation of a water film to limit oxygen supply. In field operations, cotton stalk or Salicaceae in the trough is ignited at one direction, whereas reed straw is ignited at multiple positions, for biomass carbonization, followed by water mist spraying layer by layer for a quick stop of carbonization. The biochars thus obtained have a yield of about 30% and are relatively homogeneous. They have abundant carboxyl group (0.71–1.43 mol/kg) and phenolic hydroxyl group (0.43–1.09 mol/kg) and a specific surface area of 45.5–83.2 m²/g. Being able to produce good-quality biochars directly in the field at a low cost, this method makes feasible agricultural and environmental application of biochars.

Key words: oxygen-limiting carbonization in field; mist-spraying technique; biochar production; surface functional group; specific surface area

责任编辑 周仁惠