

# 制炭温度对玉米和小麦生物质炭理化性质的影响<sup>①</sup>

许燕萍<sup>1,2</sup>, 谢祖彬<sup>1\*</sup>, 朱建国<sup>1</sup>, 刘钢<sup>1</sup>, 刘琦<sup>1,2</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 通过缓慢高温裂解方式生产不同温度的小麦和玉米生物质炭, 并对其性质进行分析。结果显示, 生物质炭性质受裂解温度和生物质种类的影响而表现出差异。当裂解温度从 300℃ 升高到 500℃ 时, 小麦生物质炭产率从 44.3% 降低到 38.4%, 其生物质炭碳含量从 617.9 g/kg 升高到 674.0 g/kg; 玉米生物质炭产率从 42.8%(300℃) 降低到 29.7%(500℃), 其生物质炭碳含量从 574.8 g/kg(300℃) 升高到 651.1 g/kg(500℃)。生物质炭 pH、灰分含量、全磷含量等也随制炭温度升高而升高, 小麦生物质炭 pH 从 7.59(300℃) 上升到 10.51(500℃), 灰分含量从 186.1 g/kg(300℃) 升高到 268.2 g/kg(500℃), 全磷含量从 0.70 g/kg(300℃) 升高到 1.10 g/kg(500℃); 玉米生物质炭 pH 从 9.35(300℃) 升高到 10.12(500℃), 全磷含量从 2.34 g/kg(300℃) 升高到 4.37 g/kg(500℃)。说明制炭温度和生物质种类对生物质炭理化性质具有决定性作用。

**关键词:** 裂解温度; 小麦生物质炭; 玉米生物质炭; 生物质炭性质

中图分类号: S3-33

生物质炭(biochar)是近几年国际上出现的新名词, 是生物质无氧高温裂解后的产品<sup>[1-2]</sup>。巴西亚马逊河流域考古发现, 生物质炭不但能长期存留在土壤中, 且能提高土壤生产力<sup>[3]</sup>。这一发现引起了科学家对生物质炭的研究热情<sup>[3-5]</sup>。据报道, 生物质炭包含难以分解的碳组分, 可提高矿质营养养分的有效性和土壤保水性, 同时可固定碳长达千万年之久。生物质炭利用还具有不可忽视的经济效益, 如因土壤质量提高产生的农业价值、可再生能源、永久固定碳、废物利用、环保效益及温室气体减排产生的经济价值等等<sup>[6]</sup>。Searchinger 等<sup>[7]</sup>和 Tilman 等<sup>[8]</sup>认为生物质炭不仅可提高土地利用的可持续性, 还是巨大的碳汇, 能够降低生物质不同处理方式引起的土地竞争, 且生物燃料有利于能源安全、减缓气候变暖、生物多样性, 而不影响粮食生产。

国际上生物质炭研究越来越多, 相关报道也逐步增加。但迄今为止, 生物质炭对农业生产影响等的研究结果各不相同, 既有促进作用<sup>[9-11]</sup>, 亦有抑制作用或没有影响<sup>[9]</sup>。各位研究学者所使用的生物质炭理化化学性质差异, 被认为是引起实验结果差异的主要原

因之一。生物质种类不同、制炭方式和条件参数不同, 所获得的生物质炭性质不尽相同<sup>[12]</sup>。研究表明生物质炭性质很大程度上取决于制炭条件(主要是裂解温度和时间)和制炭材料的性质(如小麦、玉米、木材等)<sup>[13-14]</sup>。目前, 国际上有很多不同的生物质炭生产方法, 如最典型的慢速高温裂解, 其产物中生物质炭、生物油及合成气的比例大致相同, 在成炭过程中, 生物质颗粒径、反应炉承压力、气化物组成成分等, 均会造成生物质炭性质差异<sup>[13]</sup>。据报道, 烧炭温度越高, 生物质炭产率越低, 但其碳含量却越高<sup>[15-18]</sup>。Williams 等<sup>[19]</sup>发现由木头制成的生物质炭, 其灰分通常都低于 2%, 而橡胶轮胎制成的生物质炭的灰分在 10% 之上。本文以冬小麦秸秆和玉米秸秆为原料, 研究不同温度下, 慢速高温裂解生产生物质炭的性质, 为生物质炭标准制定提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 生物质炭烧制方法

采用特制的炭化炉(专利批准号: 200920232 191.9, 中国科学院南京土壤研究所研制 ZBX1 型),

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171191, 40871146)、科技部国家科技支撑项目(2008BAD95B05)、中国科学院创新项目(KZCX2-YW-Q1-07, KZCX2-EW-409)和美国 Blue Moon Fund 资金资助。

\* 通讯作者(zbxie@issas.ac.cn)

作者简介: 许燕萍(1988—), 女, 福建德化人, 硕士研究生, 研究方向为生物炭农业利用。E-mail: ypxu@issas.ac.cn

烧制生物质炭。该设备可控温、控氧，结构简单、密闭性能好、产品质量稳定、造价低、操作简单。烧制程序：将原材料放入炭化炉反应腔内，关闭炉门，开启加热程序和控温升温程序。温度控制采用“梯级升温法”控制温度，首先将温度升到 200℃，然后以 50℃为一梯级，在达到每一设定过渡温度后，维持 1.5 h。在达到最高目标温度后，维持加热直至出气口再无气体溢出后，关闭加热程序，冷却。本实验以小麦秸秆和玉米秸秆为原料，烧制一系列不同温度(300℃、400℃、500℃)的小麦生物质炭和玉米生物质炭。

### 1.2 生物质炭理化性质分析

生物质炭原材料小麦秸秆和玉米秸秆性质：小麦秸秆全碳、全氮、全磷、全钾分别为 423.5、4.7、0.35 和 22.57 g/kg，pH 为 8.26；玉米秸秆全碳、全氮含量分别为 412.0 和 8.5 g/kg。

生物质炭前处理：碾碎，过 60 目筛，储存备用。pH：采用  $m_{\text{生物质炭}}/v_{\text{去离子水}} = 1/20$  [20]，用玻璃棒间歇搅拌 1 h 后，静置，用 pH 计测定；无机氮：采用凯氏定氮仪，KCl 提取-MgO-代氏合金蒸馏法测定， $m_{\text{生物质炭}}/v_{\text{KCl}} = 1/100$ ，室温下振荡 4 h [21]；速效磷(AP)：采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法测定， $m_{\text{生物质炭}}/v_{\text{NaHCO}_3} = 1/150$ ，室温下振荡 4 h [22]；全碳(TC)：采用森林土壤有机质测定方法(GB 7857-87) [23]；全氮(TN)：采用干烧法(CN 元素分析仪，dry combustion)测定；灰分：采用“森林植物与森林枯枝落叶层粗灰分的测定(GB7885-87)” [22]方法测定。

表 1 列出 400 条件下，玉米和小麦生物质炭 Fe、Ca、Mg 等植物必需元素含量值，作为参考(流动分析仪，方法：参照《陆地生物群落调查观测与分析》 [22])。

表 1 400℃制炭温度下生物质炭微量元素含量  
Table 1 Element contents of biochars pyrolyzed at different temperatures

材料	温度	Fe (g/kg)	Ca (g/kg)	Mg (g/kg)	Na (g/kg)	Al (g/kg)	S (g/kg)	Mn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Ni (mg/kg)
小麦生物质炭	400℃	1.80	10.32	2.22	0.96	0.31	3.72	76.02	23.34	48.26	7.20
玉米生物质炭	400℃	7.30	8.40	4.93	0.66	0.86	1.75	202.46	322.88	214.79	10.83

### 1.3 生物质炭产率计算

如 M kg 生物质材料(干重)，慢速高温裂解后获得 X kg 生物质炭，则生物质炭产率 =  $X/M \times 100\%$ ，即生物质炭产率为生物质炭与相应生物质材料的干重比。

### 1.4 统计分析

数据运用 Excel2003 软件和 SPSS13.0 软件进行分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 制炭温度对生物质炭产率的影响

表 2 结果表明，制炭温度对小麦和玉米生物质炭

产率具有较大的影响，制炭温度越高，成品生物质炭产率越低。当温度从 300℃增加到 500℃，玉米和小麦生物质炭产率分别从 42.8% 和 44.3% 降低到了 29.7% 和 38.4%，这与多数研究的结论相一致 [15-18]。Dutta [24] 认为生物质炭产率与高温裂解温度成反比，如生物质炭产率从 300℃的 75%(10 min 燃烧时间)降低到了 400℃(20 min 燃烧时间)时的 35%。Şensöz 和 Mukaddes [25] 及 Valenzuela-Calahorra 等 [26] 在研究纤维素、木质纤维素生物质炭时，也得出了相似的结论。因为裂解温度越高，裂解过程中挥发物质(先是水分，接着是烃类组分、焦油蒸气、H<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>)损失越多 [17,27]。

表 2 制炭温度对生物质炭产率、无机态氮和速效磷含量的影响  
Table 2 Yields, inorganic N contents and available P contents of biochars pyrolyzed at different temperatures

材料	制炭温度	生物质炭产率(%)	无机态氮(mg/kg)	速效磷(mg/kg)
小麦秸秆			67.67 bc	238.84 e
小麦生物质炭	300℃	44.3	65.62 bcd	276.72 e
	400℃	41.0	43.06 cde	473.40 c
	500℃	38.4	36.91 de	353.33 d
玉米秸秆			323.98 a	803.84 a
玉米生物质炭	300℃	42.8	84.07 b	721.61 b
	400℃	37.3	14.35 e	806.73 a
	500℃	29.7	63.57 bcd	798.95 a

注：表中同列不同小写字母表示处理间差异在  $P < 0.05$  水平显著。

相同温度下,小麦生物质炭产率高于玉米生物质炭的产率,前者产率为 44.3%(300℃)、41.0%(400℃)和 38.4%(500℃),后者为 42.8%(300℃)、37.3%(400℃)和 29.7%(500℃)(表 2)。可见不同生物质对生物质炭产率也有影响,这也与其他学者研究结果相似。如 Demirbas<sup>[17]</sup>认为木质素含量高的生物质(如橄榄壳),其生物质炭产率较高。Verheijen 等<sup>[12]</sup>也报道,虽然任何有机原料都可以裂解成生物质炭,但生物质炭产率及生物质炭碳含量、气体和液体产量等却各不相同。

## 2.2 制炭温度对生物质炭无机态氮和速效磷的影响

实验分析结果表明,小麦生物质炭无机态氮随着温度升高而降低。不同温度小麦生物质炭无机氮含量大小为:300℃(65.62 mg/kg)>400℃(43.06 mg/kg)>500℃(36.91 mg/kg),均小于小麦秸秆(67.67 mg/kg)(表 2),且 500℃的无机氮含量最低,并达到了显著水平( $P<0.05$ )。玉米生物质炭无机态氮含量为:300℃(84.07 mg/kg)>500℃(63.57 mg/kg)>400℃(14.35 mg/kg)(表 2),均显著低于玉米秸秆(323.98 mg/kg),且 400℃的玉米生物质炭无机态氮含量明显低于其他两个温度的( $P<0.05$ )。不同生物质的生物质炭无机态氮含量存在差异,但不显著(表 2)。温度为 300℃和 500℃的小麦生物质炭无机态氮含量高于同温度玉米生物质炭,400℃的则相反。

结果亦表明,小麦生物质炭速效磷含量大小顺序为:400℃(473.40 mg/kg)>500℃(353.33 mg/kg)>300℃(276.72 mg/kg),均比小麦秸秆速效磷含量(238.84 mg/kg)高(表 2)。不同温度玉米生物质炭速效磷含量相差不大,为 400℃(806.73 mg/kg)>玉米秸秆(803.84 mg/kg)>500℃(798.95 mg/kg)>300℃(721.61 mg/kg)(表 2)。同时,同一温度的小麦生物质炭和玉米生物质炭速效磷含量差异显著( $P<0.05$ )。可见,小麦生物质炭和玉米生物质炭相比,小麦秸秆炭比玉米秸秆炭具有更高的供磷能力。

生物质炭生产过程中,有机质会发生收缩、损耗等反应,导致最终产品性质不同<sup>[28]</sup>。裂解过程中的

操作条件,如升温速率、最高温度、持续时间、压强、惰性气体流量、反应炉的类型和形状等,以及前处理(如干燥、化学活化)和后处理(如筛分、活化),都会影响生物质炭的物理结构和性质<sup>[28-30]</sup>。据报道,生物质炭生产条件不同,造成了家禽粪生物质炭氮含量不同<sup>[1,31]</sup>。Chan 和 Xu<sup>[32]</sup>认为生物质炭的大部分氮以植物不可利用的形态存在,因此无机氮含量极低;他们在研究不同材料(木头、作物秸秆、草本、花生壳等)生物质炭性质的实验中,发现生物质炭无机氮含量仅为 0~2.0 mg/kg。这与本实验中小麦和玉米生物质炭无机氮含量较低的结论一致。

## 2.3 制炭温度对生物质炭碳氮磷钾元素含量的影响

碳含量极高却难以分解,是生物质炭最基本的性质之一,但制炭条件和生物质种类不同,生物质炭全碳含量相差很大(172~905 g/kg)<sup>[32]</sup>。本实验结果显示,小麦和玉米生物质炭含碳量均随着温度的升高而升高(表 3)。这与多数研究的结论相同:烧炭温度越高,生物质炭产率越低,但其碳含量与灰分含量却越高<sup>[15-18]</sup>。而同一温度下,小麦生物质炭和玉米生物质炭含碳量相差不大。相比之下,制炭温度对小麦和玉米生物质炭含碳量影响较大,可能是因为小麦和玉米同属于禾本科植物,结构相近。但有研究发现不同生物质炭含碳量可达 65%~80%,如木头生物质炭含碳量高达 90%<sup>[17,29]</sup>。

从表 3 的数据可知,小麦和玉米生物质炭全氮含量随着制炭温度升高而降低;相同温度下,玉米生物质炭全氮含量较小麦生物质炭的高。据报道,因生物质种类不同,生物质炭全氮含量变化范围可达 1.8~56.4 g/kg<sup>[32]</sup>,但生物质炭氮以植物不可利用的形态存在,如芳香氮和杂环氮<sup>[33]</sup>。尽管如此,生物质炭可以提高矿物氮素有效率的报道却不少。如,Lehmann 等<sup>[34]</sup>的盆栽实验研究发现,生物质炭有效降低了氮肥的淋失<sup>[34-35]</sup>。小麦和玉米生物质炭的全磷和全钾含量均随制炭温度升高而增加(表 3)。与速效磷含量一样,生物质炭具有较高的全磷和全钾含量。相对于小麦生物质炭而言,玉米生物质炭具有较高的全磷含量

表 3 制炭温度对生物质炭碳氮磷钾元素含量、灰分含量及 pH 的影响  
Table 3 Total C, N, P, K, ash content and pH of biochars pyrolyzed at different temperatures

材料	温度	全氮(g/kg)	全碳(g/kg)	C/N	灰分(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	pH
小麦生物质炭	300℃	7.1 b	617.9 a	87.15 b	186.1 d	0.70 c	46.32 b	7.59 e
	400℃	5.7 c	632.7 a	112.35 b	252.0 ab	0.89 c	48.93 ab	10.12 b
	500℃	4.6 d	674.0 a	146.76 a	268.2 a	1.10 c	52.41 a	10.51 a
玉米生物质炭	300℃	13.5 a	574.8 b	42.58 c	169.8 d	2.34 b	11.75 d	9.35 d
	400℃	13.4 a	597.7 a	44.60 c	210.4 c	2.47 b	13.42 d	9.61 c
	500℃	5.5 c	651.1 a	118.38 b	229.1 bc	4.37 a	26.45 c	10.12 b

注:同列不同小写字母表示处理间差异在  $P<0.05$  水平显著。

和较低的全钾含量。Lima 和 Marshall<sup>[31]</sup>及 Chan 等<sup>[1]</sup>认为家禽粪肥生物质炭含氮量不同归根于制炭条件(如温度)不同; 300℃的生物质炭氮含量最高<sup>[27]</sup>。Hossaine 等<sup>[36]</sup>也发现,在低于 500℃的高温裂解过程中,磷钾硫通常以生物有效性的方式重组。为此,Chan 和 Xu<sup>[32]</sup>认为,低于 500℃下生产的生物质炭具有更高营养价值,同时,更有益于提高作物产量<sup>[37]</sup>。同样的,生物质的物理化学性质,也是决定生物质炭性质的重要因素之一。Chan 和 Xu<sup>[32]</sup>研究发现生物质炭全磷全钾含量因原料种类不同变化显著,分别为 2.7~480 g/kg 和 1.0~58.0 g/kg。Cao 等<sup>[38]</sup>也提出富含磷的动物残体可作为生产高磷肥料和减缓土壤铅污染的原料;利用纸浆废液废浆生产生物质炭时,其灰分中含有相当大含量的碳酸盐和皂土成分<sup>[19]</sup>。

C/N 比是有机物质(基底物质)释放无机氮的能力的重要指标。生物质炭 C/N 比例变化极大,因生物质种类不同,变化范围可达 7~500<sup>[32]</sup>。本实验中,小麦生物质炭和玉米生物质炭 C/N 比例分别为 87.15~146.76 和 42.58~118.38(表 3)。Asai 等<sup>[39]</sup>测得木头生物质炭 C/N 比为 281,Nguyen 和 Lehmann<sup>[20]</sup>测得橡树生物质炭和玉米生物质炭的 C/N 比分别为 759(350℃)、737(600℃)和 73(350℃)、86(600℃),其玉米生物质炭的 C/N 比例与本实验的结果相近。

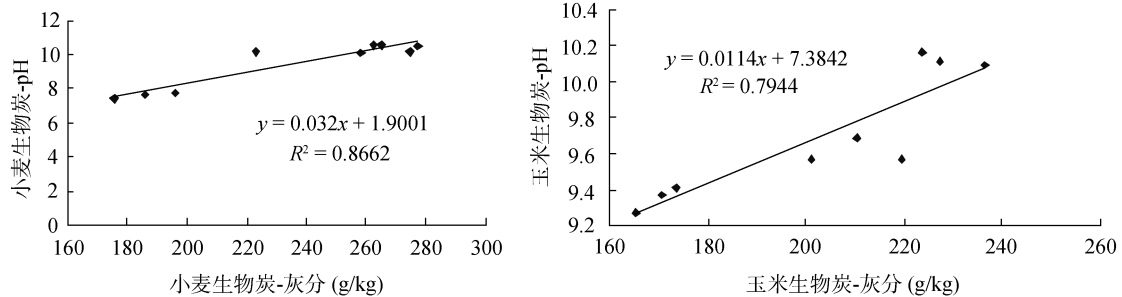


图 1 小麦、玉米生物质炭灰分含量与 pH 相关性  
Fig. 1 Correlations between ash content and pH of wheat/corn biochars

### 3 结论

生物质炭性质受裂解温度和生物质性质影响。生物质炭产率、碳含量、氮含量和生物质炭吸水能力等均随裂解温度升高而降低;pH 随裂解温度升高而升高,并与灰分含量呈正相关。生物质炭碳氮含量显著高于小麦、玉米秸秆碳氮含量,但生物质裂解过程中无机态氮的损失应引起更大关注。

#### 参考文献:

[1] Chan KY, Zwieten LV, Meszaros I, Downie A, Joseph S. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil am-

#### 2.4 制炭温度对生物质炭 pH 及灰分含量的影响

生物质炭的 pH 趋于中性偏碱性,且裂解温度越高,pH 越高<sup>[1,3,20,39-40]</sup>。结果表明,生物质炭 pH 值及其灰分含量均随裂解温度升高而升高,小麦生物质炭 pH 7.59~10.51,灰分含量为 186.1~268.2 g/kg;玉米生物质炭 pH: 500℃(10.12)>400℃(9.61)>300℃(9.35),灰分含量为 169.8~229.1 g/kg(表 3);小麦生物质炭和玉米生物质炭 pH 存在显著性差异( $P<0.05$ )。Chan 和 Xu<sup>[32]</sup>研究也发现,不同种类的生物质炭 pH 变化显著,其中绿色废物生物质炭最低(6.2),家禽粪生物质炭最高(9.6)。

生物质炭之所以呈碱性,是因为它含有一定量的灰分,灰分越高,pH 越高<sup>[3]</sup>,主要原因是矿质元素如 Na、K、Mg、Ca 等以氧化物或碳酸盐的形式存在于灰分中,溶于水后呈碱性。图 1 结果表明,小麦、玉米生物炭灰分含量越高,则生物炭 pH 越高,并达到统计显著水平( $P<0.05$ )。此结论与 Yuan 等<sup>[40]</sup>和 Singh 等<sup>[41]</sup>的研究结果相一致。由于畜禽粪便往往含有很高的灰分,畜禽粪便制成的生物质炭比木炭或秸秆炭有更高的 pH,如 400℃下家禽粪便烧制的炭的 pH 为 9.2<sup>[42]</sup>,而同样温度下的木炭 pH 为 7.67<sup>[41]</sup>。Cetin 等<sup>[43]</sup>等认为生物质炭灰分变化极大与原料中矿物质含量大小有关系,说明生物质原料与生物质炭产率密切相关。

endment[J]. Australian Journal of Soil Research, 2007, 45: 629-634

[2] Hertley W, Nicholas MD, Philip R, Lepp Nicholas W. Arsenic mobility in brownfield soils amended with green waste compost or biochar and planted with miscanthus[J]. Environmental Pollution, 2009, 157: 2 654-2 662

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

[4] Renner R. Rethinking biochar[J]. Environmental Science and Technology, 2007: 5 329-5 933

[5] Glaser B, Balashov E, Haumaier L, Guggenberger G, Zech W. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31: 669-678

- [6] Steiner C, Das KC, Melear ND, Lakly D. Reducing nitrogen Loss during poultry litter composting using biochar[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39: 1 236–1 242
- [7] Searchinger T, Heimlich R, Houghton RA, Fengxia D, Elobeid A, Fabiosa J, Tokgoz S, Hayes D, Tun-Hsiang Y. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land use change[J]. *Science*, 2008, 319: 1 338–1 340
- [8] Tilman D, Socolow R, Foley JA, Hill J, Larson E, Lynd L, Pacala S, Reilly J, Searchinger T, Somerville C, Williams R. Beneficial biofuels: The food, energy, and environment trilemma[J]. *Science*, 2009, 325 (5938): 270–271
- [9] Haefelea SM, Konboonc, Wongboon Y, Amarantea WS, Maarifatb AA, Pfeifferb EM, Knoblauch C. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems[J]. *Field Crops Research*, 2011: 430–440
- [10] Peng X, Ye LL, Wang CH, Zhou H, Sun B. Temperature and duration dependent rice straw derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011: 159–166
- [11] Uzoma1KC, Inoue M, Andry H, Fujimaki H, Zahoor A, Nishihara E. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition[J]. *Soil Use and Management*, 2011: 1–8
- [12] Verheijen F, Jeffery S, Bastos AC, Van der Velde M. Biochar Application to Soils-A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions[M]. Luxembourg: Office for the Official Publications of the European Communities, 2009: 149
- [13] Sohi S, Loez-Capel E, Krull E, Bol R. Biochar's Roles in Soil and Climate Change: A Review of Research Needs[R]. CSIRO Land and Water Science Report, 2009: 64
- [14] Brown R. Biochar production technology // Lehmann J, Joseph S. Biochar for Environmental Management: Science and Technology[C]. UK: Earthscan, 2009: 127–146
- [15] Daud WMAW, Ali WSW, Sulaiman MZ. Effect of carbonisation temperature of the yield and porosity of char produced from palm shell[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2001, 76: 1 281–1 285
- [16] Demirbas A. Carbonization ranking of selected biomass for charcoal, liquid and gaseous products[J]. *Energy Conversion and Management*, 2001, 42: 1 229–1 238
- [17] Demirbas A. Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2004, 72(2): 243–248
- [18] 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: 713–725
- [19] Williams AG, Audsley E, Sanders DL. Determining the environmental burdens and resource use in the production of agricultural and horticultural commodities[J]. Bedford: Cranfield University, 2006
- [20] Nguyen BT, Lehmann J. Black carbon decomposition under varying water regimes[J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40: 846–853
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [22] 董鸣. 陆地生物群落调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996
- [23] 刘光崧, 蒋能慧, 张连第, 刘兆礼. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996
- [24] Dutta B. Assessment of Pyrolysis Techniques of Lignocellulosic Biomass for Biochar Production[M]. Canada: McGill University, 2010
- [25] Şensöz S, Mukaddes C. Pyrolysis of Pine ( Pinus Brutia Ten.) Chips: 1. Effect of pyrolysis temperature and heating rate on the product yields[J]. *Energy Sources*, 2002, 24(4): 347–355
- [26] Valenzuela-Calahorro C, Bernalte-García A, Gómez-Serrano V, Bernalte-García MH. Influence of particle size and pyrolysis conditions on yield, density and some textural parameters of chars prepared from holm-oak wood[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1987, 12: 61–70
- [27] Baldock JA, Smernik RJ. Chemical composition and bioavailability of thermally altered Pinus resinosa (red pine) wood[J]. *Organic Geochemistry*, 2002, 33: 1093–1109
- [28] Amonette JE, Joseph S. Characteristics of biochar: Microchemical properties // Lehmann J, Joseph S. Biochar for Environmental Management: Science and Technology[C]. UK: Earthscan, 2009: 33–52
- [29] Antal Jr MJ, Grönli M. The art, science, and technology of charcoal production[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2003, 42(8): 1 619–1 640
- [30] Lua AC, Yang T, Guo J. Effects of pyrolysis conditions on the properties of activated carbons prepared from pistachio-nut shells[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2004, 72: 279–287
- [31] Lima IM, Marshall WE. Granular activated carbons from broiler manure: Physical, chemical and adsorptive properties[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96: 699–706
- [32] Chan KY, Xu Z. Biochar. Nutrient Properties and Their Enhancement // Lehmann J, Joseph S. Biochar for Environmental Management: Science and Technology[C]. UK: Earthscan, 2009: 67–84
- [33] Almendros G, Knicker H, González-Vila FJ. Rearrangement of carbon and nitrogen forms in peat after progressive thermal oxidation as determined by solid-state <sup>13</sup>C- and <sup>15</sup>N-NMR spectroscopy[J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34: 1 559–1 568
- [34] Lehmann J, Kern DC, Glaser B. Amazonian Dark Earths: Origin, Properties and Management[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003: 3–14
- [35] Steiner C, Glaser B, Teixeira WG, Lehmann J, Winfried B

- EH, Wolfgang Z. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(6): 893–899
- [36] Hossaine MK, Strezov V, Nelson P. Evaluation of Agricultural Char from Sewage Sludge[C]. Australia: Proceedings International Agrichar Initiative, 2007
- [37] Cao XD, Ma L, Gao B, Willie H. Dairy-Manure Derived Biochar Effectively Sorbs Lead and Atrazine[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43: 3 285–3 291
- [38] Gaskin JW, Steiner C, Harris K, Das KC, Bibens B. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use[J]. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2008, 51(6): 2 061–2 069
- [39] Asai H, Samson BK, Stephan HM, Songyikhangsuthor K, Homma K, Shiraiwa T, Horie T. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111: 81–84
- [40] Yuan JH, Xu RK, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102: 3 488–3 497
- [41] Singh B, Singh BP, Cowie AL. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48: 516–525
- [42] Hatton BJ, Singh B. Influence of Biochars on N<sub>2</sub>O emission and nitrogen leaching from two contrasting soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1 224–1 235
- [43] Cetin E, Moghtaderi B, Gupta R, Wall TF. Influence of pyrolysis conditions on the structure and gasification reactivity of biomass chars[J]. *Fuel*, 2004, 83(16): 2 139–2 150

## Effects of Pyrolysis Temperature on Physical and Chemical Properties of Corn Biochar and Wheat Biochar

XU Yan-ping<sup>1,2</sup>, XIE Zu-bin<sup>1\*</sup>, ZHU Jian-guo<sup>1</sup>, LIU Gang<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>1,2</sup>

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** The experiments investigated the properties of wheat and corn biochars pyrolyzed at different temperatures. Results showed that pyrolysis temperatures and original materials significantly influenced the properties of biochars. When pyrolysis temperature rose from 300°C to 500°C, the yeild of wheat and corn biochars (biochar produced by wheat straw and corn straw) decreased from 44.3% to 38.4% and from 42.8% to 29.7%, respectively; the total carbon content of wheat and corn biochars increased from 617.9 g/kg to 674.0 g/kg and from 574.8 g/kg to 651.1 g/kg respectively. For wheat biochar, pH and total P content increased from 7.59 (300°C) to 10.51 (500°C) and from 0.70 g/kg (300°C) to 1.10g/kg (500°C), respectively; for corn biochar, pH and total P content increased from 9.35(300°C) to 10.12(500°C) and from 2.34g/kg (300°C) to 4.37g/kg (500°C), respectively. It indicated that the properties of biochar are depended on the pyrolysis temperature and original materials.

**Key words:** Pyrolysis temperature, Wheat biochar, Corn biochar, Biochar's properties