

# 生物质炭热解炭化条件及其性质的文献分析

邱良祝, 朱脩玥, 马彪, 李恋卿, 潘根兴\*

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 江苏南京 210095)

**摘要:**【目的】因生物质炭具有对土壤固碳减排和作物增产以及环境修复的作用, 已受到国内外学者的广泛关注。本文回顾近年来生物质炭性质的相关研究, 分析农业应用中生物质炭性质问题, 阐述未来生物质炭性质研究发展趋势。【方法】收集了截至 2015 年 12 月文献出版物中 402 篇文献, 对数据按生物质炭来源地区、生产(制备)条件和性质类别进行分类评价。【结果】1) 目前研究中应用的生物质炭 68.2% 为实验室制备, 商业化生产比例只有 22.9%; 2) 生物质炭原料以林木为主, 占 44.3%, 其次是农作物剩余物, 占 38.6%。作物秸秆制备的生物质炭以中国研究最多; 3) 制备生物质炭的炭化温度范围在 300~700℃ (91.4%), 400~600℃ 的温度范围以商业化生产中较常用; 4) 生物质炭性质测定除总(有机)碳外, 常测指标还包括 pH、电导率、总氮、灰分和比表面积等, 潜在污染物指标测定较少, 而污泥炭中的重金属及植物源炭的多环芳烃潜在风险仍需研究; 5) 生物质炭的研究制备原料基本上取决于该区域内可收集的废弃物, 欧美地区主要关注林木生物质炭, 亚洲等的发展中国家则着重研究秸秆生物质炭。【结论】与欧美国家相比, 发展中国家的生物质炭商品化生产仍较薄弱。不同原料和温度生产的生物质炭性质和功能差别很大, 以秸秆为原料、中温炭化的生物质炭各方面性质较为平衡, 具备生物质炭大规模产业化的条件。此外, 生物质炭性质的测试注重理化性状, 对潜在风险污染物的分析普遍不足, 亟需开发一个标准来规范生物质炭最小测试指标集和合适的测试方法选择。

**关键词:** 生物质炭; 炭化条件; 作物秸秆; 潜在污染物; 文献分析

## Literature analysis on properties and pyrolyzing conditions of biochars

QIU Liang-zhu, ZHU Xiu-yue, MA Biao, LI Lian-qing, PAN Gen-xing\*

(Institute of Resources, Ecosystem and Environment for Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** 【Objectives】 Application of biochar in agriculture has recently received great attention around the world for its potential to enhance carbon sequestration, crop productivity and environment quality of soils. This paper reviewed global literature on biochar study, analysed biochar property depended of the production conditions and explored future research needs. 【Methods】 Data were retrieved from 402 publications available by the end of 2015, and were categorized in terms of study location regions, production/preparation conditions and properties of biochars. 【Results】 1) The studied biochars were mainly prepared in lab (68.2%), while a minor portion (22.9%) commercially produced. 2) Both woods (44.3%) and crop residues (38.6%) were the main feedstocks, though biochars from China were more from crop residues. 3) Pyrolyzing temperature ranged mostly (71.3%) from 300℃ to 600℃, but more often between 400–600℃ with commercial production. 4) Among the properties tested for biochars, total organic carbon was the most frequently measured, and those of pH, EC, total nitrogen, ash content and specific surface area were often tested. While concentrations of potentially toxic contaminants of biochar were often ignored, the potential risk of PAHs in plant-derived biochar and heavy metals in sludge biochars is still to be studied. 5) In addition, most biochars were produced with feedstocks available in the study area, and measurements of biochar properties and the methods needed to be upgraded and standardized.

收稿日期: 2017-02-13 接受日期: 2017-04-15

基金项目: 联合国生物质炭可持续土壤管理全球示范项目 (B4SS, GEF 2015); 江苏省农业科技自主创新资金项目 (CX [12] 3039) (江苏省有机固体废物资源化协同创新中心) 资助。

作者简介: 邱良祝 (1991—), 女, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 主要从事生物质炭与新型绿色农业技术研究。E-mail: qliangzhu@126.com

\* 通信作者 潘根兴 (1958—), 男, 浙江浦江人, 博士, 教授, 主要从事农业资源与生态环境研究。E-mail: panggenxing@aliyun.com

**【 Conclusions 】** While global studies on biochar were progressively increasing, attentions were paid more on biochar from woods in European and America but from crop residues in the developing countries. Moreover, commercialized biochar production was less developed in the developing countries compared to the EU and US. There were vast differences in biochar properties and functions across feedstocks and production conditions. But biochar from crop straws or under medium pyrolyzing temperature was more or less balanced between the properties of various significance, which could be concerned as a commercial production scenario. In addition, there was limited knowledge of potentially toxic pollutants. Finally, a framework of a minimum set of biochar testing including properties and the applicable methods should be upgraded.

**Key words:** biochar; pyrolysis condition; crop residue; potentially toxic contaminant; literature analysis

生物质炭是农作物秸秆等废弃生物质在限氧条件下经低温热解炭化产生的富含芳香烃类难降解有机物的固态物质<sup>[1]</sup>, 可以增加土壤中的碳封存, 从而减缓生态系统中碳周转速度<sup>[2-3]</sup>。研究表明, 将生物质炭施用于土壤中, 不仅解决了环境管理中大量生物废弃物的处置问题<sup>[4]</sup>, 而且在农业上具有显著的可持续减排潜力。生物质炭具有特殊的纳米孔隙结构及较大的表面积和表面电荷密度<sup>[5]</sup>, 且可改善土壤肥力<sup>[6]</sup>, 恢复已退化土壤<sup>[7]</sup>, 减少农业温室气体的排放<sup>[8-10]</sup>。Cui 等<sup>[11]</sup>研发了基于生物质炭的重金属快速钝化和土壤培肥增产技术, 在中等污染水平土壤上生产的稻米、小麦籽粒符合 WHO 食物限量标准。虽然对生物质炭的全球推广仍存在疑虑, 但关于生物质炭研究的全球文献数量每年仍在倍增<sup>[12]</sup>, 从事生物质炭生产和产品加工销售的企业仍在不断增多<sup>[13]</sup>。这首先可归结于 2009 年哥本哈根联合国气候变化大会对全球社会减缓气候变化的更强烈关切。2010 年, 生物质炭固碳减排作用再次得到全球关注, 结合土壤肥力与农业生产提升, 生物质炭农业应用备受推崇<sup>[12]</sup>, 联合国环境规划署于 2015 年启动了生物质炭土壤可持续治理全球示范项目, 在亚洲的中国、印度尼西亚和越南, 非洲的肯尼亚, 南美洲的秘鲁和大洋洲的澳大利亚实施对农民的培训 and 生物质炭的示范应用<sup>[14]</sup>。最近, Woolf 等<sup>[4]</sup>从能量平衡角度, 再次论证了生物质废弃物热解炭化生产生物质能源与生物质炭在全球温室气体减排中的巨大潜力。据 2016 年 10 月在南京召开的国际生物质炭协会董事局的预测<sup>[15]</sup>, 2030 年前后, 全球生物质炭的生产规模将达 10 亿吨, 产业总产值将超过 3000 亿美元。一个以生物质能源和生物质炭偶联生产的生物质产业将成为全球新兴制造业。

生物质炭的用途取决于其性质、结构与功能, 它们又与生物质炭的生产条件密切相关。尽管目前

生物质炭的研究和应用受到国内外学者的广泛关注, 但因制作生物质炭的原料来源广泛, 热解条件各异, 当前对其生产条件和原料的选择缺乏科学依据和规范。为了更好地了解并应用生物质炭, 本文搜集整理了关于生物质炭的生产情况及其性质的全球文献数据, 一方面通过分析原料和温度对生物质炭性质的影响, 作出一个相关关系的初步评价, 同时对不同生物质炭和生产条件进行比较, 探讨商业化生产生物质炭应考虑的生产条件和原料规范, 以为生物质炭在中国的推广应用提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本文主要收集分析文献报道的各种生物质炭的基础理化性质数据。文献检索方法: 在“Google scholar”(scholar.google.com)中输入“biochar”, 依据本研究目的、试验方法对搜索结果进行校对、核实, 并剔除一些数据有争议的文献。检索时间截止 2015 年 12 月。检索结束后, 为避免多篇文献报道同一种炭情况, 对已获得文献中的数据进行了去重, 共得到 402 篇有效文献。

### 1.2 数据库建立

从收集文献中, 提取和记载生物质炭的如下信息参数:

- 1) 生物质炭生产及其条件(来源地区、生物质原料、炭化方式、炭化温度、炭化时间及炭化效率);
- 2) 生物质炭的工业分析(灰分、挥发分、水分等);
- 3) 生物质炭的基本理化性质(比表面积、元素组成、有机质性质等);
- 4) 生物质炭的潜在污染物(PAHs、重金属等)。

如果参数在文章中以图形出现的, 通过 GetData 软件获取数据。最终获得 1792 组数据。

文献中相关数据的收集与整理在 Microsoft Excel 2013 中进行, 并建立数据库。图表中的数据以研究数量或者占研究总数的比率 (%) 表示。Kruskal-Wallis (K-W 检验): 单因素方差分析, 本文中用来研究不同原料生物质炭之间同一指标的差异显著性 (非参数多重比较检验, 用于比较具有预期平均值差异的不同组之间秩之和的差异性); Kolmogorov-Smirnov (K-S 检验): 本文是两个独立样本污泥炭和植物源炭相关指标对比, 用于推测两样本是否有相似的取值区间。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物质炭的生产使用概况

本文将各种生物质炭研究的文献发表时间分为三段: 2009 年之前, 2010~2012 年和 2013~

2015 年。如图 1 所示, 生物质炭生产所使用的原料种类越来越多, 虽然木炭所占比例逐年减少, 但一直占报道的生物质炭的最大份额; 作物残留物生物质炭使用率占其次, 比例随年份呈增加趋势; 此外, 草本生物质炭比例近几年显著增加, 污泥炭的研究频率也逐年升高。

从图 2 可以看出, 生物质炭研究报道分布在全球 6 个洲 41 个国家, 主要集中在亚洲、北美和欧洲, 在南美洲和非洲研究数量较少。从地区和国家层面来看, 发表相关文献最多的是中国, 其次是美国和澳大利亚, 欧洲国家研究分布比较平衡。本研究收集文献中涉及 200 多种生物质原料, 大致分为木类、草本、作物秸秆、畜禽粪便、污泥和城市有机废弃物。其中, 以林木和作物秸秆生物质炭的研究文献最多, 分别占 30.8% 和 26.4%。进一步分析, 作物秸秆生物质炭研究主要来自亚洲地区, 占全球

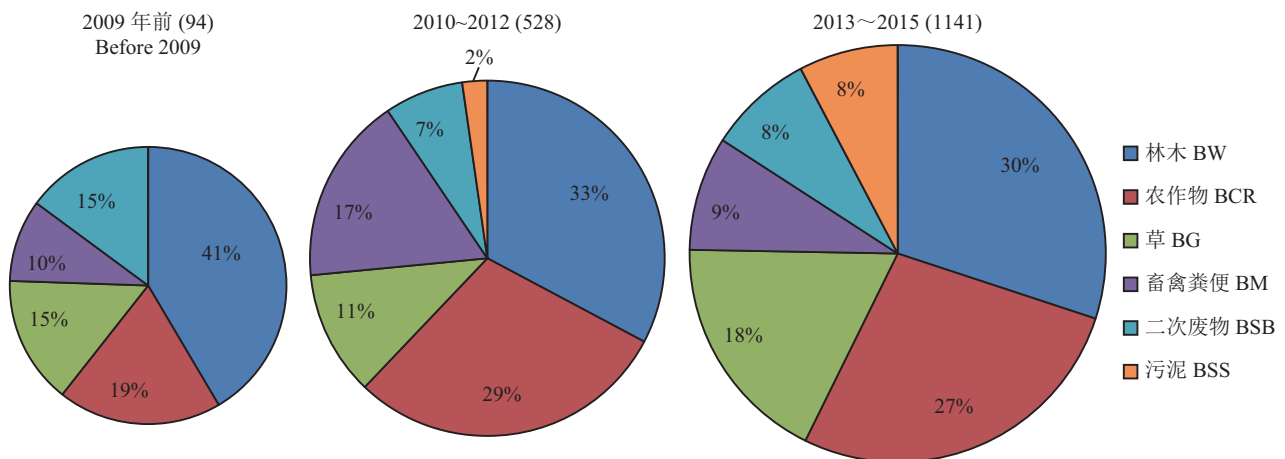


图 1 2009 年以来生物质炭原料来源的频度分布

Fig. 1 Frequency distribution of feedstocks of biochars since 2009

[注 (Note): BW—林木源生物质炭 Biochar from wood; BCR—农作物残余物生物质炭 Biochar from crop residue-; BG—草本植物生物质炭 Biochar from grass; BM—畜禽粪便生物质炭 Biochar from manure; BSB—二次废弃物生物质炭 Biochar from secondly-biowaste; BSS—污泥生物质炭 Biochar from sewage sludge. 括号中的数字代表研究的炭样本数量 The number in parenthesis represents the biochar samples in the publications.]

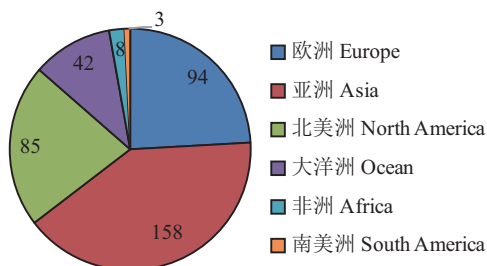


图 2 文献在地理上的分布

Fig. 2 Geographical distribution of the literature

[注 (Note): 阿拉伯数字为该区域内所报道的文献数量 The arabic numbers are the amount of articles reported in the region.]

作物源生物质炭文献的 53.0%。特别是, 中国作物秸秆生物质炭文献占亚洲全部文献的 82.7% (图 3)。

在发表的生物质炭相关文献报道中, 88.7% 的文献报道了明确的生物质炭生产条件, 商业化生产生物质炭 (commercial production, CP) 报道占 22.9%, 这些生物质炭是使用大型的工业化炭化设备生产或从市场上购买, 而 68.2% 的文献报道是实验室制备生产 (experimental production, EP) 的, 大多使用马弗炉、电炉或其他的小型炭化设备制作。从商业化生产来说, 欧洲文献报道达 45.1%, 而在亚洲和北美

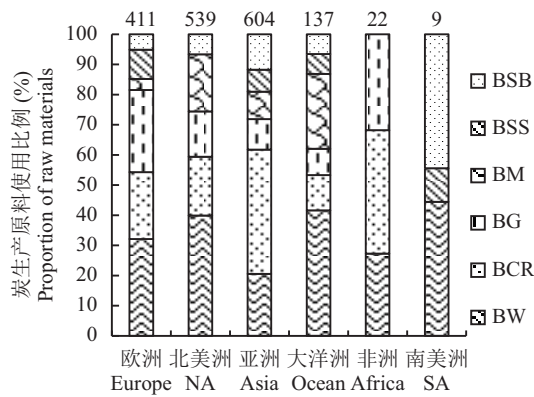


图3 世界不同区域生物质炭生产原料的使用比例  
Fig. 3 Proportion of raw materials used in biochar production in different regions of the world

[注 (Note): NA—North America; SA—South America; BW—林木源生物质炭 Biochar from wood; BCR—农作物残余物生物质炭 Biochar from crop residue; BG—草本植物生物质炭 Biochar from grass; BM—畜禽粪便生物质炭 Biochar from manure; BSB—二次废弃物生物质炭 Biochar from secondly-biowaste; BSS—污泥生物质炭 Biochar from sewage sludge. 柱上的阿拉伯数字为所研究生物质炭的样本总数 The Arabic number above the column is the sample size of biochar in literature research.]

洲分别占 28.2% 和 20.3%。在六类生物质炭中, 林木源和畜禽粪便源生物质炭商业化生产程度最高, 达 20% 左右, 作物残余物生物质炭商业化程度较低, 二次废弃物生物质炭商业化生产只占其总量的 6.9% (图 4)。

除了原料的多样化, 生物质炭的生产条件也各有不同。统计表明, 生物质炭生产过程中炭化温度在 200~1000℃ 不等, 但研究中炭化温度频率分布基本符合正态分布 (图 5)。可见, 炭化温度主要在

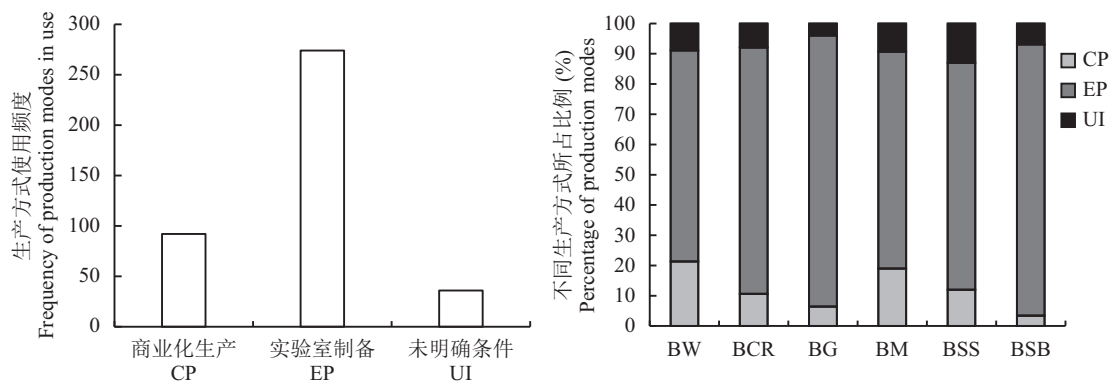


图4 研究中使用的生物炭生产方式使用频度及所占比例

Fig. 4 Frequency distribution (percentage) of the production conditions and feedstock origin proportion of biochar reported in the collected literature

[注 (Note): CP—Commercial production; EP—Experiment prepared; UI—Unidentified; BW—林木源生物质炭 Biochar from wood; BCR—农作物残余物生物质炭 Biochar from crop residue; BG—草本植物生物质炭 Biochar from grass; BM—畜禽粪便生物质炭 Biochar from manure; BSS—污泥生物质炭 Biochar from sewage sludge; BSB—二次废弃物生物质炭 Biochar from secondly-biowaste.]

300~700℃ 间, 占 91.4%。其中 400~500℃ 和 500~600℃ 的生物质炭报道占总样本数 (1736) 的比例分别达到 28.6% 和 21.7%。说明大多数生物质炭生产是在 400~600℃ 的炭化温度下进行的。

## 2.2 生物质炭理化性质

2.2.1 生物质炭性质的测试项目 对报道生物质炭性质测试的研究文献的统计结果 (表 1) 显示, 生物质炭的农学性质测试报道频率最高, 其文献篇次占总文献数的 77%。其次是灰分和挥发分等工业分析测试项目和 C/N/S/H/O 等有机质结构与元素分析项目, 分别占 61% 和 56%, 而比表面积和孔隙度等材料分析测试项目的文献数占总文献数 44%。另外, 有 80% 左右的文献分别报道了生物质炭的总碳或总氮测试结果。

2.2.2 生物质炭主要性质随炭化温度的变化 不同生物质原料和炭化温度对生物质炭的性质都有较大影响。本研究将炭化温度划分为 200~300℃, 300~400℃, 400~500℃, 500~600℃, 600~700℃ 和 >700℃ 等 6 个级差, 分别统计林木生物质炭和作物秸秆生物质炭性质随炭化温度的变异 (图 6)。从中可以看出, 两种主要原料的生物质炭性质与炭化温度的变化格局相似, 仅作物秸秆生物质炭的阳离子交换量随炭化温度升高而降低。总体来说, 生物质炭的 pH、比表面积和灰分含量随炭化温度升高而升高, 而总氮含量随炭化温度升高而下降。从图 6 可以看出, 炭化温度在 400~600℃ 之间, 生物质炭各项性质达到良好的平衡, 这也支持了大多数研究中采用 400~600℃ 炭化温度的炭化工艺。



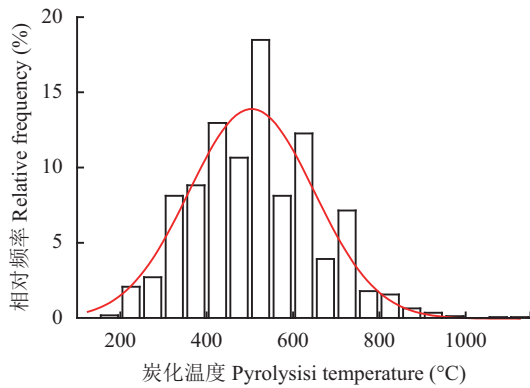


图5 生物质炭炭化温度的频度分布

Fig. 5 Distribution of pyrolysis temperature of biochars reported

[注 (Note): 采用高斯拟合公式 Simulated with a Gaussian fitting formula,  $y = y_0 + A \times \exp \left[ -0.5 \times \left( \frac{x-x_0}{w} \right)^2 \right]$ ]

表2中可见, 生物质炭的性质随原料的变化差异十分显著。林木废弃物原料生物质炭 pH 最接近中性, 平均为 8.2, 比表面积 ( $164.4 \pm 24.1$ )  $\text{m}^2/\text{g}$  和总碳含量 ( $72.6 \pm 1.3$ )% 最高, 而灰分含量最低, 氮、磷、钾养分含量均低; 反之, 养殖业废弃物 (猪粪等) 生物质炭氮磷钾养分含量较高, 分别为 ( $2.5 \pm 0.2$ )%, ( $2.4 \pm 0.4$ )% 和 ( $3.2 \pm 0.4$ )%。显而易见, 木炭可被用作吸附材料, 而它的高含碳量也是科学家们在碳储存方面研究的关注点。相对于林木和草类来说, 作物秸秆生物质炭的各项农学性质指标最高, 其比表面积仅次于木炭, 所以常被用来改善土壤质量。

2.2.3 生物质炭潜在污染物含量 相对来说, 测定分析生物质炭潜在污染物含量的研究较少。在仅有的 118 篇污染物分析的文献报道中, 分析 Pb 和 Cd 含量的文献占污染物分析文献总数 75%。笔者按植物

源 (林木、秸秆和草类生物质以及标明是果皮、厨余等来源) 的生物质与来自工业废水和城市生活废水处理污泥比较, 不同的污染物含量见表 3。植物来源生物质炭多环芳烃含量显著高于污泥生物质炭的; 污泥生物质炭重金属含量显著高于植物来源的, 差别在 5 倍以上, Pb、As 等毒性元素含量的差别甚至达到 10 倍。

### 3 讨论

#### 3.1 生物质炭研究及应用的发展态势

近 10 年来, 生物质炭土壤研究成指数增长, 且亚洲最快<sup>[16]</sup>。文献统计结果表明, 近五年来生物质炭性质研究文献随年度成几何倍数增加, 而亚洲是生物质炭研究文献的主要来源地区。这一方面可能与 2009 年哥本哈根联合国气候变化大会以来对控制气候变化的全球普遍共识和固碳减排技术发展的普遍要求有关。另一方面也反映出亚洲, 特别是中国对减缓气候变化的担当和减排技术的发展需求。废弃物生物质炭化作为固碳减排和农业生产力提升的多赢技术在全球已越来越被接受和推广。以生物质能源和生物质炭联产为特征的废弃物生物质炭化储碳是迄今为止最可持续的减排技术途径<sup>[17]</sup>, 以这一技术为基础的全球废弃物生物质炭化产业预计在 2030 年可达 10 亿吨规模, 产值将达到 2000 亿美元以上<sup>[15]</sup>。本文结果也佐证了这个产业科技的全球发展态势。

本文的文献研究还显示, 以往生物质炭研究以北美和欧洲林木生物质炭等生物质炭研究为主, 而 2010 年后转移到亚洲, 以中国为代表的农作物秸秆为主的生物质炭研究占据了优势地位。欧美研究中 40% 以上是商品化生产的生物质炭研究, 而 2009 年前亚洲商品化生产生物质炭研究不到欧美的一半,

表 1 报道生物质炭性质测试项目的文献统计

Table 1 Statistics of the tested items in literature related to biochar studies

检测项目 Test item	测试内容 Test content	文献篇次 Literature No.	占比 (%) Percentage
农学性质 Agronomic property	EC, CEC, pH, P, K	309	77
工业分析 Proximate analysis	灰分 Ash, 挥发分 Volatile, 水分 Moisture	247	61
元素分析 Elemental analysis	C, H, O, N	225	56
比表面积 Specific surface area	BET- $\text{N}_2$	178	44
污染物分析 Contaminant analysis	PAHs, Pb, Cd, Cu, Zn, As	118	29
总氮 Total N		314	78
总碳 Total C		323	80

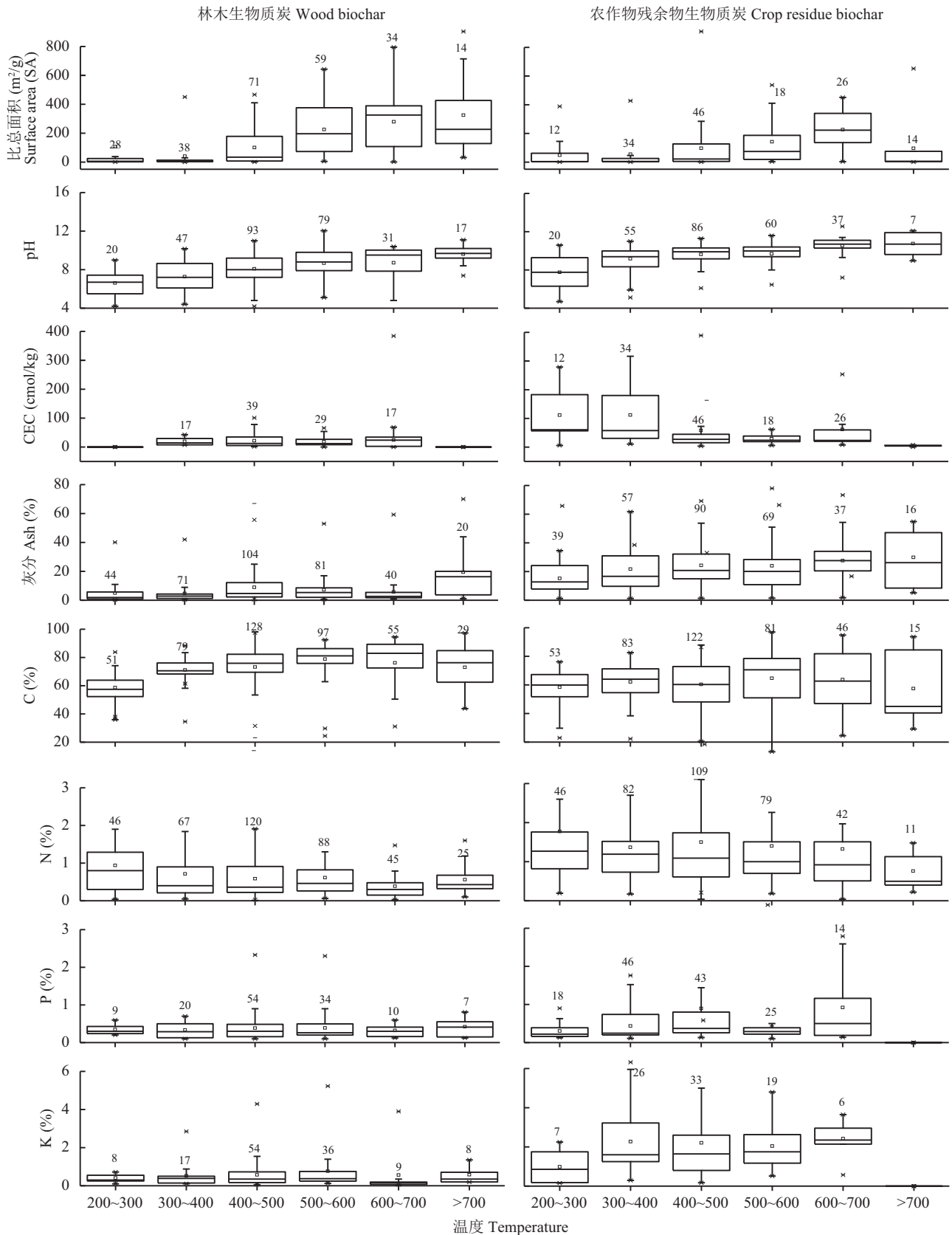


图 6 生物质炭理化性质随炭化温度的变化

Fig. 6 Variations of physical and chemical properties of biochars with pyrolysis temperature

[注 (Note) : ×—异常值 Outliers; □—下四分位到上四分位 25%~75% percentile; I—代表 Whisker 上限和下限 Whisker upper and lower limit; □—中位数 Median. 阿拉伯数字为生物质炭的样本量 The Arabic number is the sample size of biochar.]

表 2 不同原料生物质炭理化性质比较 (平均值 ± 95% 置信区间)  
Table 2 Physical and chemical properties of biochars derived from different feedstocks (mean ± 95% confidence interval)

材料 Raw material	pH	阳离子交换量 CEC (cmol/kg)	总有机碳 (%) Total organic carbon	比表面积 (m <sup>2</sup> /g) Surface area	灰分 (%) Ash	全氮 (%) Total N	全磷 (%) Total P	全钾 (%) Total K
林木 Wood	8.2 ± 0.2 (320)	20.9 ± 3.3 (127)	72.6 ± 1.3 (478)	164.4 ± 24.1 (275)	7.84 ± 1.1 (396)	0.6 ± 0.1 (478)	0.4 ± 0.1 (149)	0.7 ± 0.2 (143)
农作物 Crop residue	9.5 ± 0.2 (272)	70.4 ± 15.5 (134)	61.1 ± 1.6 (406)	109.2 ± 1.7 (202)	23.6 ± 1.7 (311)	1.3 ± 0.1 (370)	0.7 ± 0.1 (171)	3.3 ± 0.5 (137)
草 Grass	8.7 ± 0.3 (147)	98.6 ± 82.7 (18)	63.9 ± 1.8 (272)	63.4 ± 2.3 (109)	17.9 ± 2.3 (207)	1.2 ± 0.1 (246)	0.4 ± 0.1 (48)	1.7 ± 0.4 (52)
畜禽粪便 Manure	9.4 ± 0.2 (138)	37.4 ± 13.2 (42)	45.6 ± 2.7 (152)	36.5 ± 3.1 (69)	38.82 ± 3.1 (151)	2.5 ± 0.2 (154)	2.4 ± 0.4 (117)	3.2 ± 0.4 (104)
污泥 Sludge	8.7 ± 0.5 (64)	57.6 ± 35.8 (16)	25.1 ± 2.7 (77)	28.2 ± 4.3 (56)	63.3 ± 4.3 (52)	2.5 ± 0.3 (75)	3.0 ± 0.7 (27)	1.1 ± 0.3 (26)
二次废物 Sec-biowaste	8.8 ± 0.3 (97)	56.6 ± 62.67 (17)	59.2 ± 3.0 (148)	71.3 ± 4.1 (83)	23.1 ± 4.1 (111)	2.7 ± 0.3 (138)	1.2 ± 0.5 (57)	1.2 ± 0.3 (51)
K-W 检验	148***	65***	440***	34***	523***	503***	164***	197***

注 (Note) : 括号中数值为报道该性质的文献量 The number in parenthesis is the amount of literature reporting this property measurement. \*\*\*表示差异显著 Indicates significant difference.

表 3 潜在污染物含量分布 (mg/kg)

Table 3 Contents of potentially toxic contaminants in biochars

材料 Raw material	PAHs	As	Cd	Pb	Cr	Cu	Zn
污泥源炭 BSS	1.01 ± 0.36 (19)	10.39 ± 5.20 (27)	3.68 ± 0.78 (82)	131.93 ± 31.76 (77)	263.13 ± 84.79 (65)	322.47 ± 79.05 (64)	911.81 ± 489.13 (65)
植物源炭 BPR	4.74 ± 1.99 (69)	0.86 ± 0.42 (20)	1.00 ± 0.49 (41)	13.74 ± 5.09 (61)	47.89 ± 16.36 (46)	41.86 ± 16.15 (52)	83.61 ± 23.89 (58)
K-S 检验 K-S test	1.837***	2.297***	3.329***	3.462***	2.248***	2.826***	3.209***

注 (Note) : PAHs—多环芳烃 Polycyclic aromatic hydrocarbons; BSS—污泥生物质炭 Biochar from sewage sludge; BPR—植物生物质炭 Biochar from plants. 括号中数值为报道该性质的数据量  
The number in parenthesis is the number of literature reporting this property measurement. \*\*\*表示差异显著 Indicates significant difference.

即工业化生物质炭生产相对滞后。而亚洲、非洲和北美等地区的发展中国家土壤肥力低下、退化严重而农业废弃物环境问题突出, 秸秆等农业生物质废弃物热解转化为生物质炭应用于农业具有巨大优势<sup>[16]</sup>。在发展中国家中, 中国秸秆生物质炭技术研究发展迅速, 生产技术和农业应用已处于全球领先地位。2016年, 在中国首次召开了生物质炭与农业可持续发展国际研讨会, 并在中国成立国际生物质炭协会亚洲地区中心, 必将推动亚洲生物质炭研究和能源应用的快速发展。当然, 在亚洲等的发展中国家, 二次废弃物(养殖业废弃物和污泥等)生物质炭研究仍需要进一步加强, 以推动这些废弃物的生物质炭商品化处理和生产, 在解决废弃物资源化利用的同时, 为土壤固碳减排提供更多的生物质产品。

### 3.2 生物质炭的性质变异

本文显示, 生物质炭的一般结构性质(总碳、孔隙度、比表面积)及 pH 一般随温度升高而升高, 这主要是因为高温下生物质所含的有机物质不断被裂解形成含微孔隙的无定型炭<sup>[18]</sup>。但是, 随着炭化温度提高, 生物质炭的养分含量有降低的趋势(例如氮素), 而高温炭化需要更多能源消耗于系统维持反应温度, 生物质炭得率一般随炭化温度升高而降低<sup>[19]</sup>, 尽管高温生物质炭的材料性质更有优势; 从农业固碳减排来说, 本整合分析也显示出中温(400~600℃)炭化是农业废弃物生产生物质炭并应用于农业的合适炭化条件, 这跟赵世翔等的研究结果吻合<sup>[20-21]</sup>。

生物质炭性质随原料的变化较为复杂, 且互有消长, 本文结果(表 2)显示有机碳含量及孔隙度、比表面积等物理性质以林木废弃物生物质炭为优, 但养分含量少; 而养殖业废弃物和污泥生物质炭含磷等养分较多, 但总有机碳、孔隙度和比表面积低。也就是说, 没有完美的生物质炭——既有优良的物理性质又有丰富的养分。因此, 只能根据原料的可给性和用途的要求, 选择合适来源的生物质炭。秸秆生物质炭的物理性质和养分性质均表现中等, 而针对中国农作物秸秆资源状况<sup>[22-24]</sup>, 农作物残余物可以作为大规模生产的生物质原料。作物秸秆作为生物质炭的生产原料近年来被大力提倡<sup>[25]</sup>。

### 3.3 生物质炭测试指标

本研究表明, 尽管对生物质炭的基础性质分析研究十分广泛, 但还是对农学性质最为关注(80%的测试分析是农学性质), 水分、灰分和挥发分的工业分析测试指标占其次, 而孔隙度等物理性质和污染

物含量等分析偏少。所以对不同原料及生产条件下得到的生物质炭的性质进行系统性的分析测试是必要的<sup>[26]</sup>。文献统计表明, 在六种原料中以养殖废弃物和污泥炭的性质研究报道最少, 而对生物质炭潜在污染物分析研究较少。此外, 就养殖废弃物和污泥炭的污染物分析数据的统计结果来看, 其相关指标普遍偏高, 但也有相关研究表明, 经裂解炭化后, 尽管其重金属总含量增加<sup>[27]</sup>, 但有效态和生物可利用含量明显降低<sup>[28]</sup>; 另外, 有机类潜在污染物分析十分缺乏, 较高温度的炭化会导致高芳香结构的产生<sup>[29]</sup>, 而增加多环芳烃等有机污染物产生的风险<sup>[30]</sup>。生物质炭对环境和生物安全具有潜在风险的污染物分析仍需列入生物质炭分析测试内容中。虽然国际生物质炭协会提出了一个系统的但十分繁杂的分析测定标准<sup>[31]</sup>, 但从必要性和技术可行性以及经济性考虑, 必须研究提出一个生物质炭最小测定分析指标集。

关于生物质炭性质测定的标准方法仍然是一个问题。例如不同方法测定的比表面积结果可能差异在十倍以上<sup>[32]</sup>, 不同方法测定的 pH 也可能大相径庭, 且无论是湿消化法还是 CNS 元素分析法对生物质炭总有机碳的测定均存在缺陷, 研究提出标准可参照的测定方法集也是今后研究的需求。

全球生物质炭研究飞速发展, 欧美地区主要关注林木生物质炭, 亚洲等的发展中国家则着重研究秸秆生物质炭。与欧美国家相比, 发展中国家的生物质炭商品化生产仍较薄弱。不同原料和温度生产的生物质炭在性质和功能方面差别很大, 优劣此消彼长, 中温炭化和秸秆生物质炭相对较为平衡, 可以作为大规模生物质炭产业化的原料和炭化工艺条件。生物质炭测试关注的性质范围宽广, 但潜在风险污染物的测试不足, 亟需开发一个标准来规定生物质炭最小测试指标集和合适的测试方法。

### 参 考 文 献:

- [1] Gaunt J L, Lehmann J. Energy balance and emissions associated with biochar sequestration and pyrolysis bioenergy production[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(11): 4152-4158.
- [2] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(7141): 143-144.
- [3] 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.
- [4] Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change[J]. *Nature Communications*, 2010, 1: 56.
- [5] Piccolo A, Pietramellara G, Mbagwu J S C. Effects of coal derived



- humic substances on water retention and structural stability of Mediterranean soils[J]. *Soil Use and Management*, 1996, 12: 209–213.
- [6] Spokas K A, Cantrell K B, Novak J M, *et al.* Biochar: a synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4): 973–989.
- [7] Beesley L, Moreno-Jiménez E, Gomez-Eyles J L, *et al.* A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(12): 3269–3282.
- [8] Cayuela M L, van Zwieten L, Singh B P, *et al.* Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 191: 5–16.
- [9] Harter J, Krause H M, Schuettler S, *et al.* Linking N<sub>2</sub>O emissions from biochar-amended soil to the structure and function of the N-cycling microbial community[J]. *The ISME Journal*, 2014, 8(3): 660–674.
- [10] Troy S M, Lawlor P G, O'Flynn C J, *et al.* Impact of biochar addition to soil on greenhouse gas emissions following pig manure application[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 60: 173–181.
- [11] Cui L Q, Pan G X, Li L Q, *et al.* The reduction of wheat Cd uptake in contaminated soil via biochar amendment: a two-year field experiment[J]. *Bioresources*, 2012, 7(4): 5666–5676.
- [12] Cernansky R. *Agriculture: State-of-the-art soil*[J]. *Nature*, 2015, 517(7534): 258–260.
- [13] 王维锦. 原料和温度对生物质炭性质的影响及便捷式生物质炭化机的试验研究[D]. 南京: 南京农业大学硕士学位论文, 2015. 1–67.  
Wang W J. Influence of biomass and temperatures on the properties of biochar and test on the simply-speedy-biomass-pyrolyser[D]. Nanjing: MS Thesis of Nanjing Agricultural University, 2015. 1–67.
- [14] United Nations Environment Programme (UNEP). Sharing knowledge on the use of biochar for sustainable land management[EB/OL]. [https://www.thegef.org/gef/project\\_list?keyword=&countrycode=CN&focalAraCode=L&agencyCde=UNEP&projectype=all&fundingource=all&approvaFYFrom=2014&approvaFYTo=all<gt=lt<gtAmt=&opSearch&formbuild\\_id=form-NO81TxH](https://www.thegef.org/gef/project_list?keyword=&countrycode=CN&focalAraCode=L&agencyCde=UNEP&projectype=all&fundingource=all&approvaFYFrom=2014&approvaFYTo=all<gt=lt<gtAmt=&opSearch&formbuild_id=form-NO81TxH), 2017–01–10.
- [15] Kathleen D. October 2016 News from the international biochar initiative for members and supporters[EB/OL]. <http://www.biochar-international.org/sites/default/files/October%202016%20BI%20New%20sletter.pdf>, 2017–01–10.
- [16] Zhang D X, Yan M, Niu Y R, *et al.* Is current biochar research addressing global soil constraints for sustainable agriculture?[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 226(2016): 25–32.
- [17] Woolf D, Lehmann J, Lee D R. Optimal bioenergy power generation for climate change mitigation with or without carbon sequestration[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13160.
- [18] Vamvuka D, Karouki E, Sfakiotakis S. Gasification of waste biomass chars by carbon dioxide via thermogravimetry. Part I: effect of mineral matter[J]. *Combustion Science and Technology*, 2012, 184(1): 64–77.
- [19] Bian R, Ma B, Zhu X, *et al.* Pyrolysis of crop residues in a mobile bench-scale pyrolyser: Product characterization and environmental performance[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2016, 119: 52–59.
- [20] Jindo K, Mizumoto H, Sawada Y, *et al.* Physical and chemical characterizations of biochars derived from different agricultural residues[J]. *Biogeosciences Discuss*, 2014, 11: 11727–11746.
- [21] 赵世翔, 姬强, 李忠徽, 等. 热解温度对生物质炭性质及其在土壤中矿化的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 183–192.  
Zhao S X, Ji Q, Li Z H, *et al.* Characteristics and mineralization in soil of apple-derived biochar produced at different temperatures[J]. *Transaction of the Chinese Society for Agriculture Machinery*, 2015, 46(6): 183–192.
- [22] 彭春艳, 罗怀良, 孔静. 中国作物秸秆资源量估算与利用状况研究进展[J]. *中国农业资源与区划*, 2014, 35(3): 14–20.  
Peng C Y, Luo H L, Kong J. Advance in estimation and utilization of crop residues resources in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(3): 14–20.
- [23] 谢光辉, 王晓玉, 任兰天. 中国作物秸秆资源评估研究现状[J]. *生物工程学报*, 2010, 26(7): 855–863.  
Xie G H, Wang X Y, Ren L T. China's crop residues resources evaluation[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2010, 26(7): 855–863.
- [24] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 173–179.  
Gao L W, Ma L, Zhang W F, *et al.* Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(7): 173–179.
- [25] Lehmann J, Joseph S. *Biochar for environmental management: Science, technology*(2nd Edition)[M]. London and New York: Routledge, 2015.
- [26] Lehmann J, Joseph S. *Biochar for environmental management: Science and technology*(1st Edition)[M]. London: Earthscan, 2009.
- [27] Hossain M K, Strezov V, Chan K Y, *et al.* Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(1): 223–228.
- [28] 卢再亮, 李九玉, 姜军, 等. 生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险[J]. *环境科学*, 2012, 33(10): 3585–3591.  
Lu Z L, Li J Y, Jiang J, *et al.* Amelioration effects of wastewater sludge biochars on red soil acidity and their environmental risk[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33(10): 3585–3591.
- [29] Spokas K A, Novak J M, Stewart C E, *et al.* Qualitative analysis of volatile organic compounds on biochar[J]. *Chemosphere*, 2011, 85: 869–882.
- [30] Mašek O, Konno M, Hosokai S, *et al.* A study on pyrolytic gasification of coffee grounds and implications to allothermal gasification[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2008, 32(1): 78–89.
- [31] International Biochar Initiative. An Example of an Agricultural Biochar Production System[EB/OL]. [http://www.biochar-international.org/policy/united states](http://www.biochar-international.org/policy/united%20states), 2009–07–21/2017-02-10.
- [32] Zimmerman A R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar)[J]. *Environmental Science And Technology*, 2010, 44(4): 1295–1301.