

热解温度对畜禽粪便生物炭产率及理化特性的影响

王煌平¹, 张青¹, 李昱¹, 任丽花², 栗方亮¹, 罗涛^{1*}, 翁伯琦³, 王秋营^{1,4}

(1.福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福州 350013; 2.福建省农业科学院中心实验室, 福州 350003; 3.福建省农业科学院农业生态研究所, 福州 350013; 4.福建省农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

摘要:以鸡粪、猪粪渣和牛粪为原料,采用室内密闭低氧制备生物炭,研究不同温度(350、450、550、650、750℃)下,畜禽粪便生物炭的产率和理化特性。结果表明,随着热解温度的升高,畜禽粪便生物炭灰分、pH、电导率、盐分、全P和全K含量逐渐增加,而炭化产率、挥发分含量、固定碳产率、全N含量逐渐降低,同时生物炭表面超微结构粗糙程度加剧。综合分析确定,获得高炭化产率和低氮损失的适宜热解温度为450℃,该温度下生物炭品质优劣依次为牛粪、猪粪渣、鸡粪。畜禽粪便生物炭具有较高pH和总养分含量,可作为酸性土壤调理剂和有机肥生产辅料。

关键词:温度; 畜禽粪便; 生物炭; 理化特性

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)11-2208-07 doi:10.11654/jaes.2015.11.024

Effects of Pyrolysis Temperature on Yield and Physicochemical Characteristics of Biochar from Animal Manures

WANG Huang-ping¹, ZHANG Qing¹, LI Yu¹, REN Li-hua², LI Fang-liang¹, LUO Tao^{1*}, WENG Bo-qi³, WANG Qiu-ying^{1,4}

(1.Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China; 2.Central Laboratory, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China; 3.Agricultural Ecology Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China; 4.College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Many studies have examined the effects of pyrolysis temperature on yields and physicochemical characteristics of biochars from plant residues with high carbon and low ash content. However, few reports have been focused on biochars from animal manure with high mineral nutrient content. In this work, selected animal manures (chicken manure, solid-liquid separated pig manure, cow dung) were used to investigate the effects of different temperatures (350, 450, 550, 650 °C and 750 °C) on yields and physicochemical properties of biochars produced in a closed low-oxygen reactor using pyrolysis process. As pyrolysis temperature increased, ash content, pH, conductivity, salinity content, and total content of P and K increased, while biochar yields, volatile content, fixed-C yield, total N content decreased gradually. Temperature had significant negative correlation with biochar yield, fixed-C yield and total N content. At higher temperatures, the biochar particles became rougher. The optimum pyrolysis temperature for high biochar yields and low N loss was 450 °C. At this temperature, the biochar quality was cow dung>pig manure>chicken manure. Utilizing chicken manure biochar needs paying more attention to its salt toxicity. With higher pH and nutrient content, livestock manure biochars could be used in amending acidic soils and for producing organic fertilizers.

Keywords: temperature; animal manure; biochar; physicochemical characteristics

随着居民食物消费结构的变化,中国畜禽养殖业已向规模化和集约化发展,带来了巨大的经济和社会

效益,与此同时也产生大量的畜禽粪便废弃物。据张田等^[1-2]估算,中国目前每年畜禽粪便排放总量超过3×10⁹ t(鲜重)。然而,畜禽养殖废弃物的治理和资源化利用工作却相对滞后,90%以上的规模化养殖场缺乏综合利用必要的治污措施^[1]。养殖污染已成为中国农村面源污染的主要来源,严重制约着畜禽养殖业持续高效发展^[3],急需发展先进适用的畜禽粪便资源化回收利用技术。

收稿日期:2015-05-12

基金项目:国家科技支撑计划课题(2012BAD14B15, 2015BAD05B01);
公益性行业(农业)科研专项(201303094)

作者简介:王煌平(1982—),男,福建惠安人,硕士研究生,助理研究员,主要从事土壤肥料与生态环境研究。

E-mail: huangping-5539@163.com

* 通信作者:罗涛 E-mail: luotaofz@188.com

生物炭(Biochar)是指生物质在缺氧及低氧环境中热解后的固体产物^[4]。国际上对生物炭的研究越来越多,相关报道表明生物炭具有固碳、分解慢、减缓气候变化、促进作物养分吸收、降低重金属和有机污染物生物有效性等作用^[5-9]。但迄今为止,生物炭对作物生长影响的研究结果存在争议,既有促进作用,亦有抑制作用或没有影响^[10]。Glaser 等^[11]认为高量生物炭影响作物生长可能与生物炭矿质养分含量低、土壤高 C/N 易降低土壤养分有效性有关。生物炭矿质养分含量主要取决于制炭原料来源,如秸秆、木材、畜禽粪便等农业废弃物^[12]。近几年,国内外生物炭制备原料的选择主要集中在以高碳低灰分含量的植物残体,对高矿质养分含量畜禽粪便生物炭研究较少^[13]。畜禽粪便生物炭的制备和研究,对提高畜禽粪便综合利用率和弥补生物炭农田应用养分不足等具有重要的现实意义。

鸡、猪、牛是中国大中型养殖场养殖的主要畜禽种类,其粪便相对于其他畜禽粪便,多数采用干清粪处理,因而收集更为方便^[1],可就地生产畜禽粪便生物炭。当前,多数研究认为热解温度对生物炭的产率及特性影响较大^[12,14]。因此,本文以大中型养殖场鸡粪、猪粪渣和牛粪为原料,研究不同热解温度对畜禽粪便生物炭产率、炭化养分含量和超微结构的影响,旨在为畜禽粪便制备生物炭资源化循环利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

原材料分别为鸡粪、固液分离后的猪粪渣和牛粪,均取自福建省福州市近郊养殖场,经自然风干后粉碎过 10 目筛,装于自封袋并放置在干燥器内备用。

为进一步降低风干原材料水分含量并减少氮素损失,烧制生物炭前先经 80 ℃烘干 30 min(含水量<0.5%,可忽略不计)。

1.2 生物炭的制备

室内密闭低氧环境制备生物炭操作步骤如下:将定制的具外置磨砂盖子的石英瓶(80 cm×36 cm,壁厚 1 cm,底部中央有一细孔,直径 0.13 mm)称重后装入烘干的鸡粪、猪粪渣和牛粪(分别标记为 CM、PR、DM),塞满石英瓶并密封(图 1)。称重后置于马弗炉内,分别将温度升至 350、450、550、650、750 ℃,保持时间 1 h,每个样品重复 3 次。烧制时热解产物焦油和气体由底部中心孔排出,烧制结束冷却至室温后取出生物炭,置于干燥器内待测。

1.3 样品分析

1.3.1 生物炭产率分析

烧制获得的生物炭于当天称重分析炭化产率。炭化产率按下式计算:

$$\text{炭化产率}(\%) = \frac{\text{生物炭质量}}{\text{烘干原材料质量}} \times 100\%$$

1.3.2 挥发分、灰分和固定碳得率分析

挥发分测定参照农业行业标准 NY/T 1881.4—2010^[15],灰分测定参照农业行业标准 NY/T 1881.5—2010^[16]。由于生物炭终产品的含水量均<1%,可忽略不计。因此,固定碳含量和产量计算公式为:

$$\text{固定碳含量}(\%) = 100\% - \text{挥发分}(\%) - \text{灰分}(\%)$$

$$\text{固定碳产率}(\%) = \text{固定碳含量}(\%) \times \text{炭化产率}(\%)$$

1.3.3 化学特性分析

畜禽粪便和生物炭的 pH 值采用 pH 计(Seven Compact,梅特勒托利多公司,瑞士)测定,电导率(EC)、盐分采用电导/盐分分析仪(SevenEasy,梅特勒托利多公司,瑞士)测定。pH、EC、盐分测定中去 CO₂

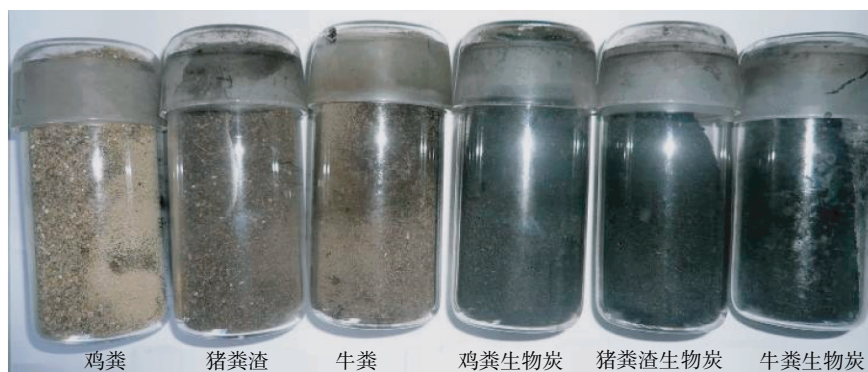


图 1 畜禽粪便生物炭烧制前后对比

Figure 1 Comparison of animal manures before and after pyrolysis

蒸馏水和物料比均分别为 5:1 和 10:1。pH 值测定需搅动 15 min, 静置 1 h 后分析。EC 和盐分测定需恒温振荡 5 min, 静置 30 min 后分析。原材料有机质测定采用重铬酸钾容量法^[17], 全 N 采用凯氏定氮法^[18], 全 P 采用钒钼黄吸收光度法^[17], 全 K 采用火焰光度法^[17]。总养分含量计算公式为:

总养分含量(N+P₂O₅+K₂O, %)=N 含量(%)+P 含量(%)×2.29(P 换算成 P₂O₅ 的系数)+K 含量(%)×1.20(K 换算成 K₂O 的系数)

1.3.4 扫描电镜(SEM)分析

分别取适量的 350、550、750 °C 的生物炭样品置于冷冻干燥仪(JFD-320, 日本电子株式会社, 日本)中进行真空干燥处理, 经过干燥处理的样品粘台后在 IB-5 型离子镀膜仪上对样品表面进行喷镀, 再用扫描电镜(JSM-6380FV, 日本电子株式会社, 日本)进行表面形貌分析。

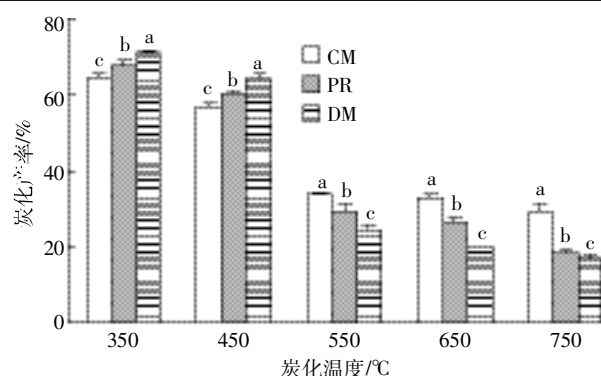
1.4 数据处理

试验数据为 3 次重复的平均值和标准差, 采用 Microsoft Excel 2003 结合 DPS 14.0 软件进行统计分析, 不同处理间的差异性分析通过 LSD 多重比较法实现, 显著性水平定为 $P<0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 对生物炭产率的影响

热解温度是影响生物炭产率的主要因素^[19-20]。图 2 表明, 热解温度越高, 鸡粪(CM)、猪粪渣(PR)和牛粪(DM)生物炭产率越低。这与植物残体研究结果一致^[19-20]。三者炭化产率分别从 350 °C 的 64.35%、67.71% 和 70.88%, 显著降低到 750 °C 的 29.24%、18.26% 和 17.01%, 其中 DM 生物炭产率最低, 表明 DM 制备生物炭损失量最大。本试验较低温度段(350~550 °C)CM、PR 和 DM 炭化产率分别显著下降了 30.67%、38.17% 和 46.49%, 而高温段(550~750 °C)三者炭化产率仅下降了 4.44%、11.28% 和 7.38%。这可能是因为较低温度热解促进原材料有机成分的降解, 并产生各种挥发性物质和高沸点物质, 而高温高沸点和难挥发物质分解缓慢^[19]。相同温度畜禽粪便生物炭间的比较表明: 温度从 350 °C 升到 450 °C, 炭化产率均以 DM 为最高, 以 CM 为最低; 从 550 °C 升至 750 °C, 炭化产率则以 CM 为最高, 以 DM 为最低。对热解温度与炭化产率的回归分析表明, 二者拟合模型以指数函数为最优, 温度与炭化产率呈显著负相关。CM、PR 和 DM 生物炭拟合方程分别为:



图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different small letters within a temperature indicate significant difference at 0.05 level. The same as below

图 2 热解温度对炭化产率的影响

Figure 2 Effects of pyrolysis temperatures on biochar yields

$$y_{CM}=144.53e^{-0.0023x}(R^2=0.9119, P=0.0114)$$

$$y_{PR}=229.95e^{-0.0034x}(R^2=0.9269, P=0.0086)$$

$$y_{DM}=308.76e^{-0.004x}(R^2=0.8858, P=0.017)$$

2.2 对炭化组分和固定碳产率的影响

随着温度的升高, 生物炭挥发分含量逐渐减少, 灰分和固定碳含量呈递增趋势^[21-22]。本研究表明(表 1), 当温度从 350 °C 升至 750 °C 时: CM、PR 和 DM 挥发分含量分别从 45.23%、37.03% 和 34.12% 显著减少到 29.24%、18.26% 和 17.01%, 相同温度下挥发分含量大小均依次为 CM>PR>DM; 灰分含量分别从 32.45%、28.39% 和 26.43% 显著升高到 48.43%、44.76% 和 37.87%, 灰分含量大小趋势与挥发分一致。这与多数研究结果一致^[21-22]。与植物残体生物炭低灰分、高碳含量相比^[20-22], 本研究畜禽粪便生物炭固定碳含量较低(表 1), 与 Cantrell 等^[23]的研究结果相似。在温度从 350 °C 升至 750 °C 过程中, CM 和 PR 生物炭固定碳含量以 450 °C 为最高, 而 DM 生物炭以 650 °C 为最高(表 1), 相同温度固定碳含量大小均依次为 DM>PR>CM。固定碳产率随温度升高而降低, 从 350 °C 至 750 °C, 固定碳产率显著下降, 相同温度下固定碳产率趋势与固定碳含量一致。温度与固定碳产率也呈显著负相关, 二者拟合的指数函数方程分别为:

$$y_{CM}=35.54e^{-0.0025x}(R^2=0.8509, P=0.0256)$$

$$y_{PR}=85.87e^{-0.0035x}(R^2=0.8557, P=0.0244)$$

$$y_{DM}=105.59e^{-0.0036x}(R^2=0.871, P=0.0205)$$

2.3 对生物质炭 pH、电导率和盐分含量的影响

由表 2 可知, 随着温度的升高, CM、PR 和 DM 处理的 pH 值呈递增趋势, 分别从未炭化原材料的 7.62、7.60、6.45 增加到 750 °C 的 12.30、10.52、10.30, 生

表 1 热解温度对炭化组分含量和固定碳产率的影响(%)

Table 1 Effects of pyrolysis temperatures on content of biochar components(%)

组分和产率 Component and yield	畜禽粪便 Livestock and poultry manure	热解温度 Pyrolysis temperatures				
		350 ℃	450 ℃	550 ℃	650 ℃	750 ℃
挥发分含量	CM	45.23±0.95a	36.96±1.75a	33.68±0.83a	32.95±0.82a	29.24±2.25a
	PR	37.03±1.10b	30.69±1.61b	29.54±2.01b	26.42±1.60b	18.26±1.35b
	DM	34.12±1.63c	30.50±3.24b	24.39±1.34c	19.94±0.18c	17.01±0.92b
灰分含量	CM	32.45±2.36a	38.48±0.38a	44.61±0.81a	46.91±1.66a	48.43±0.58a
	PR	28.39±1.21b	30.91±2.56b	37.47±0.50b	44.39±0.86b	44.76±1.45b
	DM	26.43±0.61b	28.15±2.46b	30.76±1.60c	33.57±0.72c	37.87±1.42c
固定碳含量	CM	22.32±1.86c	24.56±1.39b	21.71±1.44c	20.14±1.17c	22.32±1.71c
	PR	34.57±2.11b	38.40±3.63a	32.98±2.45b	29.18±1.01b	36.98±2.54b
	DM	39.45±1.81a	41.35±1.97a	44.84±1.87a	46.49±0.77a	45.12±2.15a
固定碳产率	CM	14.37±1.40c	13.89±1.07b	7.30±0.34c	6.64±0.47c	6.50±0.05b
	PR	23.39±1.06b	23.04±2.47a	9.71±0.09b	7.70±0.27b	6.73±0.24b
	DM	27.96±1.15a	26.60±1.73a	10.93±0.53a	9.27±0.15a	7.66±0.20a

注:小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different small letters within a temperature indicate significant difference at 0.05 level.

表 2 热解温度对 pH、电导率和盐分含量的影响

Table 2 Effects of pyrolysis temperatures on pH, EC and salinity content in biochars

化学特性 Chemical property	畜禽粪便 Livestock and poultry manure	原材料 Material	热解温度 Pyrolysis temperatures				
			350 ℃	450 ℃	550 ℃	650 ℃	750 ℃
pH	CM	7.62±0.01a	10.53±0.14b	11.59±0.19a	11.57±0.16a	11.92±0.11a	12.30±0.27a
	PR	7.60±0.04a	10.88±0.07a	11.21±0.11b	11.27±0.06b	11.42±0.11b	10.52±0.12b
	DM	6.45±0.02b	8.44±0.02c	8.70±0.18c	9.53±0.17c	10.60±0.09c	10.30±0.08b
EC/mS·cm ⁻¹	CM	6.03±0.15a	5.37±0.72a	7.60±0.30a	7.70±0.27a	12.47±0.31a	14.07±0.29a
	PR	2.47±0.06c	1.03±0.12c	1.37±0.06c	1.73±0.06c	2.23±0.25c	2.60±0.17c
	DM	4.77±0.12b	2.40±0.35b	2.43±0.06b	3.77±0.06b	4.17±0.25b	3.43±0.06b
盐分/%	CM	3.28±0.12a	2.69±0.07a	4.22±0.18a	7.68±0.27a	7.19±0.18a	8.21±0.06a
	PR	1.26±0.03c	0.50±0.04c	0.68±0.04c	1.71±0.09c	1.14±0.12c	1.35±0.11c
	DM	2.54±0.06b	1.23±0.17b	3.23±0.30b	2.07±0.11b	2.11±0.27b	1.79±0.02b

物炭产物明显偏碱性,其中以 CM 最显著。这与多数热解温度越高,生物炭 pH 值越大的结果一致^[22-24]。相同温度下 pH 值大小基本表现为 CM>PR>DM。与植物残体生物炭 pH 值相比,相同热解条件制备的畜禽粪便生物炭均具有较高的 pH 值^[10],高 pH 值的生物炭可用于改良酸性土壤^[25]。电导率(EC)表现为随着温度的升高而增加,以 CM 生物炭增加最为明显,与其自身含有较高的灰分相关^[24](表 1)。相同温度下 EC 值大小依次为 CM>DM>PR。盐分含量呈现显著增加(CM)或先升后降的趋势(PR 和 DM),相同温度下盐分含量大小依次为 CM>DM>PR。因此,若考虑将畜禽粪便生物炭作为土壤调理剂,应探讨生物炭用量,特别是高量 CM 生物炭可能引起的高盐毒害。

2.4 对生物质炭大量元素养分含量的影响

CM、PR 和 DM 原材料均有较高的有机质和总养分(表 3)。若以挥发分含量和固定碳含量之和来表示生物炭有机质含量则可看出,随着热解温度的升高,CM、PR 和 DM 有机质含量呈先升后降趋势。从原材料到 350 ℃的生物炭,三者有机质含量分别显著增加了 14.73%、15.56%和 56.56%;从 350 ℃到 750 ℃,则显著降低了 23.66%、22.86 %和 15.55%。在相同热解温度下,有机质含量表现为 DM>PR>CM。而从原材料到 750 ℃的生物炭,CM、PR 和 DM 全 N 含量分别显著降低了 70.78%、59.71%和 63.92%。这与 Song 等^[24]认为高温肉鸡草垫生物炭 N 素显著损失结论一致。相同热解温度下全 N 含量均表现为 CM>PR≥DM。炭化

表3 热解温度对大量元素养分含量的影响(%)

Table 3 Effects of pyrolysis temperatures on macronutrient content in biochars(%)

养分含量 Nutrient content	畜禽粪便 Livestock and poultry manure	原材料 Material	热解温度 Pyrolysis temperature				
			350 ℃	450 ℃	550 ℃	650 ℃	750 ℃
有机质	CM	58.88±4.14a	67.55±2.36b	61.52±0.38b	55.39±0.81c	53.09±1.66c	51.57±0.58c
		PR	61.97±6.51a	71.61±1.21a	69.09±2.56a	62.53±0.50b	55.24±1.45b
		DM	46.99±3.59b	73.57±0.61a	71.85±2.46a	69.24±1.60a	66.43±0.72a
N	CM	1.40±0.11a	1.23±0.11a	0.85±0.06a	0.59±0.06a	0.40±0.11a	0.41±0.13a
		PR	1.15±0.03b	0.90±0.04b	0.68±0.07b	0.57±0.17a	0.51±0.12a
		DM	1.05±0.07b	0.78±0.02b	0.69±0.05b	0.67±0.05a	0.37±0.06a
P	CM	1.18±0.05c	1.83±0.16c	2.07±0.16c	2.35±0.09c	2.46±0.09c	2.70±0.21c
		PR	1.79±0.07b	2.94±0.11b	3.10±0.06b	3.13±0.19b	3.30±0.17b
		DM	2.32±0.16a	3.37±0.29a	4.05±0.17a	3.94±0.08a	4.28±0.07a
K	CM	2.63±0.17a	3.73±0.13a	4.33±0.10a	4.64±0.40a	5.12±0.11a	4.87±0.26a
		PR	1.11±0.16b	1.45±0.17b	1.67±0.07b	1.99±0.02b	2.20±0.06b
		DM	0.83±0.07b	1.31±0.08b	1.34±0.07c	1.37±0.08c	1.36±0.08c
总养分	CM	7.26±0.40a	9.90±0.42a	10.78±0.50a	11.85±0.39a	12.18±0.12a	12.44±0.76a
		PR	6.58±0.33a	9.38±0.20a	9.79±0.09b	10.12±0.51b	10.70±0.43b
		DM	7.36±0.48a	10.06±0.66a	11.58±0.50a	11.33±0.23a	11.79±0.23a

注:生物炭有机质含量为挥发分含量和固定碳含量之和。

Note: Organic matter content of biochars was sum of volatile and fixed-C content.

温度与全 N 呈显著负相关,二者拟合的指数函数方程分别为:

$$y_{\text{CM}}=3.87e^{-0.0033x}(R^2=0.9755, P=0.0016)$$

$$y_{\text{PR}}=1.61e^{-0.0018x}(R^2=0.9533, P=0.0043)$$

$$y_{\text{DM}}=1.57e^{-0.0019x}(R^2=0.8446, P=0.0273)$$

从原材料到 750 ℃的生物炭,CM、PR 和 DM 生物炭全 P、全 K 含量分别显著增加了 128.45%、85.88%、88.92%和 84.94%、122.89%、89.91%,与植物残体的研究结论相似^[20-21]。相同温度下全 P 和全 K 含量大小依次为 DM>PR>CM 和 CM>PR>DM。总养分(N+P₂O₅+K₂O)分析结果表明,CM、PR 和 DM 生物炭的养分含量比原材料分别显著增加了 36.36%~71.35%、42.55%~68.09%和 36.68%~66.98%,相同温度下均表现为 CM≥DM>PR。因此,与畜禽粪便堆肥化处理相比^[26],畜禽粪便生物炭可快速实现畜禽粪便的减量化、无害化和资源化利用,可获得较高的大量元素养分含量。该生物炭用作有机肥的堆肥辅料,可增加堆肥总养分和碳含量^[27]。综合分析可知,为获得较高的炭化产率和固定碳产率(图 1,表 1),并减少 N 素损失以提高总养分含量(表 2),热解温度应以 450 ℃为宜。

2.5 对生物炭超微结构的影响

扫描电镜(SEM)的结果表明(图 3),畜禽粪便表面粗糙程度随温度升高而增大。图 3(a)CM 处理在较

低温度(350 ℃)时,生物炭表面有晶体析出,可能与 CM 处理有较高的盐分有关(表 2);当温度升高到 550 ℃时,图 3(b)可见类似蜂窝状结构,微孔分布较均匀;当温度继续上升至 750 ℃,生物炭表面粗糙程度加剧^[28]。在 PR 和 DM 处理中,从 350 ℃到 750 ℃,生物炭的表面孔道均不明显,但随着热解温度的升高,生物炭表面粗糙程度也增大,尤其是放大 1.5 k 倍观察更为明显。与秸秆生物炭表面组织结构较规整相比^[20],本研究畜禽粪便生物炭多孔结构较不明显,与畜禽粪便为畜禽排泄物的原料特性有关。

3 结论

(1)随着热解温度(350~750 ℃)的升高,鸡粪、猪粪渣和牛粪生物炭炭化产率、挥发分含量、固定碳产率、全 N 含量均逐渐降低,而灰分含量、pH、电导率、盐分含量、全 P 和全 K 含量均呈递增趋势,生物炭表面超微结构随温度升高粗糙程度加剧。

(2)畜禽粪便生物炭具有低碳高灰分的特性,热解温度与炭化产率、固定碳产率、全 N 含量显著负相关。获得高炭化产率和低氮损失的适宜热解温度为 450 ℃,该温度条件下,以牛粪生物炭理化特性为最优,其次为猪粪渣,鸡粪生物炭施用应注意其盐分毒害。

(3)畜禽粪便制备生物炭具有较高的 pH 值(8.44~

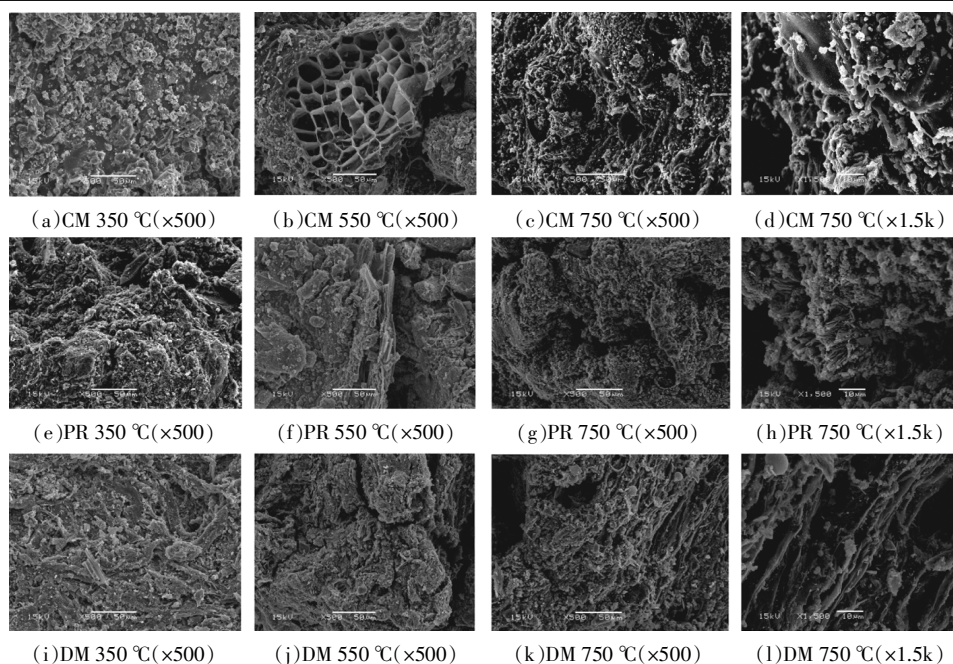


图 3 不同温度制备畜禽粪便生物炭扫描电镜图

Figure 3 SEM images of biochars produced from livestock and poultry manures at different temperatures

12.30)和总养分含量(9.38%~12.44%),可作为酸性土壤调理剂或有机肥生产辅料。

参考文献:

- [1] 张田,卜美东,耿维.中国畜禽粪便污染现状及产沼气潜力[J].生态学杂志,2012,31(5):1241-1249.
ZHANG Tian, BU Mei-dong, GENG Wei. Pollution status and biogas-producing potential of livestock and poultry excrements in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(5): 1241-1249.
- [2] 李季,彭生平.堆肥工程实用手册[M].二版.北京:化学工业出版社,2011:20.
LI Ji, PENG Sheng-ping. Practical handbook of composting project[M]. 2nd Edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 20.
- [3] 吴根义,廖新伟,贺德春,等.我国畜禽养殖污染防治现状及对策[J].农业环境科学学报,2014,33(7):1261-1264.
WU Gen-yi, LIAO Xin-di, HE De-chun, et al. Current situation and countermeasures of livestock industry pollution control in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7): 1261-1264.
- [4] Shrestha G, Traina S J, Swanston C W. Black carbon's properties and role in the environment: A comprehensive review[J]. *Sustainability*, 2010, 2(1): 294-320.
- [5] Sohi S P. Carbon storage with benefits[J]. *Science*, 2012, 338(6110): 1034-1035.
- [6] Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change[J]. *Nature Communications*, 2010, 1. doi: 10.1038/ncomms1053.
- [7] Cernansky R. Agriculture: State-of-the-art soil[J]. *Nature*, 2015, 518(7540): 483.
- [8] Mohan D, Sarswat A, Ok Y S, et al. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent: A critical review[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 160: 191-202.
- [9] 陈温福,张伟明,孟军.生物炭与农业环境研究回顾与展望[J].农业环境科学学报,2014,33(5):821-828.
CHEN Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun. Biochar and agro-ecological environment: Review and prospect[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 821-828.
- [10] 谢祖彬,刘琦,许燕萍,等.生物炭研究进展及其研究方向[J].土壤,2011,43(6):857-861.
XIE Zu-bin, LIU Qi, XU Yan-ping, et al. Advances and perspectives of biochar research[J]. *Soils*, 2011, 43(6): 857-861.
- [11] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. The 'Terra Preta' phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics[J]. *Naturwissenschaften*, 2001, 88(1): 37-41.
- [12] 许燕萍,谢祖彬,朱建国,等.制炭温度对玉米和小麦生物质炭理化性质的影响[J].土壤,2013,45(1):73-78.
XU Yan-ping, XIE Zu-bin, ZHU Jian-guo, et al. Effects of pyrolysis temperature on physical and chemical properties of corn biochar and wheat biochar[J]. *Soils*, 2013, 45(1): 73-78.
- [13] 张鹏,武健羽,李力,等.猪粪制备的生物炭对西维因的吸附与催化水解作用[J].农业环境科学学报,2012,31(2):416-421.
ZHANG Peng, WU Jian-yu, LI Li, et al. Sorption and catalytic hydrolysis of carbaryl on pig-manure-derived biochars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(2): 416-421.
- [14] Sun Y N, Gao B, Yao Y, et al. Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 240: 574-578.

- [15] 中华人民共和国农业部. NY/T 1881. 4—2010 生物质固体成型燃料试验方法 第4部分:挥发分[S]. 北京:中国标准出版社, 2010.
Ministry of Agriculture of PRC. NY/T 1881. 4—2010 Densified biofuel—test methods Part 4: Content of volatile matter[S]. Beijing: China Standards Press, 2010.
- [16] 中华人民共和国农业部. NY/T 1881. 5—2010 生物质固体成型燃料试验方法 第5部分:灰分[S]. 北京:中国标准出版社, 2010.
Ministry of Agriculture of PRC. NY/T 1881. 5—2010 Densified biofuel—test methods Part 5: Ash content[S]. Beijing: China Standards Press, 2010.
- [17] 中华人民共和国农业部. NY 525—2012 有机肥料[S]. 北京:中国标准出版社, 2012.
Ministry of Agriculture of PRC. NY 525—2012 Organic fertilizer[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [18] 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, 2000:147–149.
LU Ru-kun. Analysis method of soil agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000:147–149.
- [19] 张千丰, 孟 军, 刘居东, 等. 热解温度和时间对三种作物残体生物炭 pH 值及碳氮含量的影响[J]. 生态学报, 2013, 32(9):2347–2353.
ZHANG Qian-feng, MENG Jun, LIU Ju-dong, et al. Effects of pyrolysis temperature and duration time on pH, carbon and nitrogen contents of biochars produced from three crop residues[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(9):2347–2353.
- [20] Peng X, Ye L L, Wang C H, et al. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in Southern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 112(2):159–166.
- [21] Titiladunayo I F, McDonald A G, Fapetu O P. Effect of temperature on biochar product yield from selected lignocellulosic biomass in a pyrolysis process[J]. *Waste Biomass Valor*, 2012, 3(3):311–318.
- [22] Al-Wabel M, Al-Omran A, El-Naggar A H, et al. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 131:374–379.
- [23] Cantrell K B, Hunt P G, Uchimiya M, et al. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 107:419–428.
- [24] Song W P, Guo M X. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2012, 94:138–145.
- [25] 袁金华, 徐仁扣. 生物炭对酸性土壤改良作用的研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(4):541–547.
YUAN Jin-hua, XU Ren-kou. Research progress of amelioration effects of biochar on acid soils[J]. *Soils*, 2012, 44(4):541–547.
- [26] 常志州, 靳红梅, 黄红英, 等. 畜禽养殖场粪便清扫、堆积及处理单元氮损失率研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5):1068–1077.
CHANG Zhi-zhou, JIN Hong-mei, HUANG Hong-ying, et al. Nitrogen loss during cleaning, storage, compost and anaerobic digestion of animal manures in individual treatment unit [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5):1068–1077.
- [27] 张 翔, 张耿峻, 孙倩因, 等. 蘑菇培养土生物炭堆肥化利用及其对水稻生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10):2036–2041.
ZHANG Xiang, ZHANG Geng-ling, SUN Qian-nan, et al. Influence of biochar from spent mushroom substrate on properties of pig manure compost and rice growth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10):2036–2041.
- [28] 胡菲菲, 何丕文. 不同热解温度制备的鸡粪生物炭对废水中磷的吸附[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(8):1774–1778, 1785.
HU Fei-fei, HE Pi-wen. Phosphate adsorption in wastewater by bio-carbon prepared from pyrolysis of chicken manure at different temperature[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(8):1774–1778, 1785.