

基于扫描图像 RGB 分析的生物质炭吸附特性研究^{*}

王明峰 陈晓堃 蒋恩臣 吴宇健 张世军 李世博
(华南农业大学材料与能源学院, 广州 510642)

摘要: 以花生壳和玉米秸秆为原料,利用自主研发的无轴螺旋连续热解装置在 300、400、500℃ 的热解温度下反应 10 min 制备生物质炭,对生物质炭进行工业分析和热值测量,分析其组成成分和热值;开展了生物质炭亚甲基蓝吸附与碘吸附特性研究,结合扫描仪和取色软件获取生物质炭的 RGB 数据并进行灰度转化,探究生物质炭的吸附特性与 RGB 值、灰度的相关关系。结果表明:随着热解温度的升高,生物质炭中挥发分的含量降低,固定碳和灰分的含量升高,热值升高;较低热解温度的生物质炭的吸附效果优于较高温度热解的生物质炭;生物质炭的吸附值与 R、G、B 值均随着热解温度的升高而降低,两者之间存在强正相关关系,相关系数 r 为 0.582 ~ 0.944;生物质炭的灰度与吸附值存在强正相关关系,相关系数 r 为 0.685 ~ 0.977。

关键词: 生物质炭 吸附特性 扫描图像 RGB 值 灰度

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0212-06

Biochar Absorption Characteristics Based on RGB Analysis of Scanned Images

Wang Mingfeng Chen Xiaokun Jiang Enchen Wu Yujian Zhang Shijun Li Shibo
(College of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Biochar of peanut shells and corn stalks was prepared in the shaftless-screw-conveying continuous pyrolysis reactor at 300, 400, 500℃. Measurements of proximate analysis and calorific value were carried out to obtain the composition and calorific value of biochar. Experiment on the adsorption property of methylene blue and iodine of biochar was carried out, and the respective correlations between absorption properties and RGB, grey value were explored. Results showed that with the increased carbonization temperature, the volatile content was reduced, the fixed carbon and ash content and the calorific value of biochar were increased. Methylene blue adsorption value and iodine adsorption value of biochar made at low pyrolysis temperature were larger than those at high pyrolysis temperature. It meant that adsorption characteristics of biochar at low pyrolysis temperature were better. With the increase of pyrolysis temperature, adsorption value and RGB value of biochar were declined. There was a strong positive correlation between adsorption characteristics and RGB value, and the correlation coefficient was ranged from 0.582 to 0.944. Analogously, the correlation coefficient of adsorption characteristic value and grey value was ranged from 0.685 to 0.977, which indicated that they also had strong positive correlation. A quick detecting method of carbonization level and adsorption properties of biochar was proposed.

Key words: Biochar Adsorption characteristics Scanned images RGB value Grey value

引言

中国蕴藏的生物质能非常丰富,国家中长期科

技发展规划指出^[1],未来 10 年生物质将至少达到 15 亿 t 标准煤的资源量,其中 2015 年可开发生物质资源量可超过 3 亿 t,生物质资源中能源农林业提供

收稿日期: 2015-07-26 修回日期: 2015-08-19

^{*} 科技部农业科技成果转化资金资助项目(2014GB2E000048)和土壤植物机器系统技术国家重点实验室开放课题资助项目(2014-SKL-07)

作者简介: 王明峰,讲师,博士,主要从事生物质能利用研究,E-mail: wangmingfeng@scau.edu.cn

通讯作者: 蒋恩臣,教授,博士生导师,主要从事生物质能利用工程研究,E-mail: ecjiang@scau.edu.cn

3/4、传统生物质提供 1/4。花生壳与玉米秸秆是数量较大的农林废弃物之一,花生壳主要来源是榨油厂的剩余废料,而玉米秸秆则大多数都是来自田地的废弃物。由于花生壳跟玉米秸秆存在能量密度低、运输难度大、储存不方便等缺点^[2],给生物质的规模化利用带来困难,而热解炭化是解决这些问题可行的方法。生物质转化利用方式较多,当前,最具实用价值、运用最广泛的方式是热化学转化^[3-8],热分解技术是热化学转化技术之一,其原理是通过热化学反应的方式将生物质主要成分纤维素、半纤维素、木质素等分解成燃料物质,即生物质炭、可燃气、生物油,生物质热分解有极高的能量转化率,通常可达 95% 以上。热分解技术中根据气、液、固 3 种产物的含量差异分为热解气化、热解液化、热解炭化,其中热解炭化在这 3 种技术中发展最成熟,日益在人们生活中发挥重要作用。

生物质炭是一类多孔富碳,与活性炭类似,在有害物质吸附方面有良好前景^[9]。近年来,研究生物质炭对有机污染物的吸附作用成为环境工作者十分关注的问题^[10]。刘莹莹等^[11]利用不同作物原料的生物质炭对水溶液中的 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 吸附特性进行了研究,发现玉米秸秆炭对以上 2 种重金属离子的去除率达 90% 以上。何丽芝等^[12]研究了生物质炭对土壤吸附吡虫啉的影响,发现生物质炭的添加能增强土壤对吡虫啉的吸附能力。

本文通过无轴螺旋连续热解装置对花生壳与玉米秸秆原料在 300、400、500℃ 的热解温度下进行炭化制备生物质炭。对生物质炭进行工业分析与热值测量,测定其组成成分;对生物质炭进行亚甲基蓝吸附值与碘吸附值测定,探究热解温度对吸附特性的影响;探究生物质炭 RGB 值和灰度与生物质炭吸附值的相关关系。基于以上研究,提出一种可以用 RGB 值快速判定生物质炭的炭化程度和吸附特性的方法。

1 实验方法

1.1 生物质炭的制备

实验选用的原料为产自广东广州的花生壳和江苏连云港的玉米秸秆。

花生壳与玉米秸秆在高速多功能粉碎机中粉碎过 40 目筛后,放入电热恒温干燥箱中在 78℃ 下干燥 24 h,干燥后花生壳和玉米秸秆的含水率分别为 6.03% 和 7.21%,适用于连续热解装置。利用自制的无轴螺旋连续热解装置(图 1)分别在 300、400、500℃ 的温度条件下对原料进行连续热解炭化,热解

时间约为 10 min,获得的生物质炭在炭箱中静置 4 h 后取出用于吸附特性研究。

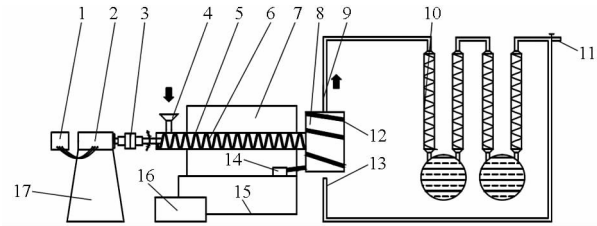


图 1 无轴螺旋连续热解装置

Fig. 1 Sketch of biomass continuous pyrolysis reactor

1. 调速器 2. 驱动电动机 3. 联轴器 4. 进料斗 5. 热解反应器 6. 无轴螺旋输送器 7. 加热炉 8. 炭箱 9. 出气口 10. 冷凝管 11. 集气阀 12. 伴热带 13. 气体回烧 14. 伴热带温控器 15. 炉体支架 16. 炉体温控器 17. 电动机支架

1.2 工业分析与热值

工业分析参照 GB/T 28731—2012《固体生物质燃料工业分析方法》,利用全自动工业分析仪进行生物炭的工业分析;利用自动量热仪参照 Q/ACHH011—2006《自动量热仪》发热量测量方法进行生物炭热值分析。

1.3 亚甲基蓝吸附

亚甲基蓝吸附实验参照 GB/T 12496. 10—1999《木质活性炭试验方法 亚甲基蓝吸附值的测定》。称取经粉碎至 71 μm 的干燥试样 0.100 g(精度为 0.1 mg)置于 250 mL 的锥形瓶中,用移液管加入 25 mL 亚甲基蓝溶液(0.1 mmol/L),保持室温(20℃)以下,以 150 r/min 的转速振荡 30 min。振荡结束后迅速过滤,取滤液用 UV762 型紫外分光光度计以 665 nm 波长测试滤液的浓度。

在波长 665 nm 下建立的亚甲基蓝浓度标准曲线如图 2 所示,UV762 型紫外分光光度计的吸光度测量范围为 -0.301 ~ 3.000,若所测亚甲基蓝滤液的吸光度超过该范围,可以取 10 mL 滤液于 100 mL 容量瓶中加水稀释到刻度线,然后再用稀释后的滤液进行检测得出滤液的浓度,实验重复 2 次。

平衡时单位生物质炭亚甲基蓝吸附量计算公式为

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{W} \tag{1}$$

式中 Q_e ——平衡时单位生物质炭吸附溶液中亚甲基蓝的量,mg/g

C_0 ——初始溶液的亚甲基蓝溶液质量浓度,mg/L

C_e ——平衡时溶液的亚甲基蓝质量浓度,mg/L

V ——消耗的亚甲基蓝溶液体积,L

W ——生物质炭干燥质量,g

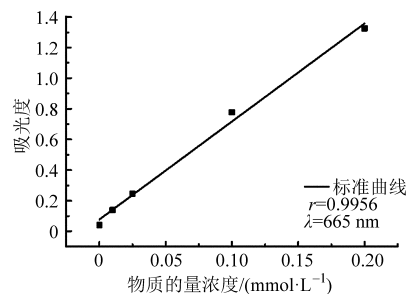


图2 亚甲基蓝浓度标准曲线

Fig.2 Standard curve of methylene blue

1.4 碘吸附

碘吸附实验参照 GB/T 12496.8—1999《木质活性炭试验方法 碘吸附值的测定》。称取粉碎至 71 μm 的干燥试样 0.5 g(精度为 0.4 mg),放入干燥的 100 mL 碘量瓶中,准确加入(1.0 mL 水 + 9.0 mL 浓盐酸)盐酸 10.0 mL,使试样湿润,放在电炉上加热至微沸(30 ± 2) s,冷却至室温后,加入 50.0 mL 的 0.1 mol/L 碘标准溶液,立即塞好瓶盖,在振荡机上振荡 15 min,迅速过滤到干燥烧杯中。用移液管吸取 10.0 mL 滤液,放入 250 mL 碘量瓶中,加入 100 mL 水,用 0.1 mol/L 的硫代硫酸钠标准溶液进行滴定,在溶液呈淡黄色时,加入 2 mL 淀粉指示剂,继续滴定溶液变为无色,记录下使用的硫代硫酸钠体积,实验重复 2 次。

碘吸附值计算公式为

A = \frac{5(10C_1 - 1.2C_2V_2) \times 127}{m} D \tag{2}

式中 A——试样的碘吸附值,mg/g
C₁——碘标准溶液浓度,mol/L
C₂——硫代硫酸钠标准溶液浓度,mol/L
V₂——硫代硫酸钠溶液消耗的量,mol
m——试样质量,g D——矫正系数

1.5 生物质炭 RGB 采集

用扫描仪对 6 个炭样进行扫描得到 jpg 格式的扫描图像,再用 ColorPix 取色软件对炭样图像上的点进行 RGB 数据采集。由于无法直接获取图像的整体 RGB 值,故随机选择 10 个点采集 RGB 值,取这 10 个点数据的平均值作为炭样的 RGB 值,所选取点之间的平均误差为 1.60 ~ 2.85。

1.6 RGB 值转换灰度

使用 RGB 值建立关系模型时,变量太多。总共有 R、G、B 3 个变量,这给建模带来了很大的难度,而由 RGB 值转化成灰度后则可以通过单一变量建立关系模型。灰度化处理可以减少处理图像时的计算量,且灰度图像的描述与彩色图像一样仍然能反映整幅图像的整体和局部色度与亮度等级的分布与特征^[13]。灰度是影响灰度图的唯一因素,灰度越

浅,越接近于白色;灰度越深,越接近于黑色^[14]。YIQ(Y 是灰度,I 和 Q 是色调)色彩空间属于 NTSC 系统(正交平衡调制),其中灰度 Y 与 R、G、B 的关系为

Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \tag{3}

式中 R——颜色的红色成分,范围为 0 ~ 255
G——颜色的绿色成分,范围为 0 ~ 255
B——颜色的蓝色成分,范围为 0 ~ 255

对 6 个炭样采集到的 R、G、B 值通过式(3)可计算出各炭样的灰度。

2 结果与分析

2.1 工业分析与热值测量结果

生物质炭的工业分析与热值测量结果如表 1 所示。花生壳与玉米秸秆原料的工业分析结果中挥发分的含量分别为 77.40% 和 73.32%,随着炭化温度的升高,原料解析出的挥发物增多,生物质炭中挥发分的含量逐渐降低,在 500℃ 条件下热解炭化后的花生壳炭与玉米秸秆炭的挥发分含量分别降至最低值 22.30% 和 18.41%。生物质炭中灰分和固定碳的含量随热解温度升高而增加,其中固定碳的含量增幅明显,为生物质炭的主要成分。生物质炭中固定碳的含量对总能量影响最大^[15],因此随着炭化温度升高,固定碳含量的大幅度增加导致生物质炭的热值升高。花生壳炭与玉米秸秆炭的热值差异较大,花生壳炭的热值大于玉米秸秆炭。

表 1 生物质炭的工业分析与热值

Tab.1 Proximate analysis and calorific value of biochar

试样	热解 温度/℃	挥发分 V _d /%	灰分 A _d /%	固定碳 FC _d /%	高位热值/ (MJ·kg ⁻¹)	低位热值/ (MJ·kg ⁻¹)
花生壳	原料	77.40	4.12	18.48	18.428	17.317
	300	32.58	13.78	53.64	24.727	24.067
	400	30.25	14.02	55.73	25.638	24.882
	500	22.30	16.34	61.36	26.226	25.728
玉米秸秆	原料	73.32	11.77	14.91	9.751	9.057
	300	31.94	24.48	43.58	20.739	19.995
	400	26.74	29.54	43.72	22.281	21.490
	500	18.41	31.59	50.00	23.249	22.444

2.2 亚甲基蓝吸附与碘吸附

由式(1)计算出生物质炭的亚甲基蓝吸附值,对 2 次实验的数据取平均值,结果如图 3 所示。2 种生物质炭对亚甲基蓝的吸附值均随着热解温度的升高呈降低趋势,300℃ 条件下炭化的花生壳炭与玉米秸秆炭的吸附值最高,分别为 18.17、19.67 mg/g,玉米秸秆炭对亚甲基蓝的吸附效果优于花生壳炭。

由式(2)计算出生物质炭的碘吸附值,对 2 次

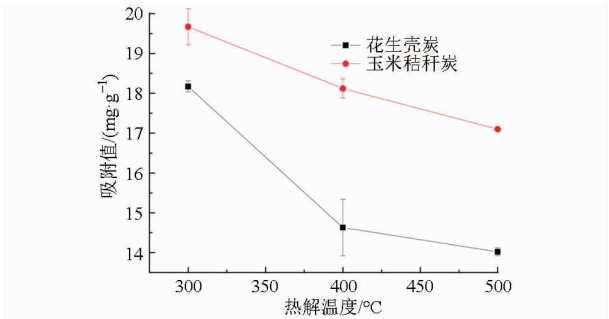


图 3 生物质炭的亚甲基蓝吸附值

Fig. 3 Methylene blue adsorption value of biochar

测量的数据取平均值,结果如图 4 所示。2 种生物质炭对碘的吸附值都随炭化温度的升高而降低,300℃ 与 400℃ 条件下热解的炭吸附效果相近,碘吸附值均大于 300 mg/g。当热解温度上升为 500℃ 后,生物质炭的碘吸附值大幅度下降,花生壳炭与玉米秸秆炭的碘吸附值分别为 163.05、162.60 mg/g,大约只有低温热解下生物质炭的 1/2。

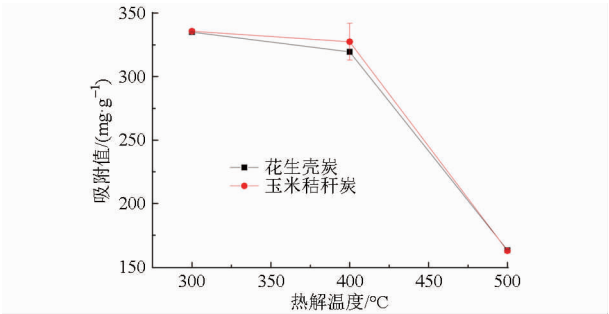


图 4 生物质炭的碘吸附值

Fig. 4 Iodine adsorption value of biochar

随着热解温度的升高,原料在热解过程中析出的挥发物会增加,挥发分中的可凝气在冷却后会液化附着在热解炭的孔隙结构里,同时,木质素在炭化过程中会发生软化、熔融,这 2 个因素都会导致生物质炭的部分孔隙结构堵塞,会使生物质炭的物理吸附特性减弱^[16-19]。因此,随着热解温度的升高,生物质炭对亚甲基蓝和碘的吸附值呈降低趋势。另外,在高温热解时生物质炭会发生塑性变形,抑制微孔的形成,由于碘吸附值是表征微孔富集程度的指标,所以在 500℃ 条件下热解的炭因为微孔的形成受到较大程度的抑制而表现出碘吸附值要远小于低温热解时的炭。

2.3 生物质炭的 RGB 值

花生壳炭与玉米秸秆炭的扫描图像如图 5 所示,其 RGB 值如图 6、7 所示。由图 6、7 可知,2 种生物质炭的 RGB 值随着热解温度的升高而降低,相关性分析得出炭化温度与 RGB 值之间的相关系数如表 2 所示,相关系数均大于 -0.893,属于极强负相关。

当生物质炭图像的 RGB 值趋于零时,颜色会趋

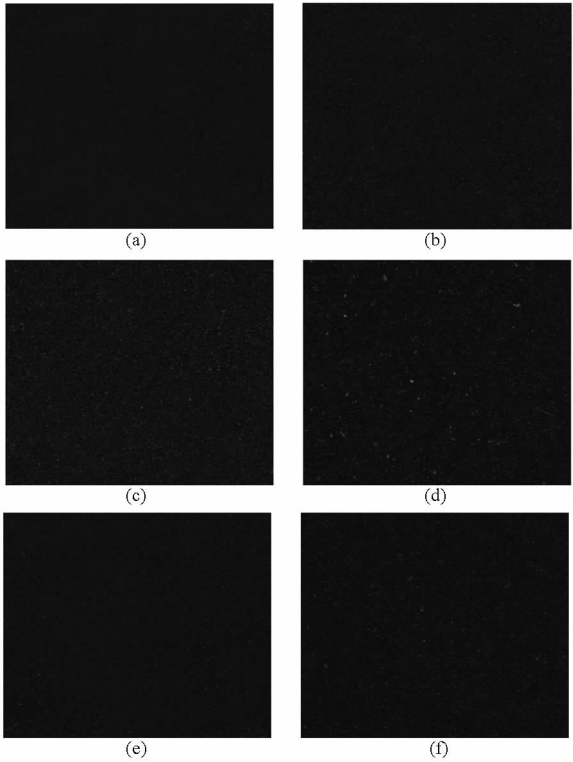


图 5 生物质炭的扫描图像

Fig. 5 Scanned images of biochar

(a) 花生壳 300℃ (b) 花生壳 400℃ (c) 花生壳 500℃
(d) 玉米秸秆 300℃ (e) 玉米秸秆 400℃ (f) 玉米秸秆 500℃

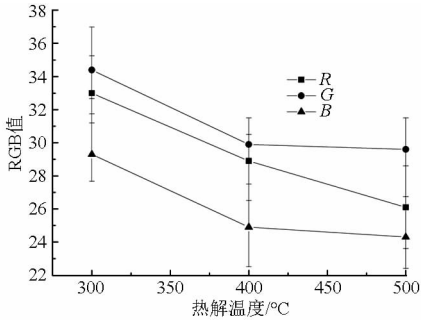


图 6 花生壳炭的 RGB 值

Fig. 6 RGB value of peanut shell biochar

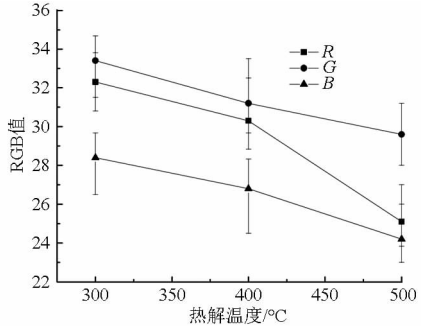


图 7 玉米秸秆炭的 RGB 值

Fig. 7 RGB value of corn stalks biochar

于黑色^[20]。原料在炭化过程中,随着热解温度的升高,炭化程度加强,颜色会逐渐变化为黑色,导致其 RGB 值降低。同比,随着热解温度的升高,生物质炭的吸附特性也呈降低趋势,RGB 值与吸附值之间

存在着正相关关系。

表 2 热解温度 T 与 RGB 的相关系数
Tab.2 Correlation coefficient of carbonization temperature and RGB value

原料	$R-T$	$G-T$	$B-T$
花生壳炭	-0.969	-0.996	-0.991
玉米秸秆炭	-0.994	-0.893	-0.916

从微观角度分析,当扫描仪的光源照射生物质炭后在反射回来的过程中,由于较高温度条件下炭化的热解炭孔隙结构部分受到堵塞与塑性形变程度较高,光信号透过孔隙结构并返回到扫描仪光带时信号损失较大,导致生成的图像中 RGB 值均较低;同比,较高温度下炭化的生物质炭因孔隙结构变差,物理吸附效果降低,导致对亚甲基蓝与碘的吸附值降低。在微观角度上,RGB 值与吸附值之间也存在正相关关系。

基于以上 2 点,对 RGB 值与吸附值之间作相关程度分析,结果如表 3 所示。根据皮尔逊相关系数对相关程度强弱的定义,相关系数 0.8~1.0 为极强相关,0.6~0.8 为强相关,0.4~0.6 为中等相关。由表 3 可以看出,花生壳炭的亚甲基蓝和碘吸附值、玉米秸秆炭的亚甲基蓝吸附值与 R 、 G 、 B 值之间的相关系数均大于 0.8,属于极强相关;玉米秸秆炭的碘吸附值与 R 、 G 、 B 值的相关系数分别为 0.831、0.582、0.626,分别属于极强相关、中等相关、强相关。

表 3 RGB 值与吸附特性的相关系数
Tab.3 Correlation coefficient of RGB value and adsorption value

原料	R -亚	G -亚	B -亚	R -碘	G -碘	B -碘
花生壳炭	0.803	0.957	0.866	0.982	0.862	0.954
玉米秸秆炭	0.994	0.940	0.957	0.831	0.582	0.626

2.4 生物质炭的灰度值

2 种生物质炭通过 RGB 值转换灰度公式计算得出的灰度如图 8 所示。灰度随着热解温度的升高,炭化程度加强,生物质炭中固定碳的含量比重增大,导致灰度呈下降趋势。

通过将 RGB 值转换成灰度可以将 3 个变量转换成一个变量来分析生物质炭的色度与吸附特性的相关系数,可以更加直观、综合地考察两者之间的相关程度。生物炭的灰度与吸附特性的相关度如表 4 所示。从表 4 可以看出,玉米秸秆炭的灰度与碘吸附值之间的相关系数为 0.685,属于强相关,表中另外 3 项相关系数均大于 0.8,属于极强相关。灰度可间接反映生物质炭物理吸附特性的强弱。

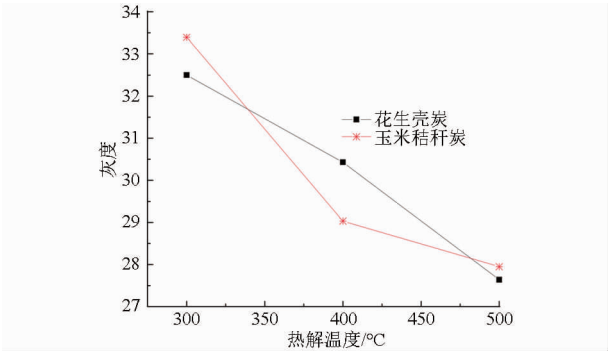


图 8 生物质炭的灰度

Fig.8 Grey value of biochar

表 4 灰度与吸附特性的相关系数
Tab.4 Correlation coefficient of grey value and adsorption value

原料	灰度-亚甲基蓝	灰度-碘
花生壳炭	0.891	0.937
玉米秸秆炭	0.977	0.685

3 结论

(1)随着热解温度的升高,炭化程度加强,灰分和固定碳的含量升高,热值小幅度升高。

(2)玉米秸秆炭的吸附能力强于花生壳炭的吸附能力;在 300~500℃ 的热解温度范围内,随着热解温度的升高,生物质炭的亚甲基蓝吸附值、碘吸附值逐渐降低,热解温度低于 400℃ 时,微孔结构发生塑性形变的程度较低,当热解温度上升到 500℃ 及以上时,塑性形变的程度大幅度提高,吸附值大幅度下降。

(3)随着热解温度的升高,生物质炭炭化程度加强,其 RGB 值降低;2 种生物质炭的亚甲基蓝吸附值与其 RGB 值之间的相关系数大于 0.8,属于极强相关;花生壳炭的碘吸附值与其 RGB 值的相关系数大于 0.8,属于极强相关;玉米秸秆炭的碘吸附值与其 R 值的相关系数大于 0.8 为极强相关,而与 G 值的相关系数为 0.582,为中等相关,与 B 值的相关系数为 0.626,为强相关。

(4)花生壳炭的灰度与亚甲基蓝和碘吸附值之间的相关系数较高,分别为 0.891 和 0.937,属于极强相关;玉米秸秆炭的灰度与亚甲基蓝吸附值之间的相关系数为 0.977,属于极强相关,而与碘吸附值之间的相关系数为 0.685,属于强相关。灰度可间接反映生物质炭物理吸附特性的强弱。

(5)随着炭化程度的加强,生物质炭的物理吸附特性增强,颜色逐渐变黑导致生物质炭的 RGB 值降低,RGB 值可以提供一个快速判定生物质炭炭化程度与物理吸附特性强弱的方法。

参 考 文 献

1 孙振钧,袁振宏,张夫道,等. 农业废弃物资源化与农村生物质资源战略研究报告[R]. 国家中长期科学和技术发展规划战略研究,2004.

2 Ma Fangrui, Hanna M A. Biodiesel production: a review[J]. Bioresource Technology,1999,70(1):1-15.

3 Hertwich E G, Zhang X P. Concentrating-solar biomass gasification process for a 3rd generation biofuel[J]. Environmental Science and Technology,2009,43(11):4207-4212.

4 Huber G W, Iborra S, Corma A. Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts, and engineering[J]. Chemical Reviews, 2006,106(9):4044-4098.

5 Garcia-Perez M, Wang S, Shen J, et al. Effects of temperature on the formation of lignin-derived oligomers during the fast pyrolysis of Mallee woody biomass[J]. Energy & Fuels,2008,22(3):2022-2032.

6 Bridgeman T G, Jones J M, Shield I, et al. Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties[J]. Fuel,2008,87(6):844-856.

7 Hosoya T, Kawamoto H, Saka S. Pyrolysis gasification reactivities of primary tar and char fractions from cellulose and lignin as studied with a closed ampoule reactor[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2008,83(1):71-77.

8 王益群. 生物质在流化床中热解过程的动力学模拟[D]. 合肥:中国科学技术大学,2008.

9 Wang Yiqun. Dynamical modeling of biomass pyrolysis in fluidized bed[D]. Hefei:University of Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)

9 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 Shixiang, Ji Qiang, Li Zhonghui, et al. Characteristics and mineralization in soil of apple-derived biochar produced at different temperatures[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(6):183-192. (in Chinese)

10 王宁,侯艳伟,彭静静,等. 生物炭吸附有机污染物的研究进展[J]. 环境化学,2012,31(3):287-295.

Wang Ning, Hou Yanwei, Peng Jingjing, et al. Research progress on sorption of organic contaminants to biochar[J]. Environmental Chemistry,2012,31(3):287-295. (in Chinese)

11 刘莹莹,秦海芝,李恋卿,等. 不同作物原料热裂解生物质炭对溶液中 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的吸附特性[J]. 生态环境学报,2012,21(1):146-152.

Liu Yingying, Qin Haizhi, Li Lianqing, et al. Adsorption of Cd^{2+} and Pb^{2+} in aqueous solution by biochars produced from the pyrolysis of different crop feedstock[J]. Ecology and Environmental Sciences,2012,21(1):146-152. (in Chinese)

12 何丽芝,张小凯,吴慧明,等. 生物质炭及老化过程对土壤吸附吡虫啉的影响[J]. 环境科学学报,2015,35(2):535-540.

He Lizhi, Zhang Xiaokai, Wu Huiming, et al. Effect of biocars and aging process on soil adsorption of imidacloprid[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2015,35(2):535-540. (in Chinese)

13 张琪,张志明,冯坤,等. 一种运用 Photoshop 实现彩色图像灰度化方法[J]. 计算机与数字工程,2010,38(12):124-127.

Zhang Qi, Zhang Zhiming, Feng Kun, et al. Use Photoshop to achieve a kind of gray-scale method for color image[J]. Computer & Digital Engineering,2010,38(12):124-127. (in Chinese)

14 武小勇. 基于灰度变化的牛奶菌群检测系统分析与设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.

Wu Xiaoyong. Milk microflora detection system analysis and design based on grey change[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2008. (in Chinese)

15 胡威,胡建杭,王华,等. 生物质炭化原料选择及需热量分析[J]. 煤炭转化,2012,35(3):80-83.

Hu Wei, Hu Jianhang, Wang Hua, et al. Selection of biomass materials producing char and analysis of caloric requirement[J]. Coal Conversion,2012,35(3):80-83. (in Chinese)

16 罗凯,陈汉平,王贤华,等. 生物质焦及其特性[J]. 可再生能源,2007,25(1):19-20.

Luo Kai, Chen Hanping, Wang Xianhua, et al. Characterization of bio-char and its characteristics[J]. Renewable Energy Resources,2007,25(1):19-20. (in Chinese)

17 林晓芬,张军,尹艳山,等. 生物质炭孔隙分形特征研究[J]. 生物质化学工程,2009,43(3):9-12.

Lin Xiaofen, Zhang Jun, Yin Yanshan, et al. Study on fractal characteristics of biomass chars[J]. Biomass Chemical Engineering, 2009,43(3):9-12. (in Chinese)

18 罗煜,赵立欣,孟海波,等. 不同温度下热裂解芒草生物质炭的理化特征分析[J]. 农业工程学报,2013,29(13):208-217.

Luo Yu, Zhao Lixin, Meng Haibo, et al. Physio-chemical characterization of biochars pyrolyzed from miscanthus under two different temperatures[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(13):208-217. (in Chinese)

19 Sharma R K, Wooten J B, Vicki L B, et al. Characterization of chars from pyrolysis of lignin[J]. Fuel, 2004,83(11):1469-1482.

20 黄国祥. RGB 颜色空间及其应用研究[D]. 长沙:中南大学,2002.

Huang Guoxiang. RGB color space and it's application[D]. Changsha:Central South University, 2002. (in Chinese)