

病死鸡微波水热处理制备生物油及其特性研究

张 鑫^{1,2}, 吴 可^{1,2}, 周 檀^{1,2}, 樊晨昕^{1,2}, 袁巧霞^{1,2}

(1. 农业部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070; 2. 华中农业大学工学院, 武汉 430070)

摘 要: 研究不同温度对微波水热处理鸡肉制备生物油及其特性的影响。结果表明,随着温度升高,生物油产率逐渐升高,其热值(35.22~37.22 MJ/kg)显著高于原料鸡肉(26.46 MJ/kg)。各温度所得生物油组分复杂,且主要成分均为脂肪酸类物质。此外,高温所得生物油中酰胺类及含氮杂环类物质更为丰富。240 ℃制得生物油的综合燃烧指数最高,其燃烧性能最佳。

关键词: 微波; 生物质; 生物燃料; 水热; 病死鸡

中图分类号: S216.1; X713 **文献标识码:** A

0 引 言

中国畜禽养殖业集约化、规模化发展的同时,也面临着如何有效处理大量病死畜禽的难题。根据统计数据显示,仅在2012年我国病死畜禽总量约在7.3亿头(只),如遇重大疫情其量还会升高^[1]。病死畜禽尸体携带大量病原微生物,如果随意丢弃,不仅会污染环境,还会对人畜生命安全造成威胁。然而,病死动物机体含有大量水分、有机物质和矿物元素,是丰富的资源和能源宝库^[2]。因此,实现病死畜禽的无害化处理和资源化利用具有重要意义。

目前,病死畜禽的处理方法有深埋法、焚烧法、化制法和发酵法等^[3]。国内最常用的方法还是深埋法和焚烧法,此类方法处理较为方便,但造成大量资源浪费,而且存在二次污染的潜在威胁^[4]。化制法和发酵法等可进行资源化利用的方法,由于资金技术等限制,还不能满足我国畜禽养殖快速发展的需求,因此更安全有效环保的处理技术值得进一步探索。

微波水热是一种利用微波加热实现水热处理的生物质转化技术,其具有水热处理绿色、高效、可处理的生物质类型广泛,较好的生物安全性的特点^[5-7],以及微波加热速度快、效率高、成本低和环境效益好的优点^[8-10]。本文研究微波水热处理鸡肉制备生物油及其特性,以期利用微波水热技术实

现病死畜禽资源化利用提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 整鸡样品的制备

为试验过程中生物安全性,本试验使用的整鸡样品为采购自华中农业大学周边菜市场的新鲜活鸡,去除羽毛后带骨通过餐厨垃圾粉碎机进行充分粉碎,搅拌均匀后测定其含水率,按每次试验所需样品量分装,-20 ℃冷冻保存。

1.2 生物油的制备

微波水热试验利用上海新仪 MDS-15 微波消解萃取合成工作站进行。取20 g 鸡肉样品,量取45 mL 去离子水,放入90 mL 石英反应罐中,由于试验装置的限制,本试验采用空气作为水热反应试验氛围,反应温度分别设定为120、160、200、240 ℃,待升温至设定温度后保温2 h。反应完成后,待反应罐体冷却至室温,开盖排出气相产物,反应后的固液混合物经二氯甲烷(CH_2Cl_2)洗涤萃取后,通过离心和真空抽滤分离得到固相和萃取相产物,前者干燥后得到固体残渣,后者经减压旋转蒸发得到油相产物,定义为生物油。每组试验重复2次,并取平均值作为结果。本文定义不同温度制得生物油分别为120 ℃-油、160 ℃-油、200 ℃-油和240 ℃-油。微波水热处理制备生物油流程如图1所示。

收稿日期: 2019-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(31872400)

通信作者: 袁巧霞(1963—), 女, 博士、教授、博士生导师, 主要从事农业生物环境与能源工程方面的研究。qxuan@mail.hzau.edu.cn

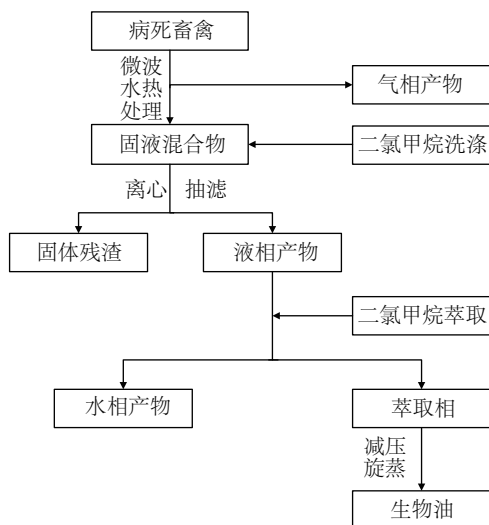


图1 微波水热处理制备生物油流程图

Fig. 1 Process of producing bio-oil by microwave hydrothermal

固体残渣得率和生物油产率计算如式(1)和式(2)所示:

$$Y_s = \frac{M_s}{M_c} \times 100\% \quad (1)$$

$$Y_o = \frac{M_o}{M_c} \times 100\% \quad (2)$$

式中, Y_s 、 Y_o ——固体残渣得率和生物油产率; M_s 、 M_o 和 M_c ——固体残渣质量、生物油质量和原料干物质的质量。

1.3 分析方法

1.3.1 原料基本组成成分分析

鸡肉原料的粗蛋白质测试通过国标 GB 5009.5—2016 中凯氏定氮法进行(分析仪器: KDN-102C 凯氏定氮仪, 中国上海), 粗脂肪按国标 GB 5009.6—2016 中索氏提取法进行, 粗纤维则按范氏纤维测定法进行测定(分析仪器: ANKOM A2000i 型全自动纤维分析仪, 美国安康), 鸡肉含水率通过中华人民共和国农业行业标准 NY/T 1881.1—2010 生物质固体成型燃料试验方法进行测定(分析仪器: DHG-92485-III 电热恒温鼓风干燥箱, 中国上海)^[11]。

1.3.2 元素分析和热值分析

鸡肉原料和生物油中 C、H、O、N 元素采用 Elementar Vario PYRO cube and Isoprime 100(德国 Elementar)元素分析仪进行测定。鸡肉原料和生物油的高位热值采用 ZDHW-5000 微机全自动弹量热

仪(中国, 鹤壁)进行测定。

1.3.3 GC-MS 和 FTIR 分析

生物油组成成分定性分析采用 Agilen 7890B-5977A(美国, 安捷伦)气相色谱质谱联用仪进行测定。色谱条件: HP-5MS 毛细管色谱柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm), 以高纯氮为载气, 流速 1 mL/min, 分流比 50:1, 进样量 1 μL。以 5 °C/min 的速率由 45 °C 升温至 275 °C, 并保温 5 min。化合物用 NIST11 质谱数据库进行比对。

生物油表观官能团采用 Nicolet iS50(美国, 赛默飞)傅里叶变换红外光谱仪进行测定, 光谱范围 4000~400 cm⁻¹, 分辨率 4 cm⁻¹。

1.3.4 热重分析

称取(6±0.3) mg 生物油样品置于坩埚中, 采用美国 TA 公司 SDTQ600 型同步热分析仪进行生物油样品燃烧特性测定。以空气作为载气, 气体流量为 100 mL/min, 升温速率分别为 20 °C/min, 温度范围是从室温升温至 900 °C, 然后降温冷却。

根据热重分析结果计算生物油综合燃烧特性指数 $S^{[12]}$, 其计算如式(3)所示:

$$S = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\max} \cdot \left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{mean}}}{T_i^2 \cdot T_b} \quad (3)$$

式中, $\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\max}$ ——最大燃烧速率, %/min;
 $\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{mean}}$ ——平均燃烧速率, %/min; T_i ——着火温度, K; T_b ——燃尽温度, K。

2 结果与讨论

试验所用的整鸡(无羽毛)原料的基本组成成分及含水率等见表 1。从表 1 中可看出鸡肉中水分含量较高, 可作为反应物直接参与到水热处理过程中。鸡肉中的粗脂肪含量较高, 研究表明脂质是制取生物油最有效的组分^[13]。

表1 鸡肉原料基本组成成分分析(%)

Table 1 Biochemical compositions of chicken(%)

粗蛋白	粗脂肪	粗纤维	含水率
6.52	9.73	8.06	75.40

2.1 温度对生物油产率及固体残渣得率的影响

反应温度对生物油产率及固体残渣得率的影响如图 2 所示。随着反应温度的升高, 生物油的产

率逐渐升高,在 240 ℃时生物油产率达 61.56%。而固体残渣的得率,随着温度的升高逐渐降低,在 240 ℃时其得率仅为 6.71%。水热反应温度较低时,鸡肉原料只发生部分的水解,此时生物油产率较低,仍有大量的固体剩余。随着温度升高,原料中脂类物质开始大量地水解,这些水解产物往油相中迁移,从而使得生物油产率不断升高。

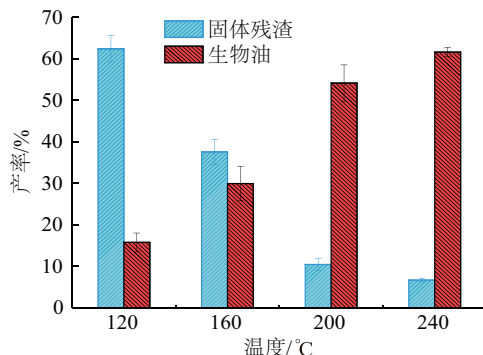


图2 反应温度对生物油产率及固体残渣得率的影响

Fig. 2 Effects of temperature on the yields of bio-oil and solid residue

郑冀鲁等^[14]在研究病死猪的常规水热液化(反应温度为 150~400 ℃,反应压力为 4 MPa,固液添加比例为 20 g:100 mL)过程中得出,在 250 ℃时其生物油达到最大产率为 43%,再随着温度升高,生物油产率开始下降。而本研究在 240 ℃时生物油产率超过 60%,由于实验设备的限制,240 ℃是否为最大产油率的反应温度还需进一步研究。对比上述研究结果,虽然反应原料存在差异,但可说明微波水热可有效对病死动物机体进行转化制取生物油。

2.2 温度对生物油 HHV 及元素组成的影响

鸡肉原料与不同温度下制得的生物油的高位热值 HHV 及元素组成见表 2。由表 2 可知,不同反应温度下制得的生物油热值均高于鸡肉原料。其热值高于快速热解生物油热值(16 MJ/kg),低于 0# 国标柴油的热值(42.6 MJ/kg)^[14],有开发为液体燃料的潜力。

相较于鸡肉原料,各温度下制得的生物油的碳元素含量均有大幅度的增加,而氧元素的含量有明显的降低,这说明水热反应促进了生物质原料的脱羧、脱水等脱氧反应^[15]。另外,随着温度的升高,生物油中的氧元素含量逐渐降低,说明温度的升高加剧这些脱氧反应的进行。同时,生物油中氮元素的

含量逐渐升高,这主要是由于原料中如蛋白质等含氮化合物,在高温下水解分解成一些不溶于水的含氮有机物,进而迁移到油相中,导致生物油中氮元素含量升高^[16]。生物油中氮元素的存在,在生物油燃烧过程中会以 NO_x 的形式释放出来,造成环境污染进而影响生物油的利用,在以后研究中如何进行生物油中氮的脱除需要进一步的探讨。

表2 反应温度对生物油热值及元素组成的影响

Table 2 Effect of temperature on HHV and element composition of bio-oil

类别	HHV/ MJ·kg ⁻¹	元素组成/%			
		[C]	[H]	[O]	[N]
鸡肉	26.46	45.57	5.27	25.34	7.61
120 ℃-油	37.22	72.01	4.67	14.13	0.49
160 ℃-油	36.53	71.11	4.85	13.81	0.69
200 ℃-油	35.38	71.46	4.87	13.78	2.54
240 ℃-油	35.22	71.08	3.91	11.45	4.02

2.3 不同温度下生物油的 FTIR 分析

图 3 为不同温度下制得生物油的 FTIR 谱图,从图 3 中可观察到:各温度生物油在 2850~3000 cm⁻¹ 均出现明显的 C—H 的伸缩振动峰,说明存在脂肪族或者环烷基团;在 1700 cm⁻¹ 附近的 C=O 伸缩振动峰,说明存在酸类、酯类,醛类或者酮类物质;在 1465 cm⁻¹ 和 1370 cm⁻¹ 附近的—CH₂ 和—CH₃ 弯曲振动峰,结合着在 1270 cm⁻¹ 附近出现的 C—O 弯曲振动峰,进一步表明生物油中存在酸类和酯类的物质;在 600~800 cm⁻¹ 出现 C—H 的弯曲振动峰,说明存在芳香族的化合物^[17-20]。从图中还可看出随着温度的升高,C—H 和 C=O 伸缩振动

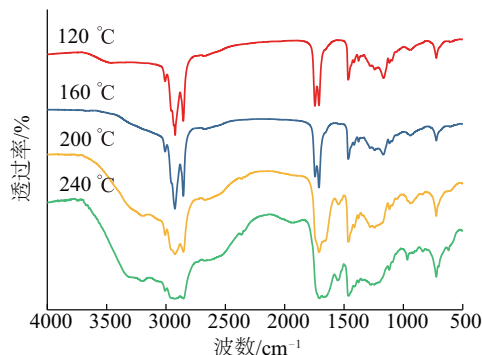


图3 不同温度下制得生物油的 FTIR 谱图

Fig. 3 FTIR spectra of bio-oil obtained at different temperatures

峰的峰强逐渐减弱,说明温度升高促进相对应物质的分解或者转化,导致这些物质的相对含量降低。

另外,在 200 ℃-油和 240 ℃-油的谱图中观察到在 3200 cm⁻¹ 附近出现可能是 O—H 和 N—H 伸缩振动峰的叠加,表明存在醇类或者酰胺类物质^[15,19];在 1575~1525 cm⁻¹ 出现 N—H 伸缩振动峰,表明存在含 N 化合物^[21]。这些吸收峰在 120 ℃-油和 160 ℃-油中并未明显观察到。

2.4 不同温度下生物油的 GC-MS 分析

本文以 200 ℃-油为例,表 3 列出其主要化学组成成分,可看出生物油的组成较为复杂,包含酯类、酸类、酮类、酰胺类以及含 N 杂环类等物质,其检测结果与上述 FTIR 图谱的显示相符合。此外,不同温度下制得的生物油的主要成分的差异对比见表 4。

表 4 不同温度下制得生物油主要成分对比

Table 4 Contrast of main components of bio-oil obtained at different temperatures

成分类型	峰面积/%			
	120 ℃	160 ℃	200 ℃	240 ℃
烃类	0.01	0.05	—	—
醛类	0.546	0.343	—	—
酯类	6.462	5.986	5.559	2.693
酸类	90.077	88.402	73.494	47.812
酮类	—	0.221	0.504	0.491
酰胺类	—	2.074	8.069	12.045
含 N 杂环类	—	—	0.573	2.018

各温度下制得的生物油中均是酸类物质的相对含量最高,这些酸类物质主要是大分子的脂肪酸,其来自于原料中脂肪的水解。而且,随着温度的升高,生物油中酸类物质的相对含量逐渐降低,这主要是因为高温加剧了脂肪以及大分子脂肪酸的分解,其变化趋势与 2.3 节中红外图谱的相对应吸收峰强的变化相吻合;在 120 ℃-油和 160 ℃-油中含有少量的烃类和醛类物质,这些物质形成主要源自于原料中糖类的分解,而在 200 ℃-油和 240 ℃-油中未检测到相关成分,主要是因为高温促使烃类和醛类物质的分解,以及向其他有机物的转化;另外,随着温度的升高,生物油中酰胺类和含 N 杂环类物质的相对含量逐渐升高,其中酰胺类物质主要

来自于蛋白质和氨基酸在高温下直接分解,温度升高促进其分解。同样的,含 N 杂环类物质主要产生于蛋白质和氨基酸等含氨基化合物与还原糖发生的 Maillard 反应中,温度的升高促进了该反应的进行^[16]。酰胺类和含 N 杂环类物质作为生物油中主要的含 N 化合物,其随温度的变化趋势与 2.2 节中不同温度生物油氮元素相对含量的变化相一致。

2.5 生物油的热重分析

不同反应温度制得生物油的 TG 和 DTG 曲线如图 4 所示。水热生物油在空气中的燃烧过程可分为 3 个阶段^[22],而有研究表明热解生物油的燃烧过程可分为 4 个阶段^[12],其第 1 阶段认为是生物油中水分和低沸点物质的蒸发,本试验水热生物油的制备是通过二氯甲烷萃取得到的,生物油中几乎不含有水分,而且水热生物油的 GC-MS 结果显示生物油组分以大分子的脂肪酸为主,低沸点物质较少,因此在燃烧温度直到 200 ℃时也未观察到明显的失重。

第 1 阶段为生物油中轻质组分的蒸发和燃烧阶段。在此阶段水热反应温度越高,其制备的生物油的失重速率越大,240 ℃-油有着最大的失重速率为 22.83%/min,此时生物油的失重率已超过 50%。240 ℃-油在此阶段有最大失重速率说明其含有较高比例的轻质组分,结合生物油 GC-MS 分析,120 ℃-油中脂肪酸等大分子物质的相对含量较高,其轻质组分的比例低,在此阶段不易挥发燃烧,使得其失重速率较低。

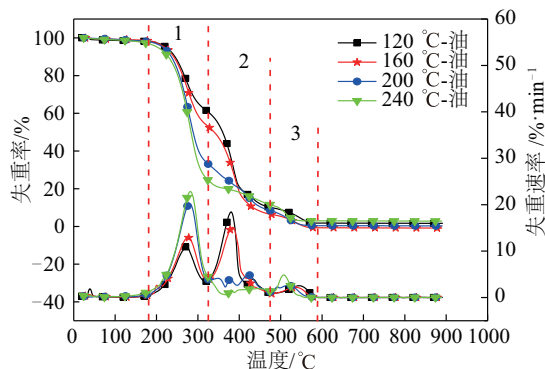


图 4 不同温度下制得生物油的 TG-DTG 曲线
Fig. 4 TG-DTG curves of bio-oil obtained at different temperatures

表3 200 ℃制得生物油 GC-MS 分析
Table 3 GC-MS analysis of bio-oil obtained at 200 ℃

序号	停留时间/min	化合物名称	化学式	峰面积/%
1	4.24	正硅酸甲酯	C ₄ H ₁₂ O ₄ Si	0.005
2	5.13	N-乙基吡咯	C ₆ H ₉ N	0.005
3	5.19	2-甲基吡啶	C ₆ H ₇ N	0.004
4	6.19	N-乙基哌啶	C ₇ H ₁₅ N	0.010
5	13.04	2-乙基-5-甲基吡啶	C ₈ H ₁₁ N	0.018
6	19.25	2-哌嗪酮	C ₅ H ₉ NO	0.037
7	19.67	2-癸酮	C ₁₀ H ₂₀ O	0.008
8	19.78	2-戊基吡啶	C ₁₀ H ₁₅ N	0.006
9	21.73	1,6-己内酰胺	C ₆ H ₁₁ NO	0.013
10	23.28	吡啶	C ₅ H ₅ N	0.014
11	28.64	3-苯基吡啶	C ₁₁ H ₉ N	0.013
12	30.31	2,4-二叔丁基苯酚	C ₁₄ H ₂₂ O	0.005
13	30.89	对氨基联苯	C ₁₂ H ₁₁ N	0.021
14	31.91	十二烷酸	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	0.029
15	36.27	十四烷酸甲(基)酯	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	0.038
16	37.57	十四酸	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	0.250
17	38.71	六氢吡咯并[1,2-a]吡嗪-1,4-二酮	C ₇ H ₁₀ N ₂ O ₂	0.203
18	39.08	氧杂环十三烷-2-酮	C ₁₂ H ₂₂ O ₂	0.013
19	39.97	十五酸	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	0.139
20	40.90	反-9-十六烯酸甲酯	C ₁₇ H ₃₂ O ₂	0.272
21	41.49	十六酸甲酯	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	0.934
22	43.38	十六烷酸	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	26.644
23	45.50	10,13-十八二烯酸甲酯	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	1.256
24	45.69	反-9-十八碳烯酸甲酯	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	1.739
25	45.78	反式-11-十八烯酸甲酯	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	0.432
26	46.20	十八酸甲酯	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	0.772
27	46.95	十八碳-9,12-二烯酸	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	24.073
28	48.05	顺式-9-十八烯酸	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	14.622
29	48.79	十六碳酰胺	C ₁₆ H ₃₃ NO	2.442
30	49.16	反式-9-十八碳烯酸	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	0.383
31	50.35	顺-6-十八碳烯酸	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	0.109
32	51.55	9-十八碳烯酰胺	C ₁₈ H ₃₅ NO	5.347
33	54.43	花生四稀酸	C ₂₀ H ₃₂ O ₂	0.087
34	55.23	9,12-十八烷二烯酸甲酯	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	0.036
合计				79.973

第2阶段为生物油重质组分裂解阶段。有研究表明一些以木质纤维素类物质为原料的热解生物油的非挥发性物质在此阶段发生裂解形成焦炭,在此阶段未见明显的失重^[23,24],而在水热生物油中此阶段出现明显的失重峰^[12],其认为水热生物油中的重质组分相较于热解生物油有更好的挥发性。在此阶段重质组分裂解燃烧生成焦炭和气体,出现明显的失重峰,此阶段出现最大失重速率的生物油为120℃-油,生物油失重速率大小的变化与第1阶段正好相反,其结果说明120℃-油的重质组分含量较多,与第1阶段所述的结果相吻合。经过此阶段,生物油的总失重率已超过80%。

第3阶段为焦炭的燃烧阶段。此阶段主要是第2阶段产生的焦炭或者碳质残留物的燃烧。在其他相关的研究中无论是热解生物油还是水热生物油在该燃烧段均出现急剧的失重峰,而在本试验的研究中,各温度制得的生物油均未在此燃烧段出现类似的急剧失重峰,可能是以动物基生物物质为原料制取的水热生物油中的重质组分在第2阶段挥发或分解程度更深,只有少量焦炭物质生成。此阶段为生物油燃烧的最后阶段,当反应完成后生物油重量已基本无变化,说明失重已结束。

表5中列出通过对TG和DTG曲线进行处理得到一系列表征燃烧的参数。从表5中可看到各温度生物油的着火温度相差不大,240℃-油有较低的燃尽温度,且其综合燃烧特性指数最大,有较好的燃烧性能。

表5 不同温度下制得生物油燃烧特性参数

Table 5 Combustibility characteristic parameters of bio-oil obtained at different temperatures

生物油	着火温度 $T_i/^\circ\text{C}$	燃尽温度 $T_f/^\circ\text{C}$	最大燃烧速率 $\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\max}$	综合燃烧特性指数 $S \times 10^{-7} / \text{K}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$
120℃-油	223	583	18.47	4.62
160℃-油	227	580	15.11	3.76
200℃-油	230	578	20.21	4.95
240℃-油	233	555	22.83	5.90

3 结论

1)微波水热处理可有效促使鸡肉转化制备生物油,在240℃时生物油有最大产率为61.56%。在

不同温度下制备的生物油都有较高的热值,最大可达37.22 MJ/kg,有开发成液体燃料的潜力。

2)鸡肉制备水热生物油的组成复杂,其主要成分为大分子的脂肪酸类物质,且高温生物油中N含量较高,作为燃料利用需进一步脱氮。

3)120℃-油有最低的着火温度和最高的燃尽温度,240℃-油正好与之相反,240℃-油有最大的综合燃烧指数,其综合燃烧性能最好。

[参考文献]

- [1] 沈玉君, 赵立欣, 孟海波. 我国病死畜禽无害化处理现状与对策建议[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(6): 167—173.
- [1] Shen Yujun, Zhao Lixin, Meng Haibo. Present status of harmless disposal of dead livestock and poultry in China and counter-measures [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2013, 15(6): 167—173.
- [2] 费洪标, 姚洪根, 范春晓, 等. 病死动物无害化和资源化处理应用的主要模式及存在问题[J]. 猪业科学, 2015, 32(10): 88—89.
- [2] Fei Hongbiao, Yao Honggen, Fan Chunxiao, et al. The main application modes and existing problems of harmless and resource-oriented treatment of dead animals [J]. Swine Industry Science, 2015, 32(10): 88—89.
- [3] 周海宾, 沈玉君, 孟海波, 等. 病死畜禽无害化处理产物及其应用研究进展[J]. 家畜生态学报, 2018, 39(2): 86—90.
- [3] Zhou Haibin, Shen Yujun, Meng Haibo, et al. Research progress on the products and utilization of innocent treatment of dead livestock and poultry [J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2018, 39(2): 86—90.
- [4] 陈永兴, 彭筱峻, 陆长清, 等. 病死畜禽不同无害化处理方法的环评要点分析[J]. 江西科学, 2016, 34(5): 692—696.
- [4] Chen Yongxing, Peng Xiaojun, Lu Changqing, et al. Key analysis of environmental impact assessment about the different method of harmless treatment to dead animal [J]. Jiangxi Science, 2016, 34(5): 692—696.
- [5] Tekin K, Karagöz S, Bektaş S. A review of hydrothermal biomass processing [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 40: 673—687.
- [6] Gwyther C L, Williams A P, Golyshin P N, et al. The environmental and biosecurity characteristics of

- livestock carcass disposal methods: A review[J]. Waste Management, 2011, 31(4): 767—778.
- [7] Zheng Jilu, Zhu Mingqing, Wu Haitang. Alkaline hydrothermal liquefaction of swine carcasses to bio-oil[J]. Waste Management, 2015, 43: 230—238.
- [8] 刘玉婷, 周 英, 尹大伟, 等. 微波技术在化学化工上的应用[J]. 化学世界, 2010, 51(8): 505—508.
- [8] Liu Yuting, Zhou Ying, Yin Dawei, et al. Applications of the microwave technology on chemistry and chemical industry[J]. Chemical World, 2010, 51(8): 505—508.
- [9] Biller P, Friedman C, Ross A B. Hydrothermal microwave processing of microalgae as a pre-treatment and extraction technique for bio-fuels and bio-products[J]. Bioresource Technology, 2013, 136: 188—195.
- [10] Chen Jinyang, Ding Siyuan, Ji Yimei, et al. Microwave-enhanced hydrolysis of poultry feather to produce amino acid[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2015, 87: 104—109.
- [11] 屈 埴, 刘志丹, 朱张兵, 等. 厨余垃圾水热液化成油特性研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(5): 1327—1333.
- [11] Qu Zhi, Liu Zhidan, Zhu Zhangbing, et al. Bio-crude production from kitchen waste through hydrothermal liquefaction[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(5): 1327—1333.
- [12] 李世博, 蒋恩臣, 王明峰, 等. 油茶果壳连续热解挥发物多级冷凝生物油燃烧特性[J]. 农机化研究, 2017, 39(6): 245—249.
- [12] Li Shibo, Jiang Enchen, Wang Mingfeng, et al. Combustion characteristics of bio-oil from multistage condensation of camellia oleifera shells continual pyrolysis volatiles[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(6): 245—249.
- [13] 庄修政, 黄艳琴, 阴秀丽, 等. 高蛋白藻类两步水热液化制备生物油的研究进展[J]. 石油学报: 石油加工, 2017, 33(5): 1007—1016.
- [13] Zhuang Xiuzheng, Huang Yanqin, Yin Xiuli, et al. Research on bio-oil production from high-protein algae via two-step hydrothermal liquefaction[J]. Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section, 2017, 33(5): 1007—1016.
- [14] 郑冀鲁, 孔永平. 肉质废物水热液化制备液体燃料[J]. 化工学报, 2014, 65(10): 4150—4156.
- [14] Zheng Jilu, Kong Yongping. Hydrothermal liquefaction of waste meat for liquid fuel[J]. CIESC Journal, 2014, 65(10): 4150—4156.
- [15] 张冀翔, 王 东, 蒋宝辉, 等. 厨余垃圾水热液化制取生物燃料[J]. 化工学报, 2016, 67(4): 1475—1482.
- [15] Zhang Jixiang, Wang Dong, Jiang Baohui, et al. Hydrothermal liquefaction of kitchen waste for bio oil production[J]. CIESC Journal, 2016, 67(4): 1475—1482.
- [16] Wang Tengfei, Zhai Yunbo, Zhu Yun, et al. Influence of temperature on nitrogen fate during hydrothermal carbonization of food waste[J]. Bioresource Technology, 2017, 247: 182—189.
- [17] Huang Zhaodan, Wufuer A, Wang Yuanyuan, et al. Hydrothermal liquefaction of pretreated low-lipid microalgae for the production of bio-oil with low heteroatom content[J]. Process Biochemistry, 2018, 69: 136—143.
- [18] Zhang Bo, Feng Huang, He Zhixia, et al. Bio-oil production from hydrothermal liquefaction of ultrasonic pre-treated *Spirulina platensis*[J]. Energy Conversion & Management, 2018, 159: 204—212.
- [19] Arun J, Varshini P, Prithvinath P K, et al. Enrichment of bio-oil after hydrothermal liquefaction (HTL) of microalgae *C. vulgaris*, grown in wastewater: Bio-char and post HTL wastewater utilization studies[J]. Bioresource Technology, 2018, 261: 182—187.
- [20] Biswas B, Arun K A, Bisht Y, et al. Effects of temperature and solvent on hydrothermal liquefaction of *Sargassum tenerrimum* algae[J]. Bioresource Technology, 2017, 242: 344—350.
- [21] 马智明. 市政湿污泥亚/超临界水热液化制生物油实验研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.
- [21] Ma Zhiming. Study on production of bio-oil by sub-supercritical hydrothermal liquefaction of municipal wet sewage sludge[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018.
- [22] Peng Xiaowei, Ma Xiaoqian, Lin Yousheng, et al. Combustion performance of biocrude oil from solvolysis liquefaction of *Chlorella pyrenoidosa* by thermogravimetry-Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Bioresource Technology, 2017, 238: 510—518.
- [23] 丁浩植, 马善为, 张一鸣, 等. 生物油热失重特性研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(10): 2698—2704.
- [23] Ding Haozhi, Ma Shanwei, Zhang Yiming, et al. Research of thermal weight loss of bio-oil[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(10): 2698—2704.

- [24] 王贤华, 陈汉平, 张 谋, 等. 生物油燃烧特性及动力学研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 92—94.
- Combustion characteristics of bio-oil and its kinetic analysis [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008, 36 (4): 92—94.

CHARACTERISTICS OF BIO-OIL FROM MICROWAVE HYDROTHERMAL OF DEAD CHICKEN

Zhang Xin^{1,2}, Wu Ke^{1,2}, Zhou Tan^{1,2}, Fan Chenxin^{1,2}, Yuan Qiaoxia^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China;

2. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: It is of great significance to realize the harmless treatment and resource utilization of illness-dead animals. The effect of temperature on the characteristics of bio-oil from microwave hydrothermal of chicken was investigated. The results showed that the bio-oil yield increased with the increase of temperature and its calorific value (35.22-37.22 MJ/kg) was significantly higher than that of raw chicken (26.46 MJ/kg). The bio-oil components obtained at different temperatures are complex and the main components are fatty acids. In addition, amides and nitrogen-containing heterocyclic are more abundant in bio-oil obtained at high temperature. The bio-oil obtained at 240 °C presents the highest comprehensive combustion index and the best combustion performance.

Keywords: microwave; biomass; biofuels; hydrothermal; dead chicken