

## 秀珍菇菌糠制备生物炭及理化性质研究

张 美,楼 坚<sup>1,2,3</sup>,苏佳雯<sup>1</sup>,张亚青<sup>1</sup>,刘士旺<sup>1,2,3</sup>

(1. 浙江科技学院 生物与化学工程学院,杭州 310023;2. 浙江省农产品化学与生物加工技术重点实验室,  
杭州 310023;3. 浙江省农业生物资源生化制造协同创新中心,杭州 310023)

**摘 要:** 为开发秀珍菇菌糠生态化循环高效利用关键技术,特开展秀珍菇菌糠生物炭制备工艺研究;并利用扫描电镜、元素分析仪等对生物炭的理化性质进行初步分析。结果表明,秀珍菇菌糠生物炭均一性较差,表面孔隙结构随着温度的升高而增多;秀珍菇菌糠水热法制备生物炭的产率约为45%~55%,且随着反应时间的增加或反应温度的升高产率降低,其C元素和O元素的变化趋势与反应温度、水热时间相关性显著,温度越高、时间越长,C元素含量越高,O元素含量越低。热解法制备生物炭的产率约30%,且随着反应温度升高而下降明显,其C元素含量呈现先降低后升高趋势。因此,利用秀珍菇菌糠制备生物炭具有可行性,可作为食用菌菌糠生态化循环利用的解决方案。

**关键词:** 菌糠;生物炭;制备;表征

中图分类号: X712

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2019)01-0050-08

## Preparation of biochar from spent pleurotus geesteranus substrate and its physicochemical properties

ZHANG Xian<sup>1</sup>, LOU Jian<sup>1,2,3</sup>, SU Jiawen<sup>1</sup>, ZHANG Yaqing<sup>2</sup>, LIU Shiwang<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Biological and Chemical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory for Chemical and Biological Processing Technology of Farm Produce, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Province Collaborative Innovation Center of Agricultural Biological Resources Biochemical Manufacturing, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

**Abstract:** The preparation technology of biochar was investigated, by using the spent pleurotus geesteranus substrate (SPGS) as raw material, with a view to developing the technology of ecological recycling and efficient utilization of spent mushroom substrate. The physicochemical properties of biochar were analyzed with the scanning electron microscopy and the elemental analyzer. The results show that homogeneity of the biochar is fairly poor and the surface pore structure increases with the increase of temperature. Yield of the hydrochar is about 45%-55%, decreasing with the increase of

收稿日期: 2018-09-12

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2015C02053);浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)(2017R415018);浙江科技学院研究生科研创新基金项目(2017YJSKC022)

通信作者: 楼 坚(1980—),男,浙江省杭州人,讲师,硕士,主要从事农业生物资源生化制造研究。E-mail: loujianzst@126.com。

reaction time or temperature. The variation trend of C and O elements is significantly correlated with reaction temperature and time, the higher the temperature and the longer the time, the higher content of C and the lower content of O. Yield of the pyrolytic biochar is about 30%, decreasing obviously with the increase of temperature, with the content of C element decreasing first and then increasing. It can be concluded that it is feasible to prepare biochar SPGS, which can be used as a reference technology to solve the ecological recycling of edible fungi.

**Keywords:** spent mushroom substrate; biochar; preparation

食用菌产业具有“不与人争粮,不与粮争地,不与地争肥,不与农争时,不与其他行业争资源”的属性,其产生废弃物菌糠(即废菌棒)的资源化利用,可以实现点草成金、化害为利、变废为宝,在促进农民增收、资源节约、发展循环经济等方面具有重要意义。据测算,在保持现有产业规模、不增加资源消耗的前提下,浙江省年产100万t鲜菇,其废弃物可转化成:生物饲料10万t,产值0.5亿元;生物基质和有机肥50万t,产值2.5亿元;再生菇类栽培基质30万t,产值1.5亿元。三者相加,总产值4.5亿元(不含增加值),相当于全省年栽培食用菌所需原材料总成本的30%以上,经济效益显著。目前,中国菌糠的资源化利用主要有:一是饲料化利用<sup>[1-2]</sup>,如利用发酵杏鲍菇菌糠饲喂肉羊,适口性良好,是一种良好的菌糠调制方式<sup>[3]</sup>;二是能源化利用,包括沼气<sup>[4-5]</sup>、乙醇<sup>[6-7]</sup>、生物油<sup>[8]</sup>等,如利用食用菌菌糠热解制的生物油,热值达到标准煤的1/2,可与褐煤热值相媲美,能满足火力大电厂的热值要求<sup>[9]</sup>;三是肥料化利用,如食用菌培养基<sup>[10-11]</sup>、农作物基质<sup>[12]</sup>、园艺基质及有机肥料等,其中以代替原生材料栽培食用菌,作为有机肥较为普遍;四是高值化利用,菌糠中含有纤维素酶<sup>[13]</sup>、多糖类<sup>[14]</sup>、有机酸类、激素等菌丝代谢产物,可制备生物农药、植物生长促进剂等;其他利用,如利用菌糠表面含有丰富的羟基、氨基、羧基及磷酸基等活性基团与工业废水中的金属离子络合,或通过菌糠表面多孔结构,对废水进行物理吸附<sup>[15-16]</sup>。

珍稀食用菌品种秀珍菇是近十年来在浙江省兴起并成熟起来的大宗生产菌。其废弃物菌糠的利用类似其他大宗生产菌如平菇、金针菇、双孢菇等,但大多依靠菇农或合作社自身的力量进行收集、处理和利用,缺乏专业化的开发力度。为了开发秀珍菇菌糠生态化循环高效利用关键技术,笔者对秀珍菇菌糠制备生物炭及其性能展开研究,以期秀珍菇产业的健康发展和绿色循环利用提供技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

秀珍菇菌糠,缙云县珍稀食用菌专业合作社提供;去离子水;无水乙醇(分析纯)。

### 1.2 仪器与设备

DZG-6000 电热真空干燥箱,上海森信实验仪器有限公司;GZX-9240MBE 电热恒温鼓风干燥箱,上海博讯实业有限公司;水热反应釜(200 mL),西安仪创实验室仪器设备有限公司;BSA 系列电子天平,赛多利斯科学仪器有限公司;SHB-III 循环水式多用真空泵,郑州长城科工贸有限公司;1 200 °C 开启式管式炉,上海钜晶精密仪器制造有限公司。

### 1.3 生物炭的制备方法

试验将采用水热炭化加热和管式炉热解炭化两种方法。

#### 1.3.1 水热炭化

水热炭化技术是在一定温度和压力下将生物质原料密闭在 150~350 °C 的高压反应釜水溶液中停留 1 h 以上,将水热反应釜内的生物质转化为水热炭。水热炭化也称为湿法热裂解,是一种脱水脱羧的过程。水热炭化技术反应条件温和,能耗较低,水热生物炭收率高但挥发性有机物含量高。生物质水热炭化过程的主要反应机理包括水解、脱水、脱羧、聚合和芳香化,其中水解是起始反应,且反应温度较温和(100~170 °C),而脱水、芳香化、缩聚等炭化过程则需要更高的反应温度(160~280 °C)。菌糠水热炭化

过程中,影响水热炭化收率的主要因素有原料的组成、反应温度、停留时间等。菌糠制备的生物炭的灰分、挥发分、固定碳含量和氧、碳含量决定了其应用方向。水热温度的高低对菌菇棒的降解、挥发分的释放、中间产物的生成和转化都有影响,温度影响比表面积、孔隙率。水热时间也影响菌糠生物炭的理化性质。

取秀珍菇菌糠放入研磨机中进行打磨,使其研磨粉碎。用分析天平称取若干份样品,加入去离子水,放入水热反应釜中进行烘制。分别编号,剩余一份放入烘箱直接烘制。在不同的温度下制备,温度设定为 160、180、200、220 °C,停留时间为 4、6、8、10、14、18、20、24、36 h。将烘好后的样品冷却,抽滤、水洗,用乙醇溶液洗涤,再水洗,将洗涤干净的样品收集,放入鼓风干燥箱里烘干,得到所需样品,将每份样称重后密封干燥保存。

### 1.3.2 管式炉热解炭化

热解生物炭是在无氧或缺氧以及相对低温( $<700\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的条件下,由动植物残体等生物质原料热解产生的富炭材料。

取研磨均匀的秀珍菇菌糠,用分析天平称取适量的原料至石英舟里并记录称取的质量,将石英舟放入玻璃管并置于管式炉中,通入氮气,氮气流量为 120 mL/min,吹扫 30 min,反应温度为 500、550、600、650、700、750 °C,反应时间为 3 h。待反应结束,冷却至室温,称量并记录,密封干燥保存制备的生物炭。

### 1.4 秀珍菇菌糠原料水分、灰分测定

对秀珍菇菌糠进行水分分析。将洁净的扁形称量瓶烘干,称量。精确称取 2~3 g 原料细末于称量瓶中,置于烘箱于 $(105\pm 3)^{\circ}\text{C}$ 下烘干 4 h。将称量瓶移入干燥器中冷却 15 min,称量。继续烘干 1 h,冷却 15 min 后称量。如此重复进行,直至恒重。

对秀珍菇菌糠进行灰分分析。用马弗炉 575 °C 灼烧 50 mL 坩埚 30 min,取出坩埚,在空气中冷却 5 min,置入干燥器内冷却 20 min,称量。精确称取 2~3 g 原料细末于上述坩埚,称量。将坩埚在电炉上燃烧使细末炭化,将其移入马弗炉中,设置 575 °C 下灼烧 90 min,在空气中冷却 5 min,置入干燥器内冷却 20 min,称量。继续灼烧 90 min,在空气中冷却 5 min,置入干燥器内冷却 20 min,称量。如此重复进行,直至恒重。

### 1.5 生物炭的表征

采用 HitachiS-3700N 扫描电子显微镜分析形貌特征。元素含量 C、H、O、N、S 采用 Vario MICRO cube 元素分析仪分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生物炭产品制备

菌糠经水热反应釜 200 °C 水热反应,反应时间为 10、14、18、20、24、36 h,制备得到的菌糠水热生物炭如图 1 所示。从图中可以看出,水热法 200 °C 下制备的生物炭,随着反应时间的增大颜色由棕色逐渐加深,生物炭的形状由片状向大颗粒状改变。菌糠经管式炉 500、550、600、650、700、750 °C 热解反应,反应时间为 3 h,制备得到的菌糠热解生物炭如图 2 所示,随着热解温度的升高所制备的炭粒径越小,颜色更黑。两种方法制备的生物炭颜色差异明显,热解法制备的生物炭比水热法制备的生物炭形态更均一。

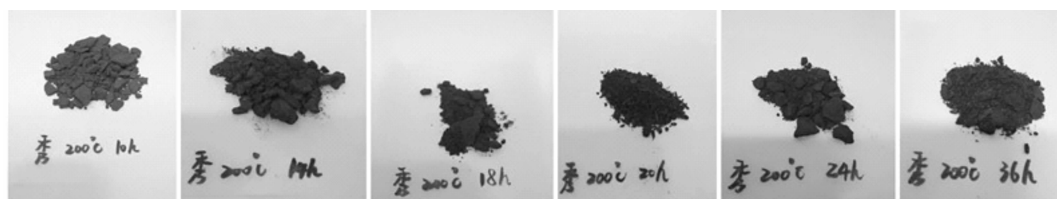


图 1 秀珍菇菌糠水热法制备生物炭样品

Fig. 1 Hydrochar specimens prepared by hydrothermal method from spent mushroom substrate of pleurotus geesteranus

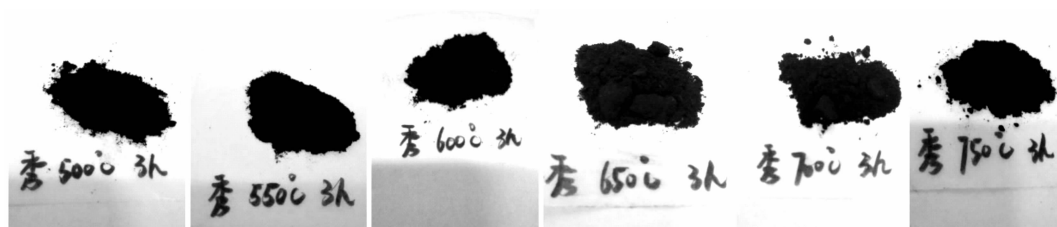


图2 秀珍菇菌糠管式炉热解法制备生物炭样品

Fig. 2 Biochar specimens prepared by pyrolysis in tube furnace from spent mushroom substrate of *pleurotus geesteranus*

## 2.2 扫描电镜分析

对不同温度 and 不同反应时间条件下制备的生物炭做扫描电镜(SEM)观察,放大5 000倍观察其表面形貌,结果如图3所示。分析秀珍菇菌糠原料SEM图,可见很多丝状结构,应为秀珍菇生产过程中真菌产生的菌丝、粘多糖等。对水热反应温度200℃,反应时间为4、6、8、10、14、20、36 h的生物炭SEM图做分析,可见在同一温度下,反应时间越长,制备出的水热生物炭形孔结构越丰富且不均一。对管式炉热解温度为550、600、650、700℃,反应时间为3 h制备得到的生物炭SEM图作分析,可见热解生物炭相对均一,其表面孔隙结构随着温度的升高而增多。由于秀珍菇菌糠是秀珍菇实际生产所得的剩余物,其本质上是木屑、麸皮、棉籽壳、秸秆等不同原料组成的混合物,不同批次菌糠原料和同一菌糠(废菌棒)不同部位的菌糠原料均有一定的差异性,从而导致炭化反应后的生物炭扫描结果不均一,这在水热炭SEM图中尤为明显。

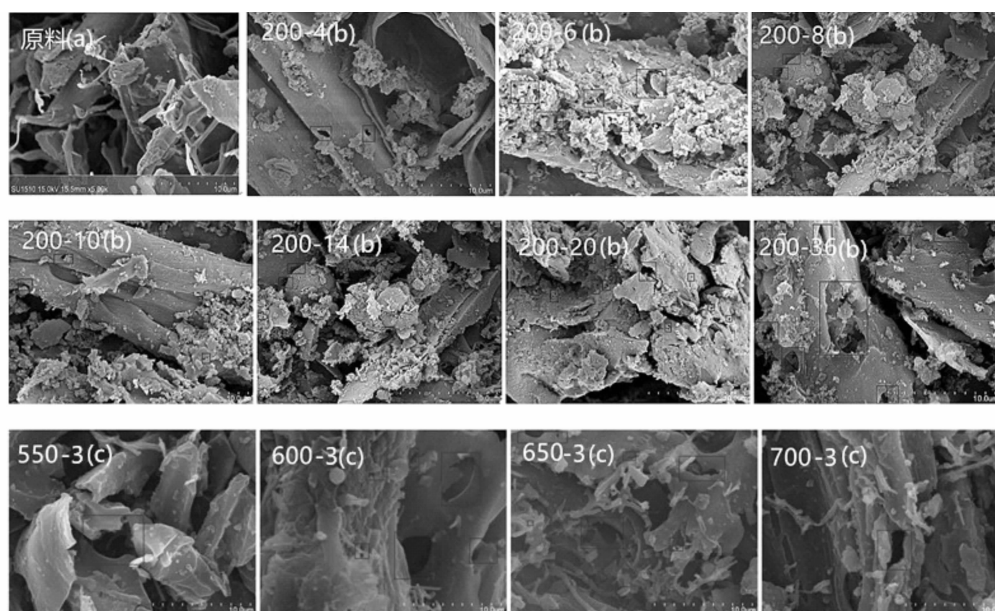


图3 菌糠原料(a)、水热生物炭(b)和热解生物炭(c)扫描电子显微镜图

Fig. 3 Scanning electron microscope of raw material (a), hydrochar (b) and pyrolytic biochar

## 2.3 产率及工业分析

### 2.3.1 生物炭产率分析

利用水热法和热解法制备的生物炭的产率为:

$$P = \frac{M_2 - M_1}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: $P$ 为生物炭的产率,%; $M_2$ 为平皿或石英舟与产物在烘干后的质量,g; $M_1$ 为洁净平皿或石英舟的质量,g; $M$ 为原料质量,g。

利用水热法在不同时间(4、6、8、10、14、18、20、24、36 h)、不同温度(160、180、200、220℃)下制备秀珍菇菌糠水热生物炭。利用式(1)对反应的产率进行计算,结果见表1和表2。从表1可以看出,在水热法

制备生物炭的过程中,当水热温度保持为 200 ℃时,生物炭的产率随着反应时间的增加而降低,但是幅度较小,产率维持在约 45%~50%;从表 2 可以看出,在水热法制备生物炭的过程中,在同一反应时间(10 h)下,生物炭的产率随着反应温度的升高而降低。由此可知,在水热法制备生物炭的过程中,水热温度和水热时间是影响生物炭产率的两个主要因素。

表 1 不同反应时间下水热法所获生物炭产率( $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Table 1 Yields of hydrochar at different reaction time( $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

$t/\text{h}$	$M/\text{g}$	$M_1/\text{g}$	$M_2/\text{g}$	$P/\%$
4	2.004 4	38.287 3	39.287 3	49.89
6	2.007 3	38.287 1	39.234 7	47.21
8	2.006 8	35.837 6	36.764 1	46.17
10	4.008 7	35.806 2	37.632 0	45.55
14	4.001 8	41.252 5	43.079 0	45.64
18	4.002 4	36.802 6	38.625 9	45.56
20	4.007 8	35.793 6	37.552 7	43.89
24	4.013 2	36.494 4	38.235 9	43.40
36	2.028 2	36.801 5	37.526 5	35.75

表 2 不同反应温度下水热法所获生物炭产率( $t=10\text{ h}$ )

Table 2 Yields of hydrochar at different temperatures( $t=10\text{ h}$ )

$T/^{\circ}\text{C}$	$M/\text{g}$	$M_1/\text{g}$	$M_2/\text{g}$	$P/\%$
160	2.006 8	36.802 4	37.765 0	47.97
180	2.001 1	32.130 8	33.046 7	45.77
200	4.008 7	35.806 2	37.632 0	45.55
220	2.002 2	41.253 7	42.114 8	43.01

在氮气气氛保护下利用管式炉热解法,在同一反应时间(3 h),不同反应温度(500、550、600、650、700、750 ℃)下制备得到秀珍菇菌糠热解生物炭。利用式(1)对反应的产率进行计算,结果见表 3。从表中可以看出,在管式炉法制备过程中,随着反应温度升高,产率显著降低,且热解生物炭总体的产率要低于水热反应。

表 3 不同反应温度下热解法所获生物炭产率( $t=3\text{ h}$ )

Table 3 Yields of pyrolytic biochar at different temperatures( $t=3\text{ h}$ )

$T/^{\circ}\text{C}$	$M/\text{g}$	$M_1/\text{g}$	$M_2/\text{g}$	$P/\%$
500	5.695 2	30.711 4	32.894 0	38.32
550	5.076 6	30.519 2	32.364 4	36.35
600	4.438 6	30.712 6	32.212 6	33.79
650	5.424 1	31.705 0	33.426 3	31.73
700	5.281 8	30.519 5	32.328 6	34.25
750	5.913 6	30.519 5	32.411 2	31.99

### 2.3.2 水分分析

秀珍菇菌糠水分含量计算如下:

$$X = \frac{M'_1 - M'_2}{M'_1 - M'} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中: $X$ 为菌糠水分含量,%; $M'$ 为扁形称量瓶质量,g; $M'_1$ 为扁形称量瓶与原料细末在烘干前的质量,g; $M'_2$ 为扁形称量瓶与原料细末在烘干后的质量,g。

进行 3 次秀珍菇菌糠原料水分含量测定平行试验,结果见表 4,经式(2)计算得到秀珍菇菌糠原料水分含量为 11%左右。试验所采用的菌糠仅是风干后的菌糠,并未进行干燥处理,由此导致含水率较高。

表 4  秀珍菇菌糠原料水分分析结果  
Table 4  Results of moisture analysis of raw material

编号	$M'/\text{g}$	$M'_1/\text{g}$	$M'_2/\text{g}$					$X/\%$
			6 h	9 h	12 h	15 h	18 h	
1	64.609 9	66.615 6	66.424 1	66.411 1	66.396 7	66.394 2	66.393 8	11.06
2	69.863 0	71.866 0	71.672 9	71.660 0	71.645 5	71.643 6	71.643 9	11.09
3	61.153 5	63.163 6	62.958 9	62.953 1	62.949 8	62.946 9	62.946 6	10.77

2.3.3  灰分分析  
秀珍菇菌糠灰分含量计算如下:

$$X' = \frac{M'_1 - M'_2}{M'_1 - M'} \times 100\%。$$
 (3)

式(3)中: $X'$ 为菌糠灰分含量,%; $M'$ 为坩埚质量,g; $M'_1$ 为坩埚与原料细末在灼烧前的质量,g; $M'_2$ 为坩埚与原料细末在灼烧后的质量,g。

进行 3 次秀珍菇菌糠原料灰分含量测定平行试验,结果见表 5。经式(3)计算得到秀珍菇菌糠原料灰分含量为 9%左右。秀珍菇栽培原料配方主要为杂木屑 59%,棉籽壳 20%,麦麸皮 20%,石膏 1%等。有研究表明,随着菌丝体的生长,废弃菌糠中的蛋白质、脂肪和灰分含量会有所增加<sup>[18]</sup>。

表 5  秀珍菇菌糠原料灰分分析结果  
Table 5  Results of ash analysis of raw material

编号	$M''/\text{g}$	$M''_1/\text{g}$	$M''_2/\text{g}$					$X'/\%$
			3 h	3.5 h	4 h	4.5 h	5 h	
1	16.670 6	18.674 4	16.866 6	16.864 7	16.863 2	16.863 6	16.863 4	9.62
2	16.334 5	18.336 1	16.527 6	16.521 6	16.520 3	16.518 6	16.518 8	9.21
3	17.909 1	18.910 6	18.006 3	18.003 6	18.003 1	18.002 0	18.002 2	9.29

2.4  元素分析

对水热制备的生物炭进行元素分析(C、H、N、S、O)。设定两组不同反应条件,一组是同一温度下(200 ℃)不同反应时间(4、6、8、10、14、18、20、24、36 h),结果如图 4 所示;另一组是同一反应时间(10 h)不同反应温度(160、180、200、220 ℃),结果如图 5 所示。

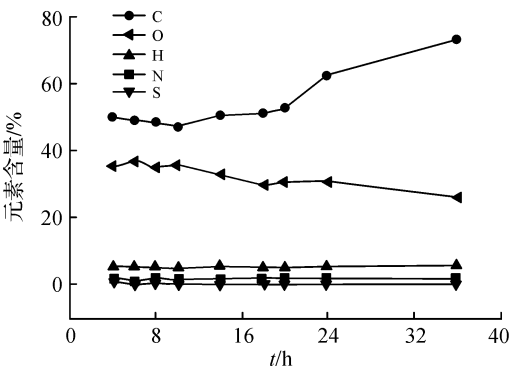


图 4  不同反应时间水热生物炭元素分析  
Fig. 4  Elemental analysis of hydrochar at different reaction time

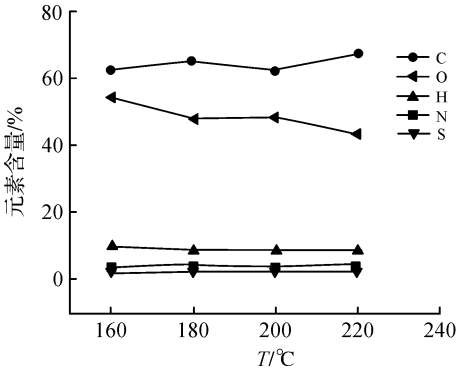


图 5  不同反应温度水热生物炭元素分析  
Fig. 5  Elemental analysis of hydrochar at different temperatures

从图 4、图 5 可见,随着反应时间的增加,水热生物炭中 C 元素的含量不断增加,O 元素含量不断下降。其中 C 元素的质量分数为 50%~70%,O 元素的质量分数在 20%~40%,H 元素的质量分数在 5%左右,N 元素的质量分数在 1%左右,S 元素的质量分数在 1%左右。元素分析中 N 元素含量相比文献[17]中偏高,推测可能是在秀珍菇生长中,真菌代谢产生的含蛋白质类的物质,在水热生物炭制备的过程中没有完全分解。

对比图 4、图 5 可见,C 元素和 O 元素的变化趋势与反应温度、水热时间相关性显著,温度越高、时间

越长,C 元素的百分含量越高,O 元素百分含量越低。

对管式炉隔绝氧气下制备的生物炭进行元素分析,结果如图 6 所示。C 元素在温度为 600 ℃ 时含量最高,质量分数约为 72%;温度从 600 ℃ 上升到 700 ℃ 时,C 元素的含量呈下降趋势,700 ℃ 时 C 元素含量最低,质量分数约为 59%;700 ℃ 至 750 ℃ 时,温度继续上升,C 元素含量增加。O 元素在温度为 600 ℃ 时含量最低,质量分数约为 14%;在温度为 550 ℃ 时含量最高,质量分数约为 16.69%;随着温度的上升,O 元素含量减少,但降幅较小。

### 3 结 语

经扫描电镜分析发现,秀珍菇菌糠原料中有很多丝状结构,炭化之后丝状结构消失;对生物炭做分析,同一温度下,反应时间越长,制备出的生物炭形孔结构越丰富,生物炭表面孔隙结构随着温度的升高而增多;秀珍菇菌糠水分的含量为 10%~11%,灰分含量为 9%,秀珍菇菌糠水热法制备生物炭的粗产率 45%~55%,热解生物炭粗产率为 30%。在水热法和热解法制备过生物炭程中,生物炭的产率随着温度和反应时间的增加而降低。元素分析发现,同一温度下(200℃)不同反应时间,随着时间的增加,C 元素的含量不断增加,从 40%提高至 70%;O 元素含量不断降低,从 40%降至 20%;H 元素含量为 5%左右;N 元素含量含量为 1%左右;S 元素的含量随温度的升高由 10%降至 1%。对热解物炭中,C 元素在温度为 600℃ 时含量最高约为 72%,700℃ 时 C 元素含量最低为 59%。O 元素在温度为 600℃ 时含量最低为 14%,在温度为 550℃ 时含量最高为 16.69%,随着温度的上升,O 元素百分含量减少,但降幅较小。综合以上分析,利用秀珍菇菌糠制备生物炭具有一定的可行性,该技术可作为秀珍菇菌糠生态化循环高效利用的解决方案,以提高食用菌废弃物的利用价值。

### 参考文献:

- [1] WANZENBOCK E, APPRICH S, TIRPANALAN O, et al. Wheat bran biodegradation by edible *Pleurotus* fungi: A sustainable perspective for food and feed[J]. *LWT-food Science and Technology*, 2017,86:123.
- [2] MUSSATTO S I, DRAGONE G, ROBERTO I C. Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications[J]. *Journal of Cereal Science*, 2006,43(1):1.
- [3] 陆亚珍,王恒昌,申远航,等. 杏鲍菇菌糠的营养价值评价及其在羊日粮中的应用效果[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(3):117.
- [4] MMANYWA M, MSHANDATE A. Co-production of *Coprinus cinereus* (Schaeff.) S. Gray. s. lato mushrooms and biogas from palm oil wastes in Tanzania[J]. *British Food Journal*, 2017,17(3):1.
- [5] TRIVEDI A, VERMA A R, KAUR S, et al. Sustainable bio-energy production models for eradicating open field burning of paddy straw in Punjab, India[J]. *Energy*, 2017,127:310.
- [6] WYMAN C E. What is (and is not) vital to advancing cellulosic ethanol[J]. *Trends in Biotechnology*, 2007,25(4):153.
- [7] ASADA C, ASAKAWA A, SASAKI C, et al. Characterization of the steam-exploded spent shiitake mushroom medium and its efficient conversion to ethanol[J]. *Bioresource Technology*, 2011,102(21):10052.
- [8] 郭晓娟,徐勇军,尹辉斌,等. 食用菌菌糠热解制油实验研究[J]. *节能技术*, 2017,35(3):210.
- [9] HARITH N, ABDULLAH N, SABARATNAM V. Cultivation of *Flammulina velutipes* mushroom using various agro-residues as a fruiting substrate[J]. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 2014,49(3):181.
- [10] LI Z P, YU C X, HUANG J, et al. Cultivation of *volvariella volvacea* using spent mushroom substrates[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2016,23(1):27.
- [11] XU X J, GAO F, HE M X, et al. Green vegetable ultivation in substrate of *phlebopus portentosus* dregs[J]. *Tropical Agriculture Science Technology*, 2017,40(3):34.

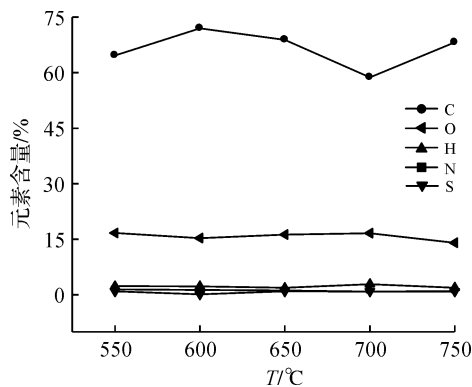


图 6 热解生物炭元素分析

Fig. 6 Elemental analysis of pyrolytic biochar

- [12] ATILA F, TUZEL Y, FEMANDEZ J A, et al. The effect of some agro-industrial wastes on yield, nutritional characteristics and antioxidant activities of *Hericium erinaceus* isolates[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018,238:246.
- [13] FRIEDMAN M. Chemistry, nutrition, and health-promoting properties of *Hericium erinaceus* (Lion's Mane) mushroom fruiting bodies and mycelia and their bioactive compounds [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015,63(32):7108.
- [14] PAVAN F A, LIMA I S, LIMA É C, et al. Use of ponkan mandarin peels as biosorbent for toxic metals uptake from aqueous solutions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006,137(1):527.
- [15] CHERGUI A, KERBACHI R, JUNTER G A. Biosorption of hexacyanoferrate(iii) complex anion to dead biomass of the basidiomycete *pleurotus mutilus*: biosorbent characterization and batch experiments[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009,147(2):150.
- [16] 彭涛,余水静,程素.食用菌菌糠综合利用研究进展[J]. *安徽农业科学*,2016(9):78.
- [17] ZHANG R H, DUAN Z Q, LI Z G. Use of spent mushroom substrate as growing media for tomato and cucumber seedlings[J]. *Pedosphere*, 2012,22(3):333.
- [18] ZADRAZIL F, PUNIYA A K. Studies on the effect of particle size on solid-state fermentation of sugarcane bagasse into animal feed using white-rot fungi[J]. *Bioresource Technology*, 1995,54(1):85.

~~~~~  
(上接第 49 页)

- [20] 刘钱薇,葛小东,张钱,等.山芝麻多糖的超声辅助提取工艺优化及对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制活性[J]. *江苏农业科学*, 2017,45(5):183.
- [21] 戴宏杰,孙玉林,杨梅语,等.拟目乌贼生殖腺碱提多糖的抗氧化及吸湿保湿特性[J]. *食品科学*,2016,37(2):31.
- [22] 安静,王振宇,刘冉,等.黑木耳多糖对大豆蛋白乳化性的影响[J]. *食品工业科技*,2014,35(13):99.
- [23] 陈自宏,虞泓,徐玲.兰坪被毛孢粗多糖延缓衰老的功效研究[J]. *科学技术与工程*,2017,17(12):138.
- [24] 韩贺东,王晓玲.响应面分析法对酸提糯米藤多糖工艺的优化[J]. *西南民族大学学报(自然科学版)*,2013,39(1):54,56.
- [25] PRAKASH MARANA J, MANIKANDAN S, THIRUGNANASAMBANDHAM K, et al. Box-Behnken design based statistical modeling for ultrasound-assisted extraction of corn silk polysaccharide[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 92(1):608.
- [26] 鞠兴荣,税丹,何荣,等.响应面分析法优化菜籽多糖酸法提取工艺的研究[J]. *中国粮油学报*,2012,27(3):92.