

不同干燥方式对香菇品质及甲醛含量的影响

苏倩倩¹, 陈贵堂², 裴 斐³, 胡秋辉^{1,3}, 赵立艳^{1,*}

(1.南京农业大学食品科技学院, 江苏 南京 210095; 2.中国药科大学药学院, 江苏 南京 210009;

3.南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏 南京 210046)

摘 要: 为研究热风恒温干燥、热风变温干燥和微波真空干燥对干香菇甲醛含量及品质的影响, 采用不同干燥方式对香菇进行处理, 并测定干燥产品的甲醛、可溶性糖、可溶性蛋白含量、收缩率、复水率等指标。结果表明: 不经预处理直接热风恒温干燥的香菇的甲醛含量高于热风变温干燥。经过预处理后再进行热风干燥的香菇中甲醛含量与直接热风干燥相比都有显著降低, 但香菇的感官品质较差, 收缩率较大, 复水性较差, 可溶性糖和蛋白质都有所损失。微波真空干燥的香菇甲醛含量比直接热风干燥低, 与经预处理后热风干燥的香菇甲醛含量相近, 香菇复水性适中, 质地疏松。经预处理后再微波真空干燥的香菇与直接微波真空干燥相比, 甲醛含量较低, 可溶性糖和蛋白质含量较低, 体积收缩率和复水率差别不显著。本研究为香菇干燥过程中品质和甲醛含量的控制提供一定的参考。

关键词: 干燥; 香菇; 甲醛; 品质

Effects of Different Drying Methods on Quality and Formaldehyde Content of *Lentinula edodes*

SU Qianqian¹, CHEN Guitang², PEI Fei³, HU Qiuhui^{1,3}, ZHAO Liyan^{1,*}

(1. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2. College of Pharmacy, China Pharmaceutical University, Nanjing 210009, China; 3. College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210046, China)

Abstract: This study aimed to examine the effects of hot-air constant temperature drying, hot-air variable temperature drying and microwave vacuum drying on formaldehyde content and quality of dried *Lentinula edodes*. *L. edodes* was treated with different drying methods, and formaldehyde content, soluble sugar, soluble protein, shrink rate, and rehydration rate of the dried products were measured. Results showed that formaldehyde content of *L. edodes* treated with hot-air constant temperature drying was higher than that of *L. edodes* treated with hot-air variable temperature drying. Formaldehyde content of *L. edodes* subjected to pretreatment followed by hot-air drying was reduced significantly compared to direct hot-air drying, but the former exhibited poor sensory quality, higher shrink rate, lower rehydration rate, and loss of soluble sugar and soluble protein. Formaldehyde content of *L. edodes* treated with microwave vacuum drying was low, and close to that of *L. edodes* subjected to pretreatment followed by hot-air drying. *L. edodes* treated with microwave vacuum drying exhibited moderate rehydration rate and loose texture. *L. edodes* subjected to pretreatment followed by microwave vacuum drying exhibited reduction of formaldehyde content, loss of soluble sugar and soluble protein, no significant difference with respect to shrink rate and rehydration rate compared to direct microwave vacuum drying. This study can provide certain references to control quality and formaldehyde content of *L. edodes* in drying process.

Key words: drying; *Lentinula edodes*; formaldehyde; quality

中图分类号: TS201.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2015)17-0033-06

doi:10.7506/spkx1002-6630-201517007

香菇属于担子菌纲, 是世界第二大食用菌。香菇营养丰富, 富含多种营养和生物活性物质如活性多糖、蛋白质、膳食纤维、麦角固醇、矿物质等^[1], 具有多种功能性质如镇痛、抗炎症^[2]、抗氧化^[3]、抗癌、降血压、降胆

固醇^[4]等作用。香菇是一种著名的药食同源的食用菌, 深受人们的喜爱, 被誉为“菇中皇后”。新鲜的香菇不耐贮藏, 因此常将香菇进行干制。传统的热风干燥香菇是一种基本的干燥方式。干燥作为一种现代食品加工中常

收稿日期: 2015-02-06

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD36B02)

作者简介: 苏倩倩(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品营养与化学。E-mail: 2012108082@njau.edu.cn

*通信作者: 赵立艳(1977—), 女, 副教授, 博士, 研究方向为食品营养与化学、食品质量与安全。E-mail: zhlychen@njau.edu.cn

用的加工方法在食品行业中被广泛的应用。经过干燥处理能将香菇中的水分含量降低到一定的水平,从而能够延长香菇的保存期,降低了一定的运输成本,干燥后的香菇香味更浓。然而在香菇干燥过程中所发生的某些物理和化学变化会影响香菇干品的品质特性。因此,有关于干燥制品的品质方面的研究已经成为近年来的研究热点。

香菇中含有甲醛^[5],香菇中甲醛的来源有两种:一是人为因素引起的,一些生产厂家为防止香菇腐败变质而违法添加;二是香菇自身生长代谢所产生的甲醛,香菇中的甲醛是香菇中的香菇酸在半胱氨酸亚砷裂解酶(S-alkyl-L-cysteine sulfoxidelyase, C-Slyase)和谷氨酰转肽酶(γ -glutamyl transpeptidase, GGT)的作用下生成特殊风味的过程中产生的副产物^[1,6],是香菇的正常生理代谢产物。甲醛是对人体健康有害的化学物质,长期接触低剂量的甲醛会引起慢性呼吸道等疾病,同时香菇具有生殖发育毒性,包括染色体和DNA损伤、蛋白质变性、细胞凋亡等^[7]。甲醛已经被国际癌症研究机构确定为致癌物,是公认的变态反应源^[8]。香菇中甲醛的存在一定程度上也制约着我国香菇的出口,研究香菇中甲醛含量的控制方法具有重要意义。已有很多研究者研究了干燥方法对香菇的干燥品质的影响及对香菇中甲醛的作用。徐晓飞等^[9]研究了热风干燥、微波干燥、冷冻干燥、真空干燥和远红外干燥对香菇的营养成分及物理性质等的影响。结果显示,冷冻干燥对香菇中的营养成分的损失较少。柯乐芹等^[10]研究了香菇热风干燥过程中不同的升温方式对香菇中甲醛含量的影响。结果表明,前期升温快,甲醛升高也快。陈晓麟等^[11]研究了热风干燥、真空干燥、微波干燥和真空冷冻干燥对香菇中甲醛含量及其品质的影响。结果显示,真空冷冻对香菇干品的品质最好,并且甲醛含量也最低。刁恩杰等^[12]研究了热风干燥、真空干燥、冷冻干燥等对香菇中甲醛含量及复水率和外观的品质的影响。结果表明,经过钝化酶活的前处理后再进行干燥的香菇中的甲醛含量均显著降低。本实验主要研究不同预处理方式及结合不同热风干燥方式和微波真空干燥对香菇的复水率、感官品质、收缩率、可溶性糖和蛋白质含量等品质指标和甲醛含量的影响,并研究了多种不同前处理方式对香菇的感官和香菇中甲醛含量、C-Slyase和GGT活力的影响。探索香菇在干燥中提高香菇品质及控制香菇中甲醛含量的干燥方法。以期为提高香菇干制品的品质及控制干制品中甲醛含量提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲜香菇 南京苏果超市。

蒽酮、乙酰丙酮、丙酮酸钠 国药集团化学试剂有限公司;氢氧化钠、蔗糖 西陇化工股份有限公司;甲醛标准溶液(100 $\mu\text{g/mL}$) 西亚试剂公司;牛血清白蛋白、考马斯亮蓝G-250 北京索莱宝科技有限公司;三氯乙酸 南京化学试剂有限公司;S-甲基-L-半胱氨酸亚砷 成都化夏化学试剂有限公司;CW9型 γ -GGT试剂盒(试剂一、试剂二) 苏州科铭生物技术有限公司。

1.2 仪器与设备

HH-6型数显恒温水浴锅 常州国华电器有限公司;722型可见分光光度计 上海菁华科技仪器有限公司;DHG-9143BS-电热恒温鼓风干燥箱 上海新苗医疗器械制造有限公司;WZDIS型微波真空设备 南京三乐微波技术发展有限公司;便携式色差仪 上海汉普光电科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 香菇的干燥

1.3.1.1 热风恒温干燥

将250 g鲜香菇平铺于电热恒温鼓风干燥箱中,于50 $^{\circ}\text{C}$ 干燥至香菇水分质量分数13%以下,取出进行感官评定、复水率和收缩率的测定。用于测定甲醛含量、可溶性糖和可溶性蛋白含量的香菇保存在-20 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中待测。

1.3.1.2 热风变温干燥

将250 g鲜香菇平铺于电热恒温鼓风干燥箱中,50 $^{\circ}\text{C}$ 烘2 h后,升至55 $^{\circ}\text{C}$ 烘2 h,再60 $^{\circ}\text{C}$ 烘2 h,最后于65 $^{\circ}\text{C}$ 烘至香菇水分质量分数为13%以下。

1.3.1.3 香菇前处理后热风恒温干燥

将香菇分成5组,分别进行如下处理:A:100 $^{\circ}\text{C}$ 烘30 min;B:85 $^{\circ}\text{C}$ 烘30 min;C:100 $^{\circ}\text{C}$ 沸水处理1 min;D:80 $^{\circ}\text{C}$ 烫漂处理3 min;E:92 $^{\circ}\text{C}$ 蒸汽处理1 min。将经过上述前处理的香菇冷却至室温后放于50 $^{\circ}\text{C}$ 的鼓风干燥箱中烘至香菇水分质量分数13%以下。

1.3.1.4 香菇前处理后热风变温干燥

将香菇分成5组,分别进行如下处理:A:100 $^{\circ}\text{C}$ 烘30 min;B:85 $^{\circ}\text{C}$ 烘30 min;C:100 $^{\circ}\text{C}$ 沸水处理1 min;D:80 $^{\circ}\text{C}$ 烫漂处理3 min;E:92 $^{\circ}\text{C}$ 蒸汽处理1 min。将经过上述前处理的香菇冷却至室温后,再按照1.3.1.2节的热风变温干燥的方式处理至香菇水分质量分数13%以下。

1.3.1.5 微波真空干燥

将250 g鲜香菇于微波真空干燥箱中,在微波功率为800 W,真空度为0.08 MPa条件下进行干燥至香菇水分质量分数13%以下。

1.3.1.6 香菇前处理后微波真空干燥

将香菇分别进行如下处理:A:100 $^{\circ}\text{C}$ 烘30 min;B:80 $^{\circ}\text{C}$ 烫漂处理3 min。将经过上述前处理的香菇冷却至室温后,再按照1.3.1.5节的微波真空干燥的方式处理至香菇水分质量分数13%以下。

1.3.2 香菇中甲醛含量的测定

采用乙酰丙酮法^[13]测定甲醛含量。

甲醛标准曲线的绘制：将100 μg/mL的甲醛标准溶液稀释成2 μg/mL的甲醛标准液。分别吸取2 μg/mL的甲醛标准液0、0.25、0.50、1.00、2.00、4.00、6.00、8.00 mL于25 mL的具塞比色管中，加蒸馏水至10 mL刻度，加入1 mL乙酰丙酮，混匀后置于沸水浴中保温3 min，取出冷却，以空白作参比，用1 cm玻璃比色皿在波长431 nm处进行比色。测定吸光度，绘制标准曲线。测定的标准曲线方程为 $y=8.004x+0.048$ ($R^2=0.9990$)。

将香菇粉碎后，取2 g香菇粉于500 mL蒸馏瓶中，加入200 mL蒸馏水和10 mL的10%的磷酸溶液，再加入玻璃珠数粒，以防爆沸。连接蒸馏装置，将冷凝管下口插入盛有20 mL蒸馏水并且置于冰浴的100 mL烧杯中。然后加热蒸馏，当蒸馏液收集至80~90 mL时，停止蒸馏，将蒸馏液放冷后转入100 mL容量瓶中并定容。测定时取蒸馏液5 mL于25 mL的具塞比色管中，其余步骤同标准液测定方法。根据标准曲线计算样品甲醛含量。

1.3.3 香菇复水性的测定

参考黄建立^[14]和曾绍校^[15]等方法并稍作改进，将一定质量的干香菇 m_1 (g) 放于40 °C的热水中浸泡30 min后，取出沥干水分后称取质量 m_2 (g)。

$$\text{复水率} = \frac{m_2}{m_1} \quad (1)$$

1.3.4 香菇收缩率的测定

采用小米置换法^[14]测定香菇的体积收缩率。通过以下公式进行计算。

$$\text{收缩率}/\% = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

式中： V_1 为干燥前的香菇体积/mL； V_2 为干燥后香菇的体积/mL。

1.3.5 香菇褐变度的测定

取0.2 g香菇样品加入20 mL的蒸馏水，研磨均匀，于4 000 r/min离心10 min，上清液过滤后于410 nm波长处测定吸光度。

1.3.6 可溶性糖含量的测定

参考Ye Jingjun等^[16]的方法，取0.1 g香菇粉加入10 mL蒸馏水冰浴匀浆，然后在100 °C沸水浴中加热浸提30 min，取出后快速冷却，再5 000 r/min离心10 min。上清液用蒸馏水定容至25 mL，即为可溶性糖待测液。用蒽酮比色法测定吸光度，以蔗糖作为标准品，计算可溶性糖的含量。

1.3.7 可溶性蛋白含量的测定

采用考马斯亮蓝法^[17]测定香菇中可溶性蛋白的含量，以牛血清白蛋白作为标准物质。

1.3.8 C-Slyase酶比活力测定

C-Slyase酶比活力测定参考文献[18]，样品前处理：称取0.2 g香菇样品，加入20 mL的磷酸盐缓冲液（20 mmol/L，pH 7.2），冰浴匀浆，4 °C条件下10 000 r/min离心10 min，上清液即为粗酶液。

将丙酮酸钠标准品用超纯水配制成0、25、50、100、150、200、300 μmol/L的丙酮酸钠标准液，分别吸取4.5 mL于试管中，加入0.5 mL 0.1%的2,4-二硝基苯肼溶液反应5 min，再加入5 mL 2.5 mol/L的氢氧化钠溶液显色10 min后于520 nm波长处测定吸光度。制作标准曲线。其拟合的线性回归方程为： $y=192.6x-1.254$ ($R^2=0.9996$)。

吸取0.05 mL的粗酶液于具塞试管中，加入0.05 mL 20 mmol/L的S-甲基-L-半胱氨酰亚砷和25 μmol/L的磷酸吡哆醛的混合液，再加入2.9 mL 20 mmol/L的磷酸盐缓冲液，置于37 °C的水浴锅中加热10 min，取出试管加入1.5 mL的10%三氯乙酸溶液终止反应，再加入0.5 mL 0.1%的2,4-二硝基苯肼溶液反应5 min，最后再加入5 mL 2.5 mol/L的氢氧化钠溶液显色10 min后，于520 nm波长处测定吸光度。酶活力单位定义为：在上述的条件下，1 g香菇提取的粗酶液每分钟催化S-甲基-L-半胱氨酰亚砷底物生成1 μmol丙酮酸钠为1个酶活力单位。

1.3.9 GGT酶比活力测定

GGT酶比活力测定采用CW9型γ-GGT试剂盒进行测定。

称取0.1 g左右的样品，加入试剂一1.0 mL研磨充分，在4 °C、10 000 r/min离心15 min，取上清液待测。

将试剂二置于25 °C的水浴中预热保温30 min以上（保证无沉淀）。测定时，取1 mL的玻璃比色皿，依次加入100 μL的上清液，900 μL的工作液，混匀后于405 nm波长处测定10 s和70 s时的吸光度，记为 A_1 和 A_2 。

$$\text{GGT酶比活力}/(\text{U/mg pro}) = \frac{1.67 \times [(A_2 - A_1) - 0.0016]}{\rho} \quad (3)$$

式中： ρ 为蛋白质质量浓度/(mg/mL)。

1.3.10 L值的测定

每个处理取4个香菇子实体，手持色差仪测定L值，每个香菇选取3个位点进行测定，记录L值并计算平均值。

1.3.11 感官评定

请10位香菇感官评定者组成测评组，对香菇的外观、色泽、香味等感官品质进行评定。

2 结果与分析

2.1 不同预处理对香菇色泽的影响

由表1可知，经不同前处理的香菇的褐变度与鲜

样相比显著性增大 ($P<0.05$)；而 L 值则显著性降低 ($P<0.05$)。褐变度大，表明褐变程度越大，颜色较深； L 值越大表明颜色越白，说明鲜样的色泽比经预处理的香菇好，同Mothibe^[19]对苹果片预处理的研究结果一致。这主要是因为加热和烫漂的热处理使香菇发生严重的褐变反应。其中100℃和85℃烘30 min预处理的褐变比100℃和80℃烫漂及92℃蒸汽预处理香菇的褐变更严重，这可能是因为前者的高温处理时间较长，香菇所发生的美拉德褐变反应更加剧烈。100℃沸水处理的香菇的褐变度高于80℃烫漂和92℃蒸汽处理，这可能是因为100℃沸水烫漂的温度较高，更有利于香菇发生美拉德反应。

表1 不同前处理方式对香菇色泽的影响
Table 1 Effects of different pretreatment methods on color of *Lentinula edodes*

前处理方式	褐变度	L
鲜样	0.45 ± 0.02^d	97.55 ± 4.89^a
100℃烘30 min	0.72 ± 0.04^a	69.33 ± 2.59^d
85℃烘30 min	0.67 ± 0.03^{ab}	73.59 ± 3.72^{cd}
100℃沸水1 min	0.64 ± 0.04^b	76.37 ± 1.26^{bc}
80℃烫漂3 min	0.54 ± 0.03^c	80.82 ± 3.17^b
92℃蒸汽处理1 min	0.57 ± 0.03^c	80.32 ± 1.83^b

注：同列小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.2 不同预处理对香菇中甲醛含量和酶活力的影响

表2 不同预处理方式对香菇中甲醛含量和酶活力的影响
Table 2 Effects of different pretreatment methods on formaldehyde content and enzyme activities of *Lentinula edodes*

前处理方式	甲醛含量/ ($\mu\text{g/g}$)	GGT酶比活力/ (U/mg pro)	C-Slyase酶比活力/ (U/mg pro)
鲜样	90.65 ± 4.32^a	0.046	1.42
100℃烘30 min	69.73 ± 3.28^c	ND	ND
85℃烘30 min	78.45 ± 3.57^b	ND	ND
100℃沸水1 min	65.60 ± 3.01^c	ND	ND
80℃烫漂3 min	71.37 ± 2.56^c	ND	ND
92℃蒸汽处理1 min	54.77 ± 2.14^d	ND	ND

注：ND. 未检出。

香菇经烫漂和蒸气处理后，香菇中的甲醛含量和鲜样相比都有显著降低 ($P<0.05$)。主要原因可能是香菇中的甲醛是香菇中的香菇酸在GGT和C-Slyase的催化作用下生成的香菇精等风味物质的过程中产生的副产物，GGT和C-Slyase的酶活力影响香菇中甲醛的生成。而从表2可以看出，香菇经上述几种前处理后香菇中的GGT和C-Slyase的酶活力都没有检出，说明前处理使香菇中的GGT和C-Slyase的酶活力遭到了破坏，刁恩杰等^[12]研究表明在干燥之前的加热及热烫处理也会使香菇中与甲醛生成有关的酶活受到破坏。并且30 min加热预处理和蒸汽预处理会使部分甲醛挥发出去；同时烫漂预处理会使部分甲醛溶于烫漂液中。从而使得经预处理的香菇的甲醛

含量都有所降低。经100℃沸水处理1 min的香菇中的甲醛含量比加热30 min的预处理低，这可能是因为虽然几种预处理方式都能够破坏GGT和C-Slyase的酶活性，但是加热30 min预处理的香菇在烘制过程中是逐渐破坏酶活，在前期香菇中的GGT和C-Slyase的酶活力也会作用于香菇酸产生部分的甲醛副产物；并且烫漂处理会使香菇的组织结构遭到破坏^[20]，从而使甲醛从香菇中溶出进入烫漂液中。蒸汽预处理的香菇中的甲醛含量最低，这可能是因为一方面蒸汽预处理的香菇中会有一部分甲醛随香菇中的水分流失，另一方面部分甲醛随蒸汽挥发。

2.3 不同干燥方式对香菇感官品质的影响

表3 不同干燥方式对香菇感官品质的影响
Table 3 Effects of different drying methods on sensory quality of *Lentinula edodes*

预处理方式	干燥方式	颜色	香味	外观	组织	质地
鲜香菇	恒温干燥	浅褐色	浓	稍有干皱	紧密	一般坚硬
	变温干燥	浅褐色	浓	稍有干皱	紧密	一般坚硬
100℃烘30 min	恒温干燥	褐色	浓	干皱	较紧密	坚硬
	变温干燥	褐色	浓	干皱	较紧密	坚硬
85℃烘30 min	恒温干燥	褐色	浓	干皱	较紧密	坚硬
	变温干燥	褐色	浓	干皱	较紧密	坚硬
100℃沸水1 min	恒温干燥	褐色	一般	较干皱	较紧密	坚硬
	变温干燥	褐色	一般	较干皱	较紧密	坚硬
80℃烫漂3 min	恒温干燥	褐色	一般	较干皱	较紧密	坚硬
	变温干燥	褐色	一般	较干皱	较紧密	坚硬
92℃蒸汽处理1 min	恒温干燥	褐色	浓	较干皱	较紧密	坚硬
	变温干燥	褐色	浓	较干皱	较紧密	坚硬
鲜香菇	微波真空干燥	褐色，局部有焦斑	浓	疏松	紧密	较脆
100℃烘30 min	微波真空干燥	褐色，局部有焦斑	浓	疏松	紧密	较脆
80℃烫漂3 min	微波真空干燥	褐色，局部有焦斑	一般	疏松	紧密	较脆

由表3可知，经过直接热风干燥和微波真空干燥的香菇的香味较浓，直接热风干燥的香菇的外观稍有干皱，颜色比经预处理后热风干燥的香菇浅，这同表1的结果基本一致，这主要是由于经过高温加热和烫漂及蒸汽的预处理，香菇发生的褐变较严重。这同严启梅等^[21]研究的杏鲍菇预处理的结果基本一致。而微波真空干燥的香菇的颜色比热风干燥的香菇深，这主要是由于微波真空处理时香菇的起始含水量较高，香菇中水分分布不均匀，对微波的吸收也不均匀，可能导致香菇局部温度过高，出现焦糊现象。这种现象同吴海虹等^[22]研究的微波真空处理的慈菇脆片相一致。经预处理后并进行热风干燥的香菇的组织结构较紧密和坚硬，这主要是由于经过上述的100℃和85℃加热30 min、烫漂和蒸汽的预处理会使香菇的组织结构受到破坏，致使香菇的组织变软，导致细胞内部的一些无机盐和营养物质等成分外流迁移到香菇表面，从而使香菇表面出现硬化的现象并且组织结构收缩紧密^[11]。经100℃和80℃烫漂预处理再干燥的香菇的香味较淡，30 min加热和蒸汽预处理再干燥的香菇的香味相对较浓，这主要是因为经烫漂处理后，香菇

中的一些香味物质会溶于水中,而30 min加热和蒸汽预处理并没有和水有直接接触,香菇成分没有损失太多。100 ℃和80 ℃的烫漂处理和蒸汽处理的香菇的外观与加热30 min的预处理相比更加干皱,这主要是因为经100 ℃和80 ℃烫漂处理及蒸汽处理的香菇的组织结构受到破坏较严重,组织明显变软。经预处理后微波真空干燥及直接微波真空干燥香菇的组织质地与热风干燥的香菇相比更疏松,这主要是由于一方面在微波作用下,香菇中的水分由内向外扩散,使香菇产生膨松效应;另一方面真空状态使香菇中水分降低了沸点,并使香菇细胞内外形成压差,从而导致细胞组织收缩,微波真空干燥结合了真空和微波作用的优点,真空使香菇中的水分由内向外推动,水分吸收微波快速气化挥发,从而使干燥速率加快,同时使香菇内部产生多空结构,防止组织坍塌和硬化^[23]。

2.4 不同干燥方式对香菇甲醛含量的影响

表4 不同干燥方式对香菇甲醛含量的影响
Table 4 Effects of different drying methods on formaldehyde content of *Lentinula edodes*

预处理方式	干燥方式	甲醛含量/($\mu\text{g/g}$)
鲜香菇	恒温干燥	76.71 \pm 3.84 ^a
	变温干燥	61.25 \pm 2.45 ^b
100 ℃烘30 min	恒温干燥	38.77 \pm 2.33 ^{cdef}
	变温干燥	36.10 \pm 2.50 ^{fgh}
85 ℃烘30 min	恒温干燥	42.18 \pm 1.69 ^c
	变温干燥	40.95 \pm 2.57 ^{cde}
100 ℃沸水1 min	恒温干燥	32.64 \pm 1.61 ^b
	变温干燥	34.04 \pm 1.50 ^{fgh}
80 ℃烫漂3 min	恒温干燥	41.74 \pm 2.09 ^{cd}
	变温干燥	37.04 \pm 1.83 ^{efg}
92 ℃蒸汽处理1 min	恒温干燥	40.71 \pm 2.59 ^{cde}
	变温干燥	38.79 \pm 2.02 ^{cdef}
鲜香菇	微波真空干燥	37.92 \pm 1.39 ^{defg}
100 ℃烘30 min	微波真空干燥	28.37 \pm 1.49 ⁱ
80 ℃烫漂3 min	微波真空干燥	26.29 \pm 1.58 ⁱ

由表4可知,经不同前处理的香菇中的甲醛含量与直接热风干燥的香菇相比都会有显著下降,由表2可知,这主要是由于经过加热、烫漂及蒸汽预处理使香菇的酶活遭到破坏,从而抑制了香菇在干燥过程中甲醛的产生。100 ℃沸水预处理的香菇的甲醛含量较低,这主要是因为一方面香菇的酶活受到破坏,另一方面,香菇在沸水中组织受到破坏,使得香菇中的甲醛部分溶于水中。鲜香菇经恒温干燥后甲醛含量比变温干燥后甲醛含量高,这可能是由于恒温干燥的温度较低,对香菇酶的破坏作用稍小,并且干燥时间较长,从而使得香菇在干燥过程中甲醛生成量较高。经同一前处理后进行的恒温干燥和变温干燥的甲醛含量变化不显著,这主要是因为前处理破坏了GGT和C-Slyase的酶活性。微波真空干燥的香菇与热风干燥香菇相比甲醛含量更低。这可能是因为

真空状态下香菇中的甲醛更易挥发及真空状态下短时间内可能将香菇中的酶灭活,从而抑制了香菇中甲醛的生成^[12,24]。经100 ℃加热和80 ℃烫漂预处理后再进行微波真空干燥的香菇的甲醛含量比直接微波真空干燥的低,这主要是预处理会使部分甲醛挥发或是溶于水中。表2中所示的预处理后香菇的甲醛含量高于预处理后再干燥的香菇的甲醛含量,主要原因可能是香菇在干燥的过程中甲醛会挥发^[5],从而使干燥后的香菇的甲醛含量降低。

2.5 不同干燥方式对香菇中可溶性糖和蛋白质含量的影响

表5 不同干燥方式对香菇可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响
Table 5 Effects of different drying methods on soluble sugar and soluble protein of *Lentinula edodes*

预处理方式	干燥方式	可溶性糖含量/(mg/g)	可溶性蛋白含量/(mg/g)
鲜香菇	恒温干燥	75.35 \pm 2.59 ^a	86.80 \pm 4.36 ^a
	变温干燥	69.94 \pm 2.13 ^b	68.00 \pm 3.52 ^b
100 ℃烘30 min	恒温干燥	65.26 \pm 2.93 ^{bcd}	21.52 \pm 1.09 ^d
	变温干燥	60.18 \pm 2.05 ^{de}	16.22 \pm 0.85 ^e
85 ℃烘30 min	恒温干燥	69.82 \pm 3.41 ^b	38.40 \pm 1.98 ^e
	变温干燥	65.43 \pm 3.57 ^{bcd}	22.74 \pm 1.17 ^d
100 ℃沸水1 min	恒温干燥	62.06 \pm 3.05 ^{cde}	9.68 \pm 0.82 ^f
	变温干燥	56.76 \pm 2.21 ^e	8.14 \pm 0.74 ^f
80 ℃烫漂3 min	恒温干燥	61.86 \pm 3.18 ^{de}	21.65 \pm 1.34 ^d
	变温干燥	51.53 \pm 2.36 ^f	17.90 \pm 0.97 ^e
92 ℃蒸汽处理1 min	恒温干燥	60.03 \pm 2.99 ^{de}	8.95 \pm 0.51 ^f
	变温干燥	48.27 \pm 2.68 ^f	8.03 \pm 0.47 ^f
鲜香菇	微波真空干燥	78.23 \pm 3.26 ^a	87.74 \pm 2.17 ^a
100 ℃烘30 min	微波真空干燥	67.29 \pm 3.16 ^{bc}	24.33 \pm 1.26 ^d
80 ℃烫漂3 min	微波真空干燥	64.56 \pm 3.07 ^{bcd}	23.57 \pm 1.18 ^d

由表5可知,经不同前处理后干燥的香菇中的可溶性蛋白和可溶性糖的含量与鲜香菇直接干燥相比均有所降低。这可能是因为前处理的高温作用会使香菇中糖和蛋白质分解或发生美拉德等褐变反应,另烫漂可能使香菇中可溶性糖和可溶性蛋白部分溶于水中。92 ℃蒸汽和100 ℃沸水预处理的香菇的可溶性蛋白质和可溶性糖的含量更低,说明蒸汽处理对香菇的糖和蛋白质的破坏作用更大。并且变温干燥的香菇中糖和蛋白的含量低于恒温干燥的香菇。这可能是因为较高的温度可能使香菇中糖和蛋白发生的美拉德反应较剧烈及分解消耗的更多^[25]。微波真空干燥的香菇的可溶性糖含量与直接恒温热风干燥没有显著差别,但高于变温热风干燥的香菇可溶性糖含量,这可能是因为微波真空干燥的温度和氧气含量较低,香菇中的糖发生的美拉德反应及降解较弱,并且干燥时间较短。

2.6 不同干燥方式对香菇收缩率和复水性的影响

由表6可知,恒温干燥的香菇的收缩率大于变温干燥,这可能是因为香菇在较低温度下,水分逐渐由内向外扩散,干燥时间较长,从而使得干燥后的香菇的

结构较紧密，收缩率较大，复水性较差。另外，经加热30 min预处理、烫漂和蒸汽处理的香菇的收缩率更大（80%~90%），而复水率更小（2左右），主要原因可能是干香菇的复水性能主要是由细胞和结构的破坏程度决定的^[26]，而高温加热30 min、烫漂和蒸汽处理会使香菇的细胞发生破坏或错位，使细胞丧失完整性，毛细管收缩，香菇的组织受到的破坏程度更大，组织变软并坍塌较严重，使干燥后菇体的质地比较坚硬，表面组织更加紧密，从而降低了干香菇的亲水性能^[27]，因此使香菇的复水更难，收缩率更大。不经预处理直接微波真空干燥的香菇的收缩率与直接热风干燥的香菇相比更大，这可能是由于香菇进行热风干燥时，热量从外部向内部传播，热风干燥与真空微波干燥相比干燥速率较慢，孔径处水分蒸发较慢，因此，香菇的收缩率较小。这同李丽娟等^[28]研究的干燥的莲藕脆片和黄建立等^[14]研究的银耳干燥的结果相一致。经过预处理后微波真空干燥的香菇的收缩率和复水率与直接微波真空干燥差别不大，主要原因可能是微波真空干燥能够使干燥产品呈疏松多孔的结构。

表6 不同干燥方式对香菇收缩率和复水性的影响
Table 6 Effects of different drying methods on shrink rate and rehydration rate of *Lentinula edodes*

预处理方式	干燥方式	收缩率/%	复水率
鲜香菇	恒温干燥	75.47±3.21 ^f	3.551±0.124 ^b
	变温干燥	59.33±0.95 ^e	5.556±0.068 ^a
100℃烘30 min	恒温干燥	85.26±1.78 ^{cd}	2.090±0.010 ^{def}
	变温干燥	81.78±2.20 ^{de}	2.051±0.156 ^{def}
85℃烘30 min	恒温干燥	87.02±0.51 ^{cd}	2.128±0.065 ^{de}
	变温干燥	85.77±4.29 ^{cd}	2.169±0.166 ^d
100℃沸水1 min	恒温干燥	96.23±0.62 ^a	1.921±0.129 ^{fe}
	变温干燥	90.10±2.64 ^{bc}	2.021±0.030 ^{def}
80℃烫漂3 min	恒温干燥	93.65±1.90 ^{ab}	1.834±0.007 ^{gh}
	变温干燥	87.04±3.53 ^{cd}	2.029±0.020 ^{def}
92℃蒸汽处理1 min	恒温干燥	96.60±1.48 ^a	1.734±0.007 ^h
	变温干燥	89.94±4.50 ^{bc}	1.972±0.058 ^{efg}
鲜香菇	真空微波干燥	79.21±2.97 ^{ef}	2.530±0.110 ^c
100℃烘30 min	真空微波干燥	82.79±4.03 ^{de}	2.671±0.139 ^c
80℃烫漂3 min	真空微波干燥	83.86±4.87 ^{de}	2.125±0.126 ^{de}

3 结 论

不同干燥方法对香菇中甲醛含量和品质的影响较大，其中微波真空干燥的香菇的甲醛含量显著低于直接热风干燥；经过预处理后再进行恒温 and 变温热风干燥的香菇的甲醛含量显著低于不经预处理直接热风干燥的香菇甲醛含量，并接近于微波真空干燥。经过预处理后再进行微波真空干燥的香菇与直接微波真空干燥相比甲醛含量较低，可溶性蛋白质和糖的含量也较低，收缩率和复水性差别不大。经过预处理后进行热风干燥的香菇的收缩率较大，复水性较小，蛋白质含量显著降低，且质地较坚硬。微波真空处理的香菇的质地较疏松。直接热风干燥的香菇的收缩率最小，复水率最大。因此，单纯考虑香菇中甲醛含量应采用微波真空干燥和经预处理后

热风干燥；考虑香菇品质因素，微波真空干燥的香菇的质地疏松多孔，但易出现局部焦糊现象；直接热风干燥香菇的收缩率较小，复水性较大；而经预处理的香菇的收缩率较大，质地较坚硬。本研究为香菇干燥过程中品质和甲醛含量的控制提供参考依据，建议后续研究中可以采用热风干燥和微波真空联合干燥处理香菇来控制甲醛含量及提高香菇的品质。

参考文献:

[1] LIU Ying, YUAN Yan, LEI Xiaoyu, et al. Purification and characterisation of two enzymes related to endogenous formaldehyde in *Lentinula edodes*[J]. Food Chemistry, 2013, 138(4): 2174-2179.

[2] CARBONERO E R, GRACHER A H P, KOMURA D L, et al. *Lentinus edodes* heterogalactan: antinociceptive and anti-inflammatory effects[J]. Food Chemistry, 2008, 111(3): 531-537.

[3] CHEN Huoliang, JU Ying, LI Junjie, et al. Antioxidant activities of polysaccharides from *Lentinus edodes* and their significance for disease prevention[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2012, 50(1): 214-218.

[4] ZHANG Zipei, SONG Huige, PENG Zhen, et al. Characterization of stipe and cap powders of mushroom (*Lentinus edodes*) prepared by different grinding methods[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(3): 406-413.

[5] 杨雪娇, 黄伟, 温健昌, 等. 2005年东莞市食用菌甲醛含量抽查结果分析[J]. 中国食品卫生杂志, 2007, 19(2): 150-152.

[6] 林树钱, 王赛贞, 林志彬. 香菇生长发育和加工贮存中甲醛含量变化的初步研究[J]. 中国食用菌, 2002, 21(3): 26-28.

[7] DUONG A, STEINMAUS C, MCHALE C M, et al. Reproductive and developmental toxicity of formaldehyde: a systematic review[J]. Mutation Research/Reviews in Mutation Research, 2011, 728(3): 118-138.

[8] 万晓泳. 应对入境集装箱甲醛超标的良方[J]. 中国检验检疫, 2010(5): 31-32.

[9] 徐晓飞, 向莹, 张小爽, 等. 不同干燥方式对香菇品质的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(17): 259-262.

[10] 柯乐芹, 陈景荣, 吴学谦, 等. 干制和贮藏方法对香菇甲醛含量的影响研究[J]. 中国食用菌, 2008, 27(3): 53-54; 56.

[11] 陈晓麟, 王强. 不同干制方式对香菇甲醛及复水性的影响研究[J]. 食品科技, 2013, 38(9): 61-64.

[12] 刁恩杰, 丁晓雯, 章道明. 干燥方式对香菇中甲醛含量的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(2): 70-73.

[13] 刁恩杰. 香菇中甲醛影响因素及在加工中控制措施研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005: 10-12.

[14] 黄建立, 黄艳, 郑宝东, 等. 不同干燥方式对银耳品质的影响[J]. 中国食品学报, 2010, 10(2): 167-173.

[15] 曾绍校, 梁静, 郑宝东, 等. 不同干燥工艺对莲子品质的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 227-231.

[16] YE Jingjun, LI Jianrong, HAN Xiaoxiang, et al. Effects of active modified atmosphere packaging on postharvest quality of Shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) stored at cold storage[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(3): 474-482.

[17] 黄菊. 基于香菇风味形成途径的内源性甲醛生成关键酶研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2013: 21-27.

[18] 吴宁. 香菇中半胱氨酰亚砷裂解酶的分离纯化及其酶学性质研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2013: 17-24.

[19] MOTHIBE K J. 脱水苹果丁的预处理及干燥方式比较研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 5-10.

[20] 赖海涛, 邓清莲, 杨柳. 干燥前预处理对豌豆脱水后的品质影响[J]. 福建化工, 2002(4): 53-55.

[21] 严启梅, 牛丽影, 唐明霞, 等. 微波烫漂对杏鲍菇POD酶活的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(4): 247-251.

[22] 吴海虹, 刘春菊, 卓成龙, 等. 干燥工艺对慈菇脆片品质的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(24): 36-39. doi: 10.7506/spkx1002-6630-201324007.

[23] 田玉庭, 陈洁, 李淑婷, 等. 不同干燥方法对龙眼果肉品质特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(8): 161-165.

[24] 张锋, 刘春芬, 张旭光. 不同干燥方式对香菇中甲醛含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(15): 6874-6875; 6877.

[25] 陈锦屏, 穆启运, 田呈瑞. 不同升温方式对烘干枣品质影响的研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 237-240.

[26] 宋洪波, 毛志怀. 干燥方法对植物产品物理特性影响的研究进展[J]. 农业机械学报, 2005, 36(6): 117-121.

[27] 陈鑫. 不同干燥方法对姬松茸干品品质特性的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2008: 32-37.

[28] 李丽娟, 刘春泉, 李大婧, 等. 不同干燥方式对莲藕脆片品质的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(11): 1697-1703.