



食品科学

Food Science

ISSN 1002-6630, CN 11-2206/TS

《食品科学》网络首发论文

题目: 不同干燥方式对真姬菇菌柄和菌盖挥发性风味物质的影响
作者: 王永伦, 李兴, 杨苗, 林姿娜, 董晓博, 徐怀德
网络首发日期: 2022-07-29
引用格式: 王永伦, 李兴, 杨苗, 林姿娜, 董晓博, 徐怀德. 不同干燥方式对真姬菇菌柄和菌盖挥发性风味物质的影响[J/OL]. 食品科学.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220729.1106.060.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

不同干燥方式对真姬菇菌柄和菌盖挥发性风味物质的影响

王永伦, 李 兴, 杨 苗, 林姿娜, 董晓博*, 徐怀德*
(西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 采用电子鼻结合顶空固相微萃取-气相色谱-质谱技术(solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)探究热风干燥(60 ℃、70 ℃、80 ℃)、冷冻干燥、自然干燥对真姬菇菌柄和菌盖挥发性风味物质的影响, 并通过相对气味活度值法(ROAV)分析各风味物质对干燥样品总体风味的贡献。结果表明: 通过电子鼻检测发现这 10 组样品传感器数值存在明显差异且电子鼻可以对其风味进行很好地区分。热风干燥(60 ℃、70 ℃、80 ℃)、冷冻干燥、自然干燥的菌盖分别鉴定出 32、41、40、53、48 种风味物质, 而菌柄分别鉴定出 34、33、33、43、44 种风味物质。相同干燥方式处理的菌盖的挥发性风味物质含量高于菌柄, 相较于自然干燥和冷冻干燥, 热风干燥生成了较高含量的新型风味物质。由 ROAV 分析得出 25 种风味物质, 其中三甲胺、异戊醛、1-辛烯-3-醇风味贡献较大。进一步对这 25 种风味物质进行主成分分析(principal component analysis, PCA), 建立综合函数品质评价模型, 发现热风干燥 80 ℃ 时制得菌盖样品(g-80 ℃)评分最高, 说明其风味品质最好。

关键词: 真姬菇; 挥发性风味物质; 干燥方式; 电子鼻; 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法(HS-SPME-GC-MS)

Effect of Drying Methods on Volatile Flavor Compounds of the Pileus and Stipe of *Hypsizygus marmoreus*

WANG Yonglun, LI Xing, YANG Miao, LIN Zina, DONG Xiaobo*, XU Huaide*
(College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The effects of hot air drying (60 ℃, 70 ℃, 80 ℃), freeze drying and natural air drying on the volatile flavor compounds of the pileus and stipe of *Hypsizygus marmoreus* were respectively investigated by solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) and electronic nose, and the contribution of flavor compounds to the overall flavor of dried samples was analyzed by relative odor activity value (ROAV). Results showed that the electronic nose could find significant difference in sensor values and effectively distinguish the volatile flavor of the ten drying samples. Moreover, the number of volatile flavor compounds of the pileus obtained by different drying methods were 32, 41, 40, 53, 48, respectively; and the stipe were 34, 33, 33, 43, 44, respectively. The content of volatile flavor compounds in the pileus was higher than that in the stipe with the same drying treatment, and hot air drying produced higher content of new flavor compounds compared with natural air drying and freeze drying. In addition, 25 kinds of flavor compounds were obtained from ROAV analysis, among which trimethylamine, iso-valeraldehyde, 1-Octen-3-ol contributed more to the overall flavor. Further, PCA was carried out for these 25 flavor compounds and generated a quality evaluation model. It was found that the pileus

基金项目: 陕西省重点研发计划 (项目编号: 2021NY-152)
第一作者简介: 王永伦(1997—) (ORCID: 0000-0001-6617-5485), 男, 硕士研究生, 研究方向为果蔬贮藏与加工。E-mail: wangyong112137@foxmail.com
*通信作者简介: 董晓博(1989—) (ORCID: 0000-0001-6087-6889) 男, 博士, 副教授, 研究方向为食用菌精深加工、质量安全与活性物质代谢。E-mail: xbdong@nwfufu.edu.cn
徐怀德(1964—) (ORCID: 0000-0002-1766-1265), 男, 教授, 学士, 研究方向为饮料加工、果品蔬菜贮藏与加工、天然产物提取。E-mail: xuhuaide@aliyun.com

samples obtained by hot air drying at 80 °C had the highest score, indicating it had the best flavor quality.

Keywords: *Hypsizygus marmoreus*; volatile flavor compounds; drying methods; electronic-nose; solid phase microextraction -gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS)

中图分类号: TS255.36

文献标志码: A

DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20220607-065

真姬菇(*Hypsizygus marmoreus*)又名海鲜菇、蟹味菇,因其具有独特的海鲜蟹味而得名^[1],隶属担子菌亚门、层菌纲、伞菌目、白蘑科、玉蕈属^[2],主要分布在亚洲、北美洲和欧洲等地区。真姬菇菇体肥厚,口感细腻,脆嫩鲜滑;同时真姬菇营养丰富,具有抗肿瘤、抗衰老、降血糖等功效,是集食用、药用于一体的珍稀食用菌^[3,4]。

由于真姬菇采后呼吸作用旺盛,以及其较高的含水量(约 91%),采后若不及时销售、加工,极易引起失水、褐变、软化等现象,造成产品品质的下降^[5]。干燥是食用菌中常见的加工方式,可以提高其货架期并降低运输成本,解决未及时销售而造成的损失问题。然而干燥加工会使食用菌挥发性风味发生变化^[6],风味的变化也同样影响产品的品质,良好的风味又是消费者购买商品的重要因素^[7],所以研究干燥加工对食用菌风味的影响就显得尤为重要。同时食用菌的香气和滋味与食用菌组织部位密切相关,已经有研究报道不同加工处理的食用菌菌柄和菌盖在风味物质上存在较大差异^[8,9],而在滋味方面呈现菌盖的等效鲜味浓度值(EUC)远大于菌柄的特性^[10]。Li Mengqi 等人通过对四川和云南两个不同地区松茸菌柄和菌盖风味差异的研究,发现干燥处理使得松茸中 C₈ 化合物大幅度减少,同时菌柄和菌盖在醛类、酮类、醇类物质含量上存在较大差异^[11]; Zhang Lijia 等人采用电子鼻和 HS-SPME-GC-MS 研究不同干燥方式对香菇挥发性风味的影响,发现热风干燥对八碳化合物和硫化化合物的含量影响最大,热风干燥使香菇特征风味物质 1-辛烯-3-醇的含量大幅下降,“蘑菇味”最弱^[12]; Selli Serkan 等人研究蒸煮两种热处理对双孢菇和平菇风味物质的影响,发现热处理造成了风味前体物质的热降解和风味化合物的蒸发,从而使挥发性风味物质相较于新鲜有所减少^[13]。然而,当前国内外关于干燥对真姬菇风味影响的报道相对较少,同时真姬菇又是一种具有独特风味的食用菌,非常适用于食用菌调味料产品的开发,研究真姬菇菌柄和菌盖的风味差异可以指导生产上对菌柄和菌盖分开进行加工利用,生产有不同风味的真姬菇产品,提高真姬菇精深加工水平,还可以为生产高附加值产品提供理论依据。

食用菌的热风干燥温度一般在 50 °C 到 80 °C 之间,温度设置超过 80 °C 则会导致有效成分被大量破坏,温度设置在 50 °C 或者更低时则需要成倍的干燥时间来完成,且温度过低时美拉德反应程度也很低,不利于新型风味物质的生成。综上,本研究拟采用 60 °C、70 °C、80 °C 的热风干燥(hot air drying, HAD)、冷冻干燥(freeze drying, FD)、自然干燥(natural air drying, NAD)对真姬菇菌柄和菌盖分别进行干燥处理,采用电子鼻结合顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术(solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)分析不同干燥处理的菌柄和菌盖挥发性风味差异,通过相对气味活度值法(relative odor activity value, ROAV)分析各挥发性风味物质对样品总体风味的贡献,对 ROAV 分析得到的挥发性风味物质采用主成分分析(principal component analysis, PCA)并建立真姬菇干燥样品挥发性风味品质评价模型,为真姬菇的精细化加工以及调味料产品的开发奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

真姬菇(*Hypsizygus marmoreus*),购于杨凌当地超市,品种为“TNN-11”。挑选无腐烂、无病虫害的真姬菇,将其表面的木屑等杂质清理干净,分离为菌柄和菌盖后进行干燥,干燥完成后粉碎过 60 目筛,密封后于干燥器中保存。

主要试剂:正癸醇(色谱级)、甲醇(色谱级),购于北京索莱宝生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

FD5-2.5 型真空冷冻干燥机 金西盟(GOLD-SIM)公司; WGL-230B 型鼓风干燥箱 天津市泰斯特仪器有限公司; GCMS-QP2010 气质联用仪 日本岛津公司; PEN3 型电子鼻 德国 Airsense 公司; 萃取头(二乙烯基苯/碳分子筛/聚二甲基硅氧烷 DVB/CAR/PDMS 50/30 μm) 美国 Supelco 公司。

1.3 方法

1.3.1 真姬菇菌柄和菌盖的干燥方式

根据 GB 7096—2014《食用安全国家标准食用菌及其制品》,可知真姬菇干制品水分含量应在 12% 以下。称取 1000.00g 各新鲜真姬菇菌柄和菌盖样品进行如下干燥,干燥过程中由质量来计算其水分含量,由前期测定的真姬菇初始水分含量为 91.54%计算可知,当样品质量低于 96.14g 时干燥结束。

HAD: 分别设置干燥箱温度为 60 $^{\circ}\text{C}$ 、70 $^{\circ}\text{C}$ 、80 $^{\circ}\text{C}$, 等待温度恒定后将新鲜真姬菇菌柄和菌盖铺在隔板上干燥,干燥时间分别为 300min、180min、140min(用 b-60 $^{\circ}\text{C}$ 、b-70 $^{\circ}\text{C}$ 、b-80 $^{\circ}\text{C}$ 、g-60 $^{\circ}\text{C}$ 、g-70 $^{\circ}\text{C}$ 、g-80 $^{\circ}\text{C}$ 分别代表不同温度的菌柄和菌盖 HAD 样品);

FD: 将真姬菇菌柄和菌盖先置于-80 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱预冻 24 h, 设置冻干机冷阱温度-50 $^{\circ}\text{C}$, 真空度 10 m Torr 以下,以单层铺在托盘上进行干燥,干燥时间约为 15h(用 b-d、g-d 分别代表菌柄和菌盖 FD 样品);

NAD: 将真姬菇菌柄和菌盖铺在托盘上,放在阳光下晒干,干燥过程温度 30-35 $^{\circ}\text{C}$,干燥时间约为 36h(用 b-s、g-s 分别代表菌柄和菌盖 NAD 样品)。

1.3.2 电子鼻传感器检测

本实验采用的 PEN3 型电子鼻包括 10 个金属氧化物传感器、气体流量控制系统和分析控制软件等部分,其中 10 个传感器对不同类型的挥发性化合物具有不同的敏感性^[14],电子鼻传感器所对应的响应风味物质描述如表 1。

参照文献方法并稍作修改^[15],准确称取各真姬菇干燥样品 1.0 g,分别置于 40 mL 顶空瓶中,加盖密封,室温下富集 60 min,然后将电子鼻探针刺入顶空瓶上端进行风味的分析测定,每组样品设置 5 个平行。

电子鼻参数设置:测试时间为 60 s,传感器清洗时间为 300 s,内部流量控制为 300 mL/min,传感器数据在 40 s 后基本稳定。

表 1 电子鼻传感器性能描述

Table 1 Electronic nose sensor performance description

编号	传感器	性能描述
S1	W1C	对芳香类物质灵敏
S2	W5S	对氮氧化物灵敏
S3	W3C	对氮类、芳香类物质灵敏
S4	W6S	对氢化物有选择性
S5	W5C	对烷烃、芳香类物质灵敏
S6	W1S	对甲基类灵敏
S7	W1W	对无机硫化物、吡嗪类、萜烯类物质灵敏
S8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏
S9	W2W	对芳香类、有机硫化物灵敏
S10	W3S	对甲烷灵敏

1.3.3 挥发性风味物质的测定

参考文献方法并稍作修改^[6],准确称取 0.20 g 真姬菇干燥样品置于 20 mL 顶空瓶中,用垫有聚四氟乙烯顶空瓶垫片的盖子密封,置于 40 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中平衡 30min,然后将活化好的萃取头(DVB/CAR/PDMS 50/30 μm)刺入顶空瓶中吸附 50 min,后取出萃取头放于 GC 进样口,推出纤维头,

解析 5 min。

色谱条件：DB-1MS 毛细管柱(60 m×250 μm,0.25 μm)；升温程序：起始温度 40 ℃，在 40 ℃保持 3 min；以 4 ℃/min 升温至 120 ℃；然后以 6 ℃/min 升温至 240 ℃，保持 12 min。载气为氦气，流速 1.0 mL/min，不分流进样。

质谱条件：电子电离源；离子源温度 230 ℃；接口温度 230 ℃；电子能量 70 eV；质量扫描范围 m/z 35~500。

挥发性风味物质定量方法：采用内标法定量，以质量浓度为 100μg/mL 的正癸醇作内标物。先计算各组分峰面积与内标峰面积的比值，再与内标物含量的乘积即可求得各组分含量，具体公式如下：

$$\text{挥发性组分含量}/(\mu\text{g/g}) = \frac{\text{组分峰面积} \times \text{内标物质含量}(\mu\text{g/g})}{\text{内标峰面积}}$$

1.3.4 ROAV 分析

参考刘登勇等方法并稍做修改^[16]，采用 ROAV 来分析各挥发性风味物质对总体风味的贡献，首先采用气味活度值法(odor activity value,OAV)确定对香气贡献最大的组分，其公式如下：

$$OAV = \frac{C}{T}$$

式中：C 为物质的含量(μg/kg)，T 为该物质的感觉阈值(μg/kg)。

根据 OAV 结果，定义对香气贡献最大的组分为 ROAV_{max}=100，则对于其它风味物质按如下公式计算：

$$ROAV_i \approx 100 \times \frac{C_i}{C_{max}} \times \frac{T_{max}}{T_i}$$

式中：ROAV_i代表各组分相对气味活度值；C_i和 C_{max}分别为各组分的含量/(μg/g)和 ROAV_{max}组分的含量/(μg/g)；T_i和 T_{max}分别为各组分的感觉阈值/(μg/kg)和 ROAV_{max}组分的感觉阈值/(μg/kg)。

ROAV 越大，则对样品总体风味贡献越大。根据文献[17]，定义 1≤ROAV 的组分为样品的关键风味物质；0.1≤ROAV<1 的组分对总体风味具有重要修饰作用。

1.4 数据处理与分析

MS 检索系统利用 NIST 和 Wiley 标准谱库对 GC-MS 总离子流图的各峰进行比对，以对比度 90% 为标准，结合标准质谱图和保留时间来确认各挥发性化合物；使用 IBM SPSS Statistics 18.0 对试验数据进行 PCA 分析；使用 Smica 13.0 软件做电子鼻 PCA 图；使用 Origin 2021 软件做雷达指纹图；使用 Tbttools 做风味物质聚类分析热图。

2 结果与分析

2.1 电子鼻结果分析

2.1.1 电子鼻雷达指纹图谱分析

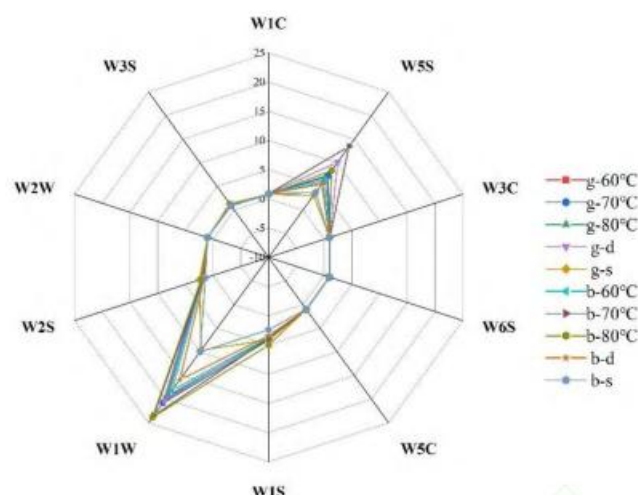


图 1 不同干燥方式下真姬菇样品的雷达指纹图

Fig. 1 Radar fingerprinting of *Hypsizygus marmoreus* obtained by different drying methods

如图 1 所示,不同真姬菇干燥样品雷达指纹图轮廓相似,但传感器响应值存在显著差异。主要涉及 W5S、W1W 两个传感器,说明不同干燥方式与不同干燥部位影响样品中氮氧化物、硫化物、吡嗪类物质的含量。对于 W5S 传感器, b-70 °C 样品响应值最大, b-s 和 g-s 样品的响应值均较小,而 g-d 与 b-d 响应值差异较大,几种不同温度 HAD 样品响应值差异较小;对于 W1W 传感器, b-70 °C、b-80 °C 样品响应值较大,而 g-s 和 b-s 响应值较小,其它几种干燥样品响应值处于它们之间且差异不大。根据结果表明不同热风温度的干燥样品的传感器响应值差异较小;而不同干燥方式对干燥样品响应值影响较大,表现为 HAD 的两个传感器响应值大于 FD 且远大于 NAD,这是由于 HAD 过程生成了较高含量的硫化物和吡嗪类物质以及胺类物质,从而具有较高的传感器数值;而 NAD 由于长时间的光照影响了前体物质的降解和挥发性风味物质的形成,这些物质的含量很低,所以两个传感器响应值较低。

2.1.2 电子鼻 PCA 分析

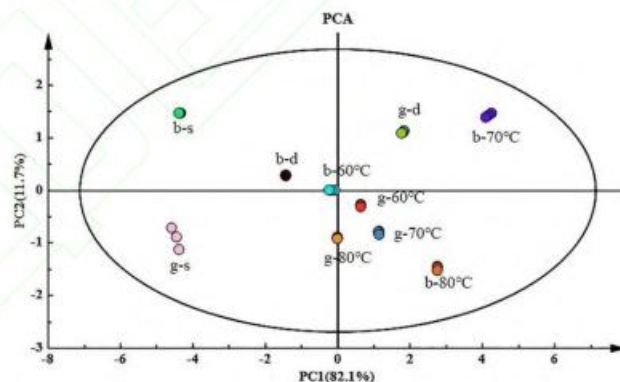


图 2 不同干燥方式的真姬菇样品的 PCA 图

Fig. 2 PCA plot of *Hypsizygus marmoreus* obtained by different drying methods

为了进一步分析不同真姬菇干燥样品风味的区别,将电子鼻数据进行 PCA 分析。PCA 是将几个有可能相关的向量通过正交变换为一组线性不相关的向量^[18],PCA 主成分的累计贡献率越大,说明主成分对电子鼻传感器数据的反映程度越好^[19]。PCA 结果如图 2 所示,其中 PC1 贡献率为 82.1%,PC2 贡献率为 11.7%,累计贡献率为 93.8%,基本涵盖样品的所有信息,用其代表真姬菇干燥样品的电子鼻整体信息可靠度非常高。10 种样品分布在四个不同的象限且分离程度较好,菌盖的 g-60 °C、g-70 °C、g-80 °C 样品距离较近,说明它们的香气差异较小,而菌柄的 b-60 °C、b-70 °C、b-80 °C 样品距离较大,分布在三个象限,说明相较于菌盖,三个不同热风温度的菌柄样品的香气差异较大; b-s、b-d、g-s、g-d 样品距离较远,说明这四种样品的香气差异也较大。通过对电子鼻数据进行 PCA 分析,发现

10 组样品没有重叠,说明电子鼻是一种高效区分不同干燥方式处理的真姬菇菌柄和菌盖风味的方式。

2.2 挥发性风味物质分析

表 2 不同干燥方式的真姬菇挥发性风味物质化学组成与含量

Table 2 Kinds and contents of volatile flavor compounds identified from dried *Hypsizygus marmoreus* obtained by different drying methods

中文名称	保留时间 (min)	含量(μg/g)									
		g-60 ℃	g-70 ℃	g-80 ℃	g-d	g-s	b-60 ℃	b-70 ℃	b-80 ℃	b-d	b-s
醛类											
异丁醛	5.77	0.33	0.34	0.42	0.11	-	-	0.18	0.37	-	-
异戊醛	7.43	0.92	1.23	1.57	0.34	0.25	0.64	0.74	2.13	0.44	0.35
2-甲基丁醛	7.68	0.61	0.71	1.07	0.20	0.16	0.33	0.44	0.75	-	-
正戊醛	8.49	-	-	-	0.28	-	-	-	-	0.57	0.63
正己醛	12.15	-	-	-	0.47	0.56	-	-	-	0.84	0.83
苯甲醛	19.06	1.08	1.04	1.12	0.37	0.59	0.59	0.61	0.62	0.29	0.30
壬醛	25.69	-	-	-	-	-	-	-	-	0.67	-
2-丁基-2-辛烯醛	34.73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.35
醇类											
二甲基硅烷二醇	8.98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.56
异戊醇	10.21	-	0.73	-	0.11	0.21	-	-	-	-	-
(R)-1,2-丙二醇	10.27	-	-	-	-	-	0.73	-	0.41	-	-
丙二醇	10.27	0.51	1.35	-	-	-	-	1.14	-	-	-
1-戊醇	11.24	-	0.33	0.35	0.24	0.53	0.28	0.24	0.55	0.27	0.44
1,3-丙二醇	13.66	-	-	-	-	-	-	0.67	-	-	-
正己醇	15.54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.29
1-辛烯-3-醇	20.59	0.77	0.91	0.85	1.04	0.94	0.74	0.55	0.74	0.30	0.48
3-辛醇	21.35	-	0.68	-	0.37	-	-	-	-	-	-
2-乙基己醇	22.83	-	-	-	0.37	-	-	-	-	-	-
苯乙醇	25.98	1.42	2.17	-	0.60	-	-	-	-	-	-
十二醇	32.69	-	-	-	0.48	-	-	-	-	-	1.23
1-十三醇	32.68	-	-	-	-	-	-	-	-	0.60	1.07
酮类											
2-丁酮	6.27	0.38	0.40	0.36	0.15	-	0.35	0.28	0.41	0.26	0.41
3-戊酮	8.53	0.46	0.59	0.48	-	-	0.61	0.40	0.74	-	-
3-羟基-2-丁酮	8.77	-	-	-	-	-	-	-	-	0.11	-
2-庚酮	16.16	-	0.76	1.24	0.19	0.69	0.16	0.29	0.86	0.47	-
甲基壬基甲酮	32.29	1.18	1.36	1.35	0.54	0.65	0.57	0.49	1.00	0.90	0.60
酯类											
乙酸甲酯	5.48	0.91	0.91	1.50	-	-	0.16	0.12	-	1.23	0.71
丙酸甲酯	6.99	-	-	-	-	1.92	-	-	-	-	0.45
丁酸甲酯	9.48	-	-	-	-	0.83	-	-	-	-	-
乳酸甲酯	9.99	-	-	-	0.13	-	-	-	-	-	0.56
2-羟基丙酸甲酯	10.00	-	-	-	-	-	-	-	-	0.14	-
2-甲基丁酸甲酯	11.57	-	-	-	-	7.16	-	-	-	-	-

戊酸甲酯	13.39	-	-	0.42	1.91	3.66	-	-	-	0.23	0.61
乙酸戊酯	17.37	-	-	-	0.12	-	-	-	-	-	-
己酸甲酯	17.87	1.74	1.74	4.25	22.81	32.48	-	-	-	4.25	12.77
γ -戊内酯	17.89	-	-	-	-	-	0.19	-	-	-	-
4-甲基- γ -丁内酯	18.12	-	-	-	-	1.01	-	-	-	-	-
4-甲基-4-羟基-5-己烯酸	22.21	-	-	-	0.30	0.81	-	-	-	0.13	0.31
- Γ -内酯											
庚酸甲酯	22.39	-	-	-	4.24	6.19	-	-	-	1.50	2.39
γ -己内酯	22.57	-	-	-	0.16	-	-	-	-	-	-
辛酸甲酯	26.56	-	-	-	6.84	7.65	-	-	-	2.33	2.30
烟酸甲酯	26.71	-	-	-	-	0.61	-	-	-	0.15	0.93
醋酸-2-乙基己酯	27.60	-	-	-	0.25	-	-	-	-	-	-
苯乙酸甲酯	28.16	-	0.43	-	-	0.64	-	-	-	-	-
醋酸辛酯	29.68	-	-	-	0.13	-	-	-	-	-	-
壬酸甲酯	30.12	-	1.69	1.33	2.91	7.85	-	-	-	1.11	1.29
癸酸甲酯	33.22	-	-	-	0.44	1.21	-	-	-	0.38	0.44
丙位壬内酯	33.84	-	-	-	0.15	-	-	-	-	0.22	0.48
三氟乙酸十三烷基酯	37.03	-	-	-	-	-	0.14	-	-	-	-
壬二酸二甲酯	38.58	-	-	-	-	1.07	-	-	-	-	-
棕榈酸甲酯	46.96	-	0.55	0.35	0.40	4.05	-	-	-	0.41	1.41
亚油酸甲酯	51.25	-	0.35	-	0.86	4.46	-	-	-	-	1.07
反-9-十八碳烯酸甲酯	51.48	-	-	-	-	2.06	-	-	-	-	-
酸类											
醋酸	7.17	97.39	105.32	90.59	26.19	13.28	75.01	41.74	73.58	31.30	8.75
丙酸	9.24	2.06	2.39	0.85	-	1.03	0.78	0.58	-	-	0.87
异丁酸	11.48	2.28	2.38	2.21	0.53	2.33	1.66	1.09	-	-	-
丁酸	12.50	-	-	-	-	0.26	-	-	-	-	-
异戊酸	15.07	0.27	6.43	4.81	0.52	9.40	2.44	1.86	1.05	0.50	0.82
2-甲基丁酸	15.52	0.81	4.49	3.62	0.76	-	2.12	1.14	1.81	0.35	0.36
2-羟基-2-甲基丁酸	15.72	-	1.83	3.62	-	-	-	2.51	1.08	-	-
正戊酸	16.73	-	-	-	-	0.84	-	-	-	-	-
己酸	20.85	1.18	0.98	-	2.75	1.85	0.68	-	-	3.22	3.30
呋喃类											
4,5-二氢-2-甲基呋喃	8.04	-	-	-	-	-	-	-	0.11	-	-
2-正戊基呋喃	21.18	2.71	2.65	3.17	0.83	0.86	1.82	1.66	5.72	0.44	1.70
烷烃类											
二甲基二甲氧基硅烷	7.58	2.93	3.15	2.68	1.03	2.46	2.97	2.57	3.80	1.60	2.68
六甲基环三硅氧烷	14.04	0.61	1.27	0.74	0.24	1.06	0.78	0.53	0.95	0.10	0.71
2,2-二甲基癸烷	21.86	-	-	-	0.47	-	-	-	0.40	0.24	-
1-十一烯	21.87	-	-	-	-	0.79	-	-	-	-	-
2,2,4,6,6-五甲基庚烷	22.05	-	-	0.62	-	0.59	-	0.27	-	-	0.50
八甲基环四硅氧烷	26.25	-	1.84	1.83	-	3.15	2.63	1.27	2.23	2.20	4.69
十一烷	25.85	2.76	2.96	2.43	1.10	2.07	2.13	1.73	1.70	1.74	2.74
1-十四烯	28.49	0.85	0.88	-	-	-	0.17	-	0.29	-	-

十甲基环五硅氧烷	29.87	12.94	9.89	4.72	3.76	9.32	8.30	5.99	5.98	7.95	7.62
十二烷	32.68	6.19	6.39	5.26	2.97	3.66	4.18	6.38	6.49	3.16	5.15
十四烷	32.98	7.23	7.20	6.09	3.30	3.78	4.42	3.64	3.87	3.10	5.16
十二甲基环六硅氧烷	33.97	8.26	0.60	5.63	4.13	7.90	9.14	6.49	6.10	5.33	11.58
庚基环己烷	34.31	-	-	0.35	-	-	-	-	-	-	-
环十五烷	37.04	-	-	-	0.22	-	-	-	-	-	-
正二十烷	40.46	-	-	-	0.24	-	-	-	-	-	-
正二十一烷	42.54	-	-	-	0.24	-	0.28	-	0.26	0.34	-
其它类											
氨基甲酸铵	4.43	-	1.14	-	-	0.90	1.35	-	-	-	-
丙酰胺	4.43	1.07	-	0.97	0.35	-	-	-	-	0.54	0.95
三甲胺	4.90	63.70	61.39	56.90	39.90	44.22	78.69	52.53	52.25	37.70	53.93
2-甲基吡嗪	13.12	-	0.25	0.36	-	-	-	-	0.39	-	-
二甲基酮	15.93	4.78	-	3.16	1.37	-	3.03	1.68	3.45	2.09	-
2,5-二甲基吡嗪	17.04	1.07	1.15	1.47	0.38	-	0.36	0.44	1.58	0.18	0.36
2,6-二甲基吡嗪	17.07	-	-	-	-	0.93	-	-	-	-	-
2-乙基-6-甲基吡嗪	20.99	-	-	0.79	-	-	-	-	-	-	-
2-乙酰基吡咯	23.56	-	-	0.47	-	-	-	-	-	-	-
3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	24.62	0.71	0.62	1.21	0.29	0.64	-	0.28	1.25	-	-
总计	/	230.12	243.48	221.17	139.06	199.57	208.44	140.54	182.93	119.87	145.16

注：“-”表示未检出。

真姬菇由于含有蛋白质、氨基酸、多糖类物质，这些物质会通过一些途径生成新型挥发性风味物质，根据前人研究，风味物质生成途径主要包括：美拉德反应、脂质的氧化作用、前体物质如游离氨基酸、碳水化合物、核酸等的热降解等^[20]。

在真姬菇干燥过程中，由于不饱和脂肪酸带有双键，在干燥过程中容易被氧化生成过氧化物或氢过氧化物，这些过氧化物或氢过氧化物分解而形成醛类物质^[21]，虽然真姬菇干燥样品中醛类物质含量不高，但由于其气味阈值较低，所以对于干燥样品总体风味贡献较大。HAD 的醛类物质含量多于 FD 和 NAD，NAD 和 FD 含量无明显差异，同时 HAD 的醛类物质含量随温度升高而增多。异戊醛、苯甲醛在所有样品均检出，其中异戊醛具有可可香气，苯甲醛可以赋予干燥样品脂香风味^[22]。除 b-d、b-s 以外的 8 个样品均检测出 2-甲基丁醛，2-甲基丁醛的生成可能是由于亮氨酸发生了 Strecker 降解反应^[23]，它增加了样品的可可香气、麦芽香气。

醇类物质主要是由脂肪酸氧化生成^[24]。由表 2 可知，虽然干燥后的 10 种样品醇类物质含量均不高，但有些醇类阈值较低，所以醇类物质对样品风味也有一定的贡献，这些物质包括 1-辛烯-3-醇、3-辛醇等 C₈ 醇，其中 1-辛烯-3-醇是新鲜真姬菇的特征风味物质^[25]，为样品提供磨菇味、泥土味。据之前文献报道，新鲜真姬菇中的醇类物质含量很高^[26]，但真姬菇干燥后的样品醇类物质含量很低，这可能是由于 C₈ 醇类物质干燥过程中易降解或分解引起的，这也与前人研究变化趋势相一致^[27-29]。

酮类物质的阈值较高，较低含量的酮类物质对真姬菇干燥样品的风味贡献很低，根据李琴等^[30]研究，新鲜真姬菇的特征风味物质包括 1-辛烯-3-酮，而干燥后未检出，说明干燥极大影响了新鲜真姬菇原有挥发性风味物质。而在本研究中有风味贡献的主要包括 2-庚酮、甲基壬基甲酮，它们为样品提供水果味和奶油味，可以增强真姬菇干燥样品的风味。另外由表 2 可知，HAD 的酮类含量多于 FD 和 NAD，酮类物质的升高可能与 HAD 过程中脂肪酸的降解有关^[31]。

酯类物质多由酯化反应得到，会赋予食品甜香味和油脂味^[32]，不同的真姬菇干燥样品间酯类物质含量与数量存在较大差异，对于不同部位，表现为菌盖酯类的数量和含量均多于菌柄；对于不同干燥方式，NAD 的酯类含量最高，其中 g-s 为 83.65 μg/g、b-s 为 25.73 μg/g，其次是 FD，含量最少的是

HAD,造成HAD含量大幅下降的原因可能是HAD较高的温度造成了酯类物质在一定程度上的降解。

10种干燥样品的酸类物质在数量上差异不大;它们在含量差异较大,含量最高的是g-70℃,为123.82 μg/g;含量最低的是b-s,为14.11 μg/g。酸类物质通常提供令人厌恶的酸败味,但由于这几种酸类物质的阈值都很高,所以酸类物质在对真姬菇干燥样品风味的贡献方面差异并不大。

10个干燥样品中共检测出16种烷烃,含量最低的是g-d,为17.70 μg/g;其次是b-d,为25.76 μg/g。可以发现FD制得的样品烷烃含量最低,而HAD和NAD差异不大,但由于烷烃的阈值都很高,所以在整体上对真姬菇干燥样品风味的贡献不大。

对于其它类物质,检测出了3种胺类物质和5种吡嗪类物质和硫化物二甲基砷,对风味贡献较大的是三甲胺、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪,它们为真姬菇干燥样品提供鱼腥味、果味和坚果香气,且三甲胺由于阈值较低,含量很高,对风味贡献很大,HAD的三甲胺含量明显大于FD和NAD。

综上所述可以得出,对于相同的干燥处理,菌盖中挥发性风味物质的含量高于菌柄;而对于不同的干燥方式,不同热风温度显著影响了样品中挥发性风味物质的含量,相较于FD与NAD,HAD由于其生成了较高含量的新型风味物质从而显著提高了挥发性风味物质的含量,FD与NAD在风味物质种类和含量上也有一定差异,而HS-SPME-GC-MS测定的结果与电子鼻检测结果可以相互印证。

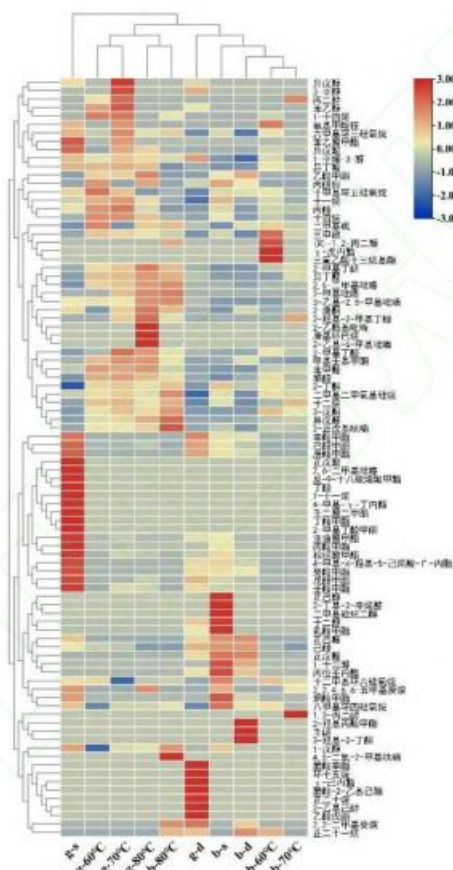


图3 不同干燥方式下真姬菇挥发性风味物质聚类热图

Fig. 3 Cluster heat map of volatile flavor compounds of *Hypsizygus marmoreus* obtained by different drying methods

为了进一步探究挥发性风味物质含量及种类与不同干燥处理的菌柄和菌盖样品之间的关系,通过聚类热图来进行分析。如图3所示,10组干燥样品可以得到明显地区分,图中红色代表高含量,蓝色代表低含量。根据聚类分析结果可以将10组样品分为三类,第一类由g-s一种样品组成,相较于其它两类,它具有多种较高含量的酯类物质(如丁酸甲酯、辛酸甲酯、癸酸甲酯等);第二类由g-60℃、g-70℃、g-80℃、b-80℃四种样品组成,它们具有几种较高含量的醛类物质、吡嗪类物质、酮类物质、酸类物质(如2-甲基丁醛、异丁醛、2,5-二甲基吡嗪、甲基壬基甲酮、醋酸等);第三类由g-d、b-s、b-d、b-60℃、b-70℃五种样品组成,其中g-d、b-s、b-d在酯类物质、醇类物质、醛类物质的含量上

存在明显差异，这三种样品还可以分别归为一类，而 b-60 ℃、b-70 ℃ 差异不大，可以将这两种样品归为一类。

2.3 ROAV 结果分析

表 3 不同干燥方式的真姬菇挥发性风味物质的 ROAV

Table 3 ROAV of volatile flavour compounds in dried *Hypsizygus marmoreus* obtained by different drying methods

中文名称	阈值 (μg/kg)	ROAV									
		g-60 ℃	g-70 ℃	g-80 ℃	g-d	g-s	b-60 ℃	b-70 ℃	b-80 ℃	b-d	b-s
异丁醛	1	0.26	0.28	0.37	0.14	-	-	0.17	0.35	-	-
异戊醛	0.4	1.81	2.51	3.44	1.05	0.72	1.02	1.75	5.10	1.45	0.82
2-甲基丁醛	4	0.12	0.15	0.23	0.06	0.04	0.05	0.10	0.18	-	-
正戊醛	42	-	-	-	0.01	-	-	-	-	0.02	0.01
壬醛	1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.89	-
1-辛烯-3-醇	1	0.60	0.74	0.75	1.30	1.06	0.47	0.52	0.71	0.39	0.44
3-辛醇	18	-	0.03	-	0.03	-	-	-	-	-	-
十二醇	73	-	-	-	0.01	-	-	-	-	-	0.02
1-十三醇	30	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	0.03
2-庚酮	140	-	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	-
甲基基甲酮	7	0.13	0.16	0.17	0.10	0.10	0.05	0.07	0.14	0.17	0.08
丙酸甲酯	58	-	-	-	-	0.04	-	-	-	-	0.01
丁酸甲酯	76	-	-	-	-	0.01	-	-	-	-	-
2-甲基丁酸甲酯	4.4	-	-	-	-	1.84	-	-	-	-	-
戊酸甲酯	20	-	-	0.02	0.12	0.21	-	-	-	0.02	0.03
己酸甲酯	84	0.02	0.03	0.04	0.34	0.44	-	-	-	0.07	0.14
庚酸甲酯	4	-	-	-	1.33	1.75	-	-	-	0.50	0.55
辛酸甲酯	200	-	-	-	0.04	0.04	-	-	-	0.02	0.01
醋酸辛酯	12	-	-	-	0.01	-	-	-	-	-	-
癸酸甲酯	8.8	-	-	-	0.06	0.16	-	-	-	0.06	0.05
异戊酸	1600	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2-正戊基呋喃	6	0.35	0.36	0.46	0.17	0.16	0.19	0.26	0.91	0.10	0.26
三甲胺	0.5	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2-乙基-6-甲基吡嗪	40	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-
3-乙基-2,5-甲基吡嗪	1	0.55	0.50	1.06	0.36	0.73	-	0.27	1.19	-	-

注：“-”表示未检出；“0.00”表示样品的 ROAV 值低于 0.01；气味阈值参考《酒类风味化学》《食品调香术》

各挥发性风味物质被感知到的最低浓度称为“气味阈值”^[33]，而挥发性风味物质的含量与其阈值比值的大小才反映该物质对香气的贡献，若以挥发性风味物质含量的大小来描述其对总体风味的贡献并不准确^[34]，为了明确各挥发性风味物质对样品风味的贡献，通过 ROAV 对各风味物质进行分析。各组样品计算的 ROAV 值见表 3，共得到 25 种风味物质，10 组干燥样品各物质的 ROAV 值存在较大差异。对于关键风味物质，三甲胺是 10 个干燥样品所共有的关键风味物质，三甲胺多在海鲜产品中检出，它为真姬菇干燥样品提供鱼腥味，推测其可能为真姬菇干燥样品中“海鲜味”的来源。异戊醛和 1-辛烯-3-醇也是部分真姬菇干燥样品的关键风味物质，它们为样品提供可可香气和蘑菇香气。FD 和 NAD 的样品中关键挥发性化合物比 HAD 种类多，主要为一些酯类，如庚酸甲酯、2-甲基丁酸甲酯，它们为样品提供鸢尾花香、浆果香气；对于具有修饰作用的风味物质，异丁醛、2-甲基丁醛、1-辛烯-3-醇、2-正戊基呋喃等是多数干燥样品所共有具有修饰作用的风味物质，但 10 组样品仍有差异，主

要表现在 FD 和 NAD 的菌柄和菌盖样品中含有一些酯类物质，如辛酸甲酯、醋酸辛酯、癸酸甲酯，它们为样品提供柑橘香、蘑菇香、泥土味、果香，而不同温度的 HAD 中均未检出。

另外根据前人研究，1-辛烯-3-醇是真姬菇的特征风味物质^[26]，而它在 g-s、g-d 样品中是关键风味物质，其它样品中是具有修饰作用的风味物质，说明干燥处理较大程度的影响了真姬菇原有关键风味物质，但同时也生成了其它关键性风味物质，而 FD 和 NAD 相较于 HAD 能较大程度的保留原有风味物质。

2.4 主成分分析

2.4.1 ROAV 鉴定出的挥发性风味物质的主成分分析

真姬菇挥发性风味物质较为复杂，为了更好地分析不同干燥方式处理的真姬菇菌柄和菌盖挥发性风味品质的差异，对 ROAV 分析得到的 25 种风味物质进行了主成分分析并建立其品质评价模型^[35]。

表 4 主成分特征值及贡献率

Table 4 Eigen valves, contribution and cumulative contributions of principal components

主成分	特征值	贡献率(%)	累计贡献率(%)
1	3.285	46.923	46.923
2	1.366	19.521	66.444
3	0.924	13.202	79.645
4	0.816	11.655	91.301

由表 4 可知，提取前 4 个主成分，可以使累计贡献率达到 91.301%，基本可以涵盖样品所有信息，符合主成分分析的要求。各主成分对各类物质的反映程度由载荷值大小来表示^[36]，由表 4、5 可知，PC1 贡献率是 46.923%，其中醛类、呋喃类的载荷较大，主要反映这两类风味物质的变量信息，而与酯类呈高度负相关；PC2 贡献率是 19.521%，其中酸类物质的载荷为 0.933，主要反映了酸类物质的变量信息，而与醇类物质负相关；PC3 贡献率是 13.202%，主要反映醇类物质的变量信息，而与其它类物质负相关；PC4 的贡献率是 11.655%，主要反映醇类物质的变量信息，与醛类物质负相关。

表 5 主成分的特征向量与载荷矩阵

Table 5 Principal component eigenvectors and loading matrix

类别	PC1		PC2		PC3		PC4	
	特征向量	载荷	特征向量	载荷	特征向量	载荷	特征向量	载荷
醛类(X_1)	0.515	0.933	0.151	0.177	0.241	0.231	-0.165	-0.149
呋喃类(X_6)	0.463	0.840	0.014	0.016	0.236	0.227	0.024	0.022
酯类(X_4)	-0.435	-0.788	0.433	0.506	0.120	0.115	-0.035	-0.032
酮类(X_3)	0.407	0.737	0.323	0.378	0.358	0.344	0.135	0.122
酸类(X_5)	-0.052	-0.094	0.798	0.933	-0.202	-0.194	0.250	0.225
醇类(X_2)	-0.259	-0.470	-0.188	-0.220	0.596	0.573	0.698	0.630
其它类(X_7)	0.310	0.562	-0.113	-0.132	-0.590	-0.567	0.636	0.574

2.4.2 挥发性风味品质评价模型的建立

根据四个主成分 7 类风味物质的特征向量，可以用 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 四个新的综合指标来代替原来的 7 类风味物质来进行风味品质的综合评价，可得：

$$F_1=0.515X_1-0.259X_2+0.407X_3-0.435X_4-0.052X_5+0.463X_6+0.310X_7$$

$$F_2=0.151X_1-0.188X_2+0.323X_3+0.433X_4+0.798X_5+0.014X_6-0.113X_7$$

$$F_3=0.241X_1+0.596X_2+0.358X_3+0.120X_4-0.202X_5+0.236X_6-0.590X_7$$

$$F_4=-0.165X_1+0.698X_2+0.135X_3-0.035X_4+0.250X_5+0.024X_6+0.636X_7$$

式中， X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 为各组样品 7 类挥发性物质标准化后的数据。

将四个主成分的贡献率 $\beta_i(i=1,2,3,4)$ 作为加权系数，利用综合函数 $F=\sum_{i=1}^4 \beta_i \times F_i$ 建立真姬菇的挥发性风味品质评价模型，其表达式如下：

$$F=0.46923F_1+0.19521F_2+0.13202F_3+0.11655F_4$$

代入数据计算得到的综合得分见表 6。

表 6 标准化后主成分综合得分
Table 6 Synthetic scores of principal components after standardization

样品	得分					排序
	F_1	F_2	F_3	F_4	F	
g-60 ℃	1.395618	-0.52977	-0.21743	-0.00722	0.521904	4
g-70 ℃	1.321539	1.09152	0.474614	1.200159	1.035719	3
g-80 ℃	2.024419	1.067593	0.334589	0.060781	1.20958	1
g-d	-2.30788	-0.60785	0.849735	-0.27862	-1.12188	10
g-s	-2.48583	2.49807	-0.55492	-0.22718	-0.77852	9
b-60 ℃	0.333368	-0.84344	-2.06764	0.770341	-0.19141	5
b-70 ℃	-0.20008	-0.72674	-0.96423	-0.90528	-0.46856	6
b-80 ℃	2.52371	-0.20174	0.812194	-0.77883	1.161272	2
b-d	-0.87714	-0.50786	0.388281	-1.28465	-0.60918	7
b-s	-1.72772	-1.23979	0.944798	1.450488	-0.75893	8

由表 6 可知,第一主成分得分最高的是 b-80 ℃;第二主成分综合得分最高的是 g-70 ℃;第三主成分得分最高的是 b-s;第四主成分得分最高的是 b-s。综合评价方程中,得分最高的是 g-80 ℃,其次是 b-80 ℃,再者是 g-70 ℃。由此可见,在 10 组真姬菇干燥样品中,HAD80 ℃处理的菌盖样品(g-80 ℃)挥发性风味品质最好。

3 结论

本研究采用电子鼻对不同干燥处理的真姬菇菌柄和菌盖挥发性风味进行分析,发现 10 种干燥样品风味存在明显差异,且电子鼻能有效区分不同样品风味。通过 HS-SPME-GC-MS 分析,发现 g-60 ℃、g-70 ℃、g-80 ℃、g-d、g-s 分别检测到 32、41、40、53、48 种风味物质,而 b-60 ℃、b-70 ℃、b-80 ℃、b-d、b-s 分别检测到 34、33、33、43、44 种风味物质,在相同干燥方式下菌盖的挥发性风味物质的含量高于菌柄,不同干燥方式中 HAD 由于生成了较多的新型风味物质从而具有较高的挥发性风味物质含量。进一步利用 ROAV 分析鉴定出 25 种对样品风味有贡献的物质,其中对香气贡献较大的有三甲胺、异戊醛、1-辛烯-3-醇等,它们为样品提供鱼腥味、可可香、蘑菇香。通过对 ROAV 分析得出的 25 种风味物质进行主成分分析并建立其品质评价模型,得到 g-80 ℃样品的挥发性风味品质最好。可以为真姬菇的精细化加工、真姬菇调味料产品的开发提供一定的理论依据。

参考文献:

- [1] 温泉,王锡昌.食用菌风味物质的研究及应用进展[J].长江大学学报(自科版),2006(11):211-213+229+136. DOI:10.3969/j.issn.1673-1409.2006.04.023
- [2] 陶明焯,王玮,王晓炜,程光宇,金邦荃.真姬菇营养成分生物活性物质分析及其多糖清除自由基活性研究[J].食品科学,2007(8):404-407. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2007.08.098
- [3] YAN Jingmin, ZHU Lei, QU Yunhe, et al. Analyses of active antioxidant polysaccharides from four edible mushrooms[J]. International Jo-urnal of Biological Macromolecules, 2019, 123: 945-956. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.11.079
- [4] 王丽,罗红霞,李淑荣,迟全勃,汪慧华.海鲜菇氨基酸组成分析及营养评价[J].食品工业科技,2016,37(21):338-341+346.DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.21.057.
- [5] ZHANG Sumin, BAI Jinhao, CHANG Mingchang, et al. Color, texture and enzyme activities of Hypsizygus marmoreus as affected by

- he-ating combined with color protection and hardening[J]. International Journal of Food Properties, 2019, 22(1): 9-18. DOI: 10.1080/10942912.2019.1566242
- [6] CHEN Guitang, WU Fangning, PEI Fei, et al. Volatile components of white *Hypsizygus marmoreus* detected by electronic nose and HS-SPME-GC-MS: Influence of four drying methods[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(12): 2901-2910. DOI: 10.1080/10942912.2016.1258575
- [7] CAI Jiasen, Zhu Yunyang, MA Runhui, et al. Effects of roasting level on physicochemical, sensory, and volatile profiles of soybeans using electronic nose and HS-SPME-GC-MS[J]. Food Chemistry, 2021, 340. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127880
- [8] CHEN Dong, WANG Silu, LI Mengqi, et al. The dynamic changes in product attributes of shiitake mushroom pilei and stipes du-ring dehydration by hot air drying[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(7): 19. DOI: 10.1111/jfpp.15648
- [9] GUO Yu, CHEN Dong, DONG Yifei, et al. Characteristic volatiles fingerprints and changes of volatile compounds in fresh and dried *Tricholoma matsutake* Singer by HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. Journal of Chromatography B-Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences, 2018, 1099: 46-55. DOI: 10.1016/j.jchromb.2018.09.011
- [10] HU Si, FENG Xi, HUANG Wen, et al. Effects of drying methods on non-volatile taste components of *Stropharia rugoso-annulata* mushrooms[J]. Lwt-Food Science and Technology, 2020, 127. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109428
- [11] LI Mengqi, YANG Ruiwen, ZHANG Hao, et al. Development of a flavor fingerprint by HS-GC-IMS with PCA for volatile compounds of *Tricholoma matsutake* Singer[J]. Food Chemistry, 2019, 290: 32-39. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.03.124
- [12] ZHANG Lijia, DONG Xiaobo, FENG Xi, et al. Effects of Drying Process on the Volatile and Non-Volatile Flavor Compounds of *Lentinula edodes*[J]. Foods, 2021, 10(11): 13. DOI: 10.3390/foods10112836
- [13] SELLI Serkan, GUCLU Gamze, SEVINDIK Onur, et al. Variations in the key aroma and phenolic compounds of champignon (*Agaricus bisporus*) and oyster (*Pleurotus ostreatus*) mushrooms after two cooking treatments as elucidated by GC-MS-O and LC-DAD-ESI-MS/MS[J]. Food Chemistry, 2021, 354. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129576
- [14] MORAN Nancy E, NOVOTNY Janet A, CICHON Morgan J, et al. Absorption and Distribution Kinetics of the C-13-Labeled Tomato Carotenoid Phytoene in Healthy Adults[J]. Journal of Nutrition, 2016, 146(2): 368-376. DOI: 10.3945/jn.115.220525
- [15] 黄贵元,赵海娟,高阳,许利平,许高燕,吴兆明,李瑞丽,梁淼,张峻松.基于 HS-SPME/GC-MS 和电子鼻技术对干枣及其不同提取物挥发性成分分析[J/OL].食品科学:1-13[2022-03-28].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20210911.1255.018.html>
- [16] 刘登勇,赵志南,吴金城,邹玉峰,王逍,李明倩.基于 SPME-GC-MS 分析熏制材料对熏鸡腿挥发性风味物质的影响[J].食品科学,2019,40(24):220-227.DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20190104-062
- [17] 王丹,丹彤,孙天松,张和平,孟和毕力格.SPME-GC-MS 结合 ROAV 分析单菌及复配发酵牛乳中关键性风味物质[J].食品科学,2017,38(8):145-152. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201708023
- [18] GU Xinzhe, SUN Ye, TU Kang, et al. Predicting the growth situation of *Pseudomonas aeruginosa* on agar plates and meat stuffs using gas sensors[J]. Scientific Reports, 2016, 6. DOI: 10.1038/srep38721
- [19] 潘晓倩,成晓瑜,张顺亮,赵冰,艾婷,乔晓玲,王守伟.不同发酵剂对北方风干香肠色泽和风味品质的改良作用[J].食品科学,2015,36(14):81-86. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201514016
- [20] DENG Yun, LUO Yali, WANG Yuegang, et al. Effect of different drying methods on the myosin structure, amino acid composition, protein digestibility and volatile profile of squid fillets[J]. Food Chemistry, 2015, 171: 168-176. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.09.002
- [21] HOU Hui, LIU Chang, LU Xiaoshuo, et al. Characterization of flavor frame in shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) detected by HS-GC-IMS coupled with electronic tongue and sensory analysis: Influence of drying techniques[J]. Lwt-Food Science and Technology, 2021, 146. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111402
- [22] 刘红. 热反应型风味基料的研制及与市售相关产品的风味比较[D].浙江工商大学,2010. DOI:10.7666/d.Y1725032
- [23] 贡震,杨震,史智佳,刘梦,陶瑞,曲超,许典.不同熬煮时间对北京酱牛肉挥发性风味成分的影响[J].食品科学,2017,38(10):183-190.DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201710031
- [24] MISHARINA T A, MUHUTDINOVA S M, ZHARIKOVA G G, et al. Formation of flavor of drychamignons (*Agaricus bisporus* L.)[J]. Applied Biochemistry and Microbiology, 2010, 46(1): 108-113. DOI:10.1134/S0003683810010199
- [25] 殷朝敏,范秀芝,樊喆,史德芳,高虹.14 种侧耳属食用菌干品挥发性香味成分分析[J].食品科学,2018,39(16):240-246.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201816035

- [26] 何奎, 贡建民, 毕阳, 王睿, 毛永强, 武淑娟. 纳米膜包装真姬菇贮藏期间挥发性风味成分变化分析[J]. 食品科学, 2021, 42(20): 160-166. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200916-214
- [27] YANG Wenjian, YU Jie, PEI Fei, et al. Effect of hot air drying on volatile compounds of *Flammulina velutipes* detected by HS-SPME-GC-MS and electronic nose[J]. Food Chemistry, 2016, 196: 860-866. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.09.097
- [28] 包陈力根, 关淳博, 辛明航, 滕旭, 刘婷婷, 王大为. HS-SPME-GC-MS 结合电子鼻分析烘烤对大球盖菇挥发性风味物质的影响[J/OL]. 食品科学: 1-14[2022-03-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220309.1942.014.html>
- [29] 马琦, 伯继芳, 冯莉, 仵逸凡, 王小晶, 李梅, 徐怀德. GC-MS 结合电子鼻分析干燥方式对杏鲍菇挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(14): 276-282. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180904-046
- [30] 李琴, 朱科学, 周惠明. 固相微萃取-气相色谱-质谱及气相色谱嗅闻技术分析双孢蘑菇汤的风味活性物质[J]. 食品科学, 2011, 32(16): 300-304.
- [31] 王治丹, 呼振豪, 张彦民, 迟焕荣, 李沛, 赵国忠. 酵母抽提物在食醋中的应用及感官评价[J]. 中国酿造, 2022, 41(1): 204-210. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2022.01.035
- [32] SUN Weizheng, ZHAO Qiangzhong, ZHAO Haifeng, et al. Volatile compounds of Cantonese sausage released at different stages of processing and storage[J]. Food Chemistry, 2010, 121(2): 319-325. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.12.031
- [33] 石芳, 李瑶, 杨雅轩, 唐宇, 吴素蕊, 明建. 不同干燥方式对松茸品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 141-147. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201805022
- [34] 奚星林, 曾广丰, 谢建军, 周舒瑜, 李双. SPME-GC-MS 结合 ROAV 法分析苦瓜粉中挥发性特征风味物质[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(2): 153-160. DOI:10.19804/j.issn1006-2513.2022.02.020.
- [35] FENG Yao, XIN Guang, WEI Yunyun, et al. Comparison of the umami taste and aroma of dried *Suillus granulatus* packed using four different packaging methods[J]. Food Chemistry, 2022, 366: 8. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.130570
- [36] 沈静, 杜若曦, 魏婷, 冀晓龙, 王敏. 干制方式对鲜食枣脆片香气品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(18): 131-137. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201718021