

不同干燥温度对金针菇菇根挥发性特征和口感特性的影响

刘芹¹, 胡素娟¹, 崔筱¹, 宋志波¹, 吴杰², 师子文², 孔维丽^{1*}

(1.河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州 450002; 2.河南农业大学生命科学学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 为研究不同干燥温度对金针菇菇根挥发性特征和口感特性的影响, 采用电子鼻、电子舌、顶空固相微萃取气相色谱-质谱联用技术(headspace solid-phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)对室温及40、50、60℃干燥处理的金针菇菇根挥发性特征和口感特性进行分析。结果表明, 干燥温度对金针菇菇根中的游离氨基酸、可溶性蛋白质、粗多糖和5'-核苷酸含量具有显著影响, 其中50℃干燥处理的金针菇菇根整体品质最好。不同干燥温度处理的金针菇菇根之间存在明显差异, 通过主成分分析(principal component analysis, PCA)结合电子鼻、电子舌、HS-SPME-GC-MS指纹图谱可以清楚区分不同干燥温度处理的样品。层次聚类分析结果(欧氏距离为6.5)与主成分分析结果一致。本研究可为食用菌和其他类似热敏农产品的干燥提供理论支撑。

关键词: 干燥温度; 金针菇菇根; 电子鼻; 电子舌; 顶空固相微萃取气相色谱-质谱联用技术

Effect of Drying Temperature on the Volatile Profile and Taste Properties of *Flammulina velutipes* Root

LIU Qin¹, HU Sujuan¹, CUI Xiao¹, SONG Zhibo¹, WU Jie², SHI Ziwen², KONG Weili^{1*}

(1. Institute of Plant Nutrition, Agricultural Resources and Environmental Science, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2. College of Life Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In this study, the volatile profile and taste properties of *Flammulina velutipes* root dried at room temperature, 40, 50 or 60 °C were analyzed by using an electronic nose (E-nose), an electronic tongue (E-tongue), and headspace solid-phase microextraction followed by gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS). Results indicated that the drying temperature markedly affected the contents of free amino acids, soluble proteins, crude polysaccharides and 5'-nucleotides, and the overall quality of *F. velutipes* root dried at 50 °C was best. Significant differences among all dried samples were observed. Principal component analysis (PCA) combined with the E-nose and E-tongue radar charts as well as the GC-MS fingerprint could clearly discriminate all dried samples. The results obtained from hierarchical cluster analysis (the Euclidean distance was 6.5) were in agreement with those of PCA. These findings may provide theoretical support for the dehydration of edible mushrooms and other similar thermo-sensitive agricultural products.

Keywords: drying temperature; *Flammulina velutipes* root; electronic nose; electronic tongue; headspace solid-phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220316-175

中图分类号: S646.1+2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)07-0104-10

引文格式:

刘芹, 胡素娟, 崔筱, 等. 不同干燥温度对金针菇菇根挥发性特征和口感特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 104-113.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220316-175. <http://www.spkx.net.cn>

LIU Qin, HU Sujuan, CUI Xiao, et al. Effect of drying temperature on the volatile profile and taste properties of *Flammulina velutipes* root[J]. Food Science, 2023, 44(7): 104-113. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220316-175. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2022-03-16

基金项目: 河南省农业科学院基础性科研项目(2022JC17);

河南省现代农业产业技术体系专项资金项目(S2013-09; S2013-09-G02); 河南省重大公益专项(201300110700)

第一作者简介: 刘芹(1986—)(ORCID: 0000-0001-9085-8104), 女, 副研究员, 博士, 研究方向为食用菌生理。

E-mail: liuqin_bio@hotmail.com

*通信作者简介: 孔维丽(1976—)(ORCID: 0000-0002-2256-9367), 女, 研究员, 硕士, 研究方向为食用菌育种。

E-mail: kongwl2019@hotmail.com

金针菇 (*Flammulina velutipes* (Fr.) Sing.) 又名冬菇、朴菇、构菌、青杠菌、毛柄金钱菌, 是我国产量和消费量最大的食用菌之一^[1], 2021年全国金针菇年产量高达227.91万 t^[2]。金针菇不仅菌盖滑嫩、菌柄细长脆嫩、形美味鲜, 还含有丰富的蛋白质、维生素、矿物质和不饱和脂肪酸^[3]。金针菇是世界著名的药食两用菌, 具有显著的抗细菌、抗病毒、抗真菌、抗氧化和抗肿瘤作用。此外, 金针菇还可以通过刺激免疫反应、产生细胞因子从而发挥免疫调节作用^[4]。金针菇中含有的酚类成分具有较高的抗氧化活性和免疫活性。金针菇菇根是金针菇食用部分收获后产生的副产物, 约占金针菇子实体总质量的10%~15%。金针菇菇根纤维素含量高, 但因口感较差、难以嚼碎而常被丢弃, 仅中国每年就生产20万 t以上的金针菇菇根废料, 欧美、日韩等发达地区的金针菇菇根废料产量甚至更高^[5]。由于缺乏有效的加工技术, 金针菇菇根通常被作为肥料、燃料或被直接丢弃, 不仅造成资源的浪费, 而且污染环境。据报道, 金针菇菇根中含有丰富的蛋白质、多糖、呈味核苷酸、维生素和矿物质等^[5], 因此, 金针菇菇根可以用于多糖、蛋白质等活性物质提取, 或作为食品配料添加到面点、汤料, 亦可以作为饲料、垫料应用于畜牧行业^[6-8]。但由于金针菇菇根含水量较大, 不宜保存和运输, 在加工利用前需先将其制成粉^[8]。

目前食用菌干燥脱水方式有热风干燥、真空冷冻干燥、微波干燥和红外干燥等方法^[9-10]。真空冷冻干燥能较完整地保留食用菌的营养物质、外观与形状, 且干制品的复水速率和复水性较好。但是真空冷冻干燥所存在的传热速率低、能耗高、效率低等缺点很大程度地限制了其应用^[11]。红外和微波干燥效率高、产品品质好, 但是易产生干燥不均匀、品质不稳定等现象^[9]。热风(65~80 °C)干燥能使食用菌内还原糖与蛋白质发生美拉德反应, 形成浓郁的风味。此外, Hu Si等^[12]称热风干燥还可以通过增加鲜味氨基酸含量来促进食用菌的鲜味。当前食用菌干燥脱水主要采用恒温热风干燥的方式, 其相对于其他干燥方式具有设备成熟、操作简便、能耗低、节约成本等特点, 因而比较适宜企业进行大规模干燥处理^[13-14]。研究表明, 热风干燥温度对食用菌的干燥特性和品质具有显著影响^[15]。黄健航等研究了不同干燥温度对鹿茸菇总酚和黄酮含量及抗氧化活性的影响^[16]。李佳欢等研究了热风干燥温度对荷叶离褶伞干燥特性和挥发性风味物质的影响^[13]。热风干燥可促进醛类和酮类风味物质的形成, 但高温也会造成一些热敏性风味物质的降解, 使食用菌的风味强度降低。并且过高的温度会引起菇体表面硬化、皱缩严重, 对微观结构破坏性大, 从而影响产品的口感, 同时也会导致多糖的组成和活性存在较大差异, 造成产品品质下降^[13]。

近年来, 气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectroscopy, GC-MS)、电子鼻(electronic nose, E-nose)和电子舌(electronic tongue, E-tongue)在食品行业质量控制中的应用越来越广泛^[17]。固相微萃取(solid-phase microextraction, SPME)技术是一种很有前途的样品制备技术, 可用于GC-MS的前处理, 为食品挥发性成分类型和浓度的检测分析提供了一种精确的方法, 同时也是食物风味分析中一种非常有效的手段。E-nose和E-tongue是一种由一系列传感器组成, 用于检测气味和口感的分析设备。HS-SPME-GC-MS、E-nose和E-tongue越来越多用于食品挥发性和味道特性的分析, 包括蘑菇、蔬菜、水果、茶和咖啡、牛奶、葡萄酒、鱼和肉等的品质控制、新鲜度分级、存储条件选择以及种类鉴定和区分^[17-18]。Dong Wenjiang等^[17]采用HS-SPME-GC-MS、E-nose和E-tongue技术结合化学计量学多元分析有效地区分了不同干燥处理的烘焙咖啡豆。Hou Hui等^[19]结合HS-SPME-GC-MS、E-tongue和感官分析很好地表征了不同干燥方式对香菇风味指纹图谱的影响。Pei Fei等^[20]采用HS-SPME-GC-MS和E-nose对冷冻干燥和微波真空干燥双孢蘑菇切片中的挥发性成分进行了研究和比较。然而, 目前鲜见将这些技术应用于评价不同干燥温度处理金针菇菇根样品之间风味差异的报道。

因此, 本研究旨在评价和比较不同干燥温度(室温及40、50、60 °C)对干燥金针菇菇根的营养成分(游离氨基酸、可溶性蛋白质、粗多糖和5'-核苷酸)、挥发性物质和口感特性的影响。将HS-SPME-GC-MS、E-nose和E-tongue技术用于分析干燥金针菇菇根样品的风味, 并采用主成分分析(principal component analysis, PCA)和层次聚类分析(hierarchical cluster analysis, HCA)对HS-SPME-GC-MS、E-nose、E-tongue所获数据以及融合数据集进行分析, 从而探讨不同温度制备的金针菇菇根样品风味之间的差异。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

金针菇(品种‘816A’)菇根(长度约5 cm)取自天水众兴菌业科技股份有限公司。

所用试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

电热鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司; 水分测定仪 常州市幸运电子设备有限公司; AL204型电子天平 Mettler-Toledo仪器(上海)有限公司; HC-2000型高速多功能粉碎机 永康市天祺盛世工贸有限公司; 7890A-5975C GC-MS仪 美国Agilent公司;

UltiMate 3000高效液相色谱仪 美国Thermo公司；PEN3电子鼻系统 德国Airsense公司；TS-5000Z味觉分析系统 日本Insent公司。

1.3 方法

1.3.1 干燥处理

准确称取500 g金针菇菇根，置于室温（25℃左右）下自然干燥或预先设置好温度（40、50、60℃）的电热鼓风机干燥箱内，直至水分质量分数降至10%以下，结束干燥。每个温度设置3个重复。将干燥后的金针菇菇根分别采用粉碎机粉碎后过100目筛，样品保存备用。

1.3.2 理化成分分析

可溶性蛋白质含量检测依据GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》。粗多糖含量检测依据NY/T 1676—2008《食用菌中粗多糖含量的测定》。游离氨基酸和5'-核苷酸含量的检测依据Liu Qin等^[21]的方法。

1.3.3 挥发性物质分析

采用HS-SPME-GC-MS对金针菇菇根粉的挥发性成分进行测定。准确称取1.0 g样品粉末放入装有5 mL蒸馏水和10 μL 100 mg/L 1,2-二氯苯的顶空瓶，55℃孵化15 min。应用固相微萃取头45℃萃取40 min，富集挥发性化合物，在GC-MS进样口250℃解吸附5 min。GC-MS分析在装备有DB-5 ms毛细管柱（30 m×0.25 mm，0.25 μm）的7890A-5975C GC-MS仪上进行。色谱条件：进样口采用不分流模式；进样口温度250℃；载气（He）流量1 mL/min；柱温初始温度40℃，保持2 min，以1.5℃/min上升到130℃，再以4℃/min上升到220℃，保持5 min。质谱条件：质量扫描范围为35~300 amu；离子源温度230℃；四极杆温度150℃；传输线温度250℃。挥发性物质含量按面积归一化法进行定量分析，各分离组分相对含量/% =（分离组分的峰面积/总峰面积）×100。

1.3.4 E-nose分析

E-nose分析采用PEN3电子鼻系统进行。电子鼻由模式识别软件、自动采样器和传感器阵列单元组成。传感器阵列由10个不同的金属氧化物传感器W1C、W5S、W3C、W6S、W5C、W1S、W1W、W2S、W2W和W3S组成（表1）。金针菇菇根粉样品（1.0 g）放入10 mL的密封小瓶中，室温下静置1 h后测试。测定条件：采样时间为1 s/组；传感器自清洗时间为90 s；传感器归零时间为5 s；样品准备时间为5 s；载气为合成的干燥空气，进样和载气流量为400 mL/min；测定时间为80 s，选取数据较平稳的70~72 s进行数据分析，每个样品重复测定3次。

表1 电子鼻传感器名称和性能描述

阵列序号	传感器名称	性能描述
1	W1C	对芳香族化合物敏感
2	W5S	对氮氧化物敏感
3	W3C	对氨类和芳香族化合物敏感
4	W6S	对氢类敏感
5	W5C	对烷烃、芳香族化合物敏感
6	W1S	对甲烷等短链烷烃敏感
7	W1W	对无机硫化物敏感
8	W2S	对醇、醚、醛、酮类敏感
9	W2W	对芳香族化合物和有机硫化物敏感
10	W3S	对烷烃敏感

1.3.5 E-tongue分析

E-tongue分析采用TS-5000Z电子舌，配备AAE、CAO、CTO、COO和AE1共5个测试传感器，分别对鲜、酸、咸、苦、涩敏感。该电子舌系统由自动采样器、传感器阵列、参比电极和化学计量软件包组成。分析前将金针菇菇根粉样品（1.0 g）加入40 mL去离子水，静置2 h，3 000 r/min离心5 min，取上清液用于测试。测试用液：Reference溶液（参比唾液）为30 mmol/L KCl和0.3 mmol/L酒石酸溶液的混合液；负极清洗液为100 mmol/L HCl和30%（体积分数，下同）乙醇溶液的混合液；正极清洗液为100 mmol/L KCl、100 mmol/L KOH和30%乙醇溶液的混合液。其中，酸味的无味点味觉值为-13.0，咸味的无味点味觉值为-6.00，其余味道的无味点味觉值均为0。以参比溶液的输出为零点，当样品的味觉值低于无味点时说明样品无该味道，反之则有。每个样品进行5次重复，为减少系统误差，仅选取后3次测量的传感器响应值用于统计分析。

1.4 数据统计分析

采用SPSS 22.0软件对实验数据进行单因素方差分析（one-way analysis of variance, One-way ANOVA），采用Duncan多重检验分析不同干燥温度处理的干燥金针菇菇根样品间的差异， $P < 0.05$ 表示差异显著。热图绘制和PCA采用R语言（Version 3.1.2），HCA采用SPSS软件。所有数据均以3组重复实验的平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 不同干燥温度对金针菇菇根营养成分含量的影响

2.1.1 可溶性蛋白质和粗多糖

如图1A所示，金针菇菇根样品中可溶性蛋白质含量随干燥温度的升高呈先升高后降低的趋势。室温及40、50、60℃干燥处理金针菇菇根中的可溶性蛋白质含量分别为145.12、146.55、153.78 g/kg和150.00 g/kg，这与Liu Xuzhou等^[3]报道的结果一致。这是由于在高温干燥过程中，金针菇菇根的内部温度迅速上升到有利于酶促反应的值，酶促反应诱导蛋白质部分降解并改变其结构，

从而暴露出更多的疏水性区域，这导致可检测到的可溶性蛋白质含量增加；然而，随着干燥过程的继续，蛋白质不断降解为小的寡肽和氨基酸，从而使可溶性蛋白含量逐渐降低。美拉德反应与上述酶促反应同时发生，也导致蛋白质进一步损失^[15]。60℃干燥处理金针菇菇根中的蛋白质含量下降至150.00 g/kg，说明该温度干燥金针菇菇根中的可溶性蛋白质减少量大于产生量。

干燥温度对金针菇菇根样品中粗多糖含量的影响如图1B所示。室温干燥处理金针菇菇根中的粗多糖含量为34.10 g/kg。50℃干燥处理金针菇菇根中的粗多糖含量最高，为40.21 g/kg，40℃和50℃干燥处理的金针菇菇根中粗多糖含量没有显著差异 ($P>0.05$)。60℃干燥处理的金针菇菇根中粗多糖含量最低，为33.63 g/kg，显著低于50℃处理 ($P<0.05$)。这可能因为糖在加热过程中可与氨基酸等物质发生美拉德反应，从而导致含量降低。金针菇菇根中多糖含量随干燥温度升高呈先升高后降低的趋势，与其他食用菌干燥过程中的多糖含量变化趋势^[15]一致。

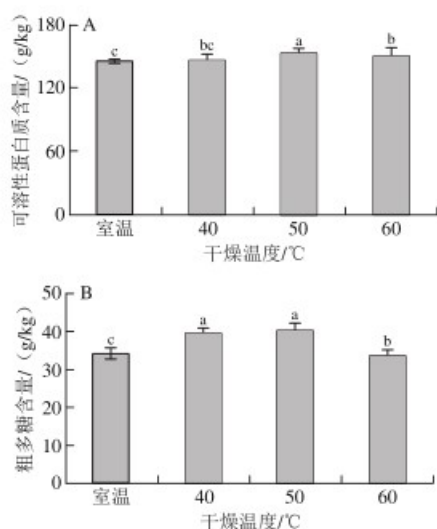


图1 不同干燥温度处理后的金针菇菇根的可溶性蛋白质 (A) 和粗多糖 (B) 含量

Fig. 1 Contents of soluble proteins (A) and crude polysaccharides (B) in dried *F. velutipes* roots prepared at different drying temperatures

2.1.2 氨基酸

金针菇菇根样品中检测到的16种游离氨基酸包括了人体所有必需氨基酸(图2A)，其中谷氨酸、天冬氨酸、苯丙氨酸和赖氨酸为主要成分，含量均在6.0 g/kg以上。金针菇菇根的总氨基酸含量随干燥温度升高呈现先增加后减少的趋势，室温干燥处理的总氨基酸含量最低，为93.01 g/kg，50℃处理的总氨基酸含量最高，为99.93 g/kg(图2B)。这可能是因为在干燥过程中蛋白质在蛋白酶或高温的作用下降解产生游离氨基酸，从而增加了

干金针菇的风味^[19]。然而温度过高(60℃)时，美拉德反应增强，降低了游离氨基酸含量。值得注意的是，干燥过程中含硫氨基酸(蛋氨酸)的降解会影响干金针菇的香气，产生如洋葱和卷心菜的味道。据报道，游离氨基酸可以赋予食用菌鲜味(谷氨酸和天冬氨酸、类味精氨基酸)、甜味和苦味^[22]。类味精氨基酸和甜味氨基酸是食用菌味道鲜美的原因，50℃干燥处理的金针菇菇根含有最高含量的甜味氨基酸和第二高含量的类味精氨基酸(图2B)，因此认为50℃干燥处理的金针菇菇根品质优于其他温度处理组。虽然在金针菇菇根中检测出大量苦味氨基酸，但在食用过程中却没有感受到苦味，这是因为苦味可能被甜味成分(可溶性糖和甜味氨基酸)所掩盖^[23]。

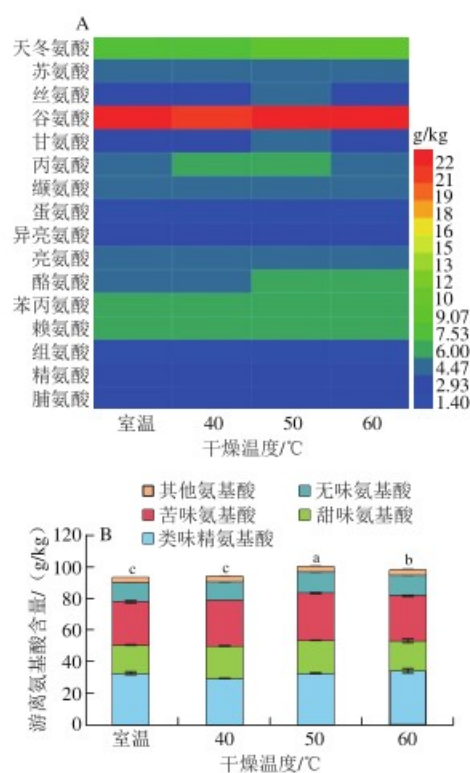


图2 不同干燥温度处理后金针菇菇根的游离氨基酸含量热图 (A) 和分类 (B)

Fig. 2 Contents of free amino acids (A) and classification of amino acids (B) in dried *F. velutipes* roots prepared at different drying temperatures

2.1.3 5'-核苷酸

5'-核苷酸通过与类味精氨基酸的协同作用对食用菌的鲜味特性的贡献远大于类味精氨基酸^[24]。4个温度干燥处理金针菇菇根样品中的5'-核苷酸主要包括：5'-胞苷酸(5'-CMP)、5'-尿苷酸(5'-UMP)、5'-鸟苷酸(5'-GMP)、5'-肌苷酸(5'-IMP)、5'-黄苷酸(5'-XMP)和5'-腺苷酸(5'-AMP)(图3A)。5'-鸟苷酸是一种重要的鲜味增强剂，具有肉味。5'-腺苷酸提供甜味，可有效抑制食用菌中的苦味和涩味^[25]。室温

及40、50、60 °C干燥处理的金针菇菇根中5'-核苷酸的总含量分别为3.32、3.43、3.64 g/kg和3.29 g/kg。50 °C干燥处理的金针菇菇根中5'-核苷酸的总含量显著高于其他温度处理组 ($P < 0.05$)，这可能是干燥时脱氧核糖核酸或核苷酸大量酶解和热分解造成的^[23]。

等效鲜味浓度 (equivalent umami concentration, EUC) 常被用来评价食用菌中氨基酸和5'-核苷酸协同作用下产生的鲜味当量^[26]。一般来说, EUC越大, 鲜味质量越好^[21]。根据EUC可将食用菌鲜味程度分为4个等级: > 1000 、 $100 \sim 1000$ 、 $10 \sim 100$ 、 < 10 g/100 g m_d 。由图3B可知, 4个温度处理金针菇菇根样品的EUC均在 $100 \sim 1000$ g/100 g m_d 之间, 属于第二等级。50 °C干燥处理金针菇菇根的EUC最高 (697.43 g/100 g m_d), 鲜味质量最好。其次是60 °C (627.12 g/100 g m_d) 和40 °C (610.10 g/100 g m_d) 处理金针菇菇根, 室温干燥处理金针菇菇根的EUC最低 (529.63 g/100 g m_d)。该结果与Li Biao等^[27]对香菇的研究结果类似, 其发现50 °C干燥处理的金针菇菇根EUC最高, 这可能归因于加热干燥过程中天冬氨酸、谷氨酸和5'-核苷酸含量的增加。

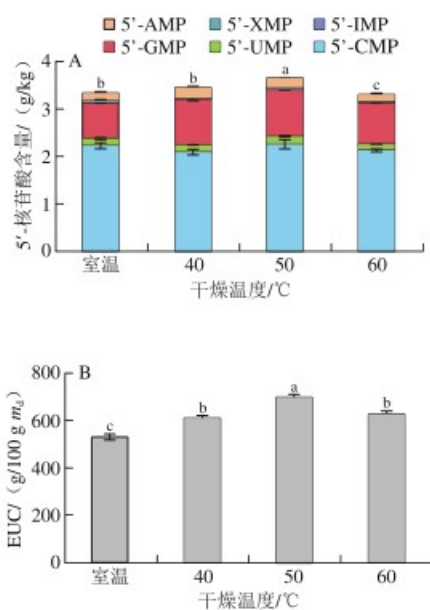


图3 不同干燥温度处理后金针菇菇根的呈味5'-核苷酸含量 (A) 和EUC (B)

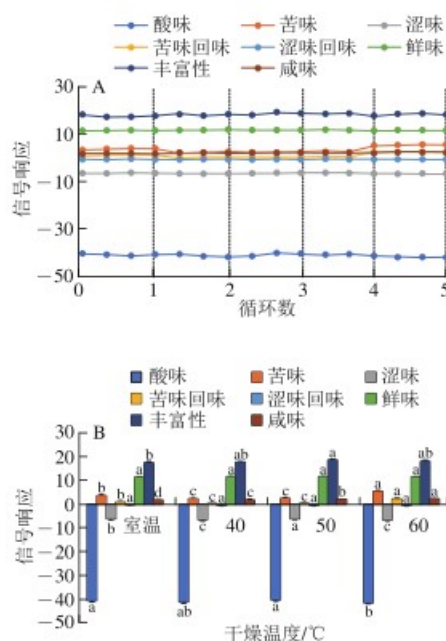
Fig. 3 Flavor 5'-nucleotide contents (A) and equivalent umami concentrations (B) of dried *F. velutipes* roots prepared at different drying temperatures

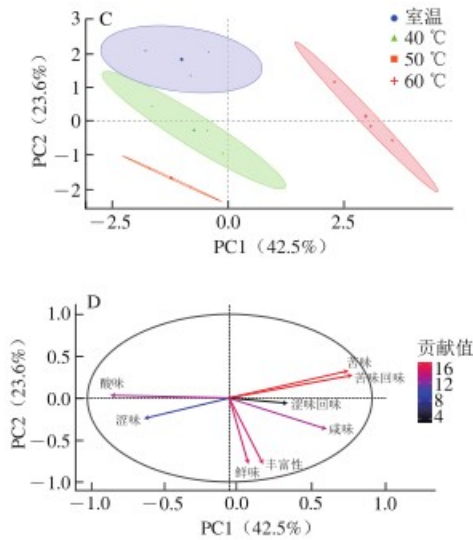
2.2 E-tongue分析结果

E-tongue能够通过电子传感器模拟人类的味觉来感知待测物的味觉特征, 可应用于质量控制和味觉食品化学的描述^[17]。Phat等^[28]采用E-tongue对食用菌提取物的味道进行评价, 结果表明E-tongue测试结果与人体感官评价得分具有显著相关性, 这说明E-tongue能够表征食用菌的味道特性。从图4A可以看出, E-tongue传感器对不同

干燥温度处理的金针菇菇根样品响应稳定, 有较好的重复性, 从而认定数据有效。图4B为被测样品的特征信号响应, 所有干燥金针菇菇根样品在7个传感器上显示出相似的变化趋势, 但是响应强度有所不同, 这说明不同干燥温度处理金针菇菇根样品的味道之间存在明显差异。

以传感器的响应值作为输入变量, 采用PCA对E-tongue数据集进行分析, 以区分不同干燥温度处理的金针菇菇根样品。图4C和图4D分别为第一主成分 (PC1) 和第二主成分 (PC2) 在二维主成分空间的得分图和载荷图。PC1和PC2分别解释总方差的42.5%和23.6%, 共计66.1%, 可信度较高。从图4C中可以看出, 不同干燥温度处理金针菇菇根样品区分度较好, 基本可以分为4个组。室温干燥处理的金针菇菇根样品位于第二象限; 40 °C干燥处理的金针菇菇根样品除一个样本位于第二象限外, 其余样本均位于第三象限; 50 °C干燥处理的金针菇菇根样品位于第三象限; 60 °C干燥处理的金针菇菇根样品位于第一、四象限。图4D为不同干燥温度处理金针菇菇根样品的载荷图, 通过对载荷图的分析, 可以解释哪些传感器对得分图中样品分布和分组贡献较大。酸味、涩味、丰富性和鲜味是影响40 °C干燥处理的金针菇菇根样品分布的主要因素; 丰富性和鲜味对于50 °C干燥处理的金针菇菇根样品的分布贡献较大; 苦味、苦味回味和咸味是影响60 °C干燥处理的金针菇菇根样品分布的主要因素。与本实验结果类似, Fang Donglu等^[29]采用E-tongue与PCA相结合, 可以有效区分不同材料包装的金针菇样品, 并且随着贮藏时间的延长, 各风味成分在PCA图中由右向左移动, 表明E-tongue结合主成分分析亦能够有效区分不同贮藏时间的金针菇。





图B中相同指标不同组别小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。图6B同。

图4 不同干燥温度处理金针菇菇根的E-tongue特征响应(A)、8个传感器的平均值(B)以及E-tongue数据的主成分分析得分图(C)和载荷图(D)

Fig. 4 E-tongue responses (A), mean values of eight sensors (B) and PCA score plot (C) and loading plot (D) of E-tongue data of dried *F. velutipes* roots prepared at different drying temperatures

2.3 挥发性物质分析结果

采用HS-SPME-GC-MS对不同干燥温度处理的金针菇菇根样品的挥发性化合物进行分析,共检测出111种挥发性成分,其中在室温及40、50、60℃干燥处理的金针菇菇根样品中分别鉴定出21、44、69种和49种挥发性成分(表2)。将所得挥发性成分进行分类,主要有醛类、酮类、醇类、酯类、烃类以及其他种类较少的物质如醚类、胺类物质等。从相对含量看,室温和40℃干燥处理的金针菇菇根样品中醛类物质相对含量最高,分别为30.57%和32.17%;50℃干燥处理的金针菇菇根样品中烃类物质相对含量最高,为26.96%;60℃干燥处理的金针菇菇根样品中酮类物质相对含量最高,为36.32%(表3)。

醛类物质是食用菌中比较丰富的一种挥发性化合物,气味阈值低,并且同其他化合物协同作用较强, $C_5 \sim C_9$ 醛类通常来自脂肪氧化和降解,具有脂香气味^[30]。从表2、3可以看出,干燥金针菇菇根中含有较多的醛类物质,其中室温干燥处理后的主要醛类成分为苯甲醛、壬醛和正己醛;40、50℃和60℃干燥处理后的主要醛类成分为苯甲醛和苯乙醛,以及少量的正己醛等。这些醛类能够产生独特的香味,其中苯甲醛具有杏仁香味,苯乙醛具有蜂蜜香味,正己醛具有青草香味^[30]。酮类化合物贡献气味有花香和果香,具有香味优异持久的特点,主要通过脂质氧化加热生成^[31]。室温及40、50℃和60℃

干燥处理后的金针菇菇根中均含有的酮类物质为2-十一酮(相对含量分别为15.47%、8.94%、7.60%和14.94%)和香芹酮(相对含量分别为2.15%、1.53%、0.36%和0.44%)。

醇类物质一般通过脂质氧化而来,其阈值较高,但浓度达到一定程度后可产生出独特的味道,不饱和醇也可达到这种效果,并且随着碳链增加,可产生出清香、木香和脂肪香的特征^[31]。室温干燥处理后的金针菇菇根中仅含有2,3-丁二醇(3.59%);40℃干燥处理后的主要醇类化合物为苯乙醇(10.87%)和DL-薄荷醇(5.63%),其次为2,3-丁二醇(5.24%)和1-壬醇(1.54%);50℃干燥处理后的主要醇类物质为DL-薄荷醇(7.65%)、异戊醇(5.14%)和1-甲基-4-(1-异丙烯基)-1,2-环己二醇(2.46%);60℃干燥处理后的主要醇类物质柠檬烯二醇(4.30%)、1-甲基-4-(1-异丙烯基)-1,2-环己二醇(3.22%)和1-戊醇(3.20%)。醇类物质具有独特的香味,如苯乙醇和1-壬醇具有花香味,异戊醇具焦香麦芽的味道,DL-薄荷醇具薄荷清香,它们相互作用,因此不同干燥温度处理的金针菇菇根呈现不同风味。1-辛烯-3-醇又称蘑菇醇,广泛存在于各种食用菌中^[21]。与其他食用菌不同,干燥的金针菇菇根中未检测到1-辛烯-3-醇,这可能是由于金针菇菇根中含量低且稳定性不高,以及与干燥对其破坏性有关^[31]。

不同干燥温度处理的金针菇菇根中含有的烃类物质主要包括烷烃和烯烃,烃类物质风味阈值较高,对金针菇整体风味贡献较小^[30]。但是一些烯烃类具有独特的风味,如D-柠檬烯有新鲜橙子香气及柠檬香气^[31]。室温干燥处理后的金针菇菇根中仅含有D-柠檬烯(1.09%)和十二烷(4.95%);40℃干燥处理后主要烃类物质为十六烷(1.34%)、十七烷(1.11%)和二十烷(6.14%);50℃干燥处理后主要烃类物质为十三烷(2.76%)、十四烷(4.18%)和二十烷(7.57%);60℃干燥处理后主要烃类物质为十二烷(3.60%)、十六烷(1.75%)和二十烷(1.22%);三者均还有少量的D-柠檬烯。此外,干燥金针菇菇根中还含有长叶烯、苜蓿烯、雪松烯等,其含量较低,但具有独特香味,对整体风味具有一定的影响。

此外,干燥金针菇菇根中还含有一定的酯类,对金针菇菇根的整体风味会产生一定影响^[32]。4种温度干燥处理的金针菇菇根中相对含量最高的酯类分别为丁内酯(1.14%)、乙酸异戊酯(1.35%)、丁内酯(1.97%)和3,7-二甲基-2-辛烯-1-异丁酸酯(1.92%)。

表2 不同干燥温度处理的金针菇菇根挥发性成分GC-MS分析结果
Table 2 GC-MS analysis results of volatile compounds in dried *F. velutipes* roots prepared at different drying temperatures

类别	分子式	化合物	相对含量/%				
			室温	40 °C	50 °C	60 °C	
醛类	C ₄ H ₈ O	3-methyl-butanal 3-甲基丁醛	1.18	0.85			
	C ₅ H ₁₀ O	2-methyl-butanal 2-甲基丁醛	1.47	1.52	1.52		
	C ₆ H ₁₂ O	hexanal 正己醛	4.14	1.26	1.48	1.28	
	C ₇ H ₁₄ O	benzaldehyde 苯甲醛	9.86	5.92	6.56		
	C ₈ H ₁₆ O	benzeneacetaldehyde 苯乙醛	14.01	9.23	4.03	7.60	
	C ₉ H ₁₈ O	nonanal 壬醛	9.77	2.11	1.59	1.74	
	C ₁₀ H ₂₀ O	β -methyl-cinnamaldehyde β -甲基肉桂醛	6.84	0.79			
	C ₁₃ H ₂₆ O	5-methyl-2-phenyl-2-hexenal 5-甲基-2-苯基-2-己烯醛	0.50	0.43	0.93		
	C ₁₂ H ₂₂ O	2-butyl-2-octenal 2-丁基-2-辛烯醛		0.87			
		总计	30.57	32.17	15.11	19.63	
	醇类	C ₉ H ₂₀ O	1-nonanol 1-壬醇	1.54			
		C ₈ H ₁₈ O	phenylethyl alcohol 苯乙醇	10.87			
		C ₆ H ₁₄ O	1-hexanol 1-己醇	0.88			
		C ₄ H ₁₀ O	3-methyl-1-butanol 3-甲基丁醇	1.09			
		C ₄ H ₁₀ O	1-methylcyclopropanemethanol 1-甲基环丙烷甲醇	0.58			
C ₄ H ₁₀ O ₂		2,3-butanediol 2,3-丁二醇	3.59	5.24	1.90		
C ₉ H ₁₈ O		nona-3,5-dien-2-ol 壬-3,5-二烯-2-醇		0.50			
C ₁₀ H ₂₀ O ₂		1-methyl-4-(1-methylethyl)-1,2-cyclohexanediol 1-甲基-4-(1-异丙基)-1,2-环己二醇		2.46	3.22		
C ₁₆ H ₃₄ O		3,5,11,15-tetramethyl-1-hexadecen-3-ol 3,5,11,15-四甲基-1-己二烯-3-醇		0.33			
C ₇ H ₁₆ O ₂		(2,3-dimethyloxiranyl) methanol (2,3-二甲基环氧乙基)甲醇			0.44		
C ₁₀ H ₂₀ O ₂		limonene glycol 柠檬烯二醇			4.30		
C ₁₀ H ₁₈ O		trans-1-methyl-4-(1-methylethyl)-2-cyclohexen-1-ol 反-1-甲基-4-(1-异丙基)-2-环己烯-1-醇		0.34			
C ₁₆ H ₃₄ O		3,5,11,15-tetramethyl-1-hexadecen-3-ol 3,5,11,15-四甲基-1-己二烯-3-醇		0.33			
C ₅ H ₁₂ O		1-pentanol 1-戊醇	2.43	3.20			
C ₁₀ H ₂₀ O ₂		cis-5-ethylnitrotetrahydro- $\alpha,\alpha,5$ -trimethyl-2-furanmethanol 顺- $\alpha,\alpha,5$ -三甲基-5-乙基四氢呋喃-2-甲醇		1.24			
酯类	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	[1S-(1 $\alpha,2\beta,5\alpha$)]-4,6,6-trimethyl-bicyclo [3.1.1] hept-3-en-2-ol [1S-(1 $\alpha,2\beta,5\alpha$)]-4,6,6-三甲基双环[3.1.1]庚-3-烯-2-醇		2.45			
	C ₁₀ H ₁₈ O	[1R-(1 $\alpha,2\beta,3\alpha$)]-1,2-dimethyl-3-(1-methylethyl)-cyclopentanol [1R-(1 $\alpha,2\beta,3\alpha$)]-1,2-二甲基-3-(1-异丙基)-环戊醇		0.54			
	C ₁₀ H ₁₈ O	2-(3-methyl-1,3-butadienyl)-1,3,3-trimethyl-1-cyclohexanol 2-(3-甲基-1,3-丁二烯基)-1,3,3-三甲基-1-环己醇		0.64			
	C ₅ H ₁₂ O	isopentanol 异戊醇	5.14				
	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	[2S-(2 $\alpha,5\beta,8\beta$)]-tetrahydro- $\alpha,\alpha,5$ -trimethyl-5-(4-methyl-3-cyclohexen-1-yl)-2-furanmethanol 红没药醇氧化物B	0.83	0.59			
	C ₁₆ H ₃₄ O	1-hexadecanol 1-十六烷醇	0.44				
	C ₁₀ H ₂₀ O	DL-menthol DL-薄荷醇	5.63	7.65			
		总计	3.59	26.66	23.50	14.64	
	酸类	C ₅ H ₁₀ O ₂	3-methylcyclopentyl acetate 环戊基乙酸酯	0.98	0.25	0.28	
		C ₇ H ₁₄ O ₂	isoamyl acetate 乙酸异戊酯	1.35			
		C ₁₁ H ₂₀ O ₂	undec-10-ynoic acid, nonyl ester 10-十一碳炔酸壬酯	0.65			
		C ₄ H ₆ O ₂	butyrolactone 丁内酯	1.14	0.88	1.97	1.05
		C ₆ H ₁₀ O ₂	hexanedioic acid, dimethyl ester 己二酸二甲酯	0.70			
		C ₉ H ₁₈ O ₂	phthalic acid, hept-4-yl isobutyl ester 邻苯二甲酸4-庚基丁酯	0.79	0.36		
		C ₁₇ H ₃₄ O ₄	acetic acid, 10,11-dihydroxy-3,7,11-trimethyl-dodeca-2,6-dienyl ester 10,11-二羟3,7,11-三甲基十二碳-2,6-二烯基乙酸酯	1.07	1.14		
C ₁₆ H ₃₂ O ₂		hexadecanoic acid, ethyl ester 棕榈酸乙酯	0.16	0.15			
C ₁₁ H ₂₀ O ₂		undec-10-ynoic acid, tridec-2-yn-1-yl ester 10-十一碳炔酸2-十三碳炔-1-酯	0.20				
C ₁₄ H ₂₈ O ₂		2-octen-1-ol, (Z)-3,3-dimethyl-isobutyrate 3,7-二甲基-2-辛烯-1-异丁酸酯	1.56	1.92			

续表2

类别	分子式	化合物	相对含量/%			
			室温	40 °C	50 °C	60 °C
酮类	C ₁₁ H ₂₀ O ₂	tau-cadinol acetate 杜松醇乙酸酯				0.36
		总计	3.19	3.13	5.82	4.82
	C ₈ H ₁₆ O ₂	1-(3-butyloxiranyl)-ethanone 1-(3-丁基环氧乙基)-乙酮				0.70
	C ₁₀ H ₁₈ O	carvone 香芹酮	2.15	1.53	0.36	0.44
	C ₁₁ H ₂₀ O	dodec-5-yne-6-one 十二碳-5-炔-6-酮		0.98		
	C ₁₁ H ₂₀ O	2-undecanone 2-十一酮	15.47	8.94	7.60	14.94
	C ₁₃ H ₂₆ O ₂	2,10,10-trimethyl-6-methylene-1-oxaspiro[4.5]decane-7-one 2,10,10-三甲基-6-亚甲基-1-氧杂螺[4.5]癸-7-酮		0.56		
	C ₁₇ H ₃₂ O	(E)-6,10-dimethyl-5,9-undecadien-2-one (E)-6,10-二甲基-5,9-十一烷二烯-2-酮		1.10	1.58	1.14
	C ₁₀ H ₁₈ O	(E)-3-octen-2-one (E)-3-辛烯-2-酮			1.14	
	C ₈ H ₁₆ O ₂	2-acetyl-cyclopentanone 2-(2-乙酰丙基)环戊酮		0.57	0.73	
	C ₁₆ H ₃₂ O	6,10,14-trimethyl-2-pentadecanone 6,10,14-三甲基-2-十五酮		0.74		
	C ₆ H ₁₀ O ₂	2,5-dimethylfuran-3,4(2H,5H)-dione 2,5-二甲基呋喃-3,4(2H,5H)-二酮			4.80	
	C ₁₀ H ₁₈ O	4,7-dimethyl-benzofuran 4,7-二甲基-香豆酮			1.03	
	C ₁₃ H ₂₆ O ₂	4-(3-hydroxybutyl)-3,5,5-trimethyl-2-cyclohexen-1-one 4-(3-羟丁基)-3,5,5-三甲基-2-环己烯-1-酮	11.44		7.90	
	C ₁₁ H ₂₀ O	5-ethyl-4-tridecanone 5-乙基-4-十三酮			4.44	
C ₁₃ H ₂₆ O ₂	7,9-di-tert-butyl-1-oxaspiro[4.5]deca-6,9-diene-2,8-dione 7,9-二叔丁基-1-氧杂螺[4.5]癸-6,9-二烯-2,8-二酮			0.17		
C ₁₁ H ₂₀ O	2-methylene-cyclododecanone 2-亚甲基-环十二酮			0.15		
C ₁₁ H ₂₀ O	6,10-dimethyl-2-undecanone 6,10-二甲基-2-十一酮			0.64		
C ₁₄ H ₂₈ O	(4 $\alpha,7\beta,8\alpha\beta$)-octahydro-4 α -methyl-7-(1-methylethyl)-2(1H)-naphthalenone (4 $\alpha,7\beta,8\alpha\beta$)-八氢-4 α -甲基-7-(1-甲基乙基)-2(1H)-萘酮			0.37	0.26	
	总计	29.06	13.11	13.38	36.32	
烃类	C ₁₃ H ₂₈	tridecane 十三烷		0.75	2.76	
	C ₁₆ H ₃₄	hexadecane 十六烷		1.34	0.20	1.75
	C ₁₄ H ₃₀	tetradecane 十四烷			4.18	
	C ₁₇ H ₃₆	heptadecane 十七烷		1.11	0.65	
	C ₁₄ H ₃₀	2,6,10,14-tetramethyl-heptadecane 2,6,10,14-四甲基-十七烷		0.74	0.89	
	C ₂₀ H ₄₂	eicosane 二十烷		6.14	7.57	1.22
	C ₁₆ H ₃₄	2,6,10,14-tetramethyl-hexadecane 2,6,10,14-四甲基-十六烷		0.58	0.30	
	C ₁₅ H ₃₂	pentadecane 十五烷		0.37		
	C ₁₄ H ₂₈	1-methyl-4-methylene-cyclohexane 1-甲基-4-亚甲基-环己烷			1.68	
	C ₁₈ H ₃₈	2-methyl-octadecane 2-甲基十八烷		0.40	0.38	
	C ₁₂ H ₂₆	dodecane 十二烷	4.95	0.89	3.60	
	C ₁₆ H ₃₄	3-methyl-pentadecane 3-甲基-十五烷		0.29		
	C ₁₆ H ₃₄	7-methyl-pentadecane 7-甲基-十五烷		1.29		
	C ₁₆ H ₃₄	2-cyclohexyl-eicosane 2-环己基-二十烷		0.28		
	C ₁₈ H ₃₈	2,3-dimethyl-heptadecane 2,3-二甲基-庚烷		0.28		
C ₁₆ H ₃₄	7-methyl-pentadecane 7-甲基-十五烷		0.55			
C ₁₀ H ₁₈	n-nonylcyclohexane 正壬基环己烷			0.31		
C ₁₆ H ₃₄	2,6-dimethyl-heptadecane 2,6-二甲基-十七烷			0.28		
C ₁₉ H ₄₀	9-methyl-nonadecane 9-甲基十九烷			0.08		
C ₁₆ H ₃₄	2,6,10,15-tetramethyl-heptadecane 2,6,10,15-四甲基-十七烷			0.13		
C ₁₇ H ₃₆	(1-butylheptyl)-benzene (1-丁基庚基)-苯			0.17		
C ₁₇ H ₃₆	(1-propyloctyl)-benzene (1-丙基辛基)-苯			0.27		
C ₁₆ H ₃₄	(E)-1,2,3-trimethyl-4-propenyl-naphthalene (E)-1,2,3-三甲基-4-丙烯基-萘			0.34		
C ₁₇ H ₃₆	cis-1-benzylidenehexahydro-7 α -methyl-indan 顺-1-苯亚甲基六氢-7 α -甲基-茚满			0.34		
C ₁₆ H ₃₄	D-limonene D-柠檬烯	1.09	0.85	0.63	0.60	
C ₁₈ H ₃₈	2,2',5,5'-tetramethyl-1,1'-biphenyl 2,2',5,5'-四甲基-1,1'-联苯			0.50		
C ₁₅ H ₃₀	[1S-(1 $\alpha,3\alpha\beta,4\alpha,7\alpha,7\alpha\beta$)]-octahydro-4-methyl-8-methylene-7-(1-methylethyl)-1,4-methano-1H-indene (+)-苜蓿烯			0.40		
C ₁₇ H ₃₄	longifolene-(v4) 长叶烯			0.37		

续表2

类别	分子式	化合物	相对含量/%			
			室温	40 °C	50 °C	60 °C
	C ₁₉ H ₃₄	(3 <i>r</i> ,3 <i>ar</i> ,7 <i>r</i> ,8 <i>as</i>)-3,8,8-trimethyl-6-methyleneoctahydro-1 <i>h</i> -3 <i>a</i> ,7-methanoazulene 雪松烯	1.55			
	C ₁₅ H ₂₄	γ -elemene γ -榄香烯	0.66			
	C ₁₃ H ₂₄	β -copaene β -可巴烯	0.46			
	C ₁₀ H ₁₄	bicyclopentyl-1,1'-diene 二环戊烷-1,1'-二烯	0.56			
	C ₁₉ H ₃₄	(1 <i>S</i> - <i>cis</i>)-1,2,3,5,6,8 <i>a</i> -hexahydro-4,7-dimethyl-1-(1-methylethyl)- naphthalene δ -杜松烯	0.53			
	C ₁₄ H ₂₂	2,3,4,5-tetramethyl-1-(4-pentenyl)-1,3-cyclopentadiene 2,3,4,5-四甲基-1-(4-戊烯基)-1,3-环戊二烯	0.95	0.42	1.07	
		总计	6.04	14.32	26.96	10.38
	C ₁₀ H ₁₆ O ₂	1,4-dihydroxy- <i>p</i> -menth-2-ene 1,4-二羟基-对-薄荷油-2-烯	10.46	5.22		
	C ₁₅ H ₂₄ O	isocaromadrene epoxide 异香橙烯环氧化物	1.40	0.92		
	C ₁₀ H ₁₂ BrO ₂	4-bromobutanoic acid, 1-adamantylmethyl ester 4-溴丁酸1-金刚烷基甲酯	1.01			
	C ₉ H ₁₅ NP	<i>n</i> -dimethylaminomethyl- <i>tert</i> -butyl-isopropylphosphine <i>n</i> -二甲氨基甲基-叔丁基-异丙基磷	0.81			
	C ₇ H ₈ O	2-pentyl-furan 2-戊基-呋喃	3.69	2.38	2.90	2.39
	C ₁₁ H ₁₆ O	4,5,6,7-tetrahydro-3,6-dimethyl- benzofuran 薄荷醇呋喃	3.15	1.62	1.49	1.41
	C ₁₄ H ₂₀ O	2,4,5,5,8 <i>a</i> -pentamethyl-4 <i>a</i> ,5,6,7,8,8 <i>a</i> -hexahydro-2 <i>H</i> -chromene 2,4,5,5,8 <i>a</i> -五甲基-4 <i>a</i> ,5,6,7,8,8 <i>a</i> -六氢-2 <i>H</i> -苯并吡喃	0.63	0.64		
	C ₁₉ H ₃₀ O ₂	2(3 <i>H</i>)-benzofuranone, 3 <i>a</i> ,4,5,7 <i>a</i> -tetrahydro-3 <i>a</i> ,6-dimethyl-, <i>cis</i> -(±)-	1.69	2.59		
其他	C ₁₉ H ₃₀ O ₂	<i>cis</i> -(±)-3 <i>a</i> ,4,5,7 <i>a</i> -四氢-3 <i>a</i> ,6-二甲基-2(3 <i>H</i>)-苯并呋喃酮	2.42			
	C ₇ H ₆ O	ethene, methoxy 乙炔基甲醚	1.22			
	C ₁₉ H ₃₀ O ₂	6-ethenyldihydro-2,2,6-trimethyl-2 <i>H</i> -pyran-3(4 <i>H</i>)-one 6-乙炔基二氢-2,2,6-三甲基-2 <i>H</i> -吡喃-3(4 <i>H</i>)-酮	3.80	1.64		
	C ₁₄ H ₂₈ N	<i>n,n</i> -dimethyl-1-tetradecanamine <i>n,n</i> -二甲基十四胺	3.01			
	C ₁₈ H ₃₅ ClO ₂	2-chloropropionic acid, pentadecyl ester 2-氯丙酸十五烷基酯	0.67			
	C ₁₉ H ₃₂ O ₃	2-hydroxy-1,1,10-trimethyl-6,9-epidioxydecalin 2-羟基-1,1,10-三甲基-6,9-对二氧萘烷	0.31			
	C ₁₁ H ₁₁ NO ₂	isoamyl nitrite 亚硝酸异戊酯	0.55			
	C ₁₂ H ₂₇ O ₃ P	tributyl phosphate 磷酸三丁酯	2.23	1.06	1.76	1.02
	C ₁₉ H ₃₀ O ₃	epoxy-linalooloxide 环氧芳醇醇氧化物	3.56			
		总计	27.56	10.61	15.23	14.25

表3 不同干燥温度处理的金针菇根挥发性成分分类比较

Table 3 Comparison of types and relative contents of volatile compounds from dried *F. velutipes* roots prepared at different drying temperatures

类别	室温		40 °C		50 °C		60 °C	
	相对含量/%	数量	相对含量/%	数量	相对含量/%	数量	相对含量/%	数量
醛类	30.57	5	32.17	8	15.11	7	19.63	6
醇类	3.59	1	26.66	8	23.54	12	14.64	7
酯类	3.19	3	3.13	4	5.82	7	4.82	6
酮类	29.06	3	13.11	5	13.38	10	36.32	10
烃类	6.04	2	14.32	12	26.96	24	10.38	12
其他	27.56	7	10.61	7	15.23	9	14.25	8

对挥发性物质的数据矩阵进行PCA，观察不同干燥温度处理金针菇根样品可能的分布。图5所示的PCA图解释了总累计方差贡献的88.0%，PC1和PC2分别占总方差贡献的58.9%和29.1%，不同温度处理的金针菇根样品区分成4个独立的组。如图5A所示，室温干燥处理的样品均位于第一象限，40 °C和60 °C干燥处理的样品均位于

第三象限，50 °C干燥处理的样品位于第四象限。图5B显示了干燥样品与挥发性化合物的关系，可以看出醇类在PC1正方向上得分较高，主要用于区分室温干燥处理样品与其他温度处理样品。酮类和其他物质与PC1和PC2呈高度负相关，其对区分40 °C和60 °C干燥处理的样品贡献较大。50 °C干燥处理样品中烃类和酯类的相对含量最高，PC1和PC2的得分分别为正值和负值。

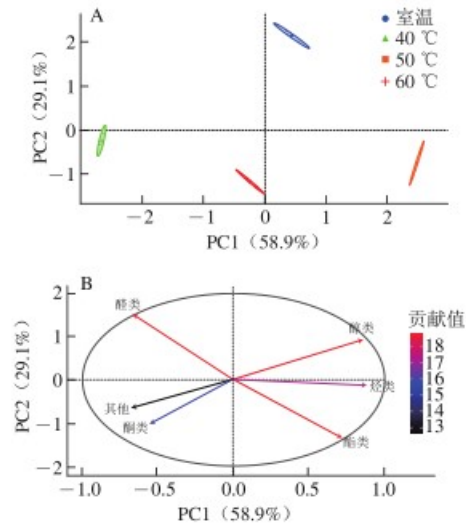


图5 使用挥发物矩阵作为输入变量的干燥金针菇根样品主成分分析得分图 (A) 和载荷图 (B)

Fig. 5 PCA score plot (A) and loading plot (B) of dried *F. velutipes* root samples using volatile matrix as input variables

2.4 E-nose分析结果

E-nose是一种很好的香气分析方法，因为它可以获得样品中挥发性化合物的完整信息，而不仅仅是定性和定量的结果^[17]。典型的E-nose响应如图6A所示，每条曲线表示对应传感器信号响应随时间的变化趋势，直至达到稳定的平衡。其中W1W、W2W和W5S的响应值随时间延长先升高后降低并达到稳定的平衡，其他传感器的响应值变化不大。图6B显示了10个传感器对不同干燥温度处理金针菇根样品中挥发性化合物的响应，可以看出，不同样品响应值的变化趋势相似，但也存在显著差异。W1W、W2W和W5S传感器的响应明显高于其他传感器，W1W和W2W对60 °C干燥样品以及W5S对50 °C干燥样品的响应显著高于其他干燥样品。Wang Liuqing等^[26]研究发现，不同处理双孢蘑菇切片的响应图谱相似，但响应值因贮藏条件和贮藏时间的不同而具有显著差异，这可能是由于在不同的贮藏条件和贮藏时间下双孢蘑菇中形成了新的挥发性化合物和其他类似的挥发性化合物。然而，仅从检测到的传感器响应值很难来区分不同的干燥样品，因而需要对10个传感器的信号信息进行进一步的处理，并探究其内部的关系和差异。

PCA可以从主要影响样本空间分布的变量中提取信息,从而解释样本之间的差异^[17]。因此,采用PCA对E-nose响应值数据集进行分析,进而评价不同温度干燥处理对金针菇菇根分组的影响。图6C、D为干燥样品的得分和载荷二维图,PC1和PC2分别占总方差贡献的68.2%和17.3%,累计贡献率为85.5%,说明它们足以解释数据集的总方差^[17]。从图6C可以看出,不同干燥温度处理的金针菇菇根样品区分度较好,分组明显。其中,室温和40℃干燥处理组位于Y轴的左侧,50℃和60℃干燥处理组位于Y轴右侧,室温和40℃干燥处理组稍有重叠。由图6D可知,W1C、W3C、W3S和W2S对样品分组贡献较大。其中,W2W、W5S和W1W对50℃和60℃干燥样品的分组和分布具有较大影响,其余传感器对室温和40℃干燥样品的区分相关性更强。综上所述,E-nose、E-tongue和HS-SPME-GC-MS 3种分析工具可用于4种温度干燥金针菇菇根样品的品质评价,且各分析结果一致。

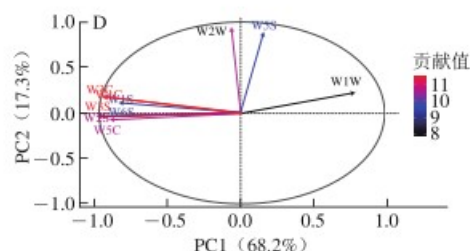
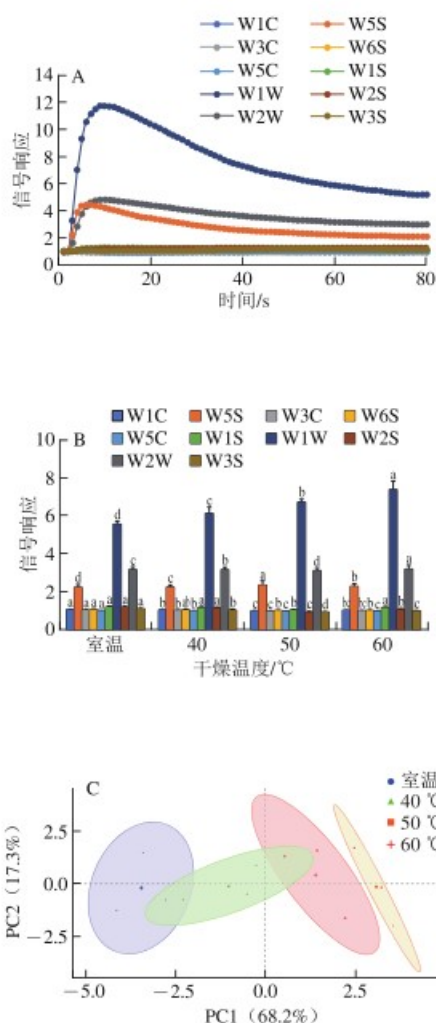


图6 不同干燥温度处理的金针菇菇根的E-nose特征响应(A)和10个传感器的平均值(B)以及E-nose数据的主成分分析得分图(C)和载荷图(D)

Fig. 6 E-nose responses (A), mean values of ten sensors (B) and PCA score plot (C) and loading plot (C) of E-nose data of dried *F. velutipes* roots prepared at different drying temperatures

2.5 E-nose、E-tongue和HS-SPME-GC-MS融合数据集的聚类分析结果

为了确认PCA的结果,将HCA应用于由E-nose、E-tongue和HS-SPME-GC-MS数据组成的融合数据集,使用Ward连接方法和欧氏距离计算不同干燥温度处理的样品之间的连接距离。得到的树状图如图7所示,其显示出不同干燥温度处理的金针菇菇根样品之间的关系和分布模式,12个测试样本分为两大类。A组有3个样品(室温干燥处理),B组有9个样品(40、50℃和60℃干燥处理),相同干燥温度的样品聚类紧密,但在树状图上可以完全区分。在欧氏距离为6.5时,层次聚类分析结果与PCA分析结果一致,所有的干燥金针菇菇根样品都根据干燥温度得到了充分区分。

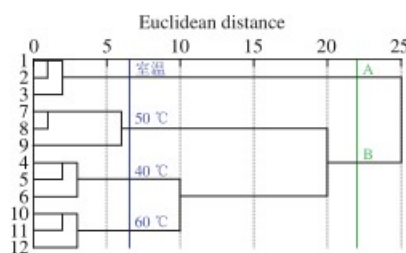


图7 干燥金针菇菇根样品的E-nose、E-tongue和HS-SPME-GC-MS数据集的HCA树状图

Fig. 7 Dendrogram obtained from hierarchical cluster analysis of dried *F. velutipes* root samples with a dataset comprising E-nose, E-tongue, and HS-SPME-GC-MS data

3 结论

本研究对不同干燥温度(室温、40、50、60℃)处理的金针菇菇根的挥发性特征和口感特性进行了检测分析。将E-nose、E-tongue、HS-SPME-GC-MS、化学计量学方法(PCA、HCA、One-way ANOVA)应用于单个或融合数据集,对干燥金针菇菇根的品质进行评价。干燥温度对游离氨基酸、可溶性蛋白质、粗多糖和5'-核苷酸含量有显著的

影响,不同干燥方法处理样品之间存在显著差异,其中50℃干燥处理的金针菇菇根整体品质最好。此外,PCA结合E-nose、E-tongue和HS-SPME-GC-MS可以有效区分不同干燥温度处理的金针菇菇根样品。将HCA与融合数据集相结合,得到了与PCA一致的结果。总之,本研究可为这种评价方法在干燥金针菇菇根样品以及其他热敏农产品鉴别中的应用提供参考。

参考文献:

- [1] SHI C, WU Y, FANG D, et al. Effect of nanocomposite packaging on postharvest senescence of *Flammulina velutipes*[J]. Food Chemistry, 2018, 246: 414-421. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.10.103.
- [2] 中国食用菌协会. 2020年度全国食用菌统计调查结果分析[DB/OL]. (2022-01-14)[2022-03-16]. <http://www.cefa.org.cn/web/index.html>.
- [3] LIU Xuzhou, ZHAO Jianbiao, ZHANG Gang, et al. Dietary supplementation with *Flammulina velutipes* stem waste on growth performance, fecal short chain fatty acids and serum profile in weaned piglets[J]. Animals, 2020, 10: 82. DOI:10.3390/ani10010082.
- [4] SHAH S R, UKAEGBU C I, HAMID H A, et al. Evaluation of antioxidant and antibacterial activities of the stems of *Flammulina velutipes* and *Hypsizygus tessellatus* (white and brown var.) extracted with different solvents[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2018, 12(3): 1947-1961. DOI:10.1007/s11694-018-9810-8.
- [5] BANERJEE D K, DAS A K, BANERJEE R, et al. Application of enoki mushroom (*Flammulina velutipes*) stem wastes as functional ingredients in goat meat nuggets[J]. Foods, 2020, 9: 1-15. DOI:10.3390/foods9040432.
- [6] 周萍, 李新胜, 马超, 等. 金针菇加工副产物干燥制粉技术研究[J]. 食品工业, 2016, 37(6): 77-79.
- [7] 黄晓红, 焦露, 敬代渺, 等. 金针菇菇根微粉在中西式面点中的应用[J]. 四川旅游学院学报, 2018(4): 25-29.
- [8] 马升, 沈城, 徐建雄. 发酵金针菇菇根多糖提取、结构及抗氧化活性[J]. 食品科技, 2021, 46(3): 147-154. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2021.03.026.
- [9] XUE Z, HAO J, YU W, et al. Effects of processing and storage preservation technologies on nutritional quality and biological activities of edible fungi: a review[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 40: 1-13. DOI:10.1111/jfpe.12437.
- [10] QIU Y, BI J, JIN X, et al. An understanding of the changes in water holding capacity of rehydrated shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) from cell wall, cell membrane and protein[J]. Food Chemistry, 2021, 351: 129230. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.129230.
- [11] LUO D, WU J, MA Z, et al. Production of high sensory quality Shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) by pulsed air-impingement jet drying (AID) technique[J]. Food Chemistry, 2021, 341: 128290. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128290.
- [12] 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: 109428. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109428.
- [13] 李佳欢, 杨斌, 任佳媛, 等. 热风干燥温度对荷叶离褶伞干燥特性及挥发性风味物质的影响[J]. 菌物学报, 2021, 40(12): 3304-3319. DOI:10.13346/j.mycosystema.210349.
- [14] 许斌, 高洁, 于翠琴, 等. 不同热风干燥温度对西藏黄蘑菇品质的影响[J]. 中国食用菌, 2022, 41(3): 71-77.
- [15] XU L, FANG X, WU W, et al. Effects of high-temperature pre-drying on the quality of air-dried shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*)[J]. Food Chemistry, 2019, 285: 406-413. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.01.179.
- [16] 黄健航, 郑峻, 杨斌, 等. 不同干燥温度对鹿茸菇品质及其抗氧化活性的比较分析[J]. 中国食品添加剂, 2022(2): 194-200.
- [17] DONG Wenjiang, HU Rongsuo, LONG Yuzhou, et al. Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS[J]. Food Chemistry, 2019, 272: 723-731. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.08.068.
- [18] DONG Wenjiang, ZHAO Jianping, HU Rong, et al. Differentiation of Chinese Robusta coffees according to species, using a combined electronic nose and tongue, with the aid of chemometrics[J]. Food Chemistry, 2017, 229: 743-751. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.02.149.
- [19] 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: 111402. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111402.
- [20] PEI Fei, YANG Wenjian, MA Ning, et al. Effect of the two drying approaches on the volatile profiles of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by headspace GC-MS and electronic nose[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 72: 343-350. DOI:10.1016/j.lwt.2016.05.004.
- [21] LIU Qin, CUI Xiao, SONG Zhibo, et al. Coating shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) with a polysaccharide from *Oudemansiella radicata* improves product quality and flavor during postharvest storage[J]. Food Chemistry, 2021, 352: 129357. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.129357.
- [22] BELUHAN S, RANOGAJEC A. Chemical composition and non-volatile components of Croatian wild edible mushrooms[J]. Food Chemistry, 2011, 124: 1076-1082. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.07.081.
- [23] ZHANG Y, VENKITASAMY C, PAN Z, et al. Recent developments on umami ingredients of edible mushrooms[J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, 33: 78-92. DOI:10.1016/j.tifs.2013.08.002.
- [24] ZHANG Z, ZHANG X, XIN G, et al. Umami taste and its association with energy status in harvested *Pleurotus geesteranus* stored at different temperatures[J]. Food Chemistry, 2019, 279: 179-186. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.12.010.
- [25] LIU Q, HU S, SONG Z, et al. Relationship between flavor and energy status in shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) harvested at different developmental stages[J]. Journal of Food Science, 2021, 86: 4288-4302. DOI:10.1111/1750-3841.15904.
- [26] WANG Liuqing, HU Qihui, PEI Fei, et al. Influence of different storage conditions on physical and sensory properties of freeze-dried *Agaricus bisporus* slices[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 97: 164-171. DOI:10.1016/j.lwt.2018.06.052.
- [27] LI Biao, KIMATU B M, PEI Fei, et al. Non-volatile flavour components in *Lentinus edodes* after hot water blanching and microwave blanching[J]. International Journal of Food Properties, 2018, 20(Suppl 3): S2532-S2542. DOI:10.1080/10942912.2017.1373667.
- [28] PHAT C, MOON B, LEE C. Evaluation of umami taste in mushroom extracts by chemical analysis, sensory evaluation, and an electronic tongue system[J]. Food Chemistry, 2016, 192: 1068-1077. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.07.113.
- [29] FANG Donglu, YANG Wenjian, KIMATU B M, et al. Comparison of flavour qualities of mushrooms (*Flammulina velutipes*) packed with different packaging materials[J]. Food Chemistry, 2017, 232: 1-9. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.03.161.
- [30] LI W, WANG J, CHEN W, et al. Analysis of volatile compounds of *Lentinula edodes* grown in different culture substrate formulations[J]. Food Research International, 2019, 125: 108517. DOI:10.1016/j.foodres.2019.108517.
- [31] 唐秋实, 陈智毅, 刘学铭, 等. 几种干燥方式对金针菇子实体挥发性风味成分的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(10): 119-124.
- [32] SUN L, ZHANG Z, XIN G, et al. Advances in umami taste and aroma of edible mushrooms[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 96: 176-187. DOI:10.1016/j.tifs.2019.12.018.