

基于 GC-IMS 技术分析不同干燥方式花菇的挥发性风味成分差异

Differences in volatile components between different drying methods of *Lentinus edoeds* analyzed by GC-IMS

陈俊宇^{1,2,3,4}

凌建刚^{2,3,4}

杜丽慧¹

康孟利^{2,3,4}

CHEN Junyu^{1,2,3,4}

LING Jiangang^{2,3,4}

DU Lihui¹

KANG Mengli^{2,3,4}

(1. 宁波大学食品科学与工程学院, 浙江 宁波 315832; 2. 宁波市农业科学研究院,

浙江 宁波 315040; 3. 国家蔬菜加工技术研发专业中心, 浙江 宁波 315040;

4. 宁波市农产品保鲜工程重点实验室, 浙江 宁波 315040)

(1. School of Food Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315832, China;

2. Ningbo Academy of Agricultural Sciences, Ningbo, Zhejiang 315040, China; 3. National Vegetable

Processing Technology Research and Development Center, Ningbo, Zhejiang 315040, China; 4. Ningbo

Key Laboratory of Preservation Engineering of Agricultural Products, Ningbo, Zhejiang 315040, China)

摘要:[目的]研究分析 3 种不同干燥方式花菇的特征挥发性物质差异。[方法]以 3 种不同干燥方式(热风干燥、射频—热风干燥、真空冷冻干燥)花菇为研究对象,利用气相色谱—离子迁移谱(GC-IMS)测定其挥发性物质,并根据指纹图谱结合 PCA 分析花菇中挥发性物质的差异。[结果]干燥花菇的挥发性成分主要以醛、醇、酮以及酸类物质为主,3 种不同干燥方式花菇的特征挥发性风味物质存在明显差异,醛、醇物质含量:热风干燥>射频—热风干燥>真空冷冻干燥。指纹图谱分析显示,相比较于真空冷冻干燥,热风干燥、射频—热风干燥可显著提高花菇的果香味。PCA 分析结果显示,PC1、PC2 贡献率分别为 61%,29%,累计贡献率达到 90.0%,热风干燥、射频—热风干燥花菇的风味组成相似度较高。[结论]GC-IMS 可以实现不同方式干燥花菇挥发性风味成分差异的快速分析鉴别。

关键词:花菇;气相色谱—离子迁移谱;热风干燥;射频—热风干燥;真空冷冻干燥;挥发性风味成分

Abstract: [Objective] To analyze the differences in volatile components between three kinds of dried *L. edoeds*. [Methods]

Three different drying methods (hot air drying, radio frequency-hot air drying, vacuum freeze drying) were used to determine the volatile substances in *L. edoeds* by gas chromatography-ion migration spectrometry (GC-IMS), and the differences of volatile substances in *L. edoeds* were analyzed according to fingerprint and PCA. [Results] The main volatile components of dried *L. edoeds* were aldehydes, alcohols, ketones and acids. There were significant differences in the characteristic volatile organic substances of dried *L. edoeds* in three different drying methods, the contents of aldehyde and alcohol were hot air drying > radio frequency-hot air drying > VD. Fingerprint analysis showed that compared with vacuum freeze drying, hot air drying and radio frequency-hot air drying could significantly improve the fruity flavor of *L. edoeds*. PCA analysis showed that the contribution rate of PC1 and PC2 was 61% and 29%, respectively, and the cumulative contribution rate reached 90.0%. Hot air drying and radio frequency-hot air drying had high similarity in the flavor composition of *L. edoeds*. [Conclusion] GC-IMS can realize differential and rapid analysis and identification of volatile flavor components of *L. edoeds* produced by three drying methods, and provide theoretical reference for high-quality drying of *L. edoeds* and its product identification.

Keywords: *L. edoeds*; GC-IMS; hot air drying; radio frequency-hot air drying; vacuum freeze drying; volatile components

基金项目:宁波市公益性科技计划项目(编号:2021S075);浙江省
领雁科技计划项目(编号:2023C02032)

作者简介:陈俊宇,男,宁波大学在读硕士研究生。

通信作者:康孟利(1979—),男,宁波市农业科学研究院研究员,
硕士。E-mail: kangmlzju@163.com

收稿日期:2024-03-26 **改回日期:**2024-05-11

花菇(*L. edoeds*)是香菇经特定生长环境发育而成,富含
维生素、多糖及氨基酸,其氨基酸含量比普通香菇高

3~4 倍^[1]。鲜菇含水量高、组织鲜嫩,易受微生物侵染,极易开伞、褐变甚至腐烂变质^[2]。干燥加工是花菇保鲜的重要手段^[3-4],还可以提高花菇的风味^[5],其主要通过抑制微生物的生长和酶的活性来延长菇类食品的保质期^[6]。日晒是一种传统而耗时的方法,因受气候、环境等影响效率低^[7]。目前,热风干燥(HD)和真空冷冻干燥(VD)已被广泛应用于菇类食品^[8]。热风干燥具有操作简便、加工均匀、卫生和干燥快速等优点^[9-10],是目前菇类干燥最常用的方法。但其干燥时间长,花菇褐变严重、品质差、复水性差^[11]。真空冷冻干燥是在真空条件下低温干燥^[12],水分不经过液体状态直接升华,且真空条件下避免了产品与空气的接触,能保持物料的形态、色泽和品质^[13],但干燥时间长、设备昂贵、能耗高,尚未得到广泛应用^[14]。射频—热风干燥是一种新型的干燥技术,主要是通过离子迁移和偶极子旋转来产生基于分子间摩擦的热量实现产品干燥,具有更强的穿透力和更稳定的温度控制等优点^[15]。射频—热风干燥可提高干燥的均匀性,已被应用于各种食品的干燥,如坚果、果蔬及稻米等^[16-17]。

挥发性物质是花菇风味的重要组成部分,也是评价花菇品质的重要指标之一。气相色谱—离子迁移谱技术(gas chromatography-ionmobility spectrum, GC-IMS)是一种新型的气相分离和检测技术,具有高分辨率、高灵敏度、操作简便、分析高效等优点^[18],特别适用于挥发性有机化合物的痕量检测^[19]。目前,国内外将 GC-IMS 应用于农产品加工检测分析的研究日益增多,如应用于食用菌品种鉴定^[20]、保鲜贮藏品的分级与评价^[21]、产地溯源以及质量跟踪^[22]等。研究拟以南方花菇为原料,利用气相色谱—离子迁移谱技术对射频—热风干燥、热风干燥、真空冷冻干燥 3 种方式干燥花菇的挥发性风味成分进行分析鉴定,旨在为花菇干燥加工提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

花菇:购于宁波奉化食用菌基地,运回实验室置于 $(4\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 冷库保存备用,挑选未开伞、无霉变、无病虫害的花菇样品用于干燥;

色谱柱:WAX 型 $(30\text{ m}\times 0.53\text{ mm}, 1\text{ }\mu\text{m})$,美国 Restek 公司。

1.1.2 主要仪器设备

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9070A 型,上海一恒科技有限公司;

真空冷冻干燥机:SCIENTZ-30ND 型,宁波新芝生物科技有限公司;

分析天平:FA2004 型,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;

食品射频加工设备:HGJL-5RFS 型,合肥哈工金浪装备科技有限公司;

食品风味分析仪:FlavourSpec[®]型,德国 GAS 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 热风干燥 根据文献[23]并修改,花菇去柄后平铺放在干燥箱载料盘上,热风温度 50°C ,干燥至花菇含水量为 8% 以下,干燥完成后粉碎过 60 目筛,密封后常温保存。

1.2.2 射频—热风干燥 花菇去柄后平铺放在载料隔板上,极板间距 9.5 cm 、热风温度 50°C ,干燥至花菇含水量为 8% 以下,干燥完成后粉碎过 60 目筛,密封后常温保存。

1.2.3 真空冷冻干燥 根据文献[24]并修改,花菇去柄后于 -80°C 预冻 12 h ,在冷阱温度 -40°C 、真空度 50 Pa 条件下干燥至花菇含水量 8% 以下,干燥完成后粉碎过 60 目筛,密封后常温保存。

1.2.4 GC-IMS 风味分析 根据文献[25]并修改,选用食品风味分析仪对不同方式干燥花菇的风味进行分析,取 1 g 样品,置于 20 mL 顶空瓶中, 60°C 孵育 20 min 后进样。将顶空进样瓶中的样品进行孵化,使用加热进样针抽取瓶内的顶空组分,进行 GC-IMS 分析测定,具体分析条件:分析时间 40 min ,色谱柱柱温 60°C ,载气/漂移气为 N_2 ,IMS 温度 45°C ,进样体积 $500\text{ }\mu\text{L}$,孵育时间 20 min ,孵育温度 60°C ,进样针温度 85°C ,孵化转速 500 r/min 。

1.3 数据处理

采用 GC-IMS 仪器配套的分析软件对数据进行分析。通过 Laboratory Analytical Viewer(LAV)处理 IMS 数据,计算挥发性化合物的保留指数 RI。利用 Reporter、Gallery Plot 等内置插件分析二维谱图、指纹图谱。利用 IMS 和 NIST 数据库对挥发性成分进行定性分析。根据面积归一化法得到各成分在花菇挥发性组分中的相对含量。

2 结果与分析

2.1 不同方式干燥花菇气相色谱—离子迁移谱图对比

如图 1 所示,不同方式干燥花菇挥发性物质的 GC-IMS 三维谱图相似度较高,难以通过肉眼直观地分析挥发成分的差异,需对其进行降维处理。

图 2 为不同干燥方式花菇的 GC-IMS 三维谱图降维后投影获得的二维俯视谱图。从图 2 可以看出,花菇的挥发性物质信号峰均出现在保留时间为 $200\sim 2\,000\text{ s}$ 和迁移时间为 $1.0\sim 1.6\text{ ms}$ 的范围内。与真空冷冻干燥(VD)相比,射频—热风干燥(HDRF)、热风干燥(HD)干燥的花菇的信号峰丰富且颜色较深,挥发性物质含量更丰富,3 种干燥花菇挥发性物质含量差异显著。

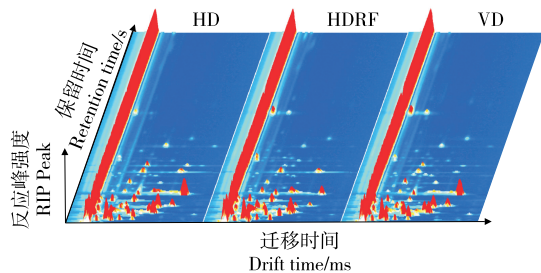


图 1 不同方式干燥花菇挥发性物质的 GC-IMS 三维谱图
Figure 1 Three dimensional GC-IMS spectra of volatile substances in dried *Lentinula edodes* using different drying methods

为了进一步区分 3 种干燥方式花菇样品间可能存在的差异,采用差异对比分析模式,选取 HD 干燥为对照,其他样品扣除参比作为参比,得到二者的差异谱图如图 3 所示。从图 3 可以看出,射频-热风干燥花菇的挥发性物质高于热风干燥花菇,如实线区域所示,背景蓝色较深;真空冷冻干燥花菇的挥发性物质低于热风干燥花菇,如虚线区域所示,背景蓝色较浅呈浅褐色。

2.2 不同方式干燥花菇挥发性风味成分定性分析

利用离子迁移时间和保留指数对热风干燥(HD)、热风-射频干燥(HDRF)及真空冷冻干燥(VD)3 种干燥花菇的挥发性化合物进行定性分析,定性谱图如图 4 所示。

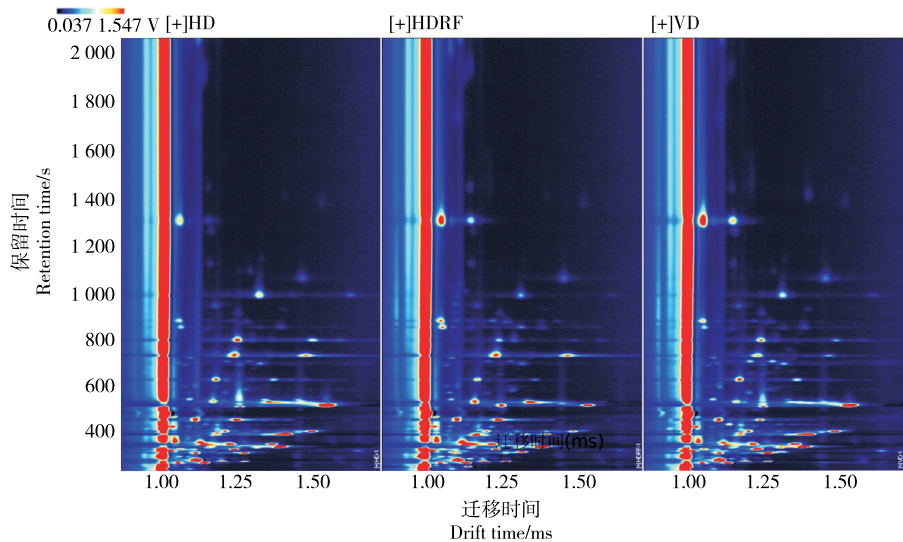


图 2 不同方式干燥花菇挥发性风味成分的 GC-IMS 二维谱图俯视图
Figure 2 Top view of GC-IMS two-dimensional spectra of volatile flavor components in dried *Lentinula edodes* using different drying methods

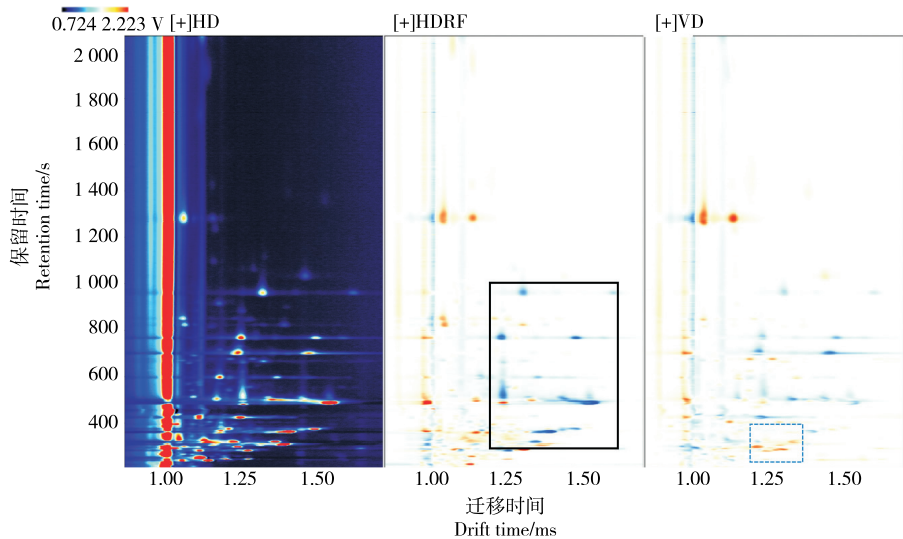


图 3 不同方式干燥花菇挥发性物质的 GC-IMS 二维谱图差异对比图
Figure 3 Comparison of differences in GC-IMS two-dimensional spectra of volatile substances in dried *Lentinula edodes* using different methods

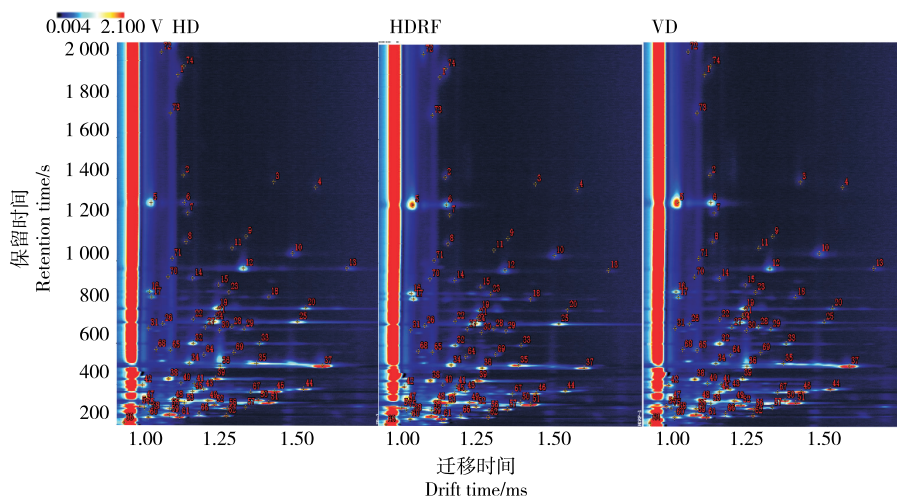


图 4 不同方式干燥花菇挥发性成分的离子迁移谱定性分析

Figure 4 IMS qualitative analysis of volatile components in *Lentinula edodes* dried by different drying methods

如表 2 所示,干燥花菇样品中共检出 75 个挥发性风味成分,定性 61 种,包括醛类 22 种、醇类 10 种、酮类 8 种、酯类 6 种、吡嗪类 3 种、酸类 3 种、呋喃类 2 种以及其他少量风味化合物,与侯会^[26]的报道一致,香菇中醛类和醇类最多,而且花菇中醛类种类更丰富。

醛类物质气味强烈,对食用菌特征香气的形成具有重要的贡献^[27]。由表 2 可知,HD 样品中的反式-2-壬烯醛、苯甲醛、壬醛、三甲基-2-丁烯醛、己醛(M)、2-甲基丙醛以及乙醛含量显著低于 HDRF 和 VD 样品。Luo 等^[11]同样发现壬醛是在香菇热风干燥过程中新生成的化合物。然而,HD 和 HDRF 样品中的 3-甲基丁醛、戊醛(M)、2-甲基丁醛、乙缩醛、丙烯醛、2-甲基-2-丙烯醛含量显著高于 VD 样品($P<0.05$)。3-甲基丁醛是亮氨酸在高温下斯特雷克降解产物^[28],主要来自于不饱和脂肪酸的自动氧化^[29],与文献^[26]报道的温度较高的 HDRF 和 HD 干燥更有利于 3-甲基丁醛的形成的结论一致。

醇类物质是普遍存在于食用菌中的特征性物质,特别是八碳醇,如 1-辛烯-3-醇,与典型的“蘑菇味”密切相关^[30]。由表 2 可以看出,VD 样品的 1-辛烯-3-醇含量显著高于 HD 和 HDRF 样品($P<0.05$),这与八碳醇类物质挥发性较强、稳定性不高,加热处理会造成含量的损失有关^[31],与张毅航等^[32]的研究结果一致。Tian 等^[33]同样发现热风干燥香菇中的八碳醇含量损失情况十分严重。表 2 也显示,HD 样品中 2-丙醇乙醇、1-己醇、1-戊醇含量显著高于 VD 和 HDRF 样品,这可能与热风干燥过程中脱羧酶活性高,酮酸转化快有关^[34],与侯会^[26]报道的结果一致。

酮类赋予了食用菌的花香和果香,且香味持久。由表 2 可以看出,酮类共检出 9 种化合物,其中,VD 样品中 6-甲基-5-庚烯-2-酮、2-丁酮、丙酮、2-戊酮含量显著高于 HD 和 HDRF 样品($P<0.05$),可能是由加热促进酮类降

解或分解所致。但 HD 和 HDRF 样品中 3-羟基-2-丁酮含量显著高于 VD 样品($P<0.05$),这可能与热处理促进酮类物质形成有关^[35];HDRF 样品中 1-羟基-2-丙酮、1-辛烯-3-酮含量显著高于 HD 和 VD 样品($P<0.05$),这可能与射频-热风双重加热有关。此外,加热促进挥发性乙酸显著减少,与 Tian 等^[33]报道香菇挥发性酸类物质经热风干燥后含量增加的研究结果不一致,这可能与花菇水分含量低,干燥时间短、水分流失快有关;酯类物质能够贡献样品愉悦的果香味,HDRF 产生了大量的乙酸乙酯(辛辣刺激味)、醋酸甲酯(水果)、乙酸异戊酯(烤坚果味)、 γ -丁内酯(水果味),其含量显著高于 VD 和 HD 样品($P<0.05$),表明联合干燥能较好地提升花菇的呈香酯类物质含量,与侯会^[26]的研究结果一致。

吡嗪类化合物能够贡献烘烤香味,主要是一种在高温下生成量较多的美拉德反应产物^[36]。由表 2 可知,HD 样品中乙酰基吡嗪含量显著高于 HDRF 和 VD 样品($P<0.05$);HDRF 样品中 2,3,5-三甲基吡嗪和 2,5-二甲基吡嗪含量显著高于 HD 和 VD 样品($P<0.05$),表明射频热风联合干燥能够赋予产品更多的烘烤香气。此外,与 VD 样品相比,HDRF 和 VD 样品中 2-乙基呋喃含量均显著增加,尤其 HDRF 样品,与侯会^[26]的研究结果一致。而 VD 样品中 2,5-二甲基呋喃含量最高。呋喃是一种重要的杂环化合物,可以通过美拉德、热降解和氧化反应等途径形成^[28]。含硫化合物是干香菇特殊香气的主要来源,具有洋葱、卷心菜气味,香味阈值较低,风味活度值较高^[37]。由表 2 可以看出,HD 样品中二甲基三硫醚含量显著高于 VD 和 HDRF 样品($P<0.05$)。二甲基三硫醚是典型的直链含硫化合物,高温能够促使这类物质更多地生成^[30],这与 Luo 等^[11]、李文等^[38]的研究结果一致。

表 1 不同方式干燥花菇挥发性风味成分的 GC-IMS 分析结果^{*}

Table 1 GC-MS analysis result of volatile compounds in *Lentinula edodes* dried by different drying methods

种类	名称	保留时 间/s	迁移时 间/ms	峰面积			风味描述
				热风干燥	射频—热风干燥	真空冷冻干燥	
醛类	反式-2-壬烯醛	1 382.626	1.420 75	339.57±41.59 ^c	395.82±123.54 ^b	595.39±15.85 ^a	脂肪味
	葵醛	1 356.615	1.543 43	264.97±12.05 ^b	260.62±27.04 ^c	269.36±7.16 ^a	甜香味
	苯甲醛	1 414.639	1.155 35	241.17±16.16 ^c	433.97±38.89 ^a	323.25±9.81 ^b	樱桃、麦芽
	反式-2-辛烯醛	1 117.386	1.339 68	192.47±19.17 ^a	133.20±6.80 ^c	159.84±8.60 ^b	脂肪、水果
	壬醛	1 034.808	1.476 72	677.63±11.37 ^c	819.40±80.96 ^b	1 179.02±105.93 ^a	脂肪、柠檬
	反式-2-庚烯醛	880.558	1.259 53	245.30±16.27 ^b	164.08±11.63 ^c	259.74±18.10 ^a	辛辣味
	辛醛	822.909	1.406 91	341.23±17.65 ^b	277.08±30.72 ^c	421.26±36.28 ^a	黄油味
	三甲基-2-丁烯醛	692.139	1.096 37	204.14±16.87 ^c	205.83±9.74 ^b	228.08±4.22 ^a	香蕉味
	反式-2-己烯醛	715.780	1.184 23	183.78±3.83 ^a	136.80±6.16 ^c	146.51±9.67 ^b	果香味
	庚醛	667.623	1.334 05	350.39±22.78 ^b	262.35±40.59 ^c	433.12±7.19 ^a	柑橘、柠檬香味
	己醛(M)	487.253	1.264 21	2 685.68±136.92 ^c	3 285.02±133.43 ^a	3 033.82±17.12 ^b	甜、葡萄酒味
	己醛(D)	487.253	1.563 84	10 696.77±599.36 ^a	3 261.63±438.55 ^c	8 955.27±166.40 ^b	
	戊醛(M)	363.597	1.184 05	2 195.64±19.12 ^b	2 962.99±230.43 ^a	2 181.29±55.69 ^c	酒香味、刺激的辛辣滋味
	戊醛(D)	364.419	1.423 27	5 495.26±378.91 ^a	1 460.14±271.34 ^c	4 471.69±120.54 ^b	
	3-甲基丁醛	309.332	1.406 58	5 242.52±145.70 ^b	7 131.64±219.40 ^a	5 156.55±61.72 ^c	香味、水果味
	2-甲基丁醛	305.221	1.158 46	845.46±9.41 ^a	681.93±12.26 ^b	657.96±24.05 ^c	奶油、水果味
	乙缩醛	293.710	1.028 28	2 044.44±33.70 ^a	2 019.34±82.51 ^b	1 133.83±26.96 ^c	香蕉、辛辣味
	丁醛(M)	282.200	1.116 18	1 419.99±32.95 ^a	885.21±48.36 ^c	1 363.11±8.97 ^b	芳香、白兰地味
	丁醛(D)	282.200	1.284 19	1 610.03±155.25 ^b	755.63±124.97 ^c	2 249.20±51.32 ^a	
	丙烯醛	266.945	1.058 73	471.80±17.98 ^b	581.65±60.80 ^a	322.30±2.80 ^c	刺鼻味
	丙醛(M)	238.932	1.052 64	1 741.44±15.92 ^a	1 616.66±79.88 ^c	1 672.09±2.29 ^b	烧焦、焦糖味
	丙醛(D)	239.376	1.146 13	3 339.40±97.73 ^b	3 565.43±533.06 ^a	2 957.89±70.16 ^c	
	2-甲基丙醛	245.602	1.282 30	538.98±10.31 ^c	881.86±145.91 ^a	591.50±25.69 ^b	花香、青苹果味
	乙醛	211.807	0.981 50	1 459.06±53.31 ^c	1 600.06±56.06 ^b	1 684.90±62.35 ^a	松木味
	2-甲基-2-丙烯醛	284.681	1.042 77	101.96±9.21 ^a	98.89±15.98 ^b	36.84±4.31 ^c	花卉味
	反式-2-戊烯醛	564.589	1.118 05	160.50±1.95 ^b	128.18±1.95 ^c	259.63±4.08 ^a	绿色味
醇类	1-辛烯-3-醇	1 232.685	1.169 03	254.27±18.41 ^b	200.25±14.11 ^c	442.20±9.01 ^a	黄瓜味
	1-己醇(M)	963.136	1.331 93	3 652.76±476.37 ^a	1 172.62±184.23 ^c	2 597.67±292.83 ^b	水果、脂肪味
	1-己醇(D)	963.136	1.635 74	735.82±208.59 ^a	131.94±11.85 ^c	379.43±65.31 ^b	
	1-戊醇(M)	766.818	1.256 94	3 821.09±188.79 ^a	1 173.27±91.23 ^c	2 792.53±122.69 ^b	柑橘、脂肪味
	1-戊醇(D)	769.934	1.515 51	1 641.73±222.24 ^a	175.49±9.51 ^c	799.81±87.46 ^b	
	3-甲基-1-丁醇(M)	701.771	1.245 06	4 311.20±88.76 ^b	4 482.47±32.22 ^a	2 786.63±127.34 ^c	土、蘑菇味
	3-甲基-1-丁醇(D)	701.771	1.490 62	3 127.00±157.35 ^b	3 191.05±20.63 ^a	962.01±108.08 ^c	
	1-丁醇(M)	597.577	1.184 23	2 415.61±69.83 ^b	1 671.26±92.31 ^c	2 871.98±93.11 ^a	类苯、特色芳香味
	1-丁醇(D)	597.577	1.379 10	857.92±35.92 ^b	339.40±37.73 ^c	1 194.06±97.86 ^a	
	2-甲基-1-丙醇(M)	501.263	1.174 09	1 536.79±119.95 ^b	2 758.41±41.04 ^a	1 420.28±60.30 ^c	酒精、刺鼻味
	2-甲基-1-丙醇(D)	501.263	1.371 22	3 190.95±326.61 ^b	4 160.19±80.46 ^a	2 249.63±163.96 ^c	
	正丙醇(M)	425.962	1.112 14	3 277.67±85.13 ^b	3 323.03±25.32 ^a	2 930.22±121.47 ^c	苹果、脂肪味
	正丙醇(D)	427.714	1.250 69	3 492.47±120.67 ^b	3 605.42±320.22 ^a	2 031.94±302.19 ^c	
	2-丁醇	404.949	1.149 31	224.71±12.94 ^b	131.46±9.89 ^c	685.38±25.89 ^a	酒精味
	乙醇(M)	320.021	1.042 75	4 257.15±33.09 ^a	4 092.10±95.64 ^b	3 942.26±48.87 ^c	花卉味

续表 1

种类	名称	保留时 间/s	迁移时 间/ms	峰面积			风味描述
				热风干燥	射频—热风干燥	真空冷冻干燥	
醇类	乙醇(D)	320.021	1.127 31	5 519.74±226.92 ^b	6 983.99±555.32 ^a	4 457.46±140.07 ^c	
	2-丙醇	319.198	1.227 45	2 706.67±50.27 ^a	2 555.60±83.21 ^b	2 512.48±97.93 ^c	香味
酮类	6-甲基-5-庚烯-2-酮	913.278	1.183 25	444.54±39.95 ^b	322.40±12.48 ^c	480.98±50.74 ^a	柑橘味
	1-羟基-2-丙酮	849.396	1.056 56	1 658.81±228.67 ^c	2 473.78±105.24 ^a	1 731.50±172.66 ^b	辛辣、甜焦糖味
	3-羟基-2-丁酮	822.909	1.063 02	1 072.90±64.85 ^b	2 176.94±23.37 ^a	910.90±135.36 ^c	
	1-辛烯-3-酮	847.117	1.288 99	236.87±7.79 ^c	354.60±6.12 ^a	297.75±24.95 ^b	香蕉、奶酪味
	2-庚酮	660.618	1.261 95	217.27±42.00 ^a	62.59±1.68 ^c	200.35±11.26 ^b	柑橘、脂肪味
	2-丁酮	298.643	1.246 36	1 798.24±70.70 ^b	1 489.21±61.43 ^c	3 420.68±154.68 ^a	杏仁、麦芽味
	丙酮	250.938	1.114 62	8 217.77±119.31 ^c	8 526.10±529.06 ^b	8 715.09±383.20 ^a	甜香味
	2-戊酮	361.237	1.353 75	845.25±22.59 ^b	841.82±133.47 ^c	919.19±18.48 ^a	特色芳香
酯类	2-甲基丁酸甲酯	116.200	1.188 74	371.66±16.44 ^c	383.67±15.91 ^b	509.50±17.22 ^a	
	甲酸丁酯(M)	376.054	1.215 77	1 405.61±38.09 ^b	1 198.11±61.66 ^c	1 537.26±4.81 ^a	水果味
	甲酸丁酯(D)	376.752	1.507 83	2 413.56±14.94 ^b	1 303.92±72.64 ^c	2 881.34±201.26 ^a	特殊香味
	乙酸乙酯	285.488	1.337 60	87.30±11.72 ^c	1 505.70±191.68 ^a	686.49±155.34 ^b	辛辣刺激味
	醋酸甲酯	257.814	1.201 17	214.61±7.92 ^c	318.97±64.17 ^a	227.77±21.16 ^b	水果、辛辣味
	乙酸异戊酯	552.709	1.304 13	150.37±2.75 ^c	266.60±27.46 ^a	162.94±16.56 ^b	烤坚果味
	γ-丁内酯	2 014.873	1.091 69	520.69±30.83 ^b	1 335.78±67.69 ^a	498.28±57.62 ^c	脂肪、水果味
吡嗪类	乙酰基吡嗪	1 902.841	1.140 01	326.08±16.30 ^a	279.14±27.52 ^b	162.41±10.36 ^c	烤玉米味
	2,3,5-三甲基吡嗪	1 090.899	1.163 86	200.22±23.15 ^c	223.81±18.59 ^a	204.02±17.06 ^b	葡萄汁味
	2,5-二甲基吡嗪	921.134	1.110 80	158.56±32.09 ^b	232.07±6.18 ^a	101.91±13.39 ^c	坚果味
酸类	乙酸(M)	1 282.585	1.060 98	4 304.84±77.55 ^c	9 002.08±603.36 ^b	10 472.66±350.48 ^a	辛辣、水果味
	乙酸(D)	1 282.543	1.158 69	409.33±25.58 ^c	2 306.34±397.22 ^b	3 333.29±249.47 ^a	
	丙酸(M)	1 718.583	1.117 66	962.50±16.67 ^b	1 002.56±18.99 ^a	960.86±83.84 ^c	刺激味
	丙酸(D)	1 946.091	1.158 30	209.66±18.82 ^b	371.98±28.50 ^a	189.44±25.07 ^c	刺激味
呋喃类	2-戊基呋喃	732.416	1.251 82	338.83±8.22 ^b	355.22±2.50 ^a	147.12±10.02 ^c	发酵味
	2,5-二甲基呋喃	320.843	1.375 43	2 437.58±259.94 ^b	985.99±121.26 ^c	3 582.61±259.52 ^a	苹果香味
其他	二甲基三硫醚	1 061.296	1.299 61	155.75±18.99 ^a	87.86±9.06 ^c	122.66±9.15 ^b	硫磺味
	松油烯(M)	675.503	1.220 28	208.99±20.42 ^c	213.62±9.06 ^b	611.41±37.15 ^a	杏仁、烤味
	松油烯(D)	677.254	1.298 00	176.22±15.31 ^c	196.17±5.49 ^b	584.71±42.03 ^a	
	邻二甲苯	671.125	1.054 69	157.08±1.79 ^a	81.39±2.02 ^b	79.32±2.64 ^c	奶酪、水果味
	噻吩	395.317	1.035 54	1 443.34±91.32 ^a	1 381.43±108.99 ^b	1 370.27±39.91 ^c	芳香味、蒜蓉味
	蒎烯	541.528	1.216 05	183.33±12.96 ^b	154.77±2.76 ^c	374.88±42.48 ^a	辛辣味、水果味
	对二甲苯	568.782	1.075 87	99.18±13.01 ^b	115.94±3.19 ^a	77.18±2.10 ^c	苹果、香蕉味
	3-乙基吡啶	1 010.810	1.122 84	188.12±32.13 ^a	181.20±12.35 ^b	128.18±10.48 ^c	奶油、焦糖味

† 每一行字母不同代表不同样品的含量之间存在显著性差异($P<0.05$)。

2.3 不同方式干燥花菇挥发性成分的指纹图谱

为了更直观且定量地分析花菇的挥发性有机化合物,采用 GalleryPlot 插件生成不同干燥方式样品的挥发性化合物指纹图谱,如图 5 所示。由图 5 可以看出,干燥花菇的挥发性成分主要为丙醛、3-甲基丁醛、正丙醇、乙醇、丙酮、甲酸丁酯以及噻吩,使样品呈现果香及焦糖香,与文献[5]报道结果一致;不同方式干燥花菇挥发性成分亮点位置不同,其种类和含量存在差异,其中 HDRF 样品

花菇亮点最多,其挥发性成分最丰富,部分含量较高;其次为 VD,HD 样品亮点最少。实线框内主要是 HDRF 样品的特征风味,包括 1-正丙醇(D)、戊醛(D)、乙醇(D)、2-丙醇、醋酸甲酯、对二甲苯、3-乙基吡啶、γ-丁内酯、丙酸等挥发性成分较高;HDRF 样品中醛类如 3-甲基丁醛和酯类物质如 γ-丁内酯、醋酸甲酯增加,醛类增加主要是 HDRF 可以促进脂肪酸氧化裂解,易发生美拉德反应,生成醛类物质,使花菇果香增加,这与陈瑞娟等^[39]的研究结

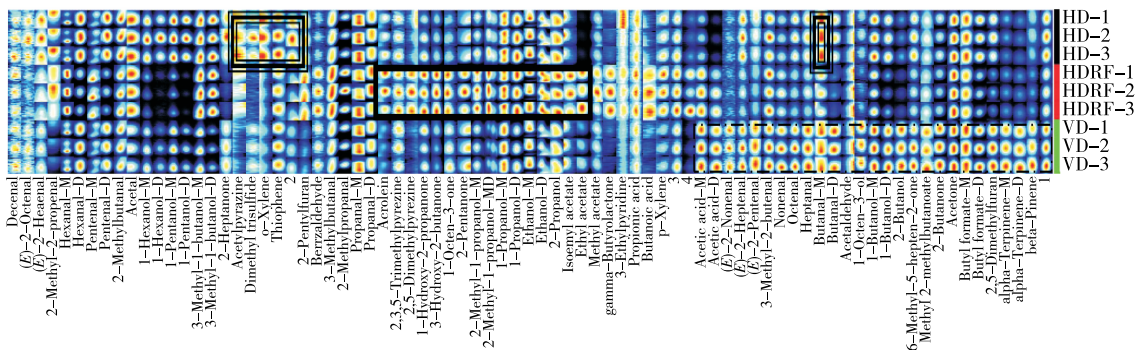


图5 不同方式干燥花菇挥发性有机化合物的指纹图谱

Figure 5 The GC-IMS fingerprints of volatile organic compounds in *Lentinula edodes* dried by different drying methods

果一致;酯类增加可能由脂质降解的醇、酸类物质的酯化反应所致^[40],内酯化合物赋予花菇果香,其中 γ -丁内酯有椰子香气^[41],这与侯会^[26]报道的结果一致;同时产生了2个吡嗪类化合物,赋予了花菇坚果及烤香风味。HDRF花菇以果香、坚果及烤香为主。

虚线框内为VD样品的特征风味,主要有壬醛、戊醛、E-2-戊烯醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、1-辛烯酮、 α -松油烯、1-丁醇、2-丁醇、2-甲基丁酸甲酯、2-丁酮、 β -蒎烯等挥发性成分较高,主要为C5~C9醛类物质,具有脂香类气味,通常是脂肪氧化降解产物^[42],VD花菇风味以脂肪味为主,与侯会^[26]报道的结果一致。这可能与冷冻干燥温度低,真空环境下不利于氨基酸、脂肪酸的氧化,挥发性成分生成受到抑制^[43];但其干燥样品结构疏松、空隙高,有利于挥发物质释放^[44]。

双实线框内HD样品的特征风味,包括乙酰基吡嗪、2-庚酮、邻二甲苯、二甲基三硫醚、噻吩及丁醛等挥发性成分的含量较高,含硫化物含量高与Luo等^[11]发现热风干燥能够增强香菇二甲基三硫醚结果一致。热处理促进脂肪酸氧化裂解,发生美拉德反应,吡嗪类化合物是美拉德反应的重要产物之一,乙酰基吡嗪具有明显烤香味^[45];2-庚酮是脂肪氧化降解产物,呈现脂肪味;邻二甲苯赋予花菇果香味。HD花菇风味以果香味、烤香味为主。

2.4 不同方式干燥花菇的挥发性风味化合物相对含量

由图6可以看出,不同方式干燥花菇的挥发性有机化合物种类基本一致,但含量存在差异。HD相较于VD其挥发性风味成分含量显著上升,HD香菇的挥发性化合物总含量显著增加,与Tian等^[33]的报道一致。花菇挥发性成分主要以醛、醇、酮以及酸类物质为主,这与Wu等^[46]的报道一致;醛类为青草香型挥发物,花菇中的醛类物质相对含量为35.02%(HD),33.40%(HDRF),31.06%(VD)。醇类一般由氨基酸代谢途径产生,也可由脂肪酸前体物质生成;酮类物质为“花香型”风味物质;酯类物质为果香型挥发物质。试验发现,HD花菇、HDRF花菇和

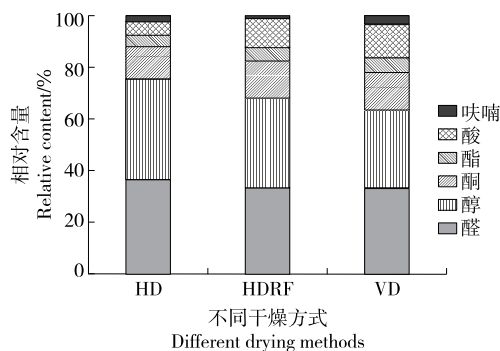


图6 干燥方式对花菇样品中挥发性物质种类的影响

Figure 6 Effects of different drying methods on varieties of volatile components in *Lentinula edodes* samples

VD花菇的醛、醇含量依次降低,HD及HDRF花菇果香味浓郁。

2.5 不同方式干燥花菇的挥发性风味成分

图7显示,PC1、PC2贡献率分别为61%,29%,累计贡献率达到90.0%,表明PC1、PC2总贡献率包含了不同干燥方式花菇的大部分风味信息,能很好地表征原始变

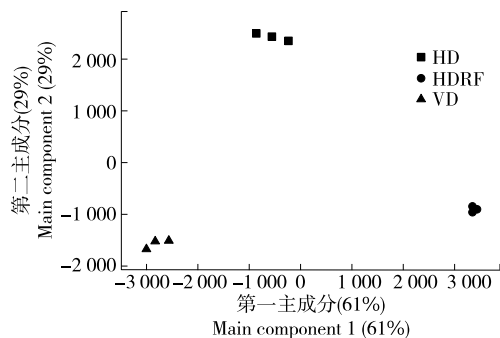


图7 不同方式干燥花菇挥发性风味成分的PCA分析图

Figure 7 Principal component analysis (PCA) plots of volatile compounds in *Lentinula edodes* dried by different drying methods

量之间的特征差异。HDRF 和 VD 距离最远,表明这两种干燥花菇的风味存在较大差异;HDRF 与 HD 距离较近,表明两种干燥花菇的风味差异较小。

图 8 显示,VD 花菇和 HD 花菇、HDRF 花菇间的距离较远,表明 VD 花菇与 HD 花菇、HDRF 花菇之间的风味存在较大差异;而 HD 花菇和花菇之间距离较为接近,表明二者风味组成相似度较高,与文献[47]报道结果一致。

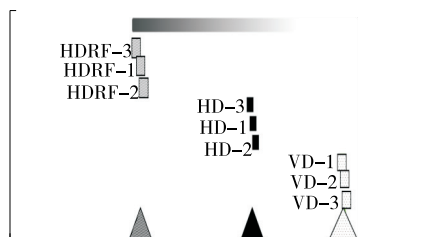


图 8 不同方式干燥花菇挥发性风味成分的相似度分析
Figure 8 Fingerprint similarity analysis of volatile flavor components in *Lentinula edodes* dried by different drying methods

3 结论

干燥是花菇贮藏的一种重要方式,不同方式干燥花菇的挥发性风味成分存在差异。采用气相色谱—离子迁移谱技术鉴别 3 种不同方式干燥花菇样品,在图谱分析过程中,发现差异性图谱更能直观地反映花菇挥发性风味成分的区别;指纹图谱可以反映花菇的各种风味成分的具体差异。通过对各种挥发性成分定性分析,结果发现:不同方式干燥花菇的挥发性风味成分主要包含醛类 22 种、醇类 10 种、酮类 8 种、酯类 6 种、吡嗪类 3 种、酸类 3 种、呋喃类 2 种以及其他少量风味化合物。

利用气相色谱—离子迁移谱技术检测分析了热风干燥、射频—热风干燥及真空冷冻干燥 3 种干燥花菇样品的香气成分,确定了特征香气成分及其特征峰,研究显示热风干燥花菇呈现出果香味、烤香味;射频—热风干燥花菇呈现出果香、坚果及烤香;真空冷冻干燥花菇呈现脂肪味。结合主成分分析和欧氏距离分析,进一步探明了 3 种方式干燥的花菇可通过气相色谱—离子迁移谱图数据实现区分鉴别。

参考文献

[1] 康孟利, 宣晓婷, 林旭东, 等. 食用菌保鲜技术研究及其在花菇保鲜上的应用[J]. 农产品加工, 2023(10): 76-80, 90.
KANG M L, XUAN X T, LIN X D, et al. Study on fresh-keeping technology of edible fungi and its application in mushroom preservation[J]. Farm Products Processing, 2023(10): 76-80, 90.
[2] 温小礼, 张伟, 周巧丽, 等. 肉桂醛熏蒸处理对香菇采后生理和品质的影响[J]. 中国食品学报, 2014, 14(8): 190-196.

WEN X L, ZHANG W, ZHOU Q L, et al. Effect of cinnamaldehyde fumigation treatments on postharvest physiology and quality of shiitake mushroom[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(8): 190-196.
[3] 张海伟, 鲁加惠, 张雨露, 等. 干燥方式对香菇品质特性及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 150-156.
ZHANG H W, LU J H, ZHANG Y L, et al. Effects of drying methods on the quality characteristics and microstructure of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) [J]. Food Science, 2020, 41(11): 150-156.
[4] 安晶晶, 王成涛, 刘国荣, 等. 鲜香菇与干香菇挥发性风味成分的 GC-MS 分析[J]. 食品工业科技, 2012, 33(14): 68-71.
AN J J, WANG C T, LIU G R, et al. Analysis of volatile aroma components of fresh and dry *Lentinus edodes* with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(14): 68-71.
[5] 鲁加惠, 张雨露, 梁进, 等. 3 种干燥方式对花菇挥发性物质及感官特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(24): 262-269.
LU J H, ZHANG Y L, LIANG J, et al. Effects of three drying processes on volatile substances and sensory characteristics in *Lentinus edodes*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(24): 262-269.
[6] ONWUDE D I, HASHIM N, JANUS R, et al. Non-thermal hybrid drying of fruits and vegetables: a review of current technologies[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2017(43): 223-238.
[7] CAO Z Z, ZHOU L Y, BI J F, et al. Effect of different drying technologies on drying characteristics and quality of red pepper (*Capsicum frutescens* L.): a comparative study[J]. J Sci Food Agric, 2016, 96: 3 596-3 603.
[8] 卢可可, 郭晓晖, 李富华, 等. 不同热风干燥方式对香菇多酚组成及其抗氧化活性的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(9): 185-190, 283.
LU K K, GUO X H, LI F H, et al. Effects of various hot-air drying methods on the composition and antioxidant activity of polyphenols in mushrooms (*Lentinus edodes*) [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(9): 185-190, 283.
[9] 赵旭博, 孙正宏, 田阳, 等. 不同干燥方式对花菇品质的影响[J]. 农产品加工, 2017(1): 115-117, 120.
ZHAO X B, SUN Z H, TIAN Y, et al. Effect of different drying methods on the quality of mushroom[J]. Farm Products Processing, 2017(1): 115-117, 120.
[10] 胡云峰, 唐裕轩, 李宁宁, 等. 枸杞干制过程中褐变反应研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(22): 159-163.
HU Y F, TANG Y X, LI N N, et al. Study on browning reaction in hot air drying processing of *Lycium barbarum* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(22): 159-163.
[11] LUO D S, WU J H, 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.
- [12] 卢永芬. 食用菌气调干制技术研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2001: 5.
- LU Y F. Studies on the controlled atmosphere drying for edible fungus[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2001: 5.
- [13] 张力伟. 香菇真空冷冻干燥工艺研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2010: 40.
- ZHANG L W. The study of *Lentinus edodes* vacuum freeze-drying processing[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2010: 40.
- [14] 王教领, 宋卫东, 任彩红, 等. 我国香菇干燥技术研究进展[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(7): 76-83.
- WANG J L, SONG W D, REN C H, et al. Research on the drying progress of *Lentinus edodes* in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(7): 76-83.
- [15] JIAO Y, TANG J M, WANG Y F, et al. Radio-frequency applications for food processing and safety[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2018, 9: 105-127.
- [16] 刘曼, 南敬昌, 丛密芳, 等. 射频加热技术在农产品和食品加工中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(8): 289-296.
- LIU M, NAN J C, CONG M F, et al. Application of radio-frequency heating technology in agriproduct and food industry[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(8): 289-296.
- [17] DAMAYANTI W, 汤英杰, 敬璞, 等. 稻谷热风辅助射频干燥工艺及相关品质研究[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(9): 79-86.
- DAMAYANTI W, TANG Y J, JING P, et al. Study on hot air-assisted radio frequency drying technology of rough rice and associated quality[J]. Storage and Process, 2021, 21(9): 79-86.
- [18] 杨芳, 邓凤琳, 贾洪锋, 等. 辣椒面颗粒度对辣椒油理化性质和挥发性风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(10): 157-165.
- YANG F, DENG F L, JIA H F, et al. Study on the effects of granularity of paprika on physicochemical properties and volatile flavor compounds of chili oil[J]. Food & Machinery, 2023, 39(10): 157-165.
- [19] 吴永康, 林亲录, 蒋志荣, 等. 基于 GC-IMS 分析碾减率对籼米米饭挥发性物质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(12): 26-31.
- WU Y K, LIN Q L, JIANG Z R, et al. Effect of degree of milling on volatile compounds of indica rice after cooking [J]. Food & Machinery, 2021, 37(12): 26-31.
- [20] 杨芳, 范成梦, 贾洪锋, 等. 基于气相色谱—离子迁移谱对不同产地羊肚菌风味化合物的分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(10): 207-213.
- YANG F, FAN C M, JIA H F, et al. Analysis of flavor compounds of *Morchella* spp. from different habitats based on gas chromatography-ion mobility spectrum[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(10): 207-213.
- [21] 孙达锋, 胡小松, 张沙沙. 电子鼻结合气相—离子迁移谱联用技术分析兰茂牛肝菌气调贮藏期间挥发性风味物质的变化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(21): 111-117.
- SUN D F, HU X S, ZHANG S S, et al. Changes in volatile compounds of *lanmaoa asiatica* during controlled atmosphere storage using electronic nose combined with gas chromatography-ion mobility spectroscopy [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(21): 111-117.
- [22] 陈彦憬, 于建娜, 敬国兴, 等. 气相色谱—离子迁移谱技术在农业领域的应用[J]. 分析试验室, 2020, 39(12): 1 480-1 488.
- CHEN Y J, YU J N, JING G X, et al. Application of gas chromatography-ion mobility spectrometry in agriculture [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2020, 39(12): 1 480-1 488.
- [23] 涂宝军, 陈尚龙, 马庆昱, 等. 3 种干燥方式对香菇挥发性成分的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(19): 106-110.
- TU B J, CHEN S L, MA Q Y, et al. Effects of three drying processes on volatile compounds in *Lentinus edodes* [J]. Food Science, 2014, 35(19): 106-110.
- [24] 赵圆圆, 易建勇, 毕金峰, 等. 干燥方式对复水香菇感官、质构及营养品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 101-108.
- ZHAO Y Y, YI J Y, BI J F, et al. Effects of three drying processes on volatile compounds in *Lentinus edodes*[J]. Food Science, 2019, 40(3): 101-108.
- [25] 张乐, 张雅, 史冠莹, 等. GC-IMS 结合化学计量学分析 8 个产区香椿挥发性成分差异[J]. 食品科学, 2022, 43(22): 301-308.
- ZHANG L, ZHANG Y, SHI G Y, et al. Differences in volatile organic compounds of *toona sinensis* from eight production regions analyzed by gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with chemometrics[J]. Food Science, 2022, 43(22): 301-308.
- [26] 侯会. 不同干燥方式和切分处理对香菇品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2021: 30-31.
- HOU H. Effect of different drying methods and cutting treatments on the quality of *Lentinula edodes* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021: 30-31.
- [27] CHO I H, KIM S Y, CHOI H K, et al. Characterization of aroma-active compounds in raw and cooked pine-mushrooms (*Tricholoma matsutake* Sing.) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(17): 6 332-6 335.
- [28] HOFMANN T, MUNCH P, SCHIEBERLE P. Quantitative model studies on the formation of aroma-active aldehydes and acids by Strecker-type reactions [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(2): 434-440.
- [29] CAO J, ZOU X G, DENG L, et al. Analysis of nonpolar lipophilic aldehydes/ketones in oxidized edible oils using HPLC-QqQ-MS for the evaluation of their parent fatty acids[J]. Food Research International, 2014, 64: 901-907.
- [30] HADAR Y, DOSORETZ C G. Mushroom mycelium as a potential source of food flavour[J]. Trends in Food Science and Technology, 1991, 2: 214-218.
- [31] HIRAIDE M, MIYAZAKI Y, SHIBATA Y. The smell and odorous

- components of dried shiitake mushroom, *Lentinula edodes* I: relationship between sensory evaluations and amounts of odorous components[J]. Journal of Wood Science, 2004, 50(4): 358-364.
- [32] 张毅航, 方东路, 仲磊, 等. 热风干燥和真空冷冻干燥对猴头菇不同部位风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 58-67.
- ZHANG Y H, FANG D L, ZHONG L, et al. Effects of hot air-drying and vacuum freeze-drying on flavor components in different parts of *Hericium erinaceus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 58-67.
- [33] TIAN Y T, ZHAO Y T, HUANG J J, et al. Effects of different drying methods on the product quality and volatile compounds of whole shiitake mushrooms[J]. Food Chemistry, 2016, 197: 714-722.
- [34] LIU S X, LAAKSONEN O A, MARSOL-VALL A, et al. Comparison of volatile composition between alcoholic bilberry beverages fermented with non-saccharomyces yeasts and dynamic changes in volatile compounds during fermentation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(11): 3 626-3 637.
- [35] FLAIG M, QI S, WEI G D, et al. Characterization of the key odorants in a high-grade Chinese green tea beverage (*Camellia sinensis*; Jingshan cha) by means of the sensomics approach and elucidation of odorant changes in tea leaves caused by the tea manufacturing process [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(18): 5 168-5 179.
- [36] SCALONE G L L, LAMICHHANE P, CUCU T, et al. Influence of free amino acids, oligopeptides and polypeptides on the formation of pyrazines in Maillard model systems[J]. Abstracts of Papers of the American Chemical Society, 2016, 63(22): 5 364-5 372.
- [37] 李小林, 陈诚, 黄羽佳, 等. 顶空固相微萃取—气质联用分析 4 种野生食用菌干品的挥发性香气成分[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(9): 174-180.
- LI X L, CHEN C, HUANG Y J, et al. Analysis of volatile flavors in 4 dried wild edible fungi by HS-SPME-GC IMS[J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(9): 174-180.
- [38] 李文, 杨焱, 陈万超, 等. 不同干燥方式对香菇含硫风味化合物的影响[J]. 食用菌学报, 2018, 25(4): 71-79.
- LI W, YANG Y, CHEN W C, et al. Effect of drying method on sulfur-containing components in *Lentinula edodes*[J]. Acta Edulis Fungi, 2018, 25(4): 71-79.
- [39] 陈瑞娟, 毕金峰, 周禹含, 等. 干燥方式对胡萝卜超微粉中挥发性风味物质的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(1): 250-256.
- CHEN R J, BI J F, ZHOU Y H, et al. Effect of different drying methods on volatile components of carrot superfine powder[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(1): 250-256.
- [40] CHEN G T, WU F N, PEI F, 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): 2 901-2 910.
- [41] GARCIA E A, ANSORENA D, ASTIASARAN I, et al. Study of the effect of different fiber coatings and extraction conditions on dry cured ham volatile compounds extracted by solid-phase microextraction (SPME)[J]. Talanta, 2004, 64(2): 458-466.
- [42] 杨铭铎, 龙志芳, 李健. 香菇风味成分的研究[J]. 食品科学, 2006, 27(5): 223-226.
- YANG M D, LONG Z F, LI J. Study on flavor compounds in *Lentinus edodes*[J]. Food Sci, 27(5): 223-226.
- [43] FERNANDES A, BARROS L, BARREIRA J C M, et al. Effects of different processing technologies on chemical and antioxidant parameters of *Macrolepiota procera* wildmushroom[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 54(2): 493-499.
- [44] ZHANG J, YAGOUB A E, SUN Y H, et al. Role of thermal and non-thermal drying techniques on drying kinetics and the physicochemical properties of shiitake mushroom[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(1): 214-222.
- [45] 张亮, 侯云丹, 黄健, 等. 加热温度对贻贝挥发性成分的影响[J]. 中国食品学报, 2013(9): 227-233.
- ZHANG L, HOU Y D, HUANG J, et al. Effect of temperature on the volatile compounds of mussel[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013(9): 227-233.
- [46] WU C M, WANG Z. Volatile compounds in fresh and processed shiitake mushrooms (*Lentinus edodes* Sing.) [J]. Food Science & Technology Research, 2000, 6(3): 166-170.
- [47] CHEN D, QIN L, GENG Y, et al. The aroma fingerprints and discrimination analysis of shiitake mushrooms from three different drying conditions by GC-IMS, GC-MS and DSA[J]. Foods, 2021, 10(12): 2 991.
-
- (上接第 42 页)
- [20] YANG L, YANG Y, YANG J, et al. FusionNet: A convolution-transformer fusion network for hyperspectral image classification [J]. Remote Sensing, 2022, 14(16): 4 066.
- [21] ZHANG Q, DENG L. An intelligent fault diagnosis method of rolling bearings based on short-time fourier transform and convolutional neural network[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2023, 23(2): 795-811.
- [22] CHINCHOR N. Muc-4 evaluation metrics[C]// Proceedings of the 4th Conference on Message Understanding. [S.l.]: Association for Computational Linguistics, 1992: 22-29.
- [23] 王首程, 于雪莹, 高继勇, 等. 基于电子舌和电子鼻结合 DenseNet-ELM 的陈醋年限检测[J]. 食品与机械, 2022, 38(4): 72-80, 133.
- WANG S C, YU X Y, GAO J Y, et al. Age detection of mature vinegar based on electronic tongue and electronic nose combined with DenseNet-ELM[J]. Food & Machinery, 2022, 38(4): 72-80, 133.