

# 食用菌挥发性香味物质及分离鉴定技术研究进展

张梦珂<sup>1,2</sup>, 陈明杰<sup>1</sup>, 余昌霞<sup>\*1</sup>, 杨焕玲<sup>1</sup>, 董沁<sup>1</sup>, 查磊<sup>1</sup>, 赵妍<sup>\*1,2</sup>

1 上海市农业科学院食用菌研究所 国家食用菌工程技术研究中心 农业农村部南方食用菌资源与利用重点开放实验室 上海市农业遗传育种重点开放实验室, 上海 201403

2 上海海洋大学 食品学院, 上海 201306

张梦珂, 陈明杰, 余昌霞, 杨焕玲, 董沁, 查磊, 赵妍. 食用菌挥发性香味物质及分离鉴定技术研究进展[J]. 微生物学通报, 2024, 51(10): 3847-3858.

ZHANG Mengke, CHEN Mingjie, YU Changxia, YANG Huanling, DONG Qin, ZHA Lei, ZHAO Yan. Research progress in volatile odor components of edible fungi and their separation and identification techniques[J]. Microbiology China, 2024, 51(10): 3847-3858.

**摘要:** 食用菌营养丰富, 风味独特, 深受消费者喜爱。食用菌的风味主要由非挥发性的滋味物质和挥发性香味物质组成, 其影响食用菌的品质和消费者的接受度。香味通过嗅觉系统感知, 能够通过增加人们的愉悦感, 刺激食欲的方式来促进消化吸收。本文综合论述了食用菌中的挥发性香味物质组成, 主要包括含硫化合物、八碳化合物和一些其他化合物。随后分别对水蒸气蒸馏法、同时蒸馏萃取法、超临界萃取、固相微萃取等分离萃取技术, 以及气相色谱-质谱和气相色谱-离子迁移谱鉴定技术进行归纳总结, 概述了这些技术的优缺点, 为食用菌挥发性香味物质研究及更好地开发食用菌风味产品提供参考。

**关键词:** 食用菌; 挥发性香味物质; 萃取; 分离鉴定

资助项目: 国家现代农业产业技术体系(CARS-20)

This work was supported by the National Modern Agricultural Industry Technology System (CARS-20).

\*Corresponding authors. E-mail: YU Changxia, ycx41529@163.com; ZHAO Yan, jiandan289@126.com

Received: 2024-01-25; Accepted: 2024-03-17; Published online: 2024-04-15

# Research progress in volatile odor components of edible fungi and their separation and identification techniques

ZHANG Mengke<sup>1,2</sup>, CHEN Mingjie<sup>1</sup>, YU Changxia<sup>\*1</sup>, YANG Huanling<sup>1</sup>, DONG Qin<sup>1</sup>, ZHA Lei<sup>1</sup>, ZHAO Yan<sup>\*1,2</sup>

1 National Engineering Research Center of Edible Fungi, Key Laboratory of Applied Mycological Resources and Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Key Laboratory of Agricultural Genetics and Breeding, Institute of Edible Fungi, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China

2 College of Food Sciences and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

**Abstract:** Edible fungi with rich nutrients and unique flavors are popular among consumers. The flavor of edible fungi is mainly composed of non-volatile taste components and volatile odor components, which affect the quality and consumer acceptance of edible fungi. Odor is perceived through the olfactory system and can promote digestion and absorption by increasing people's pleasure and stimulating appetite. This paper comprehensively summarizes the volatile odor components in edible fungi, mainly including sulfur-containing compounds, eight carbon compounds, and other compounds. Subsequently, the development of separation techniques for these components such as steam distillation (SD), simultaneous distillation extraction (SDE), supercritical fluid extraction (SFE) and solid phase micro-extraction (SPME) were summarized, as well as identification techniques such as gas chromatography-mass spectrum (GC-MS) and gas chromatography-ion migration spectrum (GC-IMS), and the advantages and disadvantages of these techniques were generalized. The purpose of this paper is to provide a reference for the future research on volatile odor components in edible fungi and the development of flavor products from edible fungi.

**Keywords:** edible fungi; volatile odor components; extraction; separation and identification

食用菌主要由担子菌和子囊菌组成,是一种大型的、适于食用的子实体真菌。近年来,我国食用菌产业发展迅速,据中国食用菌协会统计,其产量由1978年的58 000 t增长到了2022年的4 222.54万t,继粮食、棉花、油料、蔬菜和果品之后,食用菌已经成为我国农业种植业的第六大产业(<https://mp.weixin.qq.com/s/Nvx2h12KgJe4uMKIZBudng>)。食用菌含有多糖、蛋白质、萜类、矿物质、维生素等丰富的营养成分,这些营养物质具有抗肿瘤、抗氧化和免疫等活性<sup>[1]</sup>。因此,食用菌不仅具有食用价值,也具有一定的药用价值。

风味是食用菌生产中最重要质量指标,同时也是影响消费者接受度的重要因素。因此,风味物质的研究一直以来都是风味领域研究的热点之一。食用菌的风味通常由具有滋味的非挥发性风味物质和具有香味的挥发性风味物质组成<sup>[2]</sup>。滋味一般是通过味觉系统感知,例如甜味和鲜味,而香味主要通过嗅觉感知,包括含硫化合物、八碳化合物、醛、酮、酯、杂环化合物等挥发性风味物质。食用菌的不同品种、子实体的生长部位及各个生长发育阶段样品的挥发性成分差异较大。食用菌的香味一般不是由某个组分单一作用就能体现出,而是众多组

分协同作用的结果<sup>[3]</sup>。我们对食用菌挥发性香味物质的组成、分离鉴定技术的相关研究进展进行综述,以期为进一步深入研究和开发食用菌的香味物质奠定基础。

## 1 挥发性香味物质

### 1.1 含硫化合物

含硫化合物对食用菌香味的形成有着至关重要的作用,其因含量丰富且具有相对较低的气味阈值,被认为是食用菌中重要的挥发性风味物质<sup>[4]</sup>,也是香菇中重要的香味来源<sup>[5]</sup>。含硫化合物的前体物质香菇酸经过 L-半胱氨酸亚砷裂解酶和谷氨酰转肽酶催化产生含硫化合物,主要包括含硫杂环类、硫醇类、硫醚类、噻吩类等物质,如 1,2,4-三硫杂环戊烷、1,2,3,5,6-五硫杂环庚烷(香菇精)、甲硫醇、二甲基二硫醚、二甲基三硫醚等<sup>[6]</sup>。郑建仙<sup>[7]</sup>从香菇不同部位分离鉴定出多种含硫化合物,研究结果表明含硫杂环化合物对香菇风味的影响最重要。1996 年 Morita 等<sup>[8]</sup>从香菇中分离的 1,2,3,5,6-五硫杂环庚烷(香菇精)被认为是香菇主要的挥发性香味物质。李文等<sup>[9]</sup>研究发现在不同的干燥方法下,香菇中含硫化合物的种类及含量均有明显的变化,其中,香菇精对香菇子实体风味的贡献最显著,同时也明确了加热是影响含硫化合物生成和分解的关键因素。此外,其他食用菌中也含有较为丰富的含硫化合物,例如郭磊等<sup>[10]</sup>通过对干燥后美味牛肝菌的挥发性成分进行分析,鉴定到甲硫醇、甲硫醚和 3-甲硫基丙醛 3 种含硫化合物,其中 3-甲硫基丙醛含量最高,对风味特征的贡献较大。

### 1.2 八碳化合物

八碳化合物是食用菌中普遍存在的一类重要香味物质,主要由不饱和脂肪酸经酶裂解催化生成,比如亚油酸和亚麻酸经过脂肪氧化酶

和氢过氧化物酶催化生成八碳化合物,其成分主要有 1-辛醇、3-辛醇、3-辛酮、1-辛烯-3-醇、2-辛烯-1-醇、1-辛烯-3-酮等物质<sup>[11]</sup>。Badenhop 等<sup>[12]</sup>报道,1938 年 Murahashi 最先从松茸菇中鉴定出 1-辛烯-3-醇,就是我们通常所说的蘑菇醇,已有研究表明,1-辛烯-3-醇在几乎所有食用菌中均有检出<sup>[13]</sup>,如平菇<sup>[14]</sup>、香菇<sup>[15]</sup>、松茸<sup>[16]</sup>、双孢菇<sup>[17]</sup>、牛肝菌<sup>[18]</sup>、羊肚菌<sup>[19]</sup>等。殷朝敏等<sup>[20]</sup>从 14 个侧耳属(*Pleurotus*)食用菌样品中检出丰富的八碳化合物,其中 1-辛烯-3-醇含量较高,占总挥发性风味物质的 32.98%–90.58%;在 14 种侧耳属食用菌中有一些共有的八碳化合物,比如 1-辛烯-3-酮、1-辛烯-3-醇、正辛醛和正辛醇等。然而,不同样品间的相对含量差异较大,这些物质可能是影响其香味的关键成分。

### 1.3 其他化合物

除了含硫化合物和八碳化合物外,还有其他挥发性风味化合物,如:萜烯类、酸类、醛类、酮类和酯类化合物,这些化合物在食用菌的香味中也发挥着不可替代的作用<sup>[21]</sup>。比如,2-十一烷酮具有类似柠檬的香气,丙酮呈现类似薄荷的香气,酮类化合物通常具备独特的香味特征,每一种都具有各自的特点。醛类化合物通常散发出不同的香气,少量的醛也能赋予香味。酯类化合物通常由低级饱和脂肪酸和醇结合形成,能够散发出丰富的果实香气<sup>[22]</sup>。这些成分相辅相成、相互协调,从而表现出食用菌特有的芳香。关小莺等<sup>[23]</sup>对 15 个赤芝子实体样品的挥发性物质进行定性和相对定量分析,得到一些对其风味起决定性作用的特征成分,并构建特征指纹图谱,结果表明:15 个赤芝子实体样品中共检出 138 种成分,其中烷烃类化合物共有 57 种,占有成分的一半;其次是萜烯类化合物,共 21 种;醛酮类化合物,共 19 种;醇类和酯类化合物,共 15 种;此外还包含少量

的酸类、酚类、醚类和含氧杂环类化合物。王娟等<sup>[24]</sup>对 4 个人工栽培品种白肉灵芝、赤芝、紫芝、大红芝子实体挥发性物质进行检测和分析,共检测到 81 种化合物,其中醛类化合物最多,有 25 种;其次是酮类化合物,共有 14 种;烯炔类化合物最少,只有 3 种;酸类、烷类等化合物共有 18 种。王婷婷等<sup>[25]</sup>对云南黑虎掌菌(*Sarcodon imbricatus*)中的挥发性风味物质进行分离鉴定,共得到 37 种挥发性成分,醛类化合物是黑虎掌菌的主要挥发性风味成分,其中壬醛的含量最高,其次是正己醛、苯乙醛,在风味叠加效应的作用下,增加了黑虎掌菌的特殊风味。Guo 等<sup>[26]</sup>比较了 4 种松茸的挥发性物质,结果显示所有样品中均检出苯甲醛和己醛,他们可能是松茸中的关键香味物质。

## 2 挥发性香味物质的分离鉴定技术

### 2.1 挥发性香味物质的萃取

食用菌的挥发性香味物质种类丰富,在鉴定挥发性物质前需对样品进行前处理,即将挥发性香味物质从食用菌样品中萃取、分离出来。目前,常见的挥发性香味物质的萃取方法见表 1。

#### 2.1.1 水蒸气蒸馏法

水蒸气蒸馏法(steam distillation, SD)为实验室萃取香味物质的常规方法,其基本原理是:通过挥发产生的水蒸气,除去与水不相溶的部分,通过冷凝得到挥发性组分。该方法具有易吸收、挥发快及选择性好等优点,被广泛应用于食品、医药和化工等行业,随着研究的深入,它也常用于各种食用菌挥发性成分的提取。程聪慧等<sup>[27]</sup>利用水蒸气蒸馏法对白灵菇子实体中的挥发性成分进行有效的提取,之后通过气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用技术进行测定,结果表明,白灵菇

的挥发性风味以醛类、酮类和胺类化合物为主,其峰面积之和占总色谱峰面积的 96.43%。连希希等<sup>[28]</sup>采用水蒸气蒸馏法得到的香菇提取液含硫化化合物的相对含量为 39.5%。水蒸气蒸馏法由于以水作为萃取溶剂,提取温度较高,因此不适用于热稳定性差、易水解的成分。

#### 2.1.2 同时蒸馏萃取法

同时蒸馏萃取(simultaneous distillation extraction, SDE)法是指将待测样品溶液与有机溶剂混合均匀后一起加热至沸腾,待测样品中的化合物和有机溶剂共沸,将其转移到有机溶剂中,再从有机溶剂中提取挥发性物质的方法。郭磊等<sup>[29]</sup>以云南牛肝菌子实体为研究对象,利用 SDE 技术对其挥发性成分进行了定性、定量分析,确定了 56 种挥发性成分,其中醇类的含量最高。李秦等<sup>[30]</sup>为了探究新鲜平菇和香菇子实体的挥发性芳香物质,采用同时蒸馏萃取法,从平菇中鉴定出 12 种挥发性香味物质,香菇中鉴定出 33 种挥发性香味物质。吕艳杰<sup>[31]</sup>采用同时蒸馏萃取法对双孢蘑菇的挥发性风味物质进行提取,鉴定出 36 种化合物。黄明泉等<sup>[32]</sup>通过同时蒸馏萃取法和气质联用技术对竹荪的挥发性物质进行了深入研究,发现在萃取 3 h 时鉴定出的挥发性成分最多,达到 99 种;以二氯甲烷为溶剂,萃取时间为 2 h 时,可鉴定出 76 种挥发性成分。上述结果表明萃取溶剂和萃取时间是影响挥发性物质分析的重要因素。相较于水蒸气蒸馏法,同时蒸馏萃取法能够做到和较难挥发的杂质完全分离,并且使挥发性物质在还未达到沸点温度时就被蒸馏出来,操作也更加简单,但也不利于热不稳定性风味物质成分的萃取,由于操作温度高,萃取得到的香味物质可能会失真。

#### 2.1.3 超临界萃取技术

超临界萃取技术(supercritical fluid extraction, SFE)是一种基于超临界流体,集蒸馏和溶剂提

表 1 挥发性香味物质的萃取方法比较

Table 1 Comparison of the extraction methods of volatile odor components

萃取方法 Extraction method	原理 Principle	适用性 Applicability	优点 Advantage	缺点 Disadvantage
水蒸气蒸馏法 Steam distillation	通过挥发产生的水蒸气, 除去与水不相溶的部分, 通过冷凝得到挥发性组分 The water vapor produced by volatilization removes the insoluble part with the water, and the volatile fraction is obtained by condensation	适用于具有挥发性且能随水蒸气蒸馏而不被破坏、与水不发生反应, 难溶或不溶于水的成分 Suitable for volatile components which can not be destroyed with water vapor distillation, and does not react with water, which are difficult to dissolve in water or insoluble in water	易吸收、挥发快、选择性好, 成本低 Easy to absorb, fast volatilization, good selectivity, low cost	提取温度较高, 不适用于热稳定性差, 易水解的成分 The extraction temperature is high and is not suitable for components with poor thermal stability and easy hydrolysis
同时蒸馏萃取法 Simultaneous distillation extraction	将待测样品溶液与有机溶剂一起加热至沸腾, 通过冷凝过程将待测样品转移到有机溶剂中, 再从中提取挥发性物质 The sample solution to be tested is heated to boiling together with the organic solvent, and the sample to be tested is transferred to the organic solvent by the condensation process, from which the volatile substances are extracted	应用较广泛, 更适合萃取高沸点低挥发性物质 It is widely used and more suitable for extracting high boiling point and low volatile substances	操作简单、重复性较好、萃取量大、溶剂使用量小 Simple operation, good repeatability, large extraction volume, small solvent use	操作温度较高, 不利于热不稳定性差的成分 The high operating temperature is not conducive to the components with poor thermal instability
超临界萃取技术 Supercritical fluid extraction	使处于超临界状态的超临界流体与待测组分充分接触, 通过调节压力和温度条件, 对其中的组分有选择地萃取分离 The supercritical fluid in the supercritical state is fully contacted with the components to be tested, and the components are selectively extracted and separated by adjusting the pressure and temperature conditions	应用较广泛 Widely applied	操作简单, 省时省力, 绿色环保 Simple operation, save time and effort, green and environmentally friendly	设备及工艺要求较高, 成本较大 Equipment and process requirements are higher, high cost
固相微萃取法 Solid phase micro-extraction	利用待测物 and 被测物之间“相似相溶”的性质, 从萃取头表面覆盖的一层多孔吸附涂层物理吸附样品中的目标物质 Using the “similar phase dissolution” properties between the material and the measured material, the target material in the physicose sample is physically adsorbed from a porous adsorbent coating covered by the extraction head surface	适用于萃取微量的、挥发性较好的物质 Suitable for extraction of volatile substances	高效, 操作简单, 绿色环保 Efficient, simple operation, green and environmentally friendly	萃取容量有限, 不适用于挥发性差的化合物, 且萃取头昂贵、易损耗, 导致中后期重复性较差 Extraction capacity is limited and not suitable for poorly volatile compounds, moreover, the extraction head is expensive and easy to lose, resulting in poor repetition in the middle and late period

取于一体的新型萃取技术。其操作过程为：在提取罐中使处于超临界状态的超临界流体与待测组分充分接触，通过调节提取罐中的压力和温度条件，对其中的组分有选择地萃取分离并实现超临界流体的循环利用<sup>[33]</sup>。例如，兰蓉等<sup>[34]</sup>采用超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法，通过优化萃取工艺条件，再结合气相色谱-质谱联用技术分析鉴定白灵菇的挥发性风味成分，结果表明游离有机酸类化合物含量最高，其次是酯类、嘧啶类化合物。李双石等<sup>[35]</sup>利用超临界 CO<sub>2</sub> 萃取技术，并通过正交实验研究了影响提取率的因素，最终获得了鸡腿菇挥发性香味物质的最优提取工艺。超临界萃取法操作简单、省时省力，而且由于 CO<sub>2</sub> 超临界流体只对溶质起作用，不会改变其他成分，萃取残渣可以进一步利用。在食用菌中，这种技术被应用于挥发性风味物质的提取，也多应用于灵芝孢子油产品的生产<sup>[36]</sup>，所以是一种新型绿色环保的友好型技术，该技术在食品工业中应用非常广泛<sup>[37]</sup>。

#### 2.1.4 固相微萃取法

固相微萃取(solid phase micro-extraction, SPME)法是一种新兴的样品前处理和富集方法，在萃取头表面镀一层涂层，利用待测物 and 被测物之间“相似相溶”的性质，从样品中快速富集出目标化合物，从而代替传统的萃取过程。余昌霞等<sup>[38]</sup>采用固相微萃取对香菇样品进行萃取，共鉴定得到相对质量分数高于 0.5% 的挥发性风味成分 79 种。吕艳杰<sup>[31]</sup>采用固相微萃取对双孢蘑菇的挥发性风味物质进行提取，在这种方法下鉴定出 34 种风味化合物。顶空进样技术(headspace injection, HS)是从色谱出现初期就存在的一种技术，固相微萃取常与顶空进样技术结合，广泛应用于从液体或固体样品的基体中分离出来的挥发物质的检测<sup>[39]</sup>。在研究 1-MCP 喷雾剂对收获前和收获后金针菇鲜味和

香味的影响时，Xia 等<sup>[40]</sup>使用顶空气相固相微萃取(headspace solid phase microextraction, HS-SPME)技术，结合气相色谱-质谱分析技术，从金针菇萃取物中共分离得到 33 种挥发性成分，酮类和碳氢类化合物是鲜菇的主要挥发性成分，各样品中的挥发性成分的总含量均随贮藏时间的增加而降低。余昌霞等<sup>[41]</sup>利用 HS-SPME-GC-MS 分析了 5 种不同培养料栽培的草菇子实体的挥发性物质，共鉴定到 38 种风味化合物，经过主成分分析发现，异戊醛、己醛、1-辛烯-3-醇等对子实体香味的影响较大。李翔等<sup>[42]</sup>利用 HS-SPME-GC-MS 分析了野生和人工栽培羊肚菌的挥发性物质，在这项研究中，共鉴定了 42 种挥发性成分；野生羊肚菌中检测出 24 种挥发性成分，其中正己醛的相对含量最高；而从人工栽培条件下的羊肚菌中检测出 29 种挥发性有机物，相对含量最高的是甲酸己酯。相较于传统的萃取工艺，固相微萃取技术对挥发性物质的吸附作用更加高效，具有快速、简便、环保、灵敏度高等优点。

## 2.2 挥发性香味物质的鉴定

将挥发性香味物质从食用菌样品中萃取、分离之后，需要对其组成进行鉴定，不同的鉴定方法各有优缺点，目前，食用菌中挥发性香味物质的常见鉴定方法见表 2。

### 2.2.1 气相色谱-质谱

气相色谱-质谱已被广泛应用于食用菌挥发性香味物质的分离鉴定中，能够高效分离、检测和识别化合物，并对化合物进行定量。马琦等<sup>[43]</sup>利用 GC-MS 技术对杏鲍菇干制前后的挥发性物质进行了测定，共检测出 99 种挥发性成分。Aisala 等<sup>[44]</sup>利用气相色谱-嗅觉法和气相色谱-质谱法对 4 种芬兰野生蘑菇的挥发性香味物质进行表征，主要为醛类、酮类、烃类和硫类化合物。闫素君等<sup>[17]</sup>对 4 个双孢菇样品的挥

表 2 挥发性香味物质的分离鉴定方法比较

Table 2 Comparison of the separation and identification methods of volatile odour components

Item	气相色谱-质谱 Gas chromatography-mass spectrum	气相色谱-离子迁移谱 Gas chromatography-ion migration spectrum
原理 Principle	通过气相色谱先将样品混合物经过色谱柱根据吸附能力分离, 然后引入质谱检测器, 在离子源中发生电离生成带有正电荷的离子, 在电场和磁场的作用下分离, 离子荷质比确定各组分 Through gas chromatography, the sample mixture is separated through the chromatography column according to the adsorption capacity, and then introduced into the mass spectrum detector, ionized in the ion source to generate positively charged ions, separated under the action of electric field and magnetic field, and determine the components according to the ionic lotus ratio	在离子迁移谱中, 分子通过高电压电离, 形成离子, 然后沿着管道漂移, 最后到达离子探测器 In the ion migration spectrum, the molecules ionized by high voltage to form ions, then drift along the pipeline and finally reach the ion detector
适用性 Applicability	对复杂的混合物进行分离和识别, 从而确定其中的成分 Complex mixtures are separated and identified to determine the components	适用于极微量检测和高灵敏度分析 It is suitable for extremely trace detection and high sensitivity analysis
优点 Advantage	无须制备标准样品, 与固相微萃取联用操作时间短、样品量少、无须萃取溶剂、重现性好 No need to prepare standard samples, combined with solid phase microextraction with short operation time, less sample volume, no solvent extraction, good reproducibility	分辨率高、分析速度快、检测灵敏度高 High resolution, fast analysis and high detection sensitivity
缺点 Disadvantage	涂层易破损, 设备的体积较大, 寿命较短 The coating is easy to damage, and the equipment has a large volume and a short life	操作温度较高, 不利于热不稳定性差的成分 The high operating temperature is not conducive to the components with poor thermal instability

发油利用水蒸气蒸馏法结合气相色谱-质谱进行定性和定量分析, 研究发现, 西藏地区两个野生双孢菇在人工培养条件下具有较高含量的挥发性成分, 而另一个内地引进的品种则略有不同; 但是相较于西藏地区, 来自广州的双孢菇的样品挥发性成分和含量有很大的差异。黄兰兰等<sup>[45]</sup>对云南 5 种常见野生食用菌的挥发性香味物质进行分析, 鉴定得到 3-辛醇、大叶香烯、 $\alpha$ -蒎烯、3-辛酮、1-辛烯-3-醇分别是其含量最丰富的成分。气相色谱-质谱联用技术对样品的检测纯度有一定要求, 并且不适用于热不稳定的化合物。

气相色谱-质谱是联用技术领域最活跃的一项, 固相微萃取与气相色谱-质谱联用具有操

作时间短、样品用量小、不需要萃取溶剂、重现性好等优点<sup>[46]</sup>, 成为食用菌风味分析中广泛应用的方法。刘静等<sup>[47]</sup>运用固相微萃取和气相色谱-质谱联用技术, 对比分析了不同干制方法前后香菇香味组分的变化, 研究结果显示, 在香菇干制过程中, 醇类、酮类、酸类及含硫类挥发性香味物质受到干制方式的显著影响, 香菇中的醇类、酮类化合物含量减少, 酸类化合物增加。此外, 除了自然干制外, 含硫类化合物的含量均有大幅增加。杨仁军等<sup>[48]</sup>利用 HS-SPME-GC-MS 联用技术对不同云南野生食用菌鸡汤的挥发性香味物质组成和含量进行分析, 结果表明, 在添加野生食用菌后, 鸡汤中各种挥发性香味物质的含量都发生了明显变

化。Tian 等<sup>[49]</sup>用 HS-SPME-GC-MS 分析牛肝菌和云南鸡油菌的香味物质, 分别鉴定出 51 种和 69 种挥发性化合物, 其中包含 24 种常见化合物, 这类化合物以烃、酮、酯、醛、醇等为主。张宪臣等<sup>[50]</sup>为了解猴头菇、榛菇、黄蘑菇、香菇和松茸挥发性成分的异同, 采用顶空固相微萃取-气质联用技术, 对 5 种食用菌的挥发性香味物质进行了深入研究, 共鉴定到 121 种挥发性物质, 并鉴定到区别 5 种食用菌样品的主要特征性化合物, 主要有正己醇、1-辛烯-3-醇、丙基环戊醇和肉桂酸甲酯等。包陈力根等<sup>[51]</sup>以大球盖菇为研究对象, 采用 HS-SPME-GC-MS 对挥发性风味化合物进行定性定量分析, 共鉴定出挥发性香味物质 87 种, 其中醇类和酯类化合物的种类最多, 分别为 18 种和 17 种, 其次是醛类和酮类化合物。固相微萃取与气相色谱-质谱联用技术集萃取、解析、进样和检测于一体, 较其他方法更加高效, 但是这种技术也存在一些弊端, 比如涂层易破损, 设备的体积较大, 寿命较短。

### 2.2.2 气相色谱-离子迁移谱

气相色谱-离子迁移谱(gas chromatography-ion migration spectrum, GC-IMS)是近期出现的一项创新技术, 专门用于对样本中的挥发性化合物进行分析。主要采用气相色谱技术来分离样本中的多种化学物质, 然后通过离子迁移光谱技术进行检测。目前在对香味物质的研究中, GC-IMS 由于分辨率高、分析速度快、检测灵敏度高优点广泛应用于酒类、肉类和蔬果类等的挥发性物质分析鉴定, 而在食用菌香味物质分析中的应用较少。Yang 等<sup>[52]</sup>采用 GC-IMS 从牛肝菌中共鉴定出 84 个已知化合物, 醛类、酮类和醇类是主要的挥发性香味物质。董浩然等<sup>[53]</sup>利用 GC-IMS 研究了 2 个香菇品种在不同菌龄时的挥发性有机物的差异, 通过这项研究, 得出了不同菌龄阶段特有的挥发性有机物特

征。Li 等<sup>[54]</sup>采用顶空气相色谱-离子迁移谱法(headspace-gas chromatography-ion migration spectrum, HS-GC-IMS)分析了在不同加热温度和时间条件下油炸松茸中挥发性化合物的变化, 确定了 40 个信号峰相关的 24 种化合物, 这些化合物主要包括醛类、酮类和醇类化合物, 并明确了加热温度比加热时间对挥发性物质的影响更加显著。气相色谱-离子迁移谱技术的检测限低、灵敏度高, 适用于痕量组分分析检测, 检测速度快, 因此更能够真实反映样品的香味成分特征, 特别是能够相对真实地检出食用菌中一些热稳定性较差的香味成分, 从而有助于食用菌的香味成分分析。

以上两种技术均被广泛应用于食用菌挥发性香味物质的检测, GC-MS 多与顶空固相微萃取技术联用, 技术更成熟、谱库更全; GC-IMS 则在挥发性物质痕量检测方面更有优势, 特别是针对含量少但对香味有突出贡献的挥发性物质的检测和分析能发挥重要作用。

## 3 总结与展望

食用菌挥发性香味物质组成复杂、风味独特、营养丰富。研究人员对食用菌挥发性香味物质做了诸多探索, 但是仍然需要更多的研究来充分了解食用菌的香味物质。食用菌挥发性香味物质除了含硫化合物、八碳化合物外, 还含有萜烯类、醛类、酮类、酯类、酸类等其他化合物, 众多组分协同作用形成了食用菌的特征香味。就目前而言, 香味成分形成影响因素、特征性挥发性有机化合物的生物合成途径、代谢途径的研究还需要深入研究。快速高效地对食用菌中的挥发性香味物质进行提取、分离和定性定量分析是进一步研究的基础。本文论述了有效的分离鉴定技术, 水蒸气蒸馏法、同时蒸馏萃取法、超临界萃取和固相微萃取适用于各种食用菌挥



发性香味物质的萃取和分离,其中固相微萃取法相较于水蒸气蒸馏法和超临界萃取更加常用,这取决于它集采样、萃取、浓缩、进样于一体并且灵敏、高效的优点。食用菌挥发性香味物质的种类和数量差异大,有的挥发性成分不稳定,新兴的分析鉴定方法的应用有助于食用菌香味物质的研究。GC-MS 是食用菌香味物质分析中应用较为广泛的方法,能够高效地分离、检测和识别化合物,GC-IMS 是近几年新兴的一种用于分析样本中挥发性物质的检测方法,由于其无须样品前处理、操作方便的特点,在食用菌的挥发性物质研究中也逐渐得到广泛应用。上述方法都有助于对食用菌挥发性香味物质种类和含量进行全面的分析,有助于了解这些挥发性物质和食用菌香味之间的关系,为食用菌香味物质研究及更好地开发食用菌产品提供参考。

## REFERENCES

- [1] 张志秀. 食用菌的活性成分及其安全检测分析研究[J]. 食品安全导刊, 2021(31): 99-102.  
ZHANG ZX. Study on active components and safety detection of edible fungi[J]. China Food Safety Magazine, 2021(31): 99-102 (in Chinese).
- [2] 刘培基, 崔文甲, 王文亮, 弓志青, 杨正友. 食用菌风味物质及其在美拉德反应中的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(15): 188-193.  
LIU PJ, CUI WJ, WANG WL, GONG ZQ, YANG ZY. Research progress of edible fungi flavor substances and their application in Maillard reaction[J]. Food Research and Development, 2020, 41(15): 188-193 (in Chinese).
- [3] 于梓芑, 李宁阳, 弓志青, 王文亮, 贾凤娟, 崔文甲, 徐宗海, 宋莎莎, 李永生. 食用菌呈味物质及其检测技术、应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(2): 373-379.  
YU ZP, LI NY, GONG ZQ, WANG WL, JIA FJ, CUI WJ, XU ZH, SONG SS, LI YS. Research progress on edible fungus flavor substances and their detection technology and application[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(2): 373-379 (in Chinese).
- [4] ZHU RY, WEN YX, WU WH, ZHANG LZ, FARID MS, SHAN S, WEN JH, FARAG MA, ZHANG YY, ZHAO C. The flavors of edible mushrooms: a comprehensive review of volatile organic compounds and their analytical methods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022: 1-15.
- [5] 侯会, 陈鑫, 方东路, 郑惠华, 赵立艳. 干燥方式对食用菌风味物质影响研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(15): 4877-4883.  
HOU H, CHEN X, FANG DL, ZHENG HH, ZHAO LY. Research progress on influence of drying methods on flavor compounds of edible fungus[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(15): 4877-4883 (in Chinese).
- [6] 陈道游, 陈万超, 王光强, 李文, 杨焱. 香菇特征风味物质产生机制及感知过程研究进展[J]. 食用菌学报, 2023, 30(4): 97-107.  
CHEN DY, CHEN WC, WANG GQ, LI W, YANG Y. Research progress on the formation mechanism and perception process of characteristic flavor substances in *Lentinula edodes*[J]. Acta Edulis Fungi, 2023, 30(4): 97-107 (in Chinese).
- [7] 郑建仙. 福建香菇风味物质的分离与鉴定[J]. 中国食用菌, 1995, 14(6): 3-6.  
ZHENG JX. Isolation and identification of flavor substances from *Lentinus edodes* in Fujian[J]. Edible Fungi of China, 1995, 14(6): 3-6 (in Chinese).
- [8] MORITA K, KOBAYASHI S. Isolation and synthesis of lenthionine, an odorous substance of shiitake, an edible mushroom[J]. Tetrahedron Letters, 1966, 7(6): 573-577.
- [9] 李文, 杨焱, 陈万超, 张劲松, 于海龙, 沈学香. 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 WC, ZHANG JS, YU HL, SHEN XX. Effect of drying method on sulfur-containing components in *Lentinula edodes*[J]. Acta Edulis Fungi, 2018, 25(4): 71-79 (in Chinese).
- [10] 郭磊, 李为兰, 鲁斌, 王德新, 刘云, 王军民. 响应面优化 HS-SPME-GC-MS 法分析美味牛肝菌挥发性风味物质[J]. 中国调味品, 2023, 48(2): 163-168.  
GUO L, LI WL, LU B, WANG DX, LIU Y, WANG JM. Optimization of HS-SPME-GC-MS method for analysis of volatile flavor substances from *Boletus edulis* Bull. by response surface methodology[J]. China Condiment, 2023, 48(2): 163-168 (in Chinese).
- [11] 谷镇. 食用菌呈香呈味物质分析及制备工艺研究[D]. 上海: 上海师范大学硕士学位论文, 2012.  
GU Z. Study on the determination of flavor substances and preparation technology[D]. Shanghai: Master's Thesis of Shanghai Normal University, 2012 (in Chinese).
- [12] BADENHOP AF, WILKENS WF. The formation of 1-octen-3-ol in soybeans during soaking[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 1969, 46(3): 179-182.

- [13] 程玉, 孙进, 叶兴乾, 吕兵兵, 储银, 陈健初. 食用菌风味物质研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(10): 412-414.  
CHENG Y, SUN J, YE XQ, LV BB, CHU Y, CHEN JC. Advances on flavor substances of edible mushrooms[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(10): 412-414 (in Chinese).
- [14] YIN CM, FAN XZ, FAN Z, SHI DF, YAO F, GAO H. Comparison of non-volatile and volatile flavor compounds in six *Pleurotus* mushrooms[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(4): 1691-1699.
- [15] 姜宁, 董浩然, 李巧珍, 李玉, 周峰, 李正鹏. 不同光质培养下香菇挥发性风味物质的比较分析[J]. 上海农业学报, 2023, 39(6): 32-40.  
JIANG N, DONG HR, LI QZ, LI Y, ZHOU F, LI ZP. Comparative analysis of volatile components of *Lentinus edodes* cultured with different light illumination[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2023, 39(6): 32-40 (in Chinese).
- [16] LI MQ, YANG RW, ZHANG H, WANG SL, CHEN D, LIN SY. 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.
- [17] 闫素君, 谢惜媚, 林素贞, 徐爱国, 蒋思萍, 陈彬, 刘在民, 刘岚. 西藏产双孢菇(*Agaricus bisporus*)挥发性呈香成分初探[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2015, 54(1): 70-73, 78.  
YAN SJ, XIE XM, LIN SZ, XU AG, JIANG SP, CHEN B, LIU ZM, LIU L. Study on volatile flavor components from *Agaricus bisporus* of Xizang[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2015, 54(1): 70-73, 78 (in Chinese).
- [18] 彭秋菊, 严江, 陈国平, 蔡艳梅, 苗志伟. 牛肝菌挥发性风味物质的研究进展[J]. 食品科技, 2022, 47(6): 127-132, 139.  
PENG QJ, YAN J, CHEN GP, QI YM, MIAO ZW. Research on volatile flavor compounds of *Boletus*[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(6): 127-132, 139 (in Chinese).
- [19] ZHANG YM, LI XB, ZHAO ZY, HENGCHAO E, FAN TT, DONG H, HE XW, ZHAO XY, TANG LH, ZHOU CY. Comprehensive investigation on non-volatile and volatile flavor compounds in the *Morchella sextelata* and *Morchella importuna* by UPLC-MS/MS and GC×GC-TOF-MS[J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100961.
- [20] 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.  
YIN CM, FAN XZ, FAN Z, SHI DF, GAO H. Analysis of volatile flavor compounds in different *Pleurotus* species using HS-SPME-GC-MS[J]. Food Science, 2018, 39(16): 240-246 (in Chinese).
- [21] 冯涛, 水梦竹, 李雪, 宋诗清, 庄海宁, 张劲松. 食用菌风味物质的研究进展[J]. 食用菌学报, 2018, 25(4): 97-104.  
FENG T, SHUI MZ, LI X, SONG SQ, ZHUANG HN, ZHANG JS. Advances in flavor substances research in edible mushrooms[J]. Acta Edulis Fungi, 2018, 25(4): 97-104 (in Chinese).
- [22] 谷镇, 杨焱. 食用菌呈香呈味物质研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(5): 363-367.  
GU Z, YANG Y. Research progress in flavor components of edible fungus[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(5): 363-367 (in Chinese).
- [23] 关小莺, 黄康艳, 谢意珍, 陈少丹. 赤芝挥发性成分分析及特征指纹图谱构建[J]. 食用菌学报, 2019, 26(3): 113-118.  
GUAN XY, HUANG KY, XIE YZ, CHEN SD. Volatile components of *Ganoderma lucidum* and establishment of the fingerprint chromatography[J]. Acta Edulis Fungi, 2019, 26(3): 113-118 (in Chinese).
- [24] 王娟, 游金坤, 邓雅元, 吴素蕊, 杨璐敏, 孙达锋. 不同品种灵芝子实体挥发性成分分析[J]. 中国食用菌, 2021, 40(11): 56-62.  
WANG J, YOU JK, DENG YY, WU SR, YANG LM, SUN DF. Analysis on volatile components in fruit bodies of different varieties of *Ganoderma lucidum*[J]. Edible Fungi of China, 2021, 40(11): 56-62 (in Chinese).
- [25] 王婷婷, 严明, 邓雅元, 杨璐敏. 云南黑虎掌菌挥发性成分分析[J]. 中国食用菌, 2020, 39(6): 17-20.  
WANG TT, YAN M, DENG YY, YANG LM. Analysis on volatile flavor substance of *Sarcodon imbricatus* in Yunnan[J]. Edible Fungi of China, 2020, 39(6): 17-20 (in Chinese).
- [26] GUO QY, ADELINA NM, HU JT, ZHANG LG, ZHAO YH. Comparative analysis of volatile profiles in four pine-mushrooms using HS-SPME/GC-MS and E-nose[J]. Food Control, 2022, 134: 108711.
- [27] 程聪慧, 刘思梦, 李彦增, 杨冉, 屈凌波, 曾华金. 水蒸气蒸馏提取联合顶空进样 GC-MS 分析白灵菇子实体挥发性成分[J]. 中国食用菌, 2023, 42(5): 52-57.  
CHENG CH, LIU SM, LI YZ, YANG R, QU LB, ZENG HJ. Analysis of volatile components in fruit body of *Pleurotus tuoliensis* by stream distillation and headspace injection gas chromatography-mass

- spectrometry (GC-MS) method[J]. *Edible Fungi of China*, 2023, 42(5): 52-57 (in Chinese).
- [28] 连希希, 孙佳宁, 孙伶俐, 刘佳, 王联芝, 段正超. 不同方法提取香菇中挥发性成分的测定[J]. *中国酿造*, 2022, 41(6): 237-242.  
LIAN XX, SUN JN, SUN LL, LIU J, WANG LZ, DUAN ZC. Determination of volatile components extracted by different methods from *Lentinus edodes*[J]. *China Brewing*, 2022, 41(6): 237-242 (in Chinese).
- [29] 郭磊, 阚欢, 范方宇, 张雪春, 刘云. SDE/GC-MS 对云南美味牛肝菌挥发性风味物质的分析[J]. *食用菌*, 2016, 38(5): 57-59.  
GUO L, KAN H, FAN FY, ZHANG XC, LIU Y. Analysis of volatile flavors of *Boletus edulis* in Yunnan by SDE/GC-MS[J]. *Edible Fungi*, 2016, 38(5): 57-59 (in Chinese).
- [30] 李秦, 海洋, 师会勤, 杜阅光, 席宇, 郭灵燕, 朱大恒. 平菇与香菇挥发性香气成分的 GC-MS 分析比较[J]. *化学与生物工程*, 2010, 27(2): 87-89.  
LI Q, HAI Y, SHI HQ, DU YG, XI Y, GUO LY, ZHU DH. Analysis of volatile aroma components of *Pleurotus ostreatus* and *Lentinus edodes* with gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2010, 27(2): 87-89 (in Chinese).
- [31] 吕艳杰. 同时蒸馏萃取和固相微萃取对双孢蘑菇风味物质的提取分析[J]. *食品科学*, 2015, 36(10): 185-188.  
LV YJ. Comparative application of SDE and SPME for analysis of aroma-active compounds in button mushroom (*Agaricus bisporus*)[J]. *Food Science*, 2015, 36(10): 185-188 (in Chinese).
- [32] 黄明泉, 田红玉, 孙宝国, 陈海涛, 姜远宁. 同时蒸馏萃取-气质联用分析竹荪挥发性成分[J]. *食品科学*, 2011, 32(2): 205-212.  
HUANG MQ, TIAN HY, SUN BG, CHEN HT, JIANG YN. Simultaneous distillation extraction and GC-MS analysis of volatile components in *Dictyophora indusiata* fishch[J]. *Food Science*, 2011, 32(2): 205-212 (in Chinese).
- [33] 杜方岭, 王文亮, 王兆华. 超临界流体萃取技术在食品中的应用研究[J]. *农产品加工(学刊)*, 2008(9): 7-9.  
DU FL, WANG WL, WANG ZH. Application of supercritical fluid extraction methods in food fields[J]. *Academic Periodical of Farm Products Processing*, 2008(9): 7-9 (in Chinese).
- [34] 兰蓉, 危晴, 马越, 陈亮, 李双石. 白灵菇风味成分的超临界 CO<sub>2</sub> 萃取研究及 GC-MS 分析[J]. *食品科技*, 2012, 37(3): 283-286.  
LAN R, WEI Q, MA Y, CHEN L, LI SS. Extraction of flavor compounds in *Pleurotus ferulae* by supercritical CO<sub>2</sub> and GC-MS analysis[J]. *Food Science and Technology*, 2012, 37(3): 283-286 (in Chinese).
- [35] 李双石, 兰蓉, 张晓辉, 马越, 陈亮. 超临界 CO<sub>2</sub> 萃取鸡腿菇中的挥发性风味成分[J]. *食品科学*, 2011, 32(2): 240-243.  
LI SS, LAN R, ZHANG XH, MA Y, CHEN L. Supercritical carbon dioxide fluid extraction and GC-MS analysis of volatile flavor compounds in *Coprinus comatua* fruiting body[J]. *Food Science*, 2011, 32(2): 240-243 (in Chinese).
- [36] 陈体强, 吴锦忠. 超微粉碎后超临界 CO<sub>2</sub> 萃取灵芝孢子挥发油组分的 GC-MS 分析[J]. *天然产物研究与开发*, 2006, 18(6): 982-985.  
CHEN TQ, WU JZ. GC-MS analysis of *Ganoderma lucidum* spores essential oil extracted by supercritical CO<sub>2</sub> after sporeoderm-cracking[J]. *Natural Product Research and Development*, 2006, 18(6): 982-985 (in Chinese).
- [37] 郭晓双, 姚冬, 王江洁, 王营娟, 张艳霞. 超临界 CO<sub>2</sub> 萃取技术在食品工业的应用研究[J]. *现代食品*, 2023, 29(14): 93-96.  
GUO XS, YAO D, WANG JJ, WANG YJ, ZHANG YX. Application research of supercritical CO<sub>2</sub> extraction technology in the food industry[J]. *Modern Food*, 2023, 29(14): 93-96 (in Chinese).
- [38] 余昌霞, 汪虹, 赵妍, 陈明杰, 宋晓霞, 李正鹏, 奚莉萍, 张美彦, 王晨光. 两个香菇菌株的挥发性物质比较[J]. *食用菌学报*, 2017, 24(4): 65-70.  
YU CX, WANG H, ZHAO Y, CHEN MJ, SONG XX, LI ZP, XI LP, ZHANG MY, WANG CG. Comparison of volatile components in two *Lentinula edodes* strains by SPME-GC-MS[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2017, 24(4): 65-70 (in Chinese).
- [39] 程晓昆, 张亚芳, 王娅莉, 刘月, 张晴, 孙勇军. 顶空-固相微萃取技术在药品残留溶剂测定中的应用[J]. *当代化工研究*, 2018(5): 97-99.  
CHENG XK, ZHANG YF, WANG YL, LIU Y, ZHANG Q, SUN YJ. Application of headspace solid phase micro-extraction in determination of residual solvents in pharmaceuticals[J]. *Modern Chemical Research*, 2018(5): 97-99 (in Chinese).
- [40] XIA RR, WANG L, XIN G, BAO XJ, SUN LB, XU HR, HOU ZS. Preharvest and postharvest applications of 1-MCP affect umami taste and aroma profiles of mushrooms (*Flammulina velutipes*)[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 144: 111176.
- [41] 余昌霞, 赵妍, 陈明杰, 汪虹, 李正鹏, 潘桂芳, 冯爱萍. 利用不同培养料栽培的草菇子实体挥发性风

- 味成分分析[J]. 食用菌学报, 2019, 26(2): 37-44.
- YU CX, ZHAO Y, CHEN MJ, WANG H, LI ZP, PAN GF, FENG AP. Analysis of volatile flavor components in *Volvariella volvacea* fruiting bodies cultivated on different substrates[J]. Acta Edulis Fungi, 2019, 26(2): 37-44 (in Chinese).
- [42] 李翔, 钟方友, 凌云坤, 邓杰, 刘达玉, 徐艺丹, 王秋果. HS/SPME-GC/MS 法比较分析野生与人工栽培羊肚菌挥发性成分[J]. 食品工业科技, 2018, 39(17): 225-228, 234.
- LI X, ZHONG FY, LING YK, DENG J, LIU DY, XU YD, WANG QG. Comparative analysis of the volatile component from wild and cultivated *Morchella* by HS/SPME-GC/MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(17): 225-228, 234 (in Chinese).
- [43] 马琦, 伯继芳, 冯莉, 佺逸凡, 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.
- MA Q, BO JF, FENG L, NAI YF, WANG XJ, LI M, XU HD. Effect of drying method on volatile components of *Pleurotus eryngii* analyzed by combined use of GC-MS and electronic nose[J]. Food Science, 2019, 40(14): 276-282 (in Chinese).
- [44] AISALA H, SOLA J, HOPIA A, LINDERBORG KM, SANDELL M. Odor-contributing volatile compounds of wild edible Nordic mushrooms analyzed with HS-SPME-GC-MS and HS-SPME-GC-O/FID[J]. Food Chemistry, 2019, 283: 566-578.
- [45] 黄兰兰, 陈高, 于富强. 五种野生食用菌挥发性成分研究[J]. 食用菌, 2018, 40(2): 80-84.
- HUANG LL, CHEN G, YU FQ. Analysis on volatile components from five edible wild mushrooms[J]. Edible Fungi, 2018, 40(2): 80-84 (in Chinese).
- [46] 陈万超, 杨焱, 李文, 蒋俊, 于海龙, 冯杰, 李晓贝, 刘昆. 香菇挥发性成分 SPME-GC-MS 分析及特征指纹图谱的建立[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(10): 1074-1080.
- CHEN WC, YANG Y, LI W, JIANG J, YU HL, FENG J, LI XB, LIU K. Analysis of volatile components in *Lentinula edodes* by SPME-GC-MS and establishment of fingerprint[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2016, 35(10): 1074-1080 (in Chinese).
- [47] 刘静, 薛佳俐, 冯翠萍. 不同干制方式对香菇挥发性成分的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(18): 224-229.
- LIU J, XUE JL, FENG CP. Effects of different drying methods on volatile flavor compounds in *Lentinula edodes*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(18): 224-229 (in Chinese).
- [48] 杨仁军, 张秀萍, 金怀慷, 肖智超, 葛长荣, 徐志强. 3 种云南野生食用菌对鸡汤滋味和挥发性风味的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(17): 150-159.
- YANG RJ, ZHANG XP, JIN HK, XIAO ZC, GE CR, XU ZQ. Effect of three kinds of wild edible fungi from Yunnan on taste and flavor volatiles of chicken soup[J]. Food Research and Development, 2022, 43(17): 150-159 (in Chinese).
- [49] TIAN R, LIANG ZQ, WANG Y, ZENG NK. Analysis of aromatic components of two edible mushrooms, *Phlebopus portentosus* and *Cantharellus yunnanensis* using HS-SPME/GC-MS[J]. Results in Chemistry, 2022, 4: 100282.
- [50] 张宪臣, 刘恭源, 张静, 邱德义. 五种食用菌挥发性成分比较分析[J]. 现代食品科技, 2019, 35(8): 226-235.
- ZHANG XC, LIU GY, ZHANG J, QIU DY. Comparative analysis of volatile components of five kinds of edible fungi[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(8): 226-235 (in Chinese).
- [51] 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]. 食品科学, 2022, 43(14): 226-233.
- BAO C, GUAN CB, XIN MH, TENG X, LIU TT, WANG DW. Effect of roasting on volatile flavor compounds of *Stropharia rugoso-annulata* analyzed by headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry combined with electronic nose[J]. Food Science, 2022, 43(14): 226-233 (in Chinese).
- [52] YANG N, ZHANG SS, ZHOU P, ZHANG WS, LUO XL, CAO JJ, SUN DF. Analysis of volatile flavor substances in the enzymatic hydrolysate of *Lanmaoa asiatica* mushroom and its Maillard reaction products based on E-nose and GC-IMS[J]. Foods, 2022, 11(24): 4056.
- [53] 董浩然, 陆欢, 姜宁, 李巧珍, 李玉, 尚晓冬, 李正鹏, 王作录, 宋春艳, 周峰. GC-IMS 分析不同菌龄香菇挥发性有机物的差异[J]. 菌物学报, 2023, 42(6): 1330-1344.
- DONG HR, LU H, JIANG N, LI QZ, LI Y, SHANG XD, LI ZP, WANG ZL, SONG CY, ZHOU F. GC-IMS analyses of volatile organic compounds in *Lentinula edodes* at different ages[J]. Mycosystema, 2023, 42(6): 1330-1344 (in Chinese).
- [54] LI MQ, DU HT, LIN SY. Flavor changes of *Tricholoma matsutake* singer under different processing conditions by using HS-GC-IMS[J]. Foods, 2021, 10(3): 531.