

文章编号:1673-1689(2009)01-0001-07

# 食用蘑菇产天然挥发性风味化合物研究进展

吴时敏

(上海交通大学 农业与生物学院, 上海 200240)

**摘要:** 综述了近年来关于蘑菇中挥发性化合物的研究概况, 展望了利用蘑菇生产挥发性风味化合物的前景。蘑菇的挥发性次级代谢产物包含了巨大的天然化合物多样性。研究食用蘑菇中的挥发性风味化合物不仅具有理论重要性, 而且具有巨大的商业潜力和环境效益。广泛调查和分析野生蘑菇子实体的挥发性次级代谢产物组成, 不仅是揭示挥发性化合物形成路径的基点, 而且是进行重要或新型天然挥发性化合物的生物合成和工业开发的前提。

**关键词:** 挥发性风味; 天然化合物; 蘑菇; 野生子实体; 生物合成

**中图分类号:** TS 201.2; TQ 65; Q-9

**文献标识码:** A

## Progress in Natural Volatile Flavor Compounds from Edible Mushrooms

WU Shi-min

(College of Agriculture and Biology, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Volatile secondary metabolites of mushrooms comprise a wide diversity of natural compounds. Studies on volatile flavors from edible mushrooms are both of theoretical significance, of enormous commercial potential, and of environmental benefit. A comprehensive investigation on volatile secondary metabolites from wild fruiting bodies of mushrooms is not only a basic start to reveal the pathways of flavor formation, but also a key prerequisite for biosynthesis and industrial development of important or new natural volatile flavors. Recent researches on volatile flavors from mushrooms are briefly reviewed. The future of volatile flavors produced by edible mushroom fungi was suggested.

**Key words:** volatile flavor, natural compounds, mushrooms, wild fruiting bodies, biosynthesis

蘑菇是真菌大家族中的一类。真菌因代谢通用性、生态差异性、复杂的生命圈, 以及在自然界中不可或缺的地位, 而受到化学家、生化学家、生物学家、生态学家的多视角关注。利用真菌生产具有高商业价值的产品虽然已有很长的历史, 但这种趋势得以急剧增长还是近半个世纪以来的事。

通常, 蘑菇被描述为显著子实体的大型真菌, 其子实体大到足以被人的裸眼看得见并可用手采摘。据此定义, 自然界目前发现有 12 000 多种蘑菇, 它们中至少 2 000 种是可食用的<sup>[1]</sup>。现代分子生物学技术已经揭示, 基于形态学上分类的同一种名的蘑菇可能在自然界中包含许多亚种, 蘑菇菌种的

收稿日期: 2007-11-23

基金项目: 上海市登山行动计划专项(06DZ05036); 上海交通大学引进人才启动基金项目(AE150079)。

作者简介: 吴时敏(1970-), 男, 湖北孝感人, 理学博士, 副教授, 主要从事食品质量与安全、食品化学生物学研究(油脂、风味方向)。Email: wu\_shimin\_sci@yahoo.com

数量远比人们目前已知的多得多。

蘑菇在古代就已成为人类膳食的一部分。人们俗称的香菇,早在公元1 000至1 100年间,首先在中国得到人工培植<sup>[2]</sup>。至今,采用大型真菌生产食物,是利用木质素废弃物最为环保又产生显著经济效益的方式。近来,食用蘑菇的消费量和种类都得到了大幅度攀升。蘑菇已被公认不仅是一种富含蛋白质的食物,而且还是产生具有生理和药理活性的次生代谢产物的重要生物资源。几个世纪以来,主要在东亚,有200多种野生蘑菇被采集作为各种传统医药材料,而且没有发现药物副反应。食用蘑菇中许多具有药理活性的分子,包括挥发性化合物,在近些年已经被鉴定。

除食用、药用外,许多食用蘑菇因其独特诱人的风味而受到消费者的青睐,也引发了食品科学、香料香精科学界的高度关注。古罗马皇帝 Nero 之所以将蘑菇命名为“cibus deorum”(上帝的食品),据说就是因为蘑菇愉悦的风味使然<sup>[3]</sup>。如今,中餐馆中的汤类菜单,几乎少不了菇类,其挥发性香味首先就激发了人的食欲。食用蘑菇的挥发性风味化合物已经成为评价其食用品质,乃至药用价值的重要因子。我国现有珍稀野生食用蘑菇绝大多数首先是以其风味见长。风味分为挥发性风味和非挥发性风味两类。挥发性风味,即气味,是食品为人能否接受的首要因子,也是香料、香精、化妆品、芳香疗法中的核心化学组成。包括蘑菇在内的许多食品原料,其挥发性风味往往被人们无意识地感受,有“润鼻细无声”的感觉,它们只有在烹调、加工(如干制品、精油提取物)时由于加热释放,或浓缩,或反应等被人显著意识到它们的存在。通常,当人们大快朵颐的时候,把整体的饮食快感主要集中放到了非挥发性风味的体验上,使舌头和口腔得到的味觉欢乐感远远超过了嗅觉神经的愉悦作用。但是,挥发性风味其实在进食前、中、后3个过程中贯穿始终,吃之前通过外部空气传播进鼻,咀嚼过程中它们会反冲鼻腔,产生亲切的联想和愉悦感。

## 1 野生食用蘑菇生产天然挥发性风味化合物的意义

欧盟和美国立法指出,“天然”风味物质的取得只能通过物理过程(从天然资源中提取),或酶法,或发酵过程(酶法或发酵过程中采用的前体或底物必须是自然界本身的天然化合物)<sup>[4]</sup>。消费者对“天然产品”的偏好强烈驱动开发天然挥发性风味化合物。标明为“天然”的挥发性风味化合物通常比化学合成的要

贵得多。例如,天然香兰素的价格为合成香兰素价格的80~266倍<sup>[5]</sup>。而且,手性风味化合物在自然界中常以单一的异构体存在,很难通过选择性差的经典化学合成手段获得。同时,生态体系日益增长的敏感性也警示人类采取环境友好方式。因此,关于微生物合成挥发性风味化合物的能力,激发了学术研究和工业开发的强烈兴趣。特别是自从20世纪80年代早期,工业界开始关注天然挥发性风味化合物的生物技术生产研究,挥发性风味的生物技术生产研究与讨论逐步见诸于大量的文献中。

在真菌中,就产天然挥发性化合物而言,食用蘑菇很可能是最富开发挥发性风味物质前景的候选族。食用蘑菇因种类丰富和食用广泛性,成为研究的主要材料。所有挥发性的化合物类别已在食用蘑菇的子实体和培养物中检测到。研究蘑菇产挥发性风味化合物主要有如下5个方面的意义。

第一,对特定蘑菇的挥发性化合物组成开展全面调查,是揭示挥发性风味化合物在其子实体中的形成机制的基本和关键的起点。虽然挥发性风味化合物在蘑菇子实体中的从头合成常制约于低产率,但调查和分析将可能为研究形成特定挥发性风味物质的酶和基因辟一条新径,从而将加速天然挥发性风味化合物的生物合成进程。

第二,可能从野生子实体上分离到感兴趣的新菌株。对在天然生态系统中的真菌代谢活性的了解,将有利于有吸引力的挥发性风味化合物的搜寻和筛选。对来自不同底物和栖息地的分离株进行选择优化,将增加找到新型气味代谢物的机会。Kaspera等<sup>[6]</sup>的研究表明,采用食用蘑菇为生物合成载体,以低成本化合物作为底物向高价值挥发性化合物生物转化,有可能通过菌株的筛选得到大幅提升。

第三,对蘑菇风味特性的鉴别或新的挥发性次级代谢产物的发现,可作为蘑菇香气成分化学分类学的一项指标<sup>[7-9]</sup>。新的天然冲击性气味组分的发现将吸引风味相关的工业界关注,特别是香水、香精和化妆品、食品、饮料公司,这些公司总是在不断探询新的、不同寻常的挥发性化合物和气味组分。

第四,对野生蘑菇挥发性次级代谢产物的研究对监测环境和生态有益,因为这些生物应对环境也在进化。

## 2 野生蘑菇子实体中已发现的引人注目的挥发性天然风味化合物

世界上种植量最高的蘑菇首推双孢蘑菇(*Agaricus bisporus*),其次为香菇(*Lentinula*

edodes)、糙皮侧耳(*Pleurotus ostreatus*)<sup>[6]</sup>。它们的普及不仅是因为其营养价值,而且归因于它们特有的风味特点。这些工厂化生产的蘑菇菌种比野生菌种受到了更好的了解和研究。其中令人鼓舞的一个结果是,来自双孢蘑菇的酶工业化生产的天然 1-辛烯-3-醇被报道获得了突破<sup>[9]</sup>。这证明了研究蘑菇的挥发性化合物形成机制的基础研究是具有商业前景的。它也激发工业和学术界去筛选更多的野生株,开辟工业化生产昂贵天然挥发性风味化合物。对野生蘑菇的子实体的挥发性次级代谢产物进行分析调查,是这一过程必不可少的一部分。

蘑菇子实体的种植是一个具有经济地位的生物技术产业,过去几十年在世界范围内得到了快速推广。然而,进入商业种植的蘑菇种类目前只有约 35 种,而且其中进行工厂化生产的仅约 20 种。迄今,野生蘑菇人工种植的主要难题是很难在培养物上培育长出子实体。例如,牛肝菌经过长达 5 年的研究才获人工栽培成功,鸡油菌至今未见人工驯化规模生产的报道。此外,研究野生食用菌的次级代

谢产物一直是筛选天然产物的重要环节。基于上述两个原因,绝大多数报道都是集中在野生蘑菇子实体的分析上。

对蘑菇挥发性物质的研究取得显著进展还是在气相色谱诞生以后。目前发现已经至少有 220 种野生蘑菇子实体的挥发性化合物被调查报道。早期研究报道,“蘑菇”气味来自含 8 个碳的脂肪族氧化化合物系列(文献中常简称为 C 8 系列化合物),典型的代表化合物 1-辛烯-3-醇是 Murahashi 首先从松茸(*Armillaria matsutake*)中分离鉴定;此后,除 C 8 系列化合物外,愈来愈多的挥发性化合物被鉴定为不同蘑菇子实体的风味成分,一个里程碑式的例子就是香菇香精(lenthionine,1,2,3,5,6-亚硫杂环庚烷)的分离。下面,笔者列出了蘑菇子实体从头合成的一些引人关注的天然挥发性化合物及对应的野生蘑菇菌种名(表 1)。需要指出,为避免陈旧和冗长,在 1994 年以前鉴定的蘑菇中挥发性化合物的研究结果,以及 C 8 系列化合物不在该表中罗列。

表 1 1994 年后报道的野生蘑菇特征挥发性化合物及相应蘑菇种类

Tab. 1 Selected characteristic volatile compounds and species of wild mushrooms reported since 1994

蘑菇品种	特征性化合物	文献来源
<i>Agaricus bisporus</i>	(E)-Linalool oxide(反式氧化芳樟醇)	[10]
<i>Amanita ovoidea</i>	Piperitol(薄荷醇)	[11]
<i>Auricularia polytricha</i>	Dihydro-5-pentyl-2-(3H)-furanone acid(二氢 5-戊基-2-(3H)-呋喃酮酸)	[12]
<i>Boletus erythropus</i>	Piperitone(薄荷酮)	[11]
<i>Calocybe indica</i>	p-Anisaldehyde(对茴香醛)	[10]
<i>Clitocybe amoenolens</i>	(E)-Nerolidol(橙花叔醇)	[13]
<i>Cortinarius herculeus</i>	Geosmin(二甲萜烷醇)	[14]
<i>Cystoderma carcharias</i>	Geosmin(二甲萜烷醇)	[11,14]
<i>Fistulina hepatica</i>	(E)-2-Methyl-2-butenic acid(反式 2-甲基-2-丁酸)	[15]
<i>Fomes fomentarius</i>	$\beta$ -Phellandrene( $\beta$ -水芹烯)	[16]
<i>Fomitopsis pinicola</i>	(E)- $\beta$ -farnesene(反式 $\beta$ -法尼烯)	[16-17]
<i>Gomphidius glutinosus</i>	Camphene(樟脑萜)	[11]
<i>Gloeophyllum odoratum</i>	Drimenol(补身醇)	[17-18]
<i>Lactarius rufus</i>	Rufuslactone(红乳菇内酯)	[19]
<i>Lactarius atlanticus</i>	Altanticones(大西洋乳菇酮类)	[20]
<i>Lentinellus cochleatus</i>	p-Anisaldehyde(对茴香醛)	[21]
<i>Lentinus lepideus</i>	$\beta$ -Bisabolene( $\beta$ -红没药烯)	[22]
<i>Lepista nuda</i>	(Z)-Linalool oxide(顺式氧化芳樟醇)	[11]
<i>Marasmius alliaceus</i>	2,3,5-trithiahexane(2,3,5-三硫己烷)	[23]
<i>Phallus impudicus</i>	(E)-Ocimene(顺式罗勒烯)	[24]
<i>Pleurotus ssp</i>	Sotolone(4,5-二甲基-3-羟基-2,5-呋喃酮)	[25]
<i>Polyporus sulphureus</i>	3-Methylbutanoic acid(3-甲基丁酸)	[26]
<i>Trametes suaveolens</i>	Methyl anisate(对-甲氧基苯甲酸甲酯)	[18]
<i>Tricholoma caligatum</i>	$\alpha$ -Thujene( $\alpha$ -侧柏烯)	[11]
<i>Tricholoma matsutake</i>	Methional(3-甲硫基丙醛)	[27]
<i>Tricholoma sulfureum</i>	Linalool(芳樟醇)	[28]
<i>Ustilago maydis</i>	Vanillin(香草醛)	[25]
<i>Volvariella volvacea</i>	Octa-1,5-dien-3-ol(1,5-辛二烯-3-醇)	[29]

由表1可见,萜、含硫化合物和芳香族化合物在许多文献中频繁地得到关注。如,罗勒烯是无环单萜天然香味化合物的代表,常用于调配热带水果香精;2,3,5-三硫己烷是奶油、甘蓝、鱼油及煮熟的花椰菜中存在的天然香味成分;对-甲氧基苯甲酸甲酯兼具茴香样的辛香和近似甜瓜的味道,用于丁香、甜酒等香精的配制。表中化合物多数在香精香料领域得到了开发利用。当然,一些酯、内酯、含甲基支链的短链脂肪酸等也在一些文献中得以强调。例如,反式2-甲基-2-丁酸,兼有成熟果香和酸辣辛香,用于干酪、果酱和面包等食品中。这些引发兴趣的化合物的共性是:价格昂贵、难或不能人工合成。许多萜和含硫的挥发性化合物是相当昂贵的风味和香精成分,以致于在最近形成了萜类香料化学和含硫气味组分化学的专门研究领域<sup>[30-31]</sup>。含硫挥发性化合物类别受到重视,主要是因为它们中的许多化合物的气味阈值极低,在香料混合物中即使仅以痕量存在,也可改变总体的气味特征。例如,香菇中的硫风味生物化学,被认为与葱属植物(如大蒜、洋葱、香葱)类似。为何有些蘑菇能产生如此大量的外源性含硫化合物,仍然是一个谜。就萜而言,因萜类化合物在医药、食品、化妆品和生物农药等中应用广泛,众多科学家对它们在植物和少数细菌中的生物合成路径和细节正在进行积极研究<sup>[32-33]</sup>。但目前对蘑菇中萜类化合物的生物形成路径几乎是一无所知。日益积累的数据显示,就多样性而言,真菌产萜的贡献不次于高等植物。笔者最近的研究表明,一些食用菌能催化释放木质素大分子中的萜单元<sup>[34]</sup>。因此,盯住富萜真菌很可能为挥发性天然新萜的发现与生物合成另辟蹊径。此外,从创新的角度讲,在食用菌中致力找寻一些新的风味化合物仍然是学术界和工业领域都感兴趣的话题。在表1中,有一个新化合物 Rufuslactone 和一类新化合物 Altanticones 的命名直接来自菌种名,它们都是新发现的倍半萜。

### 3 野生蘑菇的选择及其子实体中挥发性化合物的分离分析

#### 3.1 采样与分析预处理

笔者认为,关于野生蘑菇挥发性风味化合物研究中实验材料的选择,除非进行大规模批量筛选。选择野生蘑菇子实体进行挥发性风味次级代谢产物研究,可以考虑从以下几个因素入手,一是可食用,二是气味明显,三是幼龄。对一些已发现富产萜或珍贵挥发性化合物的蘑菇种在野外的子实体

进行采集和对比研究可能会有一些新的收获。通常,挥发性风味化合物的组成受到菌种、底物、气候地理条件、发育阶段和子实体龄等的影响。

食用蘑菇作为一个多组分的食品基体,挥发性组成占其中含量的比例很小,同时还要避免提取过程中化学、生化反应及外源性物质的污染,选择和研究适宜的提取方法对结果的可靠性十分重要。挥发性化合物虽能让人强烈感觉它的存在,但其绝大多数的组分浓度却属于微量至痕量范围,分离分析相当不易,特别是碰到痕量但气味强烈的未知化合物时,有时需要多种现代分离分析手段的结合,以及相关经验的累积,长期从事气味化合物分离分析的研究者会深有体会。也正因此,权威的国际食品化学期刊一般要求在研究食品的挥发性风味化合物时,对任何一种挥发性化合物的鉴定必须要有两种以上的协同鉴定实验,而且要求对新化合物必须采用标准品在 GC-MS 进样分析比对,而非仅仅依靠 GC-MS 里谱库自动搜索给出的结果,对新化合物的鉴定要求更苛刻。

在蘑菇挥发性化合物分析的典型程序中,第一步通常是均质,这一步通常要注意防氧化等,以避免非蘑菇原生性挥发组分的生成。前已述及,蘑菇子实体中挥发性化合物组分包含了不同的化学类别,而且浓度各异(相差几个数量级很普遍)。与之对应,许多运用于分析果蔬、芳香植物中挥发性化合物组分的手段,也可被用来分析蘑菇子实体。目前,有11种主要的样品制备方法用来分离获取挥发性化合物组分。然而,没有任何一种方法能表明,它是最完美的从复杂基体中收集挥发性化合物的手段。至今,单一的技术满足不了理想的方案所有的需求,即满足便宜、快速、简单、环境友好、高度灵敏和稳定性。许多关于挥发性化合物分离方法的对比研究表明<sup>[35]</sup>,这些提取方法各有优缺点,方法的选择主要取决于基体类型、感兴趣的化合物、要求达到的灵敏度。一些新的技术尝试集中在将原有的两个甚至3个方法组合起来,使用新的材料,引进新的工艺等。在进行气相色谱分析之前,至少有6种主要的样品制备方法被用于分离蘑菇子实体中的挥发性组分(表2)。愈来愈多的报道表明,固相微萃取在香料香精分离领域正愈来愈受欢迎。然而,它仍然需要改进,碰到挥发性不强或复杂样品时,其萃取头难以吸附到足够量的挥发性物质<sup>[36]</sup>。与此同时,其他一些新的样品制备方法目前也进入尝试阶段,比如液相微萃取<sup>[37]</sup>。分析野生蘑菇这样的未知性样品,若要解析全组成,笔者认为,

采用连续液-液萃取 (CLLE) 是一种较为保险的方法。CLLE 仍被认为是一种通用的、可靠的、有活力的样品制备方法<sup>[38-39]</sup>。

表 2 几种对蘑菇子实体中挥发性化合物进行分离提取的样品前处理方法

Tab. 2 Preparation methods for the isolation of volatiles from fruiting bodies of mushrooms

方法	基本原理	实例
连续液液萃取	分配	[15]
直接溶剂萃取	分配	[40]
动态顶空	挥发性	[41]
同时蒸馏萃取	分配和挥发性	[42]
固相微萃取	分配	[43]
蒸汽蒸馏	挥发性	[44]
搅拌吸附萃取	分配	[44]

### 3.2 挥发性提取物组成的分析

最终分析蘑菇子实体的挥发性化合物组成通常采用 GC、GC - MS 和 GC-O。一个挥发性风味化合物的鉴定必须通过最新的可提供的分析技术的详细验证。在实际操作中,这意味着,任何一个个体挥发性化合物的鉴定必须使用两种方法。例如,通过与标准样品比对色谱特征和光谱数据,包括上面提及的 3 种工具之外的手段如核磁共振、红外等。在最常用的 GC-MS 分析中,分别采用极性和非极性柱分析并计算出出色谱保留指数,是当前气味物质分析普遍欢迎的做法。鉴于蘑菇子实体挥发性提取物是由许多化合物组成,但通常只有很少一部分化合物决定其气味特征,因此现代技术分析多采用 GC-O 进行辅助鉴定,这一结果可以绘制特征性气味指纹图谱。即使目前电子鼻技术研究取得了很大进步,但以 GC-O 反映的人鼻评判结果仍无可替代,它被普遍用于复杂天然产品中气味的分离,其特征描述已经过了 30 多年的检验<sup>[45]</sup>。最近,Cho 等<sup>[8]</sup>报道了采用 GC-O 和感官分析分别对同一种蘑菇进行质量分级的研究,并结合 GC-MS 给出了不同级别与主要挥发性风味化合物水平的关联。GC-O 分析中,评判组一般至少需要 8~10

人才能给出一个可靠的挥发性风味评判结果。此外,给 GC 配备不同的检测器也可对特定化合物进行专门和辅助确认,如原子发射检测器对含硫、氯、氮元素挥发性化合物的检测。碰到新的化合物,采用微制备 GC、NMR、高分辨 MS 等势在必行。

## 4 展 望

目前,天然挥发性风味化合物的生物技术生产途径有两种,即生物转化和从头合成。总体而言,与使用前体或浓缩酶的选择性生物转化相比,在天然寄主或基本培养基上生长的从头合成方式将产生大量的不同风味个体化合物,而且目标产物的产量和浓度都要低得多。因此,对蘑菇产挥发性风味化合物的从头合成研究目前暂都只限于实验室规模,离商业实用尚远。可以预计,新的工艺和材料技术,例如,通过体外产品移除工艺可以从发酵罐中动态移出形成的挥发性产物,从而可能克服从头合成的限制。所以,对一些芳香的野生子实体或基本培养基发酵物从头合成形成的挥发性化合物开展广泛调查,也极可能产生一些意想不到的好结果。

受市场驱动的工业研究把焦点放在筛选目标菌株和找到相关的酶,应用它们去开发合适的生产过程。在生物技术方面,工业界对蘑菇食用菌发酵产风味物质关注两点,一是发酵周期,二是目标产物的浓度。一般而言,若发酵在 3~4 d 内即可完成,目标产物质量浓度能达 1 g/L 以上,便具有较明朗的商业现实性,和目标产物的其他生产方式相比,亦具有显著的竞争力。在我国关注环保、强调节能减排的背景下,充分利用极具优势的野生食用蘑菇资源,特别是一些地理跨度大、种类繁多的特色菌种,研究其和开发生产挥发性风味化合物,对形成自主知识产权和产业竞争力意义重大。

在食品加工方面,对蘑菇加工过程及其制品风味的机理和生产特定风味化合物的潜力研究亦亟待展开,与对蘑菇菌株、子实体和发酵产挥发性风味化合物进行研究的成果协同,能更全面地发掘蘑菇产风味化合物的价值与潜力。

## 参考文献 (References):

- [1] Chang S T. World production of cultivated edible mushrooms in 1997 with emphasis on *Lentinus edodes* (Berk.) Sing. in China[J]. *International Journal of Medicine Mushrooms*, 1999(1):291-300.
- [2] Sánchez C. Modern aspects of mushroom culture technology[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2004, 64:756-762.

- [3] Berger R G, Zorn H. Flavors and fragrances. *Advances in Fungal Biotechnology for Industry, Agriculture, and Medicine* [M]. Tkacz J S, Lange L. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2004:341-358.
- [4] Serra S, Fuganti C, Brenna E. Biocatalytic preparation of natural flavours and fragrances[J]. *Trends in Biotechnology*, 2005, 23:193-198.
- [5] Walton N J, Mayer M J, Narbad A. Molecules of interest vanillin[J]. *Phytochemistry*, 2003, 63:505-515.
- [6] Kaspera R, Krings U, Berger R G, et al. Regio- and stereoselective fungal oxyfunctionalisation of limonenes [J]. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 2005, 60: 459-466.
- [7] Brondz I, Hoiland K, Ekeberg D. Multivariate analysis of fatty acid in the spores investigated of higher basidiomycetes, a new method for chemotaxonomical classification of fungi[J]. *Journal of Chromatography B*, 2004, 800:303-307.
- [8] Cho I H, Lee S M, Kim S Y, et al. Differentiation of aroma characteristics of pine-mushrooms (*Tricholoma matsutake* Sing.) of different grades using gas chromatography-olfactometry and sensory analysis[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55:2323-2328.
- [9] Morawicki R O, Beelma R B, Peterson D, et al. Biosynthesis of 1-octen-3-ol and 10-oxo-trans-8-decenoic acid using a crude homogenate of *agaricus bisporus*. Optimization of the reaction; kinetic factors[J]. *Process Biochemistry*, 2005, 40: 131-137.
- [10] Venkateshwarlu G, Chandradavana M V, Tewari R P. Volatile flavour components of some edible mushrooms (Basidiomycetes)[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 1999, 14:191-194.
- [11] Breheret S, Talou T, Rapior S, et al. Geosmin, a sesquiterpenoid compound responsible for the musty-earthy odor of *Cortinarius herculeus*, *Cystoderma amianthinum*, and *Cystoderma carcharias*[J]. *Mycologia*, 1999, 91:117-120.
- [12] Lee J W, Lee J G, Do J H, et al. Volatile flavor components of Korean *Auricularia polytricha* (Mont.) Sacc. mushroom[J]. *Han'guk Nonghwa Hakhoechi*, 1995, 38:546-548.
- [13] Fons F, Rapior S, Fruchier A, et al. Volatile composition of clitocybe amoenolens, *Tricholoma caligatum* and *Hebeloma radicosum*[J]. *Cryptogamie Mycologie*, 2006, 27: 45-55.
- [14] Breheret S, Talou T, Rapior S, et al. Monoterpenes in the aroma of fresh wild mushrooms (Basidiomycetes) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1997, 45:831-836.
- [15] Wu S M, Krings U, Zorn H, et al. Volatile compounds from the fruiting bodies of beefsteak fungus *Fistulina hepatica* (Schaeffer: Fr.) Fr. [J]. *Food Chemistry*, 2005, 92:221-226.
- [16] Faldt J, Jonsell M, Nordlander G, et al. Volatiles of bracket fungi *Fomitopsis pinicola* and *Fomes fomentarius* and their functions as insect attractants[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1999, 25:567-590.
- [17] Rösecke J, Pietsch M, König W A. Volatile constituents of wood-rotting basidiomycetes[J]. *Phytochemistry*, 2000, 54: 747-750.
- [18] Kahlos K, Kiviranta J K J, Hitunen R V K. Volatile constituents of wild and in vitro cultivated *Gloeophyllum odoratum* [J]. *Phytochemistry*, 1994, 36:917-922.
- [19] Luo D Q, Wang F, Bian X Y, et al. Rufuslactone, a new antifungal sesquiterpene from the fruiting bodies of the basidiomycete *Lactarius rufus*[J]. *Journal of Antibiotics*, 2005, 58:456-459.
- [20] Clericuzio M, Mella M, Toma L, et al. Fungal metabolites, Part 46. Atlanticones, new protoillundane sesquiterpenes from the mushroom *Lactarius atlanticus* (Basidiomycetes) [J]. *European Journal of Organic Chemistry*, 2002(6): 988-994.
- [21] Rapior S, Breheret S, Talou T, et al. The anise-like odor of *Clitocybe odora*, *Lentinellus cochleatus* and *Agaricus esettei* [J]. *Mycologia*, 2002, 94:373-376.
- [22] Wu S M, Krings U, Zorn, H, et al. Volatile compounds of the wild mushroom *Lentinus lepideus* grown on chestnut trees[J]. *Advances in Food Sciences*, 2006, 28: 54-60.
- [23] Rapior S, Breheret S, Talou T, et al. Volatile flavour constituents of fresh *Marasmius alliaceus* (Garlic Marasmius) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1997, 45:820-825.
- [24] Borgkarlson A K, Englund F O, Unelius C R. Dimethyl oligosulphides, major volatiles released from *Sauromatum guttatum* and *Phallus impudicus*[J]. *Phytochemistry*, 1994, 35:321-323.
- [25] Lizarraga-Guerra R, Guth H, Lopez M G. Identification of the most potent odorants in Huitlacoche (*Ustilago maydis*) and Austern Pilzen (*Pleurotus ssp*) by aroma extract dilution analysis and static head-space samples[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1997, 45:1329-1332.
- [26] Wu S M, Zorn H, Krings U, et al. Characteristic volatiles from young and aged fruiting bodies of wild *Polyporus sulfu-*

- reus (Bull. ; Fr.) Fr. [J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2005, 53: 4524—4528.
- [27] Cho I H, Choi H K, Kim Y S. Characterization of the overall flavor profiles and odor-active compounds in pine-mushrooms (*Tricholomy matsutake* Sing.) of different grades[C]. American Chemical Society. 230th ACS National Meeting. Washington; Abstracts of Papers, 2005.
- [28] Rapior S, Breheret S, Talou T, et al. Volatile components of fresh *Agrocybe aegerita* and *Tricholoma sulfureum*[J]. **Cryptogamie Mycologie**, 1998, 19:15—23.
- [29] Mau J L, Lin Y P, Chen P T, et al. Flavor compounds in king oyster mushrooms *Pleurotus eryngii*[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 1998, 46:4587—4591.
- [30] Candela K, Fellous R, Joulain D, et al. Thiol and thioacetate derivatives of  $\delta$ -cadinene[J]. **Sulfur Letters**, 2002, 25:29—36.
- [31] Goeke A. Sulfur-containing odorants in fragrance chemistry[J]. **Sulfur Reports**, 2002, 23:243—278.
- [32] Aharoni A, Jongsma M A, Bouwmeester H J. Volatile science? Metabolic engineering of terpenoids in plants[J]. **Trends in Plant Science**, 2005(10): 594—602.
- [33] Eisenreich W, Bacher A, Arigoni D, et al. Biosynthesis of isoprenoids via the non-mevalonate pathway[J]. **Cellular and Molecular Life Sciences**, 2004, 61: 1401—1426.
- [34] Wu S M, Zorn H, Berger R G, et al. Volatiles from submerged and surface cultured beefsteak fungus *fistulina hepatica* [J]. **Flavour and Fragrance Journal**, 2007, 22:53—60.
- [35] Da Costa N, Eri S. Modern Extraction Techniques; Food and Agriculture Samples ACS Symposium Series[M]. Washington; American Chemistry Society, 2006, 926:163—175.
- [36] Ishikawa M, Ito O, Ishizaki S, et al. Solid-phase aroma concentrate extraction (SPACE<sup>TM</sup>): a new headspace technique for more sensitive analysis of volatiles[J]. **Flavour and Fragrance Journal**, 2004, 19:183—187.
- [37] Jiang X M, Basheer C, Zhang H, et al. Dynamic hollow fiber-supported headspace liquid-phase microextraction[J]. **Journal of Chromatography A**, 2005, 1087:289—294.
- [38] Apps P, Tock M L A. Enhanced flavour extraction in continuous liquid liquid extraction[J]. **Journal of Chromatography A**, 2005, 1083:215—218.
- [39] Elss S, Preston C, Hertzig C, et al. Aroma profiles of pineapple fruit (*Ananas comosus* [L.] Merr.) and pineapple products[J]. **LWT Food Science and Technology**, 2005, 38:263—274.
- [40] Rapior S, Kanska G, Guillot J, et al. Volatile composition of *Laetiporus sulphureus*[J]. **Cryptogamie Mycologie**, 2000, 21, 67—72.
- [41] Kabbaj W, Breheret S, Guimberteau J, et al. Comparison of volatile compound production in fruit body and in mycelium of *Pleurotus ostreatus* identified by submerged and solid-state cultures[J]. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, 2002, 103:463—470.
- [42] Cho D B, Seo H Y, Kim K S. Analysis of the volatile flavor compounds produced during the growth stages of the shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*)[J]. **Journal of Food Science and Nutrition**, 2003(8):306—314.
- [43] Zeppa S, Gioacchini A M, Guidi C, et al. Determination of specific volatile organic compounds synthesized during *Tuber borchii* fruit body development by solid-phase microextraction and gas chromatography/mass spectrometry[J]. **Rapid Communications in Mass Spectrometry**, 2004, 18:199—205.
- [44] Hofmann T, Rothe M, Schieberle P. State-of-the-Art in flavour chemistry and biology, proceedings of the Wartburg symposium on flavour chemistry and biology[M]. Garching; Deutsche Forschungsanstalt fuer Lebensmittelchemie, 2004; 284—291.
- [45] Srinivasan K. Role of spices beyond food flavoring: Nutraceuticals with multiple health effects[J]. **Food Review International**, 2005, 21:167—188.

(责任编辑:秦和平,杨萌)