

干燥方式对食用菌风味物质影响研究进展

侯 会¹, 陈 鑫¹, 方东路¹, 郑惠华^{1,2}, 赵立艳^{1*}

(1. 南京农业大学食品科学技术学院, 农业农村部食用菌加工重点实验室, 南京 210095;

2. 江苏安惠生物科技有限公司, 南通 226009)

摘 要: 食用菌营养丰富, 具有浓郁的香气和鲜美的菌菇味道, 长期以来深受消费者喜爱。食用菌的风味不仅是评价其品质的主要指标之一, 而且是影响消费倾向的重要原因, 已成为国内外风味化学工作者们研究的热点。干燥作为一种可有效延长食用菌货架期的加工方式, 会引起食用菌风味物质的种类和含量发生变化, 进而使食用菌呈现出与新鲜状态下不同的风味特征, 且不同干燥方式对产品风味具有重要影响。本研究介绍了几种鲜、干食用菌间风味物质的主要差异, 重点比较了目前国内外关于不同干燥方式对食用菌挥发性风味物质和非挥发性风味物质的影响, 并深入分析了不同干燥方式造成风味物质产生差异的原因, 最后对干燥技术在食用菌风味物质中的应用前景及可能的发展方向进行展望, 以期为食用菌风味物质的深入研究提供借鉴和参考。

关键词: 干燥方式; 食用菌; 挥发性风味物质; 非挥发性风味物质

Research progress on influence of drying methods on flavor compounds of edible fungus

HOU Hui¹, CHEN Xin¹, FANG Dong-Lu¹, ZHENG Hui-Hua^{1,2}, ZHAO Li-Yan^{1*}

(1. Key Laboratory of Edible Mushroom Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Food Science and Technology, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China; 2. Jiangsu Alphas Bio-technology Co., Ltd., Nantong 226009, China)

ABSTRACT: Edible fungus is rich in nutrition, with strong aroma and delicious umami taste of mushroom, which has long been loved by consumers. The flavor is not only the main indicators for evaluating the quality of edible fungus, but also an important factor to influence the consuming trends, and it has become a research hotspot of many domestic and foreign researchers. As a processing method that can effectively prolong the shelf life of edible fungus, drying will cause the variety and content of edible fungus flavor substances to change, so that edible fungus show different flavor characteristics from fresh state, and different drying methods have an important impact on product flavor. This study introduced the main differences of flavor substances between fresh and dry edible fungus, emphatically compared the effects of different drying methods on volatile and non-volatile compounds of edible fungus, and prospected the application prospects and possible development directions of drying technology in edible fungus flavor substances, so as to provide references for the further research of edible fungus flavor substances.

KEY WORDS: drying methods; edible fungus; volatile compounds; non-volatile compounds

基金项目: 食用菌产业技术体系(CARS-20)

Fund: Supported by China Agriculture Research System (CARS-20)

*通讯作者: 赵立艳, 博士, 教授, 主要研究方向为食品营养与化学。E-mail: zhlychen@njau.edu.cn

*Corresponding author: ZHAO Li-Yan, Ph.D, Professor, Nanjing Agriculture University, College of Food Science and Technology, No. 1 Weigang, Nanjing 210095, China. E-mail: zhlychen@njau.edu.cn

1 引 言

食用菌是指具有肉眼可见的高等子实体并能供人类食用的大型真菌，又称蘑菇或蕈^[1]。食用菌因其浓郁诱人的香气和特有的鲜香菌菇味道深受消费者喜爱，香菇在民间素有“山珍”之称；杏鲍菇因味似鲍鱼而得名；草菇亦有“放一片、香一锅”之佳誉；在日本更是有“香在松茸、味在玉蕈”之说^[2,3]。每种食用菌都具有呈香呈味物质，这些风味物质主要由八碳化合物、酸类、酮类、醛类、酯类及含硫化合物等挥发性的呈香物质和可溶性糖、有机酸、游离氨基酸、核苷酸等非挥发性的呈味物质组成，二者相互协调、平衡，共同呈现出了食用菌独特的风味^[4]。

干燥作为一种可有效延长食用菌货架期的加工方式，已广泛应用在香菇^[5]、杏鲍菇^[6]、双孢菇^[7]、金针菇^[8]等菌菇的脱水储藏中。目前，常用的干燥方法主要有热风干燥、微波干燥、真空冷冻干燥和热泵干燥以及联合干燥技术等。食用菌在干燥过程中，风味物质因发生了诸如酶促反应、美拉德反应、Strecker 降解等一系列复杂反应而变化^[9]。因此，干燥不仅会改变食用菌的风味物质组分，而且会显著改变其香气特征，如香菇的浓郁之香，干燥后更为突出^[10]。干燥方式对食用菌的风味具有重要影响，通过不同干燥方式制备的产品中的风味物质具有较大差异。近年来，有关不同干燥方法对食

品风味物质影响的研究越来越多。可见，准确了解各干燥方式下食用菌的主要风味物质组成与特点具有重要意义。

本研究介绍了几种鲜、干食用菌风味物质的主要差异，重点比较了不同干燥方式对食用菌风味物质的影响及其产生差异的原因，以期深入了解食用菌干制前后的风味特征，促进食用菌作为食品原料、保健食品和调味品的消费，为食用菌的精深加工提供重要的指导意义。

2 鲜、干食用菌间风味物质差异

2.1 挥发性风味物质差异

食用菌干制前后具有不同的风味，在挥发性香气成分上存在较为明显的差异。新鲜香菇气味清香，具有草木气息，而干香菇则呈现类似大蒜的炒香味^[11]；新鲜牛肝菌散发草木和泥土气息，而干制牛肝菌具有浓郁的烤香味^[12]。这种气味差异主要来源于鲜、干食用菌间挥发性风味物质的不同。一般新鲜食用菌的挥发性物质主要为八碳化合物，但该类物质在干燥过程中极易损失^[13]；干制食用菌的风味物质更为复杂和多样，一些风味前体物质在干燥过程中发生降解，增加了风味物质的种类和含量，从而呈现出不同的香气特征。表 1 列举了几种鲜、干食用菌主要的挥发性风味物质。

表 1 鲜、干食用菌主要挥发性风味物质
Table 1 Volatile compounds in fresh and dried edible fungus

食用菌	鲜品中主要挥发性风味物质	干品中主要挥发性风味物质	干燥条件	参考文献
栽培菌	香菇	1, 2, 4-三硫杂环戊烷、1, 2, 3, 5, 6-五硫杂环庚烷(香菇素)、二甲基二硫醚、三甲基二硫醚等含硫化合物为主	采用 4 种干燥方式	陈洪雨等 ^[11] Politowicz 等 ^[14]
	杏鲍菇	醛类和醇类化合物为干制杏鲍菇中主要挥发性风味物质	热风干燥	吴迪等 ^[15] 殷朝敏等 ^[16]
	双孢蘑菇	烷烃类和杂环类挥发性风味物质，如邻苯二甲酸异辛酯、邻苯二甲酸二酯、1, 2, 3-甲基苯等	冷冻联合微波真空干燥	裴斐 ^[17]
野生菌	牛肝菌	3-(甲硫基)丙醛是干牛肝菌中最重要的气味贡献者，1-辛烯-3-酮和吡嗪类化合物是主要的挥发性风味物质	市售干品，未说明干燥方式	Bozok 等 ^[18] Zhang 等 ^[12]
	松茸	醛类物质如己醛、庚醛、壬醛和苯乙醛等；酮类物质为 2(5 h)-呋喃酮、苯乙酮	热风干燥	Guo 等 ^[19]

2.2 非挥发性风味物质差异

鲜、干食用菌在非挥发性风味物质方面也存在较大差异。食用菌因含有多核苷酸和游离氨基酸等滋味活性物质,被认为是鲜味物质的丰富来源^[20],且一些非挥发性成分之间具有协同增鲜作用,如 5'-核苷酸滋味较为单薄,但其与谷氨酸共同作用时有强烈的增鲜作用^[4]。干燥也会对非挥发性风味物质产生较大影响,进而影响食用菌的鲜味特性。

香菇在所有食用菌中的呈鲜性最强,而干香菇的鲜味特性更加强烈^[4,21]。有文献表明,鲜、干香菇非挥发性物质的主要差异在于二者 5'-鸟苷酸(5'-GMP)等呈味物质的含量不同^[22]。5'-GMP 是香菇的主要呈味物质,其含量在干香菇中更为丰富^[22]。Li 等^[23]检测到新鲜香菇呈味核苷酸总量为 6.61 mg/g,其中 5'-GMP 的含量为 1.80 mg/g。于海龙等^[24]研究发现不同品种干制香菇核苷酸总量为 3.15~11.15 mg/g,其中干香菇 605 号中 5'-GMP 含量最高 2.66 mg/g,占鲜味核苷酸的 51%。

3 不同干燥方式对食用菌风味物质的影响

3.1 不同干燥方式对食用菌挥发性风味物质的影响

根据挥发性风味物质的化学结构特点,将其主要分为醛酮类、醇类、酯类、酸类和其他类化合物。不同干燥方式因时间、温度和氧气等干燥条件的不同,会影响食用菌的各项反应,进而对食用菌的挥发性风味物质组分造成影响。各干燥方式的比较如表 2 所示。

3.1.1 醛、酮类物质

醛、酮类物质都属于羰基类化合物,是食用菌中较为丰富的 2 种挥发性风味物质。二者的气味阈值都较低,其中 C₅~C₉ 的醛类物质具有脂香气味,通常是脂肪的氧化降解产物^[25],酮类物质具有浓郁的花果香气^[34]。研究报道,加热干燥有利于醛类和酮类羰基化合物的形成^[26]。唐秋实等^[26]研究了真空冷冻、热风 and 热泵 3 种干燥方式对金针菇挥发性风味物质的影响,发现热泵和热风干燥金针菇干品

中的醛类物质种类和含量都有所增加,且主要为 2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、正己醛以及少量苯乙醛,这些醛类物质构成了金针菇的主体风味,但真空冷冻干燥样品中的醛酮类物质较少,由此认为加热干燥可促进醛酮类物质的生成。张艳荣等^[31]在微波干燥姬松茸中检测到醛类物质的相对含量高于热风干燥样品,并进一步阐述微波干燥因比热风干燥的反应更为剧烈,更加促进了醛类化合物的形成。Tian 等^[27]研究同样表明微波干燥香菇样品中的醛类物质含量明显高于热风干燥样品。

由此可以看出,不同干燥方式对食用菌醛酮类物质的含量具有较大影响。由于醛类和酮类物质的形成来自于不饱和脂肪酸的自动氧化^[35],真空冷冻干燥因干燥温度低且在无氧条件下进行干燥,不利于羰基类风味物质氧化生成^[26];热风干燥在一定温度下缓慢进行着脂肪酸氧化分解反应,对醛类化合物的生成有一定的促进作用;微波干燥的原理是在电磁振荡下,物料中的极性水分子间进行剧烈摩擦碰撞产热,可以更好地促使游离脂肪酸的裂解和美拉德反应的进行,从而生成了较多的醛类化合物^[31]。

3.1.2 醇类物质

醇类物质的气味阈值较高,一般对风味的贡献不大,但随着浓度和碳链长度的增加,可产生脂肪香和清木香,这对风味的改良起到一定的积极作用^[36]。醇类物质在新鲜食用菌中十分丰富,特别是八碳醇,如 1-辛烯-3-醇和 3-辛醇,是普遍存在于食用菌中的特征性风味物质^[37]。但醇类物质的挥发性较强,稳定性不高,长期的加热处理会造成这类物质的损失。研究表明,各干燥方式均会对八碳醇有一定破坏作用^[28,29]。Tian 等^[27]报道了醇类物质在新鲜香菇中的含量最高,占挥发性风味成分的 45.27%~70.40%^[27,38],但经热风、微波、真空和微波真空干燥后醇类物质的种类和数量均明显减少。吴方宁^[28]研究表明真空冷冻干燥白玉菇中醇类物质的损失情况也较为严重,针对此现象,作者阐述了虽然在理论上真空冷冻干燥有利于保留食品中的风味物质,但长时间的干燥处理仍会导致醇类物质的降

表 2 不同干燥方式对食用菌挥发性风味物质的影响
Table 2 Effects of different drying methods on volatile compounds of edible fungus

挥发性 风味物质	形成途径	干燥方式		
		热风干燥	真空冷冻干燥	微波干燥
醛、酮类	脂肪酸的氧化降解 ^[25]	可促进醛酮类物质的生成	不利于醛酮类物质氧化生成 ^[26]	醛类化合物增加 ^[27]
醇类	/	易造成醇类物质损失	醇类物质减少	醇类物质减少 ^[28,29]
酯类	酸和醇发生酯化反应而形成 ^[30]	有研究表明热风干燥可降低酯类物质含量 ^[31] ;另有研究表明热风干燥利于部分酯类化合物的生成 ^[32]	提高酯类物质含量	提高酯类物质含量 ^[32]
酸类	醇类物质氧化形成 ^[33]	增加酸类物质 ^[27]	较大程度的避免挥发酸类物质的形成 ^[28]	降低酸类物质 ^[27]

解,这与裴斐^[17]在双孢菇冷冻干燥过程中挥发性风味物质的变化研究所得的结果一致。由此可见,醇类物质在干燥过程中极易损失。

食用菌在干燥过程中也会伴随着新生醇类物质的生成。张艳荣等^[31]在热风 and 微波干燥姬松茸中检出了苯甲醇、芳樟醇和 α -萜品醇,这些新生醇类物质分别贡献了芳香味、兰香味和紫丁香味,不仅丰富了姬松茸的整体风味结构,而且可以改良风味、增加香气。

3.1.3 酯类物质

酯类物质是由脂质氧化产生的游离脂肪酸和醇发生酯化反应而形成的一类物质^[30],短链的酯类($C_1\sim C_{10}$)不仅挥发性较强且阈值较低,具有类似水果和陈酒的香味,对风味的贡献较大。张艳荣等^[31]等在研究中阐明酯类物质在热处理条件下会发生水解,生成醇类、酚类和其他化合物,因而干燥温度较高的热风和微波干燥均会降低姬松茸酯类物质的含量,而低温真空冷冻干燥可较好地保留呈香酯类物质。裴斐^[17]在新鲜双孢菇中所检测出的辛酸甲酯、壬酸甲酯和十二烷酸甲酯等酯类物质随着干燥过程的进行显著降低。

但另有报道指出,加热干燥处理有利于金针菇、白玉菇等食用菌酯类化合物的生成。金针菇在 55 °C 热泵和鼓风干燥中检测出以丁内酯为主的含量较高的酯类化合物^[26]。Chen 等^[32]同样研究发现热风、真空、微波真空和真空冷冻干燥均可提高白玉菇酯类物质含量,其中又以热风干燥含量最多,占挥发性风味成分的 8.46%,且热风干燥促使了白玉菇由新鲜状态下 4 种酯类物质上升至 10 种,并且认为这可能是由于一方面来自脂质降解的酸类物质与醇类物质在干燥过程中发生了酯化反应,进而增加了酯类物质含量,另一方面与脂肪的氧化和热降解有关^[28]。

3.1.4 酸类物质

挥发性酸类物质一般具有腥臭味,对风味具有不良的影响^[39],因此在一定程度上需要控制该类物质的形成。芮汉明等^[33]分析比较了后期热风干燥温度对香菇风味物质的影响,研究发现,后期 70 °C 热风干燥产品中的挥发酸类物质低于 50 °C 热风干燥,得出了提高后期热风干燥温度可以避免形成较多酸类物质的结论。吴方宁等^[28]研究发现,真空冷冻干燥是减少白玉菇酸类物质形成的较好方法,在冻干样品中未检测到酸类成分,而在 60 °C 热风干燥样品中的酸类物质较多,主要为 2-甲基丁酸、壬酸和辛酸等单链酸类物质。Tian 等^[27]以香菇为原料,也得出了热风干燥能够增加香菇酸类物质含量的结果,但还发现微波和微波真空干燥可以显著降低香菇中酸类物质。

综上所述,不同干燥方式对酸类物质具有显著影响。热风干燥可促使白玉菇、香菇等食用菌形成较多的酸类物质,而真空冷冻干燥能够较大程度地避免挥发酸类物质的形成。由于酸类化合物在干燥过程中易由醇类物质氧化形

成^[33],而上述已有研究表明热风干燥易造成醇类物质的损失^[27,28],因此推测这些损失的醇类物质有一部分参与了酸类物质的形成中。由于酸类物质对风味的影响不佳,所以在干燥过程中要避免酸类化合对风味的不良影响。

3.1.5 其他类物质

含硫化合物是食用菌中重要的挥发性风味物质,这类物质主要存在于香菇中,且被证实是香菇感官香气的主要来源^[40]。李文等^[9]研究了热风、真空、冷冻和自然干燥对香菇含硫风味化合物的影响,结果表明,冷冻干燥的低温条件可抑制大分子及热敏性含硫化合物的降解,香菇中含硫化合物的种类较多;热风干燥初期的加热处理通过增加相关酶系活性,促使了更多含硫化合物的生成,含硫化合物的总量较高。

烃类化合物主要包括烷烃类和烯烃类化合物,其中烷烃类物质的阈值较高,对食用菌的整体风味贡献不大,而一些风味较为独特的烯烃类物质如 *D*-柠檬烯,有新鲜橙子和柠檬香气,对食用菌的风味有一定调和作用^[41]。烃类物质在干制过程中可能发生裂解或聚合反应。大量研究表明,食用菌经真空冷冻干燥后烷烃类化合物的种类和相对含量明显增加^[26,28,31,42],这可能是因为脂肪酸烷氧自由基在低温和真空条件易发生裂解反应和其他反应形成烃类物质,这些烃类物质最终发生聚合形成烷烃^[43]。

吡嗪类化合物具有烘烤香味,是一种在高温(>120 °C)下生成量较多的特殊美拉德反应产物^[44]。Zhang 等^[12]对牛肝菌鲜品和干品的关键香气成分进行了鉴定与比较,发现干品中吡嗪类含氮化合物的种类和数量明显增加,该物质对牛肝菌的整体风味具有重要影响,且在其他蘑菇中很少被报道,因此被认为是区分牛肝菌与其他种类蘑菇的重要风味物质^[12,13]。

3.2 不同干燥方式对食用菌非挥发性风味物质的影响

食用菌非挥发性风味物质在呈味方面具有重要作用,不同干燥方式对其种类和含量影响显著,采用不同干燥方式对食用菌非挥发性风味物质的影响如表 3 所示。

3.2.1 5'-核苷酸

不同干燥方式对 5'-核苷酸的含量具有较大影响。Li 等^[45]比较了热风、真空、微波、冷冻和自然晒干 5 种干燥方式对杏鲍菇滋味成分的影响,其中冷冻和真空干燥样品中的核苷酸含量明显高于其他处理组,与鲜品最为接近。吴迪等^[15]重点研究了不同干燥方法对呈味核苷酸即 5'-GMP 含量的影响,结果同样证实了上述观点,香菇和杏鲍菇中 5'-GMP 含量均以真空干燥和冷冻干燥样品最高。宫雪^[49]对褐环乳牛肝菌菌盖中的核苷酸含量进行了分析,发现冻干样品中 5'-GMP 和 5'-AMP 含量最高,均为 0.42 mg/g,而真空干燥样品中 5'-IMP 和 5'-XMP 的含量最高,分别为 1.09 mg/g 和 1.92 mg/g。

表 3 不同干燥方式对食用菌非挥发性风味物质的影响
Table 3 Effects of different drying methods on non-volatile compounds of edible fungus

非挥发性风味物质	干燥方式		
	热风干燥	真空冷冻干燥	微波干燥
5'-核苷酸	可导致核苷酸发生降解 ^[45]	有利于保留食用菌中的 5'-核苷酸 ^[15,45]	核苷酸发生降解, 含量降低 ^[45,46]
游离氨基酸	有助于蛋白质水解释放出游离氨基酸, 进而游离氨基酸总量较高 ^[45]	游离氨基酸含量较低 ^[45]	游离氨基酸含量降低 ^[47]
可溶性糖	可溶性糖含量降低 ^[28]	可溶性糖含量较高 ^[48]	高微波能量易导致可溶性糖降解, 含量降低 ^[47]
有机酸	导致有机酸发生氧化、脱羧反应, 从而降低有机酸含量 ^[28]	冷冻干燥前期促进有机酸的合成, 后期导致有机酸的降解 ^[48]	有机酸含量减少 ^[48]

由以上研究可以看出, 食用菌中的 5'-核苷酸对热较敏感, 高温或长时间的干燥处理可降低其含量^[45]。传统日晒干燥时间长, 热风干燥温度高, 二者都可导致核苷酸发生不同程度的降解。微波干燥可使物料中心内部温度迅速升高, 从而导致蘑菇细胞内的核酸发生一定程度的降解^[45,46]。冷冻干燥因干燥温度低不仅可防止大部分营养物质以及核苷酸的降解, 而且有利于物料形成均匀的孔隙, 从而生产出更加细腻的粉末, 这对 5'-核苷酸的提取更加有效^[45]。综上所述, 冷冻干燥能够有效维持食用菌中的 5'-核苷酸。

3.2.2 游离氨基酸

不同于 5'-核苷酸, Li 等^[45]研究表明, 冷冻干燥杏鲍菇中的游离氨基酸含量较低, 而热风干燥样品中游离氨基酸含量最高。加热处理对游离氨基酸有 2 个方面的影响: 一是有助于蛋白质水解释放出游离氨基酸, 从而增加其含量; 二是有助于蘑菇中的氨基酸和还原糖发生美拉德反应而造成游离氨基酸的损失^[50], 由于热风干燥过程中蛋白质所产生的游离氨基酸量大于美拉德反应所消耗的量, 因而热风干燥样品中游离氨基酸的含量较高^[51]。Pei 等^[48]报道了采用冷冻-微波真空联合干燥方式的双孢蘑菇游离氨基酸含量 (42.00 mg/g) 显著高于单一冷冻干燥 (24.34 mg/g), 这主要是因为与冷冻干燥后长期长时间的解析阶段相比, 联合干燥后期的微波真空干燥具有干燥速度快、耗时短等优点, 更有利于保留双孢蘑菇的游离氨基酸。但若采用单一微波真空干燥方式, 则不利于蘑菇中游离氨基酸的保留。Wu 等^[47]以白玉菇为原料, 通过实验表明采用微波真空干燥样品中的游离氨基酸含量最低, 这是由于微波真空干燥的高微波能量能够导致白玉菇中的各类酶失活^[51], 且干燥时间短, 致使蛋白质总体分解较弱, 从而游离氨基酸的含量较低。

不同干燥方式对食用菌中的游离氨基酸含量具有较大影响。此外, 因干燥条件及各食用菌中化学成分的不同, 即使采用同一种干燥方法, 不同食用菌中的游离氨基酸含量变化也有较为明显的差异。Li 等^[45]认为热风干燥杏鲍菇

样品中氨基酸含量最高, 但吴方宁等表明白玉菇经热风干燥处理后氨基酸含量较低^[28]。

3.2.3 可溶性糖和有机酸

可溶性糖和有机酸也是食用菌中的呈味物质, 其种类和含量在一定程度上影响着食用菌的风味。可溶性糖是赋予食用菌甜味的主要成分, 包括果糖、葡萄糖、海藻糖和甘露醇等; 有机酸如苹果酸和琥珀酸对食用菌的鲜味有重要贡献^[52]。加热干燥处理对二者的影响显著, 吴方宁等^[28]报道了热风干燥和真空干燥对白玉菇可溶性糖及有机酸含量的影响, 其中热风干燥可溶性糖总量显著低于真空干燥, 特别是甘露醇和海藻糖的含量相差较多; 除苹果酸外, 热风干燥有机酸含量也显著低于真空干燥, 二者总量相差 60.82 mg/g。Pei 等^[48]研究发现冷冻干燥利于保留双孢菇中的可溶性糖和糖醇, 而后期微波真空干燥的高微波能量易导致可溶性糖类物质的降解, 另外有机酸在冷冻干燥过程中呈现出先上升后下降的趋势, 冷冻干燥前期因相关酶系被激活促进了有机酸的合成, 而干燥后期的加热过程会导致有机酸发生脱羧反应而降低其含量。

真空和真空冷冻干燥在缺氧状态下对食用菌进行干燥, 可减缓可溶性糖与氨基化合物的美拉德反应, 因而可溶性糖含量较高; 热风干燥使食用菌暴露于高温、氧气充足的环境中, 有机酸易被氧化形成脂肪酸和氧代有机酸, 或有机酸在受热干燥过程中发生了脱羧反应, 导致其含量降低^[28]。

4 结 论

干、鲜食用菌间的风味物质存在较大差异, 且不同干燥方式下食用菌的风味物质也有所不同。干燥对食用菌风味物质的影响是多方面的, 不仅与食用菌的品种有关, 而且与具体的干燥方式和干燥条件密切相关, 如真空冷冻干燥比较利于原有风味物质的保留, 热风干燥可促使食用菌形成新生风味物质, 但同时也会造成一些特征性风味物质的损失。针对食用菌品种及加工需求的不同, 选取恰当的干燥方式尤为重要。随着联合干燥技术的发展, 如何利用

各干燥技术的优点以构建出有利于形成食用菌独特风味物质的联合干燥技术仍需深入研究。另外,风味物质在干燥过程中的变化规律、特征性风味物质的形成机理及物质间的相互作用还有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 曹世宁, 陈相艳, 崔文甲, 等. 食用菌中呈味物质的研究进展[J]. 食品工业, 2016, 37(3): 231–234.
Cao SN, Chen XY, Cui WJ, *et al.* Research progress of flavor substances in edible fungi [J]. Food Ind, 2016, 37(3): 231–234.
- [2] 温泉, 王锡昌. 食用菌风味物质的研究及应用进展[J]. 长江大学学报(自科版), 2006, 3(4): 211–213, 229.
Wen Q, Wang XC. Research and application progress on flavor substances of edible mushrooms [J]. J Yangtze Univ (Nat Sci Ed), 2006, 3(4): 211–213, 229.
- [3] 刘晓, 闫语婷. 香菇的营养价值及综合利用现状与前景[J]. 食品工业, 2017, 38(3): 207–210.
Liu X, Yan YT. Review on nutritional value and comprehensive utilization of *Lentinus edodes* and present situation [J]. Food Ind, 2017, 38(3): 207–210.
- [4] 余雄涛, 潘鸿辉, 谢意珍. 食用菌风味物质的研究及应用进展[J]. 中国食用菌, 2013, 32(3): 4–7.
Yu XT, Pan HH, Xie YZ. Research and application progress on flavor substances of edible mushrooms [J]. Edible Fungi China, 2013, 32(3): 4–7.
- [5] Wang HC, Zhang M, Adhikari B. Drying of shiitake mushroom by combining freeze-drying and mid-infrared radiation [J]. Food Bioprocess, 2015, 94: 507–517.
- [6] 王海鸥, 扶庆权, 陈守江, 等. 不同真空冷冻干燥方法对杏鲍菇片干燥特性及品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(4): 904–912.
Wang HO, Fu QQ, Chen SJ, *et al.* Effect of different vacuum-freezing drying methods on the drying characteristics and qualities of *Pleurotus eryngii* slices [J]. Jiangsu J Agric Sci, 2018, 34(4): 904–912.
- [7] Lin XH, Xu JL, Sun DW. Investigation of moisture content uniformity of microwave-vacuum dried mushroom (*Agaricus bisporus*) by NIR hyperspectral imaging [J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 109: 108–117.
- [8] 陈义勇, 李家祺, 赵圆圆, 等. 不同干燥方法对金针菇多糖抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(18): 46–50, 55.
Chen YY, Li JQ, Zhao YY, *et al.* Effect of different drying methods on antioxidant activities of polysaccharides extracted from *Flammulina velutipes* [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, 38(18): 46–50, 55.
- [9] 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 WC, *et al.* Effect of drying method on sulfur-containing components in *Lentinula edodes* [J]. Acta Edulis Fungi, 2018, 25(4): 71–79.
- [10] 张乐, 李鹏, 王赵改, 等. 不同干燥方式对香菇品质的影响[J]. 天津农业科学, 2015, 21(7): 149–154.
Zhang L, Li P, Wang ZG, *et al.* Effects of Different Drying Methods on Quality of *Lentinus edodes* [J]. Tianjin Agric Sci, 2015, 21(7): 149–154.
- [11] 陈洪雨, 鲍大鹏, 康前进, 等. 香菇挥发性风味物质的研究进展[J]. 食用菌学报, 2018, 25(4): 105–114.
Chen HY, Bao DP, Kang QJ, *et al.* Research progress of volatiles in *Lentinula edodes* [J]. Acta Edulis Fungi, 2018, 25(4): 105–114.
- [12] Zhang HY, Pu DD, Sun BG, *et al.* Characterization and comparison of key aroma compounds in raw and dry porcini mushroom (*Boletus edulis*) by aroma extract dilution analysis, quantitation and aroma recombination experiments [J]. Food Chem, 2018, 258: 260–268.
- [13] Maga JA. Mushroom flavor [J]. J Agric Food Chem, 1981, 29(1): 1–4.
- [14] Politowicz J, Lech K, Lipan L, *et al.* Volatile composition and sensory profile of shiitake mushrooms as affected by drying method [J]. J Sci Food Agric, 2017, 98: 1511–1521.
- [15] 吴迪, 谷镇, 周帅, 等. 不同干燥技术对香菇和杏鲍菇风味成分的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(22): 188–191.
Wu D, Gu Z, Zhou S, *et al.* Effects of drying methods on flavor components of *Lentinus edodes* and *Pleurotus eryngii* [J]. Sci Technol Food Ind, 2013, 34(22): 188–191.
- [16] 殷朝敏, 范秀芝, 史德芳, 等. HS-SPME-GC-MS 结合 HPLC 分析 5 种食用菌鲜品中的风味成分[J]. 食品工业科技, 2019, 40(3): 254–260.
Yin CM, Fan XZ, Shi DF, *et al.* Flavor compounds analysis of 5 fresh mushrooms using HS-SPME-GC-MS and HPLC [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(3): 254–260.
- [17] 裴斐. 双孢蘑菇冷冻干燥联合微波真空干燥传质动力学及干燥过程中风味成分变化研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
Pei F. Mass transfer characteristics and changes in flavor compounds of *Agaricus bisporus* during freeze drying combined with microwave vacuum drying [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [18] Bozok F, Zarifikhosroshahi M, Kafkas E, *et al.* Comparison of volatile compounds of fresh *Boletus edulis* and *B. pinophilus* in Marmara region of Turkey [J]. Not Bot Horti Agrobot Cluj-Na, 2015, 31(1): 192–195.
- [19] Guo Y, Chen D, Dong Y, *et al.* Characteristic volatiles fingerprints and changes of volatile compounds in fresh and dried *Tricholoma matsutake* Singer by HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS [J]. J Chromatogr B, 2018, 1099: 46–55.
- [20] Poojary MM, Orlén V, Passamonti P, *et al.* Improved extraction methods for simultaneous recovery of umami compounds from six different mushrooms [J]. J Food Compos Anal, 2017, 63: 171–183.
- [21] Dermiki M, Phanphensophon N, Mottram DS, *et al.* Contributions of non-volatile and volatile compounds to the umami taste and overall flavour of shiitake mushroom extracts and their application as flavour enhancers in cooked minced meat [J]. Food Chem, 2013, 141(1): 77–83.
- [22] 薛梅, 杨文建, 胡秋辉. 香菇风味物质形成过程的研究进展(综述) [J]. 食药菌, 2013, 21(6): 349–353.
Xu M, Yang WJ, Hu QH. Study on formation of flavor compounds in *Lentinus edodes* [J]. Edible Med Mushrooms, 2013, 21(6): 349–353.
- [23] Li B, Kimatu BM, Pei F, *et al.* Non-volatile flavour components in *Lentinus edodes* after hot water blanching and microwave blanching [J]. Int J Food Prop, 2018, 20: S2532–S2542.
- [24] 于海龙, 李玉, 陈万超, 等. 不同品种干制香菇子实体等鲜浓度值差异分析[J]. 食品科学, 2018, 39(4): 171–175.
Yu HL, Li Yu, Chen WC, *et al.* Analysis of differential euc in dried fruiting bodies of different cultivars of *Lentinus edodes* [J]. Food Sci, 2018, 39(4): 171–175.
- [25] 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 MD, Long ZF, Li J. Study on flavor compounds in *Lentinus edodes* [J]. Food Sci, 2006, 27(5): 223–226.
- [26] 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.
Tang QS, Chen ZY, Liu XM, *et al.* Influence of drying methods on volatile components of *Flammulina velutipes* [J]. Sci Technol Food Ind, 2015,

- 36(10): 119–124.
- [27] Tian YT, Zhao YT, Huang JJ, *et al.* Effects of different drying methods on the product quality and volatile compounds of whole shiitake mushrooms [J]. Food Chem, 2016, 197(A): 714–722.
- [28] 吴方宁. 干燥方法对白玉蕈(*Hypsizygus marmoreus*)风味物质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- Wu FN. The influence of drying methods on flavor components of white *Hypsizygus marmoreus* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [29] 李琴, 朱科学, 周惠明. 固相微萃取-气相色谱-质谱及气相色谱嗅闻技术分析双孢蘑菇汤的风味活性物质[J]. 食品科学, 2011, 32(16): 300–304.
- Li Q, Zhu KX, Zhou HM. Analysis of flavor components in button mushroom soup by HS-SPME-GC-MS and GC-O [J]. Food Sci, 2011, 32(16): 300–304.
- [30] Ai J. Headspace solid phase microextraction. dynamics and quantitative analysis before reaching a partition equilibrium [J]. Anal Chem, 1997, 69(16): 3260–3266.
- [31] 张艳荣, 吕呈蔚, 刘通, 等. 不同干燥方式对姬松茸挥发性风味成分分析[J]. 食品科学, 2016, 37(10): 116–121.
- Zhang YR, Lv CW, Liu T, *et al.* Influence of drying methods on volatile components of *Flammulina velutipe* [J]. Food Sci, 2016, 37(10): 116–121.
- [32] Chen GT, Wu FN, 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]. Int J Food Prop, 2017, 20(12): 2901–2910.
- [33] 芮汉明, 贺丰霞, 郭凯. 香菇干燥过程中挥发性成分的研究[J]. 食品科学, 2009, 30(8): 255–259.
- Rui HM, He FX, Guo K. Analysis of volatile components in *Lentinus edodes* during drying process [J]. Food Sci, 2009, 30(8): 255–259.
- [34] 麦雅珍, 杨锡洪, 连鑫, 等. SDE/GC-MS 测定南美白对虾的挥发性香气成分[J]. 现代食品科技, 2014, 30(1): 206–210.
- Mai YY, Yang XH, Lian X, *et al.* Determination of volatile aroma compounds of *P. vannamei* by SDE/GC-MS [J]. Mod Food Sci Technol, 2014, 30(1): 206–210.
- [35] Birch AN, Petersen MA, Hansen ÅS. Review: Aroma of wheat bread crumb [J]. Cereal Chem, 2014, 91(2): 105–114.
- [36] Yang MS, Chyau CC, Horng DT, *et al.* Effects of irradiation and drying on volatile components of fresh shiitake (*Lentinus edodes*Sing) [J]. J Sci Food Agric, 2015, 76(1): 72–76.
- [37] 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]. J Wood Sci, 2004, 50(4): 358–364.
- [38] Kim KS, Cho DB, Seo HY. Analysis of the volatile flavor compounds produced during the growth stages of the shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) [J]. Prev Nutr Food Sci, 2003, 8(4): 306–314.
- [39] 孙宝国. 食用调香术[M]. 杭州: 化学工业出版社, 2003.
- Sun BG. Edible flavoring [M]. Hangzhou: Chemical Industry Press, 2003.
- [40] 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 BJ, Chen SL, Ma QY, *et al.* Effects of three drying processes on volatile compounds in *Lentinus edodes* [J]. Food Sci, 2014, 35(19): 106–110.
- [41] 王恺, 慕妮, 李亮, 等. 不同发酵剂对发酵香肠挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(14): 177–181.
- Wang K, Mu N, Li L, *et al.* Analysis of aroma components in fermented sausage with different starter cultures [J]. Sci Technol Food Ind, 2013, 34(14): 177–181.
- [42] Ma N, Pei F, Jie Y, *et al.* Valid evaluation of volatile flavor composition of fresh and dehydrated *Tuber indicum* with different drying methods [J]. CyTA-J Food, 2018, 16(1): 413–421.
- [43] Frank K, Christensen LP, Merete E. Changes in volatile compounds of carrots (*Daucus carota* L.) during refrigerated and frozen storage [J]. J Agric Food Chem, 2003, 51(18): 5400–5407.
- [44] Scalone GLL, Tatiana C, Norbert DK, *et al.* Influence of free amino acids, oligopeptides, and polypeptides on the formation of pyrazines in maillard model systems [J]. J Agric Food Chem, 2015, 63(22): 5364–5372.
- [45] Li XB, Feng T, Zhou F, *et al.* Effects of drying methods on the tasty compounds of *Pleurotus eryngii* [J]. Food Chem, 2015, 166: 358–364.
- [46] Walde SG, Velu V, Jyothirmayi T, *et al.* Effects of pretreatments and drying methods on dehydration of mushroom [J]. J Food Eng, 2006, 74(1): 108–115.
- [47] Wu FN, Jing T, Fei P, *et al.* The influence of four drying methods on nonvolatile taste components of white *Hypsizygus marmoreus* [J]. Eur Food Res Technol, 2015, 240(4): 823–830.
- [48] Pei F, Shi Y, Gao X, *et al.* Changes in non-volatile taste components of button mushroom (*Agaricus bisporus*) during different stages of freeze drying and freeze drying combined with microwave vacuum drying [J]. Food Chem, 2014, 165: 547–554.
- [49] 宫雪. 不同干燥方式褐环乳牛肝菌风味成分分析及电子舌感官评价[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- Gong X. Analysis of the flavor components and the evaluation of electronic tongue in the different drying methods [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
- [50] 王振宇, 刘欢, 马俪珍, 等. 热处理下的猪肉蛋白质特性[J]. 食品科学, 2008, (5): 73–77.
- Wang ZY, Liu H, Li ZA, *et al.* Characteristics of porcine proteins by heat treatment [J]. Food Sci, 2008, (5): 73–74.
- [51] Shallenberger RS. Taste chemistry [M]. 1993. DOI: 10.1007/978-1-4615-2666-7
- [52] Kang MW, Chung S J, Lee HS, *et al.* The sensory interactions of organic acids and various flavors in ramen soup systems [J]. J Food Sci, 2010, 72(9): S639–S647.

(责任编辑: 武英华)

作者简介



侯 会, 硕士研究生, 主要研究方向为食品营养与化学。

E-mail: 2018108074@njau.edu.cn



赵立艳, 博士, 教授, 主要研究方向为食品营养与化学。

E-mail: zhlychen@njau.edu.cn