

doi:10.12301/spxb202300128

文章编号:2095-6002(2023)03-0023-10

引用格式:杨文建,孙荣贵,王威威,等.食用菌肽的制备、功能特性及综合利用[J].食品科学技术学报,2023,41(3):23-32.



YANG Wenjian, SUN Ronggui, WANG Weiwei, et al. Research progress on preparation, functional characteristics and comprehensive utilization of peptides from edible mushroom[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(3): 23-32.

食用菌肽的制备、功能特性及综合利用

杨文建, 孙荣贵, 王威威, 徐辉, 刘建辉,

谢旻皓, 苏安祥, 裴斐, 胡秋辉

(南京财经大学食品科学与工程学院/江苏省食用菌保鲜与深加工工程研究中心/

江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 江苏南京, 210023)

摘要:我国是食用菌生产大国,食用菌总产量居世界第一。肽是食用菌中重要的生物活性成分和典型呈味物质,但目前食用菌肽功能活性与呈味机制不明确,标准化和产业化生产加工技术缺乏,严重制约食用菌肽产业的快速和健康发展。阐述了从食用菌子实体、菌丝体、生产加工副产物等不同原料来源制备食用菌肽的形式;揭示了利用生物发酵的方法制备食用菌肽具有周期短、成本低、易调控等多种优点,将成为食用菌肽类产品开发的重要途径。但是,食用菌肽单一纯品的凝胶色谱与反相高效液相色谱分离纯化等制备工艺复杂,尚难以产业化。目前,食用菌肽的健康功能研究主要集中在肽通过抑制血管紧张素转化酶(ACE)活性起到降血压的作用,食用菌肽在抗氧化、抗炎、免疫调节、神经保护等方面的作用研究虽有涉及,但并不系统和深入,食用菌肽的健康功能作用有待进一步挖掘。食用菌肽因鲜味不足,主要与传统味精、核苷酸和氨基酸等鲜味剂协同使用,充分挖掘食用菌中典型风味肽,实现高效率、低成本、高鲜度的食用菌风味肽制备是提升食用菌肽利用水平的重要突破口。同时,食用菌肽具有保鲜作用、抑菌和抗病毒作用、毒性等多种功能特性。建立不同食用菌原料来源的肽特性信息库,构建食用菌生物制造肽的高效生物转化工程菌,建立具有特定功能肽的食用菌细胞工厂,实现食用菌肽的绿色生物制造关键技术的产业化升级,将成为食用菌肽最有发展前景的研究方向。

关键词:食用菌;肽;功能活性;呈味;综合利用**中图分类号:** TS255.3**文献标志码:** A

我国是食用菌生产大国、消费大国和出口大国,具有极其丰富的食用菌资源。我国食用菌总产量一直位居世界第一。2023年联合国粮食与农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)的统计数据显示,2021年我国食用菌总产量居世界第一(4.11×10^7 t),其次是日本(4.69×10^5 t)、波兰(3.79×10^5 t)、美国(3.44×10^5 t)。

食用菌是味道鲜美、营养丰富的微生物原料,已被大量研究证实富含蛋白质、肽、多糖、膳食纤维、三萜类、维生素等多种营养与功能成分,具有抗肿瘤、抗氧化、免疫调节、预防和治疗心血管系统疾病等功能活性^[1]。因此,如何充分利用食用菌中的重要成分成为食用菌精深加工研究的主要方向。然而,目前我国食用菌精深加工程度严重不足,总加工率仅

收稿日期:2023-03-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(32202033);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

Foundation: National Natural Science Foundation of China (32202033); The Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD).

第一作者:杨文建,男,教授,博士,主要从事农产品贮藏与精深加工方面的研究。

有6%,精深加工率更是不到总加工产品的10%^[2],且主要集中在多糖、蛋白、膳食纤维等功能成分的开发上,食用菌肽类精深加工产品的开发严重不足。食用菌肽是蛋白质经酶解形成的分子大小不同的中间产物,不仅具有抗氧化、降血压、抗癌、抗炎症、抑菌、抗病毒等功能活性,还具有呈现鲜味、咸味的增鲜降盐等特征风味功能,具有良好的开发价值和市场前景^[3]。目前,关于肽的研究主要是从动物、植物、酵母菌等微生物发酵及其代谢产物中提取制备,而从食用菌中制备肽的研究相对较少,市场上关于食用菌肽的产业化产品更是十分少见。因此,本研究基于现有的研究对食用菌肽的来源、存在形式、结构表征、功能特性及其综合利用进行了较为全面的总结,以期对食用菌肽的综合开发和利用提供一定的参考。

1 食用菌肽的原料来源及制备方法

食用菌含有丰富的蛋白质,是天然肽的重要来源。目前食用菌肽主要是从其子实体、生产加工副产物、菌丝体等原料中提取蛋白后经水解、分离、纯化制备,或利用食用菌菌种发酵代谢物制备肽或利用固相合成法制备肽。

1.1 食用菌蛋白水解制备

1.1.1 从食用菌子实体中制备

目前,食用菌肽的制备主要集中在由食用菌子实体经分离纯化获取,通过将食用菌子实体脱水干燥、粉碎、浸提后,再经酶解或酸解或碱解等方式将蛋白分解成不同分子段肽。已有研究从双孢蘑菇、香菇、羊肚菌、杏鲍菇、蛹虫草、姬松茸等多种食用菌子实体中提取获得了肽^[4-6]。由于酸碱溶液对环境的腐蚀性强,故单纯的酸碱水解法使用较少;相对而言酶解法整个反应过程条件温和、便于控制,能很好地满足实际生产中的需求,因此该方法是工业上提取食用菌活性肽应用最广泛的方法。但因食用菌的品种不同、所含蛋白的分子结构差别也较大,再加上制备方法和酶解条件的差异,获得的肽结构和功能特性呈现出较大的差异。利用食用菌子实体制备肽存在生产效率和产量较低、产品质量难控制等产业问题,如何建立食用菌子实体肽的高效率、高品质的制备技术是当前产业最重要问题。

1.1.2 从发酵菌丝体中制备

从发酵菌丝体中制备肽,主要是将各种食用菌

菌株接入合适的培养基进行发酵,发酵产生的菌丝体经干燥、粉碎、提取、分离纯化制备出肽。目前,尽管利用食用菌发酵菌丝体或代谢产物来生产肽的研究较少,但由于该方法具有相对效率高、成本低、安全性高、可定向控制等优点而成为食用菌制备肽的最具有潜力的发展方向。目前已有研究从杏鲍菇、灵芝、虎奶菇、猴头菇、羊肚菌等食用菌菌株发酵菌丝体中分离鉴定出具有抗氧化、抗菌、降血压等作用的多种活性肽^[7-11]。利用生物发酵的方法制备食用菌肽与从食用菌子实体中提取相比,具有周期短、成本低、易调控等多种优点,将成为食用菌肽类产品开发的重要途径。

1.1.3 从食用菌副产物中制备

食用菌生产及产后预处理与加工过程中会产生大量残次菇、菇脚、菇蒂、菇柄、菇渣、蒸煮液等副产物,利用这些食用菌加工副产物生产食用菌肽,能够降低成本、提高食用菌综合利用率。目前已有从香菇等食用菌废弃物中制备一种能有效激活乙醇脱氢酶(ADH)、乙醛脱氢酶(ALDH)酶系的肽,具有良好的醒酒应用前景^[12-13]。以杏鲍菇的加工废弃物杏鲍菇柄和杏鲍菇菌渣为原料制备出了一种具有抗氧化作用的活性肽,其具备较强的清除DPPH自由基的活性^[14-15]。利用双孢菇菇柄、异形菇等边角料,通过对其酶解条件的优化,获得稳定、高活性的血管紧张素转换酶(ACE)抑制肽^[16]。如何将食用菌产业产生的大量副产物充分利用起来,制备出高附加值的肽类产品,具有很好的产业意义和发展空间。

1.2 固态合成法制备

用固态合成法制备食用菌肽主要是依据从食用菌中分离纯化制备出来的肽链结构信息,来获取所需特定已知氨基酸序列的肽。目前食用菌肽纯品的功能活性与呈味机制研究使用的肽原料主要是采用固态合成的方式得到的食用菌肽。已经有研究从猴头菇、灵芝、双孢蘑菇等食用菌中鉴定出功能活性肽序列,通过固态合成的方法制备出高纯度的活性肽用以后续实验研究^[8,17]。固相合成法常用于实验室制备,其获得的肽产品纯度高,以便于开展基础性研究。但固相合成法基本上只能用于氨基酸数目较少、分子质量较小的肽的合成,完全通过固相合成法获得大分子的肽仍具有较大难度。此外固相合成成本相对较高,合成效率较低,难以实现大规模工业化生产,诸多因素限制了固相合成肽的发展。

2 食用菌肽的存在形式与结构表征

2.1 食用菌肽的存在形式

食用菌中的肽除了以蛋白质和小分子肽类形式存在以外,还有一部分以与多糖或脂类结合形成糖肽、脂肽等形式存在^[18]。目前,关于食用菌肽的研究大部分是经蛋白水解形成小分子肽类,但食用菌蛋白(肽)存在于组织细胞内部,在从食用菌中提取肽之前必须破坏细胞结构,由于肽的生物活性取决于其分子构象的完整性,但其对制备过程中的热、极端 pH 值和高浓度有机溶剂等存在敏感^[19]。

2.2 食用菌肽的结构表征

食用菌肽的制备主要是从食用菌原料(子实体、菌丝体、副产物等)中提取后经超滤分离得到不同分子质量肽。目前,食用菌肽的研究大多以超滤后的不同分子质量范围的肽混合物为主,由于肽的单一纯品需进一步凝胶色谱分离纯化、反相高效液相色谱 RP-HPLC 分离纯化、UPLC-Q-TOF-MS 分离鉴定,制备工艺复杂且难以产业化,目前主要处于研究阶段。

3 食用菌肽的功能特性与综合利用

食用菌中肽的结构不同,导致其具有不同的功能特性,目前食用菌肽的功能特性研究主要集中在健康功能活性作用、呈味作用、保鲜作用、抑菌抗病毒作用、毒性作用等方面,其中食用菌肽的健康功能作用和呈味作用是目前研究的重点。

3.1 食用菌肽的健康功能活性

食用菌肽已被研究证实具有降血压、抗氧化、抗肿瘤、抗炎、调节肠道菌群等多种健康功能活性^[19]。典型食用菌中的肽结构及功能活性汇总见表 1。其中通过抑制 ACE 活性实现降血压功能的肽类研究最多,已从灵芝、双孢蘑菇、蟹味菇等 10 余种食用菌中制备出具有 ACE 抑制活性的肽,食用菌被认为是 ACE 抑制肽的良好来源。研究表明:ACE 活性过高是导致血压升高的主要因素,当其活性受到抑制时,血压才会得到有效的控制。与常规降压药物相比,ACE 抑制肽为天然的且无副作用,基于药食同源的食用菌 ACE 抑制肽研究成为热点。研究多采用水解食用菌蛋白、膜分离纯化获取 ACE 抑制肽,通过质谱技术鉴定其结构。利用酶抑制动力学模型研究

食用菌源 ACE 抑制肽酶抑制模式,研究表明食用菌源 ACE 抑制肽多以竞争性抑制模式和非竞争性抑制模式发挥作用,混合式抑制模式较少。肽的氨基酸序列、N 端和 C 端的氨基酸组成以及肽链的长度都与其功能活性相关,由表 1 知食用菌源 ACE 抑制肽 C 端多为脯氨酸和亮氨酸。此外,由于食用菌来源的抗氧化剂无副作用、活性高、成本低,作为潜在天然抗氧化剂越来越受到关注,大量食用菌抗氧化剂研究仍旧集中在多糖,对食用菌抗氧化肽的研究尚未得到深入。目前已经从杏鲍菇、灵芝、松茸、冬虫夏草、羊肚菌等十几种食用菌中多采用酶解法后经超滤获取不同分子质量的抗氧化酶解物^[10-15]。许多食用菌抗氧化肽并未经过纯化鉴定,其在体内发挥抗氧化作用的机制尚需更加深入研究。目前对于食用菌肽抗肿瘤研究较少,从羊肚菌中制备出一种通过线粒体凋亡途径诱导人宫颈癌 HeLa 细胞凋亡的八肽,从猴头菇提取到的小分子十一肽可以显著抑制肺癌 Chago-K1 细胞系的增殖作用,从香菇子实体中提取的活性肽可以通过减少抗凋亡蛋白 Bcl-2 和 c-FLIP 以及增加促凋亡蛋白 Bax 来介导肺癌细胞的凋亡^[20-22]。与传统化疗药物相比,食用菌源活性肽具有副作用小、容易吸收和良好的组织渗透性等优点,因此具备抗肿瘤药物的潜力。此外,从杏鲍菇菌丝体中分离出 Fr1 和 Fr2 两个肽组分,能够在体外起到对肠道微生物婴儿双歧杆菌、青春双歧杆菌、嗜酸乳杆菌和保加利亚乳杆菌的增殖作用^[7]。从目前研究分析,食用菌肽的健康功能主要集中在肽通过抑制 ACE 活性起到降血压功能作用的研究,食用菌肽在抗氧化、抗炎症、免疫调节、神经保护方面的研究虽有涉及,但研究并不系统深入,食用菌肽的健康功能作用有待进一步挖掘。

3.2 食用菌肽的呈味作用

天然食用菌的呈鲜味成分主要包括核苷酸、游离氨基酸、肽类等,其中肽类主要是通过将食用菌蛋白分解产生的小分子肽。新鲜食用菌味道鲜美,已有大量研究从香菇、草菇、杏鲍菇、羊肚菌、蟹味菇、大球盖菇、白玉菇等食用菌中分离鉴定出呈味的肽类。典型食用菌中的肽结构及呈味特性汇总见表 2。因不同来源蛋白分子结构差别较大,水解产生的小分子肽种类繁多,但并不是所有的小分子肽都能呈现鲜味。研究表明:呈味肽的风味特征还取决于其一级结构和氨基酸序列,一般是 2~8 肽的结

表1 典型食用菌中的肽结构及功能活性

Tab.1 Structure and functional activity of peptides in typical edible mushroom

来源	功能活性	肽结构	文献
灵芝	降血压	Gln-Leu-Val-Pro、Gln-Asp-Val-Leu、Gln-Leu-Asp-Leu	[8]
	抗氧化	Ser-Asp-Gly-Ser	[23]
		Ser-Asp-Gly-Ser、Ala-His-Leu(Ile)-Leu(Ile)-Leu(Ile)、Leu(Ile)-Leu(Ile)-Leu(Ile)-Thr-Phe-His-Ala	[24]
蟹味菇	降血压	Leu-Ser-Met-Gly-Ser-Ala-Ser-Leu-Ser-Pro	[25]
双孢蘑菇	ACE 抑制剂	Ala-His-Glu-Pro-Val-Lys、Arg-Ile-Gly-Leu-Phe、Pro-Ser-Ser-Asn-Lys	[4]
杏鲍菇	抗氧化	Glu-Ser-Ala-Gly-Leu	[15]
灰树花	ACE 抑制剂	Val-Ile-Glu-Lys-Tyr-Pro	[26]
松茸	ACE 抑制剂、 抗氧化	Leu-Leu-Val-Thr-Leu-Lys、Ile-Ile-Ser-Lys-Ile-Lys、Ile-Leu-Ser-Lys-Leu-Lys、Leu-Ile-Asp-Lys-Val-Val-Lys、Trp-Ala-Leu-Lys-Gly-Tyr-Lys	[27]
	抗炎	Ser-Asp-Ile-Lys-His-Phe-Pro-Phe、Ser-Asp-Leu-Lys-His-Phe-Pro-Phe、Ser-Asp-Ile-Lys-His-Phe-Pro-Phe、Ser-Asp-Leu-Lys-His-Phe-Pro-Phe、Trp-Phe-Asn-Asn-Ala-Gly-Pro	[28-29]
羊肚菌	抗肿瘤	Ser-Leu-Ser-Leu-Ser-Val-Ala-Arg	[20]
	神经保护	Thr-Ile-Thr-Leu-Glu-Val-Glu-Ser-Ser-Asn-Ile-Thr-Asn-Asp-Val-Lys	[30]
冬虫夏草	抗氧化、抗炎症	Ala-Met-Ala-Pro-Pro-Tyr-Gly-Tyr-Arg-Thr-Pro-Asp-Ala-Ala-Gln	[31]
富硒蛹虫草	神经保护	Arg-Tyr-Asn-Ala-Met-Asn-Asp-Tyr-Thr、Val-Pro-Arg-Lys-Leu-Met	[32]
猴头菇	免疫调节	Lys-Ser-Pro-Leu-Tyr	[33]
	抗氧化	Gly-Ser-Gly-Gly-Ser-Gly-Gly-Ser-Ala、Gly-Gly-Val-Gly-Ala-Pro、Leu-Ala-Gly-His	[34]
牛肝菌	ACE 抑制剂、 抗氧化	Asp-Leu-Asp-Leu-Leu-Glu-Lys-Gly-Ile-Arg-Lys-Thr、Asn-Gly-Gly-Asn-Ala-Pro-Ile、Val-Ser-Trp-Asn-Val-Leu-Gln-Glu-Pro、Asp-Thr-Gly-Arg-Gly-Leu-Gly-Ala-Ser-His、Ile-Asp-Asp-Asn-Leu-Asp-Asn-Leu-Ile-Ile-Lys-Leu、Leu-Ile-Tyr-Ala-Gln-Gly-Phe-Ser-Lys	[35]
姬菇	ACE 抑制剂	Arg-Leu-Pro-Ser-Glu-Phe-Asp-Leu-Ser-Ala-Phe-Leu-Arg-Ala、Arg-Leu-Ser-Gly-Gln-Thr-Ile-Glu-Val-Thr-Ser-Glu-Tyr-Leu-Phe-Arg-His	[36]
多脂鳞伞	ACE 抑制剂	Gly-Glu-Gly-Gly-Pro	[37]

构,其中以3~5肽为主(表2)。食用菌肽与核苷酸、谷氨酸钠的呈味阈值相比,大多数小分子肽显示出较弱的鲜味,但研究证实,部分食用菌肽的协同使用可以增强味精(谷氨酸钠)的呈鲜效果,同时具有安全、营养功能等特点^[38-39]。关于食用菌呈味肽主要以鲜味为主,部分还呈现出一定的咸味和苦味^[40]。由于食用菌肽的鲜味不足,目前主要是与传统味精、核苷酸和氨基酸等鲜味剂的协同使用,使用的主要形式为食用菌粉、食用菌水解物经超滤、凝胶色谱和反相高效液相色谱分离获取鲜味肽,与所需传统味精类化合物协同使用可增强其鲜味强度且鲜味更加圆润可口。未来,如何实现高效率、低成本、高鲜度的食用菌风味肽制备是提升食用菌肽利用水平的重要突破口。

3.3 食用菌肽的保鲜作用

肽类的食品保鲜剂研究并不多,主要是通过抑

菌实现保鲜效果,来源于食用菌类的肽保鲜剂仅有少量报道。研究以杏鲍菇子实体为原料,通过蛋白提取和碱性蛋白酶酶解后得到的杏鲍菇活性肽,对金黄色葡萄球菌、沙门氏菌、大肠杆菌有较强的抑制作用,抑菌率分别为57.7%、55.5%、87.1%^[54]。研究证明金针菇蛋白酶解肽通过抑制SOD和CAT活性的下降和维生素C的损失可以明显降低冬枣贮藏期间的腐烂率,对冬枣具有显著的保鲜效果^[55]。羧甲基壳聚糖-滑菇肽复合涂膜能够抑制杏鲍菇低温贮藏期间感官品质劣变,延缓衰老进程,减少营养损失^[56]。目前食用菌肽类的保鲜作用主要集中在其抑菌作用方面,加大探索食用菌肽对新鲜果蔬采后生理调节机制方面的研究,能够为食用菌肽在保鲜领域的应用提供更好的理论支撑。

3.4 食用菌肽的抑菌和抗病毒作用

食用菌肽具有抑制真菌、细菌、病毒等生长的作

表2 典型食用菌中的肽结构及呈味特性

Tab. 2 Structure and flavor characteristics of peptides in typical edible mushroom

来源	呈味特性	肽结构	文献
香菇	鲜味	Gly-Cys-Gly、Glu-Pro-Glu、Cys-Met、Val-Phe、Gly-Glu	[5]
草菇	鲜味	Asp-Asp-Cys-Pro-Asp-Lys、Leu-Val-Asp-Lys-Pro-Arg、Gln-Ala-Asp-Lys-Arg-Lys、Asp-Thr-Phe-Asn-Asp-Lys	[41]
	鲜味	Ala-Ser-Asn-Met-Ser-Asp-Leu、Leu-Gln-Pro-Leu-Asn-Ala-His	[42]
双孢蘑菇	厚重感	Gly-Leu-Pro-Asp、Gly-His-Gly-Asp	[17]
白玉菇	鲜味	Glu-Ala-Lys-Val-Tyr、Glu-Leu-Glu-Leu-Gln、Ser-Leu-Leu-Gln-Pro-Leu、Asn-Tyr-Asn-Gly-Gly-Tyr、Val-Ala-Asn-Gly-Gly-Gly-Phe-Gly-Ala-Ala、Glu-Leu-Gln-Ser-Gly-Asn-Thr-Tyr	[43-44]
华美牛肝菌	鲜味	Ser-Gly-Pro-Val-Gly-Glu-Arg、Arg-Asp-Glu-Ala-Ser-Val-Leu-Arg、Val-Trp-Asp-Ser-Ser-Glu-Ser-Leu-Arg	[45]
远东疣柄牛肝菌	鲜味	Asp-Gln-Glu-Asp-Leu-Asp-Glu-Ser-Leu-Ile-Gly-Val-Lys、Phe-Asn-Glu-Ile-Ile-Lys-Glu-Thr-Ser-Thr、Tyr-Asn-Glu-Tyr-Pro-Pro-Leu-Gly-Arg	[46]
牛肝菌	鲜味	Asp-Gly-Phe、Lys-Cys-Gly-Gln、His-His-Tyr-Glu	[47]
粉黄黄肉牛肝菌	鲜味	Gly-Ser-Ala-Gln-Ala、Ile-Ser-Lys-Glu-Lys、Leu-Pro-Lys-Glu-Arg-Leu-Tyr-Val、Val-Glu-Asn-Gln-Gln-Leu-Ala-Leu	[48]
兰茂牛肝菌	鲜味	Phe-Lys-Asp-Leu-Gly-Glu-Glu-Asn-Phe-Lys、Lys-Met-Asp-Asp-Phe-Ala-Ala-Phe-Val-Glu-Lys、Leu-Val-Asn-Glu-Val-Thr-Glu-Phe-Ala-Lys	[49]
平菇	鲜味	Glu-Pro-Leu-Cys-Asn-Gln、Ser-Gly-Cys-Val-Asn-Glu-Leu、Pro-His-Glu-Met-Gln、Ser-Glu-Pro-Ser-His-Phe、Glu-Ser-Cys-Ala-Pro-Gln-Leu	[50]
多汁乳菇	鲜味	Glu-Val-Ala-Glu-Ala-Leu-Asp-Ala-Pro-Lys-Thr-Thr、Ala-Val-Leu-Glu-Glu-Ala-Gln-Lys-Val-Glu-Leu-Lys、Ala-Glu-Asp-Leu-Ser-Leu-Arg、Lys-Val-Asp-Val-Asp-Ser-Leu-Lys	[51]
灰树花	甜味、酸味、鲜味、咸味	Arg-Ser-Gly-Val	[52]
	苦味、涩味、酸味	Tyr-His-Gly-Pro-Phe	[52]
蟹味菇	鲜味	Glu-Gly-Thr-Ala-Gly	[53]

用,有研究从杏鲍菇菌丝体和子实体中分离出多种肽组分,并证明杏鲍菇菌丝体肽组分对大肠杆菌、沙门氏菌、金黄色葡萄球菌和产气荚膜梭菌等有害菌有一定程度的抑制作用,并且对革兰氏阴性菌的抑制作用显著高于革兰氏阳性菌^[7],而杏鲍菇子实体肽能够显著抑制尖孢镰刀菌和落花生球腔菌的菌丝生长^[57]。还有研究证实,虎奶菇菌丝体抗菌肽对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的实际抑菌率分别为74.17%和86.22%^[9]。翘鳞香菇活性肽对革兰氏阳性和革兰氏阴性细菌均无显著抑制作用,但对人类各种真菌病原体表现出强烈的抗真菌活性^[58]。与抗真菌和细菌肽相比,食用菌源抗病毒肽的研究较少。从皱盖罗鳞伞中提取出抗病毒蛋白RC28,对1型单纯疱疹病毒有着较好的抗病毒活性,红菇子实体肽对HIV-1逆转录酶有较强的抑制活性^[59-60]。目前抗菌肽在医药领域的开发与利用具有很好的发展前景,但利用食用菌开发抗菌抗病毒肽类的研究

才刚刚起步,食用菌肽的抑菌抗病毒作用具有很大的发展空间。

3.5 食用菌肽的毒性

近年来,因误食野生菌导致中毒的主要原因是由于这些野生菌含有一种环肽类毒素物质所引起的,并被证实为鹅膏毒肽、鬼笔毒肽和毒伞素等肽类。研究对肉褐鳞环柄菇和毒环柄菇中的环肽类毒素进行分析发现,从肉褐鳞环柄菇中鉴定出了 α -鹅膏毒肽(α -amanitin)、 β -鹅膏毒肽(β -amanitin)、三羟鹅膏毒肽(amanin)、三羟鹅膏毒肽酰胺(amaninamide),有研究从毒环柄菇中鉴定出了 α -鹅膏毒肽和amanin II^[61]。未来,关于食用菌毒性肽的研究主要集中在两个方面,一方面是如何使野生菌在加工过程中脱毒,从而提高食用菌的综合利用度;另一方面是如何将野生菌中的毒性肽充分开发,加大基础性研究力度,探索其在生物农药和生物医药等领域的利用价值。

4 食用菌肽产业未来发展前景

我国食用菌资源丰富,不同食用菌来源的肽具有不同的功能特性和应用价值,食用菌肽不仅具有多种功能活性,有的还能够呈现出一定的鲜味,因此,需要充分弄清楚不同原料来源的食用菌肽的营养特性、功能特性、应用领域,建立不同原料来源的肽特性信息库,有效指导产业开展食用菌肽的分类加工,对食用菌肽类产品的开发具有重要的意义。

食用菌中的肽能够呈现不同的风味,但目前主要集中在呈味现象,而呈现鲜味、咸味、苦味的呈味机制以及构效关系目前仍不清楚,鲜味肽的生物合成途径等有待进一步阐明;其他食品风味成分对食用菌肽呈现鲜味效应的干扰机制仍需进一步明确。

目前,食用菌肽类产品主要为食用菌蛋白粗提物水解后的肽类混合物,肽类纯品主要通过难以工业化的色谱技术制备,规模化、产业化的食用菌肽生产技术仍是制约该领域发展的重要瓶颈问题,建立绿色安全、高效、高纯度、低成本的食用菌肽产业化加工技术是需要攻克的重要研究方向。

通过阐明不同食用菌肽合成的基因组学信息,从生物工程、基因工程、系统代谢工程等技术角度开展基因组设计与构架,开展食用菌生物制造肽的高效生物转化工程菌构建,建立具有特定功能肽的食用菌细胞工厂,成为食用菌肽最有发展前景的研究方向;通过采用定向可控的生物制造技术开展食用菌肽等方面的研究,实现食用菌肽的绿色生物制造关键技术的产业化升级。

参考文献:

[1] HAMZA A, GHANEKAR S, KUMAR D S. Current trends in health-promoting potential and biomaterial applications of edible mushrooms for human wellness [J]. *Food Bioscience*, 2023, 51: 102290.

[2] 杨文建,王柳清,胡秋辉. 我国食用菌加工新技术与产品创新发展现状[J]. *食品科学技术学报*, 2019, 37(3): 13-18.

YANG W J, WANG L Q, HU Q H. Development situation on processing technology and product innovation of edible mushroom in China [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 37(3): 13-18.

[3] ZHOU J J, CHEN M F, WU S J, et al. A review on mushroom-derived bioactive peptides: preparation and biological activities [J]. *Food Research International*, 2020, 134: 109230.

[4] LAU C C, ABDULLAH N, SHUIB A S, et al. Novel angiotensin I-converting enzyme inhibitory peptides derived from edible mushroom *Agaricus bisporus* (J. E. Lange) Imbach identified by LC-MS/MS [J]. *Food Chemistry*, 2014, 148: 396-401.

[5] KONG Y, ZHANG L L, ZHAO J, et al. Isolation and identification of the umami peptides from shiitake mushroom by consecutive chromatography and LC-Q-TOF-MS [J]. *Food Research International*, 2019, 121: 463-470.

[6] GAO J, FANG D L, MUIBDE KIMATU B, et al. Analysis of umami taste substances of morel mushroom (*Morchella sextelata*) hydrolysates derived from different enzymatic systems [J]. *Food Chemistry*, 2021, 362: 130192.

[7] 孙亚男. 杏鲍菇菌丝体多肽分离纯化及其生物活性研究[D]. 青岛: 青岛农业大学, 2017.

SUN Y N. Extraction and purification of polypeptides from *Pleurotus eryngii* mycelium and study of their biological activity [D]. Qingdao: Qingdao Agricultural University, 2017.

[8] WU Q, LI Y, PENG K, et al. Isolation and characterization of three antihypertension peptides from the mycelia of *Ganoderma lucidum* (Agaricomycetes) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(29): 8149-8159.

[9] 张书会, 罗璐, 孙雪言, 等. 虎奶菇菌丝体抗菌肽提取工艺优化及活性研究 [J]. *食品与机械*, 2022, 38(8): 158-165.

ZHANG S H, LUO L, SUN X Y, et al. Optimization of extraction process and activity study of antimicrobial peptides from *Pleurotus tuber-regium* mycelium [J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(8): 158-165.

[10] 徐艳, 丁静, 孙桂红, 等. 猴头菌丝多肽的制备及抗氧化活性研究 [J]. *中国酿造*, 2014, 33(6): 91-95.

XU Y, DING J, SUN G H, et al. Preparation and antioxidant activity of polypeptide from *Hericium erinaceus* mycelium [J]. *China Brewing*, 2014, 33(6): 91-95.

[11] 杨玉红, 杨建, 张光宇, 等. 超声波破碎法提取羊肚菌发酵菌丝体生物活性肽条件的优化 [J]. *食品科技*, 2014, 39(7): 252-257.

YANG Y H, YANG J, ZHANG G Y, et al. Optimiza-

- tion of ultrasonic disintegration extraction conditions of bioactive peptides from morel mycelium[J]. *Food Science and Technology*, 2014, 39(7): 252–257.
- [12] ZHAO R J, HUO C Y, QIAN Y, et al. Ultra-high-pressure processing improves proteolysis and release of bioactive peptides with activation activities on alcohol metabolic enzymes *in vitro* from mushroom foot protein[J]. *Food Chemistry*, 2017, 231: 25–32.
- [13] 程湛, 杨宇迪, 匡绮蓉, 等. 香菇肽提取优化及其体外抗氧化醒酒活性[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(4): 93–102.
- CHENG Z, YANG Y D, KUANG Q R, et al. Optimized extraction of *Lentinus edodes* peptides and effects on facilitating alcohol metabolism *in vitro*[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(4): 93–102.
- [14] 裴云成, 朱丹, 崔采莲, 等. 杏鲍菇柄抗氧化肽的制备及其稳定性初步分析[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(4): 146–152.
- PEI Y C, ZHU D, CUI C L, et al. Preparation of antioxidant peptides from *Pleurotus eryngii* stalk and its stability preliminary analysis[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(4): 146–152.
- [15] 蒋益, 王红连, 何静霞, 等. 菌渣蛋白肽的制备及其抗氧化肽的分离鉴定[J]. *食用菌*, 2016, 38(2): 74–79.
- JIANG Y, WANG H L, HE J X, et al. Preparation of protein peptides from mushroom residues and isolation and identification of antioxidant peptides[J]. *Edible Fungi*, 2016, 38(2): 74–79.
- [16] 王睿, 俞建民, 何奎, 等. 双孢菇边角料制备ACE抑制肽[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(1): 125–134.
- WANG R, YUN J M, HE K, et al. Preparation of ACE inhibitory peptide from scraps of *Agaricus bisporus*[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(1): 125–134.
- [17] FENG T, WU Y, ZHANG Z W, et al. Purification, identification, and sensory evaluation of kokumi peptides from *Agaricus bisporus* mushroom[J]. *Foods (Basel, Switzerland)*, 2019, 8(2): 43.
- [18] LIU M Q, LI J Z, KONG F Z, et al. Induction of immunomodulating cytokines by a new polysaccharide-peptide complex from culture mycelia of *Lentinus edodes*[J]. *Immunopharmacology*, 1998, 40(3): 187–198.
- [19] LANDI N, CLEMENTE A, PEDONE P V, et al. An updated review of bioactive peptides from mushrooms in a well-defined molecular weight range[J]. *Toxins*, 2022, 14(2): 84.
- [20] XIONG C, LI P, LUO Q, et al. Induction of apoptosis in HeLa cells by a novel peptide from fruiting bodies of *Morchella importuna* via the mitochondrial apoptotic pathway[J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine: ECAM*, 2021: 5563367.
- [21] SANGTITANU T, SANGTANOO P, SRIMONGKOL P, et al. Peptides obtained from edible mushrooms: *Hericium erinaceus* offers the ability to scavenge free radicals and induce apoptosis in lung cancer cells in humans[J]. *Food & Function*, 2020, 11(6): 4927–4939.
- [22] PRATEEP A, SUMKHEMTHONG S, SUKSOMTIP M, et al. Peptides extracted from edible mushroom: *Lentinus squarrosulus* induces apoptosis in human lung cancer cells[J]. *Pharmaceutical Biology*, 2017, 55(1): 1792–1799.
- [23] 石燕玲. 灵芝活性肽的保肝活性研究及其结构初探[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- SHI Y L. Study on hepatoprotective effects and structure of *Ganoderma lucidum* peptides[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [24] 何慧. 灵芝内源肽的结构及对肝损伤的干预[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- HE H. Structures of *Ganoderma lucidum* endogenesis peptides and intervention to liver injury[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.
- [25] KANG M G, KIM Y H, BOLORMAA Z, et al. Characterization of an antihypertensive angiotensin I-converting enzyme inhibitory peptide from the edible mushroom *Hypsizygus marmoreus*[J]. *BioMed Research International*, 2013: 283964.
- [26] CHOI H S, CHO H Y, YANG H C, et al. Angiotensin I-converting enzyme inhibitor from *Grifola frondosa*[J]. *Food Research International*, 2001, 34(2/3): 177–182.
- [27] GENG X R, TIAN G T, ZHANG W W, et al. A *Tricholoma matsutake* peptide with angiotensin converting enzyme inhibitory and antioxidative activities and antihypertensive effects in spontaneously hypertensive rats[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1–9.
- [28] LI M Q, DONG L, DU H T, et al. Potential mechanisms underlying the protective effects of *Tricholoma matsutake* singer peptides against LPS-induced inflammation in RAW264.7 macrophages[J]. *Food Chemistry*, 2021, 353: 129452.
- [29] LI M Q, GE Q, DU H T, et al. *Tricholoma matsutake*-

- derived peptides ameliorate inflammation and mitochondrial dysfunction in RAW264.7 macrophages by modulating the NF- κ B/COX-2 pathway [J]. *Foods*, 2021, 10(11): 2680.
- [30] 熊川, 黄文丽, 金鑫, 等. 一种羊肚菌源多肽 MIP-16 的分离纯化及其神经保护活性[J]. *天然产物研究与开发*, 2021, 33(9): 1519–1526.
- XIONG C, HUANG W L, JIN X, et al. Isolation and purification of a novel peptide from the fruiting bodies of *Morchella importuna* and its neuroprotective effect [J]. *Natural Product Research and Development*, 2021, 33(9): 1519–1526.
- [31] WANG J, LIU Y M, CAO W, et al. Anti-inflammation and antioxidant effect of Cordymin, a peptide purified from the medicinal mushroom *Cordyceps sinensis*, in middle cerebral artery occlusion-induced focal cerebral ischemia in rats [J]. *Metabolic Brain Disease*, 2012, 27(2): 159–165.
- [32] WU S J, WU Q P, WANG J, et al. Novel selenium peptides obtained from selenium-enriched *Cordyceps militaris* alleviate neuroinflammation and gut microbiota dysbiosis in LPS-injured mice [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(10): 3194–3206.
- [33] YU Y H, HU Q H, LIU J H, et al. Isolation, purification and identification of immunologically active peptides from *Hericium erinaceus* [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2021, 151: 112111.
- [34] 庄海宁, 向情儒, 刘玉莽, 等. 猴头菌抗氧化肽的分离纯化[J]. *食用菌学报*, 2022, 29(6): 59–66.
- ZHUANG H N, XIANG Q R, LIU Y Q, et al. Isolation and purification of antioxidant peptides from *Hericium erinaceus* [J]. *Acta Edulis Fungi*, 2022, 29(6): 59–66.
- [35] KAPRASOB R, KHONGDETH J, LAOHAKUNJIT N, et al. Isolation and characterization, antioxidant, and antihypertensive activity of novel bioactive peptides derived from hydrolysis of King Boletus mushroom [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 160: 113287.
- [36] JANG J H, JEONG S C, KIM J H, et al. Characterisation of a new antihypertensive angiotensin I-converting enzyme inhibitory peptide from *Pleurotus cornucopiae* [J]. *Food Chemistry*, 2011, 127(2): 412–418.
- [37] CHUL K K, HYOUNG L D, HO K J, et al. Production and characterization of antihypertensive angiotensin I-converting enzyme inhibitor from *Pholiota adiposa* [J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2006, 16(5): 757–763.
- [38] ZHANG Y, VENKITASAMY C, PAN Z L, et al. Novel umami ingredients; umami peptides and their taste [J]. *Journal of Food Science*, 2017, 82(1): 16–23.
- [39] 律诗, 代暘鑫, 刘野, 等. 食用菌鲜味强度评价及鲜味氨基酸和核苷酸提取工艺优化 [J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(1): 100–108.
- LÜ S, DAI Y X, LIU Y, et al. Evaluation of umami intensity of edible fungi and optimization of umami amino acid and nucleotide extraction [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 40(1): 100–108.
- [40] 林桐, 赵吉春, 雷小娟, 等. 食用菌呈味肽制备及其呈味机理研究进展 [J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(19): 313–319.
- LIN T, ZHAO J C, LEI X J, et al. Preparation and taste mechanism of flavour peptides in edible fungi: a review [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(19): 313–319.
- [41] 蒋希希, 裴斐, 赵立艳, 等. 草菇鲜味肽的分离鉴定及呈味特性分析 [J]. *食品科学*, 2022, 43(12): 235–242.
- JIANG X X, PEI F, ZHAO L Y, et al. Separation, identification and taste characteristics of umami peptides from straw mushroom [J]. *Food Science*, 2022, 43(12): 235–242.
- [42] XU X D, XU R, SONG Z, et al. Identification of umami-tasting peptides from *Volvariella volvacea* using ultra performance liquid chromatography quadrupole time-of-flight mass spectrometry and sensory-guided separation techniques [J]. *Journal of Chromatography A*, 2019, 1596: 96–103.
- [43] 李晓明, 黄占旺, 徐明生, 等. 白玉菇中鲜味肽的分离鉴定及呈味特性分析 [J]. *食品科学*, 2021, 42(24): 252–260.
- LI X M, HUANG Z W, XU M S, et al. Separation, identification and taste characteristics of umami peptides from white *Hypsizygus marmoreus* [J]. *Food Science*, 2021, 42(24): 252–260.
- [44] 李晓明. 白玉菇中鲜味肽的分离纯化及呈味特性研究 [D]. 南昌: 江西农业大学, 2021.
- LI X M. The separation and purification of umami peptides from white *Hypsizygus marmoreus* and the study of its taste characteristic [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2021.
- [45] 黄裕怡. 华美牛肝菌中呈味肽及特征成分的分离与

- 测定[D]. 昆明:昆明理工大学, 2018.
- HUANG Y Y. Separation and determination of the flavor peptides and characteristic components in *Neoboletus magnificus*[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- [46] LIANG J M, CHEN L L, LI Y N, et al. Isolation and identification of umami-flavored peptides from *Leccinum extremiorientale* and their taste characteristic [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(3): e15255.
- [47] SONG S Q, ZHUANG J D, MA C Z, et al. Identification of novel umami peptides from *Boletus edulis* and its mechanism via sensory analysis and molecular simulation approaches[J]. Food Chemistry, 2023, 398: 133835.
- [48] YANG M H, CHE T, LI Z X, et al. Identification, taste properties and molecular docking of novel umami peptides from *Butyriboletus roseoflavus* [J]. European Food Research and Technology, 2022, 248(11): 2665–2677.
- [49] 梁佳明, 王肖肖, 张蓝云, 等. 兰茂牛肝菌菌柄和菌盖中鲜味成分的分析及菌盖中鲜味肽的鉴定[J]. 食品科学, 2021, 42(22): 232–239.
- LIANG J M, WANG X X, ZHANG L Y, et al. Analysis of umami components in stipe and pileus of *Lanmaoa asiatica* and identification of umami peptides in Pileus [J]. Food Science, 2021, 42(22): 232–239.
- [50] CHEN W C, LI W, WU D, et al. Characterization of novel umami-active peptides from *Stropharia rugosoannulata* mushroom and *in silico* study on action mechanism[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 110: 104530.
- [51] SHEN Q L, SUN L P, HE Z D, et al. Isolation, taste characterization and molecular docking study of novel umami peptides from *Lactarius volemus* (Fr.) [J]. Food Chemistry, 2023, 401: 134137.
- [52] 许锐. 灰树花鲜味肽的制备及关键滋味物质研究[D]. 上海:上海应用技术大学, 2020.
- XU R. Study on the preparation of umami peptides and key taste-active compounds from *Grifola frondosa* mushroom[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2020.
- [53] 李雪. 蟹味菇风味物质研究及其呈味肽的提取鉴定[D]. 上海:上海应用技术大学, 2020.
- LI X. Research of flavor substance of *Hypsizygus moreus* and its taste peptides preparation [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2020.
- [54] 程菲儿, 赵宇宏, 赵凡, 等. 杏鲍菇多肽生物活性的研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(17): 347–350.
- CHENG F E, ZHAO Y H, ZHAO F, et al. Study on the biological activity of *Pleurotus eryngii* polypeptide [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(17): 347–350.
- [55] 朱晶, 李星辰, 郭嘉川, 等. 金针菇酶解肽对冬枣保鲜效果的研究[J]. 陕西农业科学, 2013, 59(4): 6–8.
- ZHU J, LI X C, GUO J C, et al. Study on the preservation effect of *Flammulina velutipes* enzymatic peptides on winter jujube [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2013, 59(4): 6–8.
- [56] 钱磊, 张业尼, 李涛, 等. 羧甲基壳聚糖与滑菇肽对杏鲍菇保鲜效果研究[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(18): 168–175.
- QIAN L, ZHANG Y N, LI T, et al. Study on effects of carboxymethyl chitosan and *Pholiota nameko* peptides on fresh keeping of *Pleurotus eryngii* [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(18): 168–175.
- [57] WANG H X, NG T B. Eryngin, a novel antifungal peptide from fruiting bodies of the edible mushroom *Pleurotus eryngii* [J]. Peptides, 2004, 25(1): 1–5.
- [58] POOMPOUANG S, SUKSOMTIP M. Isolation and characterization of an antifungal peptide from fruiting bodies of edible mushroom *Lentinus squarrosulus* Mont [J]. Malaysian Journal of Microbiology, 2016, 2: 119–125.
- [59] YAN N H, HE F, PIRAINO F F, et al. Antiviral activity of a cloned peptide RC28 isolated from the higher basidiomycetes mushroom *Rozites caperata* in a mouse model of HSV-1 keratitis [J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2015, 17(9): 819–828.
- [60] WANG J B, WANG H X, NG T B. A peptide with HIV-1 reverse transcriptase inhibitory activity from the medicinal mushroom *Russula paludosa* [J]. Peptides, 2007, 28(3): 560–565.
- [61] 范凤霞. 环柄菇属蘑菇中肽类毒素的检测与鉴定[D]. 长沙:湖南师范大学, 2019.
- FAN F X. Determination and identification of cyclopeptide toxin in *Lepiota* [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2019.

Research Progress on Preparation, Functional Characteristics and Comprehensive Utilization of Peptides from Edible Mushroom

YANG Wenjian, SUN Ronggui, WANG Weiwei, XU Hui, LIU Jianhui,
XIE Minhao, SU Anxiang, PEI Fei, HU Qiuhui

(College of Food Science and Engineering/Jiangsu Province Engineering Research Center of Edible Fungus Preservation and Intensive Processing/Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety of Jiangsu Province, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China)

Abstract: China is the most important country for edible mushroom production, and the total yield of edible mushroom in China ranks first in the world. Peptides are one of the important bioactive components and typical taste compounds in edible mushroom, but the mechanism underlying the functional activity and flavor formation of edible mushroom peptides are still unclear at present. Meanwhile, the lack of standardized and industrialized production and processing technologies seriously restricts the rapid and healthy development of the edible mushroom peptides industry. The peptides preparation from different edible mushroom materials such as edible mushroom fruiting body, mycelium, and by-products from mushroom production or processing were expounded, and many advantages such as short cycle, low cost, and easy regulation for the preparation of edible mushroom peptides using biological fermentation method were revealed, which would develop to be an important approach for the exploitation of edible mushroom peptides products. However, it was complex and difficult to be industrialized for pure edible mushroom peptides separation and purification using gel chromatography and reverse phase high performance liquid chromatography (RP-HPLC). At present, the health function researches of the edible mushroom peptides mostly focused on the antihypertensive effect by inhibiting angiotensin-converting enzyme (ACE) activity. Although the researches on the activities of antioxidation, anti-inflammatory, immune regulation and neuroprotection of edible mushroom peptides had been involved, these researches were not systematic and deep enough. The health function of edible mushroom peptides needs to be further explored. Because of the weak flavor, edible mushroom peptides were mainly used together with traditional monosodium glutamate, nucleotides and amino acids. Typical flavor peptides from edible mushroom needs to be fully exploited, and the preparation of edible mushroom flavor peptides with high efficiency, low cost and strong flavor will be an important breakthrough to improve the utilization of edible mushroom peptides. At the same time, edible mushroom peptides with some functional characteristics such as preservation, antibacterial and antiviral effects, and toxic effects were proved. It will become the most promising research field for edible mushroom peptides to establish the information database of peptides characteristics from different raw materials, construct the engineering bacteria with high efficiency of peptide biotransformation, establish the edible mushroom cells factory qualified with specific functional peptides, and realize the industrialization upgrading of the green biomanufacturing key technology of edible mushroom peptides.

Keywords: edible mushroom; peptide; functional activity; flavor formation; comprehensive utilization