

鲜味肽与增鲜肽及其加工特性研究进展

张佳男¹, 王华阳¹, SUN-WATERHOUSE Dongxiao¹, 苏国万^{1,2}, 赵谋明^{*1}

(1. 华南理工大学 食品科学与工程学院, 广东 广州 510641; 2. 广东天企生物科技有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要: 鲜味肽与增鲜肽是食品中的关键滋味成分, 具有风味突出等优势。同时, 鲜味肽与增鲜肽种类复杂且常作为反应前体物影响食品的风味特性, 对食品风味有重要影响。据统计分析, 目前已报道鲜味肽与增鲜肽数量分别为 208 条和 60 条, 鲜味肽氨基酸组成和空间结构是决定鲜味肽鲜味特性的重要因素, 而增鲜肽具有更复杂的增鲜模式和构效关系。在食品加工过程中, 鲜味肽与增鲜肽会作为活泼反应底物参与酶促与非酶促反应, 并在一定条件下转变为鲜味更强或增鲜特性更优的反应产物, 有利于食品风味品质的提升。作者系统分析了鲜味肽与增鲜肽的结构特性, 探讨了基于不同加工方式其在食品加工过程中的变化及其对食品呈味特性的有益影响, 并阐述了在研究过程中存在的问题和解决方案, 旨在对鲜味科学研究及调味品行业的技术发展提供理论指导。

关键词: 鲜味肽; 增鲜肽; 酶解; 发酵; 美拉德反应

中图分类号: TS 202.3 文章编号: 1673-1689(2022)07-0012-12 DOI: 10.3969/j.issn. 1673-1689.2022.07.002

Umami Peptides and Umami-Enhancing Peptides and Their Applications During Food Processing

ZHANG Jianan¹, WANG Huayang¹, SUN-WATERHOUSE Dongxiao¹, SU Guowan^{1,2}, ZHAO Mouming^{*1}

(1. School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
2. Guangdong Tanchi Biotechnology Co., Ltd., Foshan 528000, China)

Abstract: Umami and umami-enhancing peptides are the key components of novel umami flavorings. They have advantages of naturalness, higher nutritional value, and better umami taste over glutamate. There are a wide variety of umami and umami-enhancing peptides and these peptides can, as precursors, directly affect the flavor characteristics of food by participating in relevant reactions. The number of reported umami and umami-enhancing peptides is 208 and 60, respectively. For umami peptides, their amino acid composition and spatial structure are the most two important factors affecting the umami intensity, while the structure-activity relationships of umami-enhancing peptides are more complicated, which needs to be further studied. Meanwhile, umami and umami-enhancing peptides are active reactants of many reactions (enzymatic and non-enzymatic),

收稿日期: 2022-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(32102117); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2022A1515011543); 云南省科技人才和平台计划(202005AF150016); 佛山市科技创新团队项目。

* 通信作者: 赵谋明(1964—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事食品生物技术方面研究。E-mail: femmzhao@scut.edu.cn

generating the derivatives having better umami taste or umami-enhancing ability under certain conditions. In this review, the structural characteristics of umami and umami-enhancing peptides were systematically studied and their relevant reactions, as well as the flavor features of the expected products, were discussed based on different processing methods. Furthermore, some problems with the study and possible solutions are summarized to support the scientific research about umami and the development of the condiment industry.

Keywords: umami peptides, umami-enhancing peptides, enzymatic hydrolyzation, fermentation, Maillard reaction

鲜味是区别于酸、甜、苦、咸味之外的第5种基本滋味,也是我国许多传统食品的特色滋味,具有协调其他滋味、使人产生愉悦感等特点,深受消费者的喜爱^[1]。鲜味剂作为食品鲜味最重要的调配者,其应用领域中涉及相关食品产值超千亿元,对食品品质的影响较大、范围较广。为了满足消费者对鲜味调味品在来源、安全、方便、营养等方面的需求,以来源天然的动植物水解蛋白和酵母抽提物等为主要成分的新型复合鲜味剂成为大家推崇的产品,其不仅可以提升食品鲜味强度,减少食盐使用量,还能赋予食品浓郁饱满的口感,改进食品可口性^[2]。

鲜味肽和增鲜肽是新型鲜味剂的关键滋味物质,在增强食品风味的同时也具有良好的吸收性和营养价值,具有初代鲜味剂(味精)不可比拟的风味和健康优势^[3]。工业生产鲜味肽和增鲜肽主要由动植物蛋白经酶解制备而来,但由于蛋白质原料结构复杂及酶制剂酶切位点广泛等因素的影响,依旧面临着酶解过程调控精准度低、产物成分复杂、有效鲜味肽或增鲜肽类物质含量少、整体鲜味强度不足以及加工稳定性差等问题^[1,4];除此之外,目前有关鲜味的基础研究仍不够深入,难以建立完善的鲜味物质构效关系模型。因此,实现鲜味肽和增鲜肽的定向高效制备,深度开发天然鲜味肽和增鲜肽是调味品行业亟待解决的重要问题。

作者系统总结了已报道鲜味肽和增鲜肽的结构特点,探讨了其构效关系及与鲜味受体的作用机制;并基于不同加工方式阐述了鲜味肽和增鲜肽在食品加工过程中的正向变化及其对食品呈味特性的影响;简要讨论了有关鲜味肽与增鲜肽在研究过程中存在的问题和解决方案,并对其未来的研究和行业发展进行了展望。

1 鲜味及增鲜物质概述

鲜味具备所有基本滋味的基础共性,即非其他滋味的组合、独特唯一且普遍存在,以及有基于神经生理学研究的特异性与独立性(鲜味受体)^[5-6]。当鲜味物质与鲜味受体结合释放出的信息经味觉神经传入系统传递至大脑,大脑皮层特定区域参与对信号的处理形成鲜味味觉^[7]。目前发现约有8种不同类型受体与鲜味感知相关,均隶属于G蛋白偶联受体(GPCRs)家族^[2]。其中异源型二聚体T1R1/T1R3是最主要的鲜味受体,对多种鲜味物质都有较高亲和力和力,同时还能体现鲜味的协同增效作用^[8]。鲜味物质与受体结合后其结构发生改变从而转变为活跃构象是产生鲜味的主要原因,协同增效作用的产生则主要是因为这种活跃构象受增鲜物质的影响被进一步强化或稳定^[9]。其他鲜味受体不受T1R1/T1R3影响,可以独立感知鲜味物质(但是物质种类和协同增效作用均有差别),并且连接大脑中枢的味觉神经传入系统也并不完全相同,因此为T1R1/T1R3的补充^[2]。整体而言,鲜味的感知由多种受体共同介导,这同时也体现了鲜味物质的丰富性。

鲜味物质是指本身具有鲜味的化合物。目前常见的鲜味物质包括谷氨酸及其钠盐(味精/MSG)、天门冬氨酸及其钠盐、肌苷酸二钠、鸟苷酸二钠、琥珀酸及其钠盐和鲜味肽等^[2]。味精是第一代鲜味剂的主要成分,其鲜味强度高、刺激性强,但味感较为单薄;呈味核苷酸和琥珀酸分别是肉类、香菇类和水产制品的主要鲜味物质,具有代表性食物特有的呈味特点,如赋予鲜味更加宽广、丰润的感觉,呈现贝类鲜腥一体的风味^[10-12]。鲜味肽为具有鲜味的肽类物质(由氨基酸通过肽链组合而成的化合物),是许多高端食材和调味基料鲜美味的主要来源之一,能给予食物醇厚、鲜美、协调的味觉^[13]。与其他鲜味物

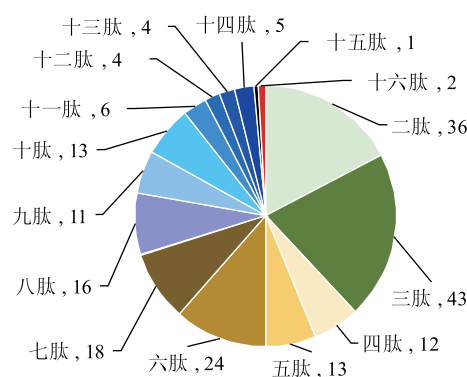
质不同,鲜味肽往往还具有其他基本滋味,呈现多维的滋味特性,增加食物味感的丰富度^[14]。1978年日本科学家首次报道了从牛肉汤中分离出的八肽 Lys-Gly-Asp-Glu-Glu-Ser-Leu-Ala 可能对肉汤鲜味有贡献作用,尽管后期通过合成手段发现牛肉八肽并不具有鲜味,但开启了人们对肽类物质呈鲜特性的研究热潮^[15-16]。随后各研究人员分别从火腿、腊肉、酱油、大豆蛋白和花生蛋白等多种动植物水解液中分离得到了多种鲜味肽,并被证实是食品风味的主要贡献者之一^[2]。

1.1 鲜味肽

如图 1 所示,目前已报道鲜味肽数量约为 208 条(截止到 2021 年),其中短肽(二肽和三肽)占比 38%,中长肽占比 62%;四肽~七肽(相对分子质量主要为 400~1 000)与八肽~十六肽(相对分子质量主要为 1 000~1 600)占比分别约为 32%和 30%。统计结果还发现,仅 2019—2021 年鲜味肽报道数量已增长一倍,说明鲜味肽是目前食品风味领域的研究热点之一^[2]。同时,随着研究的不断深入,具有鲜味特性的中长链多肽数量超过短肽数量(据 2019 年之前文献数据短肽占比超 60%),但鲜味氨基酸(谷氨酸和天冬氨酸)依旧是组成鲜味肽的代表性氨基酸,据统计含有鲜味氨基酸的鲜味肽数量占比约为 79%(见图 2),与前期统计数据基本一致^[2]。

从结构上来讲,鲜味肽的呈味特性与其组成氨基酸的性质、顺序、序列以及肽的空间结构等都密切相关。Arai 等合成了 12 种含有谷氨酸残基的二肽,发现当谷氨酸 C 端连接的氨基酸疏水性较小时才具有肉汤鲜味^[17]。鲜味肽组成氨基酸的侧链基团(如羟基和巯基等)变化可直接影响其对口腔味觉感受器上的作用而引起对无味、鲜味、甜味、浓厚味或苦味等滋味的感知^[18]。在基于八肽 Lys-Gly-Asp-Glu-Glu-Ser-Leu-Ala 的鲜味肽构效关系研究中发现,八肽分子必须同时含有带正电荷和负电荷的亲水性基团以及疏水性基团才具有鲜味,但是这一结论并不适用于其他长度的鲜味肽^[19]。同时上述八肽存在多种稳态结构(一种为环状结构,其余 3 种为 S 型结构),在与受体的结合过程中双方存在一个动态诱导的变化过程^[20],因此对于具有一定空间结构的鲜味肽来说表面电荷特性决定了与鲜味受体的结合情况。Yu 等构建了鲜味六肽的 3D-QSAR 模型,并研究了鲜味六肽与鲜味受体的相互

作用,结果显示在特定区域引入适当的电荷和合适大小的基团可能会改善六肽的鲜味强度^[21]。但很难从简单的一级结构或特定鲜味肽空间结构清楚解释、预测鲜味肽结构和呈味特性的关系。从统计结果可知(见图 1 和图 2),短链鲜味肽(二肽和三肽)氨基酸组成可能主要决定了其鲜味特性,其中鲜味氨基酸为必需氨基酸;随着肽链的延长,空间结构对鲜味特性的影响逐渐加深^[2],组成氨基酸种类、数量、序列以及分布等均为决定性因素^[14,22-24]。由图 3 可知,鲜味氨基酸、亲水性氨基酸、脯氨酸以及丙氨酸是中长链鲜味肽的主要组成氨基酸,而疏水性氨基酸残基比例较低且大多位于肽链中部,碱性氨基酸残基主要分布在肽链两端(主要是 C 端),因此鲜甜味氨基酸比例、疏水性氨基酸和碱性氨基酸序列及位置可能是影响中长链鲜味肽鲜味特性的重要因素。



数字代表鲜味肽的数量。

图 1 已报道的鲜味肽及其数量

Fig. 1 Identified umami peptides and their quantities

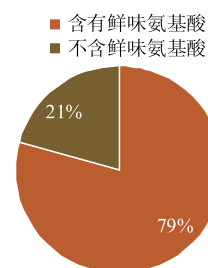


图 2 组成氨基酸含有鲜味氨基酸的鲜味肽占比

Fig. 2 Proportion of umami peptides with the amino acids composition containing umami amino acids

值得注意的是鲜味肽是否具有鲜味一直存在争议^[16],因为部分合成肽无法完全重现分离肽的呈味特性,这也可能与肽的立体结构变化有关。此外,

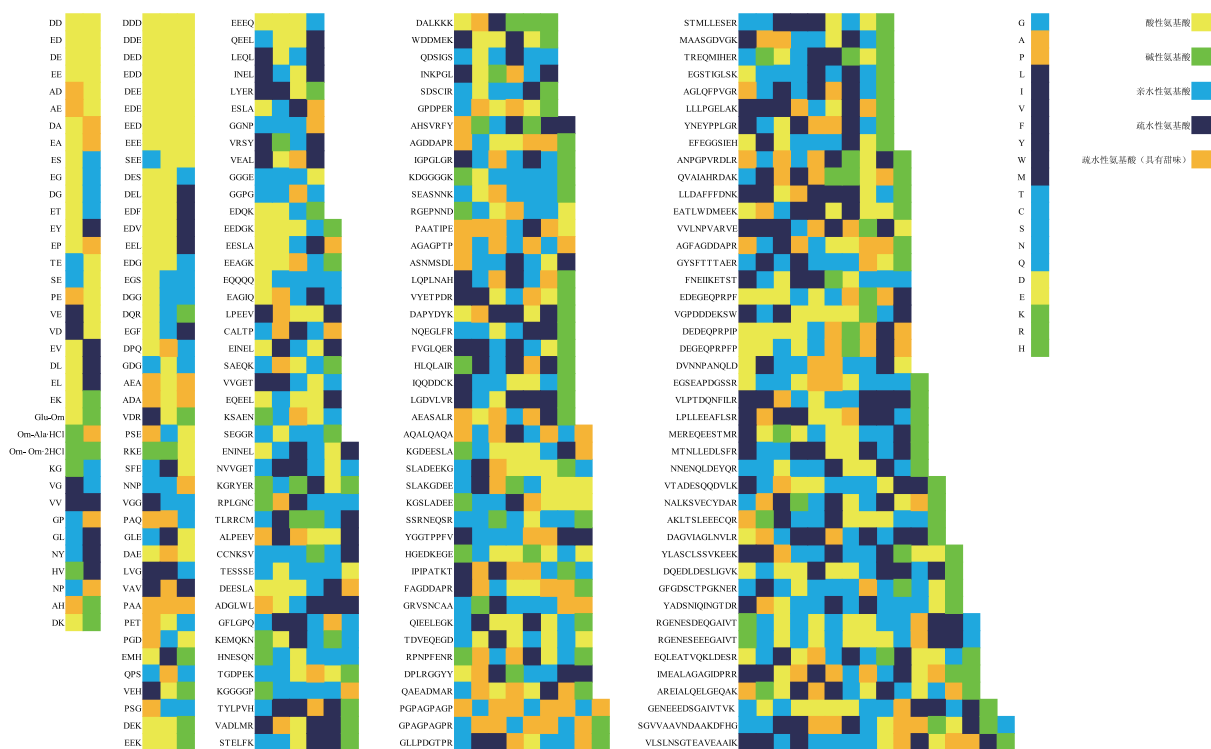
图3 已报道鲜味肽的组成氨基酸指纹图谱^[2,23-43]

Fig. 3 Amino acid fingerprints of identified umami peptides

鲜味肽往往具有多种味道,其鲜味味感与谷氨酸钠并不完全一致,因此对于感官人员的要求较高。而如何准确测定鲜味肽的鲜味强度也是评判鲜味肽鲜味特性的关键问题之一。目前有关鲜味肽滋味的评价方法主要包括感官评价法^[44]、电子舌^[14]和细胞受体实验^[45]等。感官评价需要专业、稳定的品评人员,不同区域和评价团队的评价结果有一定差异,费时费力;电子舌虽能准确反映部分鲜味物质的鲜味强度,但对于新型鲜味剂和复杂物质之间的协同增效作用适用性还有待提升;细胞受体实验最接近人体感官机制,但与人类复杂的感知系统仍有较大差距。可见,缺乏客观、统一、能真实反映鲜味肽呈味特性的评价手段限制了鲜味肽在构效关系方面的研究进展。

1.2 增鲜肽

谷氨酸钠与呈味核苷酸之间的鲜味协同增效作用是鲜味科学领域的重大发现,即当呈味核苷酸与谷氨酸钠按同等质量比(1:1)混合后,混合体系的鲜味强度可提升近7倍,提升强度远高于呈味核苷酸与谷氨酸钠鲜味强度的简单加和^[9]。基于这一发现,复合鲜味剂逐渐成为食品工业领域最重要的鲜

味调味料。此外,鲜味存在多种协同增效模式,这可能与增鲜类物质的结构和鲜味底物有关。研究表明多肽是一类重要的增鲜化合物,作为高端调味基料的特色滋味成分,对食品的鲜味强度有重要贡献,而那些具有增鲜作用的肽又被称为增鲜肽,其本身不一定具有鲜味,但与其他鲜味化合物(如谷氨酸钠、鲜味肽等)混合时能与之发生协同增效作用,从而提升混合体系的鲜味强度^[14]。

表1中总结了文献中已报道增鲜肽的基本信息,其数量仅为60条,远低于鲜味肽和其他生物活性肽的鉴定数量。由表1可知,大部分鲜味肽同时具有增鲜作用,能在低于鲜味阈值下发挥增鲜作用^[14];少部分增鲜肽本身无味或者带有酸味、涩味,但能在极低浓度下显著提高谷氨酸钠或肌苷酸的鲜味强度^[14]。此外,在相同浓度下,多种增鲜肽的混合物比一种增鲜肽可能具有更强的增鲜特性^[46]。而肽的增鲜能力还与浓度有关,浓度过高不仅不会进一步提升鲜味物质的鲜味强度,反而还会抑制其鲜味强度^[14]。因此,鲜味增强肽的增鲜模式具体跟增鲜肽种类、组合方式、浓度以及鲜味底物等相关。从微观层面来讲,鲜味受体(一种G蛋白偶联受体)具有

表 1 文献报道具有增鲜作用的多肽^[2,25,29,41,43]

Table 1 Peptides showing umami-enhancing property

标号	多肽	基本滋味	鲜味阈值/(mmol/L)	增鲜阈值/(mmol/L)
1	EGSEAPDGSSR	鲜味、增鲜	0.20	0.005
2	SSRNEQSR	鲜味、增鲜	0.17	0.05
3	ALPEEV	酸味、涩味、增鲜	0.76±0.01	1.52±0.03
4	LPEEV	涩味、甜味、鲜味、增鲜	0.43±0.03	3.41±0.01
5	EAGIQ	涩味、甜味、咸味、增鲜	0.97±0.01	1.94±0.05
6	KGDEESLA	咸味、苦味、鲜味、增鲜	0.53	0.16
7	RGENESDEQGAIVT	微鲜、涩味	0.43	0.38
8	GGITETW	无味	—	0.66
9	SFE	微鲜	1.38	1.34
10	NEY	无味	—	0.62
11	AH	酸味、涩味	—	1.27
12	EP	微鲜	5.34	1.00
13	EEEQ	鲜味、饱满感	1.09	0.39
14	GGNP	鲜味、甜味	2.10	0.63
15	VDR	鲜味、酸味、涩味	3.66	1.02
16	DPQ	鲜味、涩味	3.36	0.65
17	FT	酸味、涩味	—	0.92
18	FK	微甜	—	0.89
19	SE	鲜味	1.49	0.87
20	RGENESEEEGAIVT	鲜味、饱满感、涩味	0.43	0.33
21	TESSSE	鲜味、饱满感、涩味	0.39	0.36
22	EDG	鲜味	0.71	0.69
23	DQR	微鲜	1.11	0.55
24	NNP	鲜味、微甜	0.83	0.82
25	EGF	鲜味、苦味、饱满感	0.94	0.77
26	GP	鲜味、增鲜	2.50	0.20
27	GL	鲜味、增鲜	1.86	0.15
28	NP	鲜味、增鲜	0.76	0.04
29	ASNMSDL	酸味、鲜味、涩味	10.19	13.58
30	LQPLNAH	酸味、鲜味、咸味、涩味	12.63	18.95
31	MAASGDVGK	鲜味、酸味、甜味	0.24	0.12
32	VYETPDR	鲜味、微酸、苦味	0.23	0.11
33	DAPYDYK	鲜味、酸味、甜味	0.14	0.09
34	TREQMIHER	鲜味、微酸、苦味	0.21	0.42
35	LLDAFFFDNK	鲜味、甜味、微酸	0.10	0.24
36	EATLWDMEEK	鲜味、苦味	0.10	0.20
37	LPLLEEAFLSR	鲜味、苦味	0.16	0.08
38	NALKSVECYDAR	鲜味、甜味	0.09	0.07
39	AKLTSLEECCQR	鲜味、微酸、甜味	0.09	0.07
40	YLASCLSSVKEEK	鲜味、甜味	0.07	0.035
41	EQLEATVQKLDESR	鲜味、微甜、苦味	0.12	0.06

续表 1

标号	多肽	基本滋味	鲜味阈值/(mmol/L)	增鲜阈值/(mmol/L)
42	MEREQEESTMR	鲜味	0.09	0.07
43	SGVVAAVNDAAKDFHG	甜味、鲜味、微酸	0.13	0.16
44	VLNSGTEAVEAAIK	甜味、微鲜、酸味	0.16	0.16
45	EGSTIGLSK	鲜味、微苦、酸味	0.22	0.14
46	IMEALAGAGIDPRR	鲜味、微苦、酸味	0.14	0.14
47	NQEGLFR	鲜味、苦味、微酸	0.23	0.23
48	TGC	增鲜	—	8.40
49	GLE	鲜味、增鲜	—	3.20
50	VEAL	鲜味、增鲜	1.39	11.28
51	GGGE	鲜味、增鲜	1.57	1.57
52	DR	涩味、增鲜	—	2.04
53	DAE	鲜味、增鲜	—	1.50
54	EVC	涩味、增鲜	—	3.12
55	EE	鲜味、增鲜	+	++
56	EV	鲜味、甜味、增鲜	+	+
57	ADE	甜味、酸味、苦味、增鲜	—	+
58	AED	酸味、增鲜	—	+
59	DEE	咸味、增鲜	—	+
60	SPE	咸味、酸味、增鲜	—	+
61	EE+EV+DEE+EEN	增鲜	—	+++
62	DES+EE+DEE	增鲜	—	+++

注:—为无味;+为低于平均值;++为平均值;+++为高于平均值。

更丰富的别构调节位点,增加了增鲜肽构效关系的复杂性^[2]。

1.3 鲜味肽与鲜味受体的相互作用

目前有关鲜味肽或增鲜肽与鲜味受体的相互作用机制研究主要基于分子对接技术,并发现鲜味肽主要通过 T1R1/T1R3 在细胞外的捕蝇结构域结合产生鲜味,这一过程涉及的作用力主要包括氢键、范德华力、疏水作用力和静电作用,但未发现明显的作用规律^[47-48]。显然,肽的相对分子质量以及氨基酸组成等因素增加了相关规律探讨的复杂性,而根据这些参数分类讨论鲜味肽的呈鲜机制可能有助于逐步发现其内在规律。其他受体虽然也能被蛋白水解物激活(如受体 GPR92),但并未明确与鲜味肽之间的详细作用情况^[49]。

与常见增鲜物质呈味核苷酸类似,增鲜肽主要通过鲜味受体活性结合位点附近的别构调节位点结合以稳定受体的激活构象,从而表现出增鲜特性^[47-48]。但每种增鲜肽的结合位点和结合强度并不相同,且与核苷酸不同的是,多数增鲜肽主要与

T1R3 的别构调节位点结合(核苷酸主要与 T1R1 的别构调节位点结合),进一步稳定了 T1R3 捕蝇结构域的开口构象^[9,47-48,50]。综上所述,鲜味肽与增鲜肽基于分子层面的呈味机制还有待进一步加强和验证。然而,不管是从增鲜肽的定义还是从鲜味受体上可供增鲜物质结合的位点数量来看,可以推测增鲜肽种类应大于鲜味肽。

2 不同加工方法对鲜味肽和增鲜肽的影响

鲜味肽和增鲜肽是许多加工食品(肉制品、发酵产品等)和调味品(酵母抽提物和酱油等)的重要组成部分,在加工过程中可作为活泼底物参与反应,直接影响食品的风味特性。但加工处理不当也可能会降低鲜味物质的鲜味强度或产生焦苦味,从而影响食品的风味品质。因此,明晰鲜味肽和增鲜肽在加工过程中呈味特性的变化规律对提升产品品质有重要指导作用。

2.1 酶解

鲜味肽和增鲜肽的制备方法主要包括酸解法、

生物酶解法以及化学合成法等^[4]。生物酶解法生产过程可控、反应条件温和、酶解产物安全、生产效率高,是制备富含鲜味肽与增鲜肽呈味基料的主要生产方法。根据底物蛋白结构特点,调控酶切位点,提高蛋白酶活性可有效提升酶解产物中鲜味肽与增鲜肽的含量。

目前,商业上常见的蛋白酶主要包括微生物发酵蛋白酶(酸性、碱性、中性蛋白酶等)、动植物提取蛋白酶(木瓜蛋白酶、菠萝蛋白酶、胰蛋白酶等)、复合蛋白酶(风味蛋白酶)等。蛋白酶具有不同的酶切位点和酶解特性,大量研究发现多酶联合酶解或分段酶解等方法结合一定的原料前处理往往可获得更好的效果,包括更高的原料回收率和鲜味强度等。Gao 等通过 7 种不同蛋白酶组合方式酶解羊肚菌发现,中性蛋白酶与风味蛋白酶复合酶解所得产物鲜味最强且苦味最弱,普遍优于单酶酶解效果^[22]。作者所在研究团队利用多种蛋白酶结合原料预处理(超声波与 TG 酶处理)开发出一种低值高鲜调味料^[51];还利用中性蛋白酶和氨基肽酶建立了一种两段控制酶解法,可显著提高酶解产物中目标鲜味肽和增鲜肽的含量^[52]。除了商业蛋白酶,利用生物发酵工程技术产生蛋白酶进行酶解也是一种有效的鲜味肽和增鲜肽制备方式^[4]。研究显示,通过米曲霉发酵产生的蛋白酶具有更好的酶解效率,且产物鲜味强度更高,主要是因为微生物在发酵过程中会根据原料蛋白质特点分泌特异性酶,这些诱导酶往往具有更高的酶解效率和良好的风味效果。

2.2 生物发酵

我国许多传统鲜美食品可通过发酵制备获得,如酱油、鱼露以及腐乳等^[53]。在发酵过程中,大分子的蛋白质会被降解为小分子的肽类和氨基酸,而这些氨基酸和肽类物质又会作为底物参与各种酶促反应,产生可呈现强烈鲜味和饱满感的风味产物,有利于风味的提升。从发酵食品中发现的乳酰基肽和琥珀酰基肽可以为发酵产品带来饱满感和突出的鲜味,其主要是由参与发酵的微生物分泌的酶(如乳糖酶、转琥珀酸酶)或其他内源性酶催化产生^[54-55]。一些微生物产生的焦谷氨酸环化酶可以促进焦谷氨酰基肽的生成,这种衍生物在低阈值下可增强食品其他成分的滋味强度(如可提升谷氨酸钠的鲜味强度),从而对食品的整体风味有贡献作用^[56]。利用细菌发酵产生的 γ -谷氨酰基转肽酶以谷氨酰胺为供体合成 γ -谷氨酰基化合物,如 γ -谷氨酰基化的苯丙氨酸、缬氨酸、亮氨酸和组氨酸不仅苦味减弱,同时还可增强食物的风味特性和鲜味强度^[57]。Kuroda 等发现了一种新型 γ -谷氨酰基三肽,即 γ -Glu-Val-Gly,与谷胱甘肽结构相似,只有一种氨基酸不同,但其鲜味和厚味强度是谷胱甘肽的 12.8 倍^[58]。图 4 列出了鲜味氨基酸(谷氨酸和天门氨酸)、鲜味肽 Glu-Glu 和 Glu-Pro 及其相关衍生物的化学结构,这些衍生物均可经由发酵产生,并已证实具有良好的增味作用,有利于发酵产品鲜味、饱满感和持久感的提升^[2]。

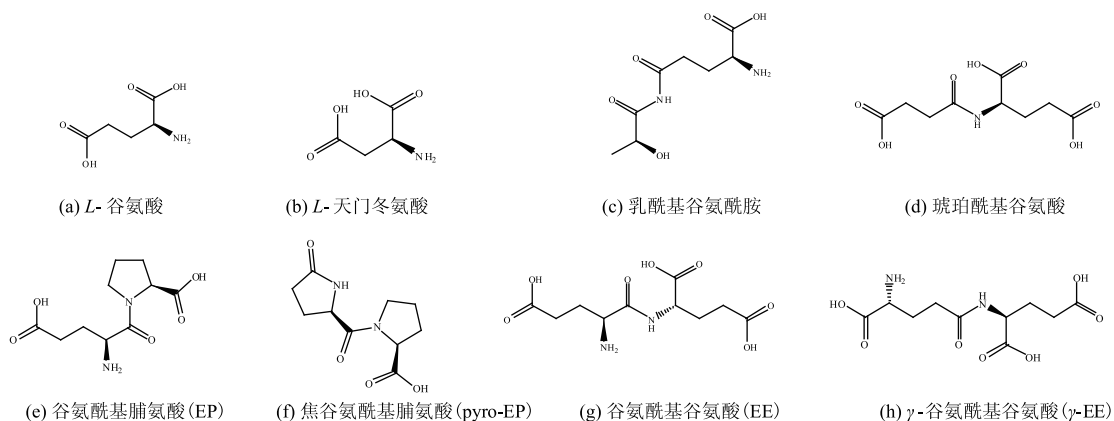


图 4 鲜味氨基酸和鲜味二肽(EP 和 EE)及其部分酶促衍生物结构

Fig. 4 Molecular structures of umami amino acids, umami dipeptides (EP and EE) and their enzymatic derivatives

2.3 加热处理

在加热过程中,鲜味肽和增鲜肽会发生分子内

衍生化反应和美拉德反应^[59]。分子内衍生化反应又可分为肽的水解、肽链环化以及氨基酸残基修饰

等,例如谷氨酸和谷氨酰胺是焦谷氨酸的直接前体化合物,在室温下可通过脱水制得(高温会加速这一过程),因此焦谷氨酰基肽也可以通过含有谷氨酸或谷氨酰胺的肽类物质经分子内脱水缩合产生,从而对食品体系鲜味提升产生积极影响^[2,44,60]。但过度热反应会导致鲜味肽和增鲜肽的裂解,产生不良风味,破坏原有鲜味物质结构。

2.4 美拉德反应

美拉德反应是食品加工和储藏过程中最常见的化学反应,会直接影响食物的颜色、气味、滋味和营养特性等,同时美拉德反应技术在香精香料和呈味基料加工领域有着广泛应用^[61-62]。鲜味肽和增鲜肽主要作为氨基反应物与碳水化合物(羰基化合物)发生美拉德反应。多项研究表明(见图5),氨基酸和肽类物质的部分美拉德反应产物是一类新型鲜味化合物,具有改善食品鲜味强度、强化原有风味物质风味特性以及增强食品饱满感等作用^[2]。与鲜味肽类似,这些氨基酸或肽的衍生物兼具多种滋味特性,与鲜味肽同为高端调味品的重要组成成分,弥补了鲜味肽鲜味强度弱和谷氨酸钠呈味单薄等缺点^[53]。适度的美拉德反应是一种能有效提升多肽类呈味基料鲜味特性的重要方法,Ogasawara 等

在研究中发现美拉德反应可以增强大豆蛋白水解产物中相对分子质量为1 000~5 000肽段的风味特性^[63]。

美拉德反应可在一定条件下生成具有强鲜味和增鲜特性的产物来提高肽和氨基酸的呈味特性。作者所在研究团队在探究美拉德反应提升花生蛋白酶解产物鲜味特性机制过程中发现,花生肽Glu-Pro在美拉德反应过程中主要形成了两种化合物,即焦谷氨酰基脯氨酸和Glu-Pro与葡萄糖的Amadori重排产物,前者是发酵食品中常见的增鲜类化合物,后者比肽本身具有更强的增鲜作用,且两类化合物均能为食物带来强烈的饱满感^[44]。Beksan 等则利用化学合成法结合感官分析直接证明了谷氨酸的美拉德反应中间产物具有强烈的与谷氨酸钠相似的鲜味^[64]。肌肽与葡萄糖的美拉德反应中间产物是一种滋味增强剂,可以显著提升肉类汤汁浓稠鲜美的味感^[65]。有研究者还从热牛肉汤中分离出了一种美拉德反应产物alapyridaine,能同时增强食品的甜味、鲜味和咸味^[66-67]。

美拉德反应还可生成特定挥发性化合物,与其他非挥发性滋味成分或感官器官发生相互作用从而提升食品鲜味强度^[68-69]。一些挥发性化合物即使

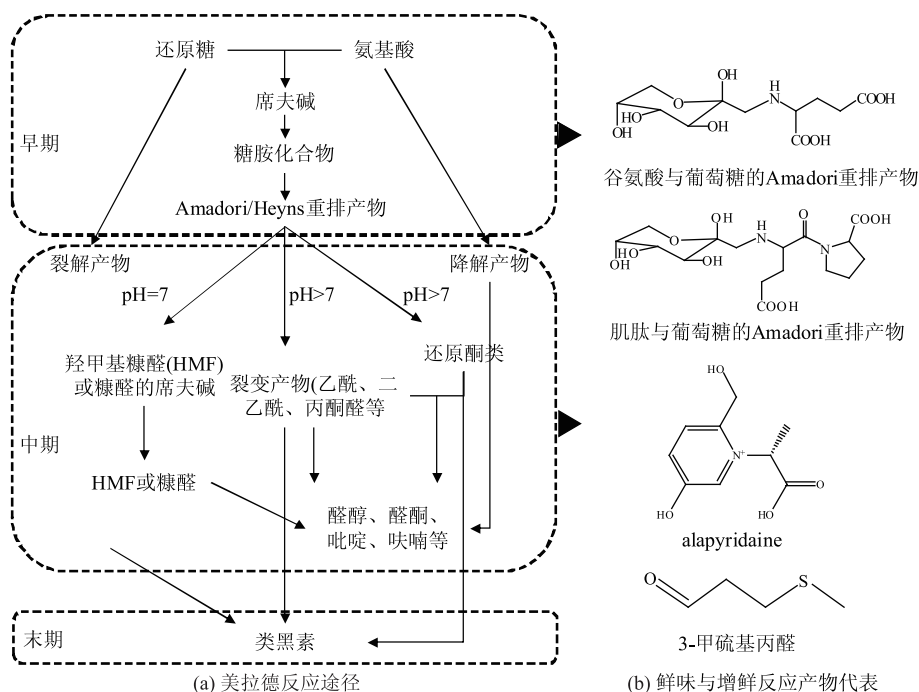


图5 美拉德反应途径示意图及对鲜味有贡献的代表反应产物

Fig. 5 Schematic diagram of Maillard reaction pathways and representative compounds contributing to umami

在亚阈值水平上也能够使得某些非挥发性化合物的呈味阈值大幅度降低^[70]。日本科学家通过细胞实验和分子对接模拟技术深入研究了风味化合物 3-甲硫基丙醛的鲜味协同增效作用机理,在谷氨酸钠存在的基础上,3-甲硫基丙醛可与鲜味受体中 T1R1 跨膜结构域的别构位点结合,从而对受体 T1R1/T1R3 产生正向调节作用^[45]。虽然美拉德反应有助于食品风味的提升,但也会引入不良风味(苦味与焦味),甚至造成食品营养价值的损失,因此如何有效调控美拉德反应对富含鲜味肽呈味基料的工业化生产具有重要意义。

2.5 其他

其他食品加工方法主要通过影响热反应途径或者酶解和提取效率从而对食品中的鲜味肽和增鲜肽产生不同影响^[71]。例如球磨加工可通过机械加工的方式赋予食品体系更多能量,从而快速、高效地诱导化学反应,指向性地促使鲜味肽和增鲜肽等反应底物生成有益风味化合物(美拉德反应中间产物等)^[72];挤压加工可影响美拉德反应的速率^[73-75],而微波^[76]和超声辅助^[77]加工会不同程度的改变化学反应进程或者提升酶解效率从而促进或消减食品中

的鲜味肽和增鲜肽含量。

3 展望

鲜味肽与增鲜肽是高品质调味料的重要组成部分,可赋予食品独特的味感,增强滋味丰富度和协调性,兼具营养与风味特性。目前有关鲜味肽和增鲜肽的呈味机理、物质基础、构效关系、应用与制备调控机制等方面的研究都还有待进一步加深,而如何基于不同感官评价手段客观反映肽类物质呈鲜及增鲜特性,构建相关呈味构效关系并明确其不同加工过程中呈味特性的变化情况是目前调味品行业亟待解决的关键问题。同时,通过改性手段提升弱呈味特性小分子肽风味,或从天然传统美食中发现新型肽衍生物并提升其生产效率是促进食品风味工业化发展的基础。而基于滋味和风味的跨通道交互作用研究是提升富含鲜味肽呈味基料呈味效果的另一发展趋势。随着分析检测技术以及感官生理学和心理学不断发展,人们对于鲜味感知机制认知的加深有利于高端调味品产业的升级与调控。

参考文献:

- [1] 张佳男. 花生鲜味肽的释放及其鲜味强度提升作用研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.
- [2] ZHANG J, SUN-WATERHOUSE D, SU G, et al. New insight into umami receptor, umami/umami-enhancing peptides and their derivatives; a review[J]. **Trends in Food Science & Technology**, 2019, 88: 429-438.
- [3] VASILAKI A, PANAGIOTOPOULOU E, KOUPANTIS T, et al. Recent insights in flavor-enhancers: definition, mechanism of action, taste-enhancing ingredients, analytical techniques and the potential of utilization[J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 2021, 30: 1-17.
- [4] 苏国万. 花生粕酶解及其产物呈味特性研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
- [5] NINOMIYA K. Umami: a universal taste[J]. **Food Reviews International**, 2002, 18(1): 23-38.
- [6] KURIHARA K, PERTICONE F. Umami the fifth basic taste: history of studies on receptor mechanisms and role as a food flavor[J]. **Biomed Research International**, 2015, 2015: 1-10.
- [7] 张文博, 覃凯华, 贾雨鑫, 等. 鲜味觉信息的产生、传递与调控机制[J]. **神经解剖学杂志**, 2021, 37(5): 584-588.
- [8] ANSON L. The bitter-sweet taste of amino acids[J]. **Nature**, 2002, 416(6877): 136-136.
- [9] ZHANG F, KLEBANSKY B, FINE R M, et al. Molecular mechanism for the umami taste synergism[J]. **Proceedings of The National Academy of Sciences**, 2008, 105(52): 20930-20934.
- [10] ZHU W, LUAN H, BU Y, et al. Changes in taste substances during fermentation of fish sauce and the correlation with protease activity[J]. **Food Research International**, 2021, 144: 1-11.
- [11] MA J, CHEN Y, ZHU Y, et al. Quantitative analyses of the umami characteristics of disodium succinate in aqueous solution[J]. **Food Chemistry**, 2020, 316: 1-6.
- [12] HONG H, REGENSTEIN J M, LUO Y. The importance of ATP-related compounds for the freshness and flavor of post-mortem fish and shellfish muscle: a review[J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 2017, 57(9): 1787-1798.

- [13] TEMUSSI P A. The good taste of peptides[J]. **Journal of Peptide Science**, 2012, 18(2): 73-82.
- [14] ZHANG J, ZHAO M, SU G, et al. Identification and taste characteristics of novel umami and umami-enhancing peptides separated from peanut protein isolate hydrolysate by consecutive chromatography and UPLC-ESI-QTOF-MS/MS [J]. **Food Chemistry**, 2019, 278: 674-682.
- [15] YAMASAKI Y, MAEKAWA K. A peptide with delicious taste[J]. **Agricultural and Biological Chemistry**, 1978, 42(9): 1761-1765.
- [16] ZHANG Y, VENKITASAMY C, PAN Z, et al. Novel umami ingredients; umami peptides and their taste[J]. **Journal of Food Science**, 2017, 82(1): 16-23.
- [17] ARAI S, YAMASHITA M, NOGUCHI M. Tastes of *L*-glutamyl oligopeptides in relation to their chromatographic properties[J]. **Agricultural and Biological Chemistry**, 1973, 37(1): 151-156.
- [18] 王蓓, 许时婴. 乳蛋白酶解产物呈味肽序列的研究[J]. 食品科学, 2010, 31(7): 140-145.
- [19] TAMURA M, NAKATSUKA T, TADA M, et al. The relationship between taste and primary structure of “delicious peptide” (Lys-Gly-Asp-Glu-Glu-Ser-Leu-Ala) from beef soup[J]. **Agricultural and Biological Chemistry**, 1989, 53(2): 319-325.
- [20] CUTTS R J, HOWLIN B J, MULHOLLAND F, et al. Low-energy conformations of delicious peptide, a food flavor: study by quenched molecular dynamics and NMR[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 1996, 44(6): 1409-1415.
- [21] YU X, ZHANG L, MIAO X, et al. The structure features of umami hexapeptides for the T1R1/T1R3 receptor[J]. **Food Chemistry**, 2017, 221: 599-605.
- [22] GAO J, FANG D, MUINDE K B, et al. Analysis of umami taste substances of morel mushroom (*Morchella sextelata*) hydrolysates derived from different enzymatic systems[J]. **Food Chemistry**, 2021, 362: 1-11.
- [23] BU Y, LIU Y, LUAN H, et al. Characterization and structure-activity relationship of novel umami peptides isolated from Thai fish sauce[J]. **Food & Function**, 2021, 12(11): 5027-5037.
- [24] LI X, XIE X, WANG J, et al. Identification, taste characteristics and molecular docking study of novel umami peptides derived from the aqueous extract of the clam *Meretrix meretrix* Linnaeus[J]. **Food Chemistry**, 2020, 312: 1-11.
- [25] ZHU X, SUN-WATERHOUSE D, CHEN J, et al. Comparative study on the novel umami-active peptides of the whole soybeans and the defatted soybeans fermented soy sauce[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2021, 101(1): 158-166.
- [26] BEGUM N, RAZA A, SONG H, et al. Fractionation and identification of flavor peptides from bovine bone extract after enzymatic hydrolysis and Maillard reaction by consecutive chromatography[J]. **Journal of Food Processing and Preservation**, 2021, 45(10): 1-15.
- [27] ZHENG Y, TANG L, YU M, et al. Fractionation and identification of salty peptides from yeast extract[J]. **Journal of Food Science and Technology—Mysore**, 2021, 58(3): 1199-1208.
- [28] YU Z, KANG L, ZHAO W, et al. Identification of novel umami peptides from myosin via homology modeling and molecular docking[J]. **Food Chemistry**, 2021, 344: 1-8.
- [29] ZHU W, LUAN H, BU Y, et al. Identification, taste characterization and molecular docking study of novel umami peptides from the Chinese anchovy sauce[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2021, 101(8): 3140-3155.
- [30] ZHAO W, HE J, YU Z, et al. In silico identification of novel small molecule umami peptide from ovotransferrin[J]. **International Journal of Food Science & Technology**, 2022, 57(5): 2628-2635.
- [31] DENG X, LIN H, AHMED I, et al. Isolation and identification of the umami peptides from *Trachinotus ovatus* hydrolysate by consecutive chromatography and nano-HPLC-MS/MS[J]. **LWT—Food Science and Technology**, 2021, 141: 1-9.
- [32] LIANG J, CHEN L, LI Y, 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): 1-8.
- [33] ZHANG Y, GAO X, PAN D, et al. Isolation, characterization and molecular docking of novel umami and umami-enhancing peptides from *Ruditapes philippinarum*[J]. **Food Chemistry**, 2021, 343: 1-9.
- [34] RUAN S, SUN L, SUN X, et al. Novel umami peptides from tilapia lower jaw and molecular docking to the taste receptor T1R1/T1R3[J]. **Food Chemistry**, 2021, 362: 1-10.
- [35] ZHU W, HE W, WANG F, et al. Prediction, molecular docking and identification of novel umami hexapeptides derived from Atlantic cod (*Gadus morhua*) [J]. **International Journal of Food Science & Technology**, 2021, 56(1): 402-412.

- [36] CHEN Y P, WANG M, BLANK I, et al. Saltiness-enhancing peptides isolated from the Chinese commercial fermented soybean curds with potential applications in salt reduction[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2021, 69(35): 10272-10280.
- [37] CHEN M, GAO X, PAN D, et al. Taste characteristics and umami mechanism of novel umami peptides and umami-enhancing peptides isolated from the hydrolysates of Sanhuang Chicken[J]. **European Food Research and Technology**, 2021, 247(7): 1633-1644.
- [38] ALIM A, SONG H, ZOU T. Analysis of meaty aroma and umami taste in thermally treated yeast extract by means of sensory-guided screening[J]. **European Food Research and Technology**, 2020, 246(10): 2119-2133.
- [39] AMIN M N G, KUSNADI J, HSU J, et al. Identification of a novel umami peptide in tempeh (Indonesian fermented soybean) and its mechanism to the umami T1R[J]. **Food Chemistry**, 2020, 333: 1-9.
- [40] BAO X, MA S, FU Y, et al. Sensory and structural characterization of umami peptides derived from sunflower seed[J]. **CyTA-Journal of Food**, 2020, 18(1): 485-492.
- [41] XU X, 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.
- [42] ALIM A, YANG C, SONG H, et al. The behavior of umami components in thermally treated yeast extract[J]. **Food Research International**, 2019, 120: 534-543.
- [43] 苏国万, 赵炫, 张佳男, 等. 酱油中鲜味二肽的分离鉴定及其呈味特性研究[J]. **现代食品科技**, 2019, 35(5): 7-15.
- [44] ZHANG J, SUN-WATERHOUSE D, FENG Y, et al. The umami intensity enhancement of peanut protein isolate hydrolysate and its derived factions and peptides by Maillard reaction and the analysis of peptide (EP) Maillard products[J]. **Food Research International**, 2019, 120: 895-903.
- [45] TODA Y, NAKAGITA T, HIROKAWA T, et al. Positive/negative allosteric modulation switching in an umami taste receptor (T1R1/T1R3) by a natural flavor compound, methional[J]. **Scientific Reports**, 2018, 8(1): 1-13.
- [46] MAEHASHI K, MATSUZAKI M, YAMAMOTO Y, et al. Isolation of peptides from an enzymatic hydrolysate of food proteins and characterization of their taste properties[J]. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, 1999, 63(3): 555-559.
- [47] DANG Y, HAO L, CAO J, et al. Molecular docking and simulation of the synergistic effect between umami peptides, monosodium glutamate and taste receptor T1R1/T1R3[J]. **Food Chemistry**, 2019, 271: 697-706.
- [48] YANG J, HUANG Y, CUI C, et al. Umami-enhancing effect of typical kokumi-active gamma-glutamyl peptides evaluated via sensory analysis and molecular modeling approaches[J]. **Food Chemistry**, 2021, 338: 1-8.
- [49] HAID D, WIDMAYER P, VOIGT A, et al. Gustatory sensory cells express a receptor responsive to protein breakdown products (GPR92)[J]. **Histochemistry and Cell Biology**, 2013, 140(2): 137-145.
- [50] MOURITSEN O G, KHANDELIA H. Molecular mechanism of the allosteric enhancement of the umami taste sensation[J]. **The FEBS Journal**, 2012, 279(17): 3112-3120.
- [51] 邹晶. 超声-TG酶交联改性对小麦面筋蛋白及酵母协同酶解特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [52] ZHAO Y, ZHAO X, SUN-WATERHOUSE D, et al. Two-stage selective enzymatic hydrolysis generates protein hydrolysates rich in Asn-Pro and Ala-His for enhancing taste attributes of soy sauce[J]. **Food Chemistry**, 2021, 345: 1-10.
- [53] ZHAO C J, SCHIEBER A, GÄNZLE M G. Formation of taste-active amino acids, amino acid derivatives and peptides in food fermentations: a review[J]. **Food Research International**, 2016, 89: 39-47.
- [54] FREROT E, CHEN T. Identification and quantitation of new glutamic acid derivatives in soy sauce by UPLC/MS/MS[J]. **Chemistry & Biodiversity**, 2013, 10(10): 1842-1850.
- [55] SGARBI E, LAZZI C, IACOPINO L, et al. Microbial origin of non proteolytic aminoacyl derivatives in long ripened cheeses[J]. **Food Microbiology**, 2013, 35(2): 116-120.
- [56] KIYONO T, HIROOKA K, YAMAMOTO Y, et al. Identification of pyroglutamyl peptides in Japanese rice wine (sake): presence of hepatoprotective pyroGlu-Leu[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2013, 61(47): 11660-11667.
- [57] SUZUKI H, IZUKA S, MINAMI H, et al. Use of bacterial gamma-glutamyltranspeptidase for enzymatic synthesis of gamma-D-glutamyl compounds[J]. **Applied and Environmental Microbiology**, 2003, 69(11): 6399-6404.
- [58] KURODA M, KATO Y, YAMAZAKI J, et al. Determination and quantification of the kokumi peptide, γ -glutamyl-valyl-glycine,

- in commercial soy sauces[J]. **Food Chemistry**, 2013, 141(2):823-828.
- [59] VAN LANCKER F, ADAMS A, DE KIMPE N. Chemical modifications of peptides and their impact on food properties[J]. **Chemical Reviews**, 2011, 111(12):7876-7903.
- [60] CHARVE J, MANGANIELLO S, GLABASNIA A. Analysis of umami taste compounds in a fermented corn sauce by means of sensory-guided fractionation[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2018, 66(8):1863-1871.
- [61] STAROWICZ M, ZIELINSKI H. How Maillard reaction influences sensorial properties (color, flavor and texture) of food products?[J]. **Food Research International**, 2019, 35(8):707-725.
- [62] FU Y, ZHANG Y, SOLADOYE O P, et al. Maillard reaction products derived from food protein-derived peptides: insights into flavor and bioactivity[J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 2020, 60(20):3429-3442.
- [63] OGASAWARA M, KATSUMATA T, EGI M. Taste properties of Maillard-reaction products prepared from 1 000 to 5 000 Da peptide[J]. **Food Chemistry**, 2006, 99(3):600-604.
- [64] BEKSAN E, SCHIEBERLE P, ROBERT F, et al. Synthesis and sensory characterization of novel umami-tasting glutamate glycoconjugates[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2003, 51(18):5428-5436.
- [65] KRANZ M, VITON F, SMARRITO-MENOZZI C, et al. Sensomics-based molecularization of the taste of pot-au-feu, a traditional meat/vegetable broth[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2018, 66(1):194-202.
- [66] OTTINGER H, HOFMANN T. Identification of the taste enhancer alapyridaine in beef broth and evaluation of its sensory impact by taste reconstitution experiments[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2003, 51(23):6791-6796.
- [67] VILLARD R, ROBERT F, BLANK I, et al. Racemic and enantiopure synthesis and physicochemical characterization of the novel taste enhancer N-(1-carboxyethyl)-6-(hydroxymethyl)pyridinium-3-ol inner salt[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2003, 51(14):4040-4045.
- [68] NIIMI J, EDDY A I, OVERINGTON A R, et al. Aroma-taste interactions between a model cheese aroma and five basic tastes in solution[J]. **Food Quality and Preference**, 2014, 31:1-9.
- [69] THOMAS-DANGUIN T, GUICHARD E, SALLES C. Cross-modal interactions as a strategy to enhance salty taste and to maintain liking of low-salt food: a review[J]. **Food & Function**, 2019, 10(9):5269-5281.
- [70] LINSOOTT T D, LIM J. Retronasal odor enhancement by salty and umami tastes[J]. **Food Quality and Preference**, 2016, 48:1-10.
- [71] ZHAO Y, ZHANG M, DEVAHASTIN S, et al. Progresses on processing methods of umami substances: a review[J]. **Trends in Food Science & Technology**, 2019, 93:125-135.
- [72] XING H, YAYLAYAN V. Investigation of thermo-chemical properties of mechanochemically generated glucose-histidine Maillard reaction mixtures[J]. **European Food Research and Technology**, 2021, 247(1):111-120.
- [73] DAVIDEK T, FESTRING D, DUFOSSE T, et al. Study to elucidate formation pathways of selected roast-smelling odorants upon extrusion cooking[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2013, 61(43):10215-10219.
- [74] RIHA W R, HO C T. Flavor generation during extrusion cooking[J]. **Advances in Experimental Medicine and Biology**, 1998, 434:297-306.
- [75] YAYLAYAN V A, FICHTALI J, VOORT F R. Production of Maillard reaction flavour precursors by extrusion processing[J]. **Food Research International**, 1992, 25(3):175-180.
- [76] YAYLAYAN V A, MATNI G, PARE J, et al. Microwave-assisted synthesis and extraction of selected Maillard reaction products[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 1997, 45(1):149-152.
- [77] ONG O, SEOW Y X, ONG P, et al. High-intensity ultrasound production of Maillard reaction flavor compounds in a cysteine-xylose model system[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**, 2015, 26:399-407.