

基于气味-滋味互作增强咸味感知研究进展

肖作兵^{1,2}, 刘龙雪¹, 牛云蔚¹, 张静^{1*}

(¹上海应用技术大学香料香精化妆品学部 上海 201418

²上海交通大学农业与生物学院 上海 200240)

摘要 近年来,因钠盐的过量摄入而带来的健康问题,引发人们对低盐食品的广泛关注。如何在降低钠盐摄入的同时确保食品的特色风味没有显著影响消费者可接受性已引起众多学者思考和探究。利用气味-滋味的多模态感知相互作用进行降盐增咸,是目前的研究热点。本文总结具有咸香特征的气味物质,对气味-滋味跨模态相互作用来增强咸味感知的分析方法、嗅觉和味觉之间的相互作用研究现状进行对比分析,并展望其未来发展方向,以期为今后气味诱导味觉增强方面的研究提供参考。

关键词 咸味; 气味-滋味相互作用; 增强; 感知

文章编号 1009-7848(2024)05-0453-12 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2024.05.038

日常生活中,食物风味是人们对食物的欣赏、接受和选择的主要驱动力。风味在一定程度上决定着消费者购买和摄入食物的意愿,进而影响摄食的营养状况^[1]。食盐(即氯化钠,NaCl)被称为“百味之首”,是烹饪美味佳肴不可缺少的一种调味品。原始社会时期,人类就将盐视为与水源同等重要的定居地考虑因素。可以说人类文明是嗅着盐的气息前行的,人类的历史就是一部追逐盐的历史^[2]。然而,高盐的食物会损伤消化道和血管,增加患高血压、脑卒中、胃癌等疾病的风险^[3-4]。世界卫生组织指出减少盐的摄取对所有人群都是有益的。降低食物中食盐的添加量可以显著减少高血压和心血管疾病的患病风险^[5]。2022年出版的《中国居民膳食指南》中建议平均每人盐摄入量从之前的6g/d持续降到5g/d^[6]。然而,如何确保在降低食品中盐添加量的同时,不会降低消费者对食品的喜爱程度,是目前面临的一个重要挑战。

风味的整体感知是一种同步感官感知,包括滋味、气味、口感和三叉神经感^[7]。在感知味道的过程中,气味和滋味发挥着重要作用,它们不仅可以

独自影响食物的味道,还通过跨感官感知的相互作用共同增强人们对味道的感知^[8]。这意味着激发一种感觉(如嗅觉)可以刺激或者加强与该感官知觉相关的另一种感觉(如味觉)^[9]。以特定气味强化人们对味道的感知为例,气味诱发的味觉变化(Odor-induced changes in taste perception, OICTP)将凸显嗅觉和味觉之间的相互影响。目前,已有不少研究证明味觉可以增强气味强度,反之,味觉也可以通过气味来增强。本文在已有研究的基础上,对近年来有关气味诱导的咸味增强(Odour-induced saltiness enhancement, OISE)相关研究方法及其与气味-滋味互作机制进行总结与分析,以期为今后气味与滋味相互作用方面的研究提供参考。

1 气味增强咸味感知的生理基础

食物风味的感知取决于各种感官体验,如质地(物理感觉)、视觉方面(颜色、形状)和化学方面(气味、味道)。由于嗅觉和味觉对风味影响深远,因此本研究阐述嗅觉和味觉是如何相互作用来增强咸味感知的。

1.1 咸味感知

食物口腔加工的咸味感知过程有3个阶段,主要包括钠的释放、传递及咸味感知^[10](图1)。最初,由于咀嚼和与唾液结合,钠从食物结构中释放出来。钠的释放量受食物结构中钠化合物的特

收稿日期: 2023-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(31972196);上海市学术研究带头人项目(21XD1423800);上海市地方高校科委能力建设项目(21010503900)

第一作者: 肖作兵,男,博士,教授

通信作者: 张静 E-mail: zhangj@sit.edu.cn

性^[1],食物结构的形变程度以及食物结构在口腔加工过程中的相互作用方式的影响。随后,在口腔加工过程中,由于咀嚼作用,当固体和半固体食物与唾液结合时,它们会产生食糜,食糜有助于钠离子的重新排列。钠的转移受钠与其它物质的相互作用,食物的物理性质和唾液特征的影响^[12-14]。最

后,由于作用在舌尖和舌头两侧的前半部分味蕾细胞感知到咸味,食物与口腔接触后,会引起感官产生兴奋反应,进而释放咸味的感知信号。目前研究指出,产生咸味的关键在于钠离子(Na^+)刺激上皮细胞组织内的(Epithelial sodium channel, ENaC)^[15],经过信号传递最终形成咸味感知。

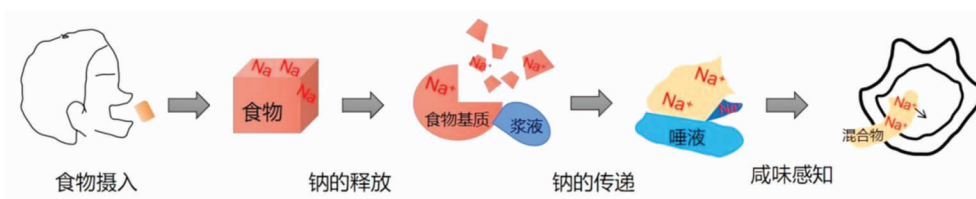
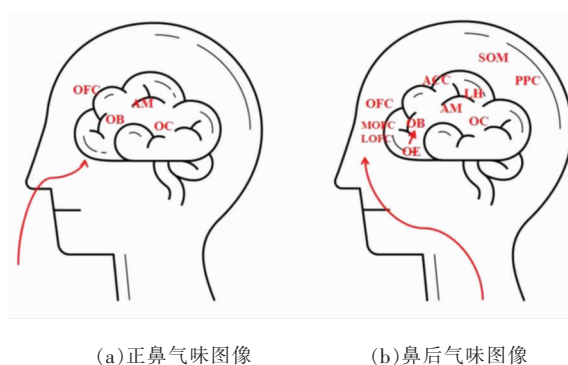


图1 口腔中咸味感知的路径^[10]

Fig.1 The pathway of saltiness perception in the mouth^[10]

1.2 嗅觉感知

“增强咸味感知的多感官协同作用”这一概念涉及利用嗅觉对味觉的综合影响来弥补氯化钠减少所导致的咸味下降。通过加入具有咸味香气特征的挥发性化合物,氯化钠溶液的咸味感知强度可以通过嗅觉补偿得到显著提升,这就是所谓的OISE^[16]。如Rozin^[17]所指出的,气味是独一无二的,因为它具有“双重性质”,即它可以感知来自身体外部(前鼻)和内部(后鼻)的信号,且彼此之间互不干扰^[18-19]。当芳香化合物从鼻腔吸入时,它们会附着在嗅觉上皮细胞上。这种相互作用会产生不同的电信号,然后由嗅球细胞解读并由大脑皮层分析,形成嗅觉感知,即鼻前感知。鼻后嗅觉感知则是在口腔加工过程中,粉碎的食物中香气化合物释放出来,通过鼻后通道到达嗅觉上皮细胞,从而产生与鼻前途径不同的感官体验^[20]。研究发现,后鼻腔香气感知有味觉皮质的参与(图2),虽然嗅觉和味觉受体以及通往大脑的神经通路在生理上是不同的,但在进食食物时,非挥发性化学物质溶解在唾液中并激活口腔中的味觉受体,而挥发性化学物质则通过喉咙回流,激活嗅觉上皮细胞中的嗅觉受体。这些独立的化学感觉系统同时向大脑传输信号,在高级脑区眼窝前额皮质(Orobitofrontal cortex, OFC)观察到显著地激活^[21]。这支持了后鼻腔的嗅觉感知与味觉之间存在相互作用的观点。当香气特征与味觉特征相匹配时,嗅觉



(a) 正鼻气味图像

(b) 鼻后气味图像

注:OFC. 眼窝前额皮质;OE. 嗅觉上皮细胞;OB. 嗅球;OC. 嗅觉皮层;LH. 下丘脑外侧;LOFC. 眶额外侧皮层;AM. 杏仁核;MOFC. 眶额内侧皮层;ACC. 前扣带回皮层;PPC. 后顶叶皮层;SOM. 自组织映射神经网络。

图2 双嗅觉系统

Fig.2 The dual olfactory system

感知会在一定程度上放大味觉感知^[22-23]。因此,利用带有咸味香气的化合物通过嗅觉补偿来增强咸味感知是减少盐摄入量的有效策略,对现阶段研究可增强咸味感知的气味物质的总结如表1所示。

2 气味增强咸味感知的常见感官评定方法研究现状

在利用气味-滋味相互作用增强咸味感知的研究中,主要通过感官试验来检测是否达到降低

表 1 咸味溶液中增强咸味感知的气味物质
Table 1 An odor substance in saltiness that enhances the perception of saltiness

气味物质	样品来源	气味类型	质量浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	溶液质量 浓度/ $\text{mg}\cdot$ mL^{-1}	前、后鼻 途径	阈值/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	参考文献
2,5-二甲基吡嗪	酱油	烤坚果	1.70×10^{-3}	0.030	鼻后	80.00	[24]-[27]
1-辛烯-3-醇		熟土豆	9.00×10^{-4}				
2-甲基-3-巯基咪唑	牛肉高汤	蘑菇味	1.50×10^{-3}	0.025	鼻后	0.01	[28]
		焦香					
1-辛烯-3-醇	火腿	蘑菇味	0.25	0.020	鼻前	1.00	[24],[29]-[31]
2-甲基-3-巯基咪唑		烤香					
己醛 壬醛	沙丁鱼	咸肉	0.25	5.400	鼻后	0.01	[29],[32]
		鱼腥味	0.50				
丁酮 2-庚酮	奶酪	青草香		0.130	鼻前	50 000.00	[29],[33]-[35]
		蘑菇味	6.30×10^{-7}				
2-甲基-3-四氢咪唑硫醇	鸡汤		3.80×10^{-7}	0.800		10.00	
		肉香	2.00				
			2.00	30.000	鼻后	-	[29],[36]

盐含量的同时又保证了含盐食品的可接受度。感官试验主要以分析性为主,通过区别、描述和定量对产品进行客观的分析和描述,在减盐增咸的研究中应用广泛,主要包括描述性分析和差别检验。

2.1 差别检验法

差别检验法中的常用方法是三角检验法或 3 点检验(Triangle test),主要目的是通过较为简单的方式判断两个或多个产品之间是否存在不同^[37]。目前,有关差别检验法在利用多模态感知协同作用进行降盐增咸中的报道有限,在降糖增甜领域中应用的较多,主要用来筛选具有甜香特征的香气化合物(如果味、香草味、焦糖味等),用于后续的感官评级试验等^[38-40]。在利用差别检验法进行检验时,通常仅由感官评定人员判断样品之间是否存在差异,而不能定量的分析气味对咸味感知的增强程度。因此,要达到对气味降盐增咸现象的全面分析,就必须综合运用多种感官评价方法。

2.2 描述性分析

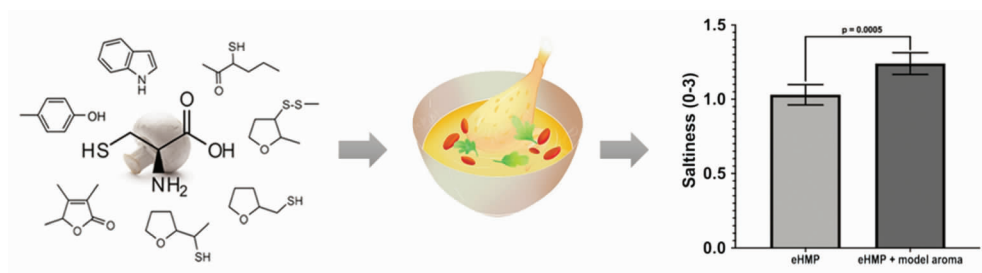
定量描述性分析(Quantitative descriptive analysis, QDA)是描述性分析中常用的方法之一,用于评估嗅觉和味觉之间的相互作用^[41]。这种技术有助于深入透彻地描述产品的感官特征,有效突出产品之间的区别^[42]。目标是量化几种刺激的感知强度,对不同的感觉属性进行评分,并生成产

品的风味轮廓^[43]。

Nasri 等^[44]运用 QDA 研究了沙丁鱼气味对咸味感知强度的影响,其中 NaCl 浓度分别设置为 0, 0.01, 0.02, 0.04 mol/L, 并以胡萝卜气味作为对照组。结果表明,相比空白和对照组,沙丁鱼气味可显著提高 NaCl 溶液的咸味强度。同时,相比高 NaCl 浓度,中、低 NaCl 浓度下的咸味强度显著增强。类似地, Lawrence 等^[29]通过筛选得出奶酪等 14 种咸味相关的气味,再利用 QDA 对比了含有这些气味的 NaCl 溶液的咸度,发现在低浓度 NaCl 溶液中,这些气味可以显著诱发咸味,并通过气味诱导的味觉变化增强咸味。Zhou 等^[24]利用液-液萃取法萃取海天高盐液态发酵酱油中的挥发性化合物,并对酱油中的气味化合物进行筛选与关联,共鉴定出 30 种与味道相关的化合物。通过 QDA 分析,发现与咸味有关的 5 种气味能够在一定浓度的 NaCl 溶液中增强咸味,其中 3-甲基硫代-丙醛、1-辛烯-3-醇、3-(甲基硫代)-1-丙醇和 2,5-二甲基吡嗪能显著提高 0.3% NaCl 溶液的咸度。Jordan 等^[45]利用 QDA 对从热处理的酶水解蘑菇蛋白和半胱氨酸制备的鸡汤的气味中鉴定筛选出的 16 种气味剂进行定量分析,以期发现增强鸡汤咸味感知的关键气味物质,并通过构建气味模拟模型进行验证。结果证实(图 3),与对照组相比(添

加 NaCl 6.0 g), 添加由筛选出的 1-(2-咪唑基)乙硫醇、2-甲基-3-(甲基二硫)咪唑、对甲酚、索托隆

和吡啶构建的香气模型增加了低钠鸡汤 (添加 NaCl 3.6 g) 的咸味感知。



注: 低钠鸡汤中只添加热处理酶水解蘑菇蛋白和复合添加香气模型的咸味评级。

图3 样本的咸度评级^[45]

Fig.3 Salinity rating of samples^[45]

定量描述分析(QDA)可以将产品中每个感官特征指标进行鉴定与评价, 从而综合分析产品的感官特性。在上文中, QDA除了可以识别样本的基本风味外, 而且还可以识别不同滋味的强度。根据样本的不同, QDA用来分析不同浓度下同一气味物质的咸味感知增强, 也可用于不同浓度下各种气味的咸味增强程度。然而, 这种方法也有其局限性, 在进行感官分析时, 感官评估者的敏感度、判断能力、经验、审美偏好以及他们的生理和心理特征等因素都属于主观评价, 会影响测试结果, 从而造成试验结果的偏差。

2.3 感官评价与仪器分析结合

食物的感官感知具有时效性, 不论是 QDA 还是 3 点检验, 都是一种主观评价方法, 感官结果很容易受感官人员年龄、性别、身体状况、好恶等因素的影响^[46]。虽然专业的感官人员可以在某种程度上规避一些主观差异, 但是仍然需要借助仪器来改善试验分析的客观和精确性。因此, 在研究气味-滋味相互作用时, 将主观分析与仪器分析相结合, 将会有更大的优越性, 从而使感官评价分析尽快走向科学化、规范化, 从而对感官评价小组的评价结果进行客观、定量的指导^[47]。

闻香扫描(Olfactoscan)技术是 Kerstin 等^[48]开发的一种耦合体系(动态稀释式嗅觉仪与气相色谱/嗅觉测定法), 用来分析混合香味背景下不同气味分子的感知变化以及背景气味强度对不同气味分子感知的影响^[49], 并对复杂气味混合物中的混合效应进行在线评估, 如食物风味。作为一种经

典的分析方法, GC-O 与 Olfactoscan 装置(如图 4 所示)相结合评估的气味化合物, 这种方法被命名为气相色谱/嗅觉相关味觉(Gas chromatography/olfactometry-associated taste, GC/O-AT), 该方法来源于 GC-O, 在其基础上又为气味区提供了“味道”属性, 在多感官协同作用分析中应用广泛。利用 GC/O-AT 对海天酱油中具有咸香气味特征的化合物进行分离时发现 3-甲硫基丙醛、1-辛烯-3-醇、2,5-二甲基吡嗪、3-甲硫基丙醇都能明显增强咸味感知, 其中 3-甲硫基丙醛对咸味感知的增强作用最强^[19]。GC/O-AT 分析还可以用来识别混合果汁中与味道属性(甜、咸、苦和酸)相关的气味

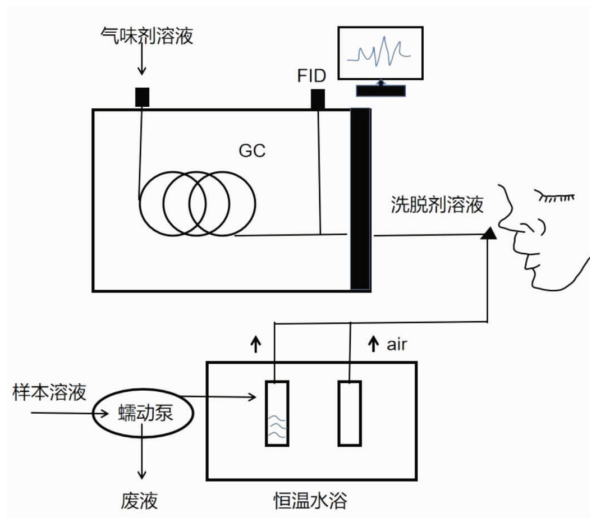


图4 嗅觉扫描试验装置的示意图^[50]

Fig.4 Schematic representation of the Olfactoscan experimental setup^[50]

化合物,使用嗅觉扫描技术选择了 9 种化合物,并通过定量描述分析(QDA)得出 2-甲基丁酸甲酯、丁酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯和芳樟醇显著提高了果汁气味的甜度^[50]。GC/O-AT 分析是用来选择与特定味道相关气味的一种新颖、高效的方法,通过 Olfactoscan 进一步筛选出与特定味道相关的气味,以增强目标味觉的感知。然而,如何选择具有特定相关味道的气味描述符仍然是一个难题。为了寻找能够增强某些特定味觉的气味,以找到气味描述符和味觉描述符之间的关系,Guichard 等^[51]通过使用偏最小二乘(PLS)、多维标度(MDS)以及 Cytoscape 等网络表示法,对 41 个气味描述符和 4 个味道描述符(甜、咸、苦、酸)之间的关系进行可视化分析描述,从而选择出具有增强味觉潜力的气味活性分子。通过采用不同的数据分析方法,发现气味描述符和味道描述符之间存在一致的关系,这个关系可以用来预测模型系统或真实食物中潜在的气味诱导的味觉增强或气味诱导的味觉掩蔽。

3 气味增强咸味感知作用机理的研究现状

味道感知实质上是一种多模态的现象,香气和味觉在其中扮演了重要角色。因此,对味道的感知涉及到不同感官形态的整合,并受到它们相互作用的影响^[52]。这些相互作用在本质上是多因素的,主要包括物理化学的相互作用、生理相互作用以及认知和心理方面的相互作用。

3.1 物理化学的相互作用

食品基质成分与唾液蛋白质的物理、化学作用,以及在食用时所产生的盐类和芳香类物质在食品中产生的多模态知觉相互作用等都会对风味的释放和感官产生影响^[53]。盐和酸提高了极性挥发性化合物的顶空浓度^[54],Jennings^[55]指出,当氯化钠浓度增大时,在顶空中 ¹⁴C 标记的醋酸乙酯的放射性也会相应增大。Schinneler 等^[56]发现,当单磷酸肌醇存在于液相中时,辛醇的顶空浓度会增大。一般来说,芳香化合物的挥发性随着介质中盐的存在而增加,这种“盐析”现象是由于盐分子动员溶剂化水分子,导致挥发性分子排出。因此,与无盐介质相比,它们的波动性增加。挥发性物质的释放依赖于它的特性,也依赖于它的介质和盐浓度^[57]。

Pionnier 等^[58]对代表 Camember 干酪水提取物的模型溶液进行了研究,结果表明,除传统的盐析作用外,还发现了几种有机化合物(例如多肽)对挥发性物质的保留或释放造成影响,从而减少或提高了香气顶空浓度,尤其是水溶性提取物的出现,使得 2-庚酮、1-辛烯-3-醇、3-甲基丁醇的顶空浓度增大。

研究表明,在不同的气味刺激下,通过鼻后嗅觉感知的气味更能增强滋味感知(图 2),也就是说,风味在口腔中的释放是影响多模态感知的一个主要因素。在感知过程中,风味属性一致的气味和味道(如香草-甜味)在知觉上发生一定的交互作用^[59],气味强度越高,味觉增强也就越明显。食物在口腔内的感知过程会受到由于咀嚼作用产生的唾液效应和化学反应等一系列变化的影响^[60]。离子增稠剂会通过静电作用阻碍钠离子的迁移,而 K⁺等阳离子的竞争性结合则会增强钠离子的迁移,最终影响咸味感知。再有,食品的流变特性会影响钠离子的输送,因为黏度增加会导致咸味感知降低。然而,在较高的剪切速率下,黏度不会影响盐浓度^[61]。此外,唾液的特征(如流速和成分)会影响钠离子的输送和味觉感知。在食用各种人工唾液的研究中发现,唾液流速越高,对咸味和酸味的感知越低^[62]。咀嚼颗粒状淀粉产品也会减少咸味,因为唾液淀粉酶会将颗粒状结构分解成分子链,防止淀粉溶液与唾液混合。

鉴于食品结构复杂,发生的反应范围广泛,分子模拟技术有助于预测食品分子、结合位点和各种影响因素之间的潜在相互作用,并在分子水平上对作用机理提供详细信息^[63-64]。分子模拟将理论方法和计算机技术结合起来,在原子或分子水平上模拟分子的结构和行为。这种方法有助于从微观角度解释分子系统的物理化学特性,探索其相互作用机制,并为指导宏观科学试验提供见解^[65]。分子模拟技术有利于全面、迅速地了解食品分子间的相互作用和结构排列,因此对食品研究系统很有优势。虽然目前尚未有报道,但分子模拟技术或可成为未来味觉和嗅觉相互作用机制探究的重要手段,避免大量重复试验,节约时间及人力成本。

3.2 生理的相互作用

味道感知是气味与滋味融合的结果,即气味

可以有味觉特性(气味诱发味觉)。嗅觉感受器和味觉感受器分别位于鼻黏膜和舌头上,跨模态反应需要存在一个多模态收敛中心点,对复合输入做出反应,大部分参与味道感知的大脑区域都是高级区域,这些心理物理数据和生理假设需要电生理和神经影像学研究进行测试。Seo等^[69]通过功能性磁共振成像(Functional magnetic resonance imaging, fMRI)发现与咸味相关的气味与味觉整合后的大脑区域(如岛叶、额盖、前扣带皮层和眶额皮层)产生的神经元激活明显高于不相关的气味与味觉溶液的组合。此外,在低浓度的NaCl溶液中,双侧岛叶前腹侧、右侧ACC和隐窝等多个脑区产生了更高的激活反应(图5)。然而,在初级

味觉和嗅觉区域也检测到嗅觉和味觉的组合反应。针对fMRI结果,Charlotte等^[28]利用一个接近真实的盐水汤模型,结合感官评估和脑电图,研究了“牛肉汤”香气对增强咸味感知的影响。结果表明,添加“牛肉汤”香气会明显增强绿豌豆汤中咸味的感知,与不添加香气的汤相比,会导致处理过程延迟25 ms。这种延迟还影响了认知后期的P3峰值,该峰值位于大脑的高级综合和认知区域,进一步支持了嗅觉和味觉之间的相互作用发生在这些高级脑区(OFC)的观点。这种相互作用可能会导致影响初级感觉区域(IC)的反馈回路,从而增强内部对咸味的感知。

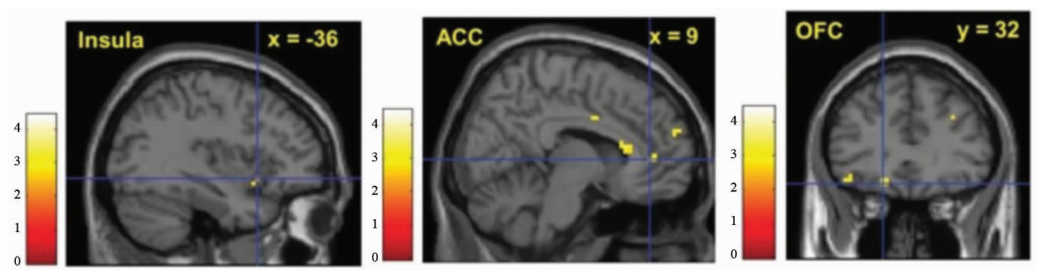
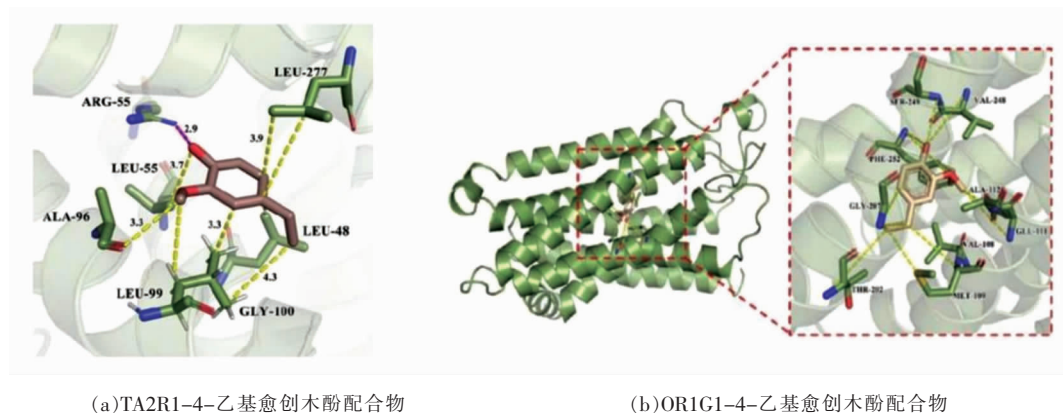


图5 大脑区域对比激活成像^[28]

Fig.5 Contrast activation imaging of brain regions^[28]

生物系统的宏观特征和反应机制是微观过程的结果,大多数生命科学系统在微观层面上表现出2个或多个分子之间的相互作用^[67]。胡可^[68]利用分子对接技术从味觉和嗅觉受体方向对人体感知熏制火腿风味进行研究,利用AutoDock vina将烟熏成分与受体结合对接后的最佳复合物进行相互

作用分析(图6),发现4-乙基愈创木酚与人体味觉受体TA2R1以及嗅觉受体OR1G1均显示出较高的结合能,这说明烟熏风味的感知是味觉与嗅觉共同作用的结果。虽然分子模拟技术在食品领域的应用日渐增多,但目前还未发现有关气味-滋味相互作用之间的报道。现有研究的发现说明,利



(a)TA2R1-4-乙基愈创木酚配合物

(b)OR1G1-4-乙基愈创木酚配合物

图6 残基相互作用示意图^[68]

Fig.6 Diagram of residue interactions^[68]

用分子对接技术或可帮助我们更加深入地了解风味分子本身与受体之间的构效关系,进一步在微观层面研究气味-滋味间的相互作用。

3.3 心理的相互作用

当我们摄入食物或饮料时,嗅觉、味觉、视觉和触觉往往是综合在一起的,很难自发地分离开来,从而影响人们对味道的整体感知^[69-71],喜欢或不喜欢、接受或拒绝均与这种整体知觉有关^[72]。通常,某种特定的气味与基本的味觉特性具有一定关联性。例如,香草的气味往往与甜味感知相关联,而沙丁鱼的气味往往与咸味感知相关联。这种“气味-味道一致性(Smell-taste congruency)”是人们在长久进食过程中形成的特定记忆,在自然界中,某种滋味和某种气味总是在同一时间发生,长此以往,人们便会习得这种一致性。因此,当人们闻到某种气味时,会自然产生相应滋味的感知。Zhou 等^[24]研究发现味道和气味的相互作用需要“一致性”,这两者之间有着某种联系,比如闻到草莓的气味会联想到甜味、闻到酱油的气味能够想到咸味。

气味引起的咸味增强(OISE)是在气味实际出现(味道和气味之间没有物理接触)或仅仅是想象时发生的^[73]。在人类心理物理学中,有一些关于气味和滋味的有趣现象。例如,气味诱发味觉增强现象。在这种现象中,当用与甜味一致的气味来进行调味时,甜味的感觉会增强^[74-76]。这种现象被认为是一种最基本的味觉感知机制。有人认为,这种现象可能是建立在嗅觉和味觉之间的关联学习上^[77]。Sakai 等^[78]在大鼠中研究了味觉和嗅觉之间联系的神经基础。用 0.3 mol/L NaCl 溶液和一种香精以及蒸馏水和另一种香精分别对大鼠进行实验,结果发现,正常的大鼠没有摄入之前搭配好的添加氯化钠的水溶液,反而被注射药剂后患有钠缺乏症的老鼠喝下了氯化钠的水溶液。这说明,大鼠在气味和咸味之间获得了一种联系,并且大鼠的岛叶和前额叶皮层也参与了这种联系,当它们的细胞外钠浓度被迅速降低时,它们使用了关联记忆,就可以选择出曾经与咸味配对的气味。气味的咸度和熟悉度对味道的影响,通常是在联想学习的框架下进行解释。联想则是指嗅觉和味觉 2 种不同感觉模式之间的系统联系,风味则受到气味与

味道共同作用。

除此之外,利用气味对滋味产生的增强效果可能是气味本身的特性,也可能是感知过程产生的光环效应(Halo effect),即对某种感官刺激产生的评价,会导致对同时考量的其它特性也产生相应的趋同现象。Jyoti 等^[79]研究了注意力对气味-滋味整合的影响发现,当感官人员被要求只专注于滋味时,气味对味道的增强作用便减弱了,而当注意力再次集中到专注于气味时,气味对味道的增强作用便会显著。同样,当根据知觉交互来采用分析与合成的方法来感知味道,会强烈影响人们对气味与味道融合的观察程度。因此,可以假设当味觉强度增加时,会吸引受试者的注意力,甚至会下意识的采用分析策略,也就是在气味和滋味之间,当盐浓度增加时,受试者的注意力更多地集在滋味上,而在某种程度上排除了对气味的注意,从而降低了 OISE。

4 展望

如何“降盐不减咸”是当下食品健康领域的重要议题,而通过气味增强咸味感知,可在降低钠盐含量的同时保证食品的可接受性。目前的研究结果表明,气味诱导的咸味感知取决于盐的浓度,当盐浓度过高时,气味诱导的咸味增强便不在明显。对该方向的研究可从以下几个方面深入:1) 对可增咸气味物质的类型及特性的继续挖掘,以及通过气味增补可达到的最大增咸程度;2) 气味增补与其它降盐手段(如鲜味剂、钠盐微胶囊等)协同作用时的增咸作用;3) 通过分子对接、分子模拟等技术对气味增咸的微观机制进行解析。

参 考 文 献

- [1] 程远, 万红建, 姚祝平, 等. 不同品种樱桃番茄氨基酸组成及风味分析[J]. 核农学报, 2019, 33(11): 2177-2185.
CHENG Y, WAN J H, YAO Z P, et al. Comparative analysis of the amino acid constitution and flavor quality in different cherry tomato varieties [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33 (11): 2177-2185.
- [2] 任乃强. 说盐[J]. 盐业史研究, 1988(1): 3-13.

- REN N Q. Say salt[J]. Research on the History of Salt Industry, 1988(1): 3-13.
- [3] AFSHIN A, SUR P J, FAYK A, et al. Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990-2017: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017[J]. The Lancet, 2019, 393(10184): 1958-1972.
- [4] 叶青, 李勤, 吕庆, 等. 食品中钠离子含量检测方法综述[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(11): 4576-4580.
- YE Q, LI Q, LÜ Q, et al. Determination methods of sodium ion in food[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2016, 7(11): 4576-4580.
- [5] 洪洋, 姜华, 袁桂莉, 等. 高食盐摄入对人体健康的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(7): 2618-2623.
- HONG Y, JIANG H, YUAN G L, et al. Effects of high salt intake on human health[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(7): 2618-2623.
- [6] 张聪. 中国营养学会发布《中国居民膳食指南(2022)》[J]. 食品安全导刊, 2022(14): 4.
- ZHANG C. The Chinese Nutrition Society released the Dietary Guidelines for Chinese Residents (2022)[J]. China Food Safety Magazine, 2022(14): 4.
- [7] 朱忆雯, 张宁龙, 姜水, 等. 食品鲜味感知研究进展[J]. 中国食品学报, 2021, 21(1): 1-16.
- ZHU Y W, ZHANG N L, JIANG S, et al. The research progress on food umami perception[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(1): 1-16.
- [8] 田怀香, 郑国茂, 于海燕, 等. 气味与滋味间相互作用对食品风味感知影响研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 259-269.
- TIAN H X, ZHENG G M, YU H Y, et al. Research progress on the influence of the interaction between odour and taste on food flavor perception[J]. Food Science, 2023, 44(9): 259-269.
- [9] BISWAS D, SZOCS C. The smell of healthy choices: Cross-modal sensory compensation effects of ambient scent on food purchases[J]. Journal of Marketing Research, 2019, 56(1): 123-141.
- [10] KUO W Y, LEE Y. Effect of food matrix on saltiness perception implications for sodium reduction[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2014, 13(5): 906-923.
- [11] DOYLE M E, GLASS K A. Sodium reduction and its effect on food safety, food quality, and human health[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2010, 9(1): 44-56.
- [12] PLOYON S, MORZEL M, CANON F. The role of saliva in aroma release and perception[J]. Food Chemistry, 2018, 226: 212-220.
- [13] MUÑOZ-GONZÁLEZ C, FERON G, BRULÉ M, et al. Understanding the release and metabolism of aroma compounds using micro-volume saliva samples by *ex vivo* approaches[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 275-285.
- [14] CANON F, NEIERS F, GUICHARD E. Saliva and flavor perception: Perspectives[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(30): 7873-7879.
- [15] ROPER S D. Signal transduction and information processing in mammalian taste buds[J]. Pflügers Arch: European Journal of Physiology, 2007, 454(5): 759-776.
- [16] 陕怡萌, 蒲丹丹, 张玉玉, 等. 食品减盐方法研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(13): 267-275.
- SHAN Y M, PU D D, ZHANG Y Y, et al. A review of methods for salt reduction in foods[J]. Food Science, 2022, 43(13): 267-275.
- [17] ROZIN P. 'Taste-smell confusions' and the duality of the olfactory sense[J]. Perception & Psychophysics, 1982, 31(4): 397-401.
- [18] BLANKENSHIP M L, GRIGOROVA M, KATZ D B, et al. Retronasal odor perception requires taste cortex, but orthonasal does not[J]. Current Biology, 2019, 29(1): 62-69.
- [19] HANNUM M, STEGMAN M A, FRYER J A, et al. Different olfactory percepts evoked by orthonasal and retronasal odorant delivery[J]. Chemical Senses, 2018, 43(7): 515-521.
- [20] CHAD L, ALEREDO F. Processing of intraoral olfactory and gustatory signals in the gustatory cortex of awake rats[J]. Journal of Neuroscience, 2017, 37(2): 244-257.
- [21] SMALL D M. Flavor is in the brain[J]. Physiology & Behavior, 2012, 107(4): 540-552.
- [22] MEREDITH L, MARIA G, DONALD B, et al. Retronasal odor perception requires taste cortex, but orthonasal does not[J]. Current Biology, 2019, 29(1): 62-69.
- [23] SMALL D M, GERBER J C, MAK Y E, et al.

- Differential neural responses evoked by orthonasal versus retronasal odorant perception in humans[J]. *Neuron*, 2005, 47(4): 593-605.
- [24] ZHOU T, FENG Y Z, ZHAO M M, et al. Enhancement of saltiness perception by odorants selected from Chinese soy sauce: A gas chromatography/olfactometry-associated tastestudy[J]. *Food Chemistry*, 2021, 335: 127664.
- [25] KAKUTANI Y, NARUMI T, KOBAYAKAWA T, et al. Saltiness intensity enhancements by odor of soy sauce synchronized with breathing[J]. *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan*, 2019, 24(1): 77-82.
- [26] NAPAPAN C, SRIWATTANA S, PHIMOLSIRIPOL Y, et al. Soy sauce odour induces and enhances saltiness perception[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2015, 50(10): 2215-2221.
- [27] DJORDJEVIC J, ZATORRE R J, JONES-GOTMAN M. Odor-induced changes in taste perception [J]. *Experimental Brain Research*, 2004, 159(3): 405-408.
- [28] CHARLOTTE S, HENRI T, THOMAS H, et al. Odor-induced saltiness enhancement: Insights into the brain chronometry of flavor perception[J]. *Neuroscience*, 2020, 452: 126-137.
- [29] LAWRENCE G, SALLES C, SEPTIER C, et al. Odour-taste interactions: A way to enhance saltiness in low-salt content solutions[J]. *Food Quality and Preference*, 2009, 20(3): 241-248.
- [30] MARION E, CHANTAL S, ISABELLE A, et al. Combined heterogeneous distribution of salt and aroma in food enhances salt perception[J]. *Food & Function*, 2015, 6(5): 1449-1459.
- [31] AASLYNG M D, VESTERGAARD C, KOCH A G. The effect of salt reduction on sensory quality and microbial growth in hotdog sausages, bacon, ham and salami[J]. *Meat Science*, 2014, 96(1): 47-55.
- [32] NASRI N, SEPTIER C, BENO N, et al. Enhancing salty taste through odour-taste-taste interactions: Influence of odour intensity and salty tastants' nature [J]. *Food Quality and Preference*, 2013, 28(1): 134-140.
- [33] NIIMI J, ANDREW I, AMY 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.
- [34] BAPTISTA D P, EBERLIN M N, GIGANTE M L, et al. Reduction of 25% salt in Prato cheese does not affect proteolysis and sensory acceptance[J]. *International Dairy Journal*, 2017, 75: 101-110.
- [35] 谭励, 王蓓, 艾娜丝, 等. 切达奶酪挥发性特征风味物质的多典型相关融合分析[J]. *中国乳品工业*, 2021, 49(9): 12-18, 27.
- TAN L, WANG B, AI N S, et al. Identification of volatile flavor characteristics of cheddar cheese with multi-CCA fusion[J]. *China Dairy Industry*, 2021, 49(9): 12-18, 27.
- [36] BATENBURG M, VELDEN R. Saltiness enhancement by savory aroma compounds[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(5): 280-288.
- [37] DRAKE M A. Invited review: Sensory analysis of dairy foods[J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90(11): 4925-4937.
- [38] RAFAEL S L, ALESSANDRA C M, TERESA M P, et al. Impact of sweetness on the sensory acceptance of passion fruit nectar in Brazilian geographic regions[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2021, 56(6): 3055-3065.
- [39] HUANG J, LIU Y P, YANG W X, et al. Characterization of the potent odorants contributing to the characteristic aroma of Beijing douzhi by gas chromatography-olfactometry, quantitative analysis, and odor activity value [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(3): 689-694.
- [40] XIAO Z B, CHEN H T, NIU Y W, et al. Characterization of the aroma-active compounds in banana (*Musa AAA Red green*) and their contributions to the enhancement of sweetness perception[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(50): 15301-15313.
- [41] 姚月华, 赵欣, 王洪伟, 等. Flash Profile法和定量描述分析法对市售酸奶和巴氏杀菌酸奶感官性质的分析[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(12): 237-244.
- YAO Y H, ZHAO X, WANG H W, et al. Sensory attributes of commercial yogurts and pasteurized yogurts using flash profile and quantitative descriptive analysis[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(12): 237-244.
- [42] 孙连海. 定量描述分析法(QDA)在香菇酱感官评定中的应用[J]. *食用菌*, 2017, 39(1): 60-62.
- SUN L H. Application of quantitative descriptive analysis (QDA) in sensory evaluation of mushroom sauce[J]. *Edible Fungi*, 2017, 39(1): 60-62.

- [43] GOTOW N, SKRANDIER W, KOBAYASHI T, et al. Traditional Japanese confection overseas: Cultural difference and retronasal aroma affect flavor preference and umami perception[J]. *Food Quality and Preference*, 2021, 92(8): 104204.
- [44] NASRI N, BENO N, SEPTIER C, et al. Cross-modal interactions between taste and smell: Odour-induced saltiness enhancement depends on salt level[J]. *Food Quality and Preference*, 2011, 22(7): 678-682.
- [45] JORDAN L, TRENT K, LINDSAY J, et al. Odorants from the thermal treatment of hydrolyzed mushroom protein and cysteine enhance saltiness perception[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(41): 11444-11453.
- [46] 糜川清, 郭安鹊, 王华. 感官分析及仪器分析在葡萄酒香气研究中的应用[J]. *食品科学*, 2012, 33(23): 351-355.
- MI C Q, GUO A Q, WANG H. Application of sensory and instrumental analysis in wine aroma[J]. *Food Chemistry*, 2012, 33(23): 351-355.
- [47] 史波林, 赵镭, 汪厚银, 等. 感官分析评价小组及成员表现评估技术动态分析[J]. *食品科学*, 2014, 35(8): 29-35.
- SHI B L, ZHAO L, WANG H Y, et al. Overview of assessment techniques for sensory panel and panelist performance[J]. *Food Chemistry*, 2014, 35(8): 29-35.
- [48] KERSTIN B, CATRIENUS J. Application of the Olfactoscan method to study the ability of saturated aldehydes in masking the odor of methional[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(19): 9086-9090.
- [49] 马玥. 冰葡萄酒混合香气感知相互作用规律及机理的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- MA Y. Rules and mechanisms of perceptual interaction of odor mixtures: Application to icewine aroma[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [50] BARBA C, BENO N, GUICHARD E, et al. Selecting odorant compounds to enhance sweet flavor perception by gas chromatography/olfactometry-associated taste (GC/O-AT)[J]. *Food Chemistry*, 2018, 257: 172-181.
- [51] GUICHARD E, CARMEN B, ANNE T, et al. Multivariate statistical analysis and odor-taste network to reveal odor-taste associations[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 68(38): 10318-10328.
- [52] ZHOU X R, SHEN Y C, LISA M, et al. Relative effects of sensory modalities and importance of fatty acid sensitivity on fat perception in a real food model[J]. *Chemosensory Perception*, 2016, 9: 105-119.
- [53] MARIKO M, SANAE I, TATSUHITO U, et al. Retronasal odor of dried bonito stock induces umami taste and improves the palatability of saltiness[J]. *Journal of Food Science*, 2014, 79(9): 1769-1775.
- [54] GUO J, YUE T L, YUAN Y H. Impact of polyphenols on the headspace concentration of aroma compounds in apple cider[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 99(4): 1635-1642.
- [55] JENNINGS W G. Influence of temperature and salt additions on vapor equilibration of headspace[J]. *Food Science*, 1965, 30(3): 445-449.
- [56] SCHINNELER D J, DOUGHERTY R H, BIGG R H. Influence of selected 50-nucleotides on flavor threshold of octanal[J]. *Journal of Food Science*, 1972, 37(6): 935-937.
- [57] REBEKKS H, RUDI F, MATTHIAS A. Microbiota dynamics and volatile compounds in lupine based moromi fermented at different salt concentrations[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2021, 354: 109316.
- [58] PIONNINER E, CHABANET C, MIOCHE L. *In vivo* aroma release during eating of a model cheese: Relationships with oral parameters[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(3): 557-564.
- [59] KEAST R, BRESLIN P. An overview of taste-taste interactions[J]. *Food Quality and Preference*, 2003, 14(2): 111-124.
- [60] YANG J, BAI W D, ZENG X F, et al. Gamma glutamyl peptides: The food source, enzymatic synthesis, kokumi-active and the potential functional properties - A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 91: 339-346.
- [61] KOLIANDRIS A L, MORRIS C, HEWSON L, et al. Correlation between saltiness perception and shear flow behaviour for viscous solutions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2010, 24(8): 792-799.

- [62] HEINZERLING C I, STIEGER M, BULT J H F, et al. Individually modified saliva delivery changes the perceived intensity of saltiness and sourness[J]. *Chemosensory Perception*, 2011, 4(4): 145-153.
- [63] 王娟娟, 李海平. 分子模拟技术在食品分子互作中的应用研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(14): 292-302.
- WANG J J, LI H P. Application progress of molecular simulation technology in food molecular interaction[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(14): 292-302.
- [64] 吕鹏飞, 单晨旭, 曲广森, 等. 腰果酚聚氧乙烯醚磺酸钠在癸烷-水体系的分子动力学模拟[J]. *油田化学*, 2017, 34(1): 126-131.
- LÜ P F, SHAN C X, QU G M, et al. Molecular dynamics simulation of cardanol polyoxyethylene ether sulfonate in decane-water interface [J]. *Oilfield Chemistry*, 2017, 34(1): 126-131.
- [65] 洪祥宇, 徐亨宇, 崔风路, 等. 分子模拟在非常规油气开发中的应用[J]. *计算力学学报*, 2021, 38(3): 313-320.
- HONG X Y, XU H Y, CUI F L, et al. Application of molecular simulation in unconventional oil and gas development [J]. *Journal of Computational Mechanics*, 2021, 38(3): 313-320.
- [66] SEO H S, IANNILLI E, HUMMEL C, et al. A salty-congruent odor enhances saltiness: Functional magnetic resonance imaging study[J]. *Human Brain Mapping*, 2013, 34(1): 62-76.
- [67] AURELIEN G, VINCENT Z, OLIVIER M. Swiss-Dock, a protein-small molecule docking web service based on EADock DSS[J]. *Nucleic Acids Research*, 2011, 39: 270-277.
- [68] 胡可. 特征烟熏成分与熏煮火腿蛋白相互作用及呈味机理研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- HU K. Study on the interactions between the characteristic smoked ingredients and protein of smoked sausage, and its taste presentation mechanism [D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [69] ROZIN E. The structure of cuisine [M]// BARKERL ed. *The psychobiology of human food selection*. Westport: Avi Publishing Col., 1982: 189-203.
- [70] FIRESTEIN S. How the olfactory system makes sense of scents[J]. *Nature*, 2001, 413(6852): 211-218.
- [71] DUIZER L. Food oral processing: Fundamentals of eating and sensory perception [J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2013, 29(1): 81-82.
- [72] Psychological processes in flavour perception [M]// TAYLOR A J, ROBERTS D D ed. *Flavor perception*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd., 2004: 256-278.
- [73] MARTION G, LAWRENCE E, MARKS. Synesthesia: Strong and weak[J]. *Current Directions in Psychological Science*, 2001, 10(2): 61-65.
- [74] FRANK R A. Response context affects judgments of flavor components in foods and beverages[J]. *Food Quality & Preference*, 2003, 14(2): 139-145.
- [75] SAKAI N. Enhancement of sweetness ratings of aspartame by a vanilla odor presented either by orthonasal or retronasal routes[J]. *Perceptual and Motor Skills*, 2001, 92(3): 1002-1008.
- [76] SAKAI N, NASU A, HANAKI R, et al. The association between the quality of taste and odor in the rat [J]. *Japanese Journal of Taste & Smell Research*, 2000, 7(5): 699-710.
- [77] STEVENSON R J, BOAKES R A, WILSON J P. Resistance to extinction of conditioned odor perceptions: Evaluative conditioning is not unique[J]. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 2000, 26(2): 423-440.
- [78] SAKAI N, YAMAMOTO T. Effects of excitotoxic brain lesions on taste-mediated odor learning in the rat[J]. *Neurobiology of Learning and Memory*, 2001, 75(2): 128-139.
- [79] JYOTI M, ADAM G. Attention distributed across sensory modalities enhances perceptual performance [J]. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 2012, 32(35): 12294-12302.

Advances in the Enhancement of Salty Taste Perception Based on Odour–taste Interactions

Xiao Zuobing^{1,2}, Liu Longxue¹, Niu Yunwei¹, Zhang Jing^{1*}

(¹School of Perfume and Aroma Technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418

²School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract In recent years, health problems caused by excessive sodium intake have led to widespread concern about low-salt foods. How to reduce sodium intake while ensuring that the characteristic flavor of food has no significant impact on consumer acceptability has aroused many scholars thinking and exploring. At present, it is a hot research topic to reduce salt and increase salinity by using the multi-modal perception interaction of smell and taste. In this paper, the analysis methods of the transmembrane interaction of smell and taste enhanced the perception of saltiness, and the research status of the interaction between smell and taste were compared and analyzed, the future directions of the research were also prospected to provide references for future research on odor-induced taste enhancement.

Keywords salty taste; odour–taste interactions; enhancement; perception