

## 甜味与其它基本味相互作用的研究进展

夏熠珣<sup>1,2,3</sup>, 陈佳<sup>2</sup>, 王子元<sup>4</sup>, 王娟<sup>5</sup>, 吴嘉欣<sup>4</sup>, 钟芳<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup> 江南大学未来食品科学中心 江苏无锡 214122

<sup>2</sup> 江南大学食品学院 江苏无锡 214122

<sup>3</sup> 江南大学 中国轻工业食品感知科学与技术重点实验室 江苏无锡 214122

<sup>4</sup> 卡士乳业(深圳)有限公司 广东深圳 518105

<sup>5</sup> 卡士酸奶(苏州)有限公司 江苏苏州 215143

**摘要** 近年来,全球糖摄入过量问题加剧。针对消费者日益增长的减糖需求,深入了解甜味与食品基质中其它基本味觉成分(酸味、苦味、咸味)的相互作用及潜在机制,对于健康食品的开发尤为重要。本文总结了水溶液中甜味与其它基本味的基本文交互规律,全面回顾并探讨真实体系下的二元味觉混合物的应用研究,最后从化学、生理、神经 3 个层面探索二元味觉交互的潜在机制,为开发低糖、健康且滋味独特的食品与饮料配方提供科学依据与创新思路。

**关键词** 味觉相互作用;甜味;酸味;苦味;咸味

**文章编号** 1009-7848(2024)08-0012-19 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.08.002

人的味觉由酸、甜、苦、咸和鲜 5 种味觉属性组成。甜味被认为是这 5 种基本味觉中人类最需要的味觉感受<sup>[1-2]</sup>。然而,由于全球范围的糖摄入过量问题日益严重,食品和饮料行业正经历着食糖领域的重大变革,即减少添加糖并重新配制高糖食品和饮料<sup>[3-4]</sup>。因此,了解甜味与食品基质中其它味觉成分相互作用的潜在机制,将有助于指导甜味食品和饮料新配方的开发。本文旨在全面回顾甜味与其它基本味觉(酸、苦、咸)之间复杂而微妙的相互作用现象和机制研究,以及这些相互作用如何影响消费者对食品的主观偏好,并进一步探讨这些规律在食品开发和改良中的应用前景。

### 1 水溶液中甜味-基本味相互作用的基本规律

人对食物的感官感受通常是多种味觉的综合反应,不同的味觉反应主要是多种味觉通过协同和拮抗相互作用引起的,多元味觉间各异的相互作用是人感知和享受食物美味的重要基础<sup>[5-6]</sup>。Keast 等<sup>[7]</sup>基于味觉曲线的概念,总结了二元味觉

的相互作用效果,从甜味出发的二元味觉交互作用根据味觉强度被分为低、中、高 3 个阶段。如图 1 所示,在低强度/低浓度下,甜味化合物与其它基本味之间的二元味觉交互效果各不相同(有增强也有抑制);在中等和高强度/浓度下,甜味通常会削弱其它基本味的感受;在高浓度下,苦味与甜味或酸味与甜味之间的相互作用呈对称性抑制<sup>[7]</sup>。此外,溶液中二元味觉混合物并不完全遵循 Keast 等<sup>[7]</sup>总结的基本规律,而是会受到甜味剂与其它味觉物质种类等因素的影响。在真实食品体系下,这种简单的相互作用结果也会因体系中其它感官刺激及消费者喜好等复杂因素而呈现差异。因此,作者重新梳理并讨论了水溶液中甜味与其它味觉之间的相互作用结果,完善基本规律认知,并为真实体系下交互作用的探究提供参考。

#### 1.1 甜味与酸味的相互作用规律

大量研究调查了甜味与酸味之间的相互作用,得到的基本规律是甜味和酸味相互抑制。在超阈浓度下<sup>[8-10]</sup>,柠檬酸通常抑制蔗糖的甜味强度,反之蔗糖也会抑制柠檬酸的酸味。同时,酸甜相互作用还表现出浓度依赖性与非对称性,在柠檬酸/蔗糖混合物中,这两种成分会抑制彼此的味觉强度,且这些影响在浓度范围并不是对称的<sup>[11]</sup>。抑制甜味的程度主要取决于柠檬酸的浓度,并存在一种“最大程度的抑制”。而抑制酸味的程度既取决

收稿日期: 2024-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(32001628)

第一作者: 夏熠珣,女,博士,副研究员

通信作者: 钟芳 E-mail: fzhong@jiangnan.edu.cn

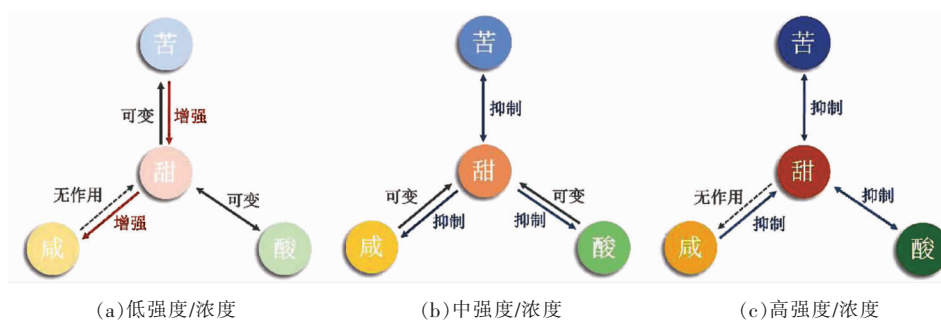


图 1 低强度/浓度下(a)、中强度/浓度下(b)、高强度/浓度下(c)甜味与其它基本味相互作用结果<sup>[7]</sup>

Fig.1 Schematic review of binary taste interactions between sweetness and other basic tastes at low intensities/concentrations (a), medium intensities/concentrations (b) and high intensities/concentrations(c)<sup>[7]</sup>

于蔗糖浓度,也取决于柠檬酸的浓度,且抑制程度与柠檬酸和蔗糖浓度成正比<sup>[11]</sup>。基于甜味与酸味共存时的协同和拮抗作用趋势,Mao等<sup>[12]</sup>根据感觉差强度曲线和Weber-Fechner定律,建立了蔗糖与柠檬酸混合物的酸甜味感觉强度变化模型(SSTVM)。该模型显示,蔗糖与柠檬酸混合时,其感官甜度和酸度并非简单的叠加,而是受到相互作用的复杂影响。这一模型不仅揭示了甜、酸交互作用中的协同与拮抗效应,还量化了这些效应随浓度变化的趋势,为食品研发和生产提供了科学依据。

进一步,为了获取单口或多口摄入过程中酸味和甜味的动态交互情况,研究者采用各种动态方法对酸甜味觉混合物进行分析。Wu等<sup>[13]</sup>使用时间主导属性测试法(Temporal dominance of sensation, TDS)和动态适合项勾选法(Temporal check-all-that-apply, TCATA)发现酸性条件下蔗糖与甜菊糖苷甜味曲线的差异,在刚入口时蔗糖的甜味引用频率明显高于甜菊糖苷,而在后期甜菊糖苷的甜味一直占主导地位。柠檬酸水平对甜度的影响在蔗糖和甜菊糖苷之间也有所不同,柠檬酸浓度变化不会影响甜菊糖苷的甜味感知,而高柠檬酸水平下蔗糖甜味受到的抑制作用更强。Junge等<sup>[14]</sup>使用TCATA方法对曲线下积分面积进行方差分析,发现D-阿洛酮糖和MFE(Monk果实提取物)的混合物具有比蔗糖更高的甜味强度,而添加柠檬酸会抑制起甜和演变过程中的甜味,从而获得与蔗糖相同的甜味曲线,这一发现表明甜味剂的适当组合可以再现蔗糖的甜度曲线。

甜味与酸味之间的相互作用是一个复杂的现象,受到多种因素的影响,包括使用的浓度水平、采用的评价方法以及具体的酸类型,因而有时会呈现出不同的规律。在阈下浓度下,酸味和甜味的相互作用是可变的,可能表现出增强或抑制的效应,这取决于具体的研究条件和方法<sup>[15-16]</sup>。针对不同酸类型的味觉研究表明:酸甜相互抑制作用具有一定的普遍性,水溶液中不同酸味剂对甜味的抑制效果较为相似<sup>[9]</sup>。不同类型的糖对酸味剂酸味的抑制作用效果不同,与蔗糖或果糖相比,在较低的感知甜度范围内,葡萄糖抑制酸味的效果较差<sup>[17]</sup>。

## 1.2 甜味与苦味的相互作用规律

整体上看,水溶液中的苦味与甜味之间呈现相互抑制的关系。在蔗糖和咖啡因的混合物中,甜味与苦味发生了相互抑制,当蔗糖水平增加时,苦味和咖啡风味品质的抑制增加;苦味化合物对甜味的强度和持久性具有显著的抑制效果<sup>[18-19]</sup>。Birch等<sup>[20]</sup>的研究也支持了甜味和苦味之间的相互抑制关系。研究中还发现甜味与苦味的相互抑制效应具有非对称性和浓度依赖性,即在相似的主观强度下,咖啡因的苦味或咖啡的风味被蔗糖抑制,而甜味并不受咖啡因或咖啡的影响<sup>[9]</sup>。抑制效应与添加剂的浓度呈对数关系<sup>[20]</sup>。这些研究明确了甜味和苦味之间得到相互作用,可能有助于食品开发中对风味的调控。

部分甜味剂在一定浓度下也会同时呈现甜味和苦味,这使得甜味剂的应用受到很大限制<sup>[21]</sup>。研究者通过差别检验、静态描述性分析及动态评价

等多种感官方法获取甜味剂的甜、苦味相互作用规律,以期改善甜味剂的不良副味。有研究比较了6种常见的甜菊糖苷甜苦味的时间-强度(TI)表现差异,结果表明,这6种甜菊糖苷在甜味和苦味的起始时间、峰值时间和衰减速度上均存在显著差异。特别是甜菊糖苷M和甜菊糖苷D的甜味起始更快,甜味衰减更快,且几乎无苦味;而甜茶苷和甜菊苷则具有显著的苦味和持久的后苦味<sup>[22]</sup>。Pierce-Feldmeyer等<sup>[23]</sup>通过时间-强度评价确定了添加特定味觉调节剂(TMCs)能够显著降低甜菊糖苷在饮料中的苦味感知。一项基于消费者的差别检验结果显示,新型糖基化甜菊糖苷gReb-A和赤藓糖醇的混合物在感官上与水溶液中蔗糖的甜味感知接近,而与麦芽糖醇混合可显著提高gReb-A的甜味并抑制苦味<sup>[24]</sup>。除了与一些填充型甜味剂复配外,还可通过微胶囊化处理<sup>[25]</sup>、酶促作用改性<sup>[26-28]</sup>等方法改良甜菊糖苷单体,使其具备优良的甜感。

### 1.3 甜味与咸味的相互作用规律

咸味与甜味之间的相互作用主要表现为咸味对甜味的抑制,而甜味对咸味无显著影响。Beebe-Center等<sup>[29]</sup>发现蔗糖和氯化钠的混合溶液中的相互掩蔽(Masking)效应,并且氯化钠(NaCl)对蔗糖甜味的掩蔽效应尤为显著。Kamen等<sup>[8]</sup>也发现低浓度(如0.02 mol/L)的NaCl能够普遍抑制不同浓度蔗糖的甜度,而蔗糖对NaCl的咸味强度无显著影响。咸味对甜味的抑制作用具有浓度依赖性,这种掩蔽效应的强度与两种溶质的浓度紧密相关,并且可以通过数学模型进行描述<sup>[29]</sup>。Kamen等<sup>[8]</sup>在低浓度NaCl与蔗糖混合物中观察到的甜味抑制作用效果,并不随着NaCl浓度的增加而线性增强,而会在中等咸味强度的混合溶液中失效,当NaCl浓度过高时(单独或同时与蔗糖浓度高于0.25 mol/L时),对甜度的抑制作用才再次显现,这一发现得到Kroeze<sup>[30]</sup>所做试验的验证。

在某些特定体系中,咸味可能会增强甜味的感知。有研究在蔗糖浓度较低而氯化钠浓度也较低的混合溶液中观察到蔗糖甜味的轻微增强,然而,这种增强效应非常有限,且随着溶质浓度的增加,掩蔽效应成为主导<sup>[29]</sup>。在含有甜味剂、NaCl和增稠剂的体系中也观察到适量的NaCl能够增强

食品的甜味感知<sup>[31]</sup>。

## 2 真实食品体系中甜味-基本味相互作用

基础研究涉及的水溶液与真实体系的主要区别之一是产品的复杂性,其它感官维度的刺激会影响甜味与其它味觉之间的交互作用。Junge等<sup>[32]</sup>比较水溶液体系与真实食品体系(冷萃咖啡),发现在两种基质中蔗糖的甜味虽均受到柠檬酸和酒石酸的抑制,但冷萃咖啡基质中酸味对甜味的抑制效果较弱。在真实食品体系中,甜味与其它味觉交互在复杂基质中的刺激特征及其对产品整体品质的影响更为重要。

### 2.1 甜味-酸味

对真实食品体系中酸味与甜味感受的交互作用研究几乎囊括了日常消费的所有种类,包括饮料、果酒、水果、发酵乳品等(表1)。研究<sup>[33-35]</sup>发现食品基质中酸味和甜味的交互作用基本遵循水溶液中二者相互抑制的规律,而不同体系下的抑制效果表现出一定差异。在葡萄酒基质中,酒石酸对甜味的抑制高于水溶液中的效果,而蔗糖对酸味的抑制效果低于水溶液<sup>[33]</sup>。此外,1项对香槟酒的研究表明,蔗糖对酒石酸的抑制效应受到嗅觉感知的影响,而酒石酸对甜味的抑制效应相对较弱且不受嗅觉阻断的影响<sup>[34]</sup>。另外,与基础研究的简单混合物体系不同,真实食品通常含有多种糖类与有机酸,其种类与比例将显著影响酸甜味觉的感知。例如,草莓汁中蔗糖占总糖比例的增加能显著提高整体甜味,而增加苹果酸占总有机酸的比例则会显著增强酸味的感知<sup>[35]</sup>。

除了掌握味觉交互的基本规律外,了解消费者对食品的认知对于产品开发、配方优化和质量控制是必不可少的<sup>[36]</sup>。通过消费者研究洞察不同食品基质中的喜好驱动因素,同时探究体系中的酸甜味觉特征,建立以消费者为导向的酸甜评价体系,是目前酸甜食品研究的主要思路。消费者的酸甜偏好及对酸甜平衡的需求,常被用于指导不同品类水果的采摘与育种<sup>[37-42]</sup>。例如,柑橘的成熟度显著影响甜味和酸味的平衡度。为了获得最佳的食用品质,Hijaz等<sup>[38]</sup>根据SSC/TA(可溶性固形物含量与可滴定酸度的比值)来确定不同柑橘品种的最优收获期。Zhang等<sup>[42]</sup>发现不同地区的气候

表1 真实食品体系中甜味与酸味相互作用的应用研究

体系	研究方法	主要发现	参考文献
水溶液、冷萃咖啡	消费者-强度打分	在两种基质中蔗糖的甜味均受到两种酸味的抑制,而冷萃咖啡基质中酸味对甜味的抑制效果较弱	[32]
柑橘	评价员-定量描述性分析	柑橘的味道主要由总糖(SSC)和酸(TA)的水平及其比例(SSC/TA)决定。为了防止柑橘在太酸时收获,建议当水果的SSC水平低于9 °Brix且SSC/TA比率低于7.0时,不应收获水果	[46]
柑橘	消费者-CATA、喜好度测试	“甜”和“酸”的属性是消费者在选择理想柑橘时考虑的重要因素	[37]
柑橘	SSC/TA	柑橘的成熟度显著影响其风味,特别是甜味和酸味的平衡。为了获得最佳的食用品质,建议根据SSC/TA比率来确定每种柑橘品种的最优收获期	[38]
芒果	评价员-描述性分析	随着芒果成熟度的增加(即从高到低的果肉硬度),3个品种的芒果都表现出甜味的增加和酸味的减少。适当的成熟度可以提高消费者对芒果甜味和酸味平衡的满意度	[39]
覆盆子	评价员-定量描述性分析	人们对冷冻覆盆子的喜爱是由高覆盆子风味、硬度和甜度驱动的。相反,不喜欢冷冻覆盆子与酸味和回味强度高有关	[40]
蓝莓	消费者-喜好度测试	甜味和酸味的感知强度对蓝莓的消费者接受度和支付意愿具有重要影响	[41]
石榴汁	消费者-喜好度测试、强度打分	及其比例能够显著提升蓝莓的风味,从而增强消费者的购买意愿	[47]
草莓	电子舌	通过电子舌和感官评价小组结果显示‘116’品种的石榴汁具有最高的酸度,其TSS/TA值显著较低,这可能影响其整体甜味的感知	[48]
草莓酱	评价员-量值估计	草莓果酱中的有机酸含量显著增加了果酱的酸味,并影响甜味的感知。此外,消费者对果酱的偏好表现出明显个体差异,整体倾向于适中酸度的果酱	[48]
草莓汁	评价员-强度打分、喜好度测试	增加明显蔗糖占总糖的比例会显著提升感知的甜度,而增加苹果酸占总有机酸的比例则会显著增强感知的酸度。在评估草莓的风味时,不仅需要关注总可溶性固形物和可滴定酸度,还需考虑糖类和有机酸的具体组成比例	[35]
苹果汁	消费者-成对比较	苹果汁中的酸味和甜味是影响消费者喜好的关键属性。具有甜/酸平衡的苹果汁最受欢迎。消费者评估表明,甜/酸苹果汁的喜好程度高于强烈酸味和弱甜味的苹果汁	[43]
果汁	评价员-品评平铺法、超自选特性	aronia果汁因其高含量的多酚而具有显著的健康益处处,然而,其强烈的酸味和涩味限制了消费者的接受度	[49]
果汁	消费者-喜好度测试、适宜性评价	电子舌能够有效模拟并预测人类感官评价中的甜味和酸味属性,特别是在经过改性的苹果汁样品中表现出更高的预测准确性	[50]
苹果汁	评价员-量值估计	对于苹果酱,老年人对甜味和酸味的辨别能力与年轻成年人相当,且未发现显著的味道遮蔽效应	[51]
苹果酱	评价员-定量描述性分析	在葡萄酒基质中酒石酸对甜味的抑制作用高于水溶液,而在葡萄酒基质中蔗糖对酸味的抑制作用低于水溶液	[33]
水溶液、葡萄酒	消费者-成对比较检验(2-AFC)	不同类型的糖和残糖显著影响起泡酒中蔗糖/香草/蜂蜜风味、甜味和酸味的感知,其中半干型酒样相较于无糖添加的酒样展现出更低的绿色风味、酵母风味和酸味。此外,消费者对起泡酒的接受度受到糖类型和残糖量的影响,尤其是对酒的“清爽”特性的感知	[52]

(续表 1)

体系	研究方法	主要发现	参考文献
香粽	评价员-量值估计	在关闭鼻孔防止嗅觉感知的情况下,蔗糖对酒石酸酸度的抑制效应更为显著,表明嗅觉可能在一定程度上影响味觉感知。相比之下,酒石酸对蔗糖甜度的抑制效应非常低,无论是否阻断嗅觉,蔗糖的甜度主要由其浓度决定,几乎不受酒石酸影响	[34]
无酒精啤酒	评价员-定量描述性分析	通过共发酵可以调节无醇啤酒中的甜味和酸味,进而影响消费者的风味偏好。通过适当控制发酵过程,可以生产出具有更平衡的甜味和酸味,且具有更高消费者接受度的无醇啤酒	[53]
酸奶	消费者-TCATA、喜好度测试	随着草莓泥浓度的增加,低浓度蔗糖的甜味和果味降低,而低浓度木糖醇和甜菊糖的口腔涂覆感降低,果味增强。此外,随着连续摄入,所有类型的甜味剂的甜味、酸味、奶油感和果味均显著下降	[54]
酸奶	评价员-定量描述性分析 消费者-喜好度测试	消费者更喜欢质地坚实、致密的希腊酸奶,适度的甜味、乳脂和乳制品酸味以及适度的酸味	[55]
酸奶	消费者-CATA、喜好度测试	酸奶与环境的交互作用在外观、味道/风味、甜度、口感、回味和整体喜欢度方面具有统计学意义。惩罚分析显示,消费者不喜欢酸奶可能是因为酸味“太多”,甜度“太少”,口感“太稀”	[56]
酸奶	消费者-CATA、喜好度测试	在酸奶饮品中减少糖含量会显著影响甜味和酸味的感知,进而影响消费者的喜好度。通过添加替代甜味剂(如甜叶菊)和增稠剂(如果胶),可以在一定程度上弥补甜味的减少,同时调整产品的口感和香气,提高消费者的接受度	[57]
酸奶	消费者-适宜度标度(Just-about-right, JAR)、喜好度测试	不同种类和浓度的甜味剂对酸奶酸味的掩盖效果存在显著差异。具体来说,高浓度的甜味剂能更有效掩盖酸奶的酸味,而低浓度的甜味剂对酸味的掩盖效果较弱。蔗糖增甜的酸奶在甜味和酸味之间达到较好的平衡,使消费者既不过于喜欢也不至于厌恶	[45]
酸奶	评价员-TDS、喜好度测试	不同类型的天然甜味剂在与酸奶结合时,不仅提供了甜味,还通过其特有的感官属性(如涩味、苦味)与酸奶的酸味产生相互作用,进而影响消费者的感官体验和整体喜好度。木糖醇在维持酸奶原有酸味和提供相似甜味方面表现最佳,而甜菊糖和罗汉果提取物则因其额外的苦味和涩味特性对酸奶的感官特性产生更为复杂的影响	[58]
复合食品(酸奶燕麦)	消费者-TDS、A-TDL	复合食品(如酸奶加燕麦片)多品尝条件下感官和愉悦感的动态变化。在开始阶段,主要感知到的是酸奶的特性,如奶油感和酸味,而在品尝的后半部分,注意力转移到燕麦片的特性上,如甜味、小麦味和黏性。奶油感、脆性和甜味被认为是正面的喜好驱动因素,随着这些特性的主导,喜好度增加。相反,酸味和黏性是负面的喜好驱动因素,当这些特性占主导时,喜好度降低	[59]
面包	评价员-2-AFC、D-QDA、TDS	苹果酸在增强强酸味和咸味感知方面比琥珀酸更强,而在抑制甜味感知方面比琥珀酸弱。这表明不同的有机酸在面包中的味觉表现及其与其它味觉的交互作用存在差异	[60]
苹果、奶酪、柠檬水、酸奶、泡菜	消费者-喜好度测试	奇迹果在提升某些酸味食品的甜味感知方面具有潜力	[61]
水溶液-甜味剂	消费者-TCATA	柠檬酸在时间范围内对蔗糖和D-阿洛酮糖的甜味抑制作用比D-阿洛酮糖与罗汉果提取物混合物的抑制作用更强。不同甜味剂系统对酸味浓度的感知没有显著影响	[62]

条件对蓝莓中糖和有机酸的积累有显著影响,这也使得蓝莓的甜酸比例和整体风味差异较大,通过栽培方式或育种手段调节蓝莓中的糖和有机酸含量,能有效改良蓝莓的整体风味品质。除了以SSC/TA或糖酸比作为评估水果酸甜平衡的指标外,研究人员也常通过专业感官评价小组或消费者感官测试,确定产品优化方向。Stolzenbach等<sup>[43]</sup>将评价员进行的品评平铺法(Napping)和超自选特性排序剖面法(Ultra flash profiling)评价结果与消费者喜好度、适宜性评价结果结合,明确了具有甜/酸平衡的苹果汁最受欢迎并优选出最受欢迎的品种(具有酸甜特征Elstar和IM),而具有强烈酸味的Blend和弱甜味的Mainstream并不受消费者喜爱。

随着减糖需求的不断提高,代糖的甜味与食品中的酸味相互作用也尤为重要。研究显示,在酸性体系中,甜味剂的动态甜味表现与蔗糖显示出较大差异<sup>[44]</sup>。例如,在酸奶中不同甜味剂的甜味强度和持久性会显著影响消费者对酸奶酸味的感知。用来替代蔗糖提供甜味的高倍甜味剂在低浓度下对酸味的掩盖效果较弱,而在高浓度时又可能带来不愉快的苦味或甘草味,或带来不愉快的甜味体验。甜味剂的浓度不仅影响消费者对酸奶甜味的感知,还影响人们对酸味的感知和总体接受度<sup>[45]</sup>。如何平衡这些甜味剂与酸味剂之间的融合及其整体特征对食品开发尤为重要。

## 2.2 甜味-苦味

在漫长进化过程中形成的防御机制使得人类天生就不喜欢苦味,甚至排斥大多数苦味食物。通过添加甜味剂来抑制苦味是一种常用的苦味掩蔽手段<sup>[63]</sup>。同时,食品中的甜味感受也会受到苦味的抑制,然而,这种相互抑制作用效果显示出较大的体系差异。研究发现,面包模型中的苦味掩蔽效果普遍弱于水溶液体系<sup>[64]</sup>。在脱因浓缩咖啡和传统浓缩咖啡中,不同甜味剂受苦味抑制的程度不同,蔗糖和三氯蔗糖在脱因咖啡中的甜味更弱,而甜菊糖苷的甜度在两种咖啡中相似<sup>[65]</sup>。此外,基质中的其它味觉物质也会参与控制甜苦味的释放。例如,黑巧克力脂肪含量的增加能够显著增强甜味

感知,同时降低苦味感知<sup>[66]</sup>。巧克力奶中添加的蔗糖、香兰素和可可粉混合物表现出甜味协同和苦味拮抗作用,在适度减少蔗糖的基础上添加香兰素能够保持甜味同时抑制苦味<sup>[67]</sup>。

甜味剂的苦味掩蔽效应常用来改善药物的适口性,以消除药物苦味对治疗依从性的影响<sup>[68-73]</sup>。考虑到消费者对于咖啡、啤酒、葡萄酒和黑巧克力等典型的苦味食品存在着偏好差异<sup>[74]</sup>,各种甜味物质常用于调整这类产品的甜、苦味平衡,以满足不同消费者的口味需求。Spinelli等<sup>[75]</sup>通过向巧克力布丁中添加不同浓度的蔗糖,探索甜味、苦味和涩感与产品喜好之间的关系,最终将消费者分为3个群体:高甜喜好者、中等甜喜好者和倒U型喜好者。倒U型喜好者对甜味的喜好则呈现先增后减的趋势,并且倒U型喜好者表现出更健康的饮食行为和偏好,更喜欢未添加糖的酚类蔬菜和饮料。已有研究通过PROP(6-*n*-丙基硫脲)测试对消费者的苦味敏感度进行分类,PROP是基于个体对其苦味的感知程度对人群进行味觉敏感度的细分(通常分为非品尝者、中等品尝者和超味觉者),被广泛用作研究饮食偏好及食物接受度的工具<sup>[75-76]</sup>。研究表明,PROP味觉敏感度可能与蔬菜消费量及整体饮食偏好有关,超味觉者通常表现出较低的蔬菜接受度<sup>[76]</sup>。针对儿童或成年人因厌恶苦味而蔬菜摄入不足的现象,多项研究对蔬菜进行甜味剂(包括蔗糖和非营养性甜味剂)的苦味抑制研究。结果显示,甜味剂可以通过混合抑制机制有效降低蔬菜苦味,提高消费者接受度,并且这种苦味抑制效果不受苦味感受基因的影响<sup>[76-79]</sup>。在甜苦味食品的感官评估中,采用动态感官方法能够更好地了解食物消费过程中所真实经历的感官变化<sup>[21]</sup>。Olegario等<sup>[80]</sup>通过多口TDS试验观察巧克力牛奶和牛奶咖啡中甜味和苦味的动态感知过程,发现甜味在多数情况下占据主导地位,尤其是在含糖较高的样品中。Morais等<sup>[81]</sup>发现三氯蔗糖和阿斯巴甜以及添加益生元(菊粉、低聚果糖)的巧克力甜点呈现的时间-强度曲线更接近蔗糖样品。值得注意的是,纽甜显著提高了巧克力甜点中甜味的感知,同时也可能增强苦味的感知<sup>[81]</sup>。

表2 真实食品体系中甜味与苦味相互作用的应用研究

体系	研究方法	主要发现	参考文献
水溶液、蔬菜汁	评价员-定量描述性分析	蔗糖在水溶液和白菜汁模型系统中均能有效掩蔽黑芥子苷和甲状腺肿素的苦味。这种掩蔽效果取决于蔗糖的浓度和测试介质的复杂性	[82]
水溶液、面包	评价员-定量描述性分析	在水溶液中,木糖醇和蔗糖对酶处理的大豆蛋白的苦味掩蔽效果最显著,优于麦芽糊精,而 $\alpha$ -环糊精则无显著效果。在面包模型中,苦味掩蔽效果普遍不如水模型明显,而麦芽糊精显著降低了苦味并提升了新鲜度	[64]
蔬菜	消费者-喜好度测试、味觉强度gLMS	不论蔬菜种类和个体苦味感知差异如何,甜味剂均显著降低了蔬菜的苦味感知,且非营养性甜味剂效果与蔗糖相当	[77]
蔬菜	消费者-强度、喜好度gLMS	阿斯巴甜在所有测试的蔬菜中均表现出最强的苦味抑制效果和感官愉悦度提升,特别是在中品尝者和超品尝者中	[76]
蔬菜	评价员-定量描述性分析	烹饪方法显著影响芜菁的整体喜好和口味喜好,甜味特征较明显的烹饪方式提高了芜菁的喜好度;同时,TAS2R38基因型显著影响对苦味的感知,而对芜菁的口味喜好没有显著影响	[78]
蔬菜	评价员-喜好度测试、强度gLMS	添加微量糖或盐能显著降低3种绿色蔬菜纯品(西兰花、菠菜和羽衣甘蓝)的苦味强度,并提高了甜味和咸味的感知,同时没有改变其它感官属性(如质地或香气)	[79]
巧克力	消费者-强度打分、喜好度测试	在70%可可含量的黑暗巧克力中,脂肪含量的增加显著增强了甜味的感知,同时降低了苦味的感知。这种甜味和苦味的相互作用可能对消费者的接受度和喜好产生重要影响	[66]
巧克力、牛奶咖啡	半培训评价员-多口TDS、喜好度测试	糖分的添加可以显著抑制苦味的感知,而无糖或低糖配方增强了苦味的显著性。具有较高可可含量的巧克力虽然苦味较强,但是整体喜好度仍然较高。这表明消费者可能偏好于具有更复杂、更强烈味觉体验的巧克力产品	[80]
巧克力布丁	消费者-味觉强度gLMS	通过聚类分析研究不同人群对甜味和苦味的喜好模式,发现3个主要群体在甜味和苦味感知上的差异。这3个群体在甜味感知上差异不大,而在苦味和湿味的感知上存在显著差异,特别是当蔗糖浓度较低时。此外,研究发现1个“倒U型”群体对富含酚类食物的喜好和消费最高,这可能与人们较强的苦味抑制能力有关	[75]
巧克力牛奶	消费者-强度打分、喜好度测试	蔗糖-香兰素和蔗糖-可可粉混合物对巧克力奶的甜味和苦味有显著协同和拮抗作用,特别指出适度减少蔗糖而添加香兰素能够保持巧克力奶的甜味的同时抑制苦味,从而提高消费者对低糖巧克力奶的接受度	[67]
巧克力牛奶	自适应选择型联合分析、层次贝叶斯分析	成年人在巧克力奶选择中对甜味剂类型、脂肪含量和添加糖量存在偏好,并发现3类不同的消费者细分:卡路意识型、平均消费者和自然食品爱好者。特别是,减少糖分会增加苦味的感知,而这种增加并未显著降低部分消费者的喜好度,表明对苦味巧克力奶有潜在兴趣的消费者群体	[83]
巧克力布丁	消费者-喜好LAM+强度gLMS	蔗糖浓度的增加显著提升了参与者对巧克力布丁的喜好度,并且甜味浓度的变化对感知的甜度和苦味有显著影响,其中甜味增加时苦味感知减少,喜好度增加	[84]

(续表2)

体系	研究方法	主要发现	参考文献
巧克力乳制品甜点	评价员-TI、TDS	在巧克力乳制品甜点中,使用不同高强度甜味剂会显著影响甜味和苦味的感知强度。甜味显著提高	[81]
咖啡	消费者-喜好度测试、JAR	了甜味的感知,同时可能增强苦味的感知 脱咖啡因咖啡中蔗糖的等效浓度和甜度低于传统咖啡,甜叶菊的甜度在两种咖啡中相似,而蔗糖素在浓缩咖啡中的甜度最强。此外,消费者对于甜度和咖啡风味的感知对样品的接受度有显著影响	[65]
葡萄酒	消费者-喜好度测试	当按照葡萄酒主要感官特性(干型、甜型、碳酸化和热感)进行分组时,PROP高响应者对各类葡萄酒的喜好评分普遍高于PROP低响应者,表明苦味感知的个体差异显著影响消费者对甜味葡萄酒(如甜白葡萄酒、甜起泡酒、餐后酒等)的喜好	[85]
利口酒	评价员-定量描述性分析	添加细香啤酒花(Saaz)的利口酒在甜味和苦味平衡上更受消费者喜爱,尤其是增加了“芳香草本植物”风味的感知,并减少了甜味过量的感觉	[86]
奶酪-啤酒搭配	评价员-喜好度测试+JAR 评价员-定量描述性分析 消费者-喜好度测试	通过聚类分析将消费者分为不同群体,如“奶酪和啤酒搭配爱好者”(Cheese and beer pairing lovers)、“不太热情的消费者”(LECs)和“极度不喜欢的消费者”(DCBPs)。这些群体的差异体现在他们对不同感官特性的喜好上,如DCBPs群体普遍不喜欢带有苦味、焦糖味和烘烤味的搭配,而更偏好甜酒和果味酒	[87]
高粱麸饮料	消费者-喜好度测试、JAR	通过让消费者品尝含糖(SB)和无糖(UB)酸化冷萃高粱麸皮饮料,并评估其感官属性,发现甜味明显降低了饮料的苦味感知,尽管仍有21%的消费者认为SB“太苦”	[88]
果冻-甜味剂	消费者-喜好度测试、JAR 评价员-强度打分	在食品中高浓度的甜叶菊(Stevia)会带来苦后味,而其与多元醇(如麦芽糖醇)具有协同作用,能显著减少所需甜叶菊的量,从而改善甜苦味比	[89]
饮料	消费者(盲测/知情)-喜好度测试+JAR	当消费者在知情条件下(即提供产品信息后)评估样品时,认为甜苦味“恰到好处”的消费者比例增加,这表明信息的提供有助于调整消费者对甜苦味的感知	[90]
蛋白水解产物	评价员-TDS	随着甜味剂(蔗糖素)的增加,蛋白水解产物苦味显著被抑制,而“奶酪味”属性增强。对于改进蛋白水解物的口感和提升消费者接受度具有重要意义	[91]
饼干	评价员-定量描述性分析	高强度甜味剂在完全替代蔗糖时显著降低了饼干的甜味,并在某些情况下增加了苦味感知,而提供“功能性甜味剂”的健康信息在一定程度上提高了消费者对替代甜味剂饼干的喜好度	[92]
凝胶体系	消费者-喜好度测试 消费者-2-AFC	将苦味物质和甜味掩蔽剂分离到不同部分对苦味抑制无影响,而将它们在同一部分内不均匀分布则会降低苦味抑制效果。此外,不均匀分布的甜味剂虽然增强了甜味感知,但是未增强对苦味的抑制能力	[93]
水溶液	味觉传感器 评价员-量值估计	当向奎宁盐酸盐溶液中添加高倍甜味剂时,苦味感官评分显著降低,证实高倍甜味剂在苦味掩蔽中的有效性	[94]
甜味剂	评价员-TCATA	阿斯巴甜-K、甜叶菊、罗汉果、异麦芽糖醇、赤藓糖醇、山梨糖醇、阿斯巴甜和三氯蔗糖在动态味觉感受中均表现出不良的苦味、金属味和化学味等副味	[21]
甜味剂	评价员-TI	添加特定味道调制化合物(TMCs)可以显著降低甜菊糖苷在饮料中的苦味感知	[23]



(续表2)

体系	研究方法	主要发现	参考文献
甜味剂	评价员-II	6种常见的甜菊糖苷在甜味和苦味的起始时间、峰值时间和衰减速度上均存在显著差异	[22]
甜味剂	消费者-差别检验	糖基化甜菊糖苷以及与赤藓糖醇和麦芽糖醇的混合在水溶液和柠檬水中具有更像蔗糖的甜味	[24]
甜味剂	评价员-量值估计	与未改性的 Reb A 相比, g-reb A 苦味、涩味减少, 甜味开始改善。测定 g-reb A 的相对甜度为 155, 低于 Reb A, 而与蔗糖相比仍较高。此外, 将 g-reb A 与阿洛酮糖和麦芽糖醇以 1:1 的比例混合, 进一步改善了感官特征	[95]
药物	消费者-焦点小组访谈	通过比较 HIV 暴露未感染婴儿在接受含有 AZT/3TC 分散片的三联药物预防, 与仅接受拉米夫定糖浆单一药物预防的依从性差异, 发现后者因其甜味和易用性而显著提高了患者的接受度和依从性	[73]
药物	味觉传感器	利用大鼠进行两瓶选择法, 评估三氯蔗糖作为甜味剂对磷酸甲哌啶/甲氧苄啶 (SMX / TMP) 苦味的掩盖效果, 发现三氯蔗糖与 TMP 的最佳质量比为 0.13, 显著提高了大鼠对 SMX/TMP 溶液的偏好	[72]
药物	消费者-喜好度测试	奇逆果蛋白能够显著改善受试者对苦味液体(柠檬汁和苹果醋)的接受度, 并部分改善对代谢配方的味觉感知	[69]
药物	消费者-强度打分	甜味和酸味均能显著降低 BCAA 溶液的苦味强度, 甜味剂蔗糖 (tau 3) 和酸味剂酒石酸 (tau 4) 在剂量依赖性方式下显著减少了 BCAA 的苦味	[70]
药物	消费者-强度 VAS	单独使用物理遮蔽法能有效减少苦味, 而增加甜味效果不显著; 单独使用感官遮蔽法则能显著增强甜味并减少苦味; 而将两种方法结合使用时, 苦味和甜味的改善效果最佳, 总口感评分接近安慰剂组	[71]

### 2.3 甜味-咸味

甜味与咸味的相互作用规律在食品配方设计中至关重要。水溶液中两者的相互作用主要表现为咸味对甜味的抑制, 而在食品体系的咸、甜味研究中, 甜味对咸味的抑制却得到更广泛的应用。Kwak 等<sup>[103]</sup>通过重新配制乌冬面, 发现增加甜度和降低咸度不会对消费者的长期接受度产生负面影响, 这为减盐食品的开发提供了新的视角。Lima 等<sup>[104]</sup>的研究揭示了乳液体体系中乳糖/葡萄糖浆等成分对咸味感知的抑制作用, 这表明通过特定的味觉-味觉相互作用可以抑制咸味的感知, 为减盐不减咸的食品配方提供了潜在策略。

全球范围内非传染性疾病 (NCDs) 的患病率不断上升, 其中心血管疾病、肥胖和糖尿病等几乎占全球死亡原因的 70%。减少盐和糖的摄入量已被世界卫生组织 (WHO) 确定为预防 NCDs 的五大优先干预措施之一<sup>[106]</sup>。目前对于甜味和咸味感知的研究大多聚焦于减盐、减糖的应用

方面, 探究甜味与咸味相互作用的规律也将有助于健康策略的开发。甜味与咸味的相互作用对食品感官特性和消费者的健康饮食习惯具有显著影响。据报道, 肥胖会导致感知系统和感官偏好的改变, 肥胖症患者的味觉不敏感, 可能需要更强的味觉刺激来满足他们的奖赏机制, 因而肥胖人群更愿意摄入富含糖、盐和脂肪的能量密集型食物<sup>[97-100]</sup>。采取以味觉为导向的饮食模式, 或许能够改善味觉系统的功能, 进一步有助于改变味觉偏好, 养成更健康的饮食习惯。Bolhuis 等<sup>[101]</sup>的研究表明, 在禁食状态下, 咸味和甜味的识别阈值会发生变化, 咸味强度感知显著增加, 而甜味强度感知显著下降。Cattaneo 等<sup>[102]</sup>对严重肥胖患者进行地中海饮食干预, 研究发现该饮食显著提高了咸味的识别阈值, 而甜味阈值则没有变化, 这为通过饮食模式改善味觉偏好提供了科学依据。

### 3 味觉相互作用的机制探究

水溶液中的基础味觉研究证明,基本味会通过增强或抑制其它味道的强度而相互作用。在真实食品和饮料等复杂基质中的研究也验证了这些味觉的相互作用。然而,人类味觉相互作用的基本机制尚不明确。研究<sup>[7,105-107]</sup>普遍认为,在研究味觉混合物的味觉效应时,必须考虑 3 个层面的相互作用:1) 溶液中发生的化学作用可能会直接影响味觉感知(化学相互作用);2) 混合物中的一种成分与另一种成分的味觉受体/转导机制之间的次级相互作用(外周生理机制);3) 同时感受不同味觉所产生的认知效应(中枢神经层面)。

#### 3.1 化学相互作用

呈味物质的化学相互作用是通过改变物质结构或包封等形式来改变呈味物质对味觉受体的亲和力或适配性<sup>[7]</sup>。氢键或疏水键等弱吸引力会导致结构改变,如 Ke 等<sup>[108]</sup>提到  $\gamma$ -环糊精的分子结构中存在一个疏水腔,可与苦味代谢物的疏水基团结合,从而减少苦味分子在真实溶液中的分布,降低其与苦味受体的接触,实现苦味的掩盖。

可可和巧克力中的苦味被认为主要是由甲基黄嘌呤(如可可碱和咖啡因)和相对低分子量的黄酮类化合物类的各种化合物产生<sup>[109]</sup>。已知的苦味掩盖分子是黄酮酮,而大多数甜味剂的黄酮类化合物属于黄烷醇或二氢查尔酮,这似乎从化学结构角度解释了甜味能够掩盖苦味的原因<sup>[110]</sup>。结构活性关系 SAR 可以帮助解释为什么结构相似的化合物能够引起相似的味觉感受,这些化合物可能与特定的味觉受体有特定的亲和力<sup>[110]</sup>。分子对接技术可以模拟味觉分子与味觉受体的结合过程,预测分子间的相互作用和结合能。通过构建包含结合能在内的多参数模型,研究者能够更准确地预测甜味强度及其味觉调节功能<sup>[111]</sup>。

#### 3.2 外周生理机制

外周味觉传导系统涉及呈味物质和味觉感受器之间的相互作用或味觉感受器细胞之间的信号传递(图 3)<sup>[7]</sup>。甜味、苦味与特异性的 G 蛋白偶联受体(G-protein-coupled receptors, GPCRs)结合产生味觉信号。在 GPCRs 家族中,T1R2/T1R3 以异二聚体形式共表达参与甜味识别<sup>[112]</sup>。苦味的感知是人类长期进化的一种防御机制,并逐渐产生

了 hT2Rs 类苦味受体家族,目前已在人体中鉴定出 25 种苦味受体<sup>[113]</sup>。酸味和咸味则通过人体中的另一类膜蛋白——离子通道受体完成味觉感知。动物对低浓度食盐的作用与上皮  $\text{Na}^+$  通道(ENaCs)相联系<sup>[114]</sup>。对高盐感知受体及机制尚待研究<sup>[115]</sup>。哺乳动物对酸味的感受实际上借助质子选择性离子通道的顶部进入所发出的信号。弱酸也可能通过穿入细胞膜使胞浆酸化,从而导致钾离子通道关闭,产生膜的去极化作用,激活酸味传感细胞<sup>[116]</sup>。

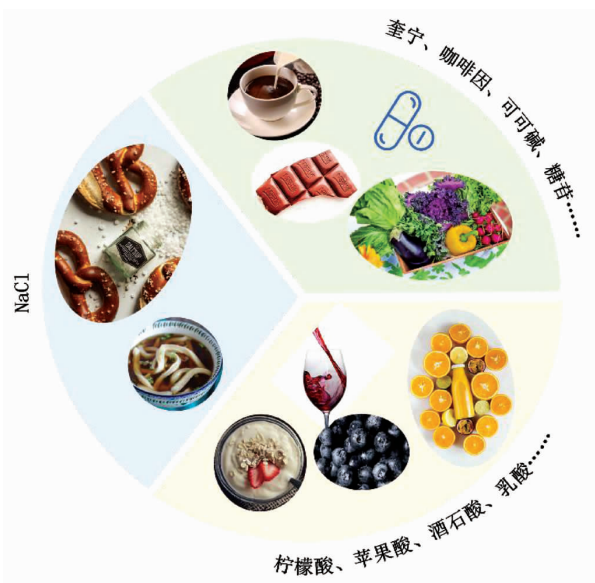


图 2 各食品基质中的味觉成分

Fig.2 Taster components in various food matrices

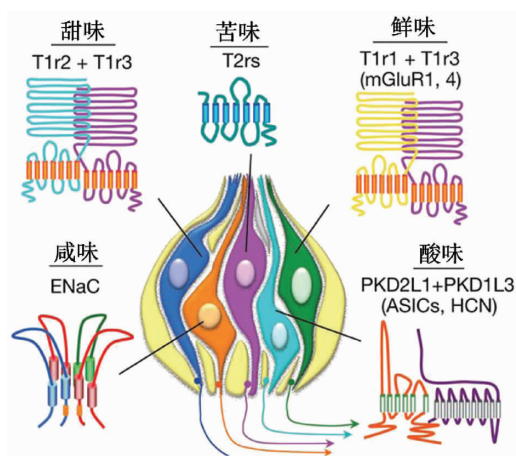


图 3 由单一类型的味觉感受细胞和味觉神经元编码的 5 种基本味觉<sup>[117]</sup>

Fig.3 Five basic tastes encoded by taste receptor cells and taste neurons of a single type<sup>[117]</sup>

当两种化合物混合时,一种化合物有可能干扰与另一种化合物相关的味觉感受器细胞或味觉传导机制<sup>[7]</sup>。咸味和酸味可能通过与甜味感受器细胞上的G蛋白偶联受体(GPCRs)相互作用,进而调节ATP的释放和信号传导,从而影响甜味的感知<sup>[118-119]</sup>。咸味、酸味与甜味间的相互作用研究相比甜苦味的交互作用较少,其生理学机制尚待补充,这可能是由于咸、酸味觉的感知路径与甜味不同,苦味与甜味可能通过控制TAS2R和TRPM5等味觉受体的信号转导而产生相互抑制作用。糖精能激活特定苦味受体(TAS2R8、TAS2R31、TAS2R43),而其苦味可通过添加甜蜜素来减弱或阻断,这项研究不仅揭示了甜味剂甜苦味感受的生理机制,也为利用微流控技术模拟味觉感知提供了新视角<sup>[120]</sup>。苦味化合物对TRPM5的抑制构成了味觉相互作用新机制的分子基础,苦味可直接抑制甜味转导途径。Nakbi等<sup>[121]</sup>通过统计物理模型,解析了咖啡因-蔗糖混合物在味觉受体位点的相互作用,其发现蔗糖与咖啡因分子在受体上呈现不同的结合方式,从而影响味觉反应的剂量效应曲线。Talavera等<sup>[122]</sup>的研究直接揭示了奎宁等苦味化合物通过抑制TRPM5阳离子通道,直接干扰甜味转导的新机制,表明苦味不仅通过竞争受体,还通过抑制下游信号通路来影响甜味感知,这一

发现为味觉相互作用提供了新的分子基础。

研究表明,GPCR(T1Rs和T2Rs)在口腔以外的全身广泛表达,如大脑、呼吸系统、内脏、消化系统、生殖系统和其他组织<sup>[123]</sup>。Carey等<sup>[124]</sup>的研究就聚焦于气道中甜味(T1R)和苦味(T2R)受体的生理调节,尤其是鼻窦纤毛细胞中的T2R38,提出葡萄糖水平可能影响甜味受体,进而调节对苦味的响应,强调了体内环境对味觉感知的复杂调控机制。

### 3.3 中枢神经层面

在人类感受混合物复杂滋味的过程中,味觉中枢的感知是3个层面中最核心的部分。味觉刺激与口腔中的味觉感受器发生作用而产生味觉信号,信号被发送到孤束核后,经进一步中转,最后到达大脑的味觉皮层,在那里信号被解码,味觉被感知<sup>[115,125-128]</sup>。基于大脑中苦味和甜味觉神经元的发现,Zucker团队揭示了苦味抑制甜味自上而下的神经调节机制,如图4所示,苦味皮层(GCbt)通过正反馈机制增强苦味神经元的响应,同时通过杏仁核(CeA)发出负反馈信号,抑制甜味神经元的活性<sup>[128]</sup>。这种调控机制确保动物在面对混合味觉刺激时,能够优先识别并响应苦味,从而避免潜在的危害。

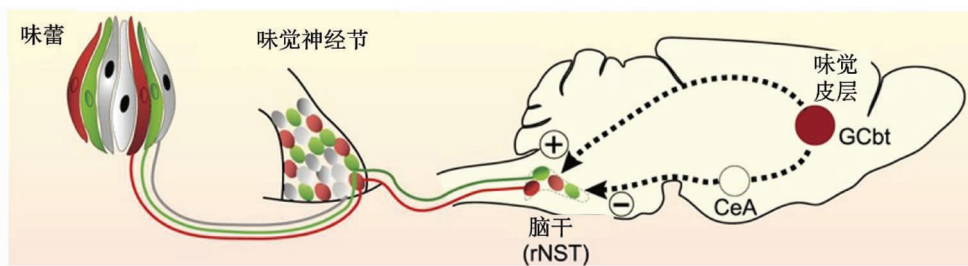


图4 来自大脑皮层的自上而下的反馈调节传入的苦味和甜味信号<sup>[128]</sup>

Fig.4 Top-down feedback from cortex modulates incoming bitter and sweet signals<sup>[128]</sup>

一般来说,两个或两个以上的味觉刺激(超阈)混合在一起时,其混合强度会小于单一味觉强度叠加的总和,即产生了混合抑制<sup>[129]</sup>。Maier等<sup>[130]</sup>通过观察大鼠初级味觉皮层(GC)神经元对甜味(蔗糖)和酸味(柠檬酸)二元混合物的反应,观察到“混合物抑制”现象,并发现中枢神经在处理复杂味觉刺激时,首先区分刺激的组成比例,然后评

估整体的可接受性。此外,大量的分舌试验也验证了多元味觉的混合抑制效应<sup>[63,131-132]</sup>。分舌试验是一种将参与者的舌头横向分为两个不同刺激区域的研究设计,味觉刺激物既可以混合呈现(即蔗糖和柠檬酸的混合),也可以同时呈现在舌头的两侧,而在物理上是分开的(蔗糖在舌头的一侧,柠檬酸在另一侧),从而消除了味觉刺激物相互影响

的可能性。这两种情况的差异代表外周生理相互作用和/或化学相互作用,只有在混合情况下,味觉成分才有可能发生相互作用。因此,若这两种情况之间没有差异,则表明存在中枢神经层面的相互作用机制。在Junge等<sup>[133]</sup>的分舌试验中,当蔗糖和柠檬酸分别刺激舌头两侧与混合刺激舌头一侧时,甜味强度评分虽无显著差异,但均显著低于无柠檬酸时的评分,证明柠檬酸对蔗糖甜味的抑制作用主要通过中央抑制机制实现,而非化学相互作用或外周生理机制。

#### 4 讨论

关于甜味与其它基本味的交互作用,现有研究在不同食品体系中验证了其基本规律。然而,毫无疑问,这些相互作用的一致性会受到不同食物基质品质特征的显著影响,包括食物的质构,味觉混合物的组成及其比例,以及其它味觉或嗅觉物质的存在等。例如,在某些食品中,甜味与酸味的交互作用可能会显著增强产品的风味,使其口感更为丰富和愉悦;而在其它情况下,这种作用可能会被基质的质构或其它风味成分所干扰。

其中,酸味和甜味的相互作用能够赋予食品令人愉悦的滋味感受,然而,酸甜平衡的尺度把控与量化仍然是味觉研究中的一个重要问题。目前,虽然酸甜平衡的感官评估方法有所进展,但是如何准确量化这一平衡仍然是一个挑战。此外,关于酸味与甜味的生理机制仍不完全明确。特别是在甜味剂被广泛应用的背景下,研究甜味剂与酸味物质的化学作用,以及甜味物质与酸味物质在细胞层面的响应机制,对理解其交互作用至关重要。对酸性体系中甜味剂的甜味释放特性的研究,也有助于进一步优化代糖在酸甜食品中的应用。

甜味与苦味的交互作用,尤其是甜味对苦味的掩蔽作用,已得到广泛关注并在实际食品体系中得到应用。然而,甜味剂的甜苦味产生机制及苦味抑制手段仍需要深入研究。随着新型甜味剂的不断出现及改进,对甜味剂本身感官属性的评价体系也在不断完善。运用专业的感官评估方法探索天然甜味剂的改良方案,将有助于推动代糖领域的发展。

关于咸味与甜味的交互作用的研究相对较少,尤其是在不同浓度下的交互作用及其与质构等特性的关系尚不明确。系统研究咸味与甜味的相互作用,特别是结合脂肪对咸甜味感知的影响,将有助于推动基于甜咸相互作用规律的减盐食品的开发。研究表明,脂肪不仅能够影响食品的整体质构,还可能对咸甜味感知产生调节作用,这为开发健康减盐食品提供了新的思路。

除了基本的味觉交互作用,实际食品体系中的酸甜喜好还存在显著的人群和文化差异。1项跨文化消费者的研究显示<sup>[9]</sup>,在柠檬酸和酒石酸对蔗糖甜度的抑制作用方面,中国和丹麦消费者的感知没有显著差异。然而,不同文化背景消费者在感知蔗糖对两种酸的酸味抑制效应上存在差异,中国消费者对酒石酸-蔗糖混合物中的酸味抑制比柠檬酸-蔗糖混合物更为敏感,而丹麦消费者对两者的敏感度相似。这表明,理解不同文化和个体对甜味和酸味感知的差异,对于促进市场产品的个性化和多元化具有重要意义。在厘清味觉交互的基本规律基础上,进一步挖掘消费者对味觉平衡的理解和偏好差异,同时考虑文化背景和消费环境的影响,可能成为甜味与其它基本味交互研究的新方向。这些研究将不仅丰富味觉研究的理论体系,也将为食品开发和市场定位提供宝贵的指导。

#### 5 结语

本文系统回顾了甜味与咸、苦、酸3种基本味觉间的相互作用,探讨其对消费者偏好的影响及在食品开发中的应用。甜味与酸味的协同赋予食品独特风味,然而,酸甜平衡的量化及消费者偏好差异的研究尚待深入;甜味虽能掩盖苦味,但代糖同时产生甜味和不良苦味的机制尚不明确;拓宽甜味与咸味的相互作用应用,能够助力减盐减糖策略的实施。当前,味觉感知领域正积极探索基于细胞传感器与机器学习算法的前沿技术,旨在精准模拟味觉感知过程,加速食品创新<sup>[134-135]</sup>。代糖趋势下,借助前沿技术研究甜味与其它味觉成分作用机制,能够推动低糖产业的发展,为消费者带来更丰富、健康的味觉体验。

## 参 考 文 献

- [1] GARNEAU N L, NUESSELE T M, MENDELSBERG B J, et al. Sweet liker status in children and adults: Consequences for beverage intake in adults [J]. *Food Quality and Preference*, 2018, 65: 175–180.
- [2] DIVERT C, CHABANET C, SCHOUMACKER R, et al. Relation between sweet food consumption and liking for sweet taste in French children [J]. *Food Quality and Preference*, 2017, 56: 18–27.
- [3] HUTCHINGS S C, LOW J Y Q, KEAST R S J. Sugar reduction without compromising sensory perception. An impossible dream? [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(14): 2287–2307.
- [4] WANG Q J, MIELBY L A, JUNGE J Y, et al. The role of intrinsic and extrinsic sensory factors in sweetness perception of food and beverages: A review [J]. *Foods*, 2019, 8(6): 211.
- [5] LINDEMANN B. Receptors and transduction in taste [J]. *Nature*, 2001, 413(6852): 219–225.
- [6] ABUIN L, BARGETON B, ULBRICH M H, et al. Functional architecture of olfactory ionotropic glutamate receptors [J]. *Neuron*, 2011, 69(1): 44–60.
- [7] KEAST R S J, BRESLIN P A S. An overview of binary taste–taste interactions [J]. *Food Quality and Preference*, 2003, 14(2): 111–124.
- [8] KAMEN J M, PILGRIM F J, GUTMAN N J, et al. Interactions of suprathreshold taste stimuli [J]. *Journal of Experimental Psychology*, 1961, 62(4): 348–356.
- [9] JUNGE J Y, BERTELSEN A S, MIELBY L A, et al. Taste interactions between sweetness of sucrose and sourness of citric and tartaric acid among chinese and danish consumers [J]. *Foods*, 2020, 9(10): 1425.
- [10] GREGSON R A M, MCCOWEN P J. The relative perception of weak sucrose - citric acid mixtures [J]. *Journal of Food Science*, 1963, 28(4): 371–378.
- [11] SCHIFFERSTEIN H N J, FRIJTERS J E R. Sensory integration in citric acid/sucrose mixtures [J]. *Chemical Senses*, 1990, 15(1): 87–109.
- [12] MAO Y, TIAN S, QIN Y, et al. Sensory sweetness and sourness interactive response of sucrose–citric acid mixture based on synergy and antagonism [J]. *npj Science of Food*, 2022, 6(1): 33.
- [13] WU A Z, LEE R W, CALVÉ B L, et al. Temporal profiling of simplified lemonade using temporal dominance of sensations and temporal check - all - that - apply [J]. *Journal of Sensory Studies*, 2019, 34(6): e12531.
- [14] JUNGE J Y, MIELBY L A, ZENG Y, et al. Investigating the temporality of binary taste interactions in blends of sweeteners and citric acid in solution [J]. *Journal of Sensory Studies*, 2022, 37(6): e12785.
- [15] FABIAN F W, BLUM H B. Relative taste potency of some basic food constituents and their competitive and compensatory action 1 [J]. *Journal of Food Science*, 1943, 8(3): 179–193.
- [16] PANGBORN R M. Taste interrelationships. II. Suprathreshold solutions of sucrose and citric acid [J]. *Journal of Food Science*, 1961, 26(6): 648–655.
- [17] SAVANT L, MCDANIEL M R. Suppression of sourness: A comparative study involving mixtures of organic acids and sugars [J]. *Perception & Psychophysics*, 2004, 66(4): 642–650.
- [18] CALVIÑO A M, GARRIDO D. Spatial and temporal suppressive behavior of bitter–sweet mixtures [J]. *Perceptual and Motor Skills*, 1991, 73(3\_suppl): 1216–1216.
- [19] CALVINO A M, GARCÍA-MEDINA M R, COMETTO-MUNIZ J E. Interactions in caffeine–sucrose and coffee–sucrose mixtures: Evidence of taste and flavor suppression [J]. *Chemical Senses*, 1990, 15(5): 505–519.
- [20] BIRCH G G, COWELL N D, YOUNG R H. Structural basis of and interaction between sweetness and bitterness in sugars [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1972, 23(10): 1207–1212.
- [21] TAN V W K, WEE M S M, TOMIC O, et al. Temporal sweetness and side tastes profiles of 16 sweeteners using temporal check –all –that –apply (TCATA) [J]. *Food Research International*, 2019, 121: 39–47.
- [22] TIAN X, ZHONG F, XIA Y. Dynamic characteristics of sweetness and bitterness and their correlation with chemical structures for six steviol glycosides [J]. *Food Research International*, 2022, 151: 110848.
- [23] PIERCE –FELDMEYER A M, JOSEPHSON D, JOHNSON A, et al. Perception of bitter taste

- through time-intensity measurements as influenced by taste modulation compounds in steviol glycoside sweetened beverages[J]. *Beverages*, 2019, 5(3): 52.
- [24] KIM S H, PARK S, HONG J. Sweetness profiles of glycosyl rebaudioside and binary mixtures with sugar alcohols in aqueous solution and a lemonade model system[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(5): 2110-2119.
- [25] CHRANIOTI C, CHANIOTI S, TZIA C. Comparison of spray, freeze and oven drying as a means of reducing bitter aftertaste of steviol glycosides (derived from *Stevia rebaudiana* Bertoni plant) - Evaluation of the final products [J]. *Food Chemistry*, 2016, 190: 1151-1158.
- [26] LI S, LI W, XIAO Q, et al. Transglycosylation of stevioside to improve the edulcorant quality by lower substitution using cornstarch hydrolyzate and CGTase [J]. *Food Chemistry*, 2013, 138(2/3): 2064-2069.
- [27] LU T, XIA Y. Transglycosylation specificity of glycosyl donors in transglycosylation of stevioside catalysed by cyclodextrin glucanotransferase [J]. *Food Chemistry*, 2014, 159: 151-156.
- [28] TE POELE E M, DEVLAMYNCK T, JÄGER M, et al. Glucansucrase (mutant) enzymes from *Lactobacillus reuteri* 180 efficiently transglucosylate *Stevia* component rebaudioside A, resulting in a superior taste[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1516.
- [29] BEEBE-CENTER J G, ROGERS M S, ATKINSON W H, et al. Sweetness and saltiness of compound solutions of sucrose and NaCl as a function of concentration of solutes[J]. *Journal of Experimental Psychology*, 1959, 57(4): 231-234.
- [30] KROEZE J H A. Masking and adaptation of sugar sweetness intensity[J]. *Physiology & Behavior*, 1979, 22(2): 347-351.
- [31] BARISAS L, ROSELT T R, GAO Y, et al. Enhanced sweetness in sweetener-NaCl-gum systems[J]. *Journal of Food Science*, 1995, 60(3): 523-527.
- [32] JUNGE J Y, MIELBY L A, KIDMOSE U. Comparison of sweet-sour taste interactions between cold brewed coffee and water[J]. *Beverages*, 2022, 8(2): 32.
- [33] ZAMORA M C, GOLDNER M C, GALMARINI M V. Sourness-sweetness interactions in different media: White wine, ethanol and water [J]. *Journal of Sensory Studies*, 2006, 21(6): 601-611.
- [34] MARTIN N. Sweet/sour balance in champagne wine and dependence on taste/odour interactions[J]. *Food Quality and Preference*, 2002, 13(5): 295-305.
- [35] IKEGAYA A. Composition of free sugars and organic acids in Japanese strawberry cultivars and their influence on the perception of sweetness and sourness[J]. *Journal of Food Science*, 2024, 89(1): 614-624.
- [36] MEILGAARD M C, CARR B T, CIVILLE G V. *Sensory evaluation techniques*[M]. Los Angeles: CRC Press, 1999.
- [37] GIMÉNEZ-SANCHIS A, TÁRREGA A, TARANCÓN P, et al. Check-all-that-apply questions including the ideal product as a tool for selecting varieties in breeding programs. A case study with mandarins[J]. *Agronomy*, 2021, 11(11): 2243.
- [38] HIJAZ F, GMITTER F G, BAI J, et al. Effect of fruit maturity on volatiles and sensory descriptors of four mandarin hybrids[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(5): 1548-1564.
- [39] NASSUR R D C M R, GONZÁLEZ - MOSCOSO S, CRISOSTO G M, et al. Describing quality and sensory attributes of 3 mango (*Mangifera indica* L.) cultivars at 3 ripeness stages based on firmness[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(9): S2055-S2063.
- [40] VILLAMOR R R, DANIELS C H, MOORE P P, et al. Preference mapping of frozen and fresh raspberries[J]. *Journal of Food Science*, 2013, 78(6): S911-S919.
- [41] CANALES E, GALLARDO R K, IORIZZO M, et al. Willingness to pay for blueberries: Sensory attributes, fruit quality traits, and consumers' characteristics[J]. *HortScience*, 2024, 59(8): 1207-1218.
- [42] ZHANG J, NIE J, LI J, et al. Evaluation of sugar and organic acid composition and their levels in highbush blueberries from two regions of China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(9): 2352-2361.
- [43] STOLZENBACH S, BREDIE W L P, CHRISTENSEN R H B, et al. Understanding liking in relation to sensory characteristics, consumer concept associations, arousal potential and 'appropriateness for use' using apple juice as an application[J]. *Journal of Sensory Studies*, 2016, 31(2): 135-142.
- [44] 韩仁娇, 卞金梅, 王彩云, 等. pH和温度对8种甜味剂甜味释放特征的影响[J]. *食品与生物技术学报*,

- 2023, 42(5): 1–11.
- HAN R J, BIAN J M, WANG C Y, et al. Effect of pH and temperature on sweetness profile of eight sweeteners[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2023, 42(5): 1–11.
- [45] NARAYANAN P, CHINNASAMY B, JIN L, et al. Use of just-about-right scales and penalty analysis to determine appropriate concentrations of stevia sweeteners for vanilla yogurt[J]. *Journal of Dairy Science*, 2014, 97(6): 3262–3272.
- [46] TIETEL Z, PLOTTO A, FALLIK E, et al. Taste and aroma of fresh and stored mandarins[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(1): 14–23.
- [47] BENJAMIN O, GAMRASNI D. Electronic tongue as an objective evaluation method for taste profile of pomegranate juice in comparison with sensory panel and chemical analysis[J]. *Food Analytical Methods*, 2016, 9(6): 1726–1735.
- [48] IKEGAYA A, TOYOIZUMI T, KOSUGI T, et al. Taste and palatability of strawberry jam as affected by organic acid content[J]. *International Journal of Food Properties*, 2020, 23(1): 2087–2096.
- [49] DUFFY V B, RAWAL S, PARK J, et al. Characterizing and improving the sensory and hedonic responses to polyphenol-rich aronia berry juice[J]. *Appetite*, 2016, 107: 116–125.
- [50] KOVÁCS Z, SIPOS L, SZÖLLŐSI D, et al. Electronic tongue and sensory evaluation for sensing apple juice taste attributes[J]. *Sensor Letters*, 2011, 9(4): 1273–1281.
- [51] MINGIONI M, MEHINAGIC E, SIUCIŃSKA K, et al. Sweet and sour discrimination abilities of elderly people compared to those of young adults in apple purée[J]. *Food Quality and Preference*, 2017, 59: 59–67.
- [52] MCMAHON K M. Trained and consumer panel evaluation of sparkling wines sweetened to brut or demi sec residual sugar levels with three different sugars[J]. *Food Research International*, 2017, 99: 173–185.
- [53] NYHAN L, SAHIN A W, ARENDT E K. Co-fermentation of non-*Saccharomyces yeasts* with *Lactiplantibacillus plantarum* FST 1.7 for the production of non-alcoholic beer[J]. *European Food Research and Technology*, 2023, 249(1): 167–181.
- [54] CHADHA D, HAMID N, KANTONO K. Application of multiple - intake temporal check all that apply: A case study of strawberry yoghurt formulated with alternative sweeteners[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2024, 104(6): 3306–3319.
- [55] DESAI N T, SHEPARD L, DRAKE M A. Sensory properties and drivers of liking for greek yogurts[J]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96(12): 7454–7466.
- [56] DONG Y, SHARMA C, MEHTA A, et al. Application of augmented reality in the sensory evaluation of yogurts[J]. *Fermentation*, 2021, 7(3): 147.
- [57] THUN Y J, YAN S W, TAN C P, et al. Sensory characteristic of sugar reduced yoghurt drink based on check-all-that-apply [J]. *Food Chemistry Advances*, 2022, 1: 100110.
- [58] CHADHA D, HAMID N, KANTONO K, et al. Changes in temporal sensory profile, liking, satiety and postconsumption attributes of yogurt with natural sweeteners[J]. *Journal of Food Science*, 2022, 87(7): 3190–3206.
- [59] VAN BOMMEL R, STIEGER M, BOELEE N, et al. From first to last bite: Temporal dynamics of sensory and hedonic perceptions using a multiple-intake approach[J]. *Food Quality and Preference*, 2019, 78: 103748.
- [60] PU D, ZHANG Y, SUN B, et al. Characterization of the key taste compounds during bread oral processing by instrumental analysis and dynamic sensory evaluation[J]. *LWT*, 2021, 138: 110641.
- [61] CHOI S E, GARZA J. Consumer likings of different miracle fruit products on different sour foods [J]. *Foods*, 2021, 10(2): 406.
- [62] JUNGE J Y, MIELBY L A, ZENG Y, et al. Investigating the temporality of binary taste interactions in blends of sweeteners and citric acid in solution[J]. *Journal of Sensory Studies*, 2022, 37(6): e12785.
- [63] LAWLESS H T. Evidence for neural inhibition in bittersweet taste mixtures[J]. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 1979, 93(3): 538–547.
- [64] BERTELSEN A S, LAURSEN A, KNUDSEN T A, et al. Bitter taste masking of enzyme-treated soy protein in water and bread[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(10): 3860–3869.

- [65] CUSIELO K V C, DA SILVA A C D M L, TAVARES - FILHO E R, et al. Sensory influence of sweetener addition on traditional and decaffeinated espresso[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(9): 2628–2637.
- [66] BROWN A L, WARREN E R, INGRAHAM B W, et al. The effect of fat content on sensory perception and consumer acceptability of 70% cacao dark chocolate made from reconstituted cocoa liquor[J]. *Journal of Sensory Studies*, 2023, 38(5): e12864.
- [67] HOPFER H, RIAK A C, ROBERTS R F, et al. Synergistic and antagonistic ingredient interactions as a sugar reduction strategy in chocolate milk[J]. *Journal of Sensory Studies*, 2022, 37(5): e12770.
- [68] SOTOYAMA M, UCHIDA S, KAMIYA C, et al. Ease of taking and palatability of fixed-dose orally disintegrating mitiglinide/ voglibose tablets[J]. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 2019, 67(6): 540–545.
- [69] LÓPEZ L, VELA M, IBARRA I, et al. Positive improvement in palatability of metabolic formula with the use of miraculin protein in patients with inborn errors of metabolism and healthy adults[J]. *Revista Chilena De Nutrición*, 2020, 47(5): 801–807.
- [70] HARAGUCHI T, YOSHIDA M, HAZEKAWA M, et al. Synergistic effects of sour taste and low temperature in suppressing the bitterness of aminoleban EN[J]. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 2011, 59(5): 536–540.
- [71] SUGIURA T, UCHIDA S, NAMIKI N. Taste-mask-ing effect of physical and organoleptic methods on peppermint -scented orally disintegrating tablet of famotidine based on suspension spray-coating method [J]. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 2012, 60(3): 315–319.
- [72] SHINOTSUKA H, MIZUTANI N, AIKAWA S, et al. Palatability evaluation of sulfamethoxazole/ trimethoprim with sweetener using the two -bottle choice test[J]. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 2023, 71(12): 906–908.
- [73] MENNECIER A, MATOKA B, WILFRED-TONGA M M, et al. Facilitators and barriers to infant post-natal HIV prophylaxis, a qualitative sub -study of the PROMISE-EPI trial in Lusaka, Zambia[J]. *Frontiers in Public Health*, 2023, 11: 1242904.
- [74] GAUDETTE N J, PICKERING G J. Modifying bit-terness in functional food systems[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2013, 53(5): 464–481.
- [75] SPINELLI S, PRESCOTT J, PIERGUIDI L, et al. Phenol -rich food acceptability: The influence of variations in sweetness optima and sensory -liking patterns[J]. *Nutrients*, 2021, 13(3): 866.
- [76] SHARAFI M, HAYES J E, DUFFY V B. Masking vegetable bitterness to improve palatability depends on vegetable type and taste phenotype[J]. *Chemosensory Perception*, 2013, 6(1): 8–19.
- [77] WILKIE L M, PHILLIPS E D C, WADHERA D. Sucrose and non-nutritive sweeteners can suppress the bitterness of vegetables independent of ptc taster phenotype [J]. *Chemosensory Perception*, 2013, 6(3): 127–139.
- [78] NOR N D M, MULLICK H, ZHOU X, et al. Consumer liking of turnip cooked by different methods: The influence of sensory profile and consumer bitter taste genotype[J]. *Foods*, 2023, 12(17): 3188.
- [79] BAKKE A J, STUBBS C A, MCDOWELL E H, et al. Mary poppins was right: Adding small amounts of sugar or salt reduces the bitterness of vegetables [J]. *Appetite*, 2018, 126: 90–101.
- [80] OLEGARIO L S, GONZÁLEZ-MOHINO A, ESTÉVEZ M, et al. Impact of ‘free -from’ and ‘healthy choice’ labeled versions of chocolate and coffee on temporal profile (multiple-intake TDS) and liking[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109342.
- [81] MORAIS E C, PINHEIRO A C M, NUNES C A, et al. Multiple time-intensity analysis and temporal dominance of sensations of chocolate dairy dessert using prebiotic and different high-intensity sweeteners[J]. *Journal of Sensory Studies*, 2014, 29(5): 339–350.
- [82] BECK T K, JENSEN S, BJOERN G K, et al. The masking effect of sucrose on perception of bitter compounds in brassica vegetables[J]. *Journal of Sensory Studies*, 2014, 29(3): 190–200.
- [83] BRODOCK J L, HAYES J E, MASTERTSON T D, et al. Differences in preferred fat level, sweetener type, and amount of added sugar in chocolate milk in a choice task relate to physical activity and orthorexia[J]. *Appetite*, 2021, 163: 105214.
- [84] MARTINEZ-LEVY A C, MONETA E, ROSSI D, et al. Taste responses to chocolate pudding with differ-



- ent sucrose concentrations through physiological and explicit self-reported measures[J]. *Foods*, 2021, 10(7): 1527.
- [85] PICKERING G J, HAYES J E. Influence of biological, experiential and psychological factors in wine preference segmentation: Factors associated with differences in wine liking[J]. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2017, 23(2): 154–161.
- [86] VÁZQUEZ-ARAÚJO L, RODRÍGUEZ-SOLANA R, CORTÉS-DIÉGUEZ S M, et al. Study of the suitability of two hop cultivars for making herb liqueurs: Volatile composition, sensory analysis, and consumer study [J]. *European Food Research and Technology*, 2013, 237(5): 775–786.
- [87] DONADINI G, FUMI M D, NEWBY-CLARK I R. An investigation of matches of bottom fermented red beers with cheeses[J]. *Food Research International*, 2015, 67: 376–389.
- [88] ARDOIN R, SMITH B, LEA J, et al. Consumer perceptions and antioxidant profiling of acidified cold-brewed sorghum bran beverages [J]. *Journal of Food Science*, 2023, 88(6): 2301–2312.
- [89] RIVERO R, ARCHAINA D, SOSA N, et al. Sensory characterization, acceptance, and stability studies on low calories fruit jelly candies[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2023, 60(8): 2204–2212.
- [90] YOON E, KIM J, LEE J. The U.S. consumers' acceptability and emotion measures when consuming novel Korean traditional non-alcoholic beverages[J]. *Journal of Sensory Studies*, 2016, 31(3): 256–271.
- [91] HUTCHINGS S C, DE CASANOVE A, SCHLICH P, et al. The effect of training on the temporal dominance of sensations method: A study with milk protein hydrolysates[J]. *Journal of Sensory Studies*, 2017, 32(6): e12303.
- [92] LEE S H, CHOE S Y, SEO G G, et al. Can 'functional sweetener' context increase liking for cookies formulated with alternative sweeteners? [J]. *Foods*, 2021, 10(2): 361.
- [93] HUTCHINGS S C, O'SULLIVAN M, JACQUIER J C, et al. The effect of modifying the distribution of sucralose and quinine on bitterness suppression in model gels[J]. *Food Quality and Preference*, 2016, 50: 157–162.
- [94] WU X, ONITAKE H, HARAGUCHI T, et al. Quantitative prediction of bitterness masking effect of high-potency sweeteners using taste sensor[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 235: 11–17.
- [95] JUNG J, KIM S, PARK S, et al. Sweetness profiles of glycosylated rebaudioside A and its binary mixtures with allulose and maltitol[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2021, 30(3): 423–432.
- [96] PONZO V, PELLEGRINI M, COSTELLI P, et al. Strategies for reducing salt and sugar intakes in individuals at increased cardiometabolic risk[J]. *Nutrients*, 2021, 13(1): 279.
- [97] COX D N, HENDRIE G A, CARTY D. Sensitivity, hedonics and preferences for basic tastes and fat amongst adults and children of differing weight status: A comprehensive review[J]. *Food Quality and Preference*, 2016, 48: 359–367.
- [98] COLTELL O, SORLÍ J V, ASENSIO E M, et al. Association between taste perception and adiposity in overweight or obese older subjects with metabolic syndrome and identification of novel taste-related genes[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2019, 109(6): 1709–1723.
- [99] FERNANDEZ-GARCIA J C, ALCAIDE J, SANTIAGO-FERNANDEZ C, et al. An increase in visceral fat is associated with a decrease in the taste and olfactory capacity[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0171204.
- [100] PROSERPIO C, LAUREATI M, BERTOLI S, et al. Determinants of obesity in Italian adults: The role of taste sensitivity, food liking, and food neophobia [J]. *Chemical Senses*, 2016, 41(2): 169–176.
- [101] BOLHUIS D P, COSTANZO A, KEAST R S J. Preference and perception of fat in salty and sweet foods[J]. *Food Quality and Preference*, 2018, 64: 131–137.
- [102] CATTANEO C, MAMBRINI S P, GILARDINI L, et al. Impact of 4-week of a restricted Mediterranean diet on taste perception, anthropometric, and blood parameters in subjects with severe obesity[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10: 1196157.
- [103] KWAK H S, KIM M, LEE Y, et al. Long-term change in consumer acceptance for salt-reduced 'udon noodle soup' over repeated intake at home[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2015, 50(2): 541–548.

- [104] LIMA A, DUFAURET M, LE RÉVÉREND B, et al. Deconstructing how the various components of emulsion creamers impact salt perception[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 79: 310–318.
- [105] BERTERETCHE M V, ELOIT C, DUMAS H, et al. Taste deficits after middle ear surgery for otosclerosis: Taste somatosensory interactions[J]. *European Journal of Oral Sciences*, 2008, 116(5): 394–404.
- [106] MCBRIDE R L, FINLAY D C. Perceptual integration of tertiary taste mixtures[J]. *Perception & Psychophysics*, 1990, 48(4): 326–330.
- [107] REYES M M, GRAVINA S A, HAYES J E. Evaluation of sweetener synergy in humans by isobole analyses[J]. *Chemical Senses*, 2019, 44(8): 571–582.
- [108] KE X, MA H, YANG J, et al. New strategies for identifying and masking the bitter taste in traditional herbal medicines: The example of Huanglian Jiedu Decoction[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2022, 13: 84382.
- [109] STARK T, BAREUTHER S, HOFMANN T. Molecular definition of the taste of roasted Cocoa Nibs (*Theobroma cacao*) by means of quantitative studies and sensory experiments[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(15): 5530–5539.
- [110] AN J P, WANG Y, MUNGER S D, et al. A review on natural sweeteners, sweet taste modulators and bitter masking compounds: Structure–activity strategies for the discovery of novel taste molecules[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, (2024–05–17)[2024–08–26]. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2024.2326012>.
- [111] ZHU Z, ZHANG W, LI Z, et al. Rethinking sweetener discovering: Multiparameter modeling of molecular docking results between the T1R2–T1R3 receptor and compounds with different tastes[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, 72(13): 7336–7343.
- [112] LEE A A, OWYANG C. Sugars, sweet taste receptors, and brain responses[J]. *Nutrients*, 2017, 9(7): 653.
- [113] BEHRENS M, MEYERHOF W. Signaling in the chemosensory systems: Bitter taste receptors and human bitter taste perception[J]. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2006, 63(13): 1501–1509.
- [114] KRETZ O, BARBRY P, BOCK R, et al. Differential expression of RNA and protein of the three pore-forming subunits of the amiloride-sensitive epithelial sodium channel in taste buds of the rat[J]. *Journal of Histochemistry & Cytochemistry*, 1999, 47(1): 51–64.
- [115] CHANDRASHEKAR J, KUHN C, OKA Y, et al. The cells and peripheral representation of sodium taste in mice[J]. *Nature*, 2010, 464(7286): 297–301.
- [116] 庞广昌, 陈庆森, 胡志和, 等. 味觉受体及其传感器研究与应用[J]. *食品科学*, 2017, 38(5): 288–298.
- PANG G C, CHEN Q S, HU Z H, et al. Advances in research on taste receptors and application prospects of taste sensors[J]. *Food Science*, 2017, 38(5): 288–298.
- [117] JYOTAKI M, SHIGEMURA N, NINOMIYA Y. Modulation of sweet taste sensitivity by orexigenic and anorexigenic factors[J]. *Endocrine Journal*, 2010, 57(6): 467–475.
- [118] WILKIE L M, CAPALDI PHILLIPS E D. Heterogeneous binary interactions of taste primaries: Perceptual outcomes, physiology, and future directions[J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2014, 47: 70–86.
- [119] FINGER T E, DANILOVA V, BARROWS J, et al. ATP signaling is crucial for communication from taste buds to gustatory nerves[J]. *Science*, 2005, 310(5753): 1495–1499.
- [120] ROELSE M, KRASTEVA N, PAWLIZAK S, et al. Tongue-on-a-chip: Parallel recording of sweet and bitter receptor responses to sequential injections of pure and mixed sweeteners[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, 72(28): 15854–15864.
- [121] NAKBI A, BOUZID M, KHEMIS I B, et al. A putative biological adsorption process of binary mixture taste of sucrose and caffeine on human neuroreceptor site by the use of statistical physics modeling[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2023, 1273: 134225.
- [122] TALAVERA K, YASUMATSU K, YOSHIDA R, et al. The taste transduction channel TRPM5 is a locus for bitter - sweet taste interactions[J]. *The FASEB Journal*, 2008, 22(5): 1343–1355.
- [123] ZHANG N, WEI X, FAN Y, et al. Recent advances in development of biosensors for taste-related

- analyses[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2020, 129: 115925.
- [124] CAREY R M, LEE R J. Taste receptors in upper airway innate immunity[J]. *Nutrients*, 2019, 11(9): 2017.
- [125] CHEN X, GABITTO M, PENG Y, et al. A gustotopic map of taste qualities in the mammalian brain[J]. *Science*, 2011, 333(6047): 1262–1266.
- [126] PENG Y, GILLIS–SMITH S, JIN H, et al. Sweet and bitter taste in the brain of awake behaving animals[J]. *Nature*, 2015, 527(7579): 512–515.
- [127] HUANG A L, CHEN X, HOON M A, et al. The cells and logic for mammalian sour taste detection[J]. *Nature*, 2006, 442(7105): 934–938.
- [128] JIN H, FISHMAN Z H, YE M, et al. Top–down control of sweet and bitter taste in the mammalian brain[J]. *Cell*, 2021, 184(1): 257–271.
- [129] PANGBORN R. Taste interrelationships[J]. *Journal of Food Science*, 2006, 25: 245–256.
- [130] MAIER J X, KATZ D B. Neural dynamics in response to binary taste mixtures[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2013, 109(8): 2108–2117.
- [131] KROEZE J H. Functional equivalence of the two sides of the human tongue[J]. *Perception & Psychophysics*, 1979, 25(2): 115–118.
- [132] KROEZE J H A, BARTOSHUK L M. Bitterness suppression as revealed by split–tongue taste stimulation in humans[J]. *Physiology & Behavior*, 1985, 35(5): 779–783.
- [133] JUNGE J Y, ANDERSEN G H, KIDMOSE U. Suppression of sweetness: Evidence for central mechanism for suppression of sweetness from sucrose by citric acid[J]. *Chemical Senses*, 2023, 48: 1–10.
- [134] 田师一, 姜国新, 毛岳忠, 等. 食品智能感知技术的发展与前沿探索[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(6): 1–11.
- TIAN S Y, JIANG G X, MAO Y Z, et al. Development and frontier exploration of food intelligent perception technology[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2024, 24(6): 1–11.
- [135] CUI Z, WU B, BLANK I, et al. TastePeptides–EEG: An ensemble model for umami taste evaluation based on electroencephalogram and machine learning[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(36): 13430–13439.

## A Systematic Review of the Interactions between Sweetness and Other Basic Tastes

Xia Yixun<sup>1,2,3</sup>, Chen Jia<sup>2</sup>, Wang Ziyuan<sup>4</sup>, Wang Juan<sup>5</sup>, Wu Jiaxin<sup>4</sup>, Zhong Fang<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Science Center for Future Foods, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu

<sup>2</sup>School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu

<sup>3</sup>Key Laboratory of Food Sensory Science and Technology, China National Light Industry, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu

<sup>4</sup>Classy Kiss Dairy(Shenzhen)Co., Ltd., Shenzhen 518105, Guangdong

<sup>5</sup>Classy Kiss Yogurt(Suzhou)Co., Ltd., Suzhou 215143, Jiangsu

**Abstract** In recent years, the issue of excessive sugar intake has intensified globally. To address the growing demand for sugar reduction among consumers, it is crucial to gain a deeper understanding of the interactions between sweetness and other basic taste components (sour, bitter, salty) within food matrices and their potential mechanisms. This article summarized the fundamental interaction patterns of sweetness with other basic tastes in aqueous solutions, comprehensively reviewed and discussed the application studies of binary taste mixtures in real systems, and explored the potential mechanisms of binary taste interactions from chemical, physiological, and neurological perspectives. This provided scientific evidence and innovative ideas for developing low–sugar, healthy, and uniquely flavored food and beverage formulations.

**Keywords** taste interaction; sweetness; sourness; bitterness; saltiness