DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250822001
引用格式: 廖茜菡, 黄上苏, 杨成龙, 等. 冻藏肉制品在口腔加工中的质地-风味-感知动态交互作用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(3): 269–278.
LIAO XH, HUANG SS, YANG CL, *et al*. Research progress on the dynamic interaction between texture, flavor and perception of frozen meat products during oral processing [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(3): 269–278. (in Chinese with English abstract).

冻藏肉制品在口腔加工中的质地-风味-感知动态交互作用研究进展

廖茜菡[1], 黄上苏[1], 杨成龙[1], 游　刚[2*], 张自然[2], 牛改改[2], 刘小玲[1*]

(1. 广西大学轻工与食品工程学院, 南宁　530004; 2. 北部湾海产健康养殖与绿色加工实验室, 广西壮族自治区海洋食品营养与加工技术创新工程研究中心, 北部湾大学食品工程学院, 钦州　535000)

摘　要: 随着现代生活节奏加快及冷链物流体系的完善, 冻藏肉制品在日常膳食中的占比显著提升, 其品质稳定性成为消费者与产业共同关注的焦点。本文综述了口腔加工过程中冻藏肉制品质地-风味-感知的交互作用。首先概述了冻藏肉制品的全球消费趋势及冻藏技术的必要性, 重点突出长期冻藏导致的质地劣化和风味失衡等品质问题; 其次详细探讨冻藏对肉制品基质的影响, 包括肌原纤维蛋白变性引发的质地变化及风味物质的氧化或流失规律; 随后深入分析口腔加工过程中, 食团质地的动态感知规律、滋味与香气物质的动态释放机制及其与感官感知的关联; 最后讨论个体差异对感官体验的影响, 并提出未来研究方向。本文通过整合动态感官评价与仪器分析方法, 聚焦动态交互作用与跨模态感知。基于仿生口腔模型旨在为消费者理解冻藏肉制品的感官体验形成机制提供科学依据, 同时为肉制品生产中冻藏条件优化、个性化产品开发提供理论支撑。

关键词: 口腔加工; 冻藏肉制品; 质地; 风味释放; 感官感知; 跨模态交互

Research progress on the dynamic interaction between texture, flavor and perception of frozen meat products during oral processing

LIAO Xi-Han[1], HUANG Shang-Su[1], YANG Cheng-Long[1], YOU Gang[2*], ZAHNG Zi-Ran[2], NIU Gai-Gai[2], LIU Xiao-Ling[1*]

(1. *School of Light Industry and Food Engineering*, *Guangxi University*, *Nanning* 530004, *China*; 2. *Laboratory of Beibu Gulf Marine Product Healthy Aquaculture and Green Processing*, *Guangxi Zhuang Autonomous Region Engineering Research Center of Marine Food Nutrition and Processing Technology Innovation*, *College of Food Engineering*, *Beibu Gulf University*, *Qinzhou* 535000, *China*)

收稿日期: 2025-08-22
基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(32360632); 广西自然科学基金资助项目(2025GXNSFAA069201); 广西科技计划项目(桂科 AB25069304); 大学生创新创业训练计划项目(S202511607082, S202411607196)

第一作者: 廖茜菡(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水产品加工与贮藏。E-mail: 753494556@qq.com
***通信作者:** 游刚(1989—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水产品加工与贮藏。E-mail: yougang8901@163.com
刘小玲(1972—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为水产品的开发与利用。E-mail: liuxling@gxu.edu.cn

ABSTRACT: With the acceleration of modern life rhythms and the improvement of cold chain logistics systems, the proportion of frozen meat products in daily diets has increased significantly, and the stability of their quality has become a key focus of both consumers and the industry. This paper reviewed the interactions among texture, flavor and perception of frozen meat products during oral processing. First, this paper outlined the global consumption trends of frozen meat products and the necessity of freezing storage technologies, with a focus on highlighting the quality issues such as texture deterioration and flavor imbalance caused by long-term frozen storage. Second, it explored in detail the effects of frozen storage on the matrix of meat products, including the texture changes caused by myofibrillar protein denaturation and the oxidation or loss patterns of flavor substances. Subsequently, it conducted an in-depth analysis of the dynamic perception patterns of bolus texture, the dynamic release mechanisms of taste and aroma compounds, and their correlations with sensory perception during oral processing. Finally, it discussed the effects of individual differences on sensory experiences and proposes future research directions. By integrating dynamic sensory evaluation and instrumental analysis methods, this paper focused on dynamic interactions and cross-modal perception. The bionic oral model-based approach aims to provide a scientific basis for consumers to understand the formation mechanism of sensory experiences of frozen meat products, and simultaneously offer theoretical support for the optimization of frozen storage conditions and the development of personalized products in meat production.

KEY WORDS: oral processing; frozen-stored meat products; texture; flavor release; sensory perception; cross-modal interaction

0 引 言

近年来, 全球肉制品消费需求持续增长, 据联合国粮食及农业组织统计, 2025 年全球人均肉制品消费量预计达到 34.8 kg[1], 肉类消费总量则有望达到 9996 万吨[2]。冻藏技术作为抑制微生物增殖、延长肉类货架期的主要手段, 已广泛应用于肉类产品的储存与运输环节。然而, 长期冻藏易引发肉类蛋白质变性、水分流失及冰晶损伤等问题, 进而导致肉品质地劣化、风味损失, 显著降低最终产品的感官品质[3]。目前冻藏肉类品质的研究多集中于静态指标分析, 却忽略了口腔加工过程中质地、风味与感官感知之间的动态交互机制, 通过跨模态感知交互作用改善食品的风味感知[4]。“跨模态感知交互作用”是指刺激一种感觉形态可以补偿或增强与另一种感觉形态。此外, 个体差异(个人经验、认知、遗传以及健康状况等)会对肉类感官感知结果产生重要影响[5]。尽管仪器分析在肉类品质客观测量方面取得进展, 仍难以完全替代真实复杂的人类感官评价。

本文系统阐明口腔加工过程中冻藏肉制品质地-风味-感知的交互作用机制。具体如下: (1)揭示冻藏时间对肉品质地特性的影响规律; (2)阐明口腔加工过程中质地动态变化对风味物质释放的调控机制; (3)解析质地与风味跨模态交互作用对感官感知的影响原理; (4)对比分析仪器分析与感官评价在冻藏肉品质研究中的优势与局限; (5)探讨口腔加工动态研究方法及其在提升冻藏肉制品感官品质中的应用前景。本文有助于消费者理解食物在口腔中感官体验的形成机制提供了新的视角, 并为提升消费者对冻藏食品的感官质量认知和选择决策提供科学依据。

1 冻藏对肉制品基质的影响

1.1 质地劣化

冻藏肉类由于肌原纤维蛋白的构象变化进而导致质地变化, 这一过程与水结构的改变和蛋白质-水相互作用的变化以及水向更大空间域的迁移密切相关[6]。冻藏过程中肌肉细胞的损伤主要通过机械力、脱水以及冰晶形成引起的溶质浓度改变来实现的, 其中冰晶的形成是导致肌原纤维蛋白变性的主要因素之一[7]。冰晶的形成会改变细胞内外的溶质浓度, 进而引起蛋白质的冷变性和氧化。此外, 冰-水界面面积的大小对肌原纤维蛋白的变性有显著影响, 其面积越大则蛋白质的展开和变性速率越快, 导致蛋白质溶解度和总巯基含量的降低[8]。冰晶的机械作用会刺破肌细胞膜以及破坏肌原纤维排列, 造成细胞破裂与微观孔隙增多。氧化作用会促进蛋白质的羰基化以及降低巯基含量, 最终引起蛋白质的结构和功能变化[9]。

ZHANG 等[10]通过扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察发现冻藏牛肉的肌原纤维完整性被破坏, 且多孔结构增多, 并随冻藏时间延长裂缝与气泡数量会进一步增加。同时在储存和配送过程中的温度波动加剧微观结构破坏, 不仅增加滴落损失以及破坏纤维结构,

还会影响肉品颜色与最终品质[11]。从宏观上看, 长期冻藏会导致肉类硬度、胶黏性以及弹性降低, 这一现象与 KLUTH 等[12]的研究结果一致。此外, 冰晶刺破肌细胞膜导致了汁液流失和微观孔隙增多, 适口性下降, 消费者接受度降低[13]。

1.2　风味物质变化

肌原纤维蛋白不仅对质地特性起到至关重要的作用, 还具备吸附风味的能力, 并且与挥发性化合物结合影响风味感知[14]。挥发性脂肪酸和氨基酸的氧化是影响肉类风味的重要因素, 氧化程度往往会随着冻藏时间的延长而升高[15]。当氧化产物积累超过可接受阈值时, 便产生令人不愉悦气味(如酸臭味), 这种酸败特征气味主要源于脂质和蛋白质氧化反应产生的挥发性化合物, 消费者可通过强烈的腐臭味道对酸败进行推断。基于部分感官研究表明短期冻藏对羊肉风味影响较小, 因此消费者对其“异味”感知不明显[16]。冻藏肉类气味释放主要源于多不饱和脂肪酸的氧化降解最终生成醛类、酮类等关键挥发性化合物[17]。有报道证实冻藏鸡肉的己醛和壬醛含量随冻藏时间显著增加, 且二者含量与丙二醛呈正相关[18]。而在鱼肉中的 1-辛烯-3-醇为风味特征化合物, 其为主要腥味物质来源, 这些挥发性物质的产生与冻藏肉质的不良气味有密切的关联。

冻藏过程中冰晶形成引起的蛋白质和脂质氧化, 以及热处理过程中发生美拉德反应的氨基酸均可能诱导羰基化合物的形成, 而其是有害物质的前体[19]。后续该物质发生羰基胺反应, 经过重排和脱水等过程, 最终形成晚期糖基化终产物[20]。其中, 硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)值是评估冻藏肉类氧化的重要指标, 可以间接反映脂质氧化引发的羰基化合物累积程度。

基于上述机制以及表 1 规律, 在实际生产中可针对性优化工艺, 短期贮藏(<3 个月)肉制品可采用–18 ℃常规低温结合快速冻结工艺, 减少冰晶损伤。长期贮藏(>6 个月)优先选用–40 ℃超低温冻藏, 抑制脂质氧化与蛋白质变性。同时, 可在配方中添加天然抗氧化剂以抑制醛类等异味物质生成。

2　口腔加工对肉制品食团质地动态感知的影响

2.1　质地变化影响

消费者摄入的食物在机械咬合力的作用下被分解成小颗粒, 这一过程增加了颗粒的数量和比表面积[26]。以 QIAN 等[27]研究为例, 咀嚼后食团硬度降低 37%。食用过程中的质地变化是一个动态过程, 然而, 现有大量研究通过质构仪(texture profile analysis, TPA)等仪器测量肉制品, 其优势在于通过将力和距离以及各种可用的测量几何形状和探头相结合, 它能够以一种相当简单的方式评估肉类的质地特性。尽管没有标准 TPA 程序的设置并且难以进行结果比较, 但这可能有助于指示整体食团结构, 并理解感官知觉和团粒结构之间的关系[28]。然而 TPA 测试仅仅只能反映某个特定咀嚼时间点的静态力学特性, 无法探究其动态变化。LIU 等[29]发射 SEM 观察显示, 猪肉食团颗粒周围存在多孔网络且在咀嚼中期时最显著, 该结果与饼干食团的咀嚼条件相似[30]。通过 SEM 观察组织形态可观察咀嚼过程中食团微观结构的演变及其与宏观质地的关联。

表 1　不同冻藏条件下肉制品质地-风味变化规律

Table 1　Change rules of texture-flavor in meat products under different frozen storage conditions

冻藏条件		种类	质地变化规律	风味变化规律	参考文献
冻藏温度	常规低温(–18 ℃)	鸡肉	冰晶缓慢形成, 肌纤维机械损伤显著, 解冻后汁液流失严重, 硬度增加, 嫩度和多汁性下降	肌苷酸降解, 鲜味强度显著降低	[21]
	超低温(–40 ℃及以下)	牛肉	与–18 ℃相比效果更优, 组织结构更好, 滴落损失、剪切力更低, 色泽更佳	–40 ℃和–60 ℃组的 TBARS 始终低于–18 ℃组, 抑制不饱和脂肪酸氧化效果更优	[22]
冻藏时间	短期(<3 个月)	羊肉	冰晶作用导致肌纤维断裂, 剪切力降低,嫩度提升	立即解冻烹饪风味可接受, TBARS 值缓慢增加	[23]
	长期(>6 个月)	猪肉	硬度、咀嚼性上升, 弹性、多汁性下降。持水力显著降低, 解冻损失和烹饪损失增加	脂质氧化加剧, 导致酸败味、异味凸显, 肉味强度下降	[24]
冻藏速率	慢速冻结	羊肉	形成大冰晶,严重破坏肌肉超微结构, 汁液流失严重, 质地劣化	细胞破坏加速氧化, 风味物质流失	[25]
	快速冻结		形成细小而均匀的冰晶,对细胞损伤小, 持水性、质地及微观结构更接近鲜肉	保留更多挥发性风味物质, 抑制氧化, 风味更接近鲜肉	

除上述方法外，超声波技术可用于食品质地属性快速、无损地检测。声学监测技术通过捕捉食品在剪切、压缩等力学作用下破裂产生的声波信号，再量化分析声波特征以反映质地特性[31]。鉴于传统仪器无法模拟人体口腔动态加工过程，仿生装置成为研究食团质地变化的关键工具。仿生装置是指使用人工手段设计制造的机械装置，主要研究集中在通过控制力、唾液流速、咀嚼时间和频率与口服药物相结合来辅助咀嚼。该装置可以模拟不同咀嚼条件，如咀嚼次数、下颌运动、咀嚼力、温度和唾液成分等，通过控制变量对食物的影响，为营养与食品安全领域提供了标准化的分析手段[32]。当前仪器在模拟口腔机制方面存在明显局限，未来研究应聚焦于开发能够连续监控质地变化的仪器并结合动态感官方法探究肉制品在口腔中复杂质地变化规律。

2.2 质地与感知关联性

质地感官感知是由触觉、视觉以及不同质地属性的强度(如硬度、嫩度、多汁性以及纤维性)，尤其是食物的口腔加工所塑造的动态体验来进行评估的结果。在食物质地感知的形成中的仪器测量结果与感官知觉之间的关联对口腔加工过程具有重要影响。口腔加工、口腔生理特性和饮食习惯方面具有潜在应用，这对食物质地的感知至关重要，三者的任何微小变化都会导致质地感知的细微差异[33]。开发时间感觉方法能够说明质地的动态特征，该方法能够随着时间的推移跟踪感知的演变。定量描述分析(quantitative descriptive analysis, QDA)和感觉主导时间法(temporal dominance of sensations, TDS)是用于评估口腔加工过程中质地感知的最流行的动态感觉评估方法[34]。QDA 训练小组以可靠的方式表达他们对产品的感知，还可以将质地属性与香气和味道属性相结合，以获得食品的完整描述性感官特征。QDA 结果显示机械性能的变化导致第一口感知到的硬度和脆性存在显著差异[34]。而 TDS 可捕捉多属性竞争关系下主导感知的动态序列。研究表明通过 TDS 得出干腌火腿的硬度在咀嚼初期更显著[35]。时间强度(time intensity, TI)测量中使用了对属性强度随时间的连续跟踪，但是 TI 仅限于对一个属性的评估，而 QDA 被认为具有给 TDS 补充信息的作用。基于质地动态变化，能够进一步探究风味释放与感知。

3 口腔加工对滋味释放与感知分析的影响

肉制品的滋味物质主要来自核酸以及蛋白质的降解产物、有机酸和钠离子等。滋味物质可以使人体味觉蛋白受体激活，从而使大脑产生相应的感知。

3.1 唾液对滋味释放影响

滋味物质的释放关键在于食物破碎后的表面积增加以及唾液渗透。唾液作为一种极为复杂的液体，在口腔中发挥着重要作用，但是在传统的食品感官评价中，唾液在风味感知中的关键作用被完全忽略。唾液对风味调控主要体现在 4 方面：(1)通过蛋白质乳化油脂，如 ZHANG 等[36]发现通过唾液蛋白能够乳化红烧肉油脂并形成黏性食团，减小食物的口腔摩擦从而促进吞咽；(2)脂溶性分子的乳化与香气释放，例如唾液与鸡皮脂肪结合形成润滑层，其中唾液中的粘蛋白和 α-淀粉酶通过氢键和疏水相互作用调控香气释放，相关体外实验已验证该乳化体系的稳定性，为阐释滋味与口腔加工的关联提供了支撑[37]；(3)稀释挥发性化合物，如曹振霞[38]研究显示唾液能够稀释红烧肉中的挥发性化合物，这与 XU 等[37]研究结果是一致的。(4)促进味觉感知，唾液蛋白通过与代谢呈味物质相互作用来激活钠离子通道，在味觉信号传递中具有重要作用[39]。

口腔微生物群的多样性与个体间风味感知差异有关。源自口腔微生物群的 β-葡萄糖苷酶可酶解多种食品中的香气前体物质，进而释放香气分子，这提示口腔细菌在香气感知调控中扮演关键角色，也为食品加工中利用微生物源 β-葡萄糖苷酶挖掘风味潜力提供了新思路。然而，真实唾液具有显著个体差异，不同个体唾液中黏蛋白与鲜味物质的结合能力存在明显区别，现有研究体系尚难以全面模拟真实人群的复杂生理变化，相关调控机制仍需进一步深入探索。

3.2 滋味物质与感知关联性影响

滋味感官通路与人体生理神经网络以及大脑高级区域有密切关联。滋味的味觉感受器主要分布在舌头表面，并在此形成味蕾[40]。味蕾可对食物的味道进行初步的识别分析并且能够检测食物中的化学物质并将信号传递到大脑[41]。现如今电子舌大量用于检测肉制品滋味感知。邓亚军等[42]使用电子舌对红烧肉进行味觉特征值分析，食团的咸味呈线性增长，并在后期咀嚼时达到最大值，整个口腔加工过程中咸味变化规律与田星等[43]研究结果基本一致。然而电子舌在检测肉类样品中，其处理方式存在较为复杂，必须转化为液体形式，这导致电子舌无法实时模拟人类口腔感受滋味的过程。XU 等[37]的研究也证实电子舌，且与感官结果并不完全一致。总而言之，电子感觉和人类感觉之间存在一定差异并与感官结果不一致。例如采用电位离子选择电极方法检测火腿发现氯离子浓度降低，但通过 TDS 可得出盐分减少后咸味仍作为主导属性[29]。鉴定风味蛋白方法较为复杂，SEBALD 等[44]开发感官蛋白质组学方法解决上述问题，该方法将目标蛋白质组学分析与感官分析相结合，这种新方法有助于解析唾液和食团蛋白组分变化对其滋味感知影响的分子机制。此外，完善电子感觉器并建立两者之间的实际联系是今后可以考虑的方向之一。

4 口腔加工对香气物质释放与感知的影响

4.1 香气物质动态影响

肉类在咀嚼过程中香气会逐渐释放，质地、食品成分

物性、口腔参数以及滋味物质的释放是影响口腔加工中香气释放的重要因素，通常用香气释放曲线来表示在口腔加工过程中肉类随时间变化而香气释放浓度不同。气味活性值(odor active value, OAV)是决定总体香气特征的贡献。通过 OAV 成功鉴定出盐焗鸡的 67 种风味化合物，并结合香气阈值确定了 19 种挥发性成分为关键香气组分[45]。针对研究大理石花纹牛肉表明脂肪含量的增加能够通过吸附或释放挥发性风味物质，从而延缓其释放[46]。吞咽前和吞咽后的释放机制不同，其中疏水性化合物在吞咽后释放更显著，刘登勇等[47]研究红烧肉在口腔加工过程中发现香气释放可以分为吞咽前和吞咽后两个阶段。在整个过程中，主要挥发性成分基本一致，且咀嚼时间及咀嚼次数与香气释放存在极显著的正相关关系，这与 BOISARD 等[48]的研究结果一致。

电子鼻、气相色谱-离子迁移谱法(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)与气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用在检测食品风味上展现出独特的优势。电子鼻操作便捷以及能够快速检测，但只能区分整体挥发性气味物质以及无法确定具体化合物。对于 GC-IMS 能检测出其挥发性物质的差异性但无法精确定量。而 GC-MS 则是能够更为准确定性定量但操作复杂且用时较长。有研究通过多变量统计方法整合口腔加工参数，解析香气释放机制。XU 等[49]通过偏最小二乘判别分析(partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA)模型确认(*E*,*E*)-2,4-癸二烯醛与己醛对肉类香气的贡献。然而，此方法需要依赖大样本数据，计算复杂度高，这些监测仪器在口腔中芳香化合物的动态检测方面表现出局限性。

4.2　香气物质与感知关联性影响

挥发性化合物的物理、化学刺激生理反应以及心理效应共同形成香气感知，其感知途径可分为来自外部环境的正鼻感知以及来自口腔加工的鼻后感知[50]。肉制品香气的释放和感知贯穿于肉制品口腔加工的整个研究阶段，其中主要通过鼻后感知来完成，如图 1 所示。口腔加工是食物进入人体并产生应有功能的第一道关口，肉制品的风味物质从口腔及咽部通过“吞咽”进入鼻腔从而感知香气，由于肉制品在口腔加工中的香气变化与释放时间较短，导致鼻后香气感知中关键挥发性物质与真实食物中的气味不同。有研究发现干制后虾的香气释放量会随着咀嚼时间的延长而增加[51]。此外，唾液成分也可能干扰香气释放，研究表明唾液稀释会减少鳗鱼中 1-庚醇的释放但对二甲基硫影响较小。通常将挥发性化合物的组成与人类的香气感知联系起来并不简单，研究人员仍然没有完全理解各种成分、它们的相互作用以及它们与生理学的相互作用如何结合产生感官感知[52]。

感官评价是改善肉制品感官与控制质量的有效工具。由于 TI 只关注单一属性，它远不能评估肉制品香气释放的多组分特征并捕捉感知的多维性。因此，已经提出了能够同时测量几个属性的其他定量和定性时间方法。肉制品通常使用 TDS 分析香气释放中占主导作用的香气，ZHAO 等[53]通过 TDS 成功解码了生姜卤牛肉的香气动态，咀嚼初期时生姜辛辣味占据感知主导，随脂质释放增强，咀嚼末期形成肉味与脂肪味感知。对于研究体内香气释放以及鼻后感知是理解人类香气感知的重要途径。因此，结合仪器和动态感官方法，识别香气感知关键挥发性化合物并建立指纹图谱更加有利于理解香气释放与感官感知。此外，电生理学和图像技术作为新型无创技术，用于解析多感官整合的大脑信号，为该领域研究提供了新的技术支撑。

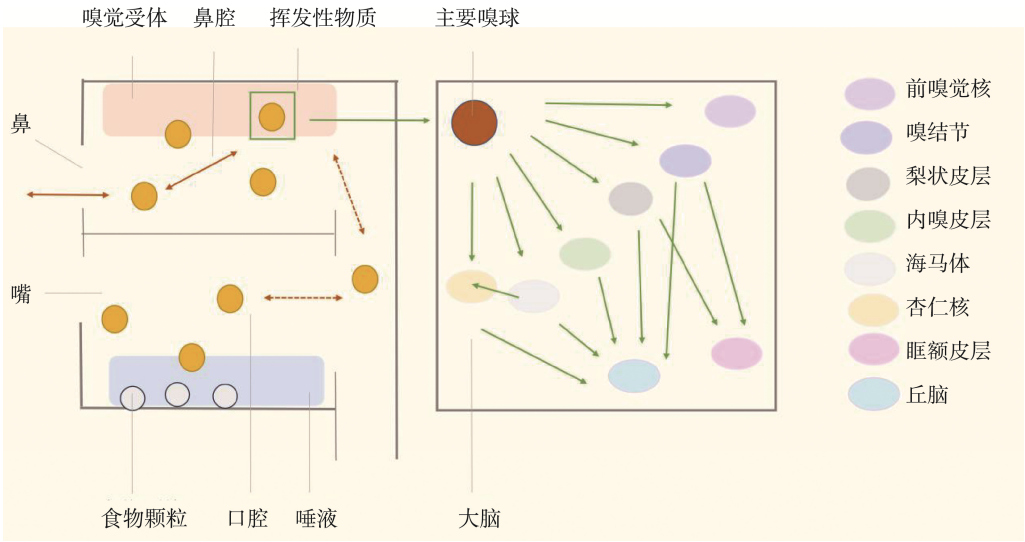


图 1　口腔加工过程中的香气感知机制

Fig.1　Aroma perception mechanism during oral processing

4.3 个体差异影响

消费者在享受美食过程中带有主观色彩，通常体现在个体的感觉和评价系统。为追求感知评估的客观性，研究人员通常采用标准化的感官评价方法并结合科学仪器。然而，个体差异带来研究挑战的同时，也为个性化产品开发提供了独特价值。在研究层面上看，个体差异导致研究难以标准化。咀嚼模式个体差异受年龄以及牙齿状态等因素影响，且个体因感官术语的模糊极易造成混淆。香气感知的个体差异更为复杂，受到个人经验、认知、遗传以及健康状态的影响，其中个人经验和遗传是关键的因素[54–56]。已有研究证实气味偏好存在显著的性别和年龄差异，女性气味敏感度高于男性，老年群体的气味意识高于年轻群体[57]。在咀嚼行为上，男性通常表现出更大的咬合力、咬合尺寸和更快的咀嚼节奏；而老年人则因牙齿数量减少导致咀嚼能力下降，可能减少膳食纤维和生食摄入。此外，文化背景对性别相关的气味情感反应影响不显著，但香气释放的个体差异与咀嚼行为、进食速率及地域差异密切相关。这些生理与感知差异已成为解析肉制品口腔加工过程中香气释放与感官感知的主要障碍[58]。

在动态感官评价中，个体差异干扰尤为明显。动态感官评价中需要在密集的时间点以及在短时间内进行评估可能导致受试者疲劳且注意力不集中，会直接影响评估的准确性。因此，在受试者正式开始评估前需要进行感官培训，如在固定时段的重复训练可以在一定程度上降低干扰因素的影响。

尽管存在诸多挑战，个体差异仍具有积极意义。能够真实反映了消费者感知的多样性，为理解消费群体偏好提供了基础。并且还可以通过解析个体咀嚼行为，揭示不同人群的咀嚼策略，明确其对食团流变特性的影响，进而定制个性化产品[59]。现有研究主要集中在肉制品质地和风味特性上，而不是受试者生理学。未来研究需建立一种创新的方法，结合口腔参数、剂量效应以及质地、风味属性和质地-风味-感知之间跨膜态相互作用对个体生理学进行科学研究，这不仅有助于预测消费者偏好，更能通过个体差异开发个性化肉制品，这些因素最终提供给肉制品生产商并作为设计新产品的附加参数。

5 口腔加工对食品质地-风味-感知交互作用的影响分析

5.1 交互作用的多尺度分析

前文已经论述感知的机制、影响因素以及感官评价法，但感官评估仍然难以解释由于质地、滋味以及香气刺激之间的多方面相互作用。

5.1.1 滋味-香气相互作用

在跨模态相互作用研究中主要聚焦于滋味-香气相互作用。经鼻后途径引发的香气感知通常被认为能够改变味蕾所产生的原有味觉感受。具体而言，气味可以增强味觉的感知，反过来，味觉也能增加气味的强度[60]。当气味和味觉之间的一致性得到保证时，这种跨感官的感知相互作用会更加明显[61]。总体而言，肉制品可能发生相互作用是由于滋味和香气化合物处于超阈值或亚阈值浓度，并且与它的基质有关。已有实验证实这一现象，“肉”“鱼”能增强咸味[4]。OGASAWARA 等[62]研究发现鳕鱼干的香气可诱导不同盐溶液感知鲜味能力的增强并且延长鲜味感知。1-辛烯-3-醇、二甲基二硫等香气化合物可在降低 NaCl 添加量的前提下不影响肉制品的咸味感知强度[63]。气味与味觉通过神经整合机制作用共同塑造风味感知，尽管脑成像显示嗅觉与味觉信号在杏仁核和海马体中进行整合[64]，但具体机制存在争议。此外，尽管通过不同的生理途径感知滋味和香气，但还必须从心理机制角度下解释香气感知变化可能是由于滋味强度的改变。

5.1.2 质地-香气相互作用

有研究已证实了香气会改变某些食品中的质地感知，在 TGase 诱导研究中发现鱼糜凝胶中发现挥发性风味物质的释放与质地变化相关，但其凝胶强度和弹性与风味释放却呈负相关[65–67]。目前研究尚不能揭示口腔加工不同质地特性的香气释放如何影响感官感知。复合食品的香气感知受食用载体食品的影响，单独使用蛋黄酱导致香气释放量和感知强度的降低，而添加载体食品(如面包、土豆等)后由于感官倾倒效应虽然香气的释放增加，但香气的感知强度却有所下降[68]。食品质地变化引发的口腔加工差异影响风味释放，且食品质地-风味跨模态交互作用影响风味感知强度。

5.1.3 检测方法

质地-风味-感知交互作用研究主要以感官评价为基础，并结合新型仪器技术开展。如 BRAUSS 等[69]结合 TI 和大气压化学电离相结合，研究发现调味酸奶的粒径和黏度的差异对香气释放产生影响。SCHLICH 等[70]则结合 TDS 和质子转移反应飞行时间质谱法(proton transfer reaction-time-of-flight-mass spectrometry，PTR-TOF-MS)，在新鲜奶酪研究中通过丰度和优势度指数的对应分析，揭示优势感觉与释放香气之间的显著关系。目前基于 PTR-TOF-MS 开发，提高灵敏度以便能够跟踪微量的关键气味物质，同时成本较低的 GC-IMS 在此领域也具有一定潜力。

结合数据分析为探讨不同质地肉制品的感官属性与风味之间的关系，构建肉类特征风味指纹图谱和感官品质调控网络，揭示质地劣化对风味释放及感官感知的影响规律。如今研究人员正尝试通过建立口腔加工动力学的调控模型，从而揭示肉类质地-风味-感知交互机制。

5.2　食品调控模型构建与验证影响

为深入探究上述交互作用机制，研究者们开发了多种模拟口腔加工过程的模型。其中，孙钟雷等[71]设计并开发了一种仿生食品质地分析仪，可以模拟下颌骨咀嚼运动，用于检测硬度和脆性等质地参数。HARRISON 等[72]提出了一种基于平滑粒子流体动力学力的口腔力模型，能够模拟进食过程中牙齿和舌头之间的力相互作用，该咀嚼模拟器证明了脂肪含量显著影响牛肉酱香气的释放。NISHINARI[73]通过流变学模型证明了舌头运动降低食团黏度并加快甜味物质的扩散速率。PEYRON 等[74]开发了一种人工咀嚼机器，通过模拟牛肉、猪肉的在食用过程中预测挥发性化合物，模拟器仅仅能够反映平均状态，婴幼儿或老年人这类特定的人群无法产生粒径分布并且无法重现推注形成的动力学。针对这类模型，可采用交叉验证的方法评估模型在数据上的表现，验证过程中需要关注模型的预测能力以及其在实际应用中的可行性。与体内研究相比，这类模型缩短了实验时间并且节省了人力成本，但仍存在局限性，且与真实口腔环境存在明显差异。现构建模型多基于静态口腔条件下进行，未考虑实际口腔中唾液分泌的动态响应特性，缺乏咀嚼力的标准化数值，最终影响实验准确性。该模型难以模拟吞咽过程中舌头和喉咙的复杂运动，需开发能够同时实现咀嚼和吞咽的模拟器。此外，咀嚼模拟器的封闭部分的体积及其操作阻碍了风味释放分析系统的优化。目前的研究主要集中在固体食物的硬度、弹性和脆性上，对流质和该液体食物的研究有限，并且吞咽过程研究不充分，需解决模拟器中食团向咽部输送及食道模拟的设计问题；缺乏标准化咀嚼效率评价体系，难以评估模型稳定性与可靠性[75]。

未来研究还面临诸多问题，一方面，口腔黏膜和唾液蛋白酶的差异也会影响口腔中的香气释放行为。另一方面，科学界尚未就人工唾液的配方及其应用条件达成共识，人工唾液无法模拟真实人群唾液并且无法复现真实吞咽神经反馈机制。同时，年龄、饮食和环境条件等多种因素都会影响代谢组学分析的结果，这些在现有模型中均未得到充分考量。此外，这些方法大多检测食物咀嚼后的颗粒或风味模型，与实际的动态变化过程有一定差距。新型模型开发为突破瓶颈提供方向，生物力学光滑粒子流体动力学模型，可耦合固体力学和流体力学的控制原理，食品特性和口腔力学为输入，求解一组微分方程，模拟食物颗粒分解过程以及味觉和风味化合物扩散规律。食品流体-结构-化学耦合模型是一种先进的多尺度计算方法，从分子、中观、宏观多尺度解析食品加工与结构形成机制。计算机方法推动食品化学研究从实验向计算转型，可高精度预测分子特性、结构变化及化学相互作用。此外，在冻藏肉制品领域，未来需构建整合个体差异以及口腔加工动态变化的预测模型，明确质地、风味释放及感官感知调控作用机制，进而通过优化冻藏条件提升产品感官质量，满足健康肉制品开发需求。

5.3　滋味与香气的中枢整合机制及应用前景

滋味与香气的中枢处理具有明确分工，味觉信号主要由岛叶处理，嗅觉信号主要由梨状皮质与杏仁核负责。CHEN 等[76]通过功能性核磁共振成像研究发现，食物关联气味(如甜味关联焦糖、酸味关联葡萄柚)可激活岛叶，提示嗅觉输入能直接调控味觉通路，为跨模态感知交互提供了神经影像证据。眶额叶皮层(orbitofrontal cortex, OFC)是滋味与香气整合的核心枢纽。相关研究显示，酸味气味对 OFC、角回及奖励相关脑区的激活强度显著高于甜味气味，这可能与酸味的进化警示功能相关[77]。此外，气味与味觉的反复关联可形成“嗅觉-味觉学习”，该过程依赖海马体与前额叶的记忆功能，能增强风味感知一致性。WEI 等[78]通过果蝇实验进一步证实，味觉受体神经元可直接响应特定气味并触发摄食行为，表明化学感知整合始于感觉神经元层面，早于大脑的加工过程。从分子机制上看，氢键、疏水相互作用是气味分子-受体结合的主要驱动力，其中 Phe203、 Asn109 等特定氨基酸残基对结合亲和力起关键作用；同时，气味可通过激活多巴胺通路调节奖励机制，进而影响食欲与食物选择偏好。

质地、嗅觉和味觉的神经通路整合示意图如图 2 所示。这一跨模态整合机制为解决高盐、高糖摄入健康问题提供新策略，例如通过咸味气味增强咸度感知以减少 NaCl 摄入；或在牛奶甜点中添加香草气味，可完全或部分抵消 20%减糖量对感官品质的负面影响，便无需大幅调整配方或添加非营养性甜味剂，这一机制具备较强产业应用价值[79]。

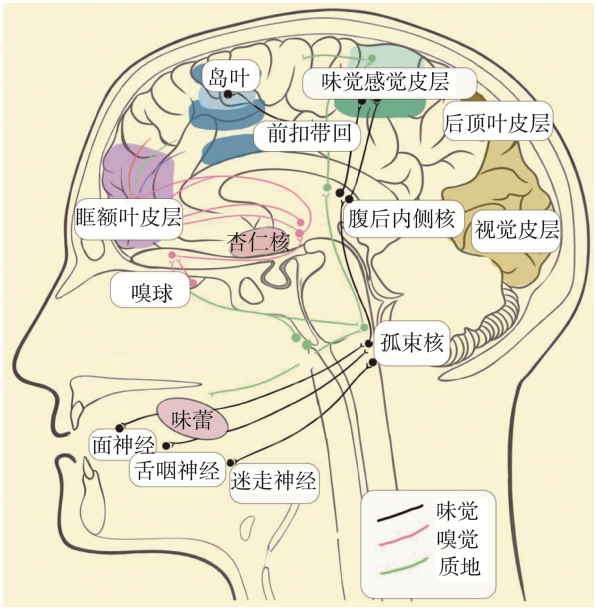


图 2　质地、嗅觉和味觉的神经通路整合示意图

Fig.2　Integration of neural pathways for texture, olfaction and taste

6 讨论与展望

肉制品口腔加工过程中，质地、风味与感知的交互作用是一个涉及多尺度、多模态的复杂系统。风味感知依赖味觉以及香气等多感官输入的中枢整合，而最终感知效果则由大脑化学感觉区的神经过程调控。当前研究已明确质地变化、滋味和香气释放以及感官感知是动态过程，需结合仪器分析与动态感觉方法，才能揭示三者之间的潜在联系。优势度-丰度指数为食品口腔加工提供了从微观颗粒分布到宏观感官体验的量化工具，例如文献[80–82]的占主导地位的丰富性(abundance while dominant, AWD)模型，通过量化特定香气分子在感知优势时相的释放强度实现了有效的分析。当前，在基于 AWD 指数或多区块分析的当前模型之外，还应努力推进综合感官与仪器数据处理[83]。

传统 TPA 模拟咀嚼力度单一，无法复现口腔多向力与温度变化；摩擦学装置虽可量化润滑性，但忽略唾液实时分泌与酶解作用。需开发集成多轴力传感器、温度控制模块与实时唾液灌注系统的口腔仿生机器人，模拟个体化咀嚼模式。PTR-TOF-MS 需外接呼气质谱仪，易干扰自然进食的呼吸节律与吞咽动作。电子鼻以及电子舌的传感器易漂移，且对高脂肉制品选择性差。可通过分子印迹聚合物传感器提升特异性，实现对目标风味物的精准检测。静态感官评分体系忽略了感知随时间变化的动态特性，TDS 等方法虽能捕捉变化但是依赖训练有素的评审团，成本高且难以推广至真实消费场景。需结合眼动追踪与面部表情分析，自动捕捉非言语感知信号，并通过众包平台扩大样本多样性，验证实验室模型的普适性。

未来应开发多维度口腔仿生模拟系统并结合多模态传感器阵列，还原真实口腔环境以及实时监测口腔加工过程。深入探索脑-口腔感知反馈环路的神经机制，结合脑电图技术解析质地、风味信号在中枢神经系统的整合路径，完善质地-风味-感知交互作用的理论体系。在个性化肉制品开发中，针对老年群体可采用快速冻结工艺结合低温短时熟化技术，降低咀嚼难度；针对减脂人群可通过咸味关联香气(如 1-辛烯-3-醇)增强香气感知，在减少食盐添加量的同时兼顾肉制品品质与健康。

7 结束语

本文系统阐述了冻藏肉制品在口腔加工过程中“质地-风味-感知”的动态交互机制，即冻藏引起肉制品基质变化，进而调控其在口腔加工中的质地特性与风味释放；而质地、滋味与香气之间的跨模态感知交互对整体风味感知具有关键作用，该过程受冻藏条件、口腔生理因素及个体差异的共同调控。现有研究多依赖静态模型或单一技术手段，难以全面复刻真实口腔加工的动态复杂性。同时，现有仿生口腔模型亦无法精准复现个体唾液成分以及吞咽反馈等生理异质性。未来研究应聚焦开发更先进的仿生口腔模型，结合神经科学技术手段，并将相关机制应用于冻藏工艺优化、“降糖”“减盐”等个性化产品开发中。

参考文献

[1] PESHUK LV, PRYKHODKO DY. New technologies. Artificial meat as a new source of protein products in the nutrition of modern people [J]. Journal of Chemistry and Technologies, 2023, 31(3): 611–626.

[2] 刘嘉琪, 王慧平, 张鑫, 等. 原料肉冻藏品质劣变机制及其改善策略[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 321–330.
LIU JQ, WANG HP, ZHANG X, *et al*. Deterioration mechanism of and improvement strategies for frozen meat [J]. Food Science, 2024, 45(8): 321–330.

[3] HE Y, WANG X, CHEN J. Current perspectives on food oral processing [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2022, 13(1): 167–192.

[4] 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 HX, ZHENG GM, YU HY, *et al*. Research progress on the effect of the interaction between odor and taste on food flavor perception [J]. Food Science, 2023, 44(9): 259–269.

[5] PU D, SHAN Y, WANG J, *et al*. Recent trends in aroma release and perception during food oral processing: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(11): 3441–3457.

[6] LEE S, JO K, JEONG HG, *et al*. Freezing-induced denaturation of myofibrillar proteins in frozen meat [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(5): 1385–1402.

[7] DANG DS, BASTARRACHEA LJ, MARTINI S, *et al*. Crystallization behavior and quality of frozen meat [J]. Foods, 2021, 10: 2707.

[8] CHEN B, WANG Y, LI K, *et al*. Insights into myofibrillar protein denaturation during freezing: The impact of ice-water interface area [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 304: 140672.

[9] ZHU M, ZHANG J, JIAO L, *et al*. Effects of freezing methods and frozen storage on physicochemical, oxidative properties and protein denaturation of porcine longissimus dorsi [J]. Lwt, 2022, 153: 112529.

[10] ZHANG G, LIN L, ZHENG X, *et al*. Effect of storage period on the quality characteristics of frozen beef and mechanisms of change from the corresponding physical and microstructural perspectives [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(1): 813–823.

[11] LI FF, ZHONG Q, KONG B, *et al*. Deterioration in quality of quick-frozen pork patties induced by changes in protein structure and lipid and protein oxidation during frozen storage [J]. Food Research International, 2020, 133: 109142.

[12] KLUTH IK, TEUTEBERG V, PLOETZ M, *et al*. Effects of freezing temperatures and storage times on the quality and safety of raw turkey meat and sausage products [J]. Poultry Science, 2021, 100(9): 101305.

[13] AL-DALALI S, LI C, XU B, *et al*. Effect of frozen storage on the lipid oxidation, protein oxidation, and flavor profile of marinated raw beef meat [J]. Food Chemistry, 2022, 376: 131881.

[14] CHEN X, ZHANG W, QUEK SY, *et al*. Flavor-food ingredient interactions in fortified or reformulated novel food: Binding behaviors, manipulation strategies, sensory impacts, and future trends in delicious and healthy food design [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(5): 4004–4029.

[15] WOOD JD, ENSER M, FISHER AV, *et al*. Manipulating meat quality and composition [J]. Proceedings of the Nutrition Society, 1999, 58(2): 363–370.

[16] MUELA E, SAÑUDO C, CAMPO M, *et al*. Effect of freezing method and frozen storage duration on lamb sensory quality [J]. Meat Science, 2012,

90(1): 209–215.

[17] ZHANG Y, KIM YHB, PUOLANNE E, *et al*. Role of freezing-induced myofibrillar protein denaturation in the generation of thaw loss: A review [J]. Meat Science, 2022, 190: 108841.

[18] SOYER A, ÖZALP B, ÜLKÜ D, *et al*. Effects of freezing temperature and duration of frozen storage on lipid and protein oxidation in chicken meat [J]. Food Chemistry, 2010, 120(4): 1025–1030.

[19] AL-SHIBLI MA, Al-ALI RM, HASHIM AZ, *et al*. Evaluation of meat and meat product oxidation and off-flavor formation: Managing oxidative changes [J]. Теория И Практика Переработки Мяса, 2024, 8(4): 302–315.

[20] LIU R, DU X, LI Y, *et al*. Research progress on the formation, influencing factors, and mitigation strategies of advanced glycation end products in meat-based foods during frozen storage and processing [J]. Trends in Food Science & Technology, 2025, 163: 105171.

[21] 黄文权, 阚启鑫, 刘果, 等. 冷冻及冻藏过程中鸡肉的食用品质及化学质量属性变化研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(6): 326–336.
HUANG WQ, KAN QX, LIU G, *et al*. Research progress on changes in eating quality and chemical quality attributes of chicken during freezing and frozen storage [J]. Food Science, 2024, 45(6): 326–336.

[22] CHANG Y, LIU Y, BAI Y, *et al*. Effect of different degrees of deep freezing on the quality of snowflake beef during storage [J]. Foods, 2022, 11(15): 2175.

[23] BI YZ, LUO YL, LUO RM, *et al*. High freezing rate improves flavor fidelity effect of hand grab mutton after short-term frozen storage [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 959824.

[24] 马志强, 钟艳, 魏雪林, 等. 不同冻藏时间的猪肉品质比较及其变化机制研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(18): 48–56.
MA ZQ, ZHONG Y, WEI XL, *et al*. Comparison of pork quality in different frozen storage time and its change mechanism [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(18): 48–56.

[25] LUO Y, BI Y, DU R, *et al*. The impact of freezing methods on the quality, moisture distribution, microstructure, and flavor profile of hand-grabbed mutton during long-term frozen storage [J]. Food Research International, 2023, 173: 113346.

[26] PU D, DUAN W, HUANG Y, *et al*. Characterization of the dynamic texture perception and the impact factors on the bolus texture changes during oral processing [J]. Food Chemistry, 2021, 339: 128078.

[27] QIAN S, LIU K, WANG J, *et al*. Capturing the impact of oral processing behavior and bolus formation on the dynamic sensory perception and composition of steamed sturgeon meat [J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100553.

[28] FUNAMI T, NAKAUMA M. Instrumental food texture evaluation in relation to human perception [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107253.

[29] LIU D, DENG Y, GONG A, *et al*. Impact of the breakdown behavior on Chinese traditional stewed pork with brown sauce: Physical properties using microstructural analysis [J]. Journal of Food Quality, 2017, 2017: 4714919.

[30] RODRIGUES SA, YOUNG AK, JAMES BJ, *et al*. Structural changes within a biscuit bolus during mastication [J]. Journal of Texture Studies, 2014, 45(2): 89–96.

[31] PREMPEH NYA, NUNEKPEKU X, MURUGESAN A, *et al*. Ultrasound in the food industry: Mechanisms and applications for non-invasive texture and quality analysis [J]. Foods, 2025, 14(12): 2057.

[32] WANG Y, XIN M, LI Z, *et al*. Food-oral processing: current progress, future directions, and challenges [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(19): 10725–10736.

[33] 田星, 穆馨怡, 邓慧琳, 等. 口腔加工对于食品风味感知及其释放影响的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(8): 186–191.
TIAN X, MU XY, DENG HL, *et al*. Research progress on the influence of oral processing on food flavor perception and release [J]. Food Research and Development, 2021, 42(8): 186–191.

[34] LAVERGNE MDD, DELFT MV, VELDE FVD, *et al*. Dynamic texture perception and oral processing of semi-solid food gels: Part 1: Comparison between QDA, progressive profiling and TDS [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 207–217.

[35] LORIDO L, HORT J, ESTÉVEZ M, *et al*. Reporting the sensory properties of dry-cured ham using a new language: Time intensity (TI) and temporal dominance of sensations (TDS) [J]. Meat Science, 2016, 121: 166–174.

[36] ZHANG M, ZHAO X, LIU D, *et al*. Effects of the degree of oral processing on the properties of saliva-participating emulsions: Using stewed pork with brown sauce as the model [J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(1): 275–282.

[37] XU N, ZENG X, WANG P, *et al*. Investigation on taste characteristics and sensory perception of soft-boiled chicken during oral processing based on electronic tongue and electronic nose [J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(1): 313–326.

[38] 曹振霞. 口腔加工过程中红烧肉香气释放规律及其影响因素[D]. 锦州: 渤海大学, 2019.
CAO ZX. Release regularity and influencing factors of braised pork aroma during oral processing [D]. Jinzhou: Bohai University, 2019.

[39] BADER M, STOLLE T, JENNERWEIN M, *et al*. Chemosensate-induced modulation of the salivary proteome and metabolome alters the sensory perception of salt taste and odor-active thiols [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(29): 7740–7749.

[40] 张一纯, 陈艳红, 李利君, 等. 味觉受体研究热点分析[J]. 食品科学, 2022, 43(17): 332–343.
ZHANG YC, CHEN YH, LI LJ, *et al*. Analysis of research hotspots on taste receptors [J]. Food Science, 2022, 43(17): 332–343.

[41] SON M, PARK TH. The bioelectronic nose and tongue using olfactory and taste receptors: Analytical tools for food quality and safety assessment [J]. Biotechnology Advances, 2018, 36(2): 371–379.

[42] 邓亚军, 刘登勇, 郭晨, 等. 红烧肉咀嚼过程中咸味和鲜味的释放规律[J]. 食品科学, 2017, 38(18): 80–86.
DENG YJ, LIU DY, GUO C, *et al*. Release regularity of saltiness and umami in braised pork during chewing [J]. Food Science, 2017, 38(18): 80–86.

[43] 田星, 陈敏, 周明玺, 等. 口腔加工过程中传统干腌肉咸味释放规律[J]. 肉类研究, 2019(12): 1–6.
TIAN X, CHEN M, ZHOU MX, *et al*. Release regularity of saltiness in traditional dry-cured meat during oral processing [J]. Meat Research, 2019(12): 1–6.

[44] SEBALD K, DUNKEL A, HOFMANN T, *et al*. Sensoproteomics: A new approach for the identification of taste-active peptides in fermented foods [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(42): 11092–11104.

[45] JIANG H, ZHANG M, YE JJ, et al. Optimization of volatile component analysis technique for salt-baked chicken [J]. Journal of Nutrition and Food Processing, 2023, 6(2): 133.

[46] FRANK D, KACZMARSKA K, PATERSON J, *et al*. Effect of marbling on volatile generation, oral breakdown and in mouth flavor release of grilled beef [J]. Meat Science, 2017, 133: 61–68.

[47] 刘登勇, 曹振霞. 红烧肉口腔加工过程中的香气释放规律[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 164–171.
LIU DY, CAO ZX. Aroma release regularity of braised pork during oral processing [J]. Food Science, 2020, 41(4): 164–171.

[48] BOISARD L, TOURNIER C, SEMON E, *et al*. Salt and fat contents influence the microstructure of model cheeses, chewing/swallowing and in vivo aroma release [J]. Flavour & Fragrance Journal, 2014, 29(2): 95–106.

[49] XU Y, ZHANG D, LIU H, *et al*. Comprehensive evaluation of volatile and nonvolatile compounds in oyster cuts of roasted lamb at different processing stages using traditional Nang roasting [J]. Foods, 2021, 10(7): 1508.

[50] LE-QUÉRÉ JL, SCHOUMACKER R. Dynamic instrumental and sensory methods used to link aroma release and aroma perception: A review [J]. Molecules, 2023, 28(17): 6308.

[51] 何晶, 邱丽霞, 张迪, 等. 热风干制凡纳滨对虾口腔加工过程中香气感知特性的研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(13): 223–231.
HE J, QIU LX, ZHANG D, *et al*. Study on aroma perception characteristics of hot-air dried *Litopenaeus vannamei* during oral processing [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(13): 223–231.

[52] HUANG X, ZHAO H, GUO R, *et al*. The interaction relationship of aroma components releasing with saliva and chewing degree during grilled eels consumption [J]. Foods, 2023, 12(11): 2127.

[53] ZHAO Y, ZHANG R, HE W, *et al*. Characterization of aroma release and perception during ginger-infused stewed beef oral processing [J]. Food Chemistry, 2025, 475: 143155.

[54] GISLADOTTIR RS, IVARSDOTTIR EV, HELGASON A, *et al*. Sequence variants in TAAR5 and other loci affect human odor perception and naming [J]. Current Biology, 2020, 30(23): 4643–4653.

[55] JACOBSON A, GREEN E, HAASE L, *et al*. Differential effects of BMI on brain response to odor in olfactory, reward and memory regions: Evidence from fMRI [J]. Nutrients, 2019, 11(4): 926.

[56] BRANN DH, TSUKAHARA T, WEINREB C, *et al*. Non-neuronal expression of SARS-CoV-2 entry genes in the olfactory system suggests mechanisms underlying COVID-19-associated anosmia [J]. Science Advances, 2020, 6(31): eabc5801.

[57] BAMBA I, MITSUDA M. Study of gender and age differences in olfaction and olfactory evaluation: Focusing on olfactory experience and preferenc [J]. Journal of the Japan Society for the Environment, 2024, 55(2): 90–97.

[58] KETEL EC, ZHANG Y, JIA J, *et al*. Comparison of and relationships between oral physiology, anatomy and food oral processing behavior of Chinese (Asian) and Dutch (Caucasian) consumers differing in age [J]. Physiology & Behavior, 2021, 232: 113284.

[59] YVEN C, PATARIN J, MAGNIN A, *et al*. Consequences of individual chewing strategies on bolus rheological properties at the swallowing threshold [J]. Journal of Texture Studies, 2012, 43(4): 309–318.

[60] VOILLEY A, ETIÉVANT P. Flavour in food [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2006.

[61] LABOURÉ H, REPOUX M, COURCOUX P, *et al*. Inter-individual retronasal aroma release variability during cheese consumption: Role of food oral processing [J]. Food Research International, 2014, 64: 692–700.

[62] OGASAWARA Y, MOCHIMARU S, UEDA R, *et al*. Preparation of an aroma fraction from dried bonito by steam distillation and its effect on modification of salty and umami taste qualities [J]. Journal of Food Science, 2016, 81(2): C308–C316.

[63] BLANKENSHIP ML, GRIGOROVA M, KATZ DB, *et al*. Retronasal odor perception requires taste cortex, but orthonasal does not [J]. Current Biology, 2019, 29(1): 62–69.

[64] SMALL DM, PRESCOTT J. Odor/taste integration and the perception of flavor [J]. Experimental Brain Research, 2005, 166(3-4): 345–357.

[65] AN Y, XIONG S, LIU R, *et al*. The effect of cross-linking degree on physicochemical properties of surimi gel as affected by MTGase [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(15): 6228–6238.

[66] FANG M, XIONG S, JIANG Y, *et al*. In vitro pepsin digestion characteristics of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi gels with different degrees of cross-linking induced by setting time and microbial transglutaminase [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(31): 8413–8430.

[67] AN Y, XIONG S, QIAN Y, *et al*. *In vivo* and *in vitro* aroma release in surimi gel with different cross-linking degrees by proton transfer reaction-mass spectrometry [J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131502.

[68] ECK AV, STIEGER M. Oral processing behavior, sensory perception and intake of composite foods [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 106: 219–231.

[69] BRAUSS MS, LINFORTH RST, CAYEUX I, *et al*. Altering the fat content affects flavor release in a model yogurt system [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(5): 2055–2059.

[70] SCHLICH P, THOMAS A, VISALLI M, *et al*. Collecting and analysing in vivo aroma release and perception by pairing nosespace PTR-ToF-MS and temporal dominance of sensations [C]. In Flavour Science: Proceedings of the XIV Weurman Flavour Research Symposium, 2015.

[71] 孙钟雷, 孙永海, 李宇, 等. 仿生食品质构仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 230–232.
SUN ZL, SUN YH, LI Y, *et al*. Design and experiment of bionic food texture analyzer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 230–232.

[72] HARRISON SM, CLEARY PW. Towards modelling of fluid flow and food breakage by the teeth in the oral cavity using smoothed particle hydrodynamics (SPH) [J]. European Food Research and Technology, 2014, 238(2): 185–215.

[73] NISHINARI K. Rheology, food texture and mastication [J]. Journal of Texture Studies, 2004, 35(2): 113–124.

[74] PEYRON MA, WODA A. An update about artificial mastication [J]. Current Opinion in Food Science, 2016, 9: 21–28.

[75] GUO Y, ZHAO Q, LI T, *et al*. Masticatory simulators based on oral physiology in food research: A systematic review [J]. Journal of Texture Studies, 2024, 55(5): e12864.

[76] CHEN YP, DING Z, YU Y, *et al*. Recent advances in investigating odor-taste interactions: Psychophysics, neuroscience, and microfluidic techniques [J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 138: 500–510.

[77] JI H, PU D, SU L, *et al*. Computational approaches for decoding structure-saltiness enhancement and aroma perception mechanisms of odorants: From machine learning to molecular simulation [J]. Food Research International, 2025, 202: 115707.

[78] WEI H, LAM TKC, KAZAMA H. Odors drive feeding through gustatory receptor neurons in Drosophila [J]. Elife, 2025, 13: RP101440.

[79] WANG J, ZHANG Q, FAN W, *et al*. Deciphering olfactory receptor binding mechanisms: A structural and dynamic perspective on olfactory receptors [J]. Frontiers in Molecular Biosciences, 2025, 11: 1498796.

[80] DEUSCHER Z. Identifier les marqueurs clés de la qualité organoleptique des chocolats pour prédire leurs caractéristiques sensorielles [D]. Dijon: University of Burgundy, 2019.

[81] DEUSCHER Z, ANDRIOT I, SÉMON E, *et al*. Dark chocolates organoleptic differences: A PTR-ToF-MS success story [C]. The 8th International Conference on Proton Transfer Reaction Mass Spectrometry and its Applications. Innsbruck University Press, 2019.

[82] DEUSCHER Z, ANDRIOT I, CORDELLE S, *et al*. Nosespace of dark chocolates differing in sensory characteristics using PTR-TOF-MS and link to flavour perception through simultaneous temporal dominance of sensations (TDS) [C]. Wartburg Symposium on Flavour Chemistry and Biology, 2019.

[83] PELTIER C, VISALLI M, LABOURÉ H, *et al*. Automatic pre-treatment and multiblock analysis of flavor release and sensory temporal data simultaneously collected *in vivo* [J]. Journal of Chemometrics, 2024, 38(5): e3450.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)