

皮若冰, 李大鹏, 洪惠, 等. 肉制品中减盐策略研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 408–415. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060248

PI Ruobing, LI Dapeng, HONG Hui, et al. Research Progress on Sodium Salt Reduction Strategies in Processed Meat Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(13): 408–415. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060248

· 专题综述 ·

肉制品中减盐策略研究进展

皮若冰¹, 李大鹏¹, 洪 惠^{1,2}, 戴瑞彤^{1,*}

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083;

2. 中国农业大学兴化健康食品产业研究院, 江苏兴化 225700)

摘 要: NaCl 具有增强食品风味、改善食品质地、抑制微生物生长、延长食品货架期等功能性质。但摄入过量的食盐会增加患高血压、骨质疏松和心脑血管疾病的风险。因此合理控制钠盐的摄入量并寻求合适的钠盐替代品在肉制品生产加工领域至关重要。文章综述了现有的肉制品中减盐策略, 总结了现有的钠盐替代品种类、特性及其替代效果, 以及超声波、超高压等新兴技术在减盐肉制品中的应用, 旨在探求经济有效的钠盐替代策略, 为未来低盐肉制品生产提供理论依据和发展方向。

关键词: 肉制品, 减盐, 无机盐替代, 风味增强剂, 苦味阻滞剂, 新兴技术

中图分类号: TS251.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)13-0408-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060248



本文网刊:

Research Progress on Sodium Salt Reduction Strategies in Processed Meat Products

PI Ruobing¹, LI Dapeng¹, HONG Hui^{1,2}, DAI Ruitong^{1,*}

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Xinghua Industrial Research Centre for Food Science and Human Health, China Agricultural University, Xinghua 225700, China)

Abstract: Sodium chloride has the functional properties of enhancing food flavor, improving food texture, inhibiting the growth of spoilage bacteria, and extending the shelf life of food. However, excessive intake of salt could lead to the increased risk of hypertension, osteoporosis, cardiovascular and cerebrovascular diseases. Therefore, it is very important to control the amount of sodium salt intake and seek suitable sodium salt substitutes, especially in the field of meat production and processing. By reviewing the existing domestic and foreign literatures, this article reviews the existing salt reduction strategies in meat products, summarizes the existing sodium salt substitute varieties, attributes and effects, as well as the application of ultrasound, ultra-high pressure and other emerging technologies in low-salt meat products. The paper aims to provide theoretical basis and development direction for the future low-salt meat products and to explore cost-effective sodium salt substitution strategies.

Key words: meat products; salt reduction; replacement of inorganic salt; flavor enhancer; bitterness blocker; emerging technology

食盐中含有 90% 以上的 NaCl, 是食品加工过程中最常用的食品添加剂之一, 将 NaCl 添加到肉制品中能为肉制品提供咸味, 增强肉制品风味; 降低肉制品水分活度, 抑制病原体 and 微生物生长, 延长货架期;

溶解肌原纤维蛋白并诱导蛋白质解折叠, 提高蛋白质的胶凝性能, 改善加工特性; 增强蛋白质水合作用, 并促进蛋白质之间的结合, 从而增加产品嫩度, 改善肉制品质地^[1-2]。

收稿日期: 2021-06-29

基金项目: “十三五”国家重点研发计划“中华传统食品工业化加工关键技术研究与装备开发(项目编号 2016YFD040040302)。

作者简介: 皮若冰(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 肉品科学, E-mail: piruobing1005@163.com。

* 通信作者: 戴瑞彤(1966-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 肉品科学, E-mail: dairuitong@hotmail.com。

食盐是人类饮食中钠的主要来源,摄入过量的钠会提高人类患高血压,骨质疏松症,肾结石和心血管疾病的风险。因此,合理控制食品中的 NaCl 含量至关重要。世界卫生组织(WHO)建议成人的食盐摄入量应 $<5\text{ g/d}$ ($<2\text{ g 钠/d}$)^[3]。肉和肉制品是大多数欧洲国家饮食中钠摄入量的主要来源之一^[4],减少肉类制品中食盐用量通常会导致肉制品水分含量、水分活度和蛋白水解程度的增加,以及蛋白质凝胶性能的破坏,降低产品整体可接受性^[5]。因此,如何在减少食盐(钠)摄入量的同时保障肉制品的感官属性、功能特性和贮藏性质尤为重要。本文将对肉制品中现有的减盐方式及其应用进行综述和总结。

1 主要减盐策略

目前的减盐策略主要包括以下几种方式:一是降低食品中所添加盐(NaCl)的含量;二是利用其他无机盐替代部分 NaCl;三是利用风味增强剂(增味剂)和苦味阻滞剂(掩味剂)替代部分盐从而改善食品的风味和香气;四是将超声波、超高压、微粉化等新兴技术应用于低盐食品当中以加快传质速度或改变盐晶体的结构。另外将这些方式结合使用也是减盐肉制品生产加工领域常见的策略之一,这些方式在多种食品生产加工领域均有着成功的应用(图 1)。

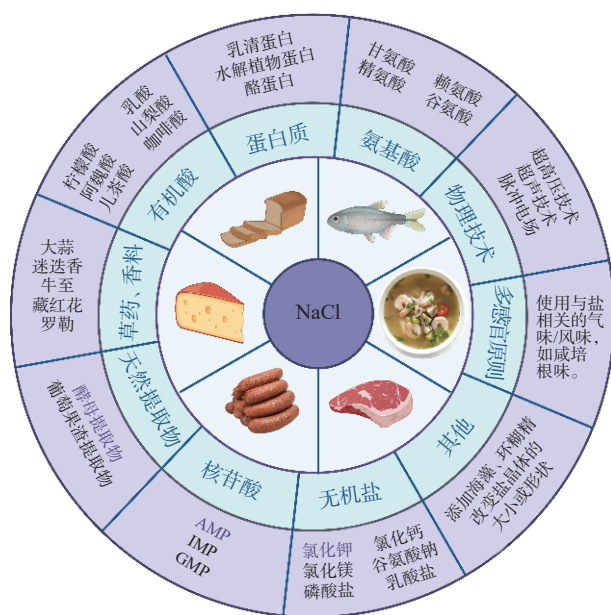


图 1 食品中主要减盐策略

Fig.1 Main salt reduction strategies in food

2 降低肉制品中钠盐添加量

肉制品中盐含量的降低不仅会影响感知到的肉品咸味,还会影响肉制品的质地和水合作用等感官特性,通常会造成产品物理性能和功能性质的改变,缩短食品贮藏期,导致肉制品风味强度和消费者可接受度降低^[6]。因此,仅通过降低盐浓度来实现肉制品减盐在实际生产中具有一定的局限性。

某些食品生产商发现通过消费者适应策略来隐形减少配方中的盐是一种有效的减盐策略。即确定

保障食品功能和感官属性所需的最低盐用量,当盐浓度超过该用量时,通过减少配方中的盐含量来实现肉制品减盐的目的^[7]。长期采用该策略时,消费者可能不会觉察到明显的差异。不过这种策略同样存在着实际限制,只有整个肉制品行业均采用该策略才能确保公平的市场竞争环境,在目前竞争激烈的食品领域,这种减盐策略并非厂家的最佳选择。

3 钠盐替代品

近年来,肉制品工业乃至整个食品行业致力于通过选择合适的钠盐替代品来弥补低钠盐肉制品的咸味缺失,同时保障原有产品感官属性和风味品质,以生产具有良好品质的低盐肉制品、满足消费者对于绿色健康产品的需求。主要的钠盐替代品包括无机盐替代品、风味增强剂和苦味阻滞剂等。这些替代品除了会影响肉制品咸味之外,还可能会影响其他重要的肉制品属性,如无机盐可能会影响产品的持水量、水分活度和功能性质^[8];乳酸及其盐类可以通过抑制某些微生物的生长来延长食品的贮藏期^[9];酵母提取物、香料、草药、味精、酶和海藻等增味剂会改变产品的滋味。但替代比例过高往往会造成肉制品感官品质的降低以及风味的劣变^[10]。

3.1 无机盐替代品

3.1.1 氯化盐替代品 由于各种中性盐的离子强度和暴露的带电基团存在着一定的差异,因此不同的氯化盐对肉类产品的影响不同^[1]。通常情况下只有 Na^+ 和 Li^+ 是具有咸味的阳离子,但是由于 Li^+ 具有毒性,因此不能作为 NaCl 的替代品。通过其他氯化盐(例如氯化钾(KCl)、氯化钙(CaCl_2)和氯化镁(MgCl_2))等物质代替肉制品中部分或全部 NaCl 是常用的钠盐替代策略之一,可以有效地降低肉制品中的钠含量,从而获得具有相似理化特性和安全性的低钠肉制品。同 Na^+ 相似,二价阳离子(Ca^{2+} 和 Mg^{2+})和一价阳离子(K^+)在凝胶化过程中也能够促进肌原纤维蛋白的溶出,且在较低浓度下, K^+ 和 Mg^{2+} 具有与 Na^+ 相当的肌原纤维蛋白的溶解能力,能够形成有序的三维凝胶网络^[11]。

KCl 是最常用的盐替代品,具有与 NaCl 十分相近的味道。钾具有抗高血压的特性,推荐摄入量也比钠高得多,且对不同致病细菌具有与钠相当的抑制作用^[12]。用 KCl 代替 50% 的 NaCl 不会改变牛肌原纤维蛋白(MP)凝胶的持水量和质地特性^[13]。研究表明在相同摩尔浓度条件下,添加 KCl 的鱼糜除 pH 略高外,品质和性能与添加 NaCl 的鱼糜十分相似^[14]。但是 KCl 的添加通常会使肉制品产生苦味、金属味或化学味等不良风味。研究发现当 KCl 的替代比例超过 30% 时,会导致熟汉堡的适口性变差,存在感官上的局限性^[15]。

相比于 K^+ 而言, Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 较难渗透到肌肉组织内部,与用 NaCl 腌制的火腿相比,用 NaCl 和 KCl 混合盐腌的低钠火腿的腌制时间延长多达 16 d(增

加 32%), 而用 KCl、CaCl₂ 和 MgCl₂ 混合盐腌的低钠火腿腌制时间会延长达 26 d(增加 52%)^[16]。

Mg²⁺和 Ca²⁺还会轻微改变蛋白质的持水能力、溶解度、凝胶性能和组织蛋白酶活性^[17]。当 CaCl₂ 与 NaCl 结合使用时咸味感增强, 但大剂量的 CaCl₂ 会产生具有刺激性的涩味^[18]。在较低摩尔浓度条件下, 与钠盐对照组相比添加 MgCl₂ 的鱼糜持水力显著降低($P<0.05$)^[14]。在鸡胸肉热诱导肌原纤维蛋白凝胶中, 用 MgCl₂ 和 CaCl₂ 替代部分 NaCl 后, 蛋白间疏水作用增强, 而氢键和静电作用减弱, 且凝胶硬度增加^[19]。在较低取代比例下, 与 0.05 mol/L MgCl₂ 或 0.05 mol/L CaCl₂ 替代物相比, 0.15 mol/L KCl 能够更好地提高猪背最长肌肌原纤维蛋白的凝胶强度并改善凝胶结构^[20]。Zheng 等^[1] 研究发现当猪肉中 NaCl 被 KCl 和 MgCl₂ 以较低的取代率(25%)部分取代时, 肌原纤维蛋白氧化程度较低, 肌原纤维蛋白凝胶表现出致密的网络结构, 有望改善低钠凝胶产品的功能特性。

3.1.2 其他无机盐替代品 MgSO₄ 或其他铵盐化合物也具有咸味, 可用作肉制品 pH 调节剂, 但由于 MgSO₄ 同样会产生苦味和异味, 限制了其在低盐肉制品中的应用。

海盐是表面粗糙且不规则的块状盐的聚集体, 通常具有较高的孔隙率和溶解速度, 以及比精盐更强烈的咸味和香气^[21]。但其往往含有不同百分含量的钙盐、钾盐和镁盐(如 MgCl₂、MgSO₄、KCl、CaSO₄) 等物质, 这些化合物会导致肉制品产品特性和风味的改变^[22], 并且与食盐相比, 海盐含杂质较多, 品质也更差, 因此一般用于腌制食品或者做盐焗使用。

乳酸盐(如乳酸钾和乳酸钙)作为钠盐替代品已在加工肉中有了成功的应用, 同时其还可以作为抗菌剂来延长肉制品贮藏期。研究发现将乳酸钾添加到咸牛肉中能够在不影响产品感官属性的同时降低蒸煮损失, 提高咸牛肉的持水能力^[23]。同样的, 向低盐干腌火腿中添加乳酸钾能够抑制干腌阶段微生物的生长, 而不会对干腌火腿的颜色, 风味或质地产生负面影响^[24]。

磷酸盐也是加工肉制品中常用的保水剂, 能够显著降低蒸煮损失并提高产品感官性能。添加 0.4% 的三聚磷酸钠和其他磷酸盐(六偏磷酸钠和酸性焦磷酸钠)可以改善乳液的稳定性, 减少火鸡产品中 40% 的 NaCl 用量^[25]。添加磷酸盐可使熟制香肠的 NaCl 含量降低到 1.4%, 而不会造成香肠的原有风味的丧失^[26]。

3.2 风味增强剂和苦味阻滞剂

KCl、MgSO₄ 和某些水解蛋白肽作为钠盐替代品应用于肉制品时往往受到苦味的限制, 因此通常需与风味增强剂或苦味阻滞剂结合使用来掩蔽其不良风味。风味增强剂本身不会产生咸味, 但会使咸味受体更加敏感, 从而影响人们对于肉制品咸味强度的

感知^[27]。另外, 许多增味剂还具有特殊的挥发性气味, 能够通过味觉和气味的相互作用弥补低盐肉制品中的咸味缺失^[28]。苦味阻滞剂则能够通过干扰味觉受体或味觉传导机制, 以及苦味感知途径来掩蔽肉制品中的苦味^[29]。常用的风味增强剂和苦味掩蔽剂主要包括天然提取物、氨基酸、柠檬酸、谷氨酸钠、核苷酸、水解蛋白、磷酸盐、乳酸盐、草药和香料等物质。

3.2.1 天然提取物 某些天然提取物是肉制品中优良的风味改良剂。酵母提取物(yeast extract)是多种挥发性香气化合物的天然来源, 含有多种挥发性化合物的前体, 如多肽、核苷酸、维生素和氨基酸等。此外, 它还含有许多活性肽及鲜味化合物, 可以增强肉制品的鲜味和咸味感, 使食品风味更加丰富和醇厚, 从而改善低钠肉制品的风味^[29]。

酵母提取物目前已成功应用于减盐发酵香肠等多种减盐食品。研究发现利用复合低钠盐替代品(1.0% NaCl、0.3% KCl、0.3% MgCl₂、0.4% 乳酸钾、1.0% 酵母提取物)加工的酱牛肉能够使钠盐添加量降低 50%, 而不会显著改变酱牛肉的品质、组织状态和总体可接受性^[30]。添加 1.3% NaCl 和 0.33% 的酵母提取物, 以及添加 1.27% NaCl、0.2% 酵母提取物和 0.16% 甘氨酸均可以使熟火腿中的盐含量降低 20%, 且与对照组(1.63% NaCl)熟火腿的总体可接受性没有显著差异^[31]。

葡萄酒加工副产物能够赋予低盐肉制品独特的挥发性风味, 其中含有丰富的多酚, 能够抑制蛋白质和脂质氧化, 并具有优异的抗氧化性和抗菌性能, 能够抑制低盐肉制品的腐败, 但可能会使肉制品产生较强的涩味感^[32]。Javier 等^[33] 研究发现由无籽红葡萄酒果渣制成的调味料具有很强的抗氧化活性, 能够显著抑制牛肉馅饼的脂质氧化, 在肉类产品存储过程中能够延迟腐烂气味的产生, 具有潜在的应用价值。

3.2.2 氨基酸 甘氨酸是食品中结构最简单的氨基酸, 通常用于制备肉类调味料。甘氨酸能够促进美拉德反应的进行和肉类香气的产生, 还能够增加火腿的硬度和咀嚼性, 已被用作咸牛肉、干猪肉等产品中的调味剂^[34]。甘氨酸还能够掩蔽食品中的苦味, 甘氨酸和乳酸钾混合物在发酵香肠中可替代 40% 的 NaCl 而无明显苦味产生^[35]。当酵母提取物与 NaCl 或甘氨酸结合使用时, 还可以增加火腿的风味和嫩度。

赖氨酸具有咸味, 几乎没有酸味, 丙氨酸具有甜味, 且味道鲜美柔和^[36]。钠盐、钾盐、镁盐与氨基酸(如赖氨酸)组合使用可以掩盖 KCl 产生的风味缺陷^[37]。Wen 等^[38] 通过向低钠哈尔滨红肠中添加 KCl、氨基酸等添加剂(20% KCl、4% 赖氨酸、1% 丙氨酸、0.5% 柠檬酸、1% 乳酸钙和 3.5% 麦芽糊精), 促进了挥发性风味化合物的形成, 且脂质和蛋白质氧化程度较低, 改善了低钠哈尔滨红肠的风味, 成功替代了红肠中 30% 的 NaCl。

精氨酸是条件必需氨基酸, 可以有效改善食品

的感官缺陷,并调节肉制品风味,提高总体接受度^[39]。组氨酸能够预防肥胖,并改善肉制品的水分分布并促进挥发性化学物的产生^[40]。用 KCl 代替 60% NaCl 制成的低脂博洛尼亚香肠,在添加 1% 精氨酸和 0.2% 组氨酸后可以有效减少由添加 KCl 引起的香肠感官品质缺陷并减少水分流失^[41]。

3.2.3 有机酸 有机酸可以降低肉制品的 pH, 通常在某些食品中用作化学防腐剂。在正常使用浓度下,大多数有机酸的钠含量比 NaCl 少得多。然而许多有机酸本身具有很强的酸味,限制了它们在食品中以较高浓度使用^[42]。柠檬酸具有令人愉悦的酸味,且在水中溶解度较高,在食品工业领域有着广泛的应用。柠檬酸不仅能够抑制肉制品中微生物的生长,还能够调节 pH、酸味并增强风味,在加工肉类中起到抗氧化剂的作用^[43]。另外,琥珀酸钾和苹果酸钾等有机酸盐也可用于替代肉制品中的钠盐。

3.2.4 谷氨酸钠 谷氨酸钠(MG)等鲜味物质具有调节甜味、增强咸味的能力,能够抑制味蕾对酸味或苦味的感知,可以有效改善低盐肉制品整体的风味和感官属性,提高低钠肉制品的可接受性,适宜用于替代肉制品中的钠并降低钠含量^[44]。Pedro 等^[45]利用 KCl 和谷氨酸钠替代干腌兔腿中 50% 的 NaCl, 结果发现 MG 的添加有效地补偿了低钠兔腿的咸味缺失并提高了消费者的可接受性,且兔腿具有高蛋白(>31%)和低脂肪(<6%)的特性,其 pH、水分活度和挥发性风味均与正常钠盐干腌兔腿无显著差异。

3.2.5 核苷酸 5'-核苷酸类物质能够结合苦味反应受体或干扰受体蛋白偶联,从而抑制奎宁等苦味化合物的体外反应,阻断味觉感受器细胞中味觉素诱导素的激活,阻止味觉神经的模拟,起到掩蔽不良风味的作用^[46]。AMP(腺苷—磷酸)是最常用的苦味阻滞剂之一,能够抑制小鼠的电生理反应和对苦味的感知,但对小鼠对 NaCl、盐酸或蔗糖的感知无显著影响^[47]。与仅添加 KCl 的鸡汤相比,添加 AMP 可显著减弱低钠鸡汤的苦味并提升咸味和鲜味^[22]。

GMP(鸟苷—磷酸)和 IMP(肌苷—磷酸)等 5'-核苷酸也是非常有效的增味剂,二者之间也存在着协同作用,将 IMP 和 GMP 混合可以使它们的阈值降低约 50%,并抑制部分苦味、涩味和酸味,增强甜咸口感^[48]。在谷氨酸钠中加入少量的 IMP 会降低谷氨酸钠的检测阈值,商业上常常通过向味精中添加少量 IMP 或 GMP 来减少谷氨酸钠的使用量,从而降低生产成本^[49],结构如图 2 所示。

3.2.6 草药与香料 目前很多研究将草药和香料作为钠盐替代品应用于肉制品当中,草药和香料等植物衍生品具有独特的风味特性,可用于补偿由于盐含量减少所造成的风味缺陷,现已被证实是减少盐摄入量的有效方法之一。牛至、迷迭香、罗勒等草药能够以较高的百分比代替 NaCl 而不会影响消费者的总体可接受度^[50]。不同种类的草药和香料之间还存在着

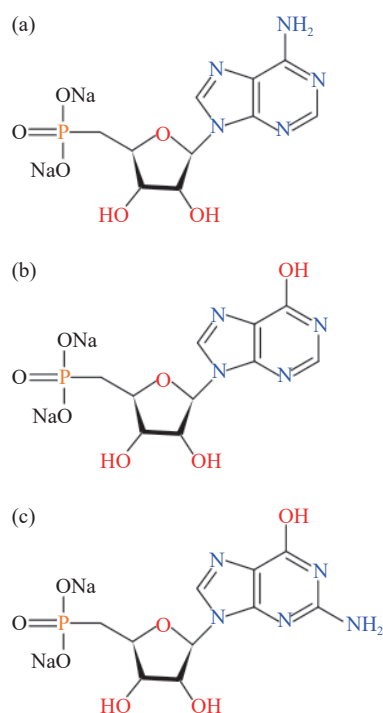


图 2 不同呈味核苷酸的化学结构

Fig.2 The chemical structure of different flavoring nucleotides
注: (a)腺苷酸二钠(AMP); (b)肌苷酸二钠(IMP); (c)鸟苷酸二钠(GMP)。

协同作用,将草药和香料混合物添加到低盐肉制品中通常会大大增强肉制品风味,取得比单一调味料更好的替代效果,替代更高比例的钠盐^[7]。

添加这些植物来源的调味料不会破坏肉制品的风味和微生物稳定性,还具有潜在的降低血压的功能性质。罗勒提取物具有抗氧化、抗炎功效,以及清除活性氧自由基的能力,能够发挥降血脂作用来保证正常的血压水平^[51]。大蒜、辣椒、生姜、芥末等香料会产生特殊的风味,降低人们对咸味食物的需求,并有助于降低血压,但是大蒜可能会导致较长时间的口臭和呼吸不良^[50,52]。

3.2.7 其他替代品 咸味增强剂还包括大豆蛋白、酪蛋白、胶原蛋白、乳清蛋白等非肌肉蛋白,以及黄原胶、角叉菜胶、果胶等食品胶体,它们能够稳定 pH,提升低盐肉制品的理化性能和功能特性,并有助于肉类风味的改善^[8,53]。Kirsti 等^[54]研究发现高矿物质的牛乳渗透物能够改善鱼糜的质地和持水性能,提升鱼糜的咸味,并有效降低鱼糜中的盐含量而不会造成鱼糜感官品质的劣化。另外,海藻也被视为一种有前途的盐替代品。海藻是多种矿物质、微量元素和蛋白质的丰富来源,可在加工肉的开发过程中充当增味剂。海藻还具有独特的风味特征,可以弥补低盐肉制品的风味损失^[55]。

4 新兴技术

通过超高压处理、脉冲电场和超声波等非热食品加工处理技术,能够在保障肉制品质量和安全的前提下减少食盐添加量,并改善低盐肉制品的品质,也

是生产减盐肉制品的可靠方法。

4.1 超声波技术

超声波可以在 20 kHz 至 100 MHz 的频率范围内以机械波的形式通过任何介质^[56]。通过超声技术不仅能够灭活肉制品中的腐败微生物,还可以辅助肉制品进行冷冻、切割、发酵和减盐干燥,提高传质速率,减少肉制品的腌制时间。超声波技术已经在肉制品腌制和熟化等方面有了成功的应用,是一种降低肉制品(如干腌火腿、培根和鸡胸肉等)中盐含量的有效策略^[57]。

César 等^[58]的研究发现超声处理可以有效提高 NaCl 和水分的扩散率,高功率超声作用会破坏肌原纤维结构,使 NaCl 更快更均匀地扩散渗透到腌制猪肉中,缩短腌制时间。Zou 等^[59]评估了超声辅助烹饪对五香牛肉口味和风味的化学特性的影响,结果表明超声波处理可以显著提高烹饪过程中 NaCl 的渗透性,在一定功率下,能够提高五香牛肉中碳水化合物、必需氨基酸和 5'-核糖核苷酸的含量,同时醛、醇和酮等挥发性风味物质的种类和相对含量也显著增加,因此适当的超声处理对五香牛肉的风味特性具有积极影响。Ojha 等^[60]的研究表明较高强度的超声处理(54.9 W/cm²)可能是一种有效辅助盐及其替代品渗透肉制品的方法,能够减少猪肉加工过程中盐的使用量,加速传质过程,并改善猪肉的质地。

4.2 超高压技术

由于食盐添加量的降低,低盐肉制品的货架期 and 安全性可能会有所下降。超高压处理(HPP)是食品中最为常用的杀菌方法之一,不仅可以满足消费者对于轻加工无添加剂产品的需求,能够在保持食物的感官和营养特性的同时杀灭有害细菌和病原体,降低肉制品蒸煮损失并延长货架期,有助于开发减盐肉制品^[61-62]。Tamm 等^[63]通过超高压处理(经过滚揉后施加 100 MPa 压力)可以将熟火腿的盐含量降低 45% 而不会显著影响火腿的质地和外观,并轻微改善了火腿的保水性。

一定强度的高压处理(HPP)会导致肌原纤维蛋白的构象变化,形成更好的蛋白网络,从而改善肉制品的保水性和物理性能,而高于 500 MPa 的压力可能会阻碍肌原纤维蛋白凝胶的形成,导致凝胶性能的劣化^[64]。Wang 等^[65]对超高压处理的低盐金鱼鲷肌球蛋白结构和胶凝特性的研究发现,适度的 HPP 处理(≤ 300 MPa)可增强低钠金线鱼肌球蛋白凝胶的保水性和弹性,形成稳定的三维凝胶网络,而更强的 UHP 处理(≥ 450 MPa)则会破坏凝胶性能和微观结构。当低浓度(<40 mmol/L)的 CaCl₂ 与高压处理(200 MPa)结合使用时对鸡胸肉中肌原纤维蛋白的功能特性的提高具有协同作用,而添加高浓度(100 mmol/L)的 CaCl₂ 则会产生拮抗作用^[66]。

超高压技术还具有增加肉制品咸味感的潜力。Picouet 等^[67]发现,HPP 加工处理后的火腿比未加工

的火腿具有更高的咸味,HPP 处理促进钠与蛋白质紧密结合,以及肌原纤维蛋白结构的改变,并且由于加压后火腿的水分含量降低,感知到的咸味也更加明显,因此 HPP 也可能是实现肉制品减盐的良好方案。

4.3 脉冲电场技术

脉冲电场(PEF)的杀菌机理主要是通过瞬时高压脉冲发生器产生的脉冲电场作用于食品物料,诱导电穿孔并改变膜结构,增加膜和细胞的渗透性来影响钠在肉基质中的释放扩散和分布,从而在较大程度上保障肉制品的营养价值和风味品质并延长肉制品保质期。这可能会改变蛋白质与盐离子之间的相互作用并影响咀嚼过程中钠的释放^[68-69]。Bhat 等^[70]研究发现,PEF 处理可通过促进盐的扩散和钠的输送来提高口腔感知到的咸味,经 PEF 处理后的牛肉(1.2% NaCl)具有与对照组(2% NaCl)相似的感官评分且钠含量明显降低,说明 PEF 可能是生产更健康的低钠肉制品的一种新方法。Ma 等^[71]对 PEF 处理后的羔羊肉的挥发性风味和感官属性研究发现,PEF 处理导致了不同羊肉切块中挥发性化合物的显著变化,经 PEF 处理的羊肉更加多汁,并具有浓厚的肉类风味,因此 PEF 在低盐肉制品领域有着良好的发展前景。

4.4 微粉化技术

味蕾所感受到的咸味与盐输送到唾液的方式密切相关。如图 3(a)、(b)中所示,微粉化的 NaCl 晶体(从 250~500 μm 到 5~10 μm)与正常 NaCl 具有不同的形态,能够暴露出比正常盐晶体更大的表面积,能够更有效的传递咸味,其溶解速度几乎是传统盐的两倍^[7,10]。Zhang 等^[72]用 1 g 壳聚糖与 2 mol/L 柠檬酸制备了壳聚糖/柠檬酸/NaCl 微球,其微观结构如图 3(c)所示。微球样品呈现出规则的球形,粒径极小(1.31 μm),并出现了轻微的聚集现象。而图 3(d)中 Yi 等^[73]制备的壳聚糖/乳酸/NaCl 微球(5 g 壳聚糖、15 mL 乳酸、15 g NaCl 和 485 mL 水经喷雾干燥

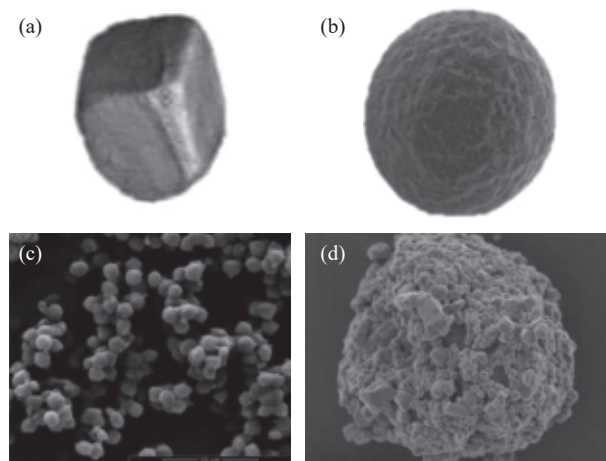


图3 盐晶体的不同形状

Fig.3 Different shapes of salt crystals

注:(a)正常形状盐颗粒^[10];(b)商用 SODA-LO 盐微球^[10];(c)壳聚糖/柠檬酸/NaCl 微球^[72];(d)壳聚糖/乳酸/NaCl 微球^[73]。

制备)是中空的,且具有良好的吸湿性,NaCl 晶体(1~4 μm)大部分附着在微球表面。

盐微球能够与口腔中更多的受体结合,在口腔中更快地溶解,而不参与味觉受体结合并被保留在食物中的盐微球更少,使消费者能够更快更强烈地感知到咸味。Juan 等^[74]将 1.0% 的微粉化食盐加入到牛肉汉堡当中,获得了与含有 1.5% 的 NaCl 的牛肉汉堡相似的咸味,且不会影响汉堡的 pH、颜色、咸味和多汁性。因此,通过微粉化技术可以实现在不添加其他添加剂的条件下降低肉制品中 NaCl 含量,其咸味与正常食盐添加量的肉制品相当。

5 结语与展望

本文总结并讨论了肉制品减盐的重要性以及有效的减盐方法。目前肉制品中减少盐含量的策略主要依赖于寻找合适的钠盐替代品,其中 KCl 是肉制品中最为常用的钠盐替代品之一,但是由于 KCl 等无机盐会使肉制品产生苦味、金属味,所以通常需要添加风味增强剂或苦味掩蔽剂来掩盖其不良风味。利用天然提取物、草药、香料、氨基酸、AMP 或藻类等代替部分 NaCl 也是减少肉制品中钠盐添加量的有效策略之一,已经在发酵肉制品等领域有了成功的应用。另外超声波技术、超高压技术、脉冲电场、微粉化等新兴技术能够通过加速传质或改变盐结构的方式改善低盐肉制品的品质,在肉类产品中具有巨大的应用潜力。

目前钠盐替代品使用的主要限制仍然是其对肉制品的滋味、颜色、质地、香气等感官特性可能造成的负面影响,另外如果替代比例过高,还可能造成肉制品所有感官参数的严重劣化,导致消费者可接受度大幅降低。因此,探索成本低廉、替代性好且安全稳定的钠盐替代品和经济有效的生产加工技术是未来减盐肉制品研究的发展方向。

参考文献

- [1] ZHENG J, HAN Y, GE G, et al. Partial substitution of NaCl with chloride salt mixtures: Impact on oxidative characteristics of meat myofibrillar protein and their rheological properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 96: 36–42.
- [2] JIANG Q, NAKAZAWA N, HU Y, et al. Changes in quality properties and tissue histology of lightly salted tuna meat subjected to multiple freeze-thaw cycles[J]. *Food Chemistry*, 2019, 293: 178–186.
- [3] World Health Organization. WHO issues new guidance on dietary salt and potassium[R]. Geneva: WHO, 2013.
- [4] LKA B, JDMA B, LG A, et al. Sodium intake and its reduction by food reformulation in the European Union-A review[J]. *NFS Journal*, 2015, 1: 9–19.
- [5] TAHERGORABI R, JACZYNSKI J. Physicochemical changes in surimi with salt substitute[J]. *Food Chemistry*, 2012, 132(3): 1281–1286.
- [6] COSTA-CORREDOR A, MUNOZ I, ARNAU J, et al. Ion uptakes and diffusivities in pork meat brine-salted with NaCl and K-lactate[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2010, 43(8): 1226–1233.
- [7] MITCHELL H. Developing food products for consumers with specific dietary needs[M]. Sawston: Woodhead Publishing, 2016: 81–105.
- [8] B, KATHY G, PRETIMA T. Reducing salt in foods[M]. 2th ed. Sawston: Woodhead Publishing, 2019: 185–211.
- [9] PARNIAKOV O, MIKHROVSKA M, TOEPFL S, et al. Agri-food Industry strategies for healthy diets and sustainability[M]. New York: Academic Press, 2020: 155–175.
- [10] INGUGLIA E S, ZHANG Z, TIWARI B K, et al. Salt reduction strategies in processed meat products-A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 59: 70–78.
- [11] ANDREETTA-GORELKINA I V, GREIFF K, RUSTAD T, et al. Reduction of salt in haddock mince: Effect of different salts on the solubility of proteins[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2015, 25(4): 518–530.
- [12] EVA B, LAMBERT R J W. Comparing the antimicrobial effectiveness of NaCl and KCl with a view to salt/sodium replacement[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2008, 124(1): 98–102.
- [13] ÇARKCIOĞLU E, ROSENTHAL A J, K CANDOĞAN. Rheological and textural properties of sodium reduced salt soluble myofibrillar protein gels containing sodium tri-polyphosphate[J]. *Journal of Texture Studies*, 2016, 47(3): 181–187.
- [14] KIRSTI G, IDA G A, ULF E, et al. Effects of type and concentration of salts on physicochemical properties in fish mince[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 64(1): 220–226.
- [15] KIRSTI G, REIDAR M J, EKREM M, et al. Gradual reduction in sodium content in cooked ham, with corresponding change in sensorial properties measured by sensory evaluation and a multimodal machine vision system[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(9): 1–14.
- [16] ALINO M, GRAU R, FUENTES A M, et al. Influence of low-sodium mixtures of salts on the post-salting stage of dry-cured ham process[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 99(2): 198–205.
- [17] BARAT J M, PÉREZ-ESTEVE E, ARISTOY M C, et al. Partial replacement of sodium in meat and fish products by using magnesium salts. A review[J]. *Plant and Soil*, 2013, 368(1–2): 179–188.
- [18] BARBA F J, PUTNIK P, KOVAČEVIĆ D. Agri-food industry strategies for healthy diets and sustainability[M]. New York: Academic Press, 2020: 155–175.
- [19] ZHANG Z, YANG Y, TANG X, et al. Chemical forces study of heat-induced myofibrillar protein gel as affected by partial substitution of NaCl with KCl, MgCl_2 and CaCl_2 [J]. *CYTA-Journal of Food*, 2016, 14(2): 1–9.
- [20] GE G, HAN Y, ZHENG J, et al. Physicochemical characteristics and gel-forming properties of myofibrillar protein in an oxidative system affected by partial substitution of NaCl with KCl, MgCl_2 or CaCl_2 [J]. *Food Chemistry*, 2019, 309: 125614.
- [21] SUN C, ZHOU X, HU Z, et al. Food and salt structure design for salt reducing[J]. *Innovative Food Science & Emerging Techno-*

logies, 2020, 67: 102570.

[22] KILCAST D, ANGUS F. Reducing salt in foods[M]. Sawston: Woodhead Publishing, 2007: 201–230.

[23] CONROY P M, O'SULLIVAN M G, HAMILL R M, et al. Sensory optimisation of salt-reduced corned beef for different consumer segments[J]. *Meat Science*, 2019, 154: 1–10.

[24] FULLADOSA E, SERRA X, GOU P, et al. Effects of potassium lactate and high pressure on transglutaminase restructured dry-cured hams with reduced salt content[J]. *Meat Science*, 2009, 82(2): 213–218.

[25] BARBUT S, MAURER A J, LINDSAY R C. Effects of reduced sodium chloride and added phosphates on physical and sensory properties of Turkey Frankfurters[J]. *Journal of Food Science*, 1988, 53(1): 62–66.

[26] RUUSUNEN M, SÄRKKÄ-TIRKKONEN M, PUOLANNE E. The effect of salt reduction on taste pleasantness in cooked bologna type sausages[J]. *Journal of Sensory Studies*, 1999, 14: 263–270.

[27] BUSCH J, YONG F, GOH S M. Sodium reduction: Optimizing product composition and structure towards increasing saltiness perception[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2013, 29(1): 21–34.

[28] DJORDJEVIC J, ZATORRE R J, JONES-GOTMAN M. Odor-induced changes in taste perception[J]. *Experimental Brain Research*, 2004, 159(3): 405–408.

[29] ANDREWS D, SALUNKE S, CRAM A, et al. Bitter-blockers as a taste masking strategy: A systematic review towards their utility in pharmaceuticals[J]. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2021, 158: 35–51.

[30] 付丽, 刘旌旒, 高雪琴, 等. 低钠盐酱牛肉贮藏品质的变化[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(7): 44–48, 54. [FU L, LIU Y N, GAO X Q, et al. Changes of storage quality of sauced beef with low sodium salt[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(7): 44–48, 54.]

[31] DELGADO-PANDO G, ALLEN P, KERRY J P, et al. Optimising the acceptability of reduced-salt ham with flavourings using a mixture design[J]. *Meat Science*, 2019, 156: 1–10.

[32] COSTA C, LUCERA A, MARINELLI V, et al. Influence of different by-products addition on sensory and physicochemical aspects of Primosale cheese[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2018, 55(10): 4174–4183.

[33] JAVIER G L, MARIA L, RAQUEL D P, et al. Antioxidant effect of seasonings derived from wine pomace on lipid oxidation in refrigerated and frozen beef patties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 77: 85–91.

[34] ZHAO J, WANG T, XIE J, et al. Meat flavor generation from different composition patterns of initial Maillard stage intermediates formed in heated cysteine-xylose-glycine reaction systems[J]. *Food Chemistry*, 2019, 274: 79–88.

[35] GOU P, GUERRERO L, GELABERT J, et al. Potassium chloride, potassium lactate and glycine as sodium chloride substitutes in fermented sausages and in dry-cured pork loin[J]. *Meat Science*, 1996, 42(1): 37–48.

[36] SCHIFFMAN S S, DACKIS C. Taste of nutrients: Amino acids, vitamins, and fatty acids[J]. *Attention Perception & Psychophysics*, 1975, 17(2): 140–146.

[37] SILOW C, AXEL C, ZANNINI E, et al. Current status of salt reduction in bread and bakery products-A review[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 72: 135–145.

[38] WEN R, HU Y, ZHANG L, et al. Effect of NaCl substitutes on lipid and protein oxidation and flavor development of Harbin dry sausage[J]. *Meat Science*, 2019, 156: 33–43.

[39] FELICIO T L, ESMERINO E A, VIDAL V A S, et al. Physico-chemical changes during storage and sensory acceptance of low sodium probiotic Minas cheese added with arginine[J]. *Food Chemistry*, 2016, 196: 628–637.

[40] ZHU C Z, ZHAO J L, TIAN W, et al. Contribution of histidine and lysine to the generation of volatile compounds in Jinhua ham exposed to ripening conditions via Maillard reaction[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(1): 46–52.

[41] SLDS A, JML B, JMM A, et al. Application of arginine and histidine to improve the technological and sensory properties of low-fat and low-sodium bologna-type sausages produced with high levels of KCl[J]. *Meat Science*, 2020, 159: 107939.

[42] LAURENCE M, FEREIDOUN S, PETER V. Encyclopedia of food chemistry[M]. Netherlands: Elsevier, 2019: 235–239.

[43] PANDEY A, NEGI S, SOCCOL C R. Current developments in biotechnology and bioengineering[M]. Netherlands: Elsevier, 2017: 557–575.

[44] WANG W, ZHOU X, LIU Y. Characterization and evaluation of umami taste: A review[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2020, 127: 115876.

[45] PEDRO D, SALDAA E, LORENZO J M, et al. Low-sodium dry-cured rabbit leg: A novel meat product with healthier properties[J]. *Meat Science*, 2021, 173: 108372.

[46] MCGREGOR R. Taste modification in the biotech Era[J]. *Food Technology*, 2004, 58(5): 24–30.

[47] MING D, NINOMIYA Y, et al. Blocking taste receptor activation of gustducin inhibits gustatory responses to bitter compounds[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96: 9903–9908.

[48] WOSKOW M H. Selectivity in flavor modification by 5'nucleotides[J]. *Food Technology*, 1969, 23(11): 1364.

[49] BENJAMIN C, PAUL M F, FIDEL T. Encyclopedia of food and health[M]. New York: Academic Press, 2016: 716–723.

[50] DT A, LLA B, BB A, et al. Plant-derived seasonings as sodium salt replacers in food[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 99: 194–202.

[51] 古孜力努尔·依马木, 鄯利娅·伊明, 依巴代提·托合提, 等. 罗勒提取物对肾性高血压大鼠的影响[J]. *新疆医科大学学报*, 2009, 32(3): 259–261, 264. [GUZILINUER Yimamu, WULIYA Yimin, YIBADEITI Tuheti, et al. Antihypertensive effects of *Ocimum basilicum* L. (OBL) on renal hypertensive rats[J]. *Journal of Xinjiang Medical University*, 2009, 32(3): 259–261, 264.]

[52] ANDERSEN B V, BYRNE D V, BREDIE W, et al. Cayenne pepper in a meal: Effect of oral heat on feelings of appetite, sensory

- specific desires and well-being[J]. *Food Quality & Preference*, 2017, 60: 1–8.
- [53] FELLENDORF S, O’SULLIVAN M G, KERRY J P. Effect of using replacers on the physicochemical properties and sensory quality of low salt and low fat white puddings[J]. *European Food Research and Technology*, 2016, 242: 2105–2118.
- [54] KIRSTI G, CHARLOTTE J S, BERIT N, et al. Novel utilization of milk-based ingredients in salt reduced fish pudding[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 63(1): 92–99.
- [55] HOTCHKISS S. Edible seaweeds A rich source of flavor components for sodium replacement[J]. *Agro Food Industry Hi-Tech*, 2012, 23(6): 30–32.
- [56] SINGLA M, SIT N. Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 73(6): 105506.
- [57] FARID C, ZILL-E-HUMA, MUHAMMED K K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2010, 18(4): 813–835.
- [58] CÉSAR O, ANA P, JOSE V, et al. Influence of high intensity ultrasound application on mass transport, microstructure and textural properties of pork meat (*Longissimus dorsi*) brined at different NaCl concentrations[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 119(1): 84–93.
- [59] ZOU Y, KANG D, RUI L, et al. Effects of ultrasonic assisted cooking on the chemical profiles of taste and flavor of spiced beef[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 46: 36–45.
- [60] OJHA K S, KEENAN D F, BRIGHT A, et al. Ultrasound assisted diffusion of sodium salt replacer and effect on physicochemical properties of pork meat[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2016, 51(1): 37–45.
- [61] PANDEY M C, HYGREEVA D. Novel approaches in improving the quality and safety aspects of processed meat products through high pressure processing technology-A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 54: 175–185.
- [62] MURCHIE L W, CRUZ-ROMERO M, KERRY J P, et al. High pressure processing of shellfish: A review of microbiological and other quality aspects[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2005, 6(3): 257–270.
- [63] TAMM A, BOLUMAR T, BAJOVIC B, et al. Salt (NaCl) reduction in cooked ham by a combined approach of high pressure treatment and the salt replacer KCl[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 36: 294–302.
- [64] CANDO D, MORENO H M, TOVAR C A, et al. Effect of high pressure and/or temperature over gelation of isolated hake myofibrils[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(11): 3197–3207.
- [65] WANG J, LI Z, ZHENG B, et al. Effect of ultra-high pressure on the structure and gelling properties of low salt golden threadfin bream (*Nemipterus virgatus*) myosin[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 100: 381–390.
- [66] WANG Y, ZHOU Y, LI P J, et al. Combined effect of CaCl_2 and high pressure processing on the solubility of chicken breast myofibrillar proteins under sodium-reduced conditions[J]. *Food Chemistry*, 2018, 269: 236–243.
- [67] PICOUE T P A, SALA X, GARCIA-GIL N, et al. High pressure processing of dry-cured ham: Ultrastructural and molecular changes affecting sodium and water dynamics[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2012, 16: 335–340.
- [68] 孙晋跃, 孙芝兰, 吴海虹, 等. 非热杀菌技术在低温鸡肉制品致病菌控制中的应用研究进展[J]. *肉类研究*, 2020, 34(8): 84–90. [SUN J Y, SUN Z L, WU H H, et al. Advances in application of non-thermal sterilization technologies to control pathogens in low temperature chicken products[J]. *Meat Research*, 2020, 34(8): 84–90.]
- [69] BHAT Z F, MORTON J D, MASON S L, et al. Current and future prospects for the use of pulsed electric field in the meat industry[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(10): 1–15.
- [70] BHAT Z F, MORTON J D, MASON S L, et al. The application of pulsed electric field as a sodium reducing strategy for meat products[J]. *Food Chemistry*, 2019, 306: 125622.
- [71] MA Q, HAMID N, OEY I, et al. Effect of chilled and freezing pre-treatments prior to pulsed electric field processing on volatile profile and sensory attributes of cooked lamb meats[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 37: 359–374.
- [72] ZHANG N, ZHANG H, LI R, et al. Preparation and adsorption properties of citrate-crosslinked chitosan salt microspheres by microwave assisted method[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 152: 1146–1156.
- [73] YI C, TSAI M L, LIU T. Spray-dried chitosan/acid/NaCl microparticles enhance saltiness perception[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 172: 246–254.
- [74] JUAN D R, ERICK S, MELINA L M, et al. Reducing the sodium content without modifying the quality of beef burgers by adding micronized salt[J]. *Food Research International*, 2019, 121: 288–295.