基于固体食盐结构及成分设计的减盐策略及其研究进展

公奕夫[1]，李 星[1]，刘 斌[1]，肖红利[2]，陈莎男[1]，宋欣宇[1]，闫惠苓[1]，李泽坤[1]，袁 育[1]，李 媛[1,*]
（1.中国农业大学食品科学与营养工程学院，食品胶体与营养递送研究中心，北京 100083；
2.新希望集团有限公司，营养健康食品研究院，四川 成都 610011）

摘 要：食盐是食品工业和居民日常生活中广泛使用的调味品，其主要成分氯化钠的过量摄入会增加高血压、胃癌、脑卒中等疾病的患病风险。如何在不影响食品口味的条件下减少含盐量是目前的研究热点。固体形式的氯化钠是日常膳食食盐摄入的重要部分，改善固体氯化钠结构及食盐成分是开发低盐食品的有效方法。本文在详细探讨咸味感知机理和机体内钠吸收代谢机制的基础上，对近年来国内外与氯化钠结构调控及成分设计有关的减盐策略进行综述，讨论减少食品含盐量而不影响咸味的各项技术，如调控氯化钠物理结构（形貌和粒径）、包埋氯化钠、添加氯化钠替代物（咸味矿物盐、风味增强剂和天然呈味物质），并分析不同结构及成分食盐的减盐原理、缺点和适用场景，为未来设计新型食盐产品，开发减盐健康食品，减少居民膳食盐摄入量，提高居民健康水平提供理论依据和技术支撑。

关键词：氯化钠；减盐策略；咸味感知；结构设计；健康饮食

Research Progress on Salt Reduction Strategies Based on Structural Regulation and Compositional Design of Solid Salt

GONG Yifu[1], LI Xing[1], LIU Bin[1], XIAO Hongli[2], CHEN Shanan[1], SONG Xinyu[1], YAN Huiling[1], LI Zekun[1], YUAN Yu[1], LI Yuan[1,*]
(1. Food Colloids and Nutrients Delivery Research Center, College of Food Science and Nutrition Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Nutrition and Health Food Research Institute, New Hope Group Co., Ltd., Chengdu 610011, China)

Abstract: Salt is a seasoning widely used in the food industry and our daily diet. Excessive intake of salt, whose major component is sodium chloride, will increase the risks of multiple diseases such as hypertension, gastric cancer, and stroke. How to reduce the salt content of foods without affecting the flavor is a hot topic of current research. Structural and compositional optimization of solid sodium chloride, which constitutes an important part of daily dietary salt intake, is an effective way to develop low-salt foods. This article provides a detailed discussion on the mechanisms of salty taste perception and sodium absorption and metabolism in the body, and summarizes the salt reduction strategies developed based on structural regulation and compositional design of sodium chloride in recent years. The novel technologies for reducing the salt content without affecting the salty taste, such as regulating the physical structure (morphology and particle size) of sodium chloride, encapsulating sodium chloride, and adding sodium chloride substitutes (salty mineral salts, flavor enhancers and natural taste substances) are discussed. In the end, the salt reduction mechanisms, shortcomings and applicable scenarios of salt with different structures and components are analyzed. We hope that this review will provide theoretical evidence and technical support to design new salt products, develop low-salt foods, reduce the dietary salt intake of residents and improve human health in the future.

Keywords: sodium chloride; salt reduction strategies; salty taste perception; structural design; healthy diet
DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220721-238
中图分类号：TS202.3 文献标志码：A 文章编号：1002-6630（2023）09-0202-09
引文格式：
公奕夫, 李星, 刘斌, 等. 基于固体食盐结构及成分设计的减盐策略及其研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 202-210. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220721-238. http://www.spkx.net.cn

收稿日期：2022-07-21
基金项目：国家自然科学基金面上项目（31972202）

第一作者简介：公奕夫（1997—）（ORCID: 0000-0002-3798-1629），男，硕士研究生，研究方向为食品胶体功能化与活性因子递送。E-mail: 1029234909@qq.com
*通信作者简介：李媛（1982—）（ORCID: 0000-0002-3245-3210），女，教授，博士，研究方向为食品胶体功能化与活性因子递送。E-mail: yuanli@cau.edu.cn

GONG Yifu, LI Xing, LIU Bin, et al. Research progress on salt reduction strategies based on structural regulation and compositional design of solid salt[J]. Food Science, 2023, 44(9): 202-210. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220721-238. http://www.spkx.net.cn

食盐的主要成分是氯化钠（NaCl），氯化钠具有增强食品风味、改善食品质构和抑制有害微生物繁殖等性质，被广泛用于食品工业和居民日常饮食[1]。氯化钠是人体必需电解质之一，钠离子在维持人体内血浆容量、酸碱平衡、神经冲动传递和正常细胞功能中发挥重要作用[2]。然而，氯化钠的过量摄入会导致许多健康问题。流行病学研究表明高钠摄入量和高血压之间存在因果关系，过量摄入氯化钠不仅会增加心脏左心室质量、动脉厚度和硬度，还会提高中风的发生率和心力衰竭的严重程度[3-4]。在我国由饮食不合理导致的心血管疾病死亡中，高钠饮食（钠摄入量高于2 000 mg/d）是占比最高（17.3%）的风险因素（图1）[5]。高钠饮食还会增加大脑海马体氧化应激和肠道炎症，导致认知功能下降[6]。血清糖皮质激素调节激酶1（serum glucocorticoid regulated kinase 1，SGK1）是T细胞中的盐感受器。摄入过量的钠会导致SGK1下游激活的级联事件，逆转调节性T细胞的免疫抑制作用，并促进细胞向促炎表型的辅助性T细胞Th-1和Th-17转换，还会破坏自身免疫系统并诱发多种疾病，如自身免疫性脑脊髓炎、狼疮[7-8]。此外，高钠饮食会使肠黏膜屏障功能受损，引起肠道菌群分布改变，导致分节丝状菌、双歧杆菌和乳酸菌等益生菌的丰度降低[9]。与正常饮食相比，高钠饮食还会增加16%的全因死亡率[10]。

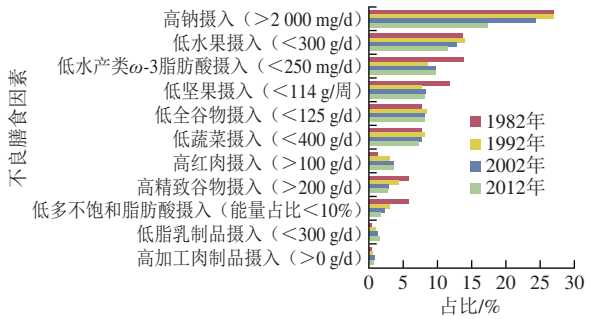


图 1 中国成年居民因不良膳食因素诱发心血管代谢性疾病致死的比例[10]

Fig. 1 Attributable percentages of cardiometabolic diseases related death due to the unhealthy dietary factors in Chinese adults[10]

根据世界卫生组织报告，成年人每日盐摄入量小于5 g（每日钠摄入量小于2 g）有助于预防高血压，降低患心脏病和中风的风险[1]。《中国居民膳食指南（2022）》指出成年人每日食盐摄入量不应超过5 g。我国人均盐摄入量（9.3 g/d）远远高于推荐摄入量，日常饮食中，盐主要来源于家庭烹饪所使用的食盐（75.8%），其次是酱油（8.2%）和加工食品（6.0%）[11]（表1）。因此，降低食盐的摄入、开发低盐食物、推广清淡饮食是优化我国居民膳食结构、促进居民健康饮食的关键。

表 1 我国居民日常膳食摄入盐来源（食盐摄入量9.3 g/d）[11]

Table 1 Sources of daily dietary salt intake of Chinese residents (salt intake 9.3 g/d)[11]

膳食来源	烹饪用盐	酱油	加工食品	鸡精和味精	面食	肉类	蔬菜	其他调味品	其他
摄入比例/%	69.2	8.2	6.0	4.5	4.0	3.2	2.4	1.1	1.4

家庭烹饪及加工食品中的油炸食品，如薯片、饼干、薯条是氯化钠摄入的重要来源。在油炸食品中，氯化钠以固体形式喷撒在食物表面。当氯化钠进入口腔后会迅速溶解并与舌头上的味蕾接触，在咀嚼前就可以感知到咸味[12]。已有研究表明，氯化钠的粒径、形状、空间结构等物理性质影响口腔中的咸味感知，改善氯化钠的结构可提高其在口腔中的溶解速度和扩散效率[13]。因此，对氯化钠结构进行调控，开发不同结构以及成分的食盐，可以达到减盐不减咸的效果，是减少氯化钠摄入量的有效途径。

本文首先详细探讨味觉细胞感受咸味的机理和机体内钠吸收代谢机制，然后对国内外近年来与氯化钠结构调控及成分设计有关的减盐策略进行总结，讨论减少食品含盐量而不影响咸味的各项技术，如调控氯化钠物理结构（形貌和粒径）、包埋氯化钠、添加氯化钠替代物（咸味增强剂和天然呈味物质）。通过综述不同减盐策略的原理、特点和应用场景，为未来设计新型食盐产品，开发减盐健康食品，减少居民膳食盐摄入量，促进人民健康饮食提供理论依据和技术支撑。

1 氯化钠的咸味感知和吸收代谢过程

1.1 味觉感知系统

人类通过感官系统感知外部世界，包括通过味觉和嗅觉感受外界化学特征和通过机械运动、声音、视觉和温度感受物理特征。味觉是人体重要的生理感觉之一，在很大程度上决定着动物对饮食的选择，使其能根据自身需要及时地补充有利于生存的营养物质。味觉在摄食调控、机体营养及代谢调节中均有重要作用。味觉包括5 种真味：“甜、咸、酸、苦、鲜”，而其中咸味感知可确保人体摄入适当的食物以维持电解质平衡。味觉通过分布于舌头表面的味蕾感知。味觉感受的基本单元是味觉感受器细胞（taste receptor cells，TRCs），由TRCs组装成的味蕾大量分布在人体前舌、舌根和舌头两侧[14]。舌头的全部区域均可以感受苦、酸、甜、咸和鲜味[15-19]。不同呈味物质都会被表达特殊受体的不同细胞识别，然后将味觉转化为神经信号[14]。神经信号通过多个神经站

传递后，在大脑前岛叶刺激其独立的皮层区域[20]。此外，味道与愉悦感相对独立。在灵长类动物的大脑皮层中存在另一个味觉皮层区——眶额皮层[21]，眶额皮层除了感知味道外，还能对味觉、嗅觉、质感和相关视觉刺激带来的愉悦感产生反应。当饱腹感增加时，位于大脑额叶和岛叶皮层的味觉神经元的响应并不因饱腹感的增强而减弱[22-24]，相比之下，在眶额皮层的味觉神经元的响应会随着饱腹感增加而下降，导致味道带来的愉悦感减弱[25]。

1.2　氯化钠的感知和吸收代谢过程

当摄入食物后，食物中氯化钠会在咀嚼的过程中逐渐释放到唾液，并随舌头的机械运动分散在整个口腔[26]。钠离子通过口腔中的味蕾感知。与甜味、鲜味和苦味的受体介导感知不同，咸味的感知是通过味觉感受器细胞膜上的离子通道调节。该过程从受体激活到神经递质释放，以电信号的方式进行，没有第二信使信号或钙升高的现象[27-28]。口腔中的钠离子通过上皮细胞膜表面钠通道（epithelial sodium channel，ENaC）进入味觉受体细胞，导致膜去极化并产生动作电位。大电导离子通道CALHM1/3在强烈的膜去极化刺激下打开，ATP顺浓度梯度排出细胞，作用于传入神经纤维上亲离子的P2X2/X3 ATP受体。神经信号经过多个神经站的传递后刺激大脑皮层，产生咸味感知（图2）。与其他味觉相比，咸味感受细胞通过*CALHM1/3*和*ENaCα*基因的共同表达来唯一识别[29]。此外，还存在多种非选择性离子通道，如瞬时感受器电位香草酸受体I作为Na^+、K^+、NH_3^+和Ca^{2+}的感受器，与咸味感知的传输有关[30]。

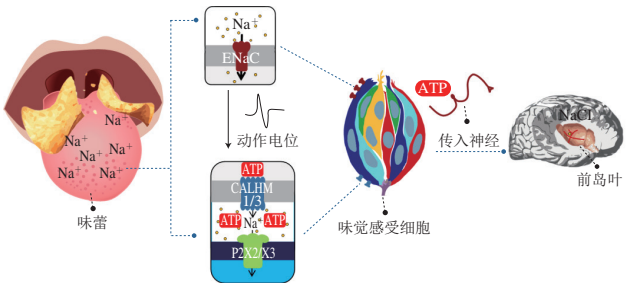


图 2　摄入食物后的咸味感知过程

Fig. 2　Process of salty taste perception after food ingestion

膳食摄入的氯化钠在咀嚼和消化过程中转变为离子形态，近端结肠是膳食离子吸收的主要部位。哺乳动物近端结肠对钠的吸收发生在上皮细胞的顶端表面，主要为两种吸收机制——钠氢交换器3（Na^+/H^+ exchanger 3，NHE3）和ENaC。结肠钠吸收是一个由ATP酶介导的能量消耗过程。经肠道细胞吸收的钠中约95%会由肾脏排出（图3）[31]，而其他钠主要储存在皮肤和肌肉中，这些钠被称为非渗透性钠。非渗透性钠通过与带负电荷的糖胺聚糖（glycosaminoglycan，GAGs）结合而无法直接被生物体利用，因此不会影响细胞外容积。非渗透性钠主要储存在皮肤间质、骨骼肌和内皮表层（endothelial surface layer，ESL），在皮肤间质中钠浓度可高达180～190 mmol/L[32]。高血压患者和高血压动物模型的骨骼肌和皮肤中钠浓度均显著高于血浆[33]。其中ESL是血管内皮细胞管腔面的一个动态层，其不断地与流动的血液交换，通过带负电荷的GAGs实现钠离子的缓冲。当ESL受到干扰时，更多的钠离子被运输到内皮细胞之间，导致水钠平衡被破坏，进而引发内皮硬化和水潴留（水肿）[34]。

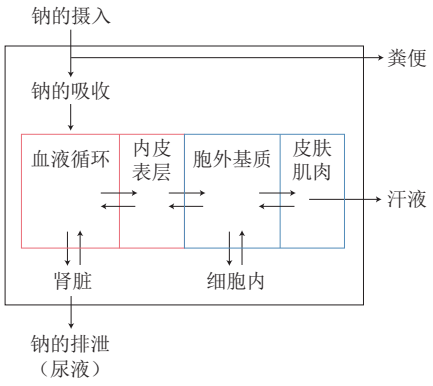


图 3　钠的体内代谢过程[31]

Fig. 3　Sodium metabolism process in the body[31]

1.3　食品质构及成分对咸味的影响

食物是一个多组分相互作用的复杂体系，咸味的感知除与食物中钠离子含量有关外，还与多种因素相关。对食物咸味产生影响的因素包括食物基质的结构、食物成分对咸味感知的影响以及味觉与其他感官交互作用[35]。基于加工食物体系中咸味感知的特点，国内外学者对此进行了广泛的研究，并由此开发出多种减盐策略。

加工食品中的胶体体系，如乳液、颗粒、凝胶，是日常生活中钠的重要来源。食品大分子形成的网络结构对钠离子（咸味金属离子，如K^+、Ca^+）的释放、扩散和感知有重要影响。对食品胶体进行结构设计能够在增强咸味感知的同时减少钠的摄入[35]。Zhang Yanhui等[36]基于淀粉-唾液淀粉酶特异性结合的原理，构建了具有不同结构特征的马铃薯淀粉基乳液凝胶，发现增加乳液凝胶中的乳液体积能显著增强凝胶强度，并降低Na^+的释放速率，实现了Na^+的可控释放。Lu Wei等[37]的研究证明卡拉胶是一种有效掩盖氯化钾苦味的天然多糖，利用卡拉胶特异性与K^+结合的特点，可以显著减缓K^+在口腔中的释放与扩散，使氯化钾的苦味降低。此外，使用卡拉胶-氯化钾-氯化钠复合物作为氯化钠替代品可以调节矿物质吸收（Na^+、K^+、Ca^{2+}），降低高血压和肾损伤风险。

天然风味物质可以通过嗅觉味觉协同作用或直接刺激味蕾细胞增强食品中咸味的感知，Chen Xiaowei等[38]

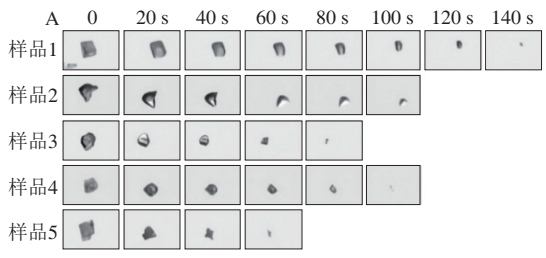
开发了以皂树皂苷乳液为基质的中空氯化钠颗粒，以提高咸味零食的咸味以及香气属性。中空结构可以提高氯化钠在固体食物表面的覆盖率，并在咀嚼过程中更快地溶解在唾液中，从而向味觉感受器提供足够的钠离子。千日菊素可引起味蕾细胞膜去极化和膜电阻增加，提高味蕾细胞对钠离子的敏感性，是潜在的咸味增强剂[39]。柴鱼干的香气也会对味觉产生影响，将柴鱼干香气成分以蒸馏液形式添加到氯化钠溶液中可以增强咸味的余味强度和整体滋味强度[40]。

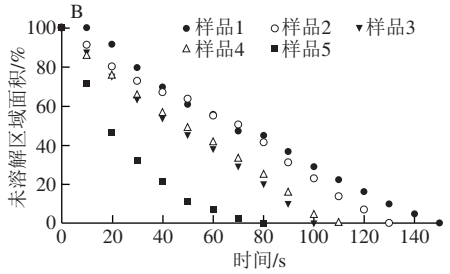
2 调控氯化钠物理结构的减盐策略

食品在咀嚼过程中会持续释放钠离子，但仍存在很大一部分钠离子在不被感知的情况下被摄入[25]。因此固体形态摄入的氯化钠应在咀嚼过程中尽可能多地溶解以提高口腔的咸味感知。比表面积越大的氯化钠颗粒溶解速率越快，目前通过增加比表面积实现减盐效果的手段包括制备特殊形貌的氯化钠和减小氯化钠的尺寸[41]。

2.1 氯化钠颗粒形貌

特殊形貌的氯化钠颗粒具有更大的比表面积，溶解速率更快，可以实现钠离子的快速释放。通过实验比较几种不同形貌固体氯化钠颗粒的溶解速率，发现高度团聚、扁平、锥型和球形度低的氯化钠颗粒溶解速率较快、溶解时间较短（图4）。商业氯化钠来源于地下岩盐矿床和海水或天然盐水，其晶体结构为立方晶体（图5A），其中来自海水或天然盐水的氯化钠通常通过蒸发结晶获得。根据蒸发条件可以获得不同粒径和形貌的氯化钠[42]。嘉吉公司生产的Diamond Crystal®盐具有独特中空金字塔形状（图5B），具有溶解速率快、黏附性强且堆积密度较低的特点，可以减少50%的钠含量[42]薄片状的氯化钠颗粒（图5C）具有较大的比表面积、较低的体积密度和较高的溶解度，在乳液体系中可以更好地结合蛋白质和提高蛋白质溶解度等，同时是干燥食品减盐的理想选择[43]。与立方晶体的氯化钠相比，成聚集状的氯化钠颗粒（图5D）溶解度提高2.8 倍，咸度提高17%，味蕾检出时间缩短40%[44]。然而具有特殊形状的氯化钠颗粒往往因为复杂的制盐工艺而售价高昂，目前在普通食品中的应用十分有限。





A.不同形貌的氯化钠晶体36 ℃下溶解在模拟唾液中的显微镜图像；B.溶解图谱[42]。样品1.碘盐（岩盐）；样品2.添加抗结剂的碘盐（岩盐）；样品3.无添加盐（岩盐）；样品4.碘盐（海盐）；样品5.无添加盐（海盐）。

图 4 不同形貌固体氯化钠颗粒的溶解速率比较

Fig. 4 Comparison of dissolution rates of solid sodium chloride particles with different morphologies

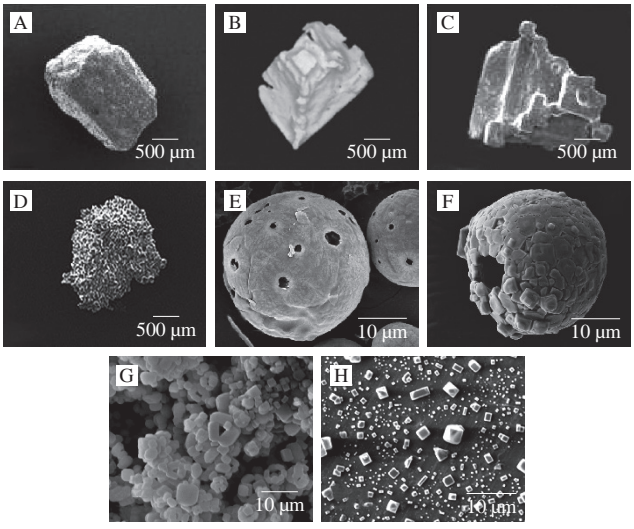
具有较高孔隙度的氯化钠颗粒比表面积更大，由于其在摄入时迅速溶解，因此表现出较高的咸度[45]。空心微球具有较高的比表面积、较小的尺寸和良好的自由流动性，可提高氯化钠与味蕾的作用，从而提高对咸味的感知[46]。中盐公司开发的空心结构氯化钠（图5E）比表面积大于普通食用盐，比重为普通食盐的1/4～1/3，溶解速率比普通食盐快2 倍以上。在同样咸度的情况下，比普通食盐使用量减少20%～30%，达到减盐的效果[47]。泰莱公司开发的SODA-LO®空心氯化钠微球（图5F）口感与氯化钠相似，成分简单，由标准海盐晶体制成的自由流动的空心微球比普通氯化钠晶体小得多，但味道浓郁，能够提供纯净的咸味，可实现50%的减钠效果[47-48]。Yi Cheng等[49]制备的壳聚糖/有机酸/NaCl微粒为15.4～32.0 μm的空心颗粒，微粒表面有大量1～3 μm的小氯化钠结晶，具有较大的比表面积和高溶解度，能产生更强的咸味，使用19.2%～54.4%的氯化钠可以保持咸度水平。此外，空心微球还可以作为其他风味物质和咸味物质的载体。皂苷稳定的调味油（柠檬油和大蒜油）纳米液滴可以作为构建空心氯化钠颗粒的框架制备空心氯化钠微球，增加气味浓度，咸度得分更高[38]。利用中空氯化钠颗粒的增强咸味感知，增加溶解速率，可以有效减少食物中的氯化钠使用量[37]，并作为食物中钠盐的替代品，如炸薯条、零食、坚果等[45]。

2.2 氯化钠颗粒粒径

减小氯化钠的粒径可以增大其比表面积，从而加快其在唾液中的溶解速率，使钠离子更有效地转移到味蕾，从而有效降低食物中的氯化钠含量[50]。目前减小氯化钠晶体粒径的方法有机械研磨、抗溶剂结晶、激光消蚀、蒸汽干燥、喷雾干燥、纳米喷雾干燥、电喷雾技术、低温化学方法和在有机溶剂中沉淀[51]。Hurst等[52]对比了8 种不同理化性质氯化钠的溶解性和咸度，结果表明溶解性和咸味感知由氯化钠晶体颗粒粒径及其疏水性决定。氯化钠颗粒越小溶解速率越快、咸度越大。然而，在表面含油量高的食物中，粒径小的盐颗粒与食物表面

脂肪的疏水相互作用更强，导致溶解性降低。Rios-Mera等[53]在牛肉汉堡中添加经60 目不锈钢筛网筛分得到的微粉氯化钠，与普通氯化钠相比，微粉氯化钠使肉饼中的氯化钠含量从1.5%减少到1.0%，而不会影响肉饼的pH值、颜色、持水性和感官特性。Tassyana等[54]发现在油炸土豆的调味过程中使用粒径更小的氯化钠可以加强咸味的感知，使用平均直径约为97、37、30 μm和 26 μm的氯化钠分别可以达到39%、46%、50%和51%的减盐效果。

近年来出现了制备超细氯化钠晶体的新技术，主要包括喷雾干燥和电流体雾化干燥。喷雾干燥是一种将溶液、悬浮液或乳液通过喷嘴雾化并注射到热空气中的技术，随着溶剂快速蒸发，雾化的液滴转化为固体颗粒[45]。而电水动力雾化干燥是一种用于生产纳米到微米颗粒的非热技术，通过液体雾化和随后的溶剂蒸发形成干燥颗粒，在食品生物活性物质的纳米封装和稳定方面有广泛的应用。Moncada等[50]发现在奶酪脆片调味中使用平均粒径为1.5 μm的纳米喷雾干燥氯化钠（图5G），产品的咸度明显高于平均粒径1 500 μm普通氯化钠，当颗粒粒径减少3 个数量级后，可以达到25%～50%的减盐效果。利用喷雾干燥和电水动力雾化干燥制备的氯化钠颗粒（图5H）平均粒径分别为1.21 μm和520 nm，与普通氯化钠相比，咸度分别增加了2 倍和3 倍，在同样咸度水平下其氯化钠使用量分别降低了58.67%和65.34%[55]。喷雾干燥在工业生产过程中微粒会黏附到喷雾干燥设备的内壁并导致微粒聚集[56]，因此会面临产率较低的问题。氯化钠颗粒粒径越小，钠离子在口腔中的输送速度越快，感知到的咸味越强烈，但咀嚼后也会存在后味不足的缺点。咸味感知的快速下降可通过咸味增强剂补偿[57]。



A.立方晶体氯化钠[44]；B.中空金字塔状氯化钠[42]；C.片状氯化钠[44]；D.聚集状氯化钠[44]；E～F.中空氯化钠微球[47-48]；G～H.超细氯化钠[54-55]。

图 5 不同物理结构氯化钠晶体的扫描电子显微镜形貌图像

Fig. 5 Morphological pictures of salt crystals with different physical structures observed by scanning electron microscope

然而，在面食或加工肉制品等食物中，大颗粒的氯化钠会增强咸味的感知。在肉制品的制造过程中，小尺寸的氯化钠晶体会在加工过程中迅速溶解。细片状氯化钠（0.55 mm）溶解较快，在干腌猪肉中具有较大的渗透性。避免氯化钠在高含水量基质中溶解的一种替代方法是使用大尺寸的颗粒状氯化钠晶体[58]。Mueller等[59]在披萨面团混合结束前30 s加入0.4～1.4 mm的粗粒氯化钠，在减少25%氯化钠的情况下获得了更咸的披萨面团。尽管增加氯化钠颗粒尺寸会增强这类食品的咸味感知，却会对感官品质产生不利影响。在牛肉饼中使用3 mm的氯化钠晶体可显著减少氯化钠含量并保持咸味，但导致牛肉饼在烹饪中损失更多水分[60]。2 mm的氯化钠晶体提高了面包的咸度，但对感官接受度有负面影响[61]。

整体而言，需要不断探究不同应用场景下氯化钠晶体的适宜尺寸，以满足不同类型食物在咸味强度和感官接受度之间的平衡。

3 包埋氯化钠的减盐策略

咸味的强度取决于咀嚼和唾液分泌过程中从食物基质向味蕾受体释放钠离子的程度[62]。在胶体食品（如奶酪、香肠等）中，经过疏水材料包埋的氯化钠会形成高盐浓度的非均匀区域，并且在咀嚼过程中释放，延长咸味感知，是一种降低食品中钠含量的有效策略。以麦芽糊精和辛烯基琥珀酸酐（octenyl succinic anhydride，OSA）改性淀粉作为包裹氯化钠的载体可以降低钠的释放速率，与商业氯化钠相比，包埋的氯化钠在口腔中钠释放更加持续稳定，能有效改善零食的咸味感知。麦芽糊精包埋样品释放钠的速率比OSA改性淀粉包埋样品快，并通过改变壁材的浓度调整钠的释放（图6）[63]。相比酶处理和喷雾干燥产生的多孔玉米淀粉（porous corn starch，PCS），通过凝胶化和冷冻干燥产生的脂蛋白基质可以更好地控制钠的释放，PCS颗粒中大部分氯化钠包裹在其表面，导致其钠的释放无明显变化，而脂蛋白载体中的氯化钠分散在其中，通过改变蛋白质含量和脂肪含量可以有效改变脂蛋白基质中钠的释放（图7）[64]。

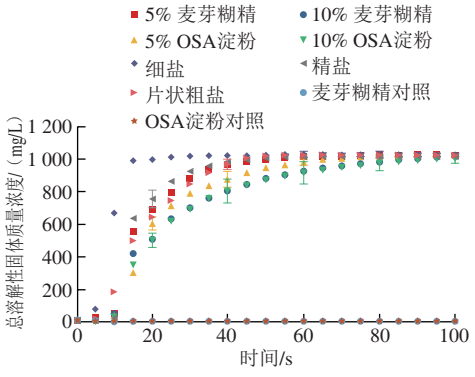
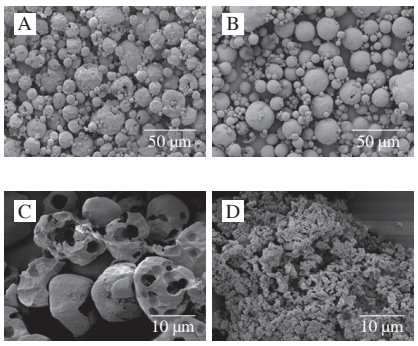


图 6 不同壁材包埋后的氯化钠释放图谱[63]

Fig. 6 Release profiles of salt encapsulated with different wall materials[63]



A.麦芽糊精包埋氯化钠；B. OSA淀粉包埋氯化钠[63]；
C. PCS包埋氯化钠；D.脂蛋白包埋氯化钠[64]。

图 7 不同壁材包埋氯化钠的扫描电子显微镜形貌图像

Fig. 7 Morphological pictures of salt crystals with different physical structures observed by scanning electron microscope

巴西棕榈蜡包埋的氯化钠可以有效降低新鲜香肠的含盐量，同时由于氯化钠分布不均匀，在低盐含量的情况下仍能保持咸味，经感官评价，使用包埋氯化钠可以减少新鲜香肠中25%的氯化钠含量[65]。ConAgra Foods®使用油脂封装的微粉氯化钠以提高食品中对咸味的感知[46]。包埋的氯化钠在面包中可以有效地增加咸度。在含1.0%（以体系质量计，下同）和1.5%氯化钠水平的面包中，普通氯化钠可以被不同粒度的包埋氯化钠（500、1 000 μm和2 000 μm）完全替代，经感官评价，使用1.0%大粒径包埋氯化钠与使用2%的正常粒径氯化钠晶体的面包咸度相等，使用粒径1 000～2 000 μm的氯化钠有望将面包中氯化钠含量降低到50%，并提高消费者的接受度[56]。由于包埋会减缓钠的释放速率，因此该策略更多地应用于需要长时间咀嚼的食物中，如加工肉制品或面食，以达到在咀嚼过程中稳定释放钠离子的效果。

4 使用氯化钠替代物的减盐策略

4.1 氯化钠替代物

4.1.1 氯化钾

使用氯化钠替代物部分取代是一种有效的减盐策略，添加量通常为25%～30%[66]。使用各种氯化钠替代物可以提高低盐食品的接受性，从而减少每日钠的摄入量。这些成分能够代替或增强氯化钠的功能，如钾离子、铵离子、钙离子和锂离子组成的化合物[67]，其中最常见的为氯化钾。氯化钾的口感与氯化钠相似，且没有严重的不良副作用。K^+对人类的生命至关重要，在许多国家中已被确定为短缺营养素。摄入充足的钾与血压降低之间存在相关性，并且能降低中风和冠心病风险[68]。世界卫生组织建议增加膳食钾摄入，成人的每日钾摄入至少为3 510 mg[69]。但氯化钾存在刺激的辛辣味、金属味和苦味，必须引入有效的味觉改善剂克服氯化钾的感官缺陷[70]。氯化钾部分替代氯化钠可以提高猪肉乳化肠的保水率，且不会显著改变猪肉乳化肠的色泽、硬度、弹性、咀嚼性和pH值，但只有40%以下氯化钾替代的猪肉肠接受度较高，继续提高氯化钾含量则会出现明显的金属涩味[71]。当风鸡中的氯化钾含量提高到50%时会出现苦味[72]。

目前掩盖氯化钾不良风味的策略主要包括复配其他具有咸味的矿物盐，使用有机酸和氨基酸，添加碳水化合物、糖醇和糖替代物，以及利用食品聚合物和鲜味成分等方法[70]。孔保华等[73]发明了一种复配低钠盐的制备方法，该方法首先利用柠檬酸、果酸或酒石酸等有机酸和麦芽糊精掩盖氯化钾的不良风味，再与钙盐、氨基酸、谷氨酸钠和氯化钠混合，不仅避免了氯化钠本身咸味被掩盖的问题，确保所加入氯化钠的咸味均能被感知，有效降低了氯化钠含量。Abu等[74]发现溶液中糖的存在会使氯化钾的感知味觉模式发生变化，在不同浓度海藻糖和蔗糖存在下，氯化钾的平均苦金属味会减弱。Ganesan等[75]的研究也证明海藻糖是一种有效的食物成分，可以掩盖各种添加含氯化钾食品中的苦味。Jung等[76]在香肠中用氯化钾和氯化镁替代40%～50%的钠，同时通过添加生物聚合物（纤维素和壳聚糖）降低氯化钾的苦味。研究结果表明3%的纤维素可以有效消除苦味，并使钠的吸收率降低60%。Vidal等[77]的研究表明氯化钠-氯化钾-赖氨酸-酵母提取物混合物是一种降低咸肉中钠含量的良好替代品，且会对感官特性产生负面影响。

4.1.2 其他矿物盐

一些其他金属元素（如钾、钙等）与钠元素具有类似的理化性质，因此采用这类咸味矿物盐部分替代氯化钠是一种广泛使用的减盐策略，包括金属离子的盐酸盐、乳酸盐和磷酸盐等[78]。其他矿物盐（氯化镁、氯化铵、硫酸镁和氯化钙）由于不良味道在氯化钠替代方面的应用受限[79]。在牛肉干中使用25%和50%的氯化钙会导致产品品质下降，特别是感官特性，产生苦味、纤维感、酸味和不良余味[80]。碱性有机钙盐（乳酸钙或柠檬酸钙）可以部分取代氯化钠降低奶酪中钠含量；感官测试表明，使用乳酸钙或柠檬酸钙替代氯化钠，在不影响盐味和苦味的条件下可以降低75%的盐含量，低盐奶酪的外观、质地和香气均与对照组奶酪相当[81]。使用氯化钙和碳酸钙（1∶1）分别替代面包中50%、70%和80%的氯化钠，低盐面包表现出与对照面包相似的质地、感官和颜色属性，但更高含量的钙会影响面包的质地和颜色[79]。不同矿物盐替代氯化钠的能力不同，在奶油芝士中为达到与1%氯化钠相同的咸味，需要添加1.2%氯化钾、2.5%氯化镁、2.56%谷氨酸钠或2.98%磷酸钾，然而在使用氯化钠替代品的样品中均产生了不良风味，如酸味和苦味，即使是与氯化钠具有类似感觉特征的谷氨酸钠，

其氯化钠替代能力也很低，不仅没有显著降低钠含量，还会导致成本的增加。由于其他矿物盐会引起不良风味，如何通过组合或包埋等方法使其他矿物盐在不影响风味的条件下替代氯化钠还需进一步研究[82]。

4.2 咸味增强剂与天然呈味物质

咸味增强剂是一种可以增加食物咸味感知的物质。咸味增强剂包括核苷酸、酵母提取物、谷氨酸盐和氨基酸[56]，可以通过激活口腔和喉咙中的味觉感受器，显著促进平衡低盐产品的咸味，并增加它们的咸味感知[83]。酶解鸡肉制备的咸味增强肽可以提高氯化钠溶液的咸味。在酶解时间4 h、温度50 ℃、酶添加量0.2%、肉-水质量比为1∶2条件下制备的酶解产物咸味增强作用较佳，能够将50 mmol/L氯化钠溶液的咸味提升26.2%[84]。添加大豆发酵成分作为天然风味增强剂可以将白面包的钠含量降低10%～50%不等。考虑到感官接受度，添加大豆发酵成分替代25%的盐不会影响面包的可接受度，但继续提高大豆发酵物含量会影响面包的颜色[85]。

不同减盐策略的原理、应用及特点如表2所示。

表 2 不同减盐策略的原理、应用及特点

Table 2 Principles, applications and characteristics of different salt reduction methods

减盐策略	类型	原理	应用场景	特点
优化氯化钠的物理结构	调节氯化钠的形貌	高度团聚、扁平、锥型和球形度低的氯化钠溶解速率更快、溶解时间更短	油炸食品	不会添加额外物质，产品具有清洁标签；成本较高
	调节氯化钠的粒径	减小氯化钠的粒径可以增加其表面积，加快在唾液中的溶解速率	油炸食品、加工肉制品、烘焙食品	不会添加额外物质，产品具有清洁标签；较小颗粒的氯化钠存在后味不足的问题；较大颗粒的氯化钠会影响食品的感官品质
	改变氯化钠的空间结构	具有小尺寸、高比表面积、较高孔隙度的氯化钠颗粒溶解速率更快，如自由流动性良好的空心微球	油炸食品	制备方法（喷雾干燥）成本较高，容易实现产业化；产率较低
氯化钠的包埋	使用生物大分子对氯化钠进行包埋	经疏水材料包埋的氯化钠会形成高盐浓度的非均匀区域，并在咀嚼过程中持续释放	加工肉制品、烘焙食品	咀嚼过程中可以均匀的感受到咸味，不会出现后味不足的问题；引入额外的添加剂
使用氯化钠替代物	添加其他矿物盐	一些其他金属元素盐会产生咸味，如钾、钙等	多种食品体系	钾等矿物质的补充对人体有多种健康作用；其他矿物盐容易产生不良风味
	使用咸味增强剂或天然风味物质	咸味增强剂可以通过激活口腔和喉咙中的味觉感受器，显著利于平衡低盐产品的咸味	多种食品体系	源自天然提取，产品具有标签清洁；不会产生异味，产品咸味纯正；成本较高

5 结 语

高盐饮食不仅与心血管疾病密切相关，还会导致自身免疫系统破坏、肠道菌群紊乱等诸多健康问题。开发低盐食品有利于我国居民健康。目前以固体形式摄入的氯化钠是我国居民日常膳食食盐摄入的重要部分，因此通过固体氯化钠结构设计达到减盐不减咸的效果是一种十分具有前景的减盐策略。本文对改变氯化钠物理结构（形貌和粒径）、包埋氯化钠和添加氯化钠替代物（其他咸味矿物盐、咸味增强剂和天然呈味物质）等减盐策略进行详细的讨论和比较。通过详细解释咸味感知的过程，分析了不同氯化钠结构影响咸味感知的原理，以及不同减盐策略的特点。未来的研究可聚焦于开发低成本、易于工业化生产以及配方纯净的不同形态氯化钠。此外，由于目前评价固体形态氯化钠咸度的方法主要通过感官评价，存在难以准确定量分析及横向对比的问题，因此开发针对固体形态氯化钠咸度的定量评价方法也十分必要。

参考文献：

[1] ISRAR T, RAKHA A, SOHAIL M, et al. Salt reduction in baked products: strategies and constraints[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 51: 98-105. DOI:10.1016/j.tifs.2016.03.002.

[2] World Health Organization. Guideline: sodium intake for adults and children[R]. Geneva: World Health Organization, 2012.

[3] MENETON P, JEUNEMAITRE X, DE WARDENER H E, et al. Links between dietary salt intake, renal salt handling, blood pressure, and cardiovascular diseases[J]. Physiological Reviews, 2005, 85(2): 679-715. DOI:10.1152/physrev.00056.2003.

[4] GMEN A Y, AHIN E, SEMIZ E, et al. Is elevated serum ceruloplasmin level associated with increased risk of coronary artery disease?[J]. The Canadian Journal of Cardiology, 2008, 24(3): 209-212. DOI:10.1016/S0828-282X(08)70586-5.

[5] HE Y N, LI Y P, YANG X Q, et al. The dietary transition and its association with cardiometabolic mortality among Chinese adults, 1982–2012: a cross-sectional population-based study[J]. The Lancet Diabetes & Endocrinology, 2019, 7(7): 540-548. DOI:10.1016/S2213-8587(19)30152-4.

[6] KENDIG M D, MORRIS M J. Reviewing the effects of dietary salt on cognition: mechanisms and future directions[J]. Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition, 2018, 28(1): 6-14. DOI:10.6133/apjcn.201903_28(1).0002.

[7] SHARIF K, AMITAL H, SHOENFELD Y. The role of dietary sodium in autoimmune diseases: the salty truth[J]. Autoimmunity Reviews, 2018, 17(11): 1069-1073. DOI:10.1016/j.autrev.2018.05.007.

[8] WU H J, HUANG X, QIU H, et al. High salt promotes autoimmunity by TET2-induced DNA demethylation and driving the differentiation of Tfh cells[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 28065. DOI:10.1038/srep28065.

[9] 徐珒昭, 汤梦琪, 徐境含, 等. 焦谷氨酸对高盐饮食小鼠肠道健康及肠道菌群的作用[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(2): 102-108. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.024997.

[10] 曹清明, 王蔚婕, 张琳, 等. 中国居民平衡膳食模式的践行: 《中国居民膳食指南 (2022)》解读[J]. 食品与机械, 2022, 38(6): 22-29. DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.60050.

[11] FANG K H, HE Y N, FANG Y H, et al. Dietary sodium intake and food sources among Chinese adults: data from the CNNHS 2010–2012[J]. Nutrients, 2020, 12(2): 453. DOI:10.3390/NU12020453.

[12] VELLA D, MARCONE M, DUIZER L M. Physical and sensory properties of regional sea salts[J]. Food Research International, 2012, 45(1): 14-21. DOI:10.1016/j.foodres.2011.11.013.

[13] DESMOND E. Reducing salt: a challenge for the meat industry[J]. Meat Science, 2006, 74(1): 188-196. DOI:10.1016/j.meatsci.2006.04.014.

[14] CHANDRASHEKAR J, HOON M A, RYBA N J, et al. The receptors and cells for mammalian taste[J]. Nature, 2006, 444: 288-294. DOI:10.1038/nature05401.

[15] KIKUT L D, TRZCIELINSKA L J. How taste works: cells, receptors and gustatory perception[J]. Cellular & Molecular Biology Letters, 2016, 20(5): 699-716. DOI:10.1515/cmble-2015-0042.

[16] NELSON G, HOON M A, CHANDRASHEKAR J, et al. Mammalian sweet taste receptors[J]. Cell, 2001, 106(3): 381-390. DOI:10.1016/s0092-8674(01)00451-2.

[17] NELSON G, CHANDRASHEKAR J, HOON M A, et al. An amino-acid taste receptor[J]. Nature, 2002, 416: 199-202. DOI:10.1038/nature726.

[18] ADLER E, HOON M A, MUELLER K L, et al. A novel family of mammalian taste receptors[J]. Cell, 2000, 100(6): 693-702. DOI:10.1016/S0092-8674(00)80705-9.

[19] HUANG A L, CHEN X K, HOON M A, et al. The cells and logic for mammalian sour taste detection[J]. Nature, 2006, 442: 934-938. DOI:10.1038/nature05084.

[20] CHEN X K, GABITTO M, PENG Y, et al. A gustotopic map of taste qualities in the mammalian brain[J]. Science, 2011, 333: 1262-1266. DOI:10.1126/science.1204076.

[21] ROLLS E T. Smell, taste, texture, and temperature multimodal representations in the brain, and their relevance to the control of appetite[J]. Nutrition Reviews, 2010, 62(11): 193-204. DOI:10.1111/j.1753-4887.2004.tb00099.x.

[22] SZALAY C, ARADI M, SCHWARCZ A, et al. Gustatory perception alterations in obesity: an fMRI study[J]. Brain Research, 2012, 1473: 131-140. DOI:10.1016/j.brainres.2012.07.051.

[23] ROLLS E T. Chemosensory learning in the cortex[J]. Frontiers in Systems Neuroscience, 2011, 5: 78. DOI:10.3389/fnsys.2011.00078.

[24] ALTHUBEATI S, AVERY A, TENCH C R, et al. Mapping brain activity of gut-brain signaling to appetite and satiety in healthy adults: a systematic review and functional neuroimaging meta-analysis[J]. Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 2022, 136: 104603. DOI:10.1016/j.neubiorev.2022.104603.

[25] PASTOR B A, STASIAK A, SCHULTZ W. Reward-specific satiety affects subjective value signals in orbitofrontal cortex during multicomponent economic choice[J]. Proceedings of The National Academy of Sciences, 2021, 118(30): e2022650118. DOI:10.1073/pnas.2022650118.

[26] TIAN X, FISK I D. Salt release from potato crisps[J]. Food & Function, 2012, 3(4): 376-380. DOI:10.1039/c2fo10282j.

[27] SUGITA M. Taste perception and coding in the periphery[J]. Cellular & Molecular Life Sciences, 2006, 63(17): 2000-2015. DOI:10.1007/s00018-006-6100-0.

[28] NOMURA K, NAKANISHI M, ISHIDATE F, et al. All-electrical Ca^{2+}-independent signal transduction mediates attractive sodium taste in taste buds[J]. Neuron, 2020, 106(5): 816-829. DOI:10.1016/j.neuron.2020.03.006.

[29] LIMAN E R. Salty taste: from transduction to transmitter release, hold the calcium[J]. Neuron, 2020, 106(5): 709-711. DOI:10.1016/j.neuron.2020.05.012.

[30] XIAO Y X, ZHOU H F, JIANG L, et al. Epigenetic regulation of ion channels in the sense of taste[J]. Pharmacological Research, 2021, 172: 1-9. DOI:10.1016/j.phrs.2021.105760.

[31] MA Z Y, HUMMEL S L, SUN N L, et al. From salt to hypertension, what is missed?[J]. Journal of Clinical Hypertension, 2021, 23(12): 2033-2041. DOI:10.1111/jch.14402.

[32] TITZE J, SHAKIBAEI M, SCHAFFLHUBER M, et al. Glycosaminoglycan polymerization may enable osmotically inactive Na^+ storage in the skin[J]. American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology, 2004, 287(1): 1433-1433. DOI:10.1152/ajpheart.01237.2003.

[33] TITZE J, BAUER K, SCHAFFLHUBER M, et al. Internal sodium balance in DOCA-salt rats: a body composition study[J]. American Journal of Physiology-Renal Physiology, 2005, 289(4): 793-802. DOI:10.1152/ajprenal.00096.2005.

[34] DAHLMANN A, DÖRFELT K, EICHER F, et al. Magnetic resonance-determined sodium removal from tissue stores in hemodialysis patients[J]. Kidney International, 2015, 87(2): 434-441. DOI:10.1038/ki.2014.269.

[35] 张彦慧, 郑红霞, 刘楠, 等. 胶体结构设计在减盐食品中的应用[J]. 食品科学, 2021, 43(1): 213-222. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200816-208.

[36] ZHANG Yanhui, YANG Hao, ZHENG Hongxia, et al. Physical properties and salt release of potato starch-based emulsion gels with OSA starch-stabilized oil droplets[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 141: 1-9. DOI:10.1016/j.lwt.2021.110929.

[37] LU Wei, HU Zining, ZHOU Xuelian, et al. Natural biopolymer masks the bitterness of potassium chloride to achieve a highly efficient salt reduction for future foods[J]. Biomaterials, 2022, 283: 121456. DOI:10.1016/j.biomaterials.2022.121456.

[38] CHEN Xiaowei, YANG Danxia, GUO Jian, et al. Quillaja saponin-based hollow salt particles as solid carriers for enhancing sensory aroma with reduced sodium intake[J]. Food & Function, 2018, 9(1): 191-199. DOI:10.1039/c7fo01371j.

[39] XU J, LEWANDOWSKI B, MIYAZAWA T, et al. Spilanthol enhances sensitivity to sodium in mouse taste bud cells[J]. Chemical Senses, 2018, 44(2): 91-103. DOI:10.1093/chemse/bjy069.

[40] 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. DOI:10.1111/1750-3841.13194.

[41] SUN C, ZHOU X, HU Z, et al. Food and salt structure design for salt reducing[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 43(1): 213-222. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200816-208.

[42] QUILAQUEO M, MIGUEL A J. Dissolution of NaCl crystals in artificial saliva and water by video-microscopy[J]. Food Research International, 2015, 69: 373-380. DOI:10.1016/j.foodres.2015.01.020.

[43] DESMOND E. Reducing salt: a challenge for the meat industry[J]. Meat Science, 2006, 74(1): 188-196. DOI:10.1016/j.meatsci.2006.04.014.

[44] QUILAQUEO M, DUIZER L, MIGUEL A J. The morphology of salt crystals affects the perception of saltiness[J]. Food Research International, 2015, 76: 675-681. DOI:10.1016/j.foodres.2015.07.004.

[45] CHINDAPAN N, NIAMNUY C, DEVAHASTIN S. Physical properties, morphology and saltiness of salt particles as affected by spray drying conditions and potassium chloride substitution[J]. Powder Technology, 2017, 326: 265-271. DOI:10.1016/j.powtec.2017.12.014.

[46] SU Y, ZHANG B L, SUN R W, et al. PLGA-based biodegradable microspheres in drug delivery: recent advances in research and application[J]. Drug Delivery, 2021, 28(1): 1397-1418. DOI:10.1080/10717544.2021.1938756.

[47] 邓小明, 朱国梁, 贾立军, 等. 一种空心结构食用盐及其制备方法: CN111034987A[P]. (2020-04-21)[2022-05-14].

[48] MARTIN K, MATEJ P, HANA B, et al. Substitution of sodium chloride by salt microspheres in dough: effect on dough rheological properties[J]. Journal of Texture Studies, 2018, 49(4): 456-463. DOI:10.1111/jtxs.12337.

[49] YI Cheng, TSAI M L, LIU T. Spray-dried chitosan/acid/NaCl microparticles enhance saltiness perception[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 172: 246-254. DOI:10.1016/j.carbpol.2017.05.066.

[50] MONCADA M, ASTETE C, SABLIOV C, et al. Nano spray-dried sodium chloride and its effects on the microbiological and sensory characteristics of surface-salted cheese crackers[J]. Journal of Dairy Science, 2015, 98(9): 5946-5954. DOI:10.3168/jds.2015-9658.

[51] RIOS-MERA J D, SELANI M M, PATINHO I, et al. Modification of NaCl structure as a sodium reduction strategy in meat products: an overview[J]. Meat Science, 2020, 174: 108417. DOI:10.1016/j.meatsci.2020.108417.

[52] HURST K E, AYED C, DERBENEV I N, et al. Physicochemical design rules for the formulation of novel salt particles with optimised saltiness[J]. Food Chemistry, 2021, 360: 129990. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.129990.

[53] RIOS-MERA J D, SALDANA E, CRUZADO-BRAVO M 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. DOI:10.1016/j.foodres.2019.03.044.

[54] TASSYANA V M F, DIEYCKSON O F, VANESSA R D S. Salting potency and time-intensity profile of microparticulated sodium chloride in shoestring potatoes[J]. Journal of Sensory Studies, 2015, 30(1): 1-9. DOI:10.1111/joss.12129.

[55] VINITHA K, LEENA M M, MOSES J A, et al. Size-dependent enhancement in salt perception: spraying approaches to reduce sodium content in foods[J]. Powder Technology, 2021, 378: 237-245. DOI:10.1016/j.powtec.2020.09.079.

[56] PATEL M, JHA A, PATEL R. Potential application of PLGA microsphere for tissue engineering[J]. Journal of Polymer Research, 2021, 28(6): 1-17. DOI:10.1007/s10965-021-02562-6.

[57] 邓小明, 朱国梁, 娄红斌, 等. 三种减钠盐减钠效果的评估[J]. 盐科学与化工, 2019, 48(11): 47-52.

[58] AHETO J H, HUANG X Y, TIAN X Y, et al. Investigation into crystal size effect on sodium chloride uptake and water activity of pork meat using hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(4): 1-10. DOI:10.1111/jfpp.14197.

[59] MUELLER E, KOEHLER P, SCHERF K A. Applicability of salt reduction strategies in pizza crust[J]. Food Chemistry, 2015, 192: 1116-1123. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.07.066.

[60] GAUDETTE N J, PIETRASIK Z, JOHNSTON S P. Application of taste contrast to enhance the saltiness of reduced sodium beef patties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 116: 108585. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108585.

[61] NOORT M, BULT J, STIEGER M. Saltiness enhancement by taste contrast in bread prepared with encapsulated salt[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 55(2): 218-225. DOI:10.1016/j.jcs.2011.11.012.

[62] BENJAMIN O, DAVIDOVICH-PINHAS M, SHPIGELMAN A, et al. Utilization of polysaccharides to modify salt release and texture of a fresh semi hard model cheese[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 75: 95-106. DOI:10.1016/j.foodhyd.2017.08.033.

[63] CAI J W, LEE Y. Controlling sodium release using maltodextrin and octenyl succinic anhydride-modified starch with two types of spray dryer nozzles[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 43(5): 1-10. DOI:10.1111/jfpe.13238.

[64] CHRISTINA J, LEE Y. Modification of sodium release using porous corn starch and lipoproteic matrix[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(4): E897-E905. DOI:10.1111/1750-3841.13251.

[65] BECK P, MATIUCCI M A, NETO A, et al. Sodium chloride reduction in fresh sausages using salt encapsulated in carnauba wax[J]. Meat Science, 2021, 175(6): 108462. DOI:10.1016/j.meatsci.2021.108462.

[66] YU J, THOUT S R, LI Q, et al. Effects of a reduced-sodium added-potassium salt substitute on blood pressure in rural Indian hypertensive patients: a randomized, double-blind, controlled trial[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2021, 114(1): 185-193. DOI:10.1093/ajcn/nqab054.

[67] DOTSCH M, BUSCH J, BATENBURG M, et al. Strategies to reduce sodium consumption: a food industry perspective[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2009, 49(10): 841-851. DOI:10.1080/10408390903044297.

[68] WEAVER C M. Potassium and health[J]. Advances in Nutrition, 2013, 4(3): 368-377.

[69] World Health Organization. Guideline: potassium intake for adults and children[R]. Geneva: World Health Organization, 2012.

[70] CEPANEC K, VUGRINEC S, CVETKOVIC T, et al. Potassium chloride-based salt substitutes: a critical review with a focus on the patent literature[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2017, 16(5): 881-894. DOI:10.1111/1541-4337.12291.

[71] 赵春波, 张秋会, 马长明, 等. 氯化钾替代部分食盐对猪肉乳化肠品质的影响[J]. 肉类工业, 2019(1): 15-19.

[72] 林静, 刘斌, 李松林. 氯化钾、氯化钙和氯化镁部分替代食盐腌制对风鸡品质影响的研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(3): 105-109. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.03.013.

[73] 孔保华, 陈佳新, 陈倩, 等. 一种复配低钠盐及其制备方法: CN107156773 A[P]. (2017-09-15) [2022-05-14].

[74] ABU N B, HARRIES D, VOET H, et al. The taste of KCl: what a difference a sugar makes?[J]. Food Chemistry, 2018, 255: 165-173. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.01.175.

[75] GANESAN K, ZOERB H, MULLALLY G, et al. Ingredient systems comprising trehalose, food products containing trehalose, and methods of making same: US8231925 B2[P]. (2013-03-19) [2022-05-14].

[76] JUNG E Y, JIN S K, HUR S J. Analysis of the effects of biopolymer encapsulation and sodium replacement combination technology on the quality characteristics and inhibition of sodium absorption from sausage in mice[J]. Food Chemistry, 2018, 250: 197-203. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.01.065.

[77] VIDAL V, SANTANA J B, PAGLARINI C S, et al. Adding lysine and yeast extract improves sensory properties of low sodium salted meat[J]. Meat Science, 2019, 159: 107911. DOI:10.1016/j.meatsci.2019.107911.

[78] 陕怡萌, 蒲丹丹, 张玉玉, 等. 食品减盐方法研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(13): 267-275. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210413-177.

[79] BASSETT M N, PREZ-PALACIOS T, CIPRIANO I, et al. Development of bread with NaCl reduction and calcium fortification: study of its quality characteristics[J]. Journal of Food Quality, 2014, 37(2): 107-116. DOI:10.1111/jfq.12079.

[80] VIDAL V A S, BIACHI J P, PAGLARINI C S, et al. Reducing 50% sodium chloride in healthier jerked beef: an efficient design to ensure suitable stability, technological and sensory properties[J]. Meat Science, 2019, 152: 49-57. DOI:10.1016/j.meatsci.2019.02.005.

[81] GORE E, MARDON J, CECILE B, et al. Calcium lactate as an attractive compound to partly replace salt in blue-veined cheese[J]. Journal of Dairy Science, 2018, 102(1): 1-13. DOI:10.3168/jds.2018-15008.

[82] SILVA T, SOUZA V D, PINHEIRO A, et al. Equivalence salting and temporal dominance of sensations analysis for different sodium chloride substitutes in cream cheese[J]. International Journal of Dairy Technology, 2014, 67(1): 31-38. DOI:10.1111/1471-0307.12100.

[83] MOJET J. Effect of concentration on taste-taste interactions in foods for elderly and young subjects[J]. Chemical Senses, 2004, 29(8): 671-681. DOI:10.1093/chemse/bjh070.

[84] 陈瑞霞, 孙思远, 相悦, 等. 以淘汰蛋鸡为原料利用蛋白酶解技术制备咸味增强肽[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(1): 166-171. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.022280.

[85] JIMENEZ-MAROTO L A, SATO T, RANKIN S A. Saltiness potentiation in white bread by substituting sodium chloride with a fermented soy ingredient[J]. Journal of Cereal Science, 2013, 58(2): 313-317. DOI:10.1016/j.jcs.2013.06.001.