

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240308008

食品减盐措施和氯化钠检测技术研究进展

李婷婷¹, 王蓉¹, 刘盼¹, 任兴权¹, 曾文锦^{1*}, 孙姗姗^{2*}

[1. 酒泉市食品检验检测中心(酒泉市质量检验检测中心), 酒泉 735000;
2. 中国食品药品检定研究院/国家市场监督管理总局重点实验室(食品质量与安全), 北京 100050]

摘要: 食盐在人们的日常饮食中不可或缺, 也在食品工业中发挥重要作用。一系列监测数据表明, 人们日常食盐摄入量远高于世界卫生组织建议的 5 g/d。高盐饮食带来的健康风险在世界范围内得到广泛关注, 降低居民每日食盐摄入量已成为共识。随着各国政府和世界卫生组织的一系列措施干预, 食品减盐已取得初步效果。本文介绍了包含直接减少食盐用量、优化食盐物理结构和改变食盐分布形态、添加咸味增强剂、使用非钠盐替代、多感官协同作用、改进加工工艺及多种措施协同作用等方法在内的减盐措施, 并对它们的减盐效果和应用前景进行阐述, 分别从以钠基计和以氯基计两个方面评述了 13 种食品中氯化钠含量的检测方法, 主要介绍了它们的测试原理、前处理方法改进和应用范围, 以为食品减盐措施和氯化钠检测技术的深入研究提供有价值的参考。

关键词: 减盐措施; 检测技术; 氯化钠

Research progress of salt reduction measures and detection technology of sodium chloride in food

LI Ting-Ting¹, WANG Rong¹, LIU Pan¹, REN Xing-Quan¹,
ZENG Wen-Jin^{1*}, SUN Shan-Shan^{2*}

[1. Food Test Center of Jiuquan (Quality Test Center of Jiuquan), Jiuquan 735000, China; 2. National Institute for Food and Drug Control, Key Laboratory of Food Quality and Safety for State Market Regulation, Beijing 100050, China]

ABSTRACT: Salt is indispensable in people's daily diet, and play an essential role in the food industry. A series of monitoring data have shown that people's daily salt intake is far higher than the World Health Organization's recommended 5 g/d. The health risks associated with a high-salt diet have received increased attention worldwide, and the agreement of reducing the daily salt intake of residents has reached. With a series of measures to intervene, enacted by governments around the world and the world health organization, salt reduction in food has achieved

基金项目: 甘肃省市场监督管理局科技计划项目(SSCJG-SP-A202207)、国家重点研发计划项目(2022YFF1100701)、酒泉市科技局2023年科技计划项目(2023CA2014)

Fund: Supported by the Science and Technology Project of Gansu Market Supervision Administration (SSCJG-SP-A202207), the National Key Research and Development Program of China (2022YFF1100701), and the 2023 Science and Technology Project of Jiuquan Science and Technology Bureau (2023CA2014)

*通信作者: 曾文锦, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 576840512@qq.com

孙姗姗, 博士, 副研究员, 主要研究方向为食品安全检测、食品的真实性检验及过敏原的鉴定。E-mail: shanshans112@163.com

*Corresponding author: ZENG Wen-Jin, Senior Engineer, Food Test Center of Jiuquan, No.24, Fukang Road, Suzhou District, Jiuquan 735000, China. E-mail: 576840512@qq.com

SUN Shan-Shan, Ph.D, Associate Professor, National Institute for Food and Drug Control, No.2, Tiantan West Lane, Chongwen District, Beijing 100050, China. E-mail: shanshans112@163.com

initial results. This paper introduced the methods of reducing salt consumption directly, optimizing the physical structure of salt and changing the distribution form of salt, adding saltiness enhancer, using non-sodium salt instead, multi-sensory synergy, improving processing technology and synergistic effect of various measures, and expounded their salt reduction effects and application prospects. The determination methods of sodium chloride content in 13 kinds of foods were reviewed from two aspects: Sodium-based and chlorine-based, and their testing principles, improvement of pretreatment methods and application scope were mainly introduced, so as to provide valuable reference for the further study of food salt reduction measures and sodium chloride detection technology.

KEY WORDS: salt reduction measures; detection technology; sodium chloride

0 引言

以氯化钠为主要成分的食盐是人们生活中最常见的调味品之一,在食物烹饪时起到增加咸鲜度、促进食欲等作用,也被广泛应用于食品工业中来改善食品风味、感官、保水性和延长保质期。研究人员通过比对采集的 622 条国内外预包装食品中食盐含量信息,发现高盐食品(钠含量 $>500\text{ mg}/100\text{ g}$)主要集中在调味粉、酱油、方便面、酱腌菜等 13 个食品亚类,且国产预包装食品中高盐食品的比例远高于进口预包装食品^[1]。人体摄入的氯化钠主要来源于家庭烹饪和预包装食品,欧美国家居民的食盐摄入量有 75%~80%来自加工食品^[2], 中国和日本等国家居民的食盐摄入量较多来自家庭烹饪食品^[3],随着生活节奏的加快和消费水平的提高,来自于加工食品的食盐摄入量占比有上升趋势。

世界卫生组织推荐的每日食盐摄入量不超过 5 g,但目前大多数国家的居民每日食盐摄入量都明显高于该推荐值^[4]。长期高盐饮食将给人体健康带来较大的风险隐患,如引发人群血压升高^[5]和增加心血管疾病以及脑卒中、胃癌等多种疾病的发生风险^[6],已成为死亡人数和伤残调整寿命年的重大危险因素之一^[7]。自 20 世纪 70 年代以来,很多国家都实施了一系列的减盐举措来干预高盐饮食^[8],如芬兰自 1972 年起实施系统性减盐政策将人均食盐摄入量从 14 g/d 降低至 2007 年的 9 g/d、英国自 1999 年通过国家卫生部签署正式文件等各项措施将人均食盐摄入量降低至 2019 年的 7.5 g/d。世界卫生组织提出了“到 2025 年将钠摄入量减少 30%”的全球目标,并在 2021 年为 60 多种食品制定了统一的最大钠含量基准^[9]。在我国,GB 7718—2011《食品安全国家标准 预包装食品标签通则》明确规定当预包装食品在加工过程中使用食盐作为辅料时应在标签的配料表中进行标识,GB 28050—2011《食品安全国家标准 预包装食品营养标签通则》中明确要求钠含量是营养标签中强制标识的内容之一,并明确当食品中钠含量分别低于 5 mg/100 g、40 mg/100 g 和 120 mg/100 g 时,可在其标签上标注“无或不含钠”“极低钠”和“低钠”含量声称。另外,我国还通过发布《中国食品工业减盐指南》《中国居民膳食指南》国

民营养行动计划》及《健康中国行动(2019-2030 年)》等政策性文件推动全民减盐行动持续深入。在食品工业中,从原料投放到最终产品需要经过一系列的工艺流程,因此食盐在原料中的投料比例并不能准确地反馈终端产品中氯化钠的含量。通过检测技术准确地测定食品中氯化钠的含量,一方面能为生产者控制产品中氯化钠含量提供有效数据支持,另一方面可通过在食品营养标签上明确标识钠含量,为消费者提供食用参考。

本文就国内外食品减盐措施和食品中氯化钠含量检测技术的研究情况展开综述,阐述了直接减少食盐用量等多种食品减盐措施的作用效果并对其在食品工业中的应用前景进行展望,对多种食品中氯化钠检测方法的原理、优缺点和实际应用进行评述,以期为高品质低钠食品的生产加工和制定降低人们氯化钠摄入量的措施制定提供积极帮助。

1 食品减盐措施

1.1 直接减少食盐用量

直接减少食盐在加工食品中的添加量和家庭烹调过程中的使用量是降低人们食盐摄入量最为直接的方式。有研究表明,将食品中氯化钠的含量降低 10%~25%不会引起明显的感官差异^[10],且在超过 5 个月以上的时间内减少氯化钠的摄入会使人体对食物咸味的感知程度增强^[11]。因此,通过渐进减少的方式可使消费者逐渐适应因食盐添加量减少带来的食品口味的变化,尤其是在家庭烹调过程中使用该方法对减少食盐摄入量有一定帮助。虽然该方法简单有效且有利于人们身体健康,但食盐用量的减少也降低了食品中的离子强度,对预包装食品的感官特性、加工特性、质构特性和保藏特性可能产生不利影响,如只通过直接减少食盐用量来降低肉制品中氯化钠的含量,会对产品中挥发性香气化合物的释放、产品的保水性和保油性以及保质期延长起到负面作用^[12]。

1.2 优化食盐的物理结构和改变食盐分布形态

氯化钠的溶解性和咸味感知由其晶体颗粒的粒径和疏水性决定^[13]。RUBEN 等^[14]发现,在咀嚼次数和时间相

同的情况下,人体对咸味的感知程度会随着食盐在唾液中的溶解速度加快而增强,而优化物理结构对提高食盐在口腔中的溶解和输送速率有明显促进作用,通常采用的手段是通过改变氯化钠的空间结构以及调节氯化钠晶体形状和粒径等途径来增加氯化钠的比表面积^[15]。相较于具有立方晶体结构的普通食盐,经过优化物理结构的食盐在降低其使用量方面有较好表现,如:呈聚集状的氯化钠^[16]味蕾检出时间可缩短 40%且咸度提高 17%;微粉氯化钠和超细氯化钠应用于油炸土豆^[17]、牛肉汉堡^[18]和饼干^[19]等食品调味时,在保持相同咸味水平下可将氯化钠使用量降低 50%以上;中空金字塔状、薄片状和球状的食盐^[20]可将其使用量降低 25%~50%。虽然优化物理结构的食盐的减盐效果非常明显,但由于具备特殊形态的氯化钠对制盐工艺要求苛刻且被少数制造商垄断、超细氯化钠产率较低且加工复杂等因素使其售价高昂,应用于普通食品加工时对控制生产成本将产生非常不利的影响。另外,使用小粒径氯化钠调味会使食品在咀嚼后存在后味不足的缺点,仍需通过咸味增强剂来弥补^[21]。除优化食盐物理结构外,改变食盐在食品基质中的空间分布形态也可有效降低食盐的使用量。非均匀分布形态会使食品基质中存在高浓度食盐区域,通过在咀嚼过程中逐渐释放氯化钠而延长咸味感知,并具有与食盐均匀分布形态食品同等或更佳的患者偏好^[22]。该方法是一种值得期待的减盐措施,其关键在于选择便于操作且满足食品安全要求的方式,使用天然可食蜡^[23]或麦芽糊精^[24]等物质包埋氯化钠、或采用 3D 打印工艺方法控制食盐分布在食品表面^[25]等方式已取得较好效果。

1.3 使用咸味增强剂

咸味增强剂可通过刺激味觉感受器^[14]或多感官协同作用^[26]来加强人体对咸味的感知程度,对弥补食品因减盐而造成的咸味减弱具有显著作用,具有较高的应用价值和较好的开发前景。目前,咸味增强剂的研究开发主要集中在咸味肽和植物天然提取物。咸味肽多是由天冬氨酸、谷氨酸等氨基酸连接而成的多肽,其呈味效果受氨基酸类型和排列方式影响较大^[27]。咸味肽在提供咸味的同时还能提供人体所需氨基酸,被认为是一种健康营养的食盐替代物,其来源有主要有两种^[28]:一是通过酶解大豆、海带等藻类植物源性食物和虾蟹、鸡、牛等动物源性食物获得;二是从天然酵母等微生物中提取。一些呈咸味的植物天然提取物及相关衍生物可作为食盐的替代品,将其加入食品中不仅可以起到减盐的作用,还可以丰富食品的风味。使用氯化钠和大蒜质量比例为 3:1 的复合盐,可降低玉米卷中 25%的食盐使用量^[29]。在人造黄油中添加柠檬、牛至叶、罗勒、大蒜、马郁兰、百里香等香料混合物使食盐使用量降低 50%~75%^[30]。一些在盐碱土地上生长旺盛的植物中也含有具备咸味增强效果物质,如海蓬子、金银花、枸杞、羊草等,其提取液制成的植物盐可替代 40%以上的

氯化钠^[31]。

1.4 使用非钠盐替代

氯化钾、氯化钙、氯化镁、氯化铵、乳酸钾、乳酸钙、磷酸钾、磷酸二氢钾等多种非钠盐在肉制品和谷物制品的减盐研究中获得较高关注度,其中采用氯化钾等盐酸盐替代氯化钠的研究最为成熟。氯化钾因和氯化钠呈现出类似的感官特性和物理特性而最为常用^[32],综合食品感官评价、品质特性、减盐效果和钾盐摄入量过量可能带来的健康风险等因素,将其替代氯化钠的量控制在 20%~35%之间较为理想^[33]。在我国,GB 2721—2015《食品安全国家标准食用盐》中规定了低钠盐中氯化钾含量应在 10~35 g/100 g 之间。倡导在餐厅和家庭日常烹饪中使用低钠盐,也为降低氯化钠摄入提供了有意义的帮助。非钠盐具有成本低、更易获取和较高的生物安全性等优势,但其过量添加会引入不良风味,如氯化铵的鱼腥味、氯化钾的苦涩味和氯化镁的金属味。以氯化钠、非钠盐和其他物质组成的复配盐为其提供了有价值的研究方向,多种非钠盐的协同使用对降低食盐使用量有较为显著的作用,如采用氯化钾和乳酸钾的混合物^[34]可替代发酵香肠中 50%的食盐,加工过程中连续使用氯化钾和氯化钙^[35]可将鱼肉汉堡中的氯化钠降低 75%。

1.5 多感官协同作用

多感官协同作用通过利用香气-味觉或味觉-味觉的相互作用来增强咸味感知,进而达到减盐目的。其引起咸味感知的气味或物质还能对减盐引起的食品感官缺陷起到一定的弥补作用,是一种有效的减盐措施。香气-味觉的相互作用主要表现为具有咸味特征的物质,如沙丁鱼和奶酪的气味^[36]以及酱油中如 3-甲硫基丙醛、3-甲硫基丙醇等^[37],可以显著增强氯化钠溶液的咸味感知程度^[38]。味觉-味觉的相互作用主要表现为鲜味物质和盐同时存在时可能会影响人对咸味的感觉,如蘑菇中的鲜味提取物^[39]和低聚木糖^[40]等。

1.6 改进加工工艺

1.6.1 非热加工技术

当在食品加工的灭菌或腌制工艺中使用高压、超声波和脉冲电场等非热加工技术时,可适当降低原料中食盐的比例,对低盐食品的开发有益,表 1 分别列出了 3 种非热加工技术的减盐原理、优点及制约发展因素,其中超声波技术和脉冲电场技术在未来食品工业中的应用领域更具前景。

1.6.2 其他技术

干制水产品、咸味调味品和腌腊制品等高盐食品的脱盐技术研究和开发对降低其中氯化钠的含量提供了积极解决思路,目前已应用于食品工业的脱盐技术主要有电渗析法和膜分离法^[48]。电渗析技术脱盐效果受操作电压和电流密度影响较大,添加离子交换剂^[49]可使金枪鱼提取物的脱

表 1 不同非热加工技术比较
Table 1 Comparison of different non-thermal processing technologies

技术类型	减盐原理	优点	制约发展因素
超高压技术	高压环境可促进钠与蛋白质的相互结合, 对增强肉制品的口感和风味有明显作用, 同时对产品的持水性和质构品质劣化也有一定的改善作用 ^[41] ; 经过该技术处理的食物在食用时, 味觉感受器能感受到更多的钠离子, 从而让人感受到更强烈的咸味 ^[42] 。	对食品的破坏较少、作用均匀且安全、能耗小、低碳环保。	国内相关法规和标准的确立还处于起步阶段; 使用成本较高 ^[43] ; 超高压处理过程可能会促进产品中脂肪的氧化以产品形态发生变化 ^[44] 。
超声波技术	通过低频率、高强度的超声波可促进肌球蛋白的溶解, 能有效地提升产品的持水能力和食盐扩散率, 使得食品在钠盐含量较低的情况下仍能引起人体较高的咸味感知 ^[45] 。	能耗低, 时间短, 易操作, 有效保存食物营养成分, 风味损失小; 对后期工艺流程中产品脱盐的操作要求低。	在使用过程中会产生热量, 与温度和压力的协同作用可能会导致自由基形成, 对产品的感官、营养和质构等特性产生负面影响。
脉冲电场技术	通过电穿孔效应增加细胞膜的通透性来影响钠在肉基质中的扩散、分布和释放, 并改变蛋白质和钠离子之间的相互作用, 对咀嚼过程中口感的提升和咸度感知产生有益影响 ^[46] 。	营养特性降低程度小, 不影响感官热性; 时间短、能耗低。	电场强度、处理时间、脉冲宽度和频率、温度以及食品本身特性等因素均会对处理效果和产品质量产生较大影响 ^[47] ; 脉冲电场系统复杂、设备技术尚不成熟、电极易被腐蚀; 现阶段仍处于实验室研究阶段。

盐率从 55.77%提高至 67.48%。膜分离法主要有微滤技术、超滤技术和纳滤技术 3 种, 其中纳滤技术^[50]因滤膜自带电荷, 可在低压条件下脱盐, 使酱油中的脱盐率达到 30.3%且通过透过液的二次发酵有望实现绿色生产。

1.7 多种减盐措施组合作用

虽然单一的减盐措施可以达到一定的减盐效果, 但将这些措施应用于食品工业中仍面临挑战, 如减盐后如何保证食品的口味、香气等感官特征、质构特性、微生物安全和可接受性^[51]。有研究表明, 将不同的减盐措施组合使用后取得了良好的减盐效果。比如用氯化钾代替氯化钠, 再添加酵母提取物掩盖氯化钾的苦涩味, 可减少咸肉中 75%的食盐使用量^[52]; 将微粉盐和氯化钾组合使用后再结合超声波技术可降低香肠中 50%的食盐使用量^[53]。在未来的减盐措施研究中, 可根据各类食品独特的加工特点提出切实可行的减盐措施组合使用方案, 在取得较好减盐效果的同时也能保证食品的风味、质感和安全性。

2 食品中氯化钠检测技术

在检测食品中氯化钠的含量时, 通常先测定食品中的钠含量或氯含量, 再通过计算转化为氯化钠的含量。

2.1 食品中钠的检测技术

食品中钠含量的分析测试技术有火焰原子吸收光谱、原子发射光谱、电感耦合等离子体质谱和离子色谱等, 其中离子色谱测定的是样品溶液中钠离子含量, 其余技术测定的均是样品溶液中钠元素含量。针对钠元素含量分析, 在食品安全国家标准中常用的前处理方法有微波消解法、压力罐消解法、湿式消解法和干式消解法 4 种。湿式消解法酸的用量大且要用到易爆的高氯酸、消解效率较低、消

解过程易带入杂质, 干式消解法灰化时间长且较高的灰化温度可能会造成目标元素的损失, 微波消解法和压力罐消解法消解效率高、酸的用量少、消解效果好、仪器自动化程度高, 因此在实际测定过程中通常将微波消解法和压力罐消解法作为首选的前处理方法。近年来, 更加便捷高效的消解方法也被使用, 如超级微波消解法^[54]将硝酸的用量降低至 3 mL 且消解完成后可直接定容测试, 石墨消解法^[55]在消解完成后可自动赶酸。此外, 针对不同种类的食品基质而开发的样品前处理方法也有报道, 如海产食品可采用色散固相微萃取法^[56]、食用油脂可采用硝酸溶液萃取法^[57]、茶叶可采用样品颗粒直接雾化进样法^[58]、粉末状食品可使用激光剥蚀技术^[59]直接进样。

2.1.1 火焰原子吸收光谱法

原子吸收光谱作为当代无机金属元素定量分析的主要手段之一, 因具有选择性好、灵敏度高、分析速度快等优点在国内外食品检测领域内得到广泛应用, 以原子化方法的不同可将原子吸收光谱分为石墨炉原子吸收光谱法和火焰原子吸收光谱法两种, 而在测定钠元素时通常采用火焰使样品测试溶液中的钠元素原子化。火焰原子吸收光谱法被 GB 5009.91—2017《食品安全国家标准 食品中钾、钠的测定》列为第一法, 在样品溶液中加入一定量的氯化铯作为消电离剂来消除电离干扰, 以 589.0 nm 作为共振线, 线性范围为 0~4 mg/L, 方法定量限为 3 mg/100 g。使用上述共振线和线性范围进行实际样品测定时, 样品溶液进样前需进行多次稀释, 增加工作量的同时也易产生误差。通过使用次灵敏线(589.6 nm)^[60]或第三灵敏线(330.2 nm)^[61]作为分析线、偏转燃烧头^[62]、调整消电离剂的种类和浓度^[63]等途径可有效拓宽线性范围, 进而减少样品的稀释倍数和次数, 对提高检测结果的准确度有积极意义。

2.1.2 原子发射光谱法

原子发射光谱是指目标元素在外界能量作用下转变为气态原子且被激发的外层电子从高能级向低能级跃迁时辐射的线状光谱,根据特征波长和谱线强度对目标元素进行定性和定量分析。在食品检测领域内,常用的原子发射光谱法主要有火焰原子发射光谱法和电感耦合等离子体发射光谱法两种,二者最主要的区别是激发方式不同。

火焰原子发射光谱法是较早应用于食品中钠含量检测的分析方法之一,利用火焰原子化器使样品溶液中的钠元素原子化,波长为 589.0 nm 的发射强度与测试溶液中的钠离子在一定浓度范围内呈现良好的线性关系,进而完成定量检测。该方法被 GB 5009.91—2017 列为第二法,具备分析速度快、选择性好等特点,但线性范围较窄,当目标物元素含量较高时也需要多次稀释样品溶液。由于发射光谱强度不仅受到由火焰弧心和边缘温度差异以及样品溶液浓度差异造成的自吸现象、电离干扰等因素的影响^[64],也对由谱线重叠引起的光谱干扰和火焰燃烧头高度较为敏感^[65],其测量精密度较火焰原子吸收光谱法和电感耦合等离子体发射光谱法而言较低。在测定牛奶、贻贝和牛肝等食品样本中的钠含量时,通过与流动注射-锂内标在线稀释^[66]技术联用获得了较好的精密度,且得到的结果与特征值之间不存在显著性差异。

电感耦合等离子体因具备稳定性好、精密度和准确度高、自吸效应小等优点,是原子发射光谱中较有竞争力的一种激发光源。电感耦合等离子体发射光谱法被 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》列为第二法,并分别给出微波消解法和压力消解法的检出限分别为 3 mg/kg 和 1 mg/kg。该方法不仅具有更宽的线性范围、更高的灵敏度和更好的稳定性^[67],在同时测定样品中含量水平差异较大的多种元素时也有较为理想的表现^[68],还可应用于洋葱等食品的产地鉴别^[69]。由于该方法的准确度易受样品基质和钠含量水平的影响,在样品溶液中添加锂作为内标^[70]可有效降低基质效应,选取可靠的线性区间和适宜的样品溶液稀释倍数对提高测定结果的准确度也有较为积极的作用。

2.1.3 电感耦合等离子体质谱法

电感耦合等离子体质谱法是自 1980 年以来发展最快的无机痕量元素分析技术之一^[71],其谱图仅由目标元素同位素峰组成,且对大多数元素都比较灵敏。当样品溶液进入高频等离子体后,待测元素在高温下电离产生的离子经过离子光学透镜聚焦后进入四极杆质谱检测器并按照质荷比实现分离,进而实现相应元素的识别和浓度检测。电感耦合等离子体质谱法线性范围宽、检出限低、背景干扰小,且可实现样品中含量水平差异较大的多种元素的同时测定^[72],当其与高效液相色谱等其他技术联用时还可实现目标元素的形态及分布特性分析^[73],被 GB 5009.268—

2016 列为第一法。同电感耦合等离子体发射光谱法一样,电感耦合等离子体质谱法因昂贵的仪器价格、较高的运行维护成本和对检测人员较高的素质要求等因素阻碍了其在基层食品检验检测机构大范围推广应用。

2.1.4 离子色谱法

自 1975 年面世以来,随着淋洗液成分和色谱柱填料的优化选择、电荷检测器及质谱联用技术等相关研究的深入和发展,离子色谱在食品安全检测、环境、医药、冶金等行业内有机和无机离子的分析领域发挥了较为重要的作用。离子色谱测定食品中包含钠在内的无机阳离子时,使用甲基磺酸溶液作为淋洗液,通过阳离子交换色谱柱实现目标离子的分离,采用电导检测器检测,以保留时间定性、峰面积定量。该方法被 GB 5750.6—2023《生活饮用水标准检验方法第 6 部分:金属和类金属指标》和 GB 8538—2022《食品安全国家标准 饮用天然矿泉水检验方法》采用,可实现 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 等多种阳离子的同时测定。此外,抑制型离子色谱技术还可应用于矿泉水中钠、钾、镁、钙、锶等离子的同时测定^[74],食盐中的钠离子、氯离子、亚硝酸根、硫酸根和硝酸根离子的分析检测^[75],以及奶粉中钠、钾、钙、镁等离子和氯化胆碱的同时测定^[76],并在前处理过程中通过稀释样品溶液和固相萃取等方法克服基体中干扰物质对测定结果的影响。

2.2 食品中氯的检测技术

2.2.1 沉淀滴定法

沉淀滴定法是测定食品中氯化物的经典方法之一,具有技术成熟、操作简单、对仪器设备要求低、检测成本低且应用广泛等特点,但受检测人员因素和样品颜色影响较大。根据滴定方法和所用指示剂种类,可分为直接滴定法和间接滴定法,分别被 GB 5009.44—2016《食品安全国家标准 食品中氯化物的测定》列为第三法和第二法。

直接滴定法又叫银量法或摩尔法,以铬酸钾作为指示剂,用硝酸银标准滴定液对试样溶液中的氯离子进行滴定,以颜色突变判断滴定终点,通过硝酸银标准滴定液的浓度和消耗体积计算食品样品中氯离子的含量。样品试样的颜色及 pH、铬酸钾指示剂过量 and 滴定过程中体系浑浊等因素都会对滴定终点的判断产生较大影响,为获得更高的准确度和精密度,针对不同类型的样品可采用不同的方法,如:对于滴定终点较难判断的水样,可蓝色纸板代替白色滤纸作为观察背景^[77];对于样品颜色较深且体系 pH 较小或偏大的食醋等样品,可采用增加样品溶液稀释倍数和调节体系 pH 的方法^[78];对于氯离子含量较高且体系易浑浊的奶粉等样品,可采用铬酸钾和百里酚酞作为双指示剂^[79],通过体系颜色从黄绿色变为橙黄色来判断滴定终点。此外,一些可以有效降低测试成本的方法也被报道,如将肉制品的亚硝酸盐和氯化物的前处理方法进行合并^[80],在保证测

试准确度不受影响的前提下提高了检测效率并降低了检测成本。采用纳米金代替铬酸钾作为指示剂^[81], 滴定终点时体系颜色从红色变为蓝紫色, 且指示剂可重复利用, 对降低实验成本和减少环境污染具有积极意义。

间接沉淀法又叫佛尔哈德法或铁铵矾指示剂法, 在酸性样品试样溶液中先加入过量的硝酸银溶液沉淀其中的氯离子, 然后以硫酸铁铵作为指示剂、用硫氰酸钾标准滴定液对过量的硝酸银进行滴定, 通过硫氰酸钾滴定液的浓度和消耗体积以及硝酸银溶液的加入量来计算食品样品中氯离子的含量。由于该法对滴定终点的判断仍依赖于体系颜色的变化, 因此也不适用于测定颜色较深的样品。采用灰化法进行样品处理^[82], 可解决酱卤肉和熟鱼制品的样品溶液颜色较深产生的滴定终点不好观察的问题。在测定肉制品中的氯化物时, 在滴定前用过滤法除去体系溶液中已经产生的氯化银沉淀^[83], 对排除氯化银沉淀对滴定终点判断的干扰有较好的效果。

2.2.2 氯离子选择性电极法

离子选择性电极又叫膜电极, 是一类具有灵敏度高、使用简单、干扰离子少等优点的电化学传感器, 其电极敏感膜对目标离子具有选择性响应, 产生的膜电位与目标离子浓度之间的关系通常情况下符合能斯特方程。在已有的关于测定食品中氯化物含量的报道中, 离子选择性电极法主要有电位滴定法、浓度直读法和电极电位法 3 种, 在国内电位滴定法获得的关注度最高^[84]。

电位滴定法以银电极作为指示电极, 玻璃电极作为参比电极, 在酸性条件下用硝酸银标准溶液滴定样品溶液中的氯化物并根据指示电极的电位突跃来确定滴定终点, 通过消耗的硝酸银标准溶液的量计算得到样品中氯化物的含量。该方法在测定食品中氯化物含量的研究较为成熟, GB 5009.44—2016 将其列为第一法, 确定其适用范围为所有种类食品并根据食品种类给出了对应的前处理方法, 方法定量限为 8×10^{-3} g/100 g (以 Cl⁻计)。较传统的沉淀滴定法而言, 电位滴定法有效避免了检测结果受人员和样品颜色等因素影响而产生的误差, 且能避免样品基质对测定结果的干扰。在测定样品中痕量氯化物时, 向待测溶液中加入已知含量的氯化钠标准溶液可提高测定结果的正确度和精密密度^[85]。目前, 较多的实验室已配备自动电位滴定仪, 自动电位滴定法可实现精确控制硝酸银标准溶液加入体积的同时根据滴定曲线自动确定滴定终点, 还可通过工作站自动记录滴定曲线^[86], 在测定食品中氯化物时不确定度的主要来源为测量重复性^[87]。

浓度直读法采用离子分析仪和氯离子选择性电极作为测试工具, 在确定测试条件一致的前提下, 比较待测溶液和与其浓度相近的标准溶液的电动势, 经离子分析仪转换后可直接读取待测离子的浓度值。浓度直读法在测定酱腌菜^[88]和调味料^[89]等组成复杂的食品中氯化物含量的效

果较好, 方法定量限均可低至 10^{-5} mol/L。该方法的优点在于测试过程操作简单、无绘图步骤、无复杂计算过程, 且测试仪器便于携带, 在构建氯离子快速检测方面有较为广阔的应用前景。

电极电位法又称直接电位法, 是一种以氯离子选择性电极作为指示电极、甘汞电极作为参比电极, 通过样品溶液中氯离子浓度的负对数与其电位之间的线性关系进行定量分析的电化学方法。该方法被应用于水^[90]和肉类、水果、罐头等复杂基质食品^[91]中氯化物含量的测定, 方法的选择性和灵敏度随着电极膜修饰材料的不断改进而提高, 如基于有序介孔碳修饰的氯离子选择性电极^[92]可将检出限降低至 10^{-4} mol/L。电极电位法检测速度快、准确度高、测试仪器便于携带部署, 也为现场快速检测氯化物方法的开发提供了有价值的研究方向。

2.2.3 离子色谱法

早在 1986 年, PENTCHUK 等^[93]报道了采用离子色谱法同时测定西红柿、生菜、土豆、胡萝卜等蔬菜中亚硝酸盐和氯化物的方法, 根据目标物离子含量水平的高低采用不同的洗脱液实现分离并通过标准曲线法进行定量, 其中氯离子的线性范围为 0.2~10 mg/L。近年来关于离子色谱法测定食品中氯化物的报道中, 多以氢氧化钾溶液或碳酸氢钠-碳酸钠溶液作为淋洗液, 通过亲水性阴离子交换色谱柱实现目标物分离, 使用电导检测器进行测定。该方法被 GB 8538—2022 和 GB/T 5750.5—2023 采用, 可同时测定饮用天然矿泉水和生活饮用水中含氯离子在内的多种阴离子含量。该方法具备同时测定多种阴离子、操作简单、自动化程度高、分析速度快、环境干扰小等多种优势, 但其对目标物离子的定性只依赖于保留时间, 易受样品溶液中其他共存离子的干扰且复杂基质也会影响检测的灵敏度^[94], 研究者们通过梯度洗脱程序^[95]、扩充色谱柱容量^[96]和改善样品前处理方法等途径克服上述不足。同时, 可根据样品类型改进前处理方法, 如: 针对水产品 and 畜禽肉等肉类食用农产品, 可采用直接超声萃取-离心法^[97]和加热萃取-高速离心法^[98]; 对于蛋白质含量较高的蚝油等样品, 可采用沉淀蛋白法^[99]; 对于颜色较深的酿造酱和酱油等食品, 可采用干灰化法^[100]。

2.2.4 分光光度法

分光光度法测定食品中氯化物含量的方法主要有分光光度计比浊法和硫氰酸汞分光光度法两种, 应用报道相对较少。

分光光度计比浊法的测定原理为: 样品提取溶液中的氯离子在酸性介质中与硝酸银发生反应生成氯化银, 该体系在特定波长下的吸光度大小与其中氯化银悬浮物的量存在线性关系, 进而确定样品溶液中氯离子的含量。该方法的特点是比传统的目视比色法结果更精确且操作更简便, 可测定腌鱼^[101]、羧甲基淀粉钠^[102]等食品和食品添加剂中

氯化物的含量。

硫氰酸汞分光光度法的测定原理如下: 氯离子可与硫酸氰汞发生化学反应, 生成难解离的氯化汞并释放出硫酸氰根离子, 硫酸氰根离子与铁离子生成橙红色的硫氰酸铁, 在 460 nm 处的吸光度与样品溶液中氯离子的含量成正比, 通过线性回归方程对样品溶液中的氯离子进行定量。鉴于该方法的抗干扰能力较差且稳定性还有待提升, 目前该方法仅被应用于饮用纯净水^[103]和植物油脂^[104]等基质简单的食品中氯化物含量的测定, 在未来可以尝试将该方法应用于更多种类食品中氯离子含量的测定, 拓宽其应用范围。

3 结束语

大量研究实践证明, 仅凭单一的减盐措施难以达到较为理想的效果, 多措施协同作用在提升减盐效果、降低生产成本和保持食品品质等方面有较为突出的表现, 在未来食品减盐措施的研究开发方面具备巨大潜力。样品前处理方式的不断改进、检测技术的持续更新以及现场快速检测技术的研发将对食品中食盐含量的检测提供很大帮助, 而大量监测数据的获取和分析对比将为今后预包装食品中钠的最大限量、减盐政策的制定和减盐行动的部署实施提供有价值的技术支持和参考。

参考文献

- 吴铮铮, 雁从容, 林芝萍, 等. 国产与进口预包装食品钠现状调查研究[J]. 农产品加工, 2023, (9): 93–96, 100.
WU ZZ, YANG CR, LIN ZP, *et al.* Investigation on the current situation of sodium content of domestic and imported prepackaged foods [J]. *Farm Prod Proces*, 2023, (9): 93–96, 100.
- BHAT S, MARKLUND M, MEGAN EH, *et al.* A systematic review of the sources of dietary salt around the world [J]. *Adv Nutr*, 2020, 11(3): 677–686.
- SHAO SH, HUA YCH, YANG Y, *et al.* Salt reduction in China: A state-of-the-art review [J]. *Risk Manag Healthc P*, 2017, 10: 17–28.
- 郭嘉吻, 冯明会, 马慧, 等. 食品减盐研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(15): 341–350.
GUO JH, FENG MH, MA H, *et al.* Advances on salt reduction in foods [J]. *Food Ferment Ind*, 2022, 48(15): 341–350.
- HUNAG LP, TRIEU K, YOSHIMURA S, *et al.* Effect of dose and duration of reduction in dietary sodium on blood pressure levels: Systematic review and meta-analysis of randomized trials [J]. *J Med Genet*, 2020, 368: m315.
- 庞玉琦, 张鑫, 陈晓平. 膳食盐不合理摄入的危害及减盐策略研究进展[J]. 心血管病学进展, 2021, 42(8): 681–685.
PANG YQ, ZHANG X, CHEN XP. Harm of unreasonable salt intake and salt reduction strategy [J]. *Adv Cardiovasc Dis*, 2021, 42(8): 681–685.
- 范芳, 李英华. 国内外减盐干预策略和措施研究进展[J]. 中国公共卫生, 2022, 38(8): 1070–1078.
FAN F, LI YH. Salt reduction in the world-intervention strategies and measures: A progress review [J]. *Chin J Public Health*, 2022, 38(8): 1070–1078.
- 王思琦, 徐建伟, 白雅敏, 等. 人群减盐干预措施效果研究进展[J]. 中国慢性病预防与控制, 2020, 28(6): 463–466.
WANG SQ, XU JW, NAI YM, *et al.* Research progress on the effect of population salt reduction interventions [J]. *Chin J Prev Contr Chron Dis*, 2020, 28(6): 463–466.
- World Health Organization. WHO global sodium benchmarks for different food categories [R]. Geneva: World Health Organization, 2021.
- ADRIANO GCRUZ, JOSÉ AFFARIA, MARISE ARPOLLONIO, *et al.* Cheeses with reduced sodium content: Effects on functionality, public health benefits and sensory properties [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2011, 22: 276–291.
- RIIS NL, BJOERNSBO KS, TOFT U, *et al.* Impact of salt reduction interventions on salt taste sensitivity and liking, a cluster randomized controlled trial [J]. *Food Qual Prefer*, 2020, 87: 104059.
- 胡越, 刘浩天, 夏秀芳, 等. 直接减盐法对哈尔滨红肠贮藏期间品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 184–191.
HU Y, LIU HT, XIA XF, *et al.* Effect of direct salt reduction on the quality characteristics of Harbin red sausages during storage [J]. *Food Sci*, 2023, 44(7): 184–191.
- HURST KE, AYED C, DERBENEV IN, *et al.* Physicochemical design rules for the formulation of novel salt particles with optimized saltiness [J]. *Food Chem*, 2021, 360: 129990.
- RUBEN R, NATALIE C, MARGARIDA CDS, *et al.* Impact of salt crystal size on in-mouth delivery of sodium and saltiness perception from snack foods [J]. *J Texture Stud*, 2013, 44(5): 338–345.
- 公奕夫, 李星, 刘斌, 等. 基于固体食盐结构及成分涉及的减盐策略及其研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 202–210.
GONG YF, LI X, LIU B, *et al.* Research progress on salt reduction strategies based on structural regulation and compositional design of solid salt [J]. *Food Sci*, 2023, 44(9): 202–210.
- QUILAQUEO M, DURIZER L, MIGUEL AJ. The morphology of salt crystals affects the perception of saltiness [J]. *Food Res Int*, 2015, 76: 675–781.
- RODRIGUES DM, SOUZA VRD, MENDES JF, *et al.* Microparticulated salts mix: An alternative to reducing sodium in shoestring potatoes [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2016, 69: 390–399.
- RIOS-MERA JD, SALDAÑA E, CRUZADO-BRAVO MLM, *et al.* Reducing the sodium content without modifying the quality of beef burgers by adding micronized salt [J]. *Food Res Int*, 2019, 121: 288–295.
- MONCADA ML, ASTETE CE, SABLIOV CM, *et al.* Influence of nano-spray dried sodium chloride on the physicochemical characteristics of surface-salted cheese crackers [J]. *Food Nutr Sci*, 2017, 8(2): 267–276.
- 张杰, 赵志峰, 郝罗, 等. 减盐策略及低钠盐研究进展[J]. 中国调味品, 2021, 46(3): 179–184.
ZHANG J, ZHAO ZF, HAO L, *et al.* Research progress of salt reduction measures and low-sodium salt [J]. *China Condiment*, 2021, 46(3): 179–184.
- 邓小明, 朱国梁, 姜红斌, 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.
DENG XM, ZHU GL, LOU HB, *et al.* Evaluation of the effect of three kinds of sodium reduction salt [J]. *J Salt Sci Chem Ind*, 2019, 48(11): 47–52.

- [22] MOSCA AC, BULT JHF, STIEGE RM. Effect of spatial distribution of tastants on taste intensity, fluctuation of taste intensity and consumer preference of (semi-) solid food products [J]. *Food Qual Prefer*, 2013, 28(1): 182–187.
- [23] BECK P, MATIUCCI MA, NETO A, *et al.* Sodium chloride reduction in fresh sausage using salt encapsulated in carnauba wax [J]. *Meat Sci*, 2021, 175(6): 108462.
- [24] CAI JW, LEE Y. Controlling sodium release using maltodextrin and octenyl succinic anhydride-modified starch with two types of spray dryer nozzles [J]. *J Food Process Eng*, 2019, 43(5): 1–10.
- [25] LIU L, CIFTCI ON. Effects of high oil compositions and printing parameters on food paste properties and printability in a 3D printing food processing model [J]. *J Food Eng*, 2021, 288: 110–135.
- [26] LAWRENCE G, SALLES C, SEPTOER C, *et al.* Odour-taste interactions: A way to enhance saltiness in low-salt content solutions [J]. *Food Qual Prefer*, 2009, 20: 241–248.
- [27] WANG WL, YANG L, NING MH, *et al.* A rational tool for the umami evaluation of peptides based on multi-techniques [J]. *Food Chem*, 2022, 371: 131105.
- [28] 张康逸, 屈凌波, 温青玉, 等. 咸味肽的制备技术研究进展[J]. *中国调味品*, 2022, 47(6): 204–211.
- ZHANG KY, QU LB, WEN QY, *et al.* Research progress on the preparation technology of salty peptides [J]. *China Cond*, 2022, 47(6): 204–211.
- [29] WONG KM, DECKER EA, AUTIO WR, *et al.* Utilizing mushrooms to reduce overall sodium in taco filling using physical and sensory evaluation [J]. *J Food Sci*, 2017, 82: 2379–2386.
- [30] LOPES CDO, BARCELOS MDP, DIAS NAA, *et al.* Effect of the addition of spices on reducing the sodium content and increasing the antioxidant activity of margarine [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2014, 58(1): 63–70.
- [31] TOUMI O, CONTE P, SILVA AMGMD, *et al.* Use of response surface methodology to investigate the effect of sodium chloride substitution with *Salicornia ramosissima* powder in common wheat dough and bread [J]. *J Funct Foods*, 2022, 99: 105349.
- [32] STANTLEY RE, BOWER CG, SULLIVAN GA. Influence of sodium chloride reduction and replacement with potassium chloride based salts on the sensory and physico-chemical characteristics of pork sausage patties [J]. *Meat Sci*, 2017, 133: 36–42.
- [33] ARAÚJO CIA, SANT'ANNA LJ, MOREIRA EDS, *et al.* How much can sodium chloride be substituted for potassium chloride without affecting the sensory acceptance of cracker-type biscuits? [J]. *Food Res Int*, 2021, 150: 110798.
- [34] SCHIVAZAPPA C, VIRGILI R. Impact of salt levels on the sensory profile and consumer acceptance of Italian dry-cured ham [J]. *J Sci Food Agric*, 2020, 100(8): 3370–3377.
- [35] SAAVEDRA ARL, RIOS-MERA JD, IMAN A, *et al.* A sequential approach to reduce sodium chloride in freshwater fish burgers considering chemical, texture, and consumer sensory responses [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2022, 167: 113854.
- [36] LAWRENCE G, SALLES C, PALICKI O, *et al.* Using cross-modal interactions to counterbalance salt reduction in solid foods [J]. *Int Dairy J*, 2011, 21: 103–110.
- [37] ZHOY T, FENG Y, THOMAS D. Enhancement of saltiness perception by odorants selected from chinese soy sauce: A gas chromatography/olfactometry-associated taste study [J]. *Food Chem*, 2020, 335: 127664.
- [38] VINITHA K, SETHUPATHY P, MOSES JA, *et al.* Conventional and emerging approaches for reducing dietary intake of salt [J]. *Food Res Int*, 2022, 152: 110933.
- [39] MILLER AM, MILLS K, WONG T, *et al.* Flavor-enhancing properties of mushrooms in meat-based dishes in which sodium has been reduced and meat has been partially substituted with mushrooms [J]. *J Food Sci*, 2014, 79(9): S1795.
- [40] BENJAMIN O, DAVIDOVICH MP, SHPIGELMAN A, *et al.* Utilization of polysaccharides to modify salt release and texture of a fresh semi hard model cheese [J]. *Food Hydrocolloid*, 2018, 75: 95–106.
- [41] PICOUET PA, SALA X, GARCIA-GIL N, *et al.* High pressure processing of dry-cured ham: Ultrastructural and molecular changes affecting sodium and water dynamics [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2012, 16: 335–340.
- [42] 李心智, 刘希, 童心, 等. 传统豆类发酵食品的减盐研究进展[J]. *现代食品*, 2023, 29(15): 16–22.
- LI XZ, LIU X, TONG X, *et al.* Research progress on the salt-reduction of traditional fermented soybean products [J]. *Mod Food*, 2023, 29(15): 16–22.
- [43] 聂鑫, 陈泓帆, 向露, 等. 低盐肉制品加工技术研究进展[J]. *中国调味品*, 2023, 48(6): 216–220.
- NIE X, CHEN HF, XIANG L, *et al.* Research progress on processing technology of low-salt meat products [J]. *China Cond*, 2023, 48(6): 216–220.
- [44] 戴浩然, 冯雅, 何诗行. 食品超高压技术应用及装备研究进展[J]. *食品工业*, 2022, 43(9): 179–182.
- DAI HR, FENG Y, HE SX. Research progress of food high pressure technology and equipment [J]. *Food Ind*, 2022, 43(9): 179–182.
- [45] 高霞, 冯庆祥, 胡杨. 高强度超声与低氯化钠盐协同作用下鲢鱼糜凝胶的品质变化[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(11): 197–204.
- GAO X, FENG QX, HU Y. Changes in the quality of silver carp surimi gel induced by the synergistic effect of high-intensity ultrasound and low-sodium chloride treatment [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2023, 39(11): 197–204.
- [46] BHAT ZF, JAMES DM, SUSAN LM, *et al.* Current and future prospects for the use of pulsed electric field in the meat industry [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2019, 59(10): 1660–1674.
- [47] CHEMAT F, HUMA ZE, KHAN MK. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction [J]. *Ultrason Sono Chem*, 2011, 18: 813–835.
- [48] 何佳驹, 朱燕莉, 黎明, 等. 高盐食品脱盐技术研究进展[J]. *中国调味品*, 2023, 48(7): 202–206.
- HE JJ, ZHU YL, LI M, *et al.* Research progress of desalination technology of high-salt food [J]. *China Cond*, 2023, 48(7): 202–206.
- [49] SHI SY, LEE YH, YUN S, *et al.* Comparisons of fish meat extract desalination by electrodialysis using different configurations of membrane stack [J]. *J Food Eng*, 2010, 101(4): 417–423.
- [50] 孙启星, 苗春雷, 朱娅媛, 等. 纳滤技术在减盐酱油生产中的应用研究[J]. *中国调味品*, 2023, 48(4): 156–160.
- SUN QX, MIAO CL, ZHU YY, *et al.* Application of nanofiltration

- technology in the production of low-salt soy sauce [J]. *China Cond*, 2023, 48(4): 156–160.
- [51] WANG J, HUANG XH, ZHANG YY, *et al.* Effect of sodium salt on meat products and reduction sodium strategies—a review [J]. *Meat Sci*, 2023, 205: 109296.
- [52] LIMA R, RIOS JD, CONTRERAS CJC, *et al.* High-power ultrasound, micronized salt, and low KCl level: An effective strategy to reduce the NaCl content of bologna-type sausages by 50% [J]. *Meat Sci*, 2023, 195: 109012.
- [53] VIDAL VAS, SANTANA JB, PAGLARINI CS, *et al.* Adding lysine and yeast extract improves sensory properties of low sodium salted meat [J]. *Meat Sci*, 2020, 159: 107911.
- [54] 廖细敏, 詹旭威, 黄素美. 超级微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定玉米粉中26种元素[J]. *中国卫生检验杂志*, 2023, 33(17): 2072–2076, 2086.
- LIAO XM, ZHAN XW, HUANG SM. Determination of 26 elements in commel by inductively coupled plasma-mass spectrometry with ultra microwave digestion [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2023, 33(17): 2072–2076, 2086.
- [55] 吴云芳, 王宏慧, 杨喆, 等. ICP-OES 及 ICP-MS 法高效快速测定马奶样品中矿物质元素含量[J]. *畜牧与饲料科学*, 2020, 41(1): 42–47.
- WU YF, WAGN HH, YANG Z, *et al.* Development of an efficient and rapid method based on ICP-OES and ICP-MS for determination of mineral elements contents in mare's milk samples [J]. *Animal Hus Feed Sci*, 2020, 41(1): 42–47.
- [56] ZHOU P, ZHENG R, ZHANG W, *et al.* Development of an effervescent tablet microextraction method using NiFe_2O_4 -based magnetic nanoparticles for preconcentration/extraction of heavy metals prior to ICP-MS analysis of seafood [J]. *J Anall Atom Spectrom*, 2019, 34(3): 598–606.
- [57] 刘波. 火焰原子吸收光谱法测定食用油脂中钠含量[J]. *理化检验: 化学分册*, 2012, (12): 1444–1445.
- LIU B. FAAS determination of sodium in edible oil [J]. *Phys Test Chem Anal Part B*, 2012, (12): 1444–1445.
- [58] GUO W, WANG R, WANG W. Rapid determination of toxic and rare-earth elements in teas by particle nebulization-ICP MS [J]. *J Food Composit Anal*, 2020, 91: 103517.
- [59] ZHOU JZ, GUO W, HU ZC, *et al.* Evaluation of an internal standard-free laser ablation-ICP-OES method for elemental analysis in solid food samples [J]. *J Food Composit Anal*, 2024, 126: 105910.
- [60] 包先金. 次灵敏火焰原子吸收法测定食品中钠钾镁的含量[J]. *中国卫生检验杂志*, 2013, 23(9): 2554–2555.
- BAO XJ. Determination of sodium, potassium and magnesium in food by subsensitive line flame atomic absorption spectrometry [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2013, 23(9): 2554–2555.
- [61] 王祎娟, 段虎, 路志轩, 等. 肉制品中钠含量的检测方法研究[J]. *肉类工业*, 2019, (3): 39–42.
- WANG WJ, DUAN H, LU ZX, *et al.* Study on the detection method of sodium content in meat product [J]. *Meat Ind*, 2019, (3): 39–42.
- [62] 程春霞. 火焰原子吸收法偏转与不偏转燃烧头测定高浓度钠的不确定度分析[J]. *广东微量元素科学*, 2015, 22(11): 16–22.
- CHENG CX. Uncertainty evaluation on measurement results for the determination for high concentration of sodium with deflect and no deflect burner by flame atomic absorption spectrometry [J]. *Guangdong Trace Elem Sci*, 2015, 22(11): 16–22.
- [63] 戴舒春, 宋俊, 周华生, 等. 火焰原子吸收法测定特殊医用配方食品中钾钠的干扰及消除[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(9): 303–306, 311.
- DAI SC, SONG J, ZHOU HS, *et al.* Interference in the determination of potassium and sodium in foods for special medical prescription by flame atomic absorption and elimination [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2014, 35(9): 303–306, 311.
- [64] 刘剑, 刘芳竹, 叶润, 等. 火焰原子吸收/发射光谱法对小麦粉中钠的检测[J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(12): 94–96, 123.
- LIU J, LIU FZ, YE R, *et al.* Compare of AAS and AES analysis in the test of Na in wheat [J]. *J China Cere Oils Assoc*, 2013, 28(12): 94–96, 123.
- [65] 黄振波, 胡曙光, 蔡文华, 等. 常见食品中钾、钠测定的方法研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2016, 7(6): 2501–2508.
- HUANG ZB, HU SQ, CAI WH, *et al.* Determination of potassium and sodium in common foods [J]. *J Food Saf Qual*, 2016, 7(6): 2501–2508.
- [66] FORTUNATO FM, BECHLIN MA, NETO JAG, *et al.* Standard dilution analysis in flow system: Sodium determination by flame atomic emission spectrometry [J]. *Microchem J*, 2016, 124: 662–667.
- [67] 叶润, 刘芳竹, 刘剑, 等. 微波消解-电感耦合等离子体发射光谱法测定大米中铜、锰、铁、锌、钙、镁、钾、钠8种元素[J]. *食品科学*, 2014, 35(16): 117–120.
- YE R, LIU FZ, LIU J, *et al.* Determination of contents of Cu, Mn, Fe, Zn, Ca, Mg, K and in rice using microwave digestion and inductively coupled plasma-optical emission spectrometry [J]. *Food Sci*, 2014, 35(16): 117–120.
- [68] JUNIOR JBP, CARVALHO VS, FERREIRA WQ, *et al.* Green sample preparation of medicinal herbs in closed digester block for elemental determination by ICP OES [J]. *J Pharmaceut Biomed Anal*, 2024, 238: 115810.
- [69] SIM KS, KIM HY, HUR SH, *et al.* Geographical origin discriminatory analysis of onions: Chemometrics methods applied to ICP-OES and ICP-MS analysis [J]. *Food Res Int*, 2024, 175: 113676.
- [70] 高喜凤, 刘艳明, 张喜琦, 等. 电感耦合等离子体发射光谱法测定食品中钠关键影响因素探究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(9): 3777–3783.
- GAO XF, LIU YM, ZHANG XQ, *et al.* Research on key influencing factors of determination of sodium in food by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(9): 3777–3783.
- [71] 李帅, 贾钊, 马金华, 等. 原子吸收分光光度计-火焰和电感耦合等离子体质谱仪法测定奶粉中钠的比较[J]. *现代食品*, 2022, 28(5): 221–225.
- LI S, JIA C, MA JH, *et al.* Comparison of determination of sodium in milk powder by atomic absorption spectrophotometer-flame and inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Mod Food*, 2022, 28(5): 221–225.
- [72] 宋瑞, 陆志芸, 李君绩, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定酱油中的铅和钠含量[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(14): 3635–3637.
- SONG R, LU ZY, LI JJ, *et al.* Determination of lead and sodium in soy sauce by microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2018, 9(14): 3635–3637.
- [73] CHANG PP, ZHENG LN, WANG B, *et al.* ICP-MS-based methodology in

- metallomics: Towards single particle analysis, single cell analysis, and spatial metallomics [J]. *Atom Spectrosc*, 2022, 43: 255–265.
- [74] 高翔, 姜明洪, 张明, 等. 离子色谱法检测矿泉水中钠、钾、镁、钙、锶[J]. *饮料工业*, 2013, 16(10): 32–36.
GAO X, JIANG MH, ZHANG M, *et al.* Determination of sodium, potassium, magnesium, calcium and strontium in mineral water by ion chromatography [J]. *Beverage Ind*, 2013, 16(10): 32–36.
- [75] 倪承珠, 包先金, 何霞, 等. 离子色谱法测定食盐中的氯离子、钠离子以及杂质阴离子[J]. *中国卫生检验杂志*, 2020, 30(20): 2456, 2459.
NI CZ, BAO XJ, HE X, *et al.* Determination of chloride, sodium ion and impurity anions in salt by ion chromatography [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2020, 30(20): 2456, 2459.
- [76] 曹文军, 崔晗, 沈葆真, 等. 离子色谱法测定奶粉中氯化胆碱、钠、钾、镁、钙的含量[J]. *现代科学仪器*, 2012, (6): 162–164.
CAO WJ, CUI H, SHEN BZ, *et al.* Determination of choline chloride, Na⁺, K⁺, Mg²⁺ and Ca²⁺ in milk powder by ion chromatography [J]. *Mod Sci Instrum*, 2012, (6): 162–164.
- [77] 吕春明, 吴晓东, 孙恩呈, 等. 硝酸银滴定法测定水中氯化物的实验方法改进[J]. *科学技术创新*, 2021, (26): 36–37.
LV CM, WU XD, SUN ENC, *et al.* Improved experimental method for determination of chloride in water by silver nitrate titration [J]. *Sci Technol Innov*, 2021, (26): 36–37.
- [78] 张煜. 食醋中氯化物的测定方法研究[J]. *检验检疫学刊*, 2019, 29(1): 51–52.
ZHANG Y. Study on the determination method of chloride in vinegar [J]. *J Inspect Quar*, 2019, 29(1): 51–52.
- [79] 杨丽丹, 袁梓泮, 林妮, 等. 双指示剂银量法测定奶粉中氯化物的含量[J]. *中国口岸科学技术*, 2021, 3(5): 33–37.
YANG LD, YUAN ZY, LIN N, *et al.* Determination of chloride content in milk powder by dual-indicator argentimetry [J]. *Chin Port Sci Technol*, 2021, 3(5): 33–37.
- [80] 徐文华, 姜勇, 张吉祥, 等. 银量法测定肉制品中氯化物的方法研究[J]. *食品与发酵科技*, 2020, 56(1): 106–108.
XU WH, JAING Y, ZHANG JX, *et al.* Study on determination of chloride in meat products by silver content method [J]. *Food Ferment Sci Technol*, 2020, 56(1): 106–108.
- [81] 张远馥, 张金荣, 任姿静, 等. 以金纳米粒子为指示剂的法扬司法测定氯离子[J]. *大学化学*, 2022, 37(3): 1–7.
ZHANG YF, ZHANG JR, REN ZJ, *et al.* Determination of chloride ion by fajans method using gold nanoparticles as the indicator [J]. *Univ Chem*, 2022, 37(3): 1–7.
- [82] 龚姝, 慎洁, 周振宁, 等. 间接滴定法测定食品中氯化钠含量[J]. *现代农业科技*, 2016, (12): 293.
GONG J, SHEN J, ZHOU ZN, *et al.* Determination on content of sodium chloride in food by titration method [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 2016, (12): 293.
- [83] 孙英鸿, 齐懿鸣. 肉制品中氯化物含量测定—对氯化银沉淀排除方法的探讨[J]. *生命科学仪器*, 2013, 11: 51–53.
SUN YH, QI YM. Determination of chloride content in meat products-comparison of silver chloride precipitate exclusion methods [J]. *Life Sci Instrum*, 2013, 11: 51–53.
- [84] 魏姜勉. 浓度直读法测定食品中的氯离子、硼砂以及不同溶解特性的铜[M]. 郑州: 河南农业大学, 2013.
WEI JM. Direct-reading method of concentration for chloride and borax and the different dissolution characteristics of copper in food [M]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2013.
- [85] 张真真. 电位滴定法在痕量氯离子样品测定中的应用技巧[J]. *纯碱工业*, 2023, (5): 16–18.
ZHANG ZZ. Application techniques of potentiometric titration in the determination of trace chloride ion samples [J]. *Soda Ind*, 2023, (5): 16–18.
- [86] 周弛, 郭晋君, 刘建利, 等. 全自动电位滴定法测定水中氯化物[J]. *中国无机分析化学*, 2023, 13(11): 1171–1175.
ZHOU C, GUO JJ, LIU JL, *et al.* Determination of chloride in water by automatic potentiometric titration method [J]. *Chin J Inorg Anal Chem*, 2023, 13(11): 1171–1175.
- [87] 张伟, 陈雪梅, 汤丹, 等. 电位滴定法测定复配甜味剂中氯化物含量的不确定度评定[J]. *食品安全导刊*, 2023, (12): 124–126.
ZHANG W, CHEN XM, TAGN D, *et al.* Evaluation of uncertainty in determination of chloride content in compound sweeteners by potentiometric titration [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2023, (12): 124–126.
- [88] 王珊, 魏姜勉, 高向阳. 浓度直读法快速测定酱菜中的氯离子[J]. *食品科学*, 2012, 33(12): 264–267.
WANG S, WEI JM, GAO XY. Rapid determination of chlorine ion in pickles by direct reading method [J]. *Food Sci*, 2012, 33(12): 264–267.
- [89] 高向阳. 固定时间超声-浓度直读法快速测定调味品中的氯化物[J]. *中国调味品*, 2019, 44(9): 157–160.
GAO XY. Rapid determination of chloride in condiments by fixed-time ultrasound-concentration direct reading method [J]. *China Cond*, 2019, 44(9): 157–160.
- [90] ZHANG M, WANG CQ, ZHANG ZY, *et al.* A novel carbon paste electrode for sensitive, selective and rapid electrochemical determination of chloride ion based on three-dimensional graphene [J]. *Sensor Actuat B-Chem*, 2019, 299: 126951.
- [91] 丁桂蓉. 离子选择性电极法和电位溶出分析法在食品检测中的作用[J]. *化学传感器*, 1991, 11(1): 19–29.
DING GR. The role of ion selective electrode method and potential stripping analysis in food detection [J]. *Chem Sensor*, 1991, 11(1): 19–29.
- [92] 姜子邓牙, 邱实. 基于有序介孔碳的氯离子选择性电极的制备及其在手持传感系统中的应用[J]. *分析实验室*, 2020, 39(1): 71–76.
JIANG ZDY, QIU S. Preparation of ordered mesoporous carbon sphere based chloride-ion selective electrode and its application for handheld sensing system [J]. *Chin J Anal Lab*, 2020, 39(1): 71–76.
- [93] PENTCHUK J, HALDNA Ü, ILMOJA K. Determination of motrate and chloride ions in foods by single-column ion chromatography [J]. *J Chromatogr A*, 1986, 364: 189–192.
- [94] 李婷婷, 史睿, 曾文锦, 等. 高氯酸盐在食品中的暴露情况及检测技术的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(11): 342–348.
LI TT, SHI R, ZENG WJ, *et al.* Research progress in exposure and detection methods of perchlorate in food [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(11): 342–348.
- [95] MISHRA VG, DAS MK, SHAH J, *et al.* Simultaneous determination of borate, chloride and molybdate in pyrohydrolysis distillates of plant and soil samples by ion chromatography [J]. *J Chromatogr A*, 2018, 1532: 144–149.
- [96] PAPPOE MK, NAEENI MH, CHARLES AL, *et al.* Bromate peak

- distortion in ion chromatography in samples containing high chloride concentrations [J]. *J Chromatogr A*, 2016, 1444: 57–63.
- [97] 刘美芹, 曹菲菲, 刘晨鸣. 离子色谱法测定食品中的氯化物含量[J]. *食品安全导刊*, 2021, (3): 77–79.
LIU MQ, CAO FF, LIU CM. Determination of chloride in food by ion chromatography [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2021, (3): 77–79.
- [98] 孙雪萍. 离子色谱法测定畜禽肉中氯化物的含量[J]. *食品安全导刊*, 2022, (35): 50–53.
SUN XP. Determination of chloride content in livestock and poultry meat by ion chromatography [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2022, (35): 50–53.
- [99] 阳雄宇, 金菲英, 章超, 等. 两种离子色谱法测定蚝油中氯化钠含量的研究[J]. *中国调味品*, 2023, 48(2): 178–182.
YANG XY, JIN FY, ZHANG C, *et al.* Determination of sodium chloride content in oyster sauce by two kinds of ion chromatography [J]. *China Cond*, 2023, 48(2): 178–182.
- [100] 郭艳芬. 灰化-离子色谱法测定酱及酱油中食盐(以氯化钠计)含量[J]. *中国卫生工程学*, 2020, 19(4): 490–493.
GUO YF. Determination of chloride (calculate by sodium chloride) in sauce and soy sauce by ion chromatography with a shing [J]. *Chin J Public Health Eng*, 2020, 19(4): 490–493.
- [101] ZHANG YL, XIA WS. A novel method for the determination of sodium chloride in salted fish [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2008, 43: 927–932.
- [102] 马兰, 雷升升, 高志宏, 等. 羧甲基淀粉钠中的氯化物含量的定量分析[J]. *价值工程*, 2014, 33(28): 320–321.
MA L, LEI SS, GAO ZH, *et al.* The quantitative analysis of chloride content of carboxymethyl starch sodium [J]. *Value Eng*, 2014, 33(28): 320–321.
- [103] 王春光. 饮用纯净水中氯化物的硫酸汞分光光度测定法[J]. *职业与健康*, 2011, 27(14): 1621–1622.
WANG CG. Determination of chloride in pure drinking water by mercuriethiocyanate spectrophotometer [J]. *Occup Health*, 2011, 27(14): 1621–1622.
- [104] 刘凤霞, 唐琳, 陈放. 分光光度法测定植物油中氯化物含量[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2015, 52(3): 668–672.
LIU FX, TANG L, CHEN F. Determination of chloride in plant oil by spectrophotometry [J]. *J Sichuan Univ (Nat Sci Ed)*, 2015, 52(3): 668–672.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

作者简介



李婷婷, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品安全检测与食品质量评价。
E-mail: litingting5180@163.com



曾文锦, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全检测。
E-mail: 576840512@qq.com



孙姗姗, 博士, 副研究员, 主要研究方向为食品安全检测、食品的真实性检验及过敏原的鉴定。
E-mail: shanshans112@163.com