

盐对腌制蔬菜品质的影响研究进展

齐 凯¹ 李子琰² 程文波¹ 樊铭聪² 左道喜¹ 李 言²
王 立² 张文斌²

(1. 江苏苏盐井神股份有限公司, 江苏 淮安 223200; 2. 江南大学, 江苏 无锡 214122)

摘要: 蔬菜腌制是一种历史悠久的食品保藏与加工方法, 而盐(主要成分为氯化钠)在其中扮演着不可替代的核心角色。文章系统综述了腌制盐对蔬菜品质的多维度影响, 涵盖防腐保藏机制、质构变化、风味物质形成与转化、色泽稳定性及营养价值变迁等方面。重点分析了盐浓度梯度对最终产品特性的决定性作用, 并深入探讨了现代低盐化趋势下面临的微生物安全风险、质构劣变、风味失衡等挑战及其应对策略。

关键词: 腌制蔬菜; 水分活度; 质构; 风味; 低盐化

Research progress on effect of salt on pickling vegetable quality

Qi Kai¹ Li Ziyang² Cheng Wenbo¹ Fan Mingcong² Zuo Daoxi¹ Li Yan²
Wang Li² Zhang Wenbin²

(1. Jiangsu Suyan Jingshen Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu 223200, China; 2. Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: Vegetable pickling is a time-honored food preservation and processing method, in which salt (primarily sodium chloride) plays an irreplaceable and core role. This paper systematically reviews the multidimensional effects of curing salt on vegetable quality. It comprehensively covers preservation mechanisms, textural transformations, the formation and conversion of flavor compounds, color stability, and nutritional value changes. Specifically, this article analyzes the decisive role of salt concentration gradients in final product characteristics. Furthermore, it examines the challenges posed by the low salinity, including microbial safety risks, textural deterioration, and flavor imbalances, while proposing corresponding strategies

Keywords: pickled vegetable; water activity; texture; flavor; low salinity

蔬菜腌制是一种古老的食物保藏加工方法。食盐(氯化钠)通过其高渗透压等特性, 在抑制微生物、调控发酵以及塑造产品品质方面发挥着核心作用^[1]。盐在此过程中不仅是咸味剂, 还影响产品的微生物安全性、物理质地、化学风味组成及营养特性^[2]。但过量摄入食盐会危害人类的生命健康, 随着消费者健康意识的提升^[3]、进一步契合中央国务院国民营养计划(2017—2030 年)^[4], “减盐”已成为全球食品工业的重要趋势, 如何在降低钠含量的同时保障传统腌制蔬菜的品质与安全是食品工业和学术界共同关注的焦点。文章旨在系统梳理腌制盐对蔬菜品质影响的科学机制, 评述不同盐浓度下的品质差异, 并

总结低盐腌制的前沿技术与挑战, 为相关研究和生产实践提供依据。

1 盐在蔬菜腌制加工中的核心作用机制

1.1 防腐与保藏

1.1.1 高渗透压效应 盐溶液产生的高渗透压是其主要防腐机制。当盐浓度高于微生物细胞内的渗透压时, 细胞膜内外的渗透压差迫使微生物细胞发生质壁分离, 水分大量外流, 细胞代谢活动受到严重抑制甚至死亡^[5]。高盐环境导致的渗透压对大多数腐败菌(如假单胞菌、芽孢杆菌)和致病菌(如金黄色葡萄球菌、大肠杆菌)具有强烈

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项项目(编号: 2022A02009-4)

通信作者: 张文斌(1979—), 男, 江南大学教授, 博士。E-mail: wbzhang@jiangnan.edu.cn

收稿日期: 2025-08-07 改回日期: 2026-02-10

引用格式: 齐凯, 李子琰, 程文波, 等. 盐对腌制蔬菜品质的影响研究进展[J]. 食品与机械, 2026, 42(7): 217-225.

Citation: Qi Kai, Li Ziyang, Cheng Wenbo, et al. Research progress on effect of salt on pickling vegetable quality[J]. Food & Machinery, 2026, 42(7): 217-225.

的抑制作用^[6]。

1.1.2 降低水分活度 盐离子具有极强的水合能力,能有效束缚体系中的自由水分子。随着盐浓度的增加,产品的水分活度显著下降。绝大多数细菌在水分活度 <0.91 时生长受抑制,酵母和霉菌的最低水分活度要求分别为 0.88 和 0.80 ^[7]。高盐腌制蔬菜的水分活度通常可降至 0.85 以下(如传统梅干菜水分活度约为 0.75),有效阻止了绝大多数微生物的生长繁殖^[8]。

1.1.3 特异性离子效应 氯离子对微生物酶系统(尤其是蛋白酶)具有直接抑制作用,并能干扰其跨膜物质运输。钠离子则可能破坏细胞膜电位平衡。两者协同作用,可进一步强化盐的抑菌防腐效果^[9]。

1.1.4 降低氧气溶解度 增加盐浓度会降低溶液中氧气的溶解度,不利于需氧菌的生长,为兼性厌氧的乳酸菌创造了更有利的发酵环境。而低盐环境更有利于某些微生物菌群的生长繁殖,从而对腌制蔬菜的风味产生一定的影响。Tang 等^[10]研究发现,在泡椒腌制过程中,低盐腌制和高浓度盐腌制引起的风味差异可能是由于微生物不同造成的。

1.2 脱水作用与质构调控

1.2.1 蔬菜组织的脱水 高渗透压环境同样作用于蔬菜细胞。当盐浓度高于细胞液渗透压时,细胞内的水分会通过细胞膜(半透膜性质)向外渗出,导致蔬菜组织脱水皱缩,质量减轻,体积缩小^[11]。这一过程伴随着细胞内可溶性物质(如糖、有机酸、部分矿物质和维生素)的溶出^[12]。腌制过程中的水分和溶质迁移是一个扩散过程,其速率受盐浓度、温度等多种因素影响,并可用相应的动力学模型进行预测,如菲克第二定律的扩散模型或 Peleg 模型^[13-14]。赵烨鹏等^[15]研究发现,在腌制辣椒过程中,高盐浓度的腌制液会增大辣椒细胞内外的水分渗透压差,辣椒中的水分开始渗出,该过程中辣椒水分减少,细胞壁逐渐变得脆弱,辣椒质地可能会变得柔软,失去一部分原有的脆度。Chenlo 等^[16]探究板栗渗透脱水的动力学过程及传质机制时,分别以 17.0% 、 22.0% 、 26.5% 的 NaCl 溶液为渗透介质,在 25 、 35 、 45 ℃下进行渗透脱水,发现可以利用逻辑斯蒂剂量—反应模型(Logistic Dose-Response 模型)、扩散模型(基于菲克第二定律)来分析和预测结果。因此,蔬菜腌制过程中,随着盐水浓度上升、温度增加、搅拌等都会促进水分流失,不同的蔬菜又有不同的迁移特点。

1.2.2 对质构的影响 过度脱水、细胞结构塌陷、内源酶(如果胶酶、纤维素酶)在低盐下未被充分抑制而持续作用以及微生物(尤其是某些酵母和霉菌)产生的胞外酶,都可能导致蔬菜组织过度软化,质地变得绵软或韧而不脆^[17]。但 NaCl 的渗透压效应使水分流失的同时也导致细胞壁收缩,细胞结构更加紧密,使得腌制蔬菜获得更加坚实的口感。同时 NaCl 也可以抑制蔬菜自身的果胶甲酯酶和半乳糖醛酸酶,为 NaCl 维持腌制蔬菜质构的关键性

原因^[18-19]。市面上常见的食用盐除了 NaCl 的成分,一般还含有 Ca^{2+} , Ca^{2+} 是常用的保脆剂,由于食用盐中 Ca^{2+} 含量较低,在腌制过程中对蔬菜质构的保持作用远远低于 NaCl 的软化作用。盐浓度的选择对平衡脱水程度以及酶和微生物的抑制作用至关重要。

1.3 风味形成与演化的基础

1.3.1 基础咸味的来源 NaCl 是咸味的主要呈味物质^[20]。人体对咸味感知的方式包括利尿剂阿米洛利敏感性(低盐浓度)和阿米洛利不敏感(高盐浓度)^[21],如图1所示,人类感知咸味的受体通道有 ENaCs (上皮钠通道)和 TRPV1 (辣椒素受体),其咸味转导机制可分为两类:低钠阈值刺激和高钠阈值刺激,它们可以通过人类的偏好和排斥来调节钠的摄入。 ENaC 负责阿米洛利敏感作用, TRPV1 介导阿米洛利不敏感效应^[23]。在中低浓度下, ENaC 路线可以使咸味对于人类有吸引力,而在中高浓度下, TRPV1 通道可以调节对钠盐摄入的排斥行为^[22]。Xie 等^[24]评估了260种报道的呈味肽,推测大多数呈味肽在中性条件下可以以负离子的形式用 TMC4 受体代替氯离子,从而产生咸味。

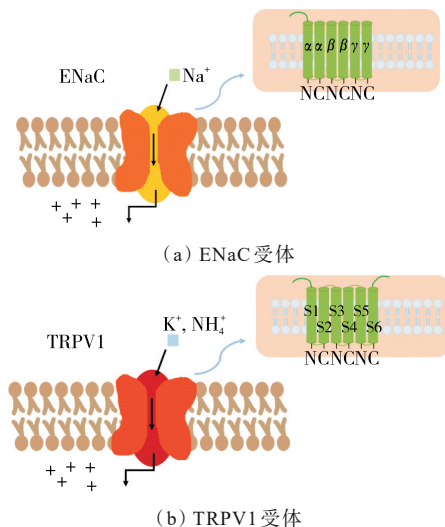


图1 人体咸味感知的两类受体的示意图^[22]

Figure 1 Two types of receptors for saltiness perception in the human body

1.3.2 风味前体物质的溶出与富集 盐渍过程促使蔬菜细胞内容物(如游离氨基酸、可溶性糖、有机酸、核苷酸等)溶出到卤水中。这些物质是后续微生物发酵(如乳酸菌发酵)产生复杂风味化合物(乳酸、醋酸、乙醇、乙醛、双乙酰、酯类等)的关键前体。盐浓度通过调控微生物群落组成(如筛选耐盐的乳酸菌)和代谢活性,直接影响发酵产物的种类和比例,从而塑造产品独特的风味特征^[25]。

1.3.3 酶促与非酶促反应 盐环境影响着蔬菜内源酶(如蛋白酶、脂肪酶)的活性,以及美拉德反应、非酶褐变

反应的速率,这些反应共同贡献了腌制品特有的色泽(如金黄色)和风味(如酱香、鲜味)^[26]。Cui等^[27]在探究腌萝卜变黄的原因时发现,芥子酶和多酚氧化酶是导致萝卜褐变的主要因素,在传统腌制中芥子酶的活性被抑制,但是多酚氧化酶活性无明显下降,而酸处理可以抑制萝卜褐变,且pH 2.4是芥子酶和多酚氧化酶灭活的最佳pH值。高倩妮等^[28]在探究芥菜加工过程中冲味的形成原因时,通过测量内源性芥子酶活性、GC-MS分析,发现硫代葡萄糖苷在内源水解酶芥子酶作用下水解产生的异硫氰酸烯丙酯是芥菜首要辛辣味的来源,但通过脱水、添加食醋进行二次腌制对芥菜独特冲味有明显的影响。

1.3.4 风味协同与掩蔽 咸味能有效抑制苦味、增强鲜味感知(与谷氨酸盐等协同),并与其他风味物质(酸、甜、鲜、发酵香)相互作用,形成和谐统一的整体风味^[29]。如图2所示,盐浓度不足可能导致酸味、苦味或异味突出,风味失衡。一定浓度的酸味对咸味感知具有阈值增强效应,例如在1%~2%食盐溶液中添加0.01%醋酸(pH>3.4),或在10%~20%盐溶液中添加0.1%醋酸(pH>3.0),咸味感知会显著增强。从神经电生理角度来看,酸味能够延长ENaC通道的开放时间(平均增加40%)、缩短关闭时间(减少30%),进而提升通道开放概率,增强钠离子内流。当醋酸浓度过高,如盐溶液中pH<3.4时,会出现反向效应^[31]。因此,在腌制蔬菜时,可以根据盐浓度调整酸味、苦味从而增强或降低咸味,也可以通过调整咸味降低涩味、苦味等,即在生产加工过程中需要加入合适的调味品从而得到符合大多数人群口味的产品。

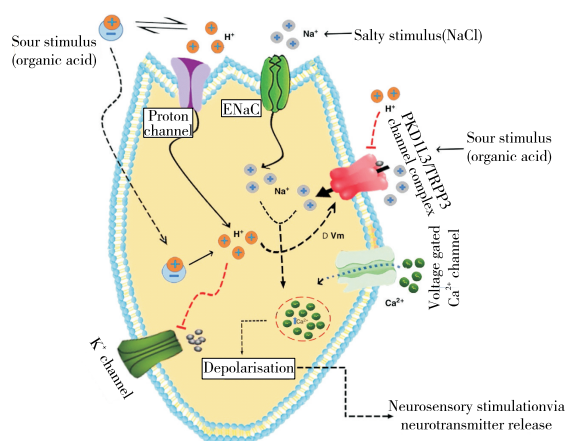


图2 酸味对咸味的协同作用示意图^[30]

Figure 2 Synergistic effect of sourness on saltiness

1.4 色泽的变化与稳定

1.4.1 叶绿素的破坏 高盐、酸性环境和加热(部分工艺)会促使蔬菜中叶绿素脱镁,导致绿色蔬菜(如黄瓜、青椒)由绿变黄褐。梁莉等^[32]研究发现,随着腌制时间的延长,所有低盐豇豆泡菜组的 a^* 值不断升高,证明了在腌制

过程中高温处理会导致豇豆绿色衰减,逐渐变黄褐色。Koca等^[33]测试了豌豆分别在pH 5.5, 6.5, 7.5和温度70, 80, 90, 100℃下的色度值,随着pH的降低,叶绿素降解速度加快。

1.4.2 色素溶出与稳定 部分天然色素(如类胡萝卜素)在腌制过程中可能随汁液溶出造成损失,但在稳定的发酵环境中也可能得以保留或转化^[34]。乳酸菌发酵产生的酸性环境有助于某些色素(如花青素在酸性条件下显红色)的稳定。Laila等^[35]在开发富含花青素的粉状饮料时发现降低pH可以增加红度(a^* 值)。

1.5 营养价值的得失

1.5.1 营养价值损失 在腌制过程中会出现脱水现象,脱水过程造成水溶性维生素(尤其是不稳定的维生素C、维生素B₁、维生素B₂、叶酸)随菜汁大量流失,损失率可达50%以上。Ma等^[36]在研究新鲜腊八蒜与乙酸熏蒸腊八蒜风味区别过程中也发现,维生素B、维生素C会从大蒜中溶出至浸泡液中。李晓^[37]在研究腌渍酸黄瓜时发现,随着腌制时间延长,低盐腌渍与高盐腌渍的酸黄瓜中果胶含量均不断降低,低盐腌渍的酸黄瓜果胶降低较多,两周内降低了19.72%。

1.5.2 营养过剩风险 钠含量显著升高是腌制蔬菜最突出的特征,高盐产品钠含量可高达数千毫克每100g,远超过每日推荐摄入量(<2 300 mg/d)。过量摄入钠会导致高血压^[38]、心血管疾病^[39]、肾脏疾病等患病风险大大提升。世界卫生组织推荐每日盐摄入量<5g^[40]。因此,为保证身体健康,减盐是腌制产品的必然趋势。

1.5.3 营养价值的保留与转化 在腌制蔬菜中,膳食纤维通常得到了良好保留^[41]。部分矿物质和脂溶性维生素相对稳定,水溶性维生素随水分流失而溶出。生物活性物质如多酚、黄酮类等物质在发酵过程中可能发生转化,其生物利用度和活性可能增强(如某些发酵产物具有更强抗氧化性)或减弱。部分乳酸菌发酵还能产生B族维生素和有益代谢物(如 γ -氨基丁酸)^[42-43]。张彤等^[44]将未添加食盐的酱与食盐添加量为5%, 10%, 15%的沙葱花酱进行比较,发现各食盐浓度下的沙葱花酱的部分营养成分损失较少,如氨基酸、还原糖等,但还有一些营养成分如脂肪、蛋白质等,随着食盐浓度的升高呈上升趋势。

2 盐浓度梯度对蔬菜腌制品质的决定性影响

盐浓度是腌制工艺中影响最终产品品质最核心的参数,盐浓度梯度对腌制蔬菜的微生物生态、质构、风味及营养保留产生决定性影响,进而形成如表1所示的不同产品特性。韩晓磊等^[45]研究发现,降低腌制过程中的渗透压可以减少对乳酸菌和酵母菌的抑制作用,并促进发酵,增加色香味等。Zhang等^[46]研究发现,泡椒中挥发性物质高达70~100种,主要包括酯类、萜烯类、烷烃类、醇类、酮

表 1 不同盐浓度对腌制蔬菜品质特征的影响对比

Table 1 Effect comparison of different salt concentrations on quality characteristics of pickled vegetables											
特征	主要目的	典型产品	微生物生态	脱水程度	质地	主要风味	色泽保持	水溶性营 养损失	钠含 量	保质期	主要风险
低盐腌制 (4%~6%)	发酵主 导,风味 开发	新鲜泡菜(如 韩式泡菜)、 主导发酵,发 水,失重 率较低 需保脆剂 辅助维持	乳酸菌快速 酵活跃	轻度脱 水,失重 率较低	较接近鲜 菜,脆度 适中	发酵风味突出 (酸、鲜、酯 香),咸味柔和 发酵)	较好(尤 其是低温 发酵)	相对较少	相对 较低	较短,微生物污染 依赖 冷藏	高风险(杂 菌、致病菌)
中盐腌制 (8%~15%)	防腐与发 酵平衡,风 味质地兼 顾	传统榨菜、 萝卜干、东 北酸菜(部 分)、多数酱 菜胚	菌群相对 复杂	中度脱水 水,失重 率较高	通常脆硬 适中	咸、酸、鲜、发 酵风味相对平 衡,本味保留 较多	一般	中等	中等 偏高	中等	相对可控
高盐腌制 (20%~25%)	强效防腐, 长期保藏	盐渍菜胚 (梅干菜、咸 菜胚)、传统 咸鱼酱菜 (如嗜盐菌)	微生物活动被 强烈抑制,主 要为耐高盐菌 (如嗜盐菌)	重度脱 水,失重 率高	非常硬韧 或脆硬	强烈咸味为 主,发酵风味 和蔬菜本味被 掩盖	易发生褐变, 色泽较深暗	严重	极高	很长	健康风险 (高钠),脱 盐繁琐

类和酸类。Liang等^[47]研究发现,高盐腌制与低盐腌制有不同菌属的生物标记物,且高盐腌制的酸菜具有更高含量的挥发性风味物质。袁松等^[48]研究表明,传统梅干菜一般采用高盐腌制法,湿腌加盐量大多为5%~10%,干燥后,盐含量可达30%,因此梅干菜样品咸度较高。张程程等^[49]研究发现,梅干菜腌制过程中有机酸含量逐渐增加,主要存在变形菌门、厚壁菌门和拟杆菌门微生物。盐浓度影响着果蔬腌制成品的总酸、氨基酸态氮含量、硬度、脆度、咀嚼性、色泽等理化指标,不同原材料所需的盐浓度不同,因此腌制时需根据实际情况选择合适的盐浓度。

3 现代减盐趋势:挑战与创新策略

3.1 减盐导致的风险

低盐可导致微生物安全风险剧增,防腐抑菌能力显著削弱,腐败菌(如产膜酵母、霉菌)和食源性致病菌(如单增李斯特菌、肉毒梭菌、沙门氏菌)生长繁殖的风险大大增加^[50]。低盐腌制还会使质构劣化,削弱钙离子的保脆效果,且对内源酶和微生物酶的抑制不足,蔬菜组织更容易发生软化、糜烂,丧失爽脆口感^[51]。

咸味不足可能导致酸味、苦味或其他异味凸显;发酵过程可能失控,非目标菌(如产气酵母、产异味菌)过度生长,产生不良风味(如酒味、腐臭味);期望的复杂发酵风

味可能无法充分形成或发生劣变^[52]。

3.2 应对减盐挑战的综合策略

3.2.1 强化抑菌防腐 低盐腌制必然导致果蔬腌制成品的微生物安全风险及货架期受到影响,为保证果蔬腌制成品的食品安全问题,需要采取新的措施补偿低盐腌制导致的货架期变短问题。补偿降低的渗透压和控制水分活性在较低水平是实现抑菌防腐目标的重要途径。添加食醋、柠檬酸、乳酸等或利用发酵快速产酸,降低pH值($\text{pH} < 4.2$),可有效抑制多数致病菌和腐败菌^[42]。还可以添加天然防腐剂,如ε-聚赖氨酸(广谱)、溶菌酶、香辛料提取物(如芥子油苷分解产物、大蒜素、肉桂醛)和壳聚糖等^[9, 53]。Tan等^[54]在乳酸菌发酵的低盐榨菜中加入壳聚糖后,产品中微生物数量减少、脆度增加、亚硝酸盐降低并有更好的风味特征。还可以辅以轻度干燥(如风干、热泵干燥)、添加亲水性物质(糖、甘油、山梨醇)或亲水胶体,进一步降低水分活性。采用真空包装或气调包装,如高CO₂、低O₂环境,可抑制好氧微生物生长。因此,低盐腌制的果蔬可以选择合适的抑菌防腐方法(表2)后得到较长的货架期。

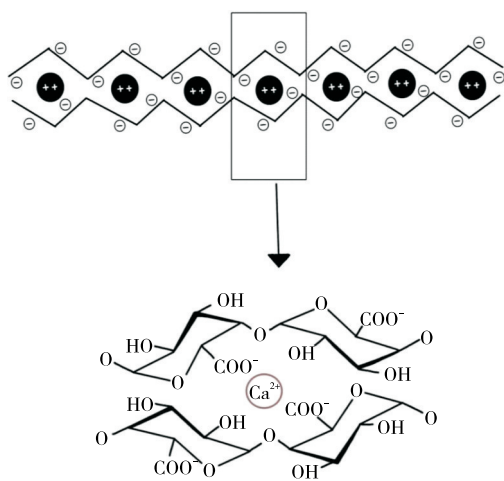
3.2.2 优化发酵工艺与微生物管理 应用直投式发酵剂,接种经过筛选的、具有快速产酸能力、良好风味特性、耐低温/耐低盐特性的优良乳酸菌(如植物乳杆菌、短乳杆

表 2 低盐果蔬腌制中常用的抑菌防腐方法

Table 2 Common antibacterial and preservative methods in low-salt fruit and vegetable pickling			
分类	主要方法	作用机制	应用效果
降低pH值	添加食醋、柠檬酸、乳酸、发酵	低pH破坏微生物细胞稳态	$\text{pH} < 4.0$ 致病菌、酵母菌几乎无法存活
天然防腐剂	香辛料提取物、壳聚糖、溶菌酶	溶菌酶水解细菌细胞壁肽聚糖	抑制革兰氏阳性菌(如李斯特菌)
降低 a_w	轻度干燥、添加亲水胶体	微生物关键酶失活	水分活性 < 0.75 细菌、大部分酵母完全被抑制
包装技术	真空包装、气调包装	调节O ₂ /CO ₂ 比例抑制好氧菌	CO ₂ $> 20\%$ 显著延缓酵母和霉菌生长

菌、肠膜明串珠菌)复合菌剂,可以确保快速启动并主导发酵,形成酸性环境抑制杂菌。乳酸杆菌属细菌通常用于发酵食品中,以改善食品的外观、气味和味道或延长其保质期^[55]。Zou等^[56]研究表明,采用乳酸菌发酵可以降低真菌数量、提高细菌含量,并促进关键风味物质的形成。周瑶等^[57]探究了不同菌种发酵对番木瓜汁品质的影响,研究发现,发酵果汁减少不愉快气味的产生,果汁的风味更加丰富。传统发酵模式是利用果蔬表面自带的菌种进行发酵,存在菌种复杂不可控的风险,而人工干预加入菌种可以使发酵更快、更可控,且产品质量更加稳定、均一,并降低未知菌种带来的风险。

3.2.3 质构改良与脆度保持 原料热烫可部分钝化内源果胶酶,有助于保持质地,还可以杀死附着在原料表面的虫卵,但需控制温度和时间,避免过度软化^[58]。李欣欣等^[59]研究发现,经85℃热水漂烫60s后,黄瓜的感官评分最好。钙盐是最常用的保脆剂^[60],如图3所示,钙离子能与蔬菜细胞壁中果胶物质的羧基交联,形成稳定的果胶酸钙网络结构,显著增强细胞壁的机械强度,抵抗细胞壁降解酶(如果胶酶)的作用和过度渗透压导致的细胞崩塌,从而有效保持或增强蔬菜的脆硬口感^[62]。其他如海藻酸钠、氯化钙、乳酸钙复配等也对保持蔬菜脆度有效果^[63],但使用时需注意添加量和均匀性(避免局部过硬)。明矾虽有强效保脆作用,但因铝残留存在健康风险,应严格限制或禁止使用。Yousefi等^[64]为改良酸黄瓜在贮存期间的软化问题,分别向盐水中加入KCl、CaCl₂、MgCl₂、AlCl₃、醋酸钙,发现加入醋酸钙和CaCl₂的酸黄瓜硬度保持最好。CaCl₂被广泛应用于果蔬加工中,且其添加量对果蔬的涩味影响较小,是一种熟知的可以改善果蔬硬度、脆度的优良保脆剂。



黑线为多聚半乳糖醛酸链,圆圈为钙离子和羧基

图3 果胶—钙凝胶中连接区形成的“蛋盒”模型的示意图^[61]

Figure 3 "Egg carton" model formed in the junction of a pectin-calcium gel

3.2.4 非热杀菌技术的应用 不同的杀菌方法对腌制蔬菜成品品质有不同程度的影响,腌制蔬菜成品在细菌作用下会出现酸化、变软、产气等现象^[65]。若要延长腌制蔬菜的保质期,必须控制并清除蔬菜加工过程中的微生物。为保证低盐腌制产品的安全性,通常辅以一些高新技术手段,如表3所示。超高压杀菌技术是通过将包装好的食品放入超高压容器中,并持续施加一段时间的压力(100~1 000 MPa)。超高压通过破坏微生物细胞结构、使蛋白质三级结构改变从而达到在常温或低温下有效杀灭致病菌和腐败菌的效果,最大限度保留产品的生鲜风味、色泽和营养(尤其是热敏性维生素)^[66]。宋宁^[67]采用超高压技术对辣白菜进行灭菌并探究其对辣白菜品质的影响,预测出最佳杀菌工艺为超高压处理压力300 MPa,保压时间15 min。辐照杀菌是利用电离辐射(主要是γ射线、X射线或电子束)照射食品,利用辐射产生的能量破坏微生物的DNA或RNA,使其失去繁殖能力或直接被杀死^[68]。辐照能有效杀菌,但消费者接受度、法规限制及可能产生的异味是其制约因素^[69]。吴梦西^[70]通过辐照杀菌延长了酸菜的保质期,控制pH和糖浓度对辐照杀菌有协同作用,但辐照会导致酸菜的脆度、硬度和咀嚼性均有所下降。毛青秀等^[71]通过辐照方式处理南酸枣糕,经⁶⁰Co-γ射线和电子束辐照处理的南酸枣糕在维持质构的同时,可延长保质期至270 d。综上,现有的高新技术改进了传统灭菌技术的同时也存在一定的局限性,所以在选择非热杀菌技术时需要结合目标需求和实际情况选择合适的杀菌技术。

3.2.5 开发风味肽作为咸味替代物 减少盐的摄入是大势所趋,但人们的口味难以在短时间改变,所以咸味替代物,如酵母抽提物、矿物质盐类、呈味氨基酸、呈味核苷酸、风味肽的研究也是应对减盐挑战的热点。能作为咸味替代物的风味肽通常包括咸味肽和咸味增强肽,咸味肽自身具有咸味,而咸味增强肽本身没有咸味,仅可以与NaCl协同增强咸味感知。风味肽作为一种天然蛋白质水解物,符合消费者对于“清洁绿色”的需求,减少消费者对于安全性的担心。同时,部分肽段具有抗氧化、抗菌等功效,可以在一定程度上延长食品货架期。常见的获取风味肽的方法包括化学水解法、酶解法、化学合成法和微生物发酵法等^[72]。微生物发酵法的风味丰富、安全性高,但其可控性差,微生物易污染,且成本较高。化学合成法的多肽纯度高,但成本极高且风味单一^[73]。通过酸或碱作用的化学水解法,容易导致蛋白质变性、破坏敏感氨基酸^[72]。酶解法的效率高、安全性好、风味较为丰富且成本适中,缺点在于易产生苦味肽,若蛋白酶选择不当(如胰蛋白酶水解含疏水性氨基酸的肽段)或水解过度,会产生含亮氨酸、异亮氨酸等疏水性氨基酸的苦味肽,需额外通过脱苦处理(如活性炭吸附、环糊精包合)改善风味,增加工艺步骤^[73]。总体而言,酶解法平衡了效率、成本 and 安全性,是食品工业生产风味肽的主流技术。咸味肽和咸味

表 3 果蔬腌制中常用非热杀菌技术对比表

Table 3 Comparison of non-thermal sterilization technologies commonly used in fruit and vegetable pickling					
评估维度	基本原理	优点	缺点	对品质的影响	产业化现状
超高压杀菌	100~600 MPa 静水压 力破坏微生物细胞 结构	高效杀灭致病菌、保留 色泽/脆度/营养、无化学 残留、适用包装后处理	设备投资高、对芽孢/霉 菌效果弱、批次式处理量 低或改变蛋白质结构	几乎不影响质地/风味、 泡菜/酱菜应用成熟、极 高压力的致软菜变形	泡菜、即食酱菜 主流技术
辐照杀菌	γ 射线/X 射线破坏 DNA 和细胞膜	穿透性强、灭活芽孢/虫 卵、常温低能、延长货 架期	消费者接受度低、可能产 生异味、法规限制严、维 生素 B ₁ /维生素 E 损失	高剂量致质地软化、风 味改变风险、叶绿素降 解(绿色褪失)	受限法规,多用 于香料脱水菜
高压二氧化 碳杀菌	5~50 MPa CO ₂ 穿透 细胞膜致 pH 下降、 酶失活	温和杀菌(30~60 ℃)、 CO ₂ 可回收、风味破坏、 能杀灭酵母和霉菌	耐压设备贵、处理时间长 (30~120 min)、对芽孢无 效、产品酸化	保留脆度/色泽、酸性腌 制品适用、CO ₂ 渗入影 响口感	实验室向中试 过渡
超声波杀菌	空化效应局部高温/ 高压破坏细胞	协同热处理降温、加速 腌制渗透、设备成本低	单独效果弱、噪声污染、 对芽孢无效、致组织软化	破坏细胞结构(质地变 软)、辅助盐渗入、高功 率致风味损失	多作为辅助技术

增强肽的主要成分为寡肽,通常由 2~6 个氨基酸组成,一般不超过 10 个氨基酸^[74]。目前,已从多种植物、动物中获得多种咸味肽及咸味增强肽。汪海燕^[75]在牛骨中发现 Asp-Pro、Asp-Arg、Arg-Glu 具有较好的咸味特征,在 1 mg/mL 的水溶液中咸味强度值分别为 12.90、9.51、7.76。在 0.35% 的 NaCl 体系中,3 种肽均表现出一定程度的增效效果:36.56% (RE)、18.63% (DR)、4.64% (DP)。Chen 等^[76]在香菇酶解提取物中发现 ADHDLPF、DIQPEER、DEPLIVW 和 LPDEPSR 4 种肽序具有良好的咸味增强效果,至少可替代 25%~30% 的 NaCl。

4 结论与展望

腌制盐是塑造蔬菜腌制品核心品质属性的关键要素,其作用贯穿于防腐安全、质构形成、风味演化、色泽稳定和营养变迁的全过程。不同盐浓度决定了产品的类型、感官特性、安全性和营养特征。高盐在保障安全与保质期方面具有优势,但与现代健康低钠饮食理念相悖。

低盐化是蔬菜腌制产业可持续发展的必然方向,但绝非简单的减量过程。它是一项系统工程,面临微生物安全、质地软化、风味失衡等严峻挑战。成功实现减盐目标依赖于对盐作用机制的深刻理解以及多种栅栏技术的创新性综合应用,包括精准调控发酵(应用优良菌剂)、辅助酸化、添加安全有效的天然防腐剂和保脆剂(如 CaCl₂)、利用风味增强剂和部分盐替代物(如 KCl)、采用先进包装(真空/气调)和严格冷链,以及应用非热杀菌技术(如超高压技术)。

参考文献

[1] Du X Y, Li J, Xu Y J, et al. Different starter cultures regulate the histamine, physicochemical properties, microbial community and volatile compounds during sour bamboo shoot fermentation [J]. International Journal of Food Microbiology, 2025, 442:

111351.
[2] Wang X Y, Song G, He Z, et al. Effects of salt concentration on the quality of Paocai, a fermented vegetable product from China [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101 (15): 6 202-6 210.
[3] 刘彤. 树立“大食物观”做强大食业[N]. 中国食品报, 2022-03-10(1).
Liu T. Embrace a broad approach to food and strengthen the food industry[N]. China Food News, 2022-03-10(1).
[4] 张志强. 《国民营养计划》(2017—2030 年)的制定与实施(详见光盘)[J]. 肿瘤代谢与营养电子杂志, 2019, 6(4): 493.
Zhang Z Q. Formulation and implementation of the National Nutrition Plan (2017—2030) (see CD-ROM for details) [J]. Electronic Journal of Metabolism and Nutrition of Cancer, 2019, 6(4): 493.
[5] Sawada K, Koyano H, Yamamoto N, et al. The effects of vegetable pickling conditions on the dynamics of microbiota and metabolites[J]. PeerJ, 2021, 9: e11123.
[6] 李嘉仪, 陈功, 黄润秋, 等. 加盐方式和盐浓度对传统四川泡菜微生物生长与品质的影响[J]. 食品与发酵科技, 2022, 58 (3): 26-33.
Li J Y, Chen G, Huang R Q, et al. Effects of salt adding methods and salt concentration on microbial growth and quality of traditional sichuan Paocai[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2022, 58(3): 26-33.
[7] Beuchat L R. Influence of water activity on growth, metabolic activities and survival of yeasts and molds[J]. Journal of Food Protection, 1983, 46(2): 135-141.
[8] 马彩兰, 陈占伟. 芥菜发酵工艺及生产过程参数控制研究[J]. 中国调味品, 2025, 50(3): 155-158, 177.
Ma C L, Chen Z W. Study on fermentation technology and production process parameter control of mustard[J]. China Condiment, 2025, 50(3): 155-158, 177.
[9] 陈满全. 酱腌菜防腐措施的研究[J]. 食品研究与开发, 2004

- (3): 141-144.
- Chen M Q. Research on preservative measures for pickles[J]. Food Research and Development, 2004(3): 141-144.
- [10] Tang J B, Wu X M, Lv D, et al. Effect of salt concentration on the quality and microbial community during pickled peppers fermentation[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101594.
- [11] Mari A, Parisouli D N, Krokida M. Exploring osmotic dehydration for food preservation: methods, modelling, and modern applications[J]. Foods, 2024, 13(17): 2 783.
- [12] 黄莎, 李伟荣, 马雅敏, 等. 食盐浓度对腌制茭白理化性质及品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(12): 78-83.
- Huang S, Li W R, Ma Y M, et al. Effect of salt concentration on the physicochemical properties and quality of pickled zizania latifolia[J]. Food Research and Development, 2021, 42 (12): 78-83.
- [13] Peleg M. An empirical model for the description of moisture sorption curves[J]. Journal of Food Science, 1988, 53(4): 1 216-1 217.
- [14] Yadav A K, Singh S V. Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(9): 1 654-1 673.
- [15] 赵烨鹏, 吴婉琴, 张志旭, 等. 不同盐浓度下辣椒盐胚的质构变化规律[J]. 食品科技, 2024, 49(12): 276-280.
- Zhao Y P, Wu W Q, Zhang Z X, et al. Texture change pattern of salted chili under different salt concentration [J]. Food Science and Technology, 2024, 49(12): 276-280.
- [16] Chenlo F, Moreira R, Fernández-herrero C, et al. Mass transfer during osmotic dehydration of chestnut using sodium chloride solutions[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 73(2): 164-173.
- [17] 罗东辉, 陈淇, 董浩. 潮州咸菜发酵工艺优化及其品质研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(5): 142-147.
- Luo D H, Chen Q, Dong H. Optimization of fermentation process and study on quality of Chaozhou pickles[J]. China Condiment, 2024, 49(5): 142-147.
- [18] 周莺茹, 袁先铃, 杜冬梅, 等. 烫漂结合氯化钙对大头菜预处理工艺研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(10): 81-88.
- Zhou Y R, Yuan X L, Du D M, et al. Study on pretreatment process of kohlrabi by blanching combined with calcium chloride[J]. China Condiment, 2024, 49(10): 81-88.
- [19] 梅明鑫, 刘卫, 晏敏, 等. 萝卜低盐腌制过程中脆度变化原因探究[J]. 中国酿造, 2017, 36(12): 27-33.
- Mei M X, Liu W, Yan M, et al. Reasons for brittleness changes of radish during pickling process with low-salt content[J]. China Brewing, 2017, 36(12): 27-33.
- [20] 李欣怡, 王晓静, 董馨然, 等. 动物源咸味增强肽的研究与应用进展[J]. 现代食品科技, 2025, 41(8): 349-358.
- Li X Y, Wang X J, Dong X R, et al. Progress on the research and application of savory-enhancing peptides of animal origin [J]. Modern Food Science & Technology, 2025, 41(8): 349-358.
- [21] Hu Y Y, Badar I H, Liu Y, et al. Advancements in production, assessment, and food applications of salty and saltiness-enhancing peptides: a review[J]. Food Chemistry, 2024, 453: 139664.
- [22] Le B, Yu B B, Amin M S, et al. Salt taste receptors and associated salty/salt taste-enhancing peptides: a comprehensive review of structure and function[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 129: 657-666.
- [23] Wang H Y, Chen D, Lu W J, et al. Novel salty peptides derived from bovine bone: identification, taste characteristic, and salt-enhancing mechanism[J]. Food Chemistry, 2024, 447: 139035.
- [24] Xie X N, Dang Y L, Pan D D, et al. The enhancement and mechanism of the perception of saltiness by umami peptide from Ruditapes philippinarum and ham[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134886.
- [25] 李敏, 齐峰, 周均, 等. 萝卜泡菜腌制过程中食盐和乳酸含量变化动力学研究[J]. 中国调味品, 2013, 38(9): 31-36.
- Li M, Qi F, Zhou J, et al. Dynamics research on changes of salt and lactic acid content in pickling process of radish[J]. China Condiment, 2013, 38(9): 31-36.
- [26] 王琛, 高雅, 张晓黎, 等. 3种白菜腌制酸菜贮期非酶褐变的比较[J]. 辽宁农业科学, 2020(1): 29-34.
- Wang C, Gao Y, Zhang X L, et al. Comparison of non-enzymatic browning of suerkrauts during storage pickled by three varieties of cabbages[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2020(1): 29-34.
- [27] Cui H P, Chen F, Yu J Y, et al. Accurate pH decrease induced inactivation of myrosinase and polyphenol oxidase in salted radish for color improvement[J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102703.
- [28] 高倩妮, 杜传来, 邹小欠, 等. 芥菜加工过程冲味形成机制及其芥子苷酶特性研究[J]. 食品科技, 2018, 43(10): 90-97.
- Gao Q N, Du C L, Zhou X Q, et al. Study on the formation mechanism and changes of main flavor during the curing process of mustard[J]. Food Science and Technology, 2018, 43 (10): 90-97.
- [29] Breslin P A S, Beauchamp G K. Salt enhances flavour by suppressing bitterness[J]. Nature, 1997, 387(6 633): 563.
- [30] Deepankumar S, Karthi M, Vasanth K, et al. Insights on modulators in perception of taste modalities: a review[J]. Nutrition Research Reviews, 2019, 32(2): 231-246.
- [31] Keast R S J, Breslin P A S. An overview of binary taste-taste interactions[J]. Food Quality and Preference, 2003, 14(2): 111-124.
- [32] 梁莉, 杜阿如娜, 马涛, 等. 低盐豇豆泡菜预处理工艺优化及贮藏特性分析[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 246-251.
- Liang L, Du A R N, Ma T, et al. Optimized pre-treatment and storage properties of low-salt pickled cowpea[J]. Food Science, 2018, 39(6): 246-251.
- [33] Koca N, Karadeniz F, Burdurlu H S. Effect of pH on chlorophyll degradation and colour loss in blanched green peas [J]. Food Chemistry, 2007, 100(2): 609-615.
- [34] 刘宗敏, 谭兴和, 周红丽, 等. 萝卜干腌制技术研究进展[J]. 中国酿造, 2017, 36(6): 19-22.

- Liu Z M, Tan X H, Zhou H L, et al. Research advance of pickled dried turnip technology[J]. China Brewing, 2017, 36 (6): 19-22.
- [35] Laila U, Yuliyanto P, Hariyadi S, et al. Incorporation of low-pH purple-fleshed sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) anthocyanin extract into a sucrose matrix: characterization and application in powdered beverage[J]. Food and Bioproducts Processing, 2025, 151: 172-188.
- [36] Ma Y, Liu P P, Guo S, et al. Nutritional quality and volatile flavor substances of "laba" garlic products produced by either soaking or fumigating with acetic acid[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(2): e15116.
- [37] 李晓. 低盐腌渍黄瓜质构与风味变化的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019: 30.
- Li X. Study on the texture and flavor of low-salted pickled cucumber[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019: 30.
- [38] He F J, Jenner K H, Macgregor G A. WASH: world action on salt and health[J]. Kidney International, 2010, 78(8): 745-753.
- [39] Cook N R, Obarzanek E, Cutler J A, et al. Joint effects of sodium and potassium intake on subsequent cardiovascular disease: the trials of hypertension Prevention follow-up study [J]. Archives of Internal Medicine, 2009, 169(1): 32-40.
- [40] Carraro C I, Machado R, Espindola V, et al. The effect of sodium reduction and the use of herbs and spices on the quality and safety of bologna sausage[J]. Food Science and Technology, 2012, 32(2): 289-297.
- [41] 崔娜, 马智权, 李阳, 等. 不同品种竹笋自然发酵过程中膳食纤维含量变化研究[J]. 中国食品, 2022(20): 142-144.
- Cui N, Ma Z Q, Li Y, et al. Study on the changes of dietary fiber content during the natural fermentation of bamboo shoots of different varieties[J]. China Food, 2022(20): 142-144.
- [42] 何双, 尚雪波, 李志坚, 等. 乳酸菌在泡菜中的作用及其应用现状[J]. 现代农业科技, 2025(7): 122-128.
- He S, Shang X B, Li Z J, et al. The role of lactic acid bacteria in kimchi and its application status[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2025(7): 122-128.
- [43] Conte P, Fadda C, Del Caro A, et al. Table olives: an overview on effects of processing on nutritional and sensory quality[J]. Foods, 2020, 9(4): 514.
- [44] 张彤, 张东, 张晓艳, 等. 不同浓度食盐处理对沙葱花酱腌制品质及特征的影响 [J]. 中国瓜菜, 2025, 38(5): 187-195.
- Zhang T, Zhang D, Zhang X Y, et al. Effects of different concentrations of salt treatments on the quality characteristics of pickled sand onion paste[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2025, 38(5): 187-195.
- [45] 韩晓磊, 梁珏钦, 方志辉, 等. 不同盐分含量对南荻笋腌制过程中品质变化影响 [J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12 (20): 8 049-8 055.
- Han X L, Liang J Q, Fang Z H, et al. Effects of different salt content on the quality changes of *Triarrhena lutarioriparia* shoots during salting[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(20): 8 049-8 055.
- [46] Zhang S Y, Xiao Y, Jiang Y L, et al. Effects of brines and containers on flavor production of Chinese pickled chili pepper (*Capsicum frutescens* L.) during natural fermentation[J]. Foods, 2022, 12(1): 101.
- [47] Liang H P, He Z, Wang X Y, et al. Bacterial profiles and volatile flavor compounds in commercial Suancai with varying salt concentration from Northeastern China[J]. Food Research International, 2020, 137: 109384.
- [48] 袁求松, 张玉, 付湘晋, 等. 市售 22 种梅干菜滋味品质与理化指标相关性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(6): 316-322.
- Yuan Q S, Zhang Y, Fu X J, et al. Correlation analysis between taste quality and physicochemical indexes of 22 kinds of preserved mustards on the market[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(6): 316-322.
- [49] 张程程, 范涛, 章检明, 等. 缙云梅干菜腌制过程中细菌群落与品质的变化[J]. 浙江农业学报, 2025, 37(6): 1 336-1 343.
- Zhang C C, Fan T, Zhang J M, et al. Changes of bacterial community and quality during pickling process of Jinyun pickled and dried mustard[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2025, 37(6): 1 336-1 343.
- [50] Ahmadsah L S F, Min S G, Han S K, et al. Effect of low salt concentrations on microbial changes during kimchi fermentation monitored by PCR-DGGE and their sensory acceptance[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2015, 25(12): 2 049-2 057.
- [51] 李瑶, 余永, 陈海, 等. 低盐榨菜加工中的危害因素分析及控制研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(18): 374-380.
- Li Y, Yu Y, Chen H, et al. Research progress on hazard factors analysis and control of low-salt tuber mustard processing[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(18): 374-380.
- [52] 徐祥, 谷贵章, 尚佳宇, 等. 低盐雪菜中呈味核苷酸关联物的检测及贮藏过程中的变化 [J]. 食品科学, 2024, 45(4): 315-322.
- Xu X, Gu G Z, Shang J Y, et al. Detection and changes in contents of flavor nucleotide-related compounds in low-salt pickled potherb mustard during storage[J]. Food Science, 2024, 45(4): 315-322.
- [53] 郑连强, 袁先铃, 罗葵. 酱腌菜天然防腐保鲜技术及应用前景展望[J]. 中国调味品, 2021, 46(4): 187-192.
- Zheng L Q, Yuan X L, Luo Y. The natural preservative and fresh-keeping technology and application prospect of pickles [J]. China Condiment, 2021, 46(4): 187-192.
- [54] Tan H, Huang D D, Zhang Y, et al. Chitosan and inulin synergized with *Lactiplantibacillus plantarum* LPP95 to improve the quality characteristics of low-salt pickled tuber mustard[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 278: 134335.
- [55] Lu Y, Xing S Q, He L P, et al. Characterization, high-density fermentation, and the production of a directed vat set starter of lactobacilli used in the food industry: a review[J]. Foods, 2022,

- 11(19): 3 063.
- [56] Zou J H, Shen H Y, Li A P, et al. The effect of lactic acid bacteria as a starter on the microbial community and flavors of the fermented beef-soybean paste[J]. Food Chemistry, 2025, 484: 144328.
- [57] 周瑶, 李娟, 贾凤霞, 等. 单一及混合乳酸菌发酵对番木瓜汁品质的影响 [J]. 食品与机械, 2024, 40(1): 175-182, 225.
Zhou Y, Li J, Jia F X, et al. Lactic acid fermentation of papaya juice using single and mixed Lactic acid bacteria[J]. Food & Machinery, 2024, 40(1): 175-182, 225.
- [58] 郑奇林, 邓放明, 赵玲艳. 不同预处理方式对发酵芥菜品质的影响[J]. 中国酿造, 2025, 44(3): 156-164.
Zheng Q L, Deng F M, Zhao L Y. Effect of different pretreatment methods on the quality of fermented mustard[J]. China Brewing, 2025, 44(3): 156-164.
- [59] 李欣欣, 刘大军, 陈畅, 等. 基于模糊数学评定与响应面法优化酸黄瓜工艺研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(6): 119-125.
Li X X, Liu D J, Chen C, et al. Optimization of process of pickled cucumber based on fuzzy mathematics evaluation and response surface method[J]. China Condiment, 2024, 49(6): 119-125.
- [60] 徐欢欢, 戴临雪, 吴志康, 等. 食盐粒度及钙含量对腌制芥菜自然发酵过程的影响[J]. 食品工业, 2023, 44(6): 73-77.
Xu H H, Dai L X, Wu Z K, et al. Effects of granularity and calcium content of salt on natural fermentation process of pickled mustard[J]. The Food Industry, 2023, 44(6): 73-77.
- [61] Said N S, Olawuyi I F, Lee W Y. Pectin hydrogels: gel-forming behaviors, mechanisms, and food applications[J]. Gels, 2023, 9 (9): 732.
- [62] Mi T, Wang D K, Yao S J, et al. Effects of salt concentration on the quality and microbial diversity of spontaneously fermented radish Paocai[J]. Food Research International, 2022, 160: 111622.
- [63] Pérez-Díaz I M, Medina E, Page C A, et al. Prevention of microbes-induced spoilage in sodium chloride-free cucumber fermentations employing preservatives[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(11): 5 054-5 069.
- [64] Yousefi M, Arianfar A, Hakimzadeh V, et al. Enhancing the texture and sensory properties of pickled cucumbers with different brine solutions[J]. Foods, 2025, 14(3): 336.
- [65] 崔方超, 胡雨倩, 王当丰, 等. 萝卜干加工贮藏与高值化利用关键技术研究进展[J]. 中国食品学报, 2024, 24(6): 455-465.
Cui F C, Hu Y Q, Wang D F, et al. Research progress on key technologies of processing, storage and high value utilization of dried radish[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(6): 455-465.
- [66] 李文华. 非热杀菌技术在低盐腌制香椿中的应用研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2021: 33.
Li W H. The effect of non-thermal sterilization technique on low-salt pickled toona sinensis[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2021: 33.
- [67] 宋宁. 超高压处理对软包装辣白菜的杀菌效果及品质影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2017: 38.
Song N. Effect of high pressure processing treatment on sterilization efficacy and quality of soft kimchi[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017: 38.
- [68] 燕欣悦, 胡风庆, 宁崇, 等. 电子束辐照技术对食品品质的影响及在食品中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(2): 216-225.
Yan X Y, Hu F Q, Ning C, et al. Research progress on the effect of electron beam irradiation technology on food quality and its application in food[J]. Food & Machinery, 2025, 41(2): 216-225.
- [69] 欧雪. 接种乳酸菌发酵低盐泡菜工艺优化及辐照杀菌对其品质的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022: 7-9.
Ou X. Optimization of fermentation process of low-salt pickled sauerkraut inoculated with lactic acid bacteria and the effect of irradiation sterilization on its quality[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2022: 7-9.
- [70] 吴梦西. 低盐酸菜中耐辐照微生物对酸菜品质的影响及联合杀菌工艺研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2023: 1-2.
Wu M X. Effect of radiation-resistant microorganisms on the quality of low-salt pickles and study on combined sterilization technology[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2023: 1-2.
- [71] 毛青秀, 徐远芳, 陈渠玲, 等. 辐照方式对南酸枣糕品质及货架期的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 109-116, 138.
Mao Q X, Xu Y F, Chen Q L, et al. Effects of irradiation methods on quality and shelf life of choerospondias axillaris pastilles[J]. Food & Machinery, 2024, 40(2): 109-116, 138.
- [72] Chen X, Luo N, Guo C F, et al. Current trends and perspectives on salty and salt taste-enhancing peptides: a focus on preparation, evaluation and perception mechanisms of salt taste[J]. Food Research International, 2024, 190: 114593.
- [73] Cruz-casas D E, Aguilar C N, Ascacio-valdés J A, et al. Enzymatic hydrolysis and microbial fermentation: the most favorable biotechnological methods for the release of bioactive peptides[J]. Food Chemistry: Molecular Sciences, 2021, 3: 100047.
- [74] Chen R X, Liu X C, Xiang J Y, et al. Prospects and challenges for the application of salty and saltiness-enhancing peptides in low-sodium meat products[J]. Meat Science, 2023, 204: 109261.
- [75] 汪海燕. 牛骨源咸味肽的分离鉴定及呈味机制研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2024: 1-2.
Wang H Y. Study on the isolation, identification, and taste mechanism of salty peptides derived from bovine bone[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2024: 1-2.
- [76] Chen D Y, Chen W C, Wu D, et al. Saltiness enhancing peptides isolated from enzymolysis extract of *Lentinula edodes* and their taste enhancing action mechanisms[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 188: 115430.