

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.03.007

罗思洋, 刘宏, 傅龙群, 等. 钙离子对泡萝卜质构及细胞壁特性的影响机制 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(3): 70-79.

# 钙离子对泡萝卜质构及细胞壁特性的影响机制

罗思洋<sup>1,2</sup>, 刘宏<sup>3</sup>, 傅龙群<sup>4</sup>, 龙立利<sup>5</sup>,  
刘倩<sup>5</sup>, 索化夷<sup>1</sup>, 张玉<sup>1</sup>

- 西南大学 食品科学学院, 重庆 400715; 2. 华南理工大学 食品科学与工程学院, 广东 广州 510641;
- 屏山县农业农村局, 四川 宜宾 645350; 4. 重庆市涪陵榨菜集团股份有限公司, 重庆 408013;
- 中盐西南盐业有限公司, 重庆 400010

**摘要:** 为了明确钙离子对泡菜脆度的影响机制, 采用不同钙离子含量的泡菜盐发酵白萝卜, 分析其质构特性、细胞膜渗透率、果胶酸钙含量、细胞壁多糖含量、细胞壁降解酶活性、细胞微观结构等指标, 并进行相关性分析。实验结果表明: 与新鲜萝卜相比, 用钙离子含量盐发酵, 萝卜硬度增加、咀嚼度下降; 510 mg/kg 钙离子含量盐发酵萝卜, 果胶酸钙、纤维素、半纤维素含量最高, 果胶甲酯酶、纤维素酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶活性最小, 此钙离子含量盐发酵萝卜具有良好的保脆效果; 相比于新鲜萝卜, 钙离子含量盐发酵萝卜使组织细胞排列更整齐有序。相关性分析表明: 细胞壁降解酶活性与硬度、水溶性果胶含量呈显著正相关( $p < 0.05$ ), 与细胞膜渗透率、果胶酸钙、纤维素、半纤维素、碳酸钠可溶性果胶含量呈显著负相关( $p < 0.05$ )。

**关键词:** 泡菜; 脆度; 钙盐; 细胞壁降解酶; 品质控制

中图分类号: TS201.1 文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2026)03-0070-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Mechanism of Calcium Ion Influence on Texture and Cell Wall Characteristics of Pickled Radish

LUO Siyang<sup>1,2</sup>, LIU Hong<sup>3</sup>, FU Longqun<sup>4</sup>, LONG Lili<sup>5</sup>,  
LIU Qian<sup>5</sup>, SUO Huayi<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>

- College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;
- College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510641, China;
- Agriculture and Rural Bureau of Pingshan County, Yibin Sichuan 645350, China;
- Chongqing Fuling Zhacai Group Co., Ltd., Chongqing 408013, China;
- China Salt Southwest Salt Industry Co., Ltd., Chongqing 400010, China

收稿日期: 2025-03-31

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2023TIAD-KPX0028)。

作者简介: 罗思洋, 硕士研究生, 主要从事发酵食品研究。

通信作者: 张玉, 正高级实验师, 博士。

**Abstract:** To clarify the influence mechanism of calcium ion on the crispness of pickles, this study used picklingsalt with different calcium ion concentrations to ferment white radish, and analyzed its texture characteristics, cell membrane permeability, calcium pectate, cell wall polysaccharide, cell wall degrading enzyme activity and cellular microstructure, and made correlation analysis. The results showed that compared with fresh radish, salt-fermented radishes with varying calcium ion concentrations exhibited increased hardness and reduced chewiness. The content of calcium pectin, cellulose and hemicellulose in radish fermented with 510 mg/kg calcium ion concentration salt was the highest, and the activities of pectin methylesterase, cellulase and  $\beta$ -glucosidase were the lowest. This calcium ion concentration salt fermented radish had a good crispness-preserving effect. Compared with fresh radish, the tissue cells of radish fermented with different calcium ion concentrations were arranged more orderly. Correlation analysis showed that the activity of cell wall degrading enzyme was positively correlated with hardness and water-soluble pectin content ( $p < 0.05$ ), and negatively correlated with cell membrane permeability, calcium pectin, cellulose, hemicellulose and sodium carbonate soluble pectin content ( $p < 0.05$ ).

**Key words:** pickles; crispness; calcium salt; cell wall degrading enzyme; quality control

泡菜是一种风味独特的发酵蔬菜制品,也是中国传统发酵食品,具有悠久的历史。其中四川泡菜是我国传统发酵蔬菜的典型代表,其原料种类多样,味道酸咸,享有“川菜之骨”的美誉<sup>[1-2]</sup>。随着当今市场的不断变化,泡菜的消费需求日益增加,四川泡菜生产逐渐从小规模作坊制作向工业化、规模化生产转变<sup>[3]</sup>。脆度是衡量泡菜品质的重要指标,但泡菜发酵过程难以控制,泡菜发酵和储藏过程中时有发生软化、腐败等不良现象,使泡菜失去原有的组织状态和口感,降低食用价值,并造成经济损失。

泡菜的软化主要受果胶降解、细胞膨压变化、细胞结构变化等影响<sup>[4]</sup>。细胞中原果胶和纤维素在细胞层间与蛋白质形成黏合剂,细胞紧密黏合在一起,使泡菜具有较好的硬度和脆性。泡菜发酵过程中,原果胶在果胶酶与酸性条件下易水解成果胶与果胶酸,使细胞间的链接被破坏,细胞间失去黏性而变得松软,泡菜随之软化。此外,细胞的水分含量、结构、形态、大小、空间排列及细胞间的结合力也影响泡菜的硬度和脆性<sup>[4-6]</sup>。泡菜保脆方法之一是提高果胶酸盐的含量,通过加快果胶的胶凝(例如外源性果胶甲酯酶的加入、温度的调控及保脆剂的使用<sup>[7-8]</sup>)从而提高泡菜的脆性。已有研究表明,果胶可在果胶甲酯酶的作用下转化为果胶酸,果胶酸与钙、镁离子等结合形成不溶性的果胶酸盐,可以有效保持泡菜脆度,而在泡菜盐中添加一定的金属离子,可以在一定程度上提高泡菜的脆度,实现保脆<sup>[9]</sup>。然而,目前对于泡菜盐中钙离子的含量与泡菜的脆度是否呈正相关、泡菜保脆效果的具体影响机制及其发酵的泡菜中细胞壁各类特性的相关研究不足。

为探究泡菜盐中钙离子含量对泡菜脆度的影响机制,本研究采用不同钙离子含量的泡菜盐对白萝卜进行发酵,对泡萝卜的质构特性、细胞膜渗透率、果胶酸钙含量、细胞壁多糖含量、细胞壁降解酶活性、细胞微观结构等指标进行检测,并对泡菜盐中钙离子含量与这些指标之间的相关性进行分析,以期优化泡萝卜的品质提供技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

白萝卜购自中国重庆市北碚区永辉超市。4种泡菜盐购自重庆市盐业有限公司。泡菜盐中钙离子含量分别为459、510、892、1350 mg/kg,并且将实验组分别命名为T459、T510、T892、T1350;对照组采用新鲜白萝卜,命名为C0组。

氯化钠、柠檬酸钠、硼氢化钠、二甲基亚砜、丙酮、乙酸:分析纯,重庆川东化工有限公司;乙酸钠、柠檬酸、果胶、半乳糖醛酸、咪唑、氯仿:分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;硝酸:分析纯,福州韦伯康

生物科技有限公司; 葡萄糖: 分析纯, 常德比克曼生物科技有限公司; 反式-1, 2-环己二胺四乙酸: 分析纯, 天津市众联化学试剂有限公司; 蒽酮: 分析纯, 上海科丰实业有限公司; 甲苯胺蓝 O: 分析纯, 北京伊诺凯科技有限公司; 多聚半乳糖醛酸、水杨苷: 分析纯, 南京草本源生物科技有限公司; 3, 5-二硝基水杨酸: 化学纯, 成都市科龙化工试剂厂; 碳酸钠、氢氧化钠、硫酸: 分析纯, 成都市科龙化工试剂厂; 无水氯化钙、羟甲基纤维素钠: 分析纯, 成都市科隆化学品有限公司。

## 1.2 仪器与设备

CT325K230 物性测定仪, 美国 Brookfield 公司; DDS-309+ 电导率仪, 成都方舟科技有限公司; biotek/H1MG 酶标仪, 美国 BioTek 公司; TU-1950 双光束紫外可见分光光度计, 北京普析通用仪器有限公司; TAS-990AFG 火焰石墨炉一体原子吸收分光光度计, 北京普析通用仪器有限公司; BX43 正置显微镜, 美国奥林巴斯公司; HH-4 恒温水浴锅, 常州澳华仪器有限公司; 5810 台式高速离心机, 德国 Eppendorf 公司。

## 1.3 实验方法

### 1.3.1 泡萝卜样品的制备

将新鲜白萝卜清洗沥干后切分成长、宽 25 mm, 厚 10 mm 的块状, 加入含量为 4% 的泡菜盐预腌 2 h, 再加入含量为 2% 的盐水(菜、水体积比为 1:2)混合装坛后, 接种乳酸菌发酵(植物乳植杆菌接种量为  $1 \times 10^9$  CFU/mL, 肠膜明串珠菌接种量为  $1 \times 10^7$  CFU/mL), 在 25 °C 恒温条件下密封发酵。取发酵成熟的泡萝卜样品用于指标测定。

### 1.3.2 质构特性的测定

参考文献[10]的方法。取长、宽 25 mm, 厚 10 mm 泡萝卜样品置于质构仪下进行质构测定。质构测定参数: 探头 TA44, 测试速率 1 mm/s, 下降距离为 5 mm, 压缩力 7 g。实验重复 3 次。

### 1.3.3 细胞膜渗透率的测定

参考文献[11]的方法。细胞膜渗透率为煮沸后与煮沸前电导率之比所得到的相对电导率。实验重复 3 次。

### 1.3.4 果胶酸钙含量的测定

参考文献[12]的方法。用 1 mol/L 氯化钠溶液提取后定容到 100 mL, 用原子吸收分光光度计测定果胶酸钙含量。原子吸收分光光度计元素测量参数: 工作灯电流 3.0 mA、光谱带宽 0.4 nm、负高压 300.0 V、燃气流量 1 700 mL/min、燃烧器高度 6.0 nm。实验重复 3 次。

### 1.3.5 细胞壁多糖的提取和含量测定

醇不溶性物质(alcohol insoluble residue, AIR)的提取参考文献[13-14]的方法, 略有修改。用咔唑比色法测定水溶性果胶、螯合剂可溶性果胶、碳酸钠可溶性果胶的含量。以葡萄糖为标准品, 用蒽酮硫酸法测定纤维素、半纤维素含量。实验重复 3 次。

### 1.3.6 细胞壁降解酶活性的测定

参考文献[15]的方法。果胶甲酯酶活性、多聚半乳糖醛酸酶活性、 $\beta$ -葡萄糖苷酶活性、纤维素酶活性的测定采用 3, 5-二硝基水杨酸(DNS)法。酶活性被量化为在 37 °C 下每小时每克萝卜样品水解底物产生 1 mg 相应还原糖量。酶活性单位表示为 U。实验重复 3 次。

### 1.3.7 细胞微观结构观察

参考文献[16]的方法。将萝卜样品切成薄片, 在 0.5 g/L 甲苯胺蓝 O 溶液中染色 5 min, 冲洗沥干后在正置显微镜下观察, 并采集图像进行分析。实验重复 3 次。

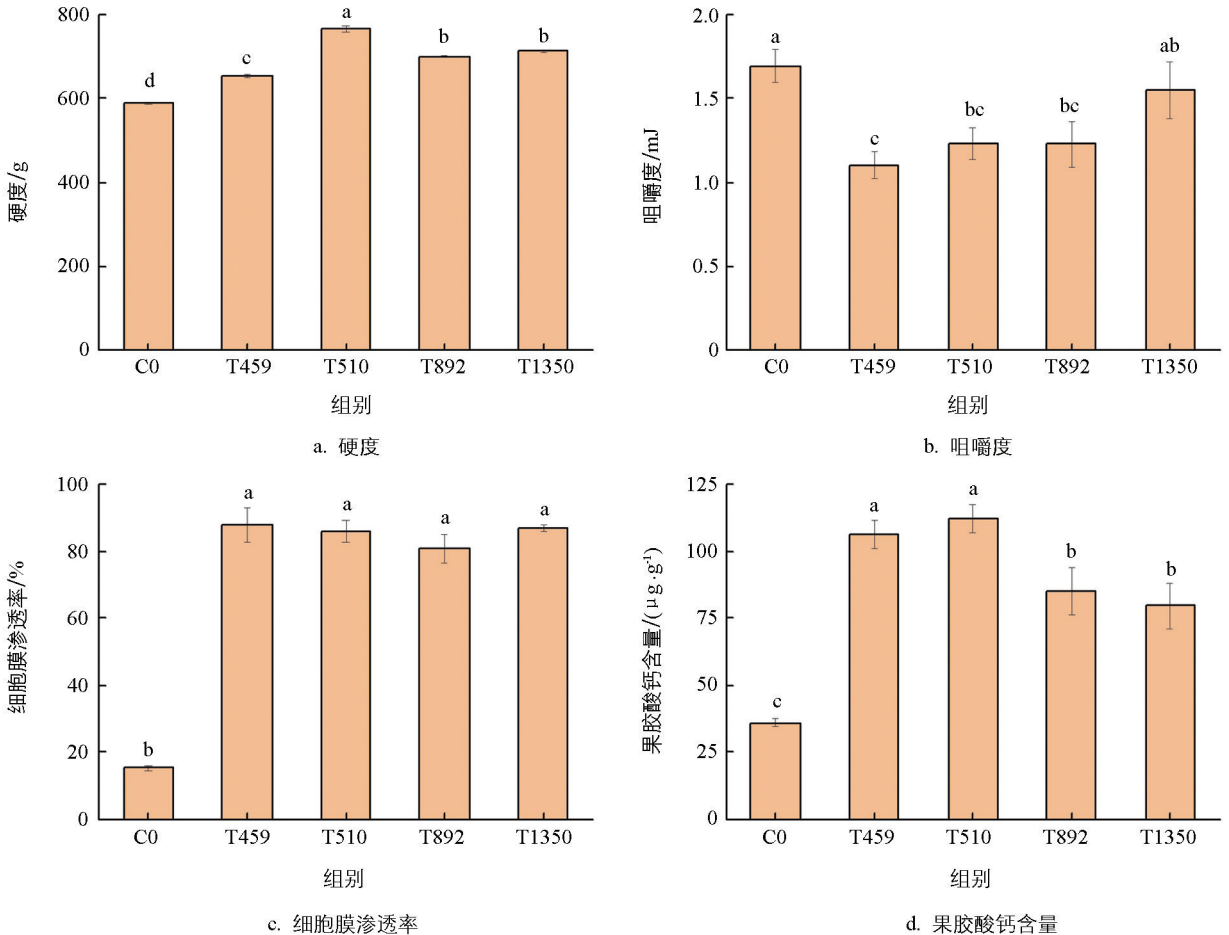
## 1.4 数据分析处理

使用 Microsoft Office Excel 统计并处理数据。使用 SPSS 21.0 的 ANOVA 法对数据进行单因素方差分析。使用 Origin 2021 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同钙离子含量盐发酵对泡萝卜质构特性的影响

质构是评价泡萝卜品质的重要指标之一<sup>[17]</sup>,本研究选取硬度和咀嚼性 2 个指标分析样品质构特性的变化。如图 1a 所示,4 个实验组泡萝卜的硬度显著高于对照组( $p < 0.05$ ),其中 T510 组泡萝卜的硬度显著高于其他实验组( $p < 0.05$ )。随着泡菜盐中钙离子含量的增加,泡萝卜硬度的增加量呈先上升后下降的趋势,最后趋于平稳。这是由于钙离子含量较低时,钙离子能与果胶酸形成果胶酸钙,细胞壁间的黏附性增强,硬度提高;钙离子含量较高时,萝卜细胞组织过度硬化,导致细胞失水,使其硬度下降;除此之外,钙离子还会增加发酵液的渗透压,使细胞失水<sup>[18]</sup>。继续增加钙离子含量不再对萝卜细胞组织硬化和萝卜细胞内外渗透压造成影响,导致硬度不变。有研究发现,不同质量分数氯化钙浸泡对青椒硬度的差异有统计学意义( $p < 0.05$ ),随着氯化钙使用量的增加,硬度先逐渐上升后下降<sup>[19]</sup>,这与本研究结果类似。如图 1b 所示,发酵后各个实验组泡萝卜的咀嚼度均降低,其中 T459 组泡萝卜咀嚼度最低,为 $(1.1 \pm 0.14)$  mJ,但与 T510 组和 T892 组的差异无统计学意义( $p > 0.05$ )。



不同小写字母 a、b、c、d 表示差异有统计学意义( $p < 0.05$ )。下同。

图 1 不同钙离子含量盐发酵泡萝卜的硬度、咀嚼度、细胞膜渗透率、果胶酸钙含量

### 2.2 不同钙离子含量盐发酵对泡萝卜细胞膜渗透率的影响

如图 1c 所示,4 个实验组的细胞膜渗透率显著高于对照组( $p < 0.05$ ),这一现象可能归因于盐渍处理对萝卜细胞造成的逆境压力,导致细胞膜结构受损,使得细胞内的电解质物质外泄,从而增加了萝卜细胞浸提液的电导率,导致细胞膜渗透率的增加<sup>[20-22]</sup>。有研究发现,用氯化钙处理西梅果实能够延缓细胞膜渗透率的上升,且不同浓度氯化钙的延缓程度不同<sup>[23]</sup>,但本研究结果与此不同,可能是因为盐渍处

理对细胞膜渗透率的影响远大于钙对其的影响, 所以不同钙离子含量盐发酵萝卜细胞膜渗透率之间的差异无统计学意义( $p > 0.05$ )。

### 2.3 不同钙离子含量盐发酵对泡萝卜果胶酸钙含量的影响

钙离子与果胶酸生成不溶于水的果胶酸钙凝胶, 在细胞间隙起到粘连细胞的作用, 防止细胞解体, 从而达到保脆的目的<sup>[24-26]</sup>。如图 1d 所示, 4 个样品实验组果胶酸钙含量显著高于对照组( $p < 0.05$ ), 其中 T510 组果胶酸钙含量最高, 显著高于 T892 组和 T1350 组( $p < 0.05$ ), 但与 T459 组的差异无统计学意义( $p > 0.05$ )。随着钙离子含量增加, 果胶酸钙含量呈先上升后下降, 最后趋于稳定的趋势, 这是因为钙离子含量较高时, 萝卜组织过度硬化, 并且钙离子含量过高增加发酵液的渗透压, 导致细胞失水<sup>[18]</sup>, 从而引起样品表皮皱缩、软化等质地改变<sup>[27]</sup>, 同时也带动了果胶酸钙含量的变化, 使得果胶酸钙含量有所下降。有研究发现, 大头菜中果胶酸钙含量随着氯化钙浓度的上升, 整体呈现先上升后下降的趋势<sup>[28]</sup>, 这与本研究结果类似。

### 2.4 不同钙离子含量盐发酵对泡萝卜细胞壁多糖含量的影响

果蔬细胞壁中的果胶与纤维素是影响果蔬硬度的重要物质, 果胶与纤维素交叉联接, 对细胞起支撑作用, 有利于保持细胞壁结构<sup>[29]</sup>。根据果胶的溶解特性可将其分为水溶性果胶、螯合剂可溶性果胶和碳酸钠可溶性果胶<sup>[30]</sup>。如图 2a 所示, T510 组果胶含量显著高于其他组( $p < 0.05$ )。不同钙离子含量盐发酵泡萝卜中果胶相对含量如图 2b 所示, 发现经不同钙离子浓度盐发酵的萝卜与对照组相比, 螯合剂可溶性果胶相对含量显著下降( $p < 0.05$ ), 碳酸钠可溶性果胶相对含量显著上升( $p < 0.05$ ), 这可能是因为泡萝卜在发酵过程中螯合剂可溶性果胶转化成了碳酸钠可溶性果胶。如表 1 所示, T510 组的水溶性果胶含量显著低于其他组( $p < 0.05$ ), C0 组的水溶性果胶含量显著高于其他组( $p < 0.05$ )。有研究发现, 猕猴桃的水溶性果胶含量随着储藏时间延长呈现明显升高趋势, 而螯合剂可溶性果胶含量及碳酸钠可溶性果胶含量迅速下降, 并伴随着猕猴桃质地软化<sup>[31]</sup>;  $\text{CaCl}_2$  处理可以抑制青椒储藏期间果胶的降解, 减缓水溶性果胶含量的增加<sup>[32]</sup>。表 1 还说明, 每组螯合剂可溶性果胶含量均显著高于同组的水溶性果胶含量, 且显著低于碳酸钠可溶性果胶含量( $p < 0.05$ ), 其中 T510 组的碳酸钠可溶性果胶含量显著高于其他组( $p < 0.05$ )。这是因为钙离子可以抑制果胶酶类活性位点的暴露, 降低果胶酶的活性, 阻止螯合剂可溶性果胶及碳酸钠可溶性果胶向水溶性果胶进行转化。

如图 2c 和图 2d 所示, 4 个样品实验组的纤维素含量和半纤维素含量均显著高于对照组( $p < 0.05$ ), 其中 T510 组的含量显著高于其他组( $p < 0.05$ ), 在半纤维素与纤维素含量检测中, 其余 3 个样品实验组的差异无统计学意义( $p > 0.05$ ), 进一步证实 T510 组在保脆效果上的优势。

表 1 不同钙离子含量盐发酵泡萝卜的 3 种果胶含量

$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$

果胶种类含量	组别				
	C0	T459	T510	T892	T1350
水溶性果胶含量	15.37±0.77a	13.40±0.83bc	10.72±0.52d	11.68±1.44cd	14.46±0.54ab
螯合剂可溶性果胶含量	29.05±1.58a	23.05±0.37bc	25.85±2.61ab	19.62±1.70c	19.07±2.01c
碳酸钠可溶性果胶含量	42.23±4.05c	53.00±5.64b	80.59±3.32a	54.89±2.88b	50.67±3.07bc

### 2.5 不同钙离子含量盐发酵对泡萝卜细胞壁降解酶活性的影响

果实质地软化和细胞壁降解酶的活性息息相关, 当细胞壁中的果胶受到果胶酶和酸的作用时, 就会逐渐水解为可溶性果胶酸, 使细胞壁中胶层溶解, 细胞间黏合力下降, 从而引起蔬菜质地软化<sup>[33-34]</sup>。果胶甲酯酶、多聚半乳糖醛酸酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、纤维素酶为细胞壁降解的主要相关酶。如图 3a 所示, T510 组果胶甲酯酶活性显著低于其他组( $p < 0.05$ ), 这表明钙离子含量达到一定程度时, 在果胶甲酯酶的作用下, 果蔬组织中低甲氧基果胶和钙离子结合形成钙桥, 使果蔬的纤维-果胶网络结构更加牢固, 从而增强其硬度<sup>[35]</sup>。同时, 其他 3 个样品实验组间的果胶甲酯酶活性的差异无统计学意义( $p > 0.05$ ), 这再次证实 T510 组在保脆效果上的优势。

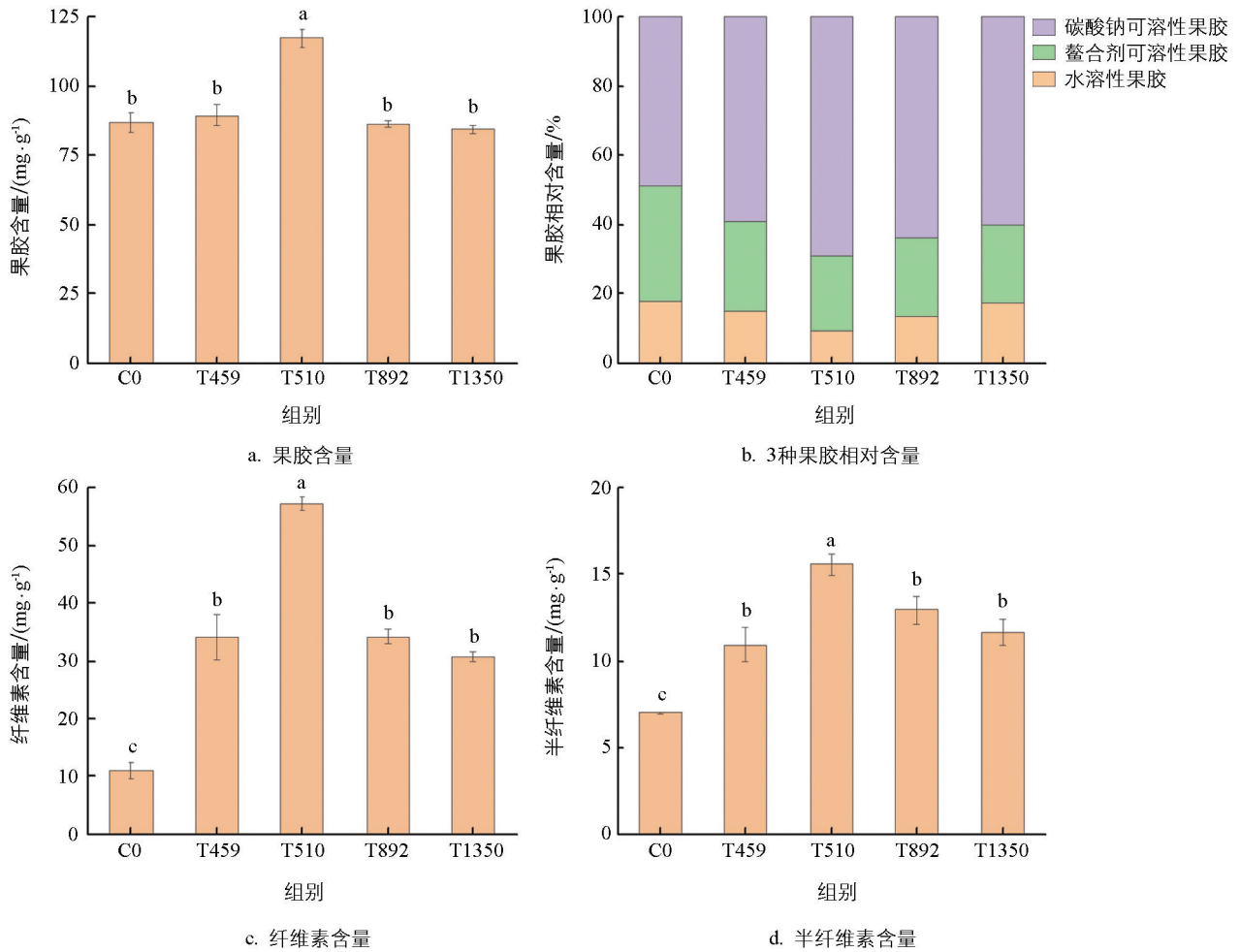


图 2 不同钙离子含量盐发酵泡萝卜果胶含量、3 种果胶相对含量、纤维素含量、半纤维素含量

多聚半乳糖醛酸是细胞壁多糖的重要成分,多聚半乳糖醛酸酶可水解多聚半乳糖醛酸的 1, 4- $\alpha$ -D-半乳糖苷键,破坏细胞壁结构,分解果胶从而导致果实软化<sup>[36]</sup>。如图 3b 所示, T1350 组泡萝卜的多聚半乳糖醛酸酶活性最低,但与 T510 组和 T892 组差异无统计学意义( $p > 0.05$ ),这种现象可能与不同浓度外源钙处理影响酶活性峰值出现时间有关<sup>[37]</sup>。 $\beta$ -葡萄糖苷酶属于聚糖水解酶类,能与纤维素酶协调作用,主要水解非还原性末端的  $\beta$ -D-糖苷键生成  $\beta$ -D-葡萄糖<sup>[38]</sup>。如图 3c 所示, T510 组与 T892 组泡萝卜中的  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性差异无统计学意义( $p > 0.05$ ),但显著低于 C0 组、T459 组和 T1350 组( $p < 0.05$ )。在果实成熟软化过程中,纤维素酶活性升高,表明纤维素酶降解果实细胞壁中的纤维素,导致细胞壁组织的解聚、溶解及果实的软化<sup>[39]</sup>。如图 3d 所示, T510 组泡萝卜的纤维素酶活性显著低于其他组( $p < 0.05$ )。如图 3 所示, 4 种细胞壁降解酶中  $\beta$ -葡萄糖苷酶的活性最高,表明泡萝卜的质地软化可能主要受到  $\beta$ -葡萄糖苷酶的影响。T510 组泡萝卜中 4 种细胞壁降解酶活性均较低,反映出其在泡萝卜保脆方面具有积极作用。同时,对照组与 4 个样品实验组之间的差异有统计学意义( $p < 0.05$ ),表明不同钙离子含量盐发酵对降低泡萝卜细胞壁降解酶活性具有显著影响。

## 2.6 不同钙离子含量盐发酵对泡萝卜细胞微观结构的影响

在加工储藏和运输过程中,果蔬的细胞结构易发生改变,导致细胞膜、细胞壁以及由果胶质构成的中胶层被破坏而收缩、坍塌<sup>[40]</sup>。图 4 为样品实验组和对照组萝卜细胞的微观结构(为了显示不是偶然现象,每组进行平行实验,放两个图)。可以看出, C0 组萝卜组织细胞排列无规则,细胞结构紊乱无秩序;不同钙离子含量盐发酵处理的泡萝卜样品组织细胞排列较为紧密、整齐,说明钙离子与果胶酸形成的果胶酸钙在细胞壁之间起到了一定的粘连细胞的作用,对泡萝卜的细胞壁组织起到一定的支撑作用,再次证明钙离子利于维持果蔬细胞壁结构的完整性和泡萝卜的脆度。

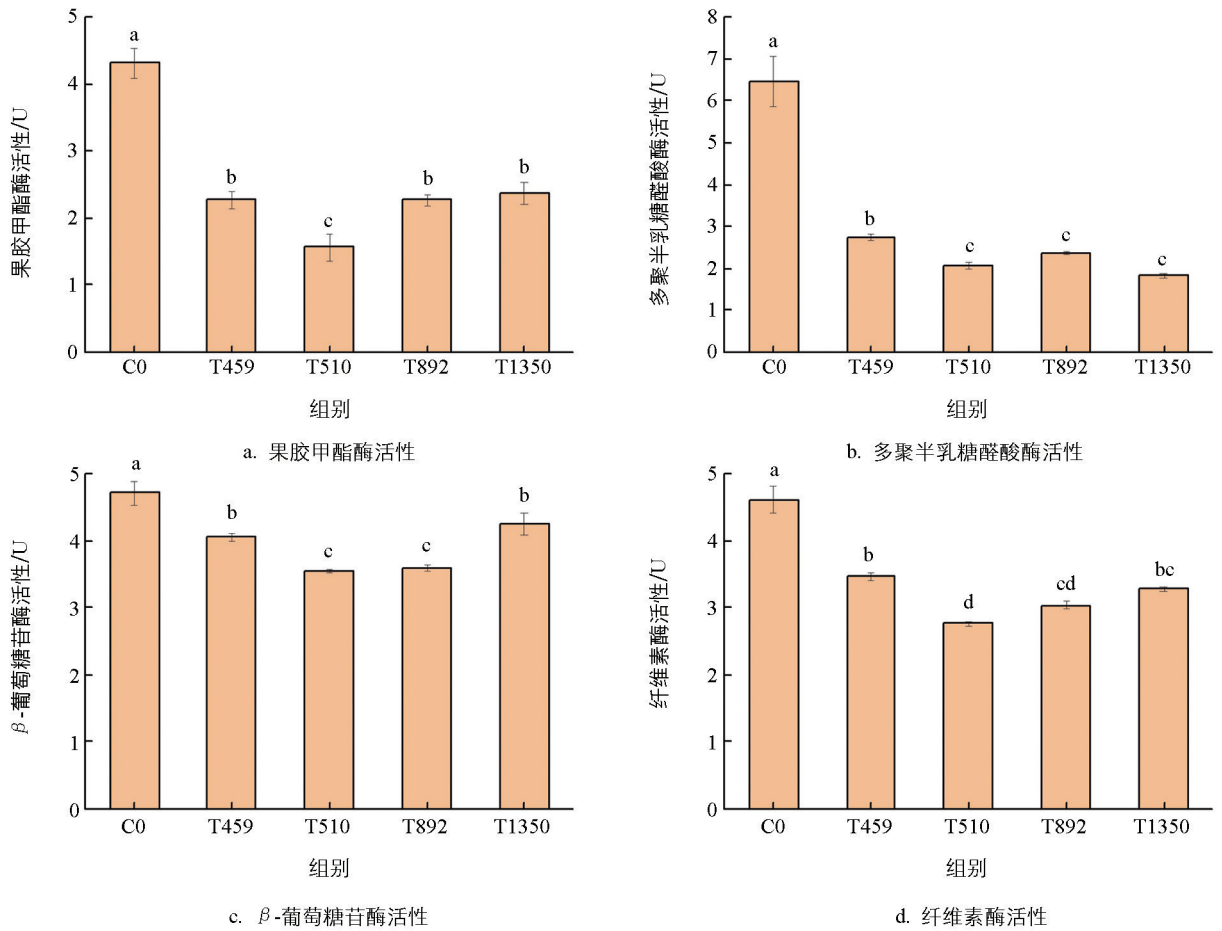


图 3 不同钙离子含量盐发酵泡萝卜的 4 种细胞壁降解酶活性

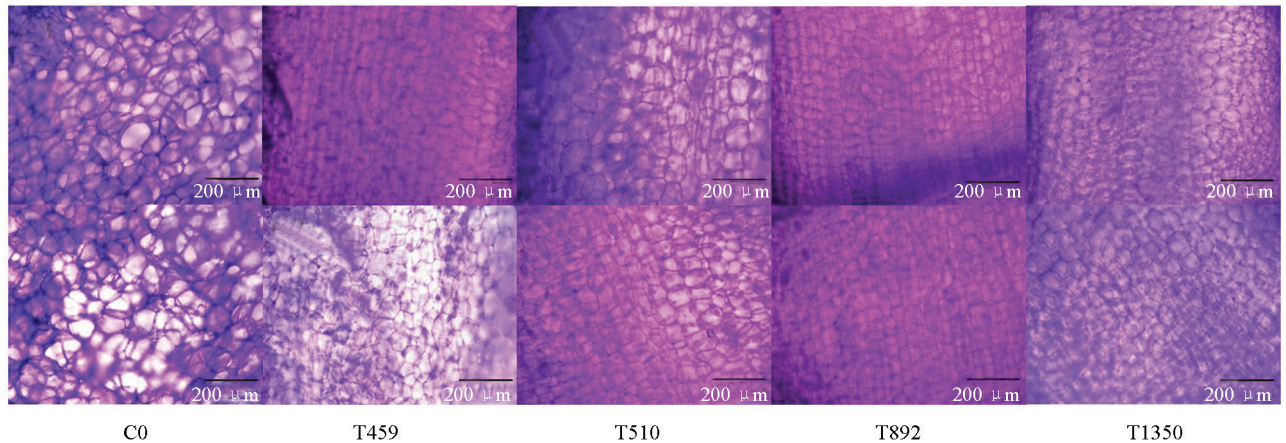
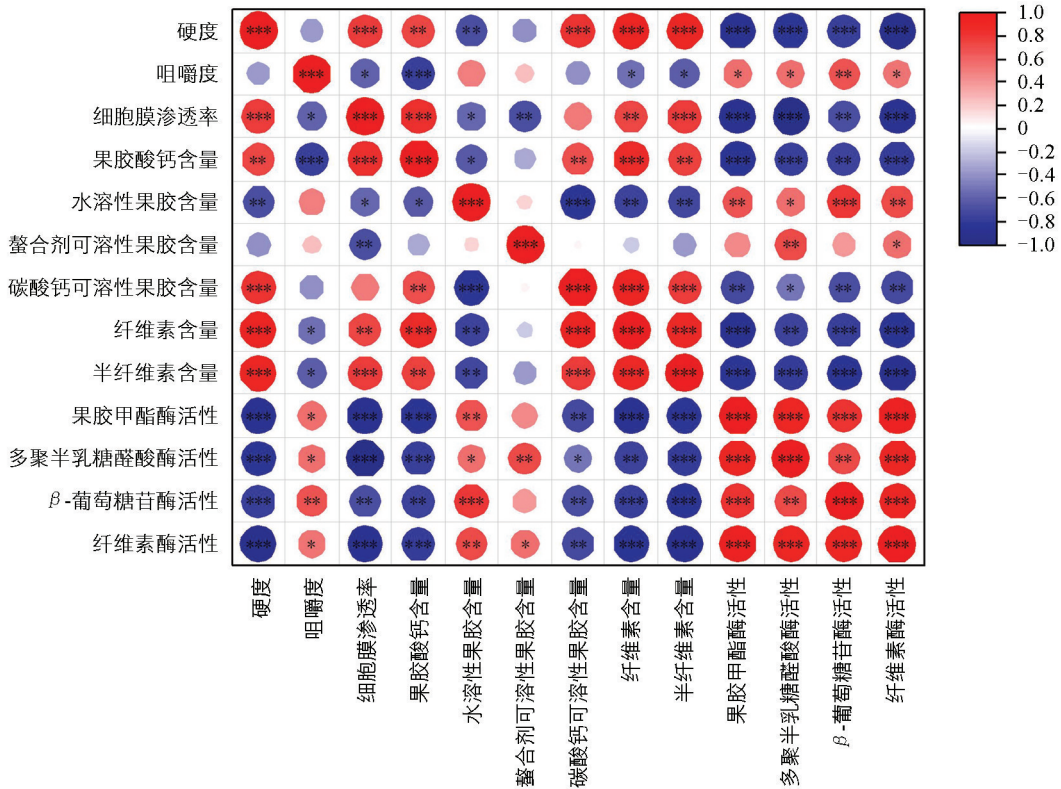


图 4 不同钙离子含量盐发酵泡萝卜细胞的微观结构

## 2.7 不同钙离子含量盐发酵泡萝卜各项指标之间的相关性

泡萝卜的各项指标与硬度之间存在着紧密的联系, 对本研究中测定的 13 个指标进行相关性分析。如图 5 所示, 硬度与细胞膜渗透率、果胶酸钙含量、碳酸钠可溶性果胶含量、纤维素含量、半纤维素含量呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 与水溶性果胶含量、4 种细胞壁降解酶活性呈显著负相关 ( $p < 0.05$ ); 细胞壁降解酶活性与水溶性果胶含量呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 与细胞膜渗透率、果胶酸钙含量、纤维素含量、半纤维素含量、碳酸钠可溶性果胶含量呈显著负相关 ( $p < 0.05$ ), 说明细胞壁降解酶活性升高会使细胞膜渗透率、果胶酸钙含量、纤维素含量、半纤维素含量减少, 导致果实软化。

本研究中不同钙离子含量盐发酵萝卜后使得其中的细胞壁降解酶活性降低,从而引起其他指标变化,最终导致泡萝卜硬度增加。



\*、\*\*、\*\*\* 分别表示在  $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$ 、 $p < 0.001$  有统计学意义。图中红色代表正相关,蓝色代表负相关;颜色越深相关性系数越大,反之则越小;圆的大小代表相关性的大小,圆越大,相关性越大,反之则越小。

图 5 不同钙离子含量盐发酵泡萝卜的相关性分析图

### 3 结论

本研究通过测定不同钙离子含量盐发酵萝卜的质构特性、细胞壁降解酶活性、细胞微观结构等指标并进行相关性分析,研究不同钙离子含量盐对泡萝卜脆度的影响。研究发现,泡菜盐中不同钙离子含量对泡萝卜的质构特性、果胶酸钙含量、纤维素含量、半纤维素含量、细胞壁降解酶活性、细胞微观结构均有显著影响( $p < 0.05$ ),但对泡萝卜的细胞膜渗透率无显著影响( $p > 0.05$ )。钙离子含量的适当增加可以提高泡萝卜中果胶酸钙的含量,达到增加泡萝卜硬度的效果,但其对果胶酸钙的影响存在一个最优含量,超过该含量后硬度会下降。细胞壁多糖方面,T510 组的水溶性果胶含量最低,碳酸钠可溶性果胶含量最高,而 4 个样品实验组碳酸钠可溶性果胶含量均显著高于同组的水溶性果胶含量、螯合剂可溶性果胶含量( $p < 0.05$ ),并且纤维素含量、半纤维素含量均显著高于新鲜萝卜( $p < 0.05$ ),这说明不同钙离子含量盐发酵泡萝卜具有良好的保脆效果。不同钙离子含量盐发酵对泡萝卜的酶活性具有调节作用,能够降低泡萝卜中细胞壁降解酶的活性,减少果胶降解,抑制软化,保持泡萝卜的脆度。其中 T510 组果胶甲酯酶活性、纤维素酶活性、 $\beta$ -葡萄糖苷酶活性显著低于其他组( $p < 0.05$ )。不同钙离子含量盐发酵可促进泡萝卜的细胞排列秩序性,从而保持泡萝卜的脆度。相关性分析表明,细胞壁降解酶活性与水溶性果胶含量呈显著正相关( $p < 0.05$ ),与细胞膜渗透率、果胶酸钙含量、纤维素含量、半纤维素含量、碳酸钠可溶性果胶含量呈显著负相关( $p < 0.05$ )。综上所述,本研究发现泡菜盐中钙离子含量为 510 mg/kg 时发酵泡萝卜在保脆效果上表现最佳。

## 参考文献:

- [1] 王雅利, 赵楠, 葛黎红, 等. 酵母菌对发酵萝卜品质的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(24): 68-75.
- [2] 何松, 练银银, 杨菊香, 等. 榨菜“三腌三榨”过程中品质形成研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(4): 219-225.
- [3] 黄润秋, 唐焱, 唐晓慧, 等. 工业软化泡菜理化指标及主要致软微生物特性分析 [J]. 食品与发酵科技, 2024, 60(2): 1-6, 19.
- [4] YANG Z X, DUAN X K, YANG J Y, et al. Effects of High Hydrostatic Pressure and Thermal Treatment on Texture Properties of Pickled Kohlrabi [J]. LWT, 2022, 157: 113078.
- [5] GE L H, LAI H M, HUANG Y L, et al. Comparative Evaluation of Package Types in Alleviating Textural Softening and Package-Swelling of Paocai during Storage: Insight into Microbial Invasion, Cell Wall Pectinolysis and Alteration in Sugar and Organic Acid Profiles [J]. Food Chemistry, 2021, 365: 130489.
- [6] GE L H, HUANG Y L, LI X, et al. Temperature-Driven Divergence in Molecular Distribution and Microbial Invasion and the Associated Texture Softening during Dual-Phase Fermentation of Paocai [J]. Food Chemistry, 2024, 457: 140171.
- [7] 康孟利, 谢功琦, 林旭东. 白菜咸齏护色保脆加工技术探讨 [J]. 农产品加工, 2020(24): 73-75.
- [8] IQRA, 李静, 刘玉凌, 等. 胖袋榨菜中1株产气微生物的分离和鉴定 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(9): 97-104.
- [9] 王蕾, 田方, 孙志栋, 等. 芥菜传统腌制发酵工艺优化研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(1): 324-329.
- [10] 钱杨, 吴李川, 许童桐, 等. 不同空气暴露条件下四川泡菜的品质变化及产植物细胞壁降解酶微生物分析 [J]. 食品工业科技, 2020, 41(13): 128-133, 147.
- [11] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- [12] 彭昱竹, 王晓芸, 丁筑红, 等. 烫漂结合氯化钙对糟辣椒钙盐保脆辅助增效作用研究 [J]. 食品与发酵科技, 2022, 58(4): 39-45, 72.
- [13] FENG X, DENG H C, HUANG L, et al. Degradation of Cell Wall Polysaccharides during Traditional and Tank Fermentation of Chinese Liupao Tea [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(8): 4195-4206.
- [14] YOU W L, ZHANG J L, RU X Y, et al. Exogenous  $\text{CaCl}_2$  Delays Flesh Softening by Inhibiting the Degradation of Cell Wall in Fresh-Cut Cantaloupe [J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 213: 112934.
- [15] LIU L, LIU Q, DENG S F, et al. Influence of Myoinositol on Post-Ripening and Softening of *Prunus Salicina* ‘Wushan Plum’ [J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 210: 112772.
- [16] FAN Z Y, DENG W Q, LI X B, et al. Effect of Air Exposed Storage on Quality Deterioration and Microbial Succession of Traditional Sichuan Paocai [J]. LWT, 2022, 154: 112510.
- [17] 经骐源, 李婷, 曾凡坤, 等. 发酵剂对泡萝卜品质的影响 [J]. 食品科学, 2021, 42(22): 171-177.
- [18] 汪姣玲, 李加兴, 岳元媛, 等. 植物乳杆菌和肠膜明串珠菌混合发酵泡萝卜的工艺优化 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 172-182.
- [19] 杜长婷, 黄峰, 陈旭华, 等. 冷冻青椒护绿保硬工艺优化 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 235-243.
- [20] YANG Z X, FAN H K, LI R X, et al. Potential Role of Cell Wall Pectin Polysaccharides, Water State, and Cellular Structure on Twice “Increase-Decrease” Texture Changes during Kohlrabi Pickling Process [J]. Food Research International, 2023, 173: 113308.
- [21] ITOH M, GOTO C, IWASAKI Y, et al. Production of High Soluble Solids Fruits without Reducing Dry Matter Production in Tomato Plants Grown in Salinized Nutrient Solution Controlled by Electrical Conductivity [J]. The Horticulture Journal, 2020, 89(4): 403-409.
- [22] KIM S Y, GU H L, JU H, et al. Effects of Pulsed Electric Fields on Controlling Fermentation Rate of Brined *Raphanus sativus* [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 92: 103553.
- [23] 田全明, 殷贝贝, 祁华梅, 等. 采前喷施  $\text{CaCl}_2$  对西梅采后果实软化品质的影响 [J]. 新疆农业科学, 2024, 61(7):

1717-1726.

- [24] 李娇, 吕芳娥, 杨梦娇, 等. 哈密瓜幼瓜佐餐小菜护绿和保脆工艺研究 [J]. 轻工学报, 2024, 39(4): 17-25.
- [25] 张晓敏, 年蕊, 王娅, 等. 浸渍冷冻对皇冠梨质地的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(9): 333-340.
- [26] 邵晓庆, 卢一铭, 徐卫红. 钙诱导下白菜的转录特征及钙富集关键基因表达研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(1): 47-58.
- [27] 孟儒缘, 吴毅, 刘微, 等. 储藏温度对生姜保鲜效果的影响 [J]. 江西中医药大学学报, 2024, 36(4): 58-64.
- [28] 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.
- [29] 芦玉佳, 张昱, 宋美玉, 等. 外源果糖处理对采后杏果实软化的影响 [J]. 食品科学, 2023, 44(11): 152-159.
- [30] NIU X X, DENG L Z, WANG H O, et al. Transformation of Cell Wall Pectin Profile during Postharvest Ripening Process Alters Drying Behavior and Regulates the Sugar Content of Dried Plums [J]. Food Chemistry, 2024, 458: 140093.
- [31] WANG H, WANG J, MUJUMDAR A S, et al. Effects of Postharvest Ripening on Physicochemical Properties, Microstructure, Cell Wall Polysaccharides Contents (Pectin, Hemicellulose, Cellulose) and Nanostructure of Kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118: 106808.
- [32] XU H S, WANG Y R, DING S H, et al. Effect of Hydrothermal-Calcium Chloride Treatment on Pectin Characteristics and Related Quality in Green Peppers during Storage [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(10): 3712-3724.
- [33] CHENG A, ZHAO P F, WANG X, et al. Relationships between Melatonin and Salicylic Acid Treatments in Delaying the Senescence of Postharvest Pear Fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 219: 113288.
- [34] FULLERTON C G, PRAKASH R, NINAN A S, et al. Fruit from Two Kiwifruit Genotypes with Contrasting Softening Rates Show Differences in the Xyloglucan and Pectin Domains of the Cell Wall [J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 964.
- [35] 余以刚, 伍惠仪, 胡郁汉, 等. 配餐食品中绿叶蔬菜的护绿保脆工艺优化 [J]. 现代食品科技, 2020, 36(10): 190-199, 267.
- [36] 李东, 郝旺, 雷雨, 等. 氯化钙/聚乙烯醇涂膜处理对脆红李生理生化的影响 [J]. 中国食品学报, 2024, 24(2): 218-227.
- [37] 万冰, 庞阿倩, 王江洁, 等. 外源钙处理对番茄果实生理特性的影响 [J]. 中国食品, 2023(20): 134-136.
- [38] CHEN W T, CUI K B, JIN L L, et al. Impacts of Fruit Frosting Coverage on Postharvest Softening of Prunes under Vibration Stress [J]. Foods, 2024, 13(19): 3197.
- [39] 钱丽丽, 杨斯琪, 李跃, 等. 果实采后软化机制研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(4): 371-378.
- [40] WANG Z J, ZUO C Z, WANG M Y, et al. Optical Properties Related to Cell Wall Pectin Contribute to Determine the Firmness and Microstructural Changes during Apple Softening [J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 218: 113150.

责任编辑 廖坤  
崔玉洁