李娅, 帅希祥, 张明, 等. 不同酯化度的芒果皮果胶对芒果浊汁稳定性的影响及动力学研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 103−115. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060189

LI Ya, SHUAI Xixiang, ZHANG Ming, et al. Influence and Kinetic Study of Mango Peel Pectin with Different Esterification Degrees on the Stability of Mango Juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 103−115. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060189

·研究与探讨·

不同酯化度的芒果皮果胶对芒果浊汁稳定性的影响及动力学研究

李　娅[1,2], 帅希祥[1,2,*], 张　明[1,2], 杜丽清[1,2,*], 李铃东[1,2], 张宇晗[1,2], 钟新传[1,3], 潘欣瑞[1,3]

（1.中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 海南省热带园艺产品采后生理与保鲜重点实验室, 广东湛江 524091;
2.农业农村部热带果树生物学重点实验室, 广东湛江 524091;
3.云南农业大学热带作物学院, 云南昆明 650500）

摘　要: 以台农 1 号芒果为原料，通过超声辅助酸解法提取芒果皮果胶，经碱法脱酯制备得到四种酯化度的果胶（$DEMP_1$~$DEMP_4$，酯化度分别为 66.26%、55.32%、47.19%、33.67%）。将果胶添加到芒果浊汁中，评价果胶对浊汁稳定性的影响，并根据 Stokes 理论预测重力沉降时间，通过 25~45 ℃ 加速贮藏实验预测芒果浊汁的货架期。结果表明，添加低酯芒果皮果胶（$DEMP_3$/$DEMP_4$）能有效地提高芒果浊汁的稳定性。其中添加 $DEMP_4$ 的芒果浊汁离心沉淀率达 44.46%，悬浮稳定性提升 26.76%，不稳定性指数降低 25.47%，重力沉降时间从对照组的 0.79 个月延长至 6.30 个月；采用 Boltzmann 与 Logistic 模型拟合沉降动力学，发现 $DEMP_4$ 能够显著延长沉降反弯点时间；$DEMP_4$ 的 Zeta 电位达−36.09 mV，持水性达 14.72 g/g，在加速贮藏中粒径增幅最低，这些理化特性与浊汁稳定性提升呈显著正相关。建立了离心沉淀率的吉布斯自由能与温度之间、感官值与离心沉淀率之间的回归方程，获得了浊汁稳定动力学及热力学模型，根据模型推测了芒果浊汁在不同温度下的稳定性时间。25 ℃ 下，与未添加果胶的芒果浊汁相比，添加了 $DEMP_1$、$DEMP_2$、$DEMP_3$、$DEMP_4$ 的芒果浊汁的稳定时间从 21 d 分别延长至 30、60、185、195 d。除芒果汁外，预测模型残差变异系数均小于 15%，表明该模型具有高预测精度。

关键词: 芒果皮果胶, 酯化度, 芒果浊汁, 稳定性, 动力学

中图分类号: TS255.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0103−13

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060189　　本文网刊:

Influence and Kinetic Study of Mango Peel Pectin with Different Esterification Degrees on the Stability of Mango Juice

LI Ya[1,2], SHUAI Xixiang[1,2,*], ZHANG Ming[1,2], DU Liqing[1,2,*], LI Lingdong[1,2], ZHANG Yuhan[1,2], ZHONG Xinchuan[1,3], PAN Xinrui[1,3]

（1.South Subtropical Crop Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Key Laboratory of Postharvest Physiology and Technology of Tropical Horticultural Products of Hainan Province, Zhanjiang 524091, China;
2.Key Laboratory of Tropical Fruit Biology, Ministry of Agriculture & Rural Affairs, Zhanjiang 524091, China;
3.College of Tropical Crops, Yunnan Agricultural University, Kunming 650500, China）

Abstract: Pectin was extracted from the peels of Tainong No.1 mango via ultrasound-assisted acid hydrolysis, and four

收稿日期: 2025−06−18

基金项目: 海南省自然科学基金青年基金项目（323QN293）; 海南省重点研发项目（ZDYF2023XDNY059, ZDYF2025XDNY101）; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项（1630062025015, 1630062025021）。

作者简介: 李娅（1995−）, 女, 硕士, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: 895130350@qq.com。

*** 通信作者:** 帅希祥（1989−）, 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: shuaixixiang1989@163.com。
杜丽清（1975−）, 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: duliqing927618@163.com。

types of pectins with different degrees of esterification (DE) were prepared by alkaline deesterification, namely $DEMP_1$, $DEMP_2$, $DEMP_3$, and $DEMP_4$, with DE values of 66.26%, 55.32%, 47.19%, and 33.67%, respectively. These pectins were added to mango cloudy juice to evaluate their effects on the stability of the juice. Based on Stokes' theory, the gravitational sedimentation time was predicted, and the shelf life of mango cloudy juice was estimated through accelerated storage experiments conducted at 25~45 ℃. The results showed that the addition of low-ester mango peel pectins ($DEMP_3$/$DEMP_4$) effectively improved the stability of mango cloudy juice. Specifically, the juice added with $DEMP_4$ exhibited a centrifugal precipitation rate of 44.46%, with the suspension stability increased by 26.76% and the instability index reduced by 25.47%. Moreover, the gravitational sedimentation time was extended from 0.79 months (control group) to 6.30 months. The sedimentation kinetics were fitted using the Boltzmann and Logistic models, and it was found that $DEMP_4$ significantly prolonged the time of the sedimentation inflection point. The Zeta potential and water-holding capacity of $DEMP_4$ reached −36.09 mV and 14.72 g/g, respectively, and the particle size increase was the lowest during accelerated storage. These physicochemical properties were significantly positively correlated with the improved stability of the cloudy juice. Regression equations were established between the Gibbs free energy of centrifugal precipitation rate and temperature, as well as between sensory scores and centrifugal precipitation rate, yielding kinetic and thermodynamic models for juice stability. Based on the models, the stability time of the mango cloudy juice at different temperatures was predicted. At 25 ℃, compared with the control group (without pectin addition) which had a stability duration of 21 days, the stability durations of the juices added with $DEMP_1$, $DEMP_2$, $DEMP_3$, and $DEMP_4$ were extended to 30, 60, 185 and 195 days, respectively. Except for mango juice, the residual coefficients of variation for the prediction models were all below 15%, confirming their high predictive accuracy.

Key words: mango peel pectin; degree of esterification; mango cloudy juice; stability; kinetics

芒果采收期短、储运困难、采后损耗大，因此除供鲜食外，还被加工成各种产品。芒果果汁饮料是目前国内外最大的芒果加工类产品之一[1−2]。由于芒果的肉质和营养特性，适宜加工成浑浊型中高浓度芒果浊汁饮料。但芒果浊汁因颗粒易沉降、粒径增长快等问题严重影响了饮料的外观、口感和组织状态，缩短了饮料的货架期[3]。解决浊汁稳定性问题的核心策略是添加稳定剂。尽管传统稳定剂（如羧甲基纤维素钠、黄原胶等）被广泛应用，但它们往往存在成本较高或可能带来不良口感等缺陷。因此，开发高效、安全、天然且来源可持续的新型稳定剂具有重要的产业需求。

果胶作为一种由 D-半乳糖醛酸和中性糖组成的天然酸性杂多糖，因其优异的增稠性、凝胶性和安全性，被公认为一种理想的食品稳定剂[4−6]。值得注意的是，芒果加工过程中产生大量果皮（约占果实重量的 15%~25%），这些果皮富含果胶资源，但目前常被作为废弃物处理，造成环境污染和资源浪费[7−8]。从芒果皮中提取果胶用于稳定芒果汁，具有显著的“变废为宝”和“同源匹配”双重优势。来源于芒果本身的果胶，其分子结构（如中性糖侧链组成）可能更契合芒果汁体系中的颗粒成分[3]，理论上能提供更好的稳定性和更天然的风味兼容性，满足消费者对“清洁标签”和纯天然健康食品的需求。大量研究表明果胶在维持果汁浊度稳定性方面效果显著。例如，黄珣洋[9]发现不同来源的果胶对枸杞浊汁的稳定效果存在差异；付劭杰等[10]指出果胶是影响 NFC 苹果汁混浊稳定性的关键因素，其组分、结构及变化直接影响颗粒稳定性；Lin 等[11]则证明通过水动力空化改变胡柚浊汁中果胶的结构（分子量、线性度、酯化度）可有效提升其贮藏稳定性。

在果胶的诸多结构参数中，酯化度（DE）是调控其功能性质（特别是胶体稳定性）的核心因素[12−13]。高酯果胶（DE>50%）主要在高糖酸条件下通过氢键和疏水作用形成凝胶网络来包裹固定颗粒，但在中低糖含量的浊汁体系中稳定颗粒的能力通常较弱；而低酯果胶（DE<50%）依赖游离羧基与金属离子交联作用，在低糖、低酸环境中表现出更强的悬浮能力[14]。然而现有研究对果胶“DE-体系稳定性”构效关系的阐释不够系统和深入。一方面，果胶在复杂果汁体系中稳定颗粒的具体作用机制尚未完全明确；另一方面，沉降动力学模型（如温度依赖性）的构建尚未结合热力学参数，导致货架期预测精度有限。更关键的是，在芒果皮果胶的提取与脱酯改性过程中，果胶关键结构参数（DE 值）的变化是如何影响果胶 Zeta 电位、持水性等理化特性，进而实现对浊汁稳定性的调控，仍需深入探讨。

因此，本研究聚焦芒果皮果胶 DE 值的调控及其对芒果浊汁稳定性的优化作用，以台农 1 号芒果皮为原料，通过超声辅助酸解法提取果胶，并经碱法脱酯制备不同 DE 值的果胶样品，系统评估其对芒果浊汁离心沉淀率、悬浮稳定性、物理稳定性、感官变化、粒径等指标的影响。创新性引入 Boltzmann/Logistic 模型拟合沉降动力学，结合 Stokes 理论预测重力沉降时间，并通过 25~45 ℃ 加速贮藏实验构建热力学模型，根据模型推测芒果浊汁在不同温度下的稳定性时间。本研究首次阐明芒果皮果胶 DE 值与浊汁稳定性的构效关系，为果胶资源的分级利用提供理论依据。同时，基于动力学与热力学参数构建稳定性预测模型，为热带水果加工中的货架期评估提供标准

化工具，推动芒果皮从农业废弃物向高附加值功能配料的转化，具有显著的环境效益与产业升级价值。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

‘台农 1 号’芒果（成熟度一致，商业成熟期果实）购自海南当地市场；芒果原浆　广东源丰食品有限公司；维生素 C、白砂糖、柠檬酸　江苏科伦多食品配料有限公司；半乳糖醛酸（GalA）、间羟基二苯　Sigma-Aldrich 公司；所有其他试剂或溶剂（分析级）Macklin 生化有限公司；所有超纯水溶液　均由 Millipore 系统（Millipore, Billerica, USA, 18.2 MΩ cm 电阻）制备。

SPX/APV-2000 高压均质机　北京同和友德科技有限公司；Multifuge X1 R Pro 冷冻离心机　美国 Thermo Fisher Scientific 公司；LUMiFuge 稳定性分析仪　德国 LUM 仪器公司；Mastersizer 3000 激光衍射粒度分析仪　英国 Malvern 仪器公司；UV-6100 紫外/可见分光光度计　上海元析仪器有限公司；SY-2000A 旋转蒸发仪　上海亚荣生化仪器公司；RI-10A 示差折光检测器　岛津仪器有限公司；Zetasizer Nano S90 动态光散射设备　英国 Malvern 仪器公司；HAAKE™ MARS 60 旋转流变仪　德国哈克公司。

1.2　实验方法

1.2.1　不同酯化度芒果皮果胶的制备与表征

1.2.1.1　芒果皮果胶的制备　采用超声辅助酸解法从芒果皮中提取果胶[15]。用锋利的不锈钢刀将芒果皮削去，收集好的芒果皮立即进行 5 min 的漂烫，用蒸馏水冲洗两次，并在 40 ℃ 的烘箱中干燥 2~3 d，用机械电动研磨机研磨成粉末。称取适量处理过的芒果皮粉置于烧杯中，按照料液比 1∶20 加入 pH2.0 的 HCl 溶液（若原料批次间成分波动较大，在混合后复测并调节 pH 至 2.0），在 200 W 超声功率和 90 ℃ 超声温度下提取 2 h，溶液用四层纱布过滤，用旋转蒸发仪在 60 ℃ 下浓缩。然后向浓缩的果胶提取物中加入两倍体积浓度为 95% 的乙醇，于 4 ℃ 下静置过夜。用 65% 乙醇和无水丙酮洗涤三次沉淀的絮状果胶，40 ℃ 烘干得到芒果皮果胶。

1.2.1.2　不同酯化度芒果皮果胶的制备　参照 Wan 等[16] 的方法进行了一定的修改，采用碱法制备低酯果胶：称取 3 g 芒果皮果胶，加入 100 mL 浓度为 0.1 mol/L 的 Na_2CO_3/$NaHCO_3$ 缓冲溶液。将果胶液置于 10 ℃ 水浴中，用 1 mol/L 的 NaOH 调节 pH（10.0~11.0），并保持 pH 恒定，进行脱酯反应，脱酯时间 30、60、90、120 min。加入 2.7 mol/L 的 HCl 调节 pH 到 3.0 终止脱酯反应，再加 95% 的乙醇沉淀果胶。抽滤分离沉淀，并用 95% 乙醇洗涤 2~3 次。将所得沉淀 40 ℃ 烘干，得到不同 DE 值的芒果皮果胶样品（DEMPs），分别记为 $DEMP_1$、$DEMP_2$、$DEMP_3$、$DEMP_4$。

1.2.1.3　不同酯化度芒果皮果胶理化性质的表征　果胶的 GalA 的含量根据 Chaaiwarit 等[17] 的方法进行测定，用紫外/可见分光光度计在 537 nm 下测定 GalA 含量，用 D-半乳糖醛酸当量的百分比表示。

果胶的 DE 值通过氢氧化钠滴定法来确定[18]。配制浓度为 0.1% 的果胶溶液。以酚酞为指示剂，用 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液进行滴定至溶液出现微红色（V_1），接着加入 20 mL 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液，充分摇匀。随后加入 20 mL 0.1 mol/L 的 HCl，摇匀直至粉红色消失。再次加入酚酞后，用 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液滴定样品至溶液再次出现微红色（V_2）。

$$DE(\%) = \frac{V_2}{V_1 + V_2} \times 100 \qquad 式（1）$$

果胶的分子量采用高效凝胶渗透色谱法测定[19]。精确称取 5 mg 样品与不同分子量的普鲁兰糖标准品，用流动相溶解并定容至 5 mg/mL，经 12000 r/min 离心 10 min 后，取上清液过 0.22 μm 微孔滤膜，采用示差折光检测器进行分析。

果胶 Zeta 电位和粒径根据 Chen 等[8] 的方法，在动态光散射设备上测定。设置折光率在 10%~15% 之间，介质折射率为 1.33。

果胶的黏度根据 Méndez 等[20] 的方法，采用旋转流变仪及其配套计算机软件进行测定。配制 2%（w/v）的果胶溶液，测试条件为：平板夹具直径 60 mm，间隙 1000 μm，温度 25±1 ℃。在稳态剪切模式下，测定剪切速率为 50 s^{-1} 时的样品黏度。

果胶的溶解性（Solubility, S）和持水性（Water holding capacity, WHC）依据 Nguyen 等[21] 报道的离心法进行测定，但略作修改。将 0.5 g 左右的果胶样品浸泡在 20 mL 的超纯水中，于 25 ℃ 下浸泡 1 h，然后在 6000 r/min 下离心 15 min。离心后，弃去上清液，将沉淀物进行称重，烘干至恒重后再次称重。计算果胶样品的 S 和 WHC。

$$S(\%) = \frac{m_i - m_d}{m_i} \times 100 \qquad 式（2）$$

$$WHC(g/g) = \frac{m_w - m_d}{m_d} \qquad 式（3）$$

式中，m_i 为测 S 前果胶干样的起始质量（g）；m_w 为沉淀物（果胶湿样）的质量（g）；m_d 为干燥后果胶干样的质量（g）。

1.2.2　添加不同酯化度芒果皮果胶的芒果浊汁的制备　芒果原浆→调配（按照原浆∶水≈1∶4 的比例添加饮用水，调节可溶性固形物至 13°Brix~15°Brix，用柠檬酸溶液调节 pH 至 3.8~4.2）→加胶（按体系总量加入 0.2% 不同 DE 值的芒果皮果胶）→搅拌溶解（50 ℃，15 min）→均质（12000 r/min 下高速剪切 5 min，然后在温度为 50 ℃、压力为 30 MPa 下进行均质处理 2 个循环）→杀菌（在 85~90 ℃ 条件下，维持 30 min 进行常压杀菌）。

1.2.3 芒果浊汁稳定性分析

1.2.3.1 离心沉淀率的测定 离心沉淀率(SR)表示体系的稳定性。取 40 mL 已制备好的芒果果汁于 50 mL 离心管中, 以 4000 r/min 的转速离心 30 min, 将上清液分离后倒置 30 min, 测定 SR。

$$SR(\%) = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad \text{式（4）}$$

式中, m_1 为样品离心后沉淀物质量(g); m_2 为样品离心前的质量(g)。

1.2.3.2 悬浮稳定性的测定 果汁悬浮稳定性(R)的测定[22]: 取芒果果汁 20 mL, 在 4000 r/min 下离心 15 min, 测定果汁在 660 nm 处离心前吸光度 A_0 和离心后上清液吸光度 A_1, 以蒸馏水做空白, 计算 R。

$$R(\%) = \frac{A_1}{A_0} \times 100 \quad \text{式（5）}$$

1.2.3.3 物理稳定性的测定 参照 Ke 等[3] 的方法采用稳定性分析仪进行稳定性扫描, 测定所用的参数如下: 旋转速度, 1320×g; 进行时间, 3000 s; 时间间隔, 10 s; 温度, 25 ℃。不同时间的光透过率曲线作为离心管位置的函数绘制。不稳定性指数由仪器软件计算。

1.2.3.4 重力沉降时间的预测 根据 Stokes 沉降理论, 应用分离因数的概念, 把重力沉降与离心沉降相结合, 推出了饮料产品中颗粒的沉降时间与预测实验中颗粒的离心沉降时间的关系式[23], 即:

$$\theta = 2.5 \times 10^{-8} n^2 rt \quad \text{式（6）}$$

式中, θ 为饮料产品的重力沉降时间(月); t 为饮料产品在预测实验中的离心沉降时间(min); n 为离心机的转速(r/min); r 为离心机的旋转半径(m)。

通过目测法评估芒果浊汁在贮藏过程中的稳定性, 重点关注由果肉颗粒上浮或下沉导致的相分离现象。

1.2.3.5 沉降动力学研究 将果汁倒入 1000 mL 量筒中, 在不同时间点(1、2、5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、60 d)记录沉淀物体积。以时间为横坐标, 以上清液体积为纵坐标, 利用 Origin 软件建立沉降动力学方程。选用 Boltzmann 模型和 Logistic 模型对果汁沉降动力学方程进行拟合[24−25]。

Boltzmann 模型的基本方程为:

$$V = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(t-t_0)/d_t}} + A_2 \quad \text{式（7）}$$

式中, $t_0 \geqslant 0$, $d_t > 0$, $A_1 - A_2 > 0$; V 为 t 时刻的沉降体积; A_1、A_2、t_0、d_t 为待定参数。

Logistic 模型的基本方程为:

$$V = \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{t}{t_0}\right)^p} + A_2 \quad \text{式（8）}$$

式中, $t_0 \geqslant 0$, $p > 0$, $A_1 - A_2 > 0$; V 为 t 时刻的沉降体积; A_1、A_2、t_0、p 为待定参数。

1.2.4 贮藏期间芒果浊汁品质的变化

1.2.4.1 离心沉淀率 将果汁贮藏在不同温度(25、35、45 ℃)条件下, 每隔 10 d(于 0、10、20、30、40、50、60 d)取样测定其离心沉淀率。

1.2.4.2 粒径 使用激光衍射粒度分析仪测定芒果浊汁的粒径。粒子折射率为 1.52, 吸收率为 0.1。分散剂为去离子水, 设置折光率在 10%~15% 之间, 介质折射率为 1.33。粒径测定范围 0.1~1000 μm, 表示为 $D_{[3,2]}$。

1.2.4.3 感官评价 将果汁贮藏在不同温度(25、35、45 ℃)条件下, 每隔 10 d(于 0、10、20、30、40、50、60 d)取样进行感官评价分析。将样品分装至透明塑料杯中, 随机编码。让 10 个感官评价员使用数据化表格记录感官评价分值, 评价员依据表 1 标准对果汁外观稳定性进行评分(重点评估沉淀/分层程度)。样品间用清水漱口, 间隔 1 min。计算 10 人评分的算术平均值, 当平均分≥2.5 分时判定为不可接受。

1.2.5 贮藏期间芒果浊汁理化参数变化的动力学和热力学

1.2.5.1 芒果浊汁动力学和热力学稳定性模型的建立 将果汁贮藏在不同温度(25、35、45 ℃)条件下, 每隔 10 d 取样分析贮藏过程中 SR、粒径分布的变化规律。采用零级、一级、二级动力学公式计算反应速率常数[26], 运用 Arrhenius 方程建立果汁稳定动力学及热力学模型[27]。

芒果浊汁储存期间物理化学参数的变化可以用

表 1 芒果浊汁储存期间感官值评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of mango turbid juice during storage

评价标准	现象说明	分值(分)
没有差别, 无可见变化	无沉淀, 均匀无分层	0
非常细微的差别, 极轻微沉淀(≤1 mm层厚)	倾倒后杯底可见轻微颗粒	1
细微的差别, 轻微沉淀(1~3 mm层厚)	倾倒后颗粒分散, 无结块	2
中等的差别, 明显沉淀(3~5 mm层厚)	轻微结块, 摇动后部分分散	3
中等偏大的差别, 严重沉淀(>5 mm层厚)	结块紧实, 摇动不分散	4
很大的差别, 分层(沉淀+清液层)	清液层高度≥1 cm	5
非常大的差别, 完全分层(沉淀硬化+清液层)	清液层高度≥2 cm	6

式(9)表示：

$$\frac{dC}{dt} = \pm kC^n \quad \text{式（9）}$$

式中，C 为 t 时的物化参数值；k 为反应速率常数；n 为反应级数。

若为零级反应，则可用式(10)计算其反应速率常数：

$$C_0 - C = kt \quad \text{式（10）}$$

若为一级反应，则可用式(11)计算其反应速率常数：

$$\ln\frac{C_0}{C} = kt \quad \text{式（11）}$$

若为二级反应，则可以用公式(12)计算反应速率常数：

$$\frac{1}{C_0} - \frac{1}{C} = kt \quad \text{式（12）}$$

式中，C_0 为物理化学参数浓度数值最初值。

贮藏时间与反应温度有关的变化用 Arrhenius 方程计算：

$$k = A_0\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad \text{式（13）}$$

式中，A_0 为阿仑尼乌斯常数；E_a 为活化能；R 为绝对气体常数 8.314(J/mol·K)；T 为绝对温度(K)。

取对数：

$$\ln k = -\frac{E_a}{R}\times\frac{1}{T} + B \quad \text{式（14）}$$

在求得不同温度下的反应速度常数后，取温度自然对数对热力学温度的倒数(1/T)作图，可获得斜率为$-E_a/R$ 的直线。

为了更进一步了解反应机理，根据绝对反应速率理论可以计算反应热力学参数：ΔH^*、ΔS^*、ΔG^*。

ΔH^*(kJ/mol)可以通过式(15)计算：

$$\Delta H^* = E_a - RT \quad \text{式（15）}$$

ΔS^*(J/mol·k)可以通过式(16)计算：

$$k = \frac{K_b}{h}\exp\left(\frac{\Delta S^*}{R}\right)\exp\left(\frac{-\Delta H^*}{RT}\right) \quad \text{式（16）}$$

式中，K_b 为玻尔兹曼常数(1.38×10^{-23} J/K)；h 为普朗克常数(6.626×10^{-34} Js)。

ΔG^*(kJ/mol)可以通过式(17)计算：

$$\Delta G^* = \Delta H^* - T\Delta S^* \quad \text{式（17）}$$

1.2.5.2　模型的精确度评价　芒果浊汁稳定性预测模型是否精确，可通过模型的预测值和实际值之间的标准误差(ε)以及预测模型的残差变异系数(CV)来检验。

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}} \quad \text{式（18）}$$

式中，ε 为预测标准误差；y_i 为模型实测值；$\hat{y}_i$ 为模型预测值；n 为样本大小。

$$CV(\%) = \frac{\varepsilon}{\bar{y}}\times100 \quad \text{式（19）}$$

式中，CV 为残差变异系数；ε 为预测标准误差；$\bar{y}$为平均实测值。

1.3　数据处理

每次实验重复 3 次以上，结果用平均值±标准差表示；采用 SPSS 25.0 的 Ducan 检验差异性($P<0.05$ 为差异性显著)；采用 Origin 2022 绘图。

2　结果与分析

2.1　不同酯化度芒果皮果胶理化性质的表征

如表 2 所示，DEMPs 的 DE 随着碱处理时间的增加而降低，从 30~120 min，DE 值从 66.26% 下降到 33.67%，其中所得 $DEMP_3$ 和 $DEMP_4$ 均为低酯果胶。所有 DEMPs 中 GalA 的含量都超过了商业食品级果胶 65% 的限制。然而，GalA 含量与 DE 值呈非线性关系，$DEMP_2$ 的 GalA 最高(85.05%)，可能是脱酯过程中 β-消除反应选择性降解中性糖，导致 GalA 相对占比上升，$DEMP_4$ 的 GalA 降至 81.81%，可能是脱酯引发了部分主链断裂。在碱法脱酯梯度下(DE 由 66.26% 降低至 33.67%)，随着 DE 降低，DEMPs 的 S 和 WHC 也有所提高。这种改善可能是由于果胶中甲氧基含量的减少，从而增加了游离羧基的数量。这些羧基可以与水分子形成氢键，从而提高果胶的 S 和 WHC。此结果与韦鑫等[28] 的研究结果相同，低酯化后的菠萝蜜果皮果胶也具有更好的 S。碱性脱酯化后，随着 DE 降低，DEMPs 的分子量、粒径和黏度都有所降低，这可能是因为随着脱酯化反应的进行，还伴随着 β-消除反应[29]，导致了部分果胶的降解，果胶的分子量降低，粒径变小，黏度降低[30]。DE 值与果胶溶液的 Zeta 电位绝对值呈负相关，这是由于脱酯化反应导致游离羧基(带负电荷)增加所致[19,31]。DE 值每降低 10%，Zeta 电位绝对值增加约 2.5 mV，$DEMP_4$ 的 Zeta 电位绝对值最高

表 2　不同酯化度芒果皮果胶的理化性质

Table 2　Physicochemical properties of mango peel pectin with different degrees of esterification

样品	半乳糖醛酸(GalA)含量(%)	酯化度DE(%)	溶解性S(%)	持水性WHC(g/g)	分子量M_w(kDa)	粒径(μm)	电位(mV)	黏度(mPa·s)
$DEMP_1$	69.22±0.12^d	66.26±1.42^a	95.76±0.08^b	12.77±0.45^c	616.31	1602±63.10^a	−25.83±1.30^a	134.35±1.77^a
$DEMP_2$	85.05±0.81^a	55.32±1.37^b	96.98±0.15^a	13.78±0.36^b	535.84	1593.67±38.48^a	−29.56±0.55^b	128.15±2.76^b
$DEMP_3$	76.28±0.05^c	47.19±2.01^c	96.21±0.08^{ab}	13.91±0.16^b	393.79	1598±57.19^a	−30.72±0.37^c	125.45±1.91^b
$DEMP_4$	81.81±0.75^b	33.67±1.16^d	96.59±0.08^a	14.72±0.31^a	342.37	1278.67±27.65^b	−36.09±1.52^d	109.35±1.63^c

注：同一列中不同小写字母表示样品之间存在显著差异($P<0.05$)，表3同。

(−36.09 mV), 高 Zeta 电位表示胶体颗粒之间的静电排斥作用强, 胶体体系越稳定。

2.2　芒果浊汁稳定性分析

2.2.1　离心沉淀率分析　SR 表示体系的稳定性, 一般来说, SR 值越小, 稳定性越好[9]。然而由表 3 可见, 加入果胶后, 芒果汁的 SR 值反而增大。这可能是由于果胶增强了芒果汁体系中的凝胶网络, 在更强的网络下沉淀中会保留更多的水, 从而使得 SR 增大。另一方面, 较强的 WHC 可以提高果汁的物理稳定性。这一现象与 Ke 等[3] 研究报道保持一致, 经工业规模的微流体均质机系统处理的全组分芒果浊汁通过强化纤维网络, 使沉淀相中保留更多水分, 导致沉淀重量比升高, WHC 增强, 进而提升了果汁的物理稳定性。

2.2.2　悬浮稳定性分析　果汁的 R 值也是衡量果汁稳定性的一个标准, 由表 3 可见, 加入果胶后, R 值增大。添加 $DEMP_1$、$DEMP_2$、$DEMP_3$、$DEMP_4$ 的芒果汁与无添加的芒果汁相比, R 值分别提高了 5.47%、16.08%、22.11%、26.76%。说明果汁浊度的变化率较小, 颗粒悬浮更持久, 整体稳定性高。

2.2.3　物理稳定性分析　为了表征不同 DE 值果胶的添加对芒果汁物理稳定性的影响, 使用了 LUMi Fuge 分散分析仪进行分析。芒果汁在离心过程中透光曲线的变化和不稳定性指数分别如图 1 和表 3 所示。从图 1 中可以看出, 在离心管底部的透射值随着时间的推移而减小, 说明沉淀是逐渐形成的。在离心过程中, 无添加的芒果汁表现出明显的非重叠透射曲线和透射值的变化, 表明发生了相分离和严重的沉淀[3]。添加了不同 DE 值的芒果皮果胶之后, 随着果胶 DE 值的减小, 芒果汁的透射值变化越小, 剖面越重叠。如表 3 所示, 随着添加果胶 DE 值的减小, 芒果汁的不稳定性指数显著降低(P<0.05)。添加 $DEMP_1$、$DEMP_2$、$DEMP_3$、$DEMP_4$ 的芒果汁与无添加的芒果汁相比, 分别降低了 4.53%、7.91%、18.14%、25.47%。结果表明, 果胶的添加提高了芒果汁的物理稳定性, 并随着果胶 DE 值的减小而增加。

2.2.4　重力沉降时间的预测　如表 3 所示, 当 n=6000 r/min, r=0.175 m, 芒果汁、芒果汁+$DEMP_1$、芒果汁+$DEMP_2$、芒果汁+$DEMP_3$、芒果汁+$DEMP_4$ 分别在离心 5、6、13、38、40 min 时达到最大沉淀率, 预测重力沉降时间分别为 0.79、0.95、2.05、5.99、6.30 个月, 并且实测重力沉降时间与货架期观察结果较一致。

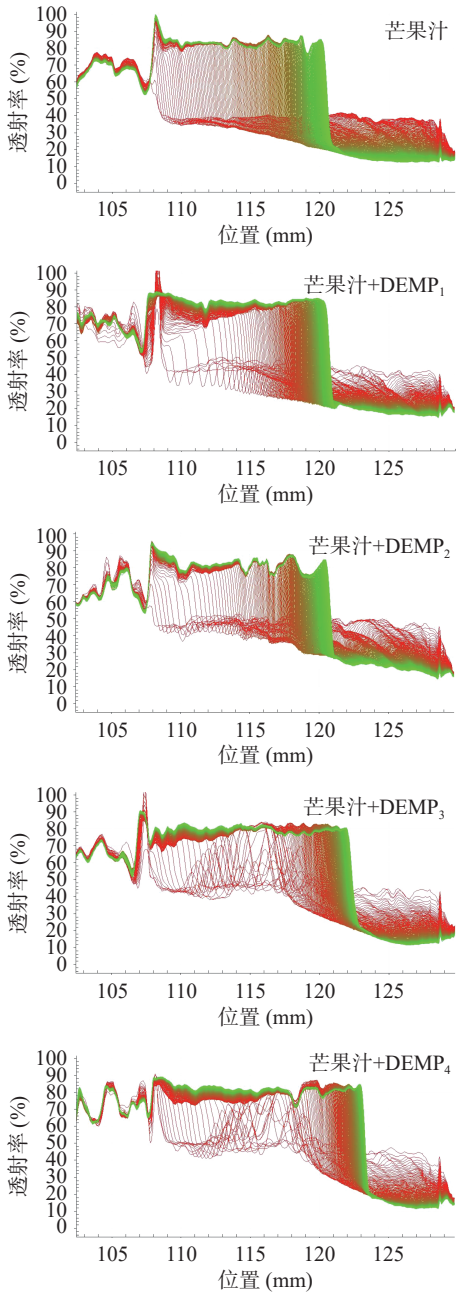


图 1　添加不同酯化度果胶的芒果浊汁透光特性的变化

Fig.1　Changes in light transmittance of mango turbid juice incorporated with pectins of different degrees of esterification

2.2.5　沉降动力学分析　如图 2 所示, Boltzmann 曲线和 Logistic 曲线可以较好地反映沉降历时曲线与

表 3　芒果浊汁离心沉淀率、悬浮稳定性及货架期预测

Table 3　Centrifugal sedimentation rate, suspension stability and shelf life prediction of mango turbid juice

样品	离心沉淀率SR(%)	悬浮稳定性R(%)	不稳定性指数	离心机实测t(min)	据t预测的θ(月)	货架期观察现象
芒果汁	30.67±0.23^{e}	41.81±0.50^{e}	0.860±0.020^{a}	5	0.79	三周后颗粒上浮和下沉
芒果汁+$DEMP_1$	34.32±0.11^{d}	44.10±0.39^{d}	0.821±0.004^{b}	6	0.95	一个月后果肉大量下沉
芒果汁+$DEMP_2$	37.22±0.18^{c}	48.54±0.21^{c}	0.792±0.004^{c}	13	2.05	两个月后果肉大量上浮和下沉
芒果汁+$DEMP_3$	40.71±0.03^{b}	51.06±0.74^{b}	0.704±0.007^{d}	38	5.99	半年内无颗粒上浮和下沉
芒果汁+$DEMP_4$	44.46±0.31^{a}	53.00±0.32^{a}	0.641±0.021^{e}	40	6.30	半年内无颗粒上浮和下沉

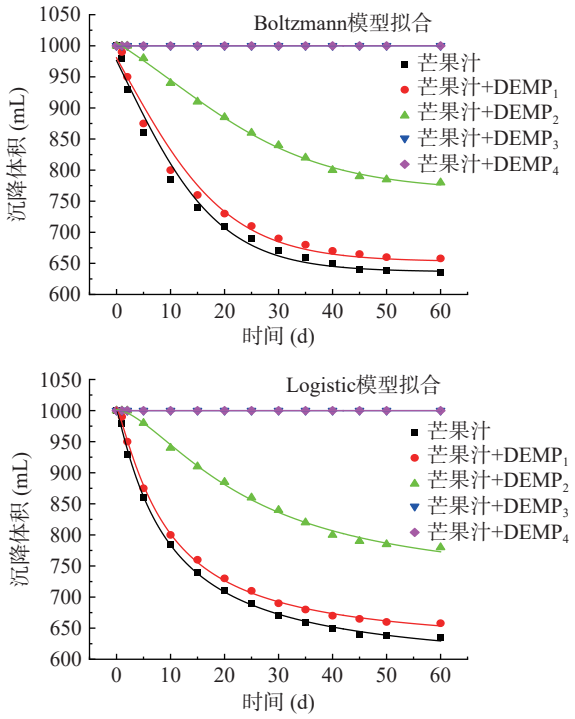


图 2　添加不同酯化度果胶的芒果浊汁沉降动力学拟合

Fig.2　Sedimentation kinetic modeling of mango turbid juice incorporated with pectins of different degrees of esterification

其呈 S 形变化的数学特征。

根据 Boltzmann 模型，$t_0 \geqslant 0$、$d_t>0$、$A_1-A_2>0$，V 为 t 时刻对应的沉降体积。当 $t\to+\infty$时，$V=A_2$，即 A_2 为预测最终沉降体积。由表 4 可见，芒果汁、芒果汁+$DEMP_1$、芒果汁+$DEMP_2$ 的最终沉降体积分别为 636.490、652.827、766.510 mL，而芒果汁+$DEMP_3$、芒果汁+$DEMP_4$ 始终未发生沉降。

将式(7)对时间 t 求导，得：

$$V' = -\frac{(A_1-A_2)}{d_t} e^{\frac{t-t_0}{d_t}} \left(1+e^{\frac{t-t_0}{d_t}}\right)^{-2} \qquad 式（20）$$

将式(7)对时间 t 求二阶导，得：

$$V'' = \frac{(A_1-A_2)}{d_t^2} e^{\frac{t-t_0}{d_t}} \frac{\left(e^{\frac{t-t_0}{d_t}}-1\right)}{\left(1+e^{\frac{t-t_0}{d_t}}\right)^3} \qquad 式（21）$$

其中：a.当 $t=t_0$ 时 $V''=0$，V'最大，反弯点出现；b.当 $t<t_0$ 时 $V'<0$，$V''<0$，即在区间$(0, t_0)$内 V 图形表现为凸形，在此区间内 V'递增，初期 V'增加较快，达到峰值后逐渐减小；c.当 $t>t_0$ 时 $V'<0$，$V''>0$，即在区间(t_0, ∞)内 V 图形表现为凹形，在此区间内 V'递减降低，最终趋于零。d_t 值的大小影响沉降曲线收敛速度，反映沉降曲线的加载速率[32]。d_t 值越小表示在较短时间内完成大的沉降。芒果汁、芒果汁+$DEMP_1$、芒果汁+$DEMP_2$ 的 t_0、d_t 值逐渐增大，说明不添加果胶的芒果汁在短时间内即完成大的沉降，物理稳定性较差，而添加果胶提高了芒果汁的物理稳定性，并随着果胶 DE 值的减小稳定性增加。

根据 Logistic 模型，当 $t\to+\infty$时，$V=A_2$，A_2 为预测最终沉降体积。由表 5 可见，芒果汁、芒果汁+$DEMP_1$、芒果汁+$DEMP_2$ 的最终沉降体积分别为 581.766、616.967、717.325 mL。Logistic 模型与

表 4　芒果浊汁的 Boltzmann 模型拟合参数

Table 4　Fitting parameters of the Boltzmann model for mango turbid juice

样品	A_1	A_2	t_0	d_t	R^2	拟合方程
芒果汁	1288.916	636.490	0.767	9.126	0.987	$V=\frac{652.426}{1+e^{(t-0.767)/9.126}}+636.490$
芒果汁+$DEMP_1$	1275.823	652.827	1.042	9.933	0.984	$V=\frac{622.996}{1+e^{(t-1.042)/9.933}}+652.827$
芒果汁+$DEMP_2$	1121.594	766.510	10.121	14.034	0.998	$V=\frac{355.084}{1+e^{(t-10.121)/14.034}}+766.510$
芒果汁+$DEMP_3$	1000.000	1000.000	20.000	3.000	–	–
芒果汁+$DEMP_4$	1000.000	1000.000	20.000	3.000	–	–

表 5　芒果浊汁的 Logistic 模型拟合参数

Table 5　Fitting parameters of the Logistic model for mango turbid juice

样品	A_1	A_2	t_0	p	R^2	拟合方程
芒果汁	1003.047	581.766	9.288	1.103	0.999	$V=\frac{421.281}{1+\left(\frac{t}{9.288}\right)^{1.103}}+581.766$
芒果汁+$DEMP_1$	1004.990	616.967	9.245	1.208	0.999	$V=\frac{388.022}{1+\left(\frac{t}{9.245}\right)^{1.208}}+616.967$
芒果汁+$DEMP_2$	1001.878	717.325	24.295	1.566	0.998	$V=\frac{284.552}{1+\left(\frac{t}{24.295}\right)^{1.566}}+717.325$
芒果汁+$DEMP_3$	1000.000	1000.000	20.000	3.000	–	–
芒果汁+$DEMP_4$	1000.000	1000.000	20.000	3.000	–	–

Boltzmann 模型相比，R^2 值更高，可能精度更准。

2.3　贮藏期间芒果浊汁品质的变化

2.3.1　离心沉淀率的变化　芒果汁在不同的贮藏温度下（25、35、45 ℃）的 SR 变化曲线见图 3，由图可知，在同一温度下，样品的 SR 随时间延长而增加，不同温度储存条件下，温度越高，样品的 SR 越大。由于温度高，分子运动越剧烈，样品中大分子物质在布朗运动时，碰撞的机会越高[33]。添加果胶的芒果汁的 SR 比纯芒果汁高，且随着 DE 值的降低，SR 不断增大，这可能是由于果胶增强了芒果汁体系中的凝胶网络，在更强的网络下沉淀中会保留更多的水。

2.3.2　粒径变化　芒果汁在不同的贮藏温度下（25、35、45 ℃）粒径的变化曲线见图 4，由图可知，在同一温度下，样品的粒径随时间延长而增加，不同温度储存条件下，温度越高，样品的粒径越大。与纯芒果汁相比，添加果胶后，粒径随时间增长的速率发生变化。在相同时间跨度内，添加了果胶的芒果汁体系粒径增长幅度小于纯芒果汁，说明果胶能在一定程度上减缓粒径的增长。低酯果胶在溶液中带有较多负电荷，颗粒间的静电排斥作用较强，阻止了颗粒的靠近和聚集，有效减缓粒径增长[34]。低酯果胶羧基含量较高，在芒果汁体系中，这些羧基可能与果汁中的金属

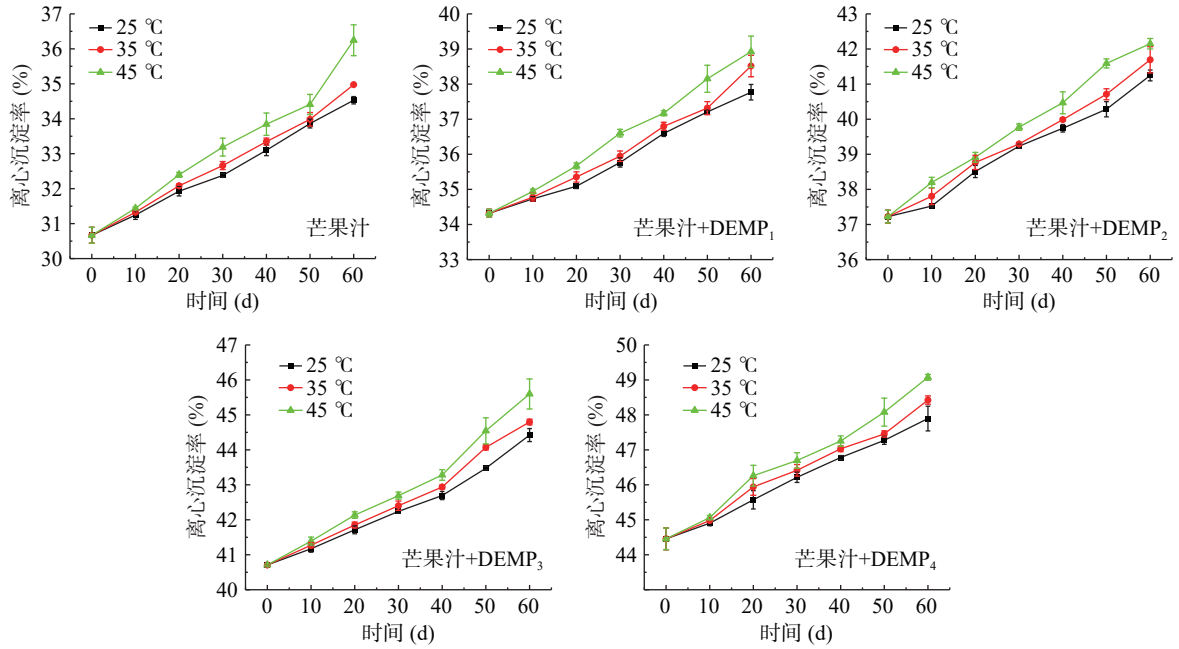


图 3　芒果浊汁在储存期间产品离心沉淀率

Fig.3　Centrifugal precipitation rate of mango turbid juice during storage

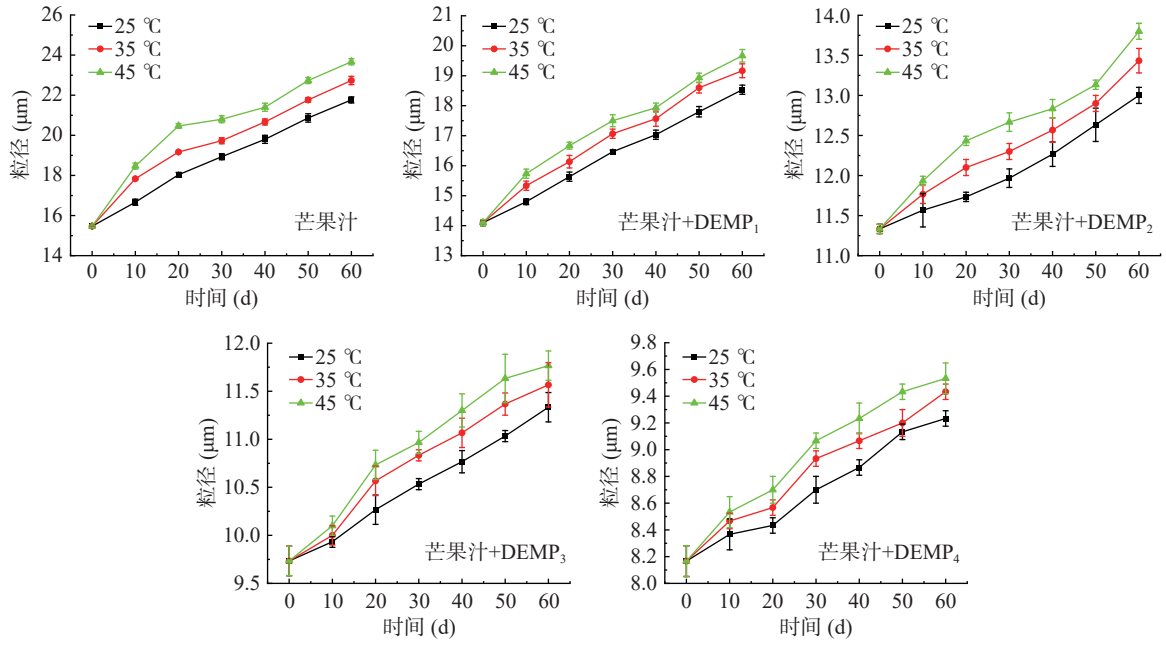


图 4　芒果浊汁在储存期间产品粒径

Fig.4　Particle size of mango turbid juice during storage

离子(如钙离子)发生交联作用，形成相对稳定的网络结构。这种网络结构可以限制颗粒的自由移动和碰撞，从而减缓颗粒的聚集，抑制粒径增长。

2.3.3　感官变化　芒果汁在不同的贮藏温度下(25、35、45 ℃)感官评价值的变化曲线见图 5，在不同温度储存条件下，芒果汁感官值随贮藏时间的增加而递增，在贮藏时间相同时，感官值随贮藏温度升高而上升。感官值越大，果汁的稳定性越差。从图中可以看出，添加了果胶的芒果汁体系感官值上升较慢，添加 $DEMP_3$/$DEMP_4$ 组的芒果汁在储存期间 60 d 内，感官值均未超过 2.5。

2.4　贮藏期间芒果浊汁理化参数变化的动力学和热力学

2.4.1　理化参数变化的动力学和热力学分析　按照化学动力学反应级数的计算方法。计算芒果汁贮藏期间 SR、粒径的反应级数，符合一级反应化学动力学。用对不同温度下的 SR、粒径数据进行回归分析，该拟合指数均大于 0.9，反应拟合程度良好。对指数方程求导，确定 SR、粒径的反应速率常数。根据式(14)求出反应活化能。根据式(15)(16)(17)计算反应的热力学参数ΔH^*、ΔS^*、ΔG^*，见表 6。

活化能(E_a)表明化学反应需要的能量，活化能越低，化学反应越容易发生。焓变值(ΔH^*)大于零，表明反应为吸热过程，温度越高，越能促进络合物的形成，体系的稳定性越差。根据热力学原理，吉布斯自由能(ΔG^*)表征反应物基态与过渡态之间的能垒变化，是判定过程自发性的关键参数。本研究中ΔG^*值在 85.87~95.12 kJ/mol 范围内窄幅波动，表明其受温度影响较小。该正值特征($\Delta G^*>0$)证实反应需外界能量驱动，属于非自发过程[35]。

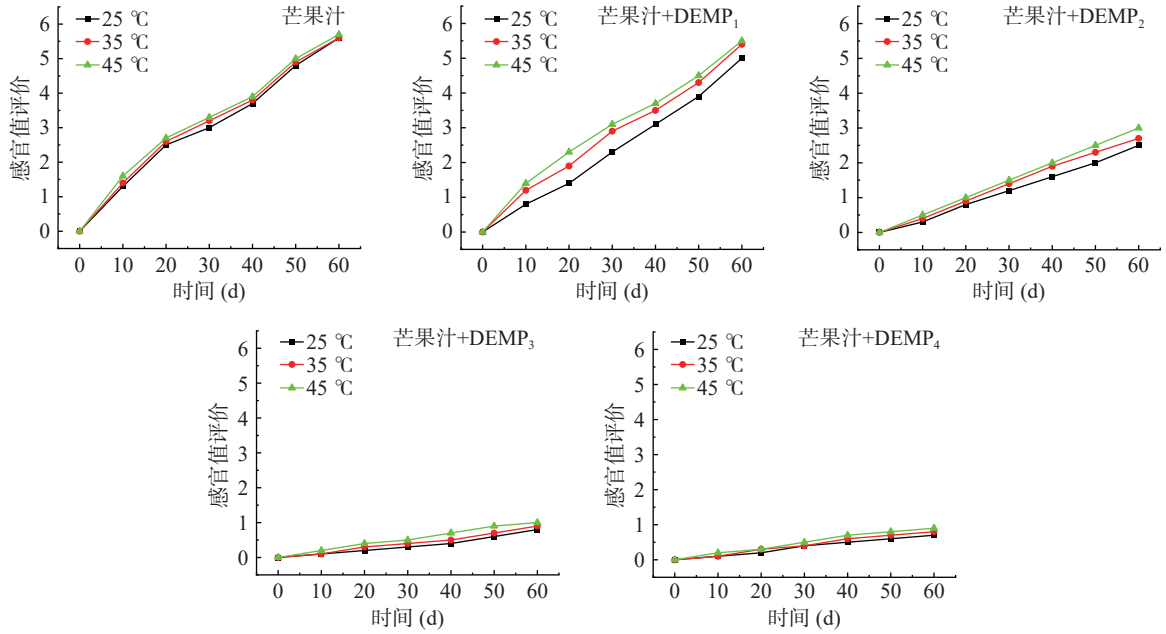


图 5　芒果浊汁在储存期间的感官评价结果

Fig.5　Sensory evaluation of mango turbid juice during storage

表 6　芒果浊汁动力学与热力学参数

Table 6　Kinetic and thermodynamic parameters of mango turbid juice

理化参数	样品	温度(K)	K(d^{-1})	E_a(kJ/mol)	ΔH^*(kJ/mol)	ΔS^*(J/mol·K)	ΔG^*(kJ/mol)
离心沉淀率SR	芒果汁	298.15	0.00197	10.74	8.26	−269.01	88.46
		308.15	0.00213	10.74	8.17	−269.80	91.31
		318.15	0.00259	10.74	8.09	−269.53	93.84
	芒果汁+$DEMP_1$	298.15	0.00167	9.40	6.93	−274.85	88.87
		308.15	0.00188	9.40	6.84	−275.16	91.63
		318.15	0.00212	9.40	6.76	−275.39	94.37
	芒果汁+$DEMP_2$	298.15	0.00172	7.47	4.99	−281.08	88.80
		308.15	0.00185	7.47	4.91	−281.56	91.67
		318.15	0.00208	7.47	4.83	−281.62	94.42
	芒果汁+$DEMP_3$	298.15	0.00141	10.48	8.00	−272.66	89.29
		308.15	0.00158	10.48	7.91	−273.13	92.08
		318.15	0.00184	10.48	7.83	−273.20	94.75
	芒果汁+$DEMP_4$	298.15	0.00126	9.39	6.91	−277.23	89.57
		308.15	0.00138	9.39	6.83	−277.77	92.42
		318.15	0.00160	9.39	6.75	−277.76	95.12

续表 6

理化参数	样品	温度(K)	K(d^{-1})	E_a(kJ/mol)	ΔH^*(kJ/mol)	ΔS^*(J/mol·K)	ΔG^*(kJ/mol)
粒径	芒果汁	298.15	0.00560	4.00	1.52	−282.91	85.87
		308.15	0.00582	4.00	1.44	−283.30	88.74
		318.15	0.00620	4.00	1.36	−283.44	91.53
	芒果汁+$DEMP_1$	298.15	0.00455	4.91	2.43	−281.60	86.39
		308.15	0.00497	4.91	2.34	−281.68	89.14
		318.15	0.00515	4.91	2.26	−282.15	92.03
	芒果汁+$DEMP_2$	298.15	0.00226	9.98	7.50	−270.40	88.12
		308.15	0.00261	9.98	7.42	−270.57	90.79
		318.15	0.00291	9.98	7.33	−270.94	93.54
	芒果汁+$DEMP_3$	298.15	0.00255	9.34	6.86	−271.56	87.82
		308.15	0.00293	9.34	6.77	−271.69	90.50
		318.15	0.00323	9.34	6.69	−272.10	93.26
	芒果汁+$DEMP_4$	298.15	0.00212	7.89	5.41	−277.93	88.28
		308.15	0.00234	7.89	5.33	−278.25	91.07
		318.15	0.00259	7.89	5.25	−278.47	93.84

Gibbs 自由能ΔG^*随温度增加而递增，建立 Gibbs 自由能ΔG^*与温度回归函数，表明化学反应与宏观物理变化之间的相关性关系，SR 和粒径的 Gibbs 自由能与温度之间的回归方程相关性都很高，见表 7。

2.4.2 芒果浊汁离心沉淀率和感官值的关系 通常判断饮料稳定性的标准是消费者的感官接受程度，因此，将感官评价值作为芒果汁的稳定性变化标准。感官评价相关程度较高的理化参数—SR、粒径都可作为建立芒果汁稳定性动力学的模型指标。在储存期间，芒果汁 SR 和感官值的回归方程见表 8。由表可见，SR 和感官值线性回归方程的决定系数(R^2)均大于 0.98，表明两者间的相关性较强。

2.4.3 芒果浊汁的动力学和热力学的稳定性模型 将 SR 作为样品的动力学和热力学模型指示值，可获得芒果汁的动力学和热力学的稳定性模型如表 9 所示。

因此，由初始的沉淀率(SR_0)，就可用动力学和热力学的稳定性模型推测芒果汁在不同温度下的稳定性时间。

2.4.4 模型的精确度评价 根据实验数据，得到不同样品组在不同温度条件下观察的稳定时间，计算预测标准误差、模型残差变异系数如表 10 所示，模型残差变异系数(除芒果汁外)均小于 15%，则表明该模

表 7 芒果浊汁理化参数吉布斯自由能与温度的回归方程

Table 7 Regression equation of Gibbs free energy versus temperature for physicochemical parameters of mango turbid juice

理化参数	样品	回归方程ΔG^*(kJ/mol)=f(T)	R^2
离心沉淀率SR	芒果汁	y=0.2691x+8.2828	0.9988
	芒果汁+$DEMP_1$	y=0.2751x+6.8516	1.0000
	芒果汁+$DEMP_2$	y=0.2813x+4.9547	0.9998
	芒果汁+$DEMP_3$	y=0.2729x+7.9553	0.9998
	芒果汁+$DEMP_4$	y=0.2774x+6.8870	0.9997
粒径	芒果汁	y=0.2831x+1.4648	1.0000
	芒果汁+$DEMP_1$	y=0.2819x+2.3030	0.9998
	芒果汁+$DEMP_2$	y=0.2707x+7.3958	0.9999
	芒果汁+$DEMP_3$	y=0.2719x+6.7462	0.9999
	芒果汁+$DEMP_4$	y=0.2782x+5.3392	1.0000

表 8 芒果浊汁离心沉淀率和感官评价值的相关性与回归方程

Table 8 Correlation and regression equation between centrifugal sedimentation rate and sensory evaluation value of mango turbid juice

理化参数	样品	回归方程	R^2
离心沉淀率SR	芒果汁	ss=1.3847SR−42.059	0.9834
	芒果汁+$DEMP_1$	ss=1.3505SR−46.161	0.9906
	芒果汁+$DEMP_2$	ss=0.6178SR−22.960	0.9959
	芒果汁+$DEMP_3$	ss=0.2163SR−8.8155	0.9974
	芒果汁+$DEMP_4$	ss=0.2092SR−9.3003	0.9931

注：ss表示感官值；SR表示离心沉淀率。

表 9　芒果浊汁的动力学和热力学的稳定性模型

Table 9　Stability models of kinetics and thermodynamics of mango turbid juice

理化参数	样品	动力学和热力学的稳定性模型
离心沉淀率SR	芒果汁	$ss = 1.3847\left\{SR_0\exp\left[t\frac{k_bT}{h}\exp\frac{-(269.1\times T+8282.8)}{RT}\right]\right\}-42.059$
	芒果汁+$DEMP_1$	$ss = 1.3505\left\{SR_0\exp\left[t\frac{k_bT}{h}\exp\frac{-(275.1\times T+6851.6)}{RT}\right]\right\}-46.161$
	芒果汁+$DEMP_2$	$ss = 0.6178\left\{SR_0\exp\left[t\frac{k_bT}{h}\exp\frac{-(281.3\times T+4954.7)}{RT}\right]\right\}-22.960$
	芒果汁+$DEMP_3$	$ss = 0.2163\left\{SR_0\exp\left[t\frac{k_bT}{h}\exp\frac{-(272.9\times T+7955.3)}{RT}\right]\right\}-8.8155$
	芒果汁+$DEMP_4$	$ss = 0.2092\left\{SR_0\exp\left[t\frac{k_bT}{h}\exp\frac{-(277.4\times T+6887)}{RT}\right]\right\}-9.3003$

表 10　稳定性预测模型的残差变异系数

Table 10　Residual coefficient of variation of the stability prediction model

样品	温度(K)	稳定时间观察值(d)	稳定时间预测值(d)	预测标准误差ε	模型的残差变异系数(%)
芒果汁	298.15	21	24.98	3.14	15.94
	308.15	20	21.69		
	318.15	18	18.98		
芒果汁+$DEMP_1$	298.15	30	29.18	1.63	6.42
	308.15	25	25.81		
	318.15	21	22.99		
芒果汁+$DEMP_2$	298.15	60	59.78	0.71	1.30
	308.15	55	54.21		
	318.15	50	49.41		
芒果汁+$DEMP_3$	298.15	185	180.05	4.59	2.87
	308.15	160	156.98		
	318.15	135	137.91		
芒果汁+$DEMP_4$	298.15	195	190.86	4.57	2.64
	308.15	170	168.74		
	318.15	155	150.20		

型能够比较精确地预测芒果汁的货架期。25 ℃ 下，与未添加果胶的芒果浊汁相比，添加了 $DEMP_1$、$DEMP_2$、$DEMP_3$、$DEMP_4$ 的芒果浊汁的稳定时间从 21 d 分别延长至 30、60、185、195 d。

2.5　相关性分析

对果胶的理化性质与芒果浊汁稳定时间进行相关性分析，分析结果如图 6 所示。芒果浊汁稳定时间与果胶 DE 值、分子量、粒径、电位、黏度之间的相关系数分别为−0.91、−0.99、−0.61、−0.84、−0.81，呈现出负相关关系。其中，稳定时间与果胶分子量呈显著负相关（P<0.05），稳定时间与果胶 DE 值、电位、黏度呈较强的负相关，但统计学上不显著。芒果浊汁稳定时间与果胶 GalA 含量、溶解性、持水性之间的相关系数分别为 0.31、0.19、0.84，呈现出正相关关系。其中，稳定时间与果胶的持水性呈较强的正相关，但统计上不显著。

低酯芒果皮果胶（$DEMP_3$/$DEMP_4$）可能通过多机制协同提升芒果浊汁的稳定性。其一，脱酯化显著增加游离羧基数量，提高体系 Zeta 电位绝对值（如 $DEMP_4$Zeta 电位达−36.09 mV），增强胶体颗粒间静电排斥作用，有效抑制果胶与颗粒聚集。霍璟怡[36]的研究也表明，随着果胶添加量的增加，柠檬汁的 Zeta 电位的绝对值逐渐增加，体系稳定性不断增强，

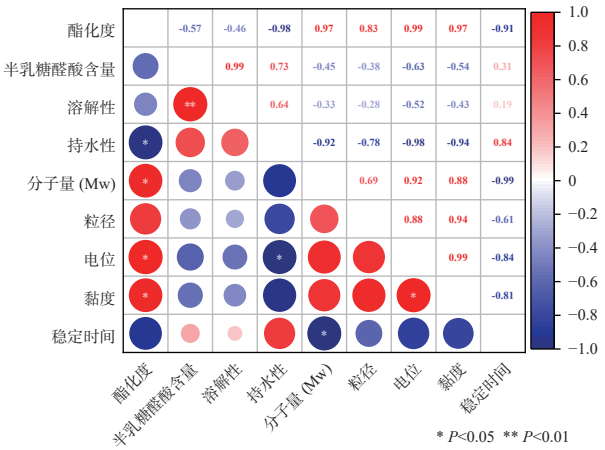


图 6　果胶性质与稳定时间之间的相关性分析热图

Fig.6　Heat map of the correlation analysis between pectin properties and stabilization time

高 Zeta 电位值表明粒子间存在较强的静电排斥力，有助于防止粒子聚集，从而增强体系的稳定性。其二，低 DE 果胶的羧基数量多，促进其与果汁中钙离子通过“蛋盒模型”交联，形成三维网络结构[37−38]，该网络包裹悬浮颗粒，显著降低粒径增长速率（$DEMP_3$/$DEMP_4$ 组粒径增幅最低），延缓沉降进程。其三，其强 WHC 形成稳定水化层，阻隔分子直接接触，减少聚集的可能性，防止分层或相分离[3,36]。三重效应共

同延长芒果浊汁稳定时间，其中 $DEMP_4$ 稳定期达 195 d。

3 结论

本实验提取并制备了四种不同 DE 值的芒果皮果胶（$DEMP_1$~$DEMP_4$），将其添加到芒果浊汁中，系统揭示了果胶 DE 值对芒果浊汁稳定性的调控机制，并构建了基于动力学与热力学参数的货架期预测模型。结果表明，低酯果胶（$DEMP_3$/$DEMP_4$）显著提升了芒果浊汁的稳定性。其中添加 $DEMP_4$ 的芒果浊汁离心沉淀率达 44.46%，悬浮稳定性提升 26.76%，不稳定性指数降低 25.47%，重力沉降时间从对照组的 0.79 个月延长至 6.30 个月；采用 Boltzmann 与 Logistic 模型拟合沉降动力学，发现低酯果胶能够显著延长沉降反弯点时间；基于 Arrhenius 方程获得了果汁稳定动力学及热力学模型，模型推测芒果浊汁在不同温度下的稳定性时间具有高预测精度，25 ℃ 下添加 $DEMP_1$~$DEMP_4$ 的芒果浊汁稳定时间较未添加果胶组的 21 d 分别延长至 30、60、185、195 d，预测模型残差变异系数均小于 15%。本研究揭示了低酯果胶对芒果浊汁的稳定机制，构建了精准的稳定性预测模型，但受限于原料单一性与机制表征手段，未来需融合多尺度表征技术阐明稳定机制本质，并综合评估果胶添加对果汁风味、口感等属性的长期影响。本文为芒果皮果胶资源的高值化利用及热带水果浊汁稳定化技术提供了理论依据与实践指导：建议优先选用 DE 值低于 50% 的低酯果胶作为浊汁稳定剂；建议利用本研究建立的稳定性预测模型快速评估和预测产品货架期。这对推动食品工业的可持续发展与产业升级具有积极意义。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] GUO Weiling, ZHENG Haoyu, HE Siyu, et al. Improvement of physicochemical characteristics, bioactivity, flavor and metabolic profiles of mango juice fermented by *Limosilactobacillus reuteri*[J]. International Journal of Food Microbiology, 2025, 431: 111087.

[2] MA Tianyu, WANG Chunguang, ZHANG Xinyue, et al. Unveiling the aromatic diversity of Fermented mango juices through 40 plant-derived *Lactiplantibacillus plantarum*[J]. Food Chemistry, 2025, 467: 142026.

[3] KE Yingying, DAI Taotao, XIAO Min, et al. Industry-scale microfluidizer system produced whole mango juice: Effect on the physical properties, microstructure and pectin properties[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 75: 102887.

[4] ZHANG Sai, WU Jihong, ZHENG Jixiang, et al. Deep eutectic solvents/water systems in different pH for extracting pectin from mango peel: Analysis of physicochemical and structural properties [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 168: 111578.

[5] PACHECO-JIMÉNEZ A A, LIZARDI-MENDOZA J, HEREDIA J B, et al. Physicochemical characterization of pectin and mango peel (*Mangifera indica* L.) from Mexican cultivars[J]. Heliyon, 2024, 10(15): e35184.

[6] THAKARE V B, JADEJA G C, DESAI M A. Extraction of mangiferin and pectin from mango peels using process intensified tactic: A step towards waste valorization[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2023, 192: 280−288.

[7] GEMECHU B, KEYATA E O, GELETA T E, et al. Optimization of mango peel pectin extraction (*Mangifera indica* L.): For the production of jam and jelly[J]. Applied Food Research, 2024, 4(1): 100411.

[8] CHEN Sijun, XIAO Leyan, LI Songjie, et al. The effect of sonication-synergistic natural deep eutectic solvents on extraction yield, structural and physicochemical properties of pectins extracted from mango peels[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 86: 106045.

[9] 黄珣洋. 枸杞浊汁饮料的制备及稳定性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024. [HUANG Xunyang. Study on the preparation and stability of cloudy wolfberry beverage[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.]

[10] 付劭杰, 毕金峰, 曹凤, 等. 非浓缩还原苹果汁贮藏期颗粒稳定性与果胶结构相关性研究[J]. 核农学报, 2024, 38(10): 1941−1950. [FU Shaojie, BI Jinfeng, CAO Feng, et al. Correlation analysis between particle stability and pectin structure of not from concentrate apple juice during storage[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(10): 1941−1950.]

[11] LIN Yang, LIU Changshuai, WANG Lixia, et al. Revealing the dominant role of pectin in regulating the stability of Huyou turbid juice: Insights from hydrodynamic cavitation[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 161: 110864.

[12] TANG Wei, LIN Xinyi, YE Longfei, et al. Effect of pectin with different esterification degree on the freeze-thaw stability of gluten protein: Structures, functional properties, and cryoprotective mechanism[J]. Food Chemistry, 2025, 465: 142040.

[13] GAO Fei, MAO Xueying, WANG Pengjie, et al. The effect of degree of esterification of pectin on the grainy properties of post-heated fermented milk[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 168: 111484.

[14] WEI Huiying, QI Junru, LIAO Jinsong, et al. Co-influence of the degree of esterification and degree of amidation on the properties of acid-sugar-calcium amidated pectin gels[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 159: 110707.

[15] JAMSAZZADEH K Z, SHPIGELMAN A, KYOMUGASHO C, et al. The impact of extraction with a chelating agent under acidic conditions on the cell wall polymers of mango peel[J]. Food Chemistry, 2014, 161: 199−207.

[16] WAN Li, CHEN Qianqian, HUANG Mengling, et al. Physiochemical, rheological and emulsifying properties of low methoxyl pectin prepared by high hydrostatic pressure-assisted enzymatic, conventional enzymatic, and alkaline de-esterification: A comparison study[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 93: 146−155.

[17] CHAIWARIT T, MASAVANG S, MAHE J, et al. Mango (cv. Nam Dokmai) peel as a source of pectin and its potential use as a film-forming polymer[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 102: 105611.

[18] TANG Chao, SHI Zhaojuan, WU Jun, et al. Effect of degree of esterification on the stability of high internal phase Pickering emulsions (HIPPEs) fabricated with pectin-whey protein isolate complexes[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2024, 59(6): 4154−4165.

[19] LI Ruoxuan, FAN Hekai, LI Bowen, et al. Comparison on emulsifying and emulgelling properties of low methoxyl pectin with varied degree of methoxylation from different de-esterification

methods[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 263: 130432.
[20] MÉNDEZ D A, MARTÍNEZ-ABAD A, MARTÍNEZ-SANZ M, et al. Tailoring structural, rheological and gelling properties of watermelon rind pectin by enzymatic treatments[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108119.
[21] NGUYEN H D H, NGUYEN H V H, SAVAGE G P. Properties of pectin extracted from Vietnamese mango peels[J]. Foods, 2019, 8(12): 629.
[22] 杨子逸, 王玉荣, 王振宇, 等. 山楂枸杞复合果汁悬浮和色泽稳定性的研究[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(9): 95−101. [YANG Ziyi, WANG Yurong, WANG Zhenyu, et al. Study on suspension and color stability of hawthorn-wolfberry composite fruit juice[J]. Storage and Process, 2024, 24(9): 95−101.]
[23] 张鹏戈, 张东向. 饮料中颗粒沉降时间的预测[J]. 食品与机械, 1995, 11(3): 14−16. [ZHANG Pengge, ZHANG Dongxiang. Prediction of granula subsidence time in beverage[J]. Food and Machinery, 1995, 11(3): 14−16.]
[24] 刘江波, 李俊. 软土路基病害机理及 Boltzmann 沉降模型应用研究[J]. 公路工程, 2016, 41(3): 203−207, 241. [LIU Jiangbo, LI Jun. Study on damage mechanism and Boltzmann model of soft clay embankment[J]. Highway Engineering, 2016, 41(3): 203−207, 241.]
[25] 康馨月, 廖姿莹, 马一鸣, 等. 乳酸菌发酵香菇汁过程中品质变化及动力学模型的建立[J]. 现代食品科技, 2024, 40(11): 140−148. [KANG Xinyue, LIAO Ziying, MA Yiming, et al. Quality change and kinetic model of *Lentinula edodes* juice fermentation by lactic acid bacteria[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(11): 140−148.]
[26] 李明, 赵良忠, 王容, 等. 果汁型豆酸汤饮料稳定性动力学模型初探[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(9): 2555−2561. [LI Ming, ZHAO Liangzhong, WANG Rong, et al. Exploration on stability kinetics model of juice soysour soup beverage[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(9): 2555−2561.]
[27] 欧红艳, 赵良忠, 刘婷, 等. 豆清饮料发酵及贮藏过程中品质变化及动力学研究[J]. 大豆科学, 2021, 40(4): 528−538. [OU Hongyan, ZHAO Liangzhong, LIU Ting, et al. Study on quality change and kinetics of soybean whey beverage during fermentation and storage[J]. Soybean Science, 2021, 40(4): 528−538.]
[28] 韦鑫, 黄安, 陈逸, 等. 超声辅助酶法提取菠萝蜜果皮果胶工艺优化及低酯化改性[J]. 食品工业科技, 2024, 45(16): 239−248. [WEI Xin, HUANG An, CHEN Yi, et al. Optimization of extraction of pectin from jackfruit peel by ultrasonic-assisted enzymatic method and modification of de-esterification[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(16): 239−248.]
[29] 李梦洋, 朱佳奕, 孙庆申. 低甲氧基果胶在乳品中的应用及其制备方法研究进展[J]. 乳业科学与技术, 2022, 45(1): 67−73. [LI Mengyang, ZHU Jiayi, SUN Qingshen. Progress in the application of low methoxy pectin in milk products and its preparation methods[J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2022, 45(1): 67−73.]
[30] WAN Li, WANG Haiyan, ZHU Yu, et al. Comparative study on gelling properties of low methoxyl pectin prepared by high hydrostatic pressure-assisted enzymatic, atmospheric enzymatic, and alkaline de-esterification[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 226: 115285.
[31] WANG Chun, QIU Wenyi, CHEN Tingting, et al. Effects of structural and conformational characteristics of *Citrus* pectin on its functional properties[J]. Food Chemistry, 2021, 339: 128064.
[32] 陈志杰, 陈哲, 赵凤岐. 软基沉降拟合的 Boltzmann 曲线模型研究[J]. 煤炭工程, 2014, 46(12): 90−92, 96. [CHEN Zhijie, CHEN Zhe, ZHAO Fengqi. Soft soil foundation settlement curve fit with Boltzmann model[J]. Coal Engineering, 2014, 46(12): 90−92, 96.]
[33] 施伽, 范志平, 陆雅丽, 等. 刺梨果汁饮料的贮藏稳定性及其货架期预测[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(20): 8076−8083. [SHI Jia, FAN Zhiping, LU Yali, et al. Storage stability and shelf-life prediction of *Rosa roxburghii* Tratt. juice beverage[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(20): 8076−8083.]
[34] HUI Linchong, ZHANG Chan, YU Junjie, et al. Structural characterization, gelling properties, and beef preservation applications of pectin extracted from sweetpotato residue using a hydrothermal method[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 314: 144348.
[35] 王容, 赵良忠, 莫鑫, 等. 米酸汤发酵工艺优化及贮存稳定性预测模型[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(6): 191−198. [WANG Rong, ZHAO Liangzhong, MO Xin, et al. Research on the optimization of fermentation technology and the prediction model of storage stability of rice acid soup[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(6): 191−198.]
[36] 霍璟怡. 冷冻柠檬汁解冻后分层絮凝调控研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024. [HUO Jingyi. Modulation of post-thaw stratified flocculation of frozen lemon juice[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.]
[37] PATOVA O A, KOSOLAPOVA N V, GOLOVCHENKO V V. Complex influence of structural characteristics of low-methoxyl pectins on rheological properties of semi-solid Ca-gels[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280: 135633.
[38] FRAEYE I, COLLE I, VANDEVENNE E, et al. Influence of pectin structure on texture of pectin-calcium gels[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(2): 401−409.