不同浓缩方式对梨浓缩汁品质的影响

劳颖仪[1,2]，孟千杰[1,2]，徐玉娟[2]，许芷杰[3]，吴继军[2]，余元善[2]，邹波[2]，程丽娜[2]，温靖[2]，胡腾根[2*]

（1.华南农业大学食品学院，广东广州 510642）（2.广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所，农业农村部功能食品重点实验室，广东省农产品加工重点实验室，广东广州 510610）（3.岭南师范学院食品科学与工程学院，广东湛江 524037）

摘要：以多酚氧化酶（PPO）、5-羟甲基糠醛（5-HFM）、总酚含量、可滴定酸、维生素C（Vc）及抗氧化活性等为指标，探究了真空浓缩、膜浓缩、冷冻浓缩和热浓缩对水晶梨营养成分和抗氧化活性成分的影响。结果表明，四种浓缩方式均提升了梨汁的总酚含量、总抗氧化性、$ABTS^+$及DPPH自由基清除能力；而还原糖含量无显著差异。真空浓缩梨汁糖度最高（60 °Bx），且表现出最佳的抗氧化效果；但其PPO活性较高。热浓缩梨汁总酚含量最高、可溶性蛋白含量最低（0.015 mg/mL）；但生成了5-HMF，而其他方式未检测到该物质。冷冻浓缩和膜浓缩对梨汁的可滴定酸和Vc含量有不同程度的影响。相关性分析表明，各指标间存在不同程度的相关性，主成分分析提取的三个特征因子累计贡献率达94.53%，反映出多种指标对梨汁品质的综合影响。综合分析结果显示，真空浓缩获得的梨汁综合评分最高（1.95），并在浓缩效率和抗氧化活性方面具有显著优势；热浓缩在提高梨汁营养含量具有一定优势，但因5-HFM生成，其综合得分次之。该研究为梨汁浓缩及水果深加工提供了理论依据。

关键词：梨；浓缩汁；品质；营养成分

文章编号：1673-9078(2025)12-156-164 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1343

Effects of Different Concentration Methods on the Quality of Pear Juice Concentrates

LAO Yingyi[1,2], MENG Qianjie[1,2], XU Yujuan[2], XU Zhijie[3], WU Jijun[2], YU Yuanshan[2], ZOU Bo[2], CHENG Lina[2], WEN Jing[2], HU Tenggen[2*]

(1.College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China) (2.Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China) (3.College of Food Science and Engineering, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524037, China)

Abstract: The effects of vacuum concentration, membrane concentration, freezing concentration and thermal concentration on the nutrient composition and antioxidant components of crystal pears were investigated using polyphenol oxidase (PPO), 5-hydroxymethylfurfural (5-HFM), total phenol content, titratable acidity, vitamin C (Vc) content and antioxidant activity as the indicators. The results showed that all four concentration methods increased the total phenolic content, total antioxidant activity,

引文格式：

劳颖仪,孟千杰,徐玉娟,等.不同浓缩方式对梨浓缩汁品质的影响[J].现代食品科技,2025,41(12):156-164.

LAO Yingyi, MENG Qianjie, XU Yujuan, et al. Effects of different concentration methods on the quality of pear juice concentrates [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 156-164.

收稿日期：2024-09-09；修回日期：2024-12-10；接受日期：2024-12-12

基金项目：广州市科技计划项目（2023E04J1269）；广东省农业科学院金颖之光人才项目（R2023PY-JG015）；清远市连州市水晶梨省级现代农业产业园项目；科技创新战略（农业科研主力军建设）专项（2024 工作站 16）

作者简介：劳颖仪（1999-），女，硕士研究生，研究方向：食品加工与安全，E-mail：LaoYY0808@163.com；共同第一作者：孟千杰（1998-），女，硕士研究生，研究方向：果蔬保鲜，E-mail：mengqj524@163.com

通讯作者：胡腾根（1989-），男，博士，助理研究员，研究方向：果蔬加工，E-mail：hu.tenggen@foxmail.com

and ABTS$^+$ and DPPH radical scavenging capacities of pear juice, with insignificant difference in reducing sugar content. Vacuum-concentrated pear juice had the highest sugar content (60 °Bx) and showed the greatest antioxidant effect, althoughhaving a higher PPO activity. Thermal-concentrated pear juice had the highest total phenolic content and the lowest soluble protein content (0.015 mg/mL), while causing the generation of 5-HMF (which was not detected otherwise in the juices treated by other methods). Freeze-concentration and membrane-concentration affected the titratable acid and Vc contents of pear juice to different extents. Correlation analysis showed that there were different degrees of correlation between the indicators, and the cumulative contribution of the three characteristic factors extracted from the principal component analysis reached 94.53%, reflecting the comprehensive influence of multiple indicators on the quality of pear juice. The comprehensive analysis showed that the pear juice obtained via vacuum concentration had the highest comprehensive score (1.95) and significant advantages in concentration efficiency and antioxidant activity; thermal concentration had certain advantages in improving the nutrient content of pear juice, but due to the generation of 5-HFM, its comprehensive score was the second highest. This study provides a theoretical basis for pear juice concentration and fruit deep processing.

Key words: pear; juice concentrate; quality; nutrient composition

我国拥有丰富的梨果资源，是梨属植物的中心发源地，梨果的总产量仅次于苹果和柑橘，是我国重要的经济作物之一[1]。梨不仅是经济作物中的重要一环，也因其药食两用的特性而在中医药和食补领域中占据着重要地位。梨果富含多种营养成分，包括维生素、矿物质、蛋白质和膳食纤维等，这些成分为梨果赋予了多重保健功效，如清热降火、清心润肺、化痰止咳、退热等，因而具有较高的食补价值[2]。此外，梨果在食用和药用上的双重功能，使其在我国传统饮食文化中也占据了重要地位。

尽管梨果具有如此重要的经济与食用价值，但目前我国梨产业仍以鲜果销售为主，且鲜果市场存在着供需不平衡的现象。据统计，每年约有 30% 的梨果产量由于市场需求疲软而被低价处理，或者由于保存不当导致大量腐烂，造成了严重的资源浪费[3]。这一问题在我国南方地区尤为突出，南方地区是砂梨的主要产区，而水晶梨作为早熟砂梨的代表性品种，因其较早上市，常面临集中上市造成的市场供过于求问题。此外，由于采后商品化处理和深加工环节相对欠缺，南方的梨果在市场中的保值增值能力有限。因此，提升梨果的深加工水平，充分挖掘其附加值，对于缓解市场供需矛盾，减少资源浪费，促进梨产业的可持续发展具有重要意义[4]。

在众多水果深加工方式中，浓缩技术逐渐在我国占据重要地位。浓缩果汁不仅能够保留水果的营养成分和独特风味，还具有易于储存、运输便捷、保质期长等优点，此外，浓缩果汁还可作为糕点、果酒、果酱等进一步加工产品的重要原料[5]。随着技术的进步，目前果汁的浓缩技术已经发展出多种方法，包括真空蒸发技术、冷冻浓缩技术、膜技术以及加热浓缩等。这些浓缩方法在实现果汁浓缩的同时，由于处理温度、操作压力等工艺条件的差异，可能对浓缩果汁的营养成分、风味、色泽和功能性产生显著影响[6]。因此，为了生产出品质更高、营养成分保留更完整的浓缩梨汁，深入研究不同浓缩方式对梨汁品质的影响显得尤为重要。

基于此，本文选择了真空浓缩、膜浓缩、冷冻浓缩和热浓缩四种常见的浓缩技术，系统地对比分析了它们对水晶梨汁中主要营养物质和功能成分的影响。通过实验研究，旨在探讨各浓缩方式对梨汁营养成分、抗氧化性和感官品质的具体影响，为高品质浓缩梨汁的工业化生产提供科学依据。这不仅有助于提高梨果的深加工水平，推动梨产业的发展，还能为其他水果的深加工提供参考和借鉴。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

水晶梨，采集于广东清远连州；碳酸钠、氯化钠、柠檬酸、酒石酸钾钠、苯酚、氢氧化钠、无水亚硫酸钠、乙酸锌、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠，天津市福晨化学试剂厂；没食子酸、偏磷酸，天津市科密欧化试剂有限公司；无水甲醇（分析纯）、色谱级甲醇、3,5-二硝基水杨酸，天津大茂化学试剂公司；盐酸，广州化学试剂厂；邻苯二酚、DPPH、ABTS，上海麦克林生化科技有限公司；牛血清蛋白标准品、考马斯亮蓝 G-250 染色液、葡萄糖标准品，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；抗坏血酸、福林酚（Folin-Ciocalteu）试剂，上海源叶生物科技有限公司；反渗透膜，杭州瑞纳膜工程有限公司。

1.2 仪器与设备

HP-100 高速多功能粉碎机，浙江永康市荣浩工贸有限公司；ME204 电子分析天平，上海之信仪器有限公司；Vortex-Genie2 多用途涡旋混合器，美国 Scientific Industries 公司；N-1300 旋转蒸发仪，日本东京理化公司；D3024R 台式高速冷冻离心机，美国赛洛捷克 SCILOGEX 公司；PB-10 型 PH 值计，赛多利斯公司；AP-55 数显糖度计，衢州艾普计量仪器有限公司；LC-20AT 高效液相色谱、UV-1800 紫外可见分光光度计，日本岛津公司；BCD-226STV 型冰箱，青岛海尔股份有限公司；FDU-2110 型冷冻干燥机，上海爱朗仪器有限公司；1812 型小试膜浓缩设备，杭州瑞纳膜工程有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 梨汁的制备

选择完整且无破损的新鲜水晶梨，去除果梗后清洗干净，并沥干水分。去皮切块后，使用榨汁机后经 200 目滤网过滤，得到新鲜梨汁，即时制备使用。

1.3.2 浓缩梨汁的制备

1.3.2.1 冷冻浓缩

取 2 L 梨汁 −18 ℃条件下冷冻 24 h，室温（25 ℃）的条件下解冻梨汁 2 h，4 ℃保留样品待测。

1.3.2.2 真空浓缩

取 2 L 梨汁，在压强 0.007 MPa、转速 80 r/min 条件下，40 ℃水浴加热 2 h，4 ℃保留样品待测。

1.3.2.3 膜浓缩

取 2 L 梨汁，在 2 MPa 压强下，采用反渗透膜浓缩 2 h，4 ℃保留样品待测。

1.3.2.4 热浓缩

取 2 L 梨汁，水浴蒸发 2 h，4 ℃保留样品待测。

1.3.3 浓缩梨汁理化指标的测定

为了测定浓缩梨汁的理化性质，首先分析了浓缩梨汁的糖度及 pH 值。随后，为了在同一条件下衡量梨汁的多酚氧化酶活性、5-羟甲基糠醛、总酚、还原糖、可滴定酸、可溶性蛋白、Vc 和抗氧化活性含量，用蒸馏水将所有的浓缩梨汁的糖度稀释到 10 °Bx 进行测定。

1.3.3.1 糖度的测定

使用糖度计，各样品重复处理三次，取平均值。

1.3.3.2 pH值的测定

使用 pH 值计，各样品重复处理三次，取平均值。

1.3.3.3 多酚氧化酶（PPO）活性的测定

参考苏菲烟等[7]的方法，略作修改。在 30 ℃下，取 5 μL 待测样品酶液、120 μL 250 mmol/L 的磷酸钠盐缓冲液（pH 值 7.0）和 30 μL 0 50 mmol/L 邻苯二酚水溶液充分混合，在 420 nm 波长处的测定并监测其吸光度值变化，以每分钟 OD_{420} 变化 0.001 所需的酶量为一个酶活力单位。按式（1）计算多酚氧化酶活残留率。

$$C=\frac{A}{A_0}\times 100\% \tag{1}$$

式中：

C——多酚氧化酶活残留率，%；

A——处理后的酶活力，U/g；

A_0——处理前的酶活力，U/g。

1.3.3.4 5-羟甲基糠醛（5-HMF）含量的测定

使用高效液相色谱法检测浓缩梨汁中 5-HMF[8]。取 1 mL 待测样品，加 3 mL φ=10% 甲醇溶液，超声处理 30 min。离心取上清液，过 0.45 μL 有机滤膜后待测。液相色谱测定条件：C18 色谱柱（4.6 mm×250 mm, 5 μm），流动相为甲醇 : 水（5:95, V/V），柱温设定为 30 ℃，检测波长 285 nm，进样量为 10 μL，流速为 1.0 mL/min。样品中的 5-HMF 含量通过标准曲线计算。

1.3.3.5 总酚含量的测定

采用 Folin-Ciocalteu 检测法[9]略作修改测定总多酚含量。取 1 mL 待测样品，加入 2 mL 福林酚试剂，振荡混合后再加入 3 mL 10 wt.% 碳酸钠溶液，避光放置 1 h，在 765 nm 波长处的测定其吸光度值。每组样品测定 3 次，结果以没食子酸当量表示。

1.3.3.6 还原糖含量的测定

采用 DNS（3,5-二硝基水杨酸）法[10]略作修改进行测定还原糖含量。取 2 mL 待测样品于试管中，与 3 mL DNS 溶液混匀，沸水加热 5 min，冷却至 25 ℃，并用水补足至 15 mL，混匀，在 540 nm 处测定吸光值。每组样品测定 3 次，从标准曲线上得到对应的葡萄糖质量浓度，计算还原糖得率。

1.3.3.7 可滴定酸含量的测定

参照 GB 12456-2021 方法[11]采用酸碱滴定法测定样品中的可滴定酸含量。

1.3.3.8 可溶性蛋白含量的测定

参考黄宁馨[12]的考马斯亮蓝 G-250 染色法，取待测样品，与考马斯亮蓝染液混匀后，在 595 nm 处测定吸光值。每组样品测定 3 次，以牛血清蛋白作标准曲线，计算可溶性蛋白含量。

1.3.3.9 Vc含量的测定

使用高效液相色谱法检测浓缩梨汁中 Vc 含量[13]。取待测样品，过 0.45 μm 有机滤膜后待测。液相色谱测定条件：C18 色谱柱（4.6 mm×250 mm, 5 μm），流动相为 0.1 wt.% 偏磷酸溶液 : 甲醇（96:4, V/V），柱温设定为 30 ℃，检测波长 243 nm，进样量为 10 μL，流

量为1.0 mL/min。样品中的Vc含量通过标准曲线计算。

1.3.4 浓缩梨汁理化指标的测定

1.3.4.1 总抗氧化能力的测定

参考李晓华等[9]的方法，略作修改。取0.3 mL待测样品，加入2.7 mL预热至37 ℃的TPTZ工作液，充分摇匀后避光放置10 min，在593 nm处测定吸光度。用0.05 mg/mL的Vc溶液做阳性对照。每组样品测定3次，以$FeSO_4$溶液为标样作标准曲线，计算样品的总抗氧化能力。

1.3.4.2 $ABTS^+$自由基清除能力的测定

参考李晓华等[9]的方法，略作修改。取0.1 mL待测样品，加入2 mL的ABTS溶液，旋涡振荡10 s，室温条件下避光放置10 min，测定在734 nm处吸光度，记为A_1。对照组使用无水乙醇溶液代替ABTS工作液，测定吸光度值A_2。空白组使用无水乙醇代替样品溶液，测定吸光度值A_0。用0.05 mg/mL的Vc溶液做阳性对照。按式（2）计算$ABTS^+$自由基的清除率。

$$R_s=(1-\frac{A_1-A_2}{A_0})\times100\% \quad (2)$$

式中：

R_S——$ABTS^+$自由基清除能力，%；

A_0——空白组吸光度值；

A_1——样品溶液吸光度值；

A_2——对照组吸光度值。

1.3.4.3 DPPH自由基清除能力的测定

参考李晓华等[9]的方法，略作修改。取2 mL待测样品，加入0.2 mmol/L DPPH-φ=95%乙醇溶液2 mL，室温下避光静置30 min后，于517 nm波长处测定吸光度值，记为A_1。对照组以φ=95%乙醇溶液代替DPPH-95%乙醇溶液，测定吸光度值A_2。空白组以φ=95%乙醇代替样品溶液，测定吸光度值A_0。用0.05 mg/mL的Vc溶液做阳性对照。按式（2）计算DPPH自由基清除能力。

1.4 数据处理

试验数据采用SPSS 19.0软件进行统计分析，组间比较采用配对样本t检验，$P<0.05$为差异显著，所有试验均重复3次，数据采用平均值 ± 标准差表示，图采用Origin 2022进行绘制。

2 结果与分析

2.1 浓缩方式对糖度与pH值的影响

梨汁浓缩前后的糖度如图1所示。新鲜梨汁糖度为9.9 °Bx接近10 °Bx。经过浓缩后，真空浓缩梨汁糖度达到60 °Bx，冷冻浓缩与热浓缩达到30 °Bx，膜浓缩只有23.5 °Bx左右。相对而言膜浓缩效率最低，其次是冷冻浓缩。真空浓缩与热浓缩对原梨汁的需求量最少，即其原料损失最小。

梨汁浓缩前后的pH值如图2所示。原汁pH为4.54，经过4种方式浓缩后得到的梨汁pH值在4.34~4.63范围内，这可能是梨汁中的总酸物质均为弱酸，总酸物质在浓缩过程中虽有所减小，但对整体pH值得影响较小[14]。这表明，在不同浓缩方式下，尽管酸性物质的含量有所波动，但它们对梨汁整体酸碱平衡的调节作用依然保持稳定[15]。

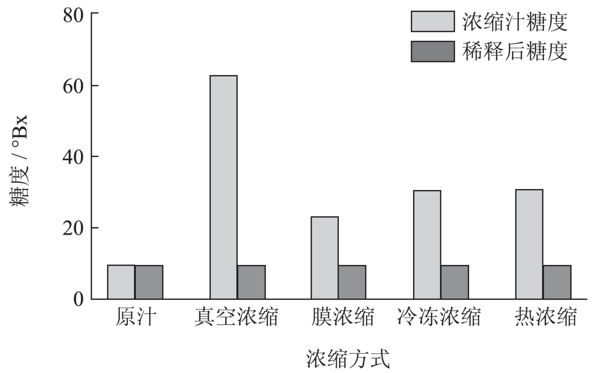

图1 浓缩方式对糖度的影响

Fig.1 Effect of concentration method on sugar content

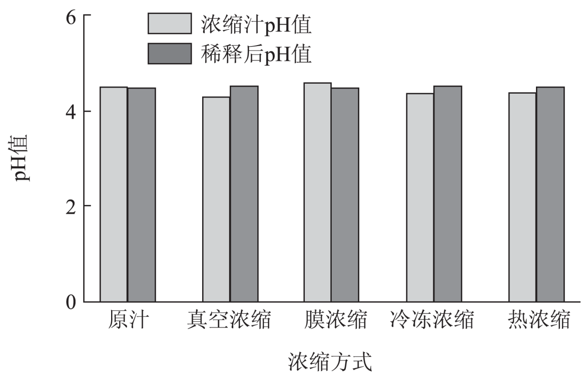

图2 浓缩方式对pH值的影响

Fig.2 Effect of concentration mode on pH

2.2 浓缩方式对多酚氧化酶活性的影响

在分子氧存在的情况下，PPO会与酚类物质发生反应，将其氧化为羟基醌，进而聚集生成黑色素物质，从而导致产品褐变，是使果汁酶促褐变的关键酶[16]。如图3所示，与原汁相比，经过不同的浓缩方式处理后只有热浓缩方式的梨汁多酚氧化酶活性降低，其余的多酚氧化酶活性均增加。真空浓缩后的多酚氧化酶活性最高，达1 357 U/g，为原汁的5倍。这是因为梨中PPO活性最适温度约为40 ℃，导致其活性最高；但真空浓缩时活性氧较少，从而抑制酶促褐变的发生，

保障浓缩后梨汁的品质[17]。而高温破坏 PPO 酶三维结构，导致 PPO 酶失活；且温度越高，对酶结构破坏越强[7]。因此，热浓缩得到的梨汁其 PPO 酶活下降最明显，PPO 活性及 PPO 保留率分别为 132 U/g 和 48.41%。

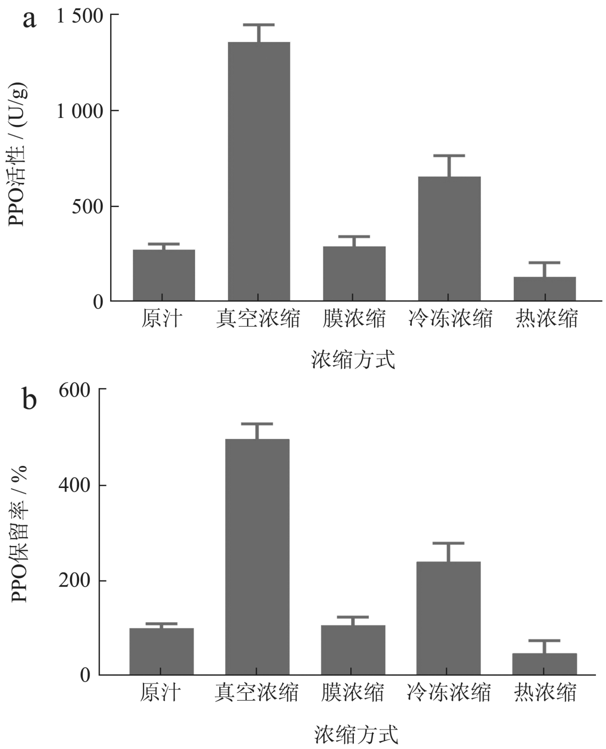

图 3 浓缩方式对多酚氧化酶活性与保留率的影响

Fig.3 Effect of concentration mode on polyphenol oxidase activity and retention rate

2.3 浓缩方式对5-羟甲基糠醛的影响

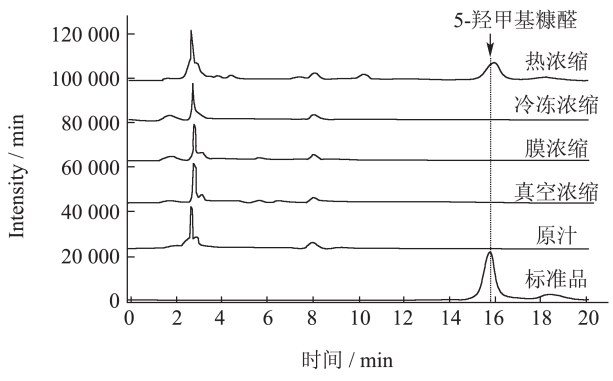

图 4 浓缩方式对 5-羟甲基糠醛的影响

Fig.4 Effect of concentration mode on 5-hydroxymethylfurfural

5-HMF 是单糖在酸性环境发生焦糖化反应与美拉德反应生成的产物，其存在会使梨汁颜色加深。浓缩方式对梨汁中 5-HMF 含量影响结果如图 4 所示。经过检测发现，几种不同的浓缩方式中，只有热浓缩方式会产生 5-HMF，其它方式的浓缩梨汁中均未检出；这是因为 5-HMF 浓度随着热处理或贮存温度的增加而急剧增加[18]。Cernisev 等[19]发现，保持温度在 50 ℃以下，能有效抑制美拉德反应的发生，从而减缓产品的褐变程度；在真空浓缩、膜浓缩和冷冻浓缩的处理温度均低于此值，5-HMF 未分解产生或产生量极少[20]。

2.4 浓缩方式对总酚含量的影响

酚类物质普遍存在与蔬菜水果中，对蔬果的风味、色泽以及抗氧化活性起着重要作用。此类物质具有优良的抗氧化特性，能够中和活性氧中间体，阻断进一步的氧化反应，从而对人体健康产生积极影响[21]。不同浓缩梨汁中总酚含量如图 5 所示。浓缩后的梨汁中的总酚含量均比原汁高，其中热浓缩方式总酚含量最高，为 0.18 mg/mL，其次为膜浓缩方式得到的梨汁，其总酚含量为 0.15 mg/mL；这可能是由于不溶性酚变为可溶性酚溶于梨浓缩汁中[15]。该结果与陈树俊等[22]的探究不同温度对浓缩梨汁多酚含量的结果相似，在 50、60、70、80 ℃条件下将梨汁浓缩至 60 °Bx，总酚含量分别为 357、363、373、382 μg/mL，发现随着提取温度的升高，梨汁中的总酚含量呈现递增趋势。

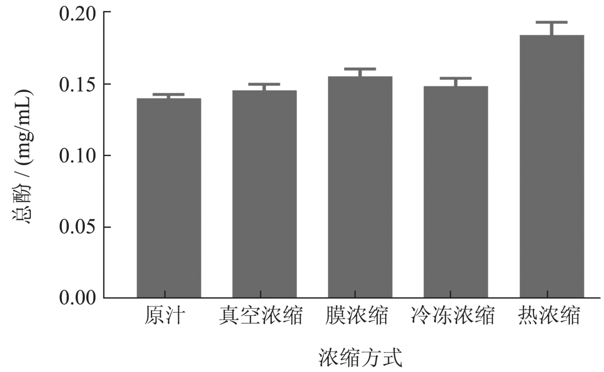

图 5 浓缩方式对总酚含量的影响

Fig.5 Effect of concentration mode on total phenol content

2.5 浓缩方式对梨汁中还原糖含量的影响

还原糖含量对梨汁的感官品质和微生物抑制能力具有重要影响[23]。不同浓缩方式对浓缩梨汁还原糖的含量影响如图 6 所示。所选的几种梨汁浓缩方式对梨汁中的还原糖较小影响，原汁的还原糖含量为 65.21 mg/mL，浓缩后的梨汁还原糖含量为 63.08~64.68 mg/mL，未有显著差异（$P>0.05$）。这可能是因为在浓缩过程中部分还原糖参与了美拉德反应，并与有机酸反应生成褐色色素；同时，在酸性条件下，二糖和多糖不断水解生成还原糖[24]。浓缩过程中，上述还原糖的生成和消耗同时进行，维持在动态平衡状态，表现为几种浓缩方式的最终还原糖含量变化较小[25]。

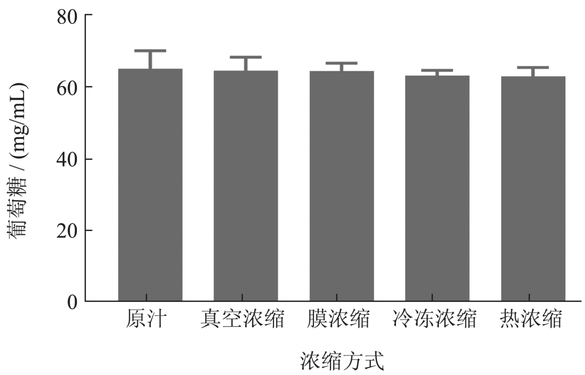

图 6 浓缩方式对梨汁中还原糖含量的影响

Fig.6 Effect of concentration method on reducing sugar content

2.6 浓缩方式对可滴定酸的影响

可滴定酸是影响果汁味道和香气的重要指标，是形成低 pH 值环境的关键因素，并可抑制有害菌的生长，从而有助于食品的保存。梨汁浓缩后其可滴定酸的变化如图 7 所示。结果显示未浓缩前梨汁中的可滴定酸含量为 20.87 mmol/L，热浓缩与冷冻浓缩后对梨汁中的可滴定酸含量没有明显影响；经过真空浓缩与膜浓缩后梨汁中的可滴定酸含量下降，其含量分别为 14.32 和 13.63 mmol/L。酸度的降低可能是由于梨汁中酸类物质发生氧化聚合反应，以及多糖在酸性条件下水解所致。高欣月等[26]也发现，苹果汁经过冷冻浓缩后，可滴定酸的变化较小，而经过真空浓缩后其可滴定酸下降。

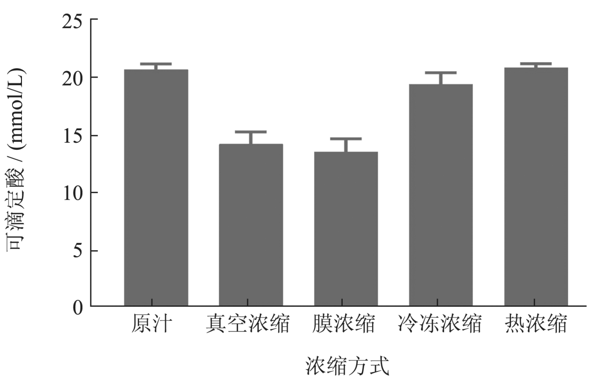

图 7 浓缩方式对可滴定酸的影响

Fig.7 Effect of concentration mode on titratable acids

2.7 浓缩方式对可溶性蛋白的影响

可溶性蛋白与还原糖发生美拉德反应，生成一系列深色物质，是非酶褐变的催化剂与反应物。浓缩梨汁中可溶性蛋白含量如图 8 所示。结果显示真空浓缩、膜浓缩与冷冻浓缩都能较好的保护梨汁中的蛋白。而热浓缩方式对梨汁中的蛋白破坏较大，可溶性蛋白含量从 0.06 mg/mL 降低至 0.02 mg/mL，其可能的原因是热浓缩过程梨汁经过高温后蛋白质变性严重，其结构被破坏严重。

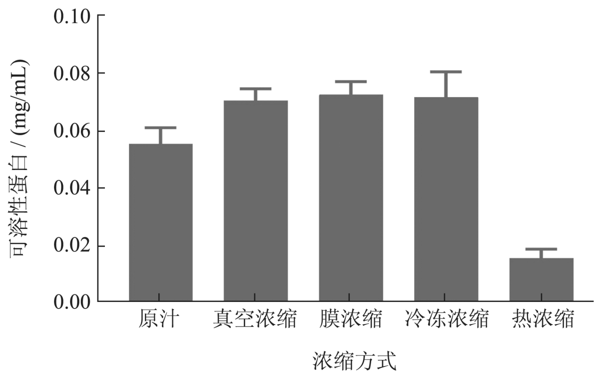

图 8 浓缩方式对可溶性蛋白含量的影响

Fig.8 Effect of concentration method on soluble protein content

2.8 浓缩方式对Vc含量的影响

维生素 C（Vc）为人体必需的营养素，具有多种功效，但人体无法自行合成 Vc，需通过食物或营养补充剂来供应身体所需，因此，V_C 含量是梨中重要的营养指标之一[27]。图 9 展示了不同浓缩方式对浓缩梨汁中 Vc 含量的影响。结果表明，膜浓缩与热浓缩处理的梨汁 Vc 含量显著增加（P＜0.05），分别为 36.00 和 38.52 μg/mL ；相反，真空浓缩与冷冻浓缩处理的梨汁中 Vc 含量有所降低，其中真空浓缩方式处理后的梨汁 Vc 含量最低，为 28.93 μg/mL，可能是真空浓缩中持续的压力使得 Vc 结构遭到破坏，使得其含量降低；而冷冻浓缩中 Vc 夹杂在冰晶中流失[28,29]。这与陈学红等[30]发现真空浓缩处理会降低芦笋汁的 Vc 含量结果一致。

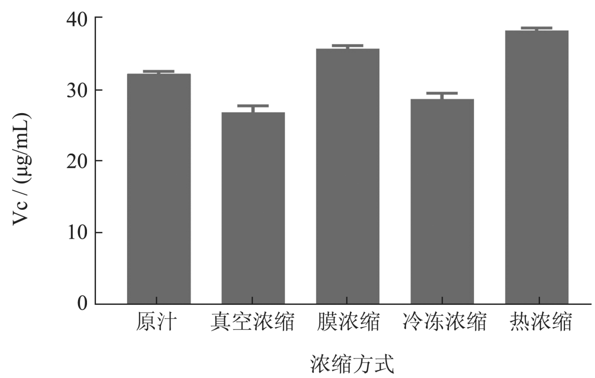

图 9 浓缩方式对 Vc 含量的影响

Fig.9 Effect of concentration method on Vc content

2.9 浓缩方式对抗氧化活性的影响

抗氧化能力是衡量浓缩梨汁的重要指标，不同浓缩方式对抗氧化活性的影响如表 1 所示。总体而言，对梨汁进行浓缩后，可有效提高其抗氧化活性。

经过真空浓缩的梨汁展现了最佳的抗氧化性，其中对 ABTS$^+$ 自由基清除能力达到了 78.21%，并高于 0.05 mg/mL Vc 的抗氧化性。Dhumal 等[31]采用不同浓缩方式对石榴汁进行处理，也发现真空浓缩的抗氧化活性优于其他方式，且真空浓缩法的色度更优。

表 1 不同浓缩方式对抗氧化活性的影响

Table 1 Effect of different concentration methods on antioxidant activity

浓缩方式	总抗氧化性/($FeSO_4$mmol/L)	ABTS$^+$·清除率/%	DPPH·清除率/%
Vc	0.71 ± 0.01^b	33.69 ± 1.79^d	95.88 ± 0.94^a
原液	0.18 ± 0.02^c	20.36 ± 1.63^f	36.61 ± 0.98^e
真空浓缩	1.04 ± 0.15^a	78.21 ± 2.45^a	93.33 ± 0.35^{bc}
膜浓缩	0.31 ± 0.01^c	25.93 ± 0.71^e	74.18 ± 0.90^d
冷冻浓缩	0.58 ± 0.09^b	39.63 ± 0.58^c	91.72 ± 1.38^c
热浓缩	0.72 ± 0.04^b	50.81 ± 1.26^b	94.41 ± 1.38^{ab}

注：同列中不同字母表示差异显著（P＜0.05）。

2.10 不同浓缩方式的果汁品质综合评价

2.10.1 不同浓缩方式的果汁品质指标相关性分析

对 4 种浓缩方式的 11 项指标进行相关性分析，结果见表 2。由表 2 可知，在梨汁成分指标中，糖度与 PPO 活性之间存在极显著正相关，相关性系数为 0.752，并与 pH 值、可滴定酸呈显著负相关。pH 值与 Vc 呈显著正相关，与 PPO 活性则呈显著负相关。PPO 活性与 Vc 之间存在极显著负相关。在功能成分指标中，总抗氧化性与糖度、PPO 活性呈极显著正相关关系，但与 pH 值呈极显著负相关。ABTS$^+$· 清除能力与糖度、PPO 活性、总抗氧化性表现出极显著的正相关，与 pH 值呈极显著负相关。DPPH 清除能力与糖度、总抗氧化性、ABTS$^+$· 清除能力呈极显著正相关，与 pH 值呈显著负相关。从上述相关性分析结果表明，各指标间存在不同程度的相关性，说明 11 个指标间存在相互关联，即营养和活性成分对其褐变及抗氧化活性密切相关。

生化指标间的显著相关性揭示了梨汁品质的多维驱动机制。例如，总酚和 Vc 作为主要的抗氧化成分，不仅显著提高梨汁的抗氧化能力，还能在一定程度上改善感官风味；PPO 活性与糖度的相关性表明酶促褐变可能与甜度变化存在潜在联系，需通过工艺控制抑制其活性以维持梨汁的色泽与稳定性。而 pH 值和可滴定酸对梨汁的风味和抑菌效果具有显著影响，两者的平衡是提升风味稳定性和延长保质期的关键。

因此，为了更准确地评价不同浓缩方式对梨汁品质的影响，进一步采用主成分分析对指标进行分类简化，为梨汁浓缩工艺的优化提供科学依据。

2.10.2 不同浓缩方式的果汁品质指标主成分提取

采用 SPSS 22.0 对标准化处理后的数据进行主成分分析，结果见表 3。根据特征值大于 1.0、累计方差贡献率大于 80% 的原则确定主成分的个数[32]。由表 3 可知，主成分 1、2、3 的特征值均大于 1，主成分 3 的特征值为 1.30，其累计方差贡献率为 94.53%。因此，选取前 3 个主成分作为不同浓缩方式果汁品质综合评价指标。

表 2 各项指标相关性分析

Table 2 Correlation analysis of indicators

品质指标	糖度	pH 值	PPO 活性	总酚	还原糖	可滴定酸	可溶性蛋白	Vc	总抗氧化性	ABTS$^+$·清除能力	DPPH·清除能力
糖度	1										
pH 值	−0.64*	1									
PPO 活性	0.75**	−0.62*	1								
总酚	0.02	−0.05	−0.42	1							
还原糖	−0.03	0.12	−0.11	−0.27	1						
可滴定酸	−0.63*	−0.15	−0.51	0.26	−0.03	1					
可溶性蛋白	0.24	0.11	0.51	−0.77**	0.22	−0.58*	1				
Vc	−0.48	0.57*	−0.81**	0.71**	−0.09	0.23	−0.68**	1			
总抗氧化性	0.87**	−0.82**	0.71**	0.23	−0.20	−0.28	−0.11	−0.37	1		
ABTS$^+$ 清除能力	0.92**	−0.84**	0.70**	0.16	−0.09	−0.30	−0.06	−0.43	0.97**	1	
DPPH 清除能力	0.73**	−0.60*	0.37	0.49	−0.20	−0.24	−0.11	−0.01	0.77**	0.72**	1

注：* 表示相关性显著（P＜0.05）；** 表示相关性极显著（P＜0.01）。

表 3 4种浓缩方式果汁品质指标主成分分析的特征值及方差贡献率

Table 3 Eigenvalues and variance contributions of principal component analysis of juice quality indexes of four concentration methods

主成分	初始特征值/%			提取载荷平方和/%		
	特征值	方差贡献率	累积方差贡献率	特征值	方差贡献率	累积方差贡献率
PC1	6.26	52.19	52.19	6.26	52.19	52.19
PC2	3.78	31.47	83.66	3.78	31.47	83.66
PC3	1.30	10.87	94.53	1.30	10.87	94.53
PC4	0.66	5.48	100.00			
PC5	3.10E−16	2.58E−15	100.00			
PC6	1.04E−16	8.65E−16	100.00			
PC7	2.64E−17	2.20E−16	100.00			

表 4 为不同浓缩方式果汁品质指标的主成分载荷矩阵，数据表示的是所提取的各主成分对原始变量的影响程度。由表 4 可知，PC1 在 PPO 活性、糖度、ABTS$^+$ 清除能力、总抗氧化性的载荷值均较大，其权重系数分别是 0.955、0.928、0.887、0.872，主要包含了酶促褐变、固形物浓度和抗氧化方面的信息；PC2 在总酚、还原糖、可溶性蛋白的载荷值较大，其权重系数分别为 0.933、−0.851、−0.818，主要包含了活性物质方面信息；PC3 在可滴定酸、pH 值、Vc 上的载荷值较大。在上述分析结果表明，前 3 个主成分反映了浓缩果汁大部分品质指标的信息。

表 4 4种浓缩方式果汁品质指标的主成分载荷矩阵

Table 4 Principal component loading matrix of juice quality indexes for the four concentration methods

品质指标	PC1	PC2	PC3
PPO 活性	0.96	−0.28	−0.10
糖度	0.93	0.16	0.32
ABTS$^+$·清除能力	0.89	0.38	0.02
总抗氧化性	0.87	0.46	0.02
pH 值	−0.78	−0.39	0.48
Vc	−0.76	0.50	0.40
总酚	−0.23	0.93	0.27
还原糖	−0.05	−0.85	0.13
可溶性蛋白	0.40	−0.82	0.16
DPPH·清除能力	0.63	0.65	0.25
可滴定酸	−0.49	0.39	−0.78

2.10.3 不同浓缩方式果汁品质的综合评价

将各特征向量的标准化数据代入各主成分计算得分，并将 PC1~PC3 的方差贡献率作为权数，分别计算综合得分，结果如表 5 所示。PC1 得分较高的是真空浓缩和冷冻浓缩，表明 PPO 活性、糖度、ABTS$^+$· 清除能力、总抗氧化性可作为评价其品质的主要指标，通过这两种浓缩方式制备的浓缩液 PPO 酶活性较高，但真空及低温条件下活性氧较少，能有效抑制酶促褐变的发生；且经过浓缩后，所得梨汁的抗氧化活性均高于原液，有效保障梨汁品质。PC2 评分最高的是热浓缩，表明热浓缩可能果汁中的总酚含量较高，而还原糖、可溶性蛋白损失较大，从而影响果汁品质。PC3 评分较高的是膜浓缩对梨汁中的可溶性滴定酸影响最大，可能是由于膜浓缩过程中有机酸与其他大分子物质或固形物结合而导致损失。

综合评分中，真空浓缩评分最高，这主归因于其在较低温度（40 ℃）和低压（0.007 MPa）的条件下操作，有效避免高温对热敏性成分的破坏，减少蛋白质的变形和糖类的分解损失，并显著提高梨汁的抗氧化能力和浓缩效率。热浓缩的综合评分位居第二，虽因高温处理会产生 5-HFM，但该浓缩方式可提高梨汁的总酚、Vc 和可滴定酸含量，同时有效降低 PPO 活性，从而抑制酶促褐变，改善梨汁抗氧化性和品质稳定性；热浓缩在部分指标上弥补高温处理的劣势，表明其在提升梨汁的品质指标方面仍具有优势。

表 5 4种浓缩方式果汁的主成分分析与综合评价指数

Table 5 Principal component analysis and comprehensive evaluation index of juice from four concentration methods

浓缩方式	主成分分值			综合评价指数	排名
	PC1	PC2	PC3		
真空浓缩	3.98	−0.47	0.16	1.95	1
冷冻浓缩	0.82	0.02	−0.9	0.34	3
膜浓缩	−1.34	−1.04	1.8	−0.83	4
热浓缩	−1.13	3.26	0.02	0.44	2

3 结论

本文研究了四种不同浓缩方式（真空浓缩、冷冻浓缩、热浓缩和膜浓缩）对梨汁品质的影响。结果表明，冷冻浓缩和热浓缩梨汁种可滴定酸含量没有减少，其

中热浓缩所得梨汁的总酚和 Vc 含量最高；但冷冻浓缩效率较低且 Vc 含量下降，热处理会产生 5-HMF 及破坏可溶性蛋白，使梨汁颜色加深。膜浓缩的糖度及综合品质最低，即原料利用率低，不利于工业大批量生产。真空浓缩所得的梨汁糖度最高，达 60 °Bx，同时其总酚、还原糖、可溶性蛋白含量与原汁相比并无减少，且其抗氧化活性最佳，表明真空浓缩具有原料利用率高、营养物质保留率高的特点，所得的梨汁综合品质优于其他浓缩方式。

参考文献

[1] BLANKE M. Fruit consumption in China-Prices, sources and production [J]. Erwerbs-obstbau, 2011, 53: 93-98.

[2] HONG S Y, LANSKY E, KANG S S, et al. A review of pears (*Pyrus* spp.), ancient functional food for modern times [J]. BMC Complementary Medicine and Therapies, 2021, 21: 1-214.

[3] HAIDER I, CHOUBEY V K. Identifying fruit and vegetable losses and waste causing factors in supply chain towards achieving sustainable consumption and production [J]. Environment, Development and Sustainability, 2024, 26(6): 1-30.

[4] 张绍铃,谢智华.我国梨产业发展现状、趋势、存在问题与对策建议[J].果树学报,2019,36(8):1067-1072.

[5] ADNAN A, MUSHTAQ M, UL I T. Fruit Juice Concentrates [M]. Fruit Juices. Academic Press, 2018: 217-240.

[6] KATIBI K K, MOHD N M Z, YUNOS K F, et al. Strategies to enhance the membrane-based processing performance for fruit juice production: a review [J]. Membranes, 2023, 13(7): 679.

[7] 苏菲烟,雷激,刘江,等.雪梨多酚氧化酶酶学特性及其果汁褐变控制技术研究[J].食品科技,2020,45(2):303-310.

[8] ZOU Y, HUANG C, PEI K, et al. Cysteine alone or in combination with glycine simultaneously reduced the contents of acrylamide and hydroxymethylfurfural [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(1): 275-280.

[9] 李晓华,徐玉娟,刘雯雯,等.不同配比陈皮-蜜橘皮茶汤品质分析[J].食品与发酵工业,2024,50(12):159-169.

[10] 谭凤翔,余元善,邹宇晓,等.酶法水解桑叶多糖制备低聚糖及其抑菌活性研究[J].蚕业科学,2024,50(2):127-138.

[11] GB 12456-2021,食品安全国家标准 食品中总酸的测定[S].

[12] 黄宁馨.复合乳酸菌发酵枸杞汁的工艺优化及其营养品质变化研究[D].武汉:华中农业大学,2021.

[13] 黄艳勋.高效液相色谱法测定蔬果中的Vc含量[J].广东化工,2023,50(17):157-160.

[14] 饶建平.不同浓缩方式对枇杷汁品质的影响[J].漳州职业技术学院学报,2014,16(3):14-19.

[15] TIAN Y, SUN L, YANG Y, et al. Changes in the physicochemical properties, aromas and polyphenols of not from concentrate (NFC) apple juice during production [J]. CyTA-Journal of Food, 2018, 16(1): 755-764.

[16] ROMÁN B Ó, SANZ M, ILLERA A, et al. Polyphenol oxidase (PPO) and pectin methylesterase (PME) inactivation by high pressure carbon dioxide (HPCD) and its applicability to liquid and solid natural products [J]. Catalysis Today, 2020, 346: 112-120.

[17] 马烁,赵华.果蔬汁防褐变的研究进展[J].农产品加工,2023,11:76-79,83.

[18] TURKUT G M, DEGIRMENCI A, YILDIZ O, et al. Investigating 5-hydroxymethylfurfural formation kinetic and antioxidant activity in heat treated honey from different floral sources [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2018, 12: 2358-2365.

[19] CERNISEV S. Effects of conventional and multistage drying processing on non-enzymatic browning in tomato [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(1): 114-118.

[20] KATHURIA D, GAUTAM S, THAKUR A. Maillard reaction in different food products: Effect on product quality, human health and mitigation strategies [J]. Food Control, 2023, 153: 109911.

[21] RUDRAPAL M, RAKSHIT G, SINGH R P, et al. Dietary polyphenols: review on chemistry/sources, bioavailability/metabolism, antioxidant effects, and their role in disease management [J]. Antioxidants, 2024, 13(4): 429.

[22] 陈树俊,赵辛,康俊杰,等.不同梨品种品质评价及温度对梨浓缩汁指标影响研究[J].食品工业科技,2015,17:326-329.

[23] 李慧琳,高伟,姚淑敏,等.制干温度对“果汁杏干”品质的影响[J].曲阜师范大学学报(自然科学版),2022,48(1):100-105.

[24] 肖婷,王静,黄学均,等.酱油中美拉德反应产物的研究进展[J].中国调味品,2024,49(3):187-192.

[25] 周亚平.苹果浓缩汁非酶褐变影响因素的研究[D].青岛:莱阳农学院,2006.

[26] 高欣月,万金庆,厉建国,等.两种浓缩工艺对苹果浊汁贮藏期品质及抗氧化活性的影响[J].食品与发酵工业,2020,46(14):114-120,135.

[27] FENECH M, AMAYA I, VALPUESTA V, et al. Vitamin C content in fruits: Biosynthesis and regulation [J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 9: 413553.

[28] 余金橙,蒋文鸿,郑海花,等.响应面优化草莓汁冷冻浓缩工艺研究[J].食品科技,2020,45(8):107-114.

[29] LIU S W, ZHANG D Q, CHEN J P. Changes of Vc in cornus officinalis clarified juice [J]. Journal Shenyang Agricultural University, 1999, 30(2): 140-143.

[30] 陈学红,马利华,宋慧,等.真空浓缩对绿芦笋汁营养品质和风味的影响[J].现代食品科技,2014,30(9):205-209,216.

[31] DHUMAL S S, KARALE A R, MORE T A, et al. Preparation of pomegranate juice concentrate by various heating methods and appraisal of its physicochemical characteristics [J]. Acta Horticulturae, 2015, 1089: 473-484.

[32] 廖钦洪,张文林,兰建彬,等.重庆市不同区县“红阳”猕猴桃果实品质综合评价[J].经济林研究,2021,39(1):17-23.