

卢靖辉, 温靖, 赖慧宁, 等. 不同浓缩方式对枸杞汁品质特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(3): 31–40. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100016

LU Jinghui, WEN Jing, LAI Huining, et al. Effect of Different Concentration Methods on Quality Characteristics of *Lycium chinense* Juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(3): 31–40. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100016

· 研究与探讨 ·

不同浓缩方式对枸杞汁品质特性的影响

卢靖辉^{1,2}, 温靖^{2,3,*}, 赖慧宁², 吕思哲², 徐玉娟^{2,3}, 余元善^{2,3}, 程丽娜^{2,3}, 彭健^{2,3}

(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. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室, 广东广州 510610)

摘要: 枸杞汁富含多种营养和保健功能成分, 浓缩汁是其重要的流通形式。为探究浓缩方式对枸杞汁品质特性的影响, 本文对比了热浓缩 (heating concentration, HC)、真空浓缩 (vacuum concentration, VC)、二级冷冻浓缩 (secondary freezing concentration, SFC)、热联合一级冷冻浓缩 (heating-assisted primary freezing concentration, HAPFC)、真空联合一级冷冻浓缩 (vacuum-assisted primary freezing concentration, VAPFC) 五种浓缩方法, 考察浓缩前后枸杞汁色泽、还原糖、糖组分、有机酸组分、总酚、总黄酮、类胡萝卜素、DPPH 及 FRAP 等的变化。结果表明, 真空浓缩对色泽的保护效果显著优于其他处理组, 能较好地保留枸杞汁中的还原糖, 对苹果酸和酒石酸影响较小。真空浓缩能较好地保留枸杞汁中的总酚、总黄酮含量, 较其他处理组分别高 8.76%~21.40% 和 5.41%~13.77%; 真空浓缩能有效保留枸杞汁中的类胡萝卜素, 且 DPPH 自由基清除能力和铁离子还原能力较其他处理组高 6.98%~29.77% 和 5.97%~26.76%。因此, 真空浓缩对枸杞浓缩汁品质的保护效果最好, 是一种适宜枸杞汁浓缩的方式。

关键词: 枸杞汁, 热浓缩, 真空浓缩, 冷冻浓缩, 联合浓缩, 品质特性

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)03-0031-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100016



本文网刊:

Effect of Different Concentration Methods on Quality Characteristics of *Lycium chinense* Juice

LU Jinghui^{1,2}, WEN Jing^{2,3,*}, LAI Huining², LÜ Sizhe², XU Yujuan^{2,3}, YU Yuanshan^{2,3},
CHENG Lina^{2,3}, PENG Jian^{2,3}

(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, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China;

3. Lingnan Modern Agricultural Science and Technology Laboratory of Guangdong Province, Guangzhou 510610, China)

Abstract: *Lycium chinense* juice is rich in a variety of nutrients and ingredients for health, and concentrated juice is its important circulation type. In order to explore the effect of concentration methods on the quality characteristics of *Lycium chinense* juice, the heating concentration (HC), vacuum concentration (VC), secondary freezing concentration (SFC), heating-assisted primary freezing concentration (HAPFC), and vacuum-assisted primary freezing concentration (VAPFC) were applied in the present work, and the color, reducing sugar, sugar fraction, organic acid fraction, total phenols, total flavonoids, carotenoids, DPPH and FRAP of *Lycium chinense* juice before and after concentrated were measured. The

收稿日期: 2023-10-09

基金项目: 广东省农业科学院项目 (R2023PY-JG015, 202109TD); 国家重点研发计划 (2019YFD1002300); 岭南现代农业实验室科研项目 (NZ2021031)。

作者简介: 卢靖辉 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品深加工, E-mail: 861178436@qq.com。

* 通信作者: 温靖 (1978-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: jingw988@163.com。

results showed that VC treatment showed better color protection than the other treatment groups, as well as retained higher reducing sugar in concentrated juice, and less effect on malic acid and tartaric acid degradation. The total phenols and total flavonoids of *Lycium chinense* juice concentrated by VC were higher 8.76%~21.40% and 5.41%~13.77% than other groups, respectively. The DPPH free radical scavenging capacity and ferric ion reducing capacity of *Lycium chinense* juice concentrated by VC owed higher 6.98%~29.77% and 5.97%~26.76% when compared with the other groups, beside lower carotenoids degradation. Therefore, VC showed the best protection effects on the quality characteristics of *Lycium chinense* juice during concentration and it is a suitable way to concentrate *Lycium chinense* juice.

Key words: *Lycium chinense* juice; heating concentration; vacuum concentration; freezing concentration; combining concentration; quality characteristics

枸杞又名枸杞子,是茄科枸杞属植物的果实。我国的枸杞主要栽种在西北地区,其中以宁夏为主,内蒙古、新疆、甘肃以及青海部分地区也有种植^[1]。其果实中含有丰富的有益于健康的成分,例如类胡萝卜素、类黄酮、多酚、多糖、维生素以及氨基酸等^[2-3]。新鲜枸杞不耐贮藏,易受季节、环境条件的影响,深加工是延长其货架期、延伸产业链的有效手段^[4]。果汁作为一种常见的水果加工产品,备受消费者青睐。浓缩可降低果汁的水分活度,浓缩果汁的稳定性比新鲜果汁更高,较大程度地保留鲜果中的营养物质,是吸引现代消费者的重要产品。

目前,常用的果汁浓缩方法包括热浓缩、真空浓缩、膜浓缩、冷冻浓缩等^[5-7]。热浓缩成本较低,相比其他浓缩设备简单易操作且耗时相对较短、效率高,其中电磁加热浓缩更是具有受热均匀、自动化程度高等优点,然而热浓缩法也存在营养成分流失和色泽劣变等问题。徐红雨等^[8]研究发现,热浓缩处理虽能一定程度提高枸杞汁中总类胡萝卜素等抗氧化成分的保留率,但浓缩汁的色泽呈现暗红偏黄色,色差相对较大。与传统的常压加热浓缩相比,真空浓缩缩短了浓缩时间、节省了能耗,并且避免了高温对品质造成的不利影响,减少了热敏性成分、芳香物质和色素的破坏和损失,更好地保留了果汁的色泽和风味^[9]。然而真空环境对果汁中部分易挥发的营养物质会造成一定损失。冷冻浓缩技术属于低能耗浓缩技术,能耗仅为蒸发浓缩的三分之一到六分之一,成本降低约 27.5% 至 40%^[10]。理论上,冷冻浓缩对功能营养成分、色泽、风味和热敏性成分破坏程度较小,但由于冷冻浓缩设备和操作工艺的不同,浓缩果汁的质量也会有所降低。相比其他浓缩方式,冷冻浓缩终点易受果汁黏度的限制,因此浓缩终点的糖度相对较低且原料消耗较高。因此,研究者们采用冷冻浓缩联合其他浓缩方式,例如电磁加热或真空浓缩等,进行果汁浓缩。

国内外对比单一浓缩方式与复合浓缩方式制得的浓缩果汁品质特性的相关报道并不多见,枸杞的浓缩方式相对单一,主要有热浓缩、真空浓缩及膜浓缩^[8,11],然而三种浓缩方式对浓缩枸杞汁的品质特性均有不同程度的破坏。为了探究不同浓缩方式减少果汁中营养物质的损失破坏、提高浓缩程度及果汁

贮存稳定性^[12-13]之间的差异,本实验比较热联合一级冷冻浓缩(heating-assisted primary freezing concentration, HAPFC)、真空联合一级冷冻浓缩(vacuum-assisted primary freezing concentration, VAPFC)、热浓缩(heating concentration, HC)、真空浓缩(vacuum concentration, VC)、二级冷冻浓缩(secondary freezing concentration, SFC)五种浓缩方式对枸杞汁品质特性的影响,为生产高品质浓缩枸杞汁提供技术指导和理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜红枸杞 品种是‘宁号’,产自宁夏银川市;碳酸钠、铁氰化钾、三氯化铁(纯度 98%) 天津市福晨化学试剂厂;无水乙醇、没食子酸标准品、芦丁标准品、苯酚、环己烷、正己烷(分析纯) 天津市科密欧化学试剂有限公司;果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖、草酸、酒石酸、苹果酸、维生素 C、柠檬酸、琥珀酸标准品(纯度 99%) 上海源叶生物科技有限公司;浓盐酸、氢氧化钠、亚硝酸钠、硝酸铝(纯度 98%) 天津市大茂化学试剂厂;叶黄素(纯度 99%) 上海麦克林生化科技股份有限公司。

CQ08 螺旋式榨汁机 中山卡丘智能科技有限公司;WK2102 电磁炉 广东美的生活电器制造有限公司;N-1300 旋转蒸发仪 日本东京理化公司;DW-2DA 冷冻浓缩机组 深圳市达沃西设备有限公司;UV-1900i 紫外分光光度计、LC-20AT 高效液相色谱仪、C₁₈ Superb 液相色谱柱 日本岛津公司;RFM340+数显折射计 英国 Bellingham Stanley (B S)公司;Ultra Scan VIS 型全自动色差仪 美国 Hunter Lab 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 新鲜枸杞汁的制备 筛选个体完整且无损坏的新鲜枸杞子,除梗、清洗、沥干。将枸杞子放入榨汁机中榨汁得到枸杞果浆,用 200 目滤网过滤果浆,得到新鲜枸杞汁,糖度为 16.10°Brix±0.2°Brix

1.2.2 浓缩枸杞汁的制备

1.2.2.1 冷冻浓缩处理 将枸杞原汁置于冷冻浓缩设备的冷槽内并密封,槽内的枸杞料液通过设备内的制冷装置降温,当枸杞汁冷却到冰点时在冷槽内壁的

冰晶成核,刮板将冷壁上的小冰晶搅拌入料液中与枸杞汁溶液混合形成冰浆,冰晶逐渐长大同时诱导料液二次成核产生大量冰晶^[14]。待冰晶成熟后在结晶器内形成多孔紧密的冰晶堆积床^[15],在低温下(-12℃)迅速分离出冰相得到浓缩汁。由于受到枸杞汁黏度和冷冻浓缩设备的限制,本研究采用 24°Brix±0.4°Brix 的糖度作为一级冷冻浓缩终点,采用 35°Brix±0.2°Brix 的糖度作为二级冷冻浓缩终点,研究浓缩枸杞汁的品质特性。

1.2.2.2 二级冷冻浓缩 以 1.2.1 中的新鲜枸杞汁为原料,设定浓缩温度为-12℃,于实验开始前预冷降温,枸杞原汁泵入冷槽后密封,随后在设定的冷媒温度下(-12℃)进行降温,当枸杞汁冷却到冰点时,在制冷面上冰晶成核并以树枝状生长。随后启动刮板进行搅拌(搅拌时间 1.5 h,搅拌速率为 144 r/min),待冰粒成熟后在结晶器内形成多孔且紧密的冰晶堆积床,低温分离冰相后得到一级冷冻浓缩汁,糖度为 24°Brix±0.4°Brix。将一级冷冻浓缩汁重复上述处理得到二级冷冻浓缩汁,糖度为 35°Brix±0.2°Brix,密封后于-20℃的环境中保存待用。

1.2.2.3 热浓缩 以 1.2.1 中的新鲜枸杞汁为原料,采用电磁炉以 800 W 功率加热浓缩枸杞原汁,以 35°Brix±0.2°Brix 作为浓缩终点。

1.2.2.4 真空浓缩 以 1.2.1 中的新鲜枸杞汁为原料,采用真空旋转蒸发仪(55℃,100 hPa,50 r/min)浓缩枸杞原汁,以 35°Brix±0.2°Brix 作为浓缩终点。

1.2.2.5 热浓缩联合一级冷冻浓缩 以 1.2.2.2 中的一级冷冻浓缩液为原料,采用电磁炉以 800 W 功率加热浓缩枸杞汁,以 35°Brix±0.2°Brix 作为浓缩终点。

1.2.2.6 真空浓缩联合一级冷冻浓缩 以 1.2.2.2 中的一级冷冻浓缩液为原料,采用真空旋转蒸发仪(55℃,100 hPa,50 r/min)浓缩枸杞汁,以 35°Brix±0.2°Brix 作为浓缩终点。

1.2.3 浓缩比 浓缩比是指浓缩后溶液浓度与浓缩前溶液浓度的比值,用于衡量果汁的浓缩效果。可表示为:

$$r = \frac{C_{j1}}{C_{j0}}$$

式中: r 表示浓缩比; C_{j0} 表示浓缩前枸杞汁可溶性固形物含量(°Brix); C_{j1} 表示浓缩后枸杞汁可溶性固形物含量(°Brix)。

参考秦贯丰等^[16]和丁中祥等^[17]的方法,通过各项浓缩沃柑汁测定后的理化指标除以浓缩比来模拟沃柑浓缩复原汁,重点分析浓缩沃柑汁间的品质特性。根据上述公式将五种浓缩方法得到的浓缩汁糖度(35.00°Brix±0.2°Brix)除以枸杞原汁糖度(16.10°Brix±0.2°Brix)得到浓缩比 r 为 2.17。

1.2.4 枸杞汁色泽的测定 枸杞汁的色度采用全自动色差计测定,结果采用 L 、 a 、 b 值和色差 ΔE 表示,

ΔE 按下式计算:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2}$$

式中: L 值表示亮度; a 值表示红度,正值表示红/紫色,负值表示浅蓝/绿色; b 值表示黄度,正值表示黄色,负值表示蓝色; L_0 、 a_0 、 b_0 表示枸杞汁的 Hunter 参数; L^* 、 a^* 、 b^* 表示枸杞浓缩汁的 Hunter 参数; ΔE 表示枸杞浓缩汁和枸杞汁之间的色泽差异,数值越小表示色泽保留越好。

1.2.5 枸杞汁中的还原糖含量测定 枸杞汁中的还原糖含量测定参照 GB/T 5009.7-2008《食品中还原糖的测定》中的 3,5-二硝基水杨酸法稍作调整。称取 1.2.1 和 1.2.2 中的枸杞汁各 5.0 g,加入二级水定容至 250 mL 后混匀,置于 40℃ 恒温振荡水浴锅中 30 min,冷却后离心(5000 r/min,10 min),取上清液作为样液待用。取 2 mL 稀释至合适倍数的样液/葡萄糖标准溶液,加入 4 mL 的 DNS 溶液混匀后置于沸水浴中加热 5 min,取出后冷却至室温并定容至 10 mL,在 540 nm 波长下测定吸光值。

1.2.6 枸杞汁中的糖组分测定 枸杞汁中的糖组分测定参考 GB 5009.8-2016《食品中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖的测定》中的高效液相色谱法稍作调整。准确称取 1.2.1 和 1.2.2 中的枸杞汁各 0.8 g,加入 0.8 mL 无水乙醇后混匀,超声辅助提取 15 min,离心(10000 r/min,10 min),取上清液过有机系 0.22 μm 滤膜后待进样。果糖、葡萄糖、麦芽糖、乳糖标准品配制成系列浓度梯度的糖标准溶液后过膜待进样。

色谱条件:流动相:乙腈:一级水=70:30(体积比);流速:1 mL/min;柱温:40℃;进样量 10 μL;检测器:蒸发光检测器(ELSD)。

1.2.7 枸杞汁中的有机酸组分测定 枸杞汁中的有机酸组分测定参考 GB 5009.157-2016《食品中有机酸的测定》稍作调整。准确称取 1.2.1 和 1.2.2 中的枸杞汁各 0.4 g,加入 1.2 mL 0.3% 偏磷酸超声辅助提取 15 min,离心(10000 r/min,10 min),取上清液过水系 0.22 μm 滤膜后待进样。草酸、柠檬酸、酒石酸、苹果酸、琥珀酸标准品配制成系列浓度梯度的有机酸标准溶液后过膜待进样。

色谱条件:流动相:磷酸氢二铵(pH2.7);流速:1 mL/min;柱温:30℃;进样量:10 μL;色谱柱: C_{18} ;检测器:二极管阵列检测器(PDA);检测波长:有机酸 210 nm;维生素 C 254 nm。

1.2.8 枸杞汁提取液的制备 参考陈霖虹等^[18]的提取方法略作修改,准确称取枸杞汁和五种枸杞浓缩汁 20.0 g,加入 40 mL 的酸化甲醇,超声(30℃,500 W)浸提 1 h,离心(5000 r/min,10 min),收集上清液,滤渣按上述方式重复浸提三次,合并上清液用酸化甲醇定容至 200 mL 制得枸杞汁提取液,保存在-20℃的环境下待用。

1.2.9 枸杞汁酚类物质含量的测定

1.2.9.1 枸杞汁中的总酚含量测定 参考 Orsavová 等^[19]的方法略作修改,取 1 mL 用酸化甲醇稀释到适当倍数的提取液/没食子酸标准品,加入 2 mL 福林酚试剂,振荡混合后加入 2 mL 10% 碳酸钠溶液,静置避光放置 1 h,取出后离心(10000 r/min, 5 min)得到上清液,在 760 nm 波长下测其吸光值。

1.2.9.2 枸杞汁中的总黄酮含量测定 参考 Orsavová 等^[19]的方法略作修改,取 1 mL 用酸化甲醇稀释到适当倍数的提取液/芦丁标准品,加入 0.5 mL 5% 亚硝酸钠溶液,混匀后静置 5 min,加入 0.5 mL 10% 硝酸铝溶液,混匀后静置 6 min,加入 2 mL 1 mol/L 的氢氧化钠溶液,混匀后置于 45 ℃ 水浴 10 min,冷却后离心(10000 r/min, 5 min)得到上清液,在 505 nm 波长下测其吸光值。

1.2.10 枸杞汁类胡萝卜素含量的测定 枸杞汁中的类胡萝卜素含量测定参考 DB64/T 1514-2017《枸杞及枸杞籽油中玉米黄质、β-胡萝卜素和叶黄素的测定》稍作调整。准确称取 1.2.1 和 1.2.2 中的枸杞汁各 6.0 g,加入 1.0 g 抗坏血酸、0.2 g BHT、30 mL 无水乙醇,混匀后置于 70 ℃ 水浴中恒温振荡 30 min。取出冷却至室温,加入 1 g/mL 的氢氧化钾溶液 1 mL,边加边摇匀,置于 54 ℃ 水浴中恒温振荡 45 min 皂化。皂化后立即冷却至室温,加入 60 mL 类胡萝卜素萃取溶剂在室温下振荡 10 min 后静置分层,将水相与有机相分离,水相按上述方法进行二次萃取,合并有机相,用 100 mL 一级水洗涤有机相 2~3 次至近中性,除去水相后有机相通过无水硫酸钠过滤脱水,滤液收入蒸发瓶中,于真空旋转蒸发器(40 ℃)减压浓缩至近干,用 0.1% BHT 乙醇溶液充分溶解提取物,定容至 10 mL,过有机系 0.22 μm 滤膜后待进样。叶黄素、β-胡萝卜素、玉米黄质标准品以二氯甲烷溶解,配制成 1 mg/mL 标准储备液。吸取 1 mL 标准储备液,用 0.1% BHT 乙醇定容至 100 mL 得到 10 μg/mL 的标准工作液后过有机系 0.22 μm 滤膜后待进样。

色谱条件:流动相:A相:甲醇:一级水=88:12(含 0.1% BHT);B相:甲基叔丁基醚(含 0.1% BHT),梯度洗脱条件见表 1。流速:1 mL/min;柱温:30 ℃;进样量:20 μL;色谱柱:C₃₀;检测器:二极管阵列检测器(PDA);检测波长:445 nm。

1.2.11 枸杞汁 DPPH 自由基清除能力的测定 参考 Wang 等^[20]的测定方法略作修改,取 1.2.8 中一定体积的提取液/Trolox 标准溶液,稀释到一定倍数,取稀

表 1 梯度洗脱条件

Table 1 Gradient elution conditions

时间(min)	A相(%)	B相(%)
0.00	85	15
5.00	75	25
10.00	70	30
22.00	55	45
24.00	45	55
26.00	25	75
29.00	20	80
29.01	85	15
36.00	85	15

释后的样品 50 μL,加入 0.2 mmol/L DPPH 溶液 150 μL,混匀后在室温条件下避光反应 10 min,使用酶标仪在 517 nm 处测定吸光值。

$$\text{清除率}(\%) = \frac{(A_{y0} - A_0) - (A_y - A_{s0})}{(A_{y0} - A_0)} \times 100$$

式中: A_y 表示样品吸光值; A_{s0} 表示样品空白组吸光值(等体积 80% 甲醇代替 DPPH 溶液); A₀ 表示试剂空白组吸光值(80% 甲醇); A_{y0} 表示对照组吸光值(等体积 80% 甲醇代替样品)。

1.2.12 枸杞汁铁离子还原能力测定 参考 Tabart 等^[21]的测定方法略作修改,取 1.2.8 中一定体积的提取液/Trolox 标准溶液,稀释到一定倍数,取稀释后的样品 250 μL,加入 50 μL 0.2 mol/L 的 PBS 溶液(pH6.6)和 350 μL 0.3% 铁氰化钾后混匀,置于 50 ℃ 水浴中加热 20 min 后迅速取出冷却并加入 250 μL 10% 三氯乙酸后混匀,离心(5000 r/min, 5 min),取上清液 900 μL,加入 200 μL 0.3% 三氯化铁混匀,再加入 900 μL 一级水,充分混合后取 200 μL 溶液于酶标板中,使用酶标仪在 700 nm 处测定吸光值。

1.3 数据处理

图采用 Origin 2018 进行绘制,实验数据采用 SPSS 24 软件进行统计分析,所有实验均重复平行 3 次,数据采用平均值±标准差来表示。

2 结果与分析

2.1 枸杞汁的理化指标

枸杞汁的理化指标如表 2、表 3 所示,还原糖和部分糖组分、有机酸组分、类胡萝卜素含量低于后文中的几种浓缩枸杞汁(图 2、表 4~表 6),这可能是由于浓缩使糖和酸及类胡萝卜素从枸杞基质中释放提高了含量^[22];此外浓缩过程中会发生氧化和酶促反应,导致形成新的及水解产生小分子的糖和酸化合物^[23]。枸杞汁的酚类物质含量、DPPH 自由基清除能力及铁离子还原能力均高于浓缩枸杞汁,这归因于枸杞汁浓

表 2 枸杞汁的基本成分

Table 2 Basic ingredients of *Lycium chinense* juice

还原糖含量(mg/g)	糖组分(mg/g)				有机酸组分(mg/g)				
	果糖	葡萄糖	乳糖	麦芽糖	草酸	酒石酸	苹果酸	柠檬酸	琥珀酸
72.85±0.51	32.10±0.47	39.11±0.75	2.48±0.08	3.59±0.09	1.16±0.07	2.10±0.09	1.33±0.13	11.64±0.51	0.71±0.04

表 3 枸杞汁的活性成分及抗氧化能力

Table 3 Active components and antioxidant capacity of *Lycium chinense* juice

类胡萝卜素含量(mg/100 g)			酚类物质含量(mg/g)		DPPH自由基清除和铁离子还原能力	
叶黄素	玉米黄质	β -胡萝卜素	总酚	总黄酮	DPPH(%)	FRAP(mg Trolox/g)
5.13±0.02	26.25±0.14	138.56±0.51	1.07±0.03	0.28±0.01	27.81±1.33	4.15±0.17

缩过程中氧化导致酚类物质和抗氧化性下降,其次,部分挥发性酚类物质会随浓缩过程流失导致酚类物质的总体含量及抗氧化性降低^[24]。

2.2 浓缩方式对枸杞汁中的色度影响

在枸杞汁浓缩过程中往往伴随着褐变反应的发生,其中包括酶促褐变和非酶褐变^[8]。美拉德反应、焦糖化反应、抗坏血酸褐变以及多酚氧化等都会对枸杞汁的色泽造成一定程度的影响。如图 1 所示,五种浓缩枸杞汁都发生了不同程度的褐变,各处理组之间差异显著($P<0.05$)。其中 VAPFC 色泽变化最小, ΔE 为 3.66; HC 色泽变化最大, ΔE 为 14.31。从 L^* 值看,除 SFC 外其他浓缩处理后的枸杞果汁亮度都有所提升,HC 提升最高,SFC 处理与枸杞汁原亮度相近。从 a^* 值看,VC 和 HC 处理提升了枸杞汁的红度,冷冻浓缩处理(VAPFC、HAPFC、SFC)则降低。从 b^* 值看,HC、HAPFC、VC 显著高于枸杞汁($P<0.05$),VAPFC 与枸杞汁较为接近,SFC 处理会降低果汁的黄度。

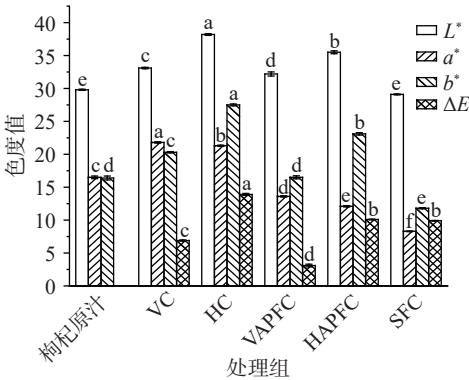


图 1 浓缩方式对色度的影响

Fig.1 Effect of concentration method on chromaticity

注:同一指标中的小写字母表示不同处理组组间有统计学差异($P<0.05$)。

枸杞汁中的悬浮果肉、纤维等杂色物质降低了整体亮度,在浓缩过程中部分杂色物质被除去,因此浓缩枸杞汁亮度均有不同程度的提升。VC 和 VAPFC 组的枸杞汁呈现出深红色,可见真空浓缩对红度和黄度略有提升但幅度不大且两组的色差值最小,对色素破坏程度最小,与枸杞汁的色泽相似度最高。HC 和 HAPFC 组的枸杞汁呈现出深红偏黄的色泽,即热浓缩对黄度的提升有明显的效果,其次是红度。由于对 HAPFC、VAPFC、SFC 进行了一级或二级冷冻浓缩,其亮度、红值和黄值均有不同程度的降低,使总体颜色比枸杞汁色泽更暗,其中 SFC 组表现为暗红色;这可能是因为冷冻浓缩用时较长,随着

浓缩的进行,各种褐变反应也伴随进行,空气不断被刮板搅入料液中使得溶解氧增加,对色素的破坏作用较大,导致冷冻浓缩的枸杞汁颜色呈暗红色,与原汁的颜色差异较大。综上,真空浓缩对枸杞汁的色泽保护效果更好,浓缩果汁的颜色还原度最好,更容易被消费者接受。

2.3 浓缩方式对枸杞汁中的还原糖含量影响

还原糖含量可影响枸杞汁的感官品质及对微生物的抑制效果,且与浓缩过程果汁色度的变化密切相关^[8]。如图 2 所示,HC、VC 处理后的枸杞汁还原糖含量与 HAPFC、VAPFC、SFC 组略有差异。VC 及 HC 处理显著高于 VCPFC、HAPFC、SFC 处理 5.61%~7.64%($P<0.05$)。浓缩枸杞汁中的部分还原糖属于羰基化合物,易与果汁中的蛋白质等氨基化合物产生羰胺缩合、斯特克勒降解以及分子聚合进而发生美拉德反应造成总还原糖含量损失。HAPFC 和 VAPFC 组均先进行一级冷冻浓缩,后再进行电磁加热和真空浓缩,与 SFC 组相似,部分还原糖在冷冻浓缩过程中留在了冰相被除去,因此上述三种浓缩枸杞汁中的还原糖含量损失较 HC、VC 处理高。综上,VC 及 HC 处理能较好地保留浓缩枸杞汁中的总还原糖。

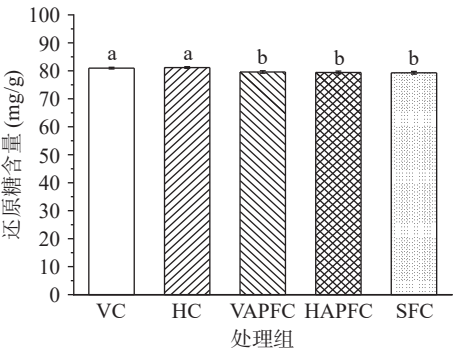


图 2 浓缩方式对还原糖含量的影响

Fig.2 Effect of concentration method on reducing sugar content

注:小写字母表示不同处理组组间有统计学差异($P<0.05$),图 3~图 6 同。

2.4 浓缩方式对枸杞汁中的糖组分影响

如表 4 所示,五种浓缩方法处理对枸杞汁果糖、葡萄糖和麦芽糖含量影响较小,HC 组果糖和葡萄糖含量略高于其他浓缩处理组。HC 和 HAPFC 处理后乳糖含量相对较低,仅为 SFC 处理的 70.72%~77.93%($P<0.05$)。VC、VAPFC 处理后乳糖含量与 SFC 相近,相差约为 5%。这可能是由于乳糖在果汁中的稳定性随温度的升高而降低,因此 HC 和

HAPFC 处理易使乳糖损失; VC、VAPFC、SFC 处理在相对较低的温度下进行, 乳糖含量损失较少。综上, 五种浓缩方式对果糖、葡萄糖、麦芽糖含量影响不大, HC 和 HAPFC 处理会降低枸杞汁中乳糖的保留率。

表4 浓缩方式对糖组分的影响

Table 4 Effect of concentration method on sugar components

浓缩方式	果糖(mg/g)	葡萄糖(mg/g)	乳糖(mg/g)	麦芽糖(mg/g)
VC	30.94±0.55 ^a	38.53±0.32 ^a	2.12±0.03 ^a	3.63±0.03 ^a
HC	32.01±0.90 ^a	39.50±1.31 ^a	1.57±0.08 ^c	3.53±0.11 ^a
VAPFC	31.86±0.63 ^a	39.06±0.67 ^a	2.13±0.05 ^a	3.72±0.06 ^a
HAPFC	31.87±0.78 ^a	39.13±0.61 ^a	1.73±0.06 ^b	3.55±0.16 ^a
SFC	31.69±0.82 ^a	38.66±0.62 ^a	2.22±0.13 ^a	3.70±0.27 ^a

注: 同列不同小写字母表示不同处理组间有统计学差异 ($P<0.05$), 表5、表6同。

2.5 浓缩方式对枸杞汁中的有机酸组分影响

如表5所示, 五种浓缩方法处理后的枸杞汁均检测出草酸、酒石酸、苹果酸、柠檬酸及琥珀酸。其中柠檬酸的含量最高、琥珀酸含量最低, 各占五种有机酸含量中的 68.44%~74.17%、1.20%~2.81%。VC 处理组枸杞浓缩汁中的草酸、苹果酸含量分别高于其他处理组 0.66%~4.11% 和 4.07%~20.13% ($P<0.05$)。HC 处理组酒石酸、柠檬酸含量分别高于其他处理组 1.13%~8.91% 和 6.89%~31.57% ($P<0.05$)。SFC 处理可提高琥珀酸的保留率, 较其他处理组显著提高了 1.89%~92.86% ($P<0.05$)。这可能是由于琥珀酸在热浓缩的作用下, 与水分一起蒸发损失。相比 HC 和 VC 处理, 冷冻浓缩组所损失的琥珀酸含量则相对较少。综上, VC 处理对枸杞汁的草酸及苹果酸含量影响较小, HC 处理对枸杞汁的酒石酸和柠檬酸含量影响较小, SFC 处理可提高枸杞汁中琥珀酸的保留率。

2.6 浓缩方式对枸杞汁中的酚类物质及类胡萝卜素含量影响

2.6.1 浓缩方式对枸杞汁中的酚类物质影响 酚类物质是一类广泛存在于植物果实中的次生代谢产物, 包含了黄酮类、酚酸类、花青素类、单宁类等物质, 具有很高的抗氧化性及清除自由基能力等生物活性, 同时可以延缓果蔬的衰老及褐变^[25-26]。如图3所示, HC、VC 与 HAPFC、VAPFC、SFC 处理的枸杞汁总酚含量差异性显著 ($P<0.05$)。VC 和 HC 处理组总酚含量显著高于其他处理组, 较 VCPFC、

HAPFC 组高 8.76%~11.85%, 较 SFC 组高 19.50%~21.40% ($P<0.05$)。如图4所示, HC、VC 与 HAPFC、VAPFC、SFC 处理的枸杞汁总黄酮含量存在显著性差异 ($P<0.05$)。VC 处理组总黄酮含量显著高于其他处理组, 高于 HC 组 5.41%, 高于 VCPFC、HAPFC、SFC 组 9.88%~13.77% ($P<0.05$)。这主要是由于在较高的温度下, 枸杞汁细胞内的结合酚大量分解并游离释放转变为单体酚, 导致总体酚类化合物含量的增加^[27]; 其次热浓缩温度 (95 ℃) 也会造成多酚氧化酶和过氧化物酶等失活, 减少酚类物质的氧化损失^[28]。在真空浓缩的过程中共价结合的酚类物质不断进行解离和聚合, 形成了一些非内源性的酚类物质; 此外, 枸杞在真空和脱水的环境刺激下会产生更多酚类化合物来抵抗和减弱环境造成的应激反应^[29], 提高了 VC 组的总酚及总黄酮含量。Nhi 等^[30] 研究发现, 与新鲜柚子汁相比, 真空浓缩后柚子汁中的总酚含量提升了 1.33 倍。在冷冻浓缩作用下, 枸杞汁形成冰晶破坏了细胞膜, 导致细胞内容物溶出, 酚类物质在多

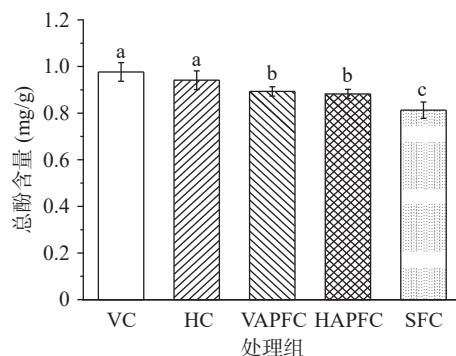


图3 浓缩方式对总酚含量的影响

Fig.3 Effect of concentration method on total phenols content

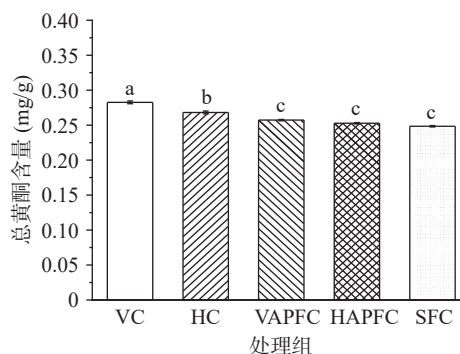


图4 浓缩方式对总黄酮含量的影响

Fig.4 Effect of concentration method on total flavonoids content

表5 浓缩方式对有机酸组分的影响

Table 5 Effect of concentration method on organic acid components

浓缩方式	草酸(mg/g)	酒石酸(mg/g)	苹果酸(mg/g)	柠檬酸(mg/g)	琥珀酸(mg/g)
VC	1.52±0.02 ^a	2.66±0.01 ^a	1.79±0.08 ^a	14.43±0.06 ^c	0.37±0.01 ^b
HC	1.46±0.11 ^a	2.69±0.14 ^a	1.62±0.11 ^{bc}	17.38±1.06 ^a	0.28±0.01 ^c
VAPFC	1.51±0.03 ^a	2.59±0.01 ^{ab}	1.72±0.03 ^{ab}	13.77±0.07 ^{cd}	0.53±0.01 ^a
HAPFC	1.52±0.06 ^a	2.62±0.07 ^a	1.70±0.10 ^{ab}	16.26±0.51 ^b	0.40±0.01 ^b
SFC	1.48±0.04 ^a	2.47±0.05 ^b	1.49±0.04 ^c	13.21±0.41 ^d	0.54±0.01 ^a

酚氧化酶和过氧化物酶的作用下氧化造成损失^[31],降低了 HAPFC、VAPFC、SFC 组的总酚及总黄酮含量。综上,VC 处理能较好地保留浓缩枸杞汁中的酚类物质含量。

2.6.2 浓缩方式对枸杞汁中的类胡萝卜素影响 类胡萝卜素是一类广泛存在于动物、植物及微生物中具有抗氧化、抗衰老等功能活性的脂溶性天然色素^[32]。如表 6 所示,五种浓缩方法处理后的枸杞汁类胡萝卜素总体呈现下降趋势,这可能是由于枸杞在制汁和浓缩过程中组织会遭到破坏,使细胞中的类胡萝卜素暴露在空气中,类胡萝卜素分子结构中的双键容易与氧气接触自动氧化导致类胡萝卜素降解^[33]。各处理组间的类胡萝卜素含量差异性显著,VC 处理组在隔绝氧气的条件下进行浓缩,叶黄素、玉米黄质及 β -胡萝卜素含量显著高于其他处理组($P<0.05$); HC 组浓缩时间较短,对类胡萝卜素含量影响相对较小;由于冷冻浓缩设备的刮板对枸杞汁不断进行搅拌,空气不可避免地搅入冷槽内,增加了料液中的溶解氧含量,加剧了 HAPFC、VAPFC、SFC 组被氧化的程度,进而降低了浓缩液中类胡萝卜素的含量。Bialik 等^[34]研究发现,采用真空干燥法可从猕猴桃中获得含量更高的类胡萝卜素。综上,VC 处理能较好地保留浓缩枸杞汁中的类胡萝卜素。

表 6 浓缩方式对类胡萝卜素的影响			
Table 6 Effect of concentration method on carotenoids			
浓缩方式	叶黄素(mg/100 g)	玉米黄质(mg/100 g)	β -胡萝卜素(mg/100 g)
VC	5.85±0.03 ^a	17.96±0.22 ^a	108.79±0.15 ^a
HC	4.19±0.02 ^b	13.37±0.05 ^b	88.76±0.22 ^b
VAPFC	3.34±0.07 ^c	7.19±0.04 ^c	59.50±0.06 ^c
HAPFC	2.17±0.01 ^d	6.75±0.03 ^d	47.12±0.17 ^d
SFC	1.02±0.01 ^e	4.28±0.04 ^e	23.79±0.13 ^e

2.7 浓缩方式对枸杞汁抗氧化能力的影响

2.7.1 浓缩方式对枸杞汁中的 DPPH 自由基清除能力影响 DPPH 法是一种基于抗氧化物质的递减性检测植物提取物及化合物抗氧化活性的方法^[35]。如图 5 所示,除 HAPFC 与 VAPFC 间无显著差异($P>0.05$)外,不同浓缩方法处理后的枸杞汁 DPPH 自由基清除能力差异性显著($P<0.05$)。VC 处理组 DPPH 自由基清除能力显著高于其他处理组,高于 HC 组 6.98%,高于 VAPFC、HAPFC 组 18.65%~20.76%,SFC 组 29.77%($P<0.05$)。根据 Jiménez-Escrig 等^[36]研究发现,类胡萝卜素与 DPPH 自由基清除能力有关,类胡萝卜素中的共轭双键可以产生更稳定的自由基中间体,可以提高抗氧化活性。冷冻浓缩设备对枸杞汁中类胡萝卜素的共轭双键破坏作用较大,导致 HAPFC、VAPFC、SFC 组的 DPPH 自由基清除率有所降低;而由于 HC、VC 处理时间短或隔绝氧气,对枸杞汁中类胡萝卜素的共轭双键破坏作用相对较小,所以两组的 DPPH 自由基清除率相对较高。同时

DPPH 与酚类物质含量趋势相似,这主要是因为果蔬原料的抗氧化活性与酚类物质含量之间存在一定的线性关系,热处理(大于 60 ℃)及在真空条件下可使部分酚类物质的种类、结构等发生变化,提高了抗氧化活性^[37]。李月^[38]研究发现,相比热浓缩,真空浓缩鸭梨膏的品质更佳,DPPH 自由基清除率和总还原力更高。综上,VC 处理对枸杞汁的 DPPH 自由基清除能力影响较小。

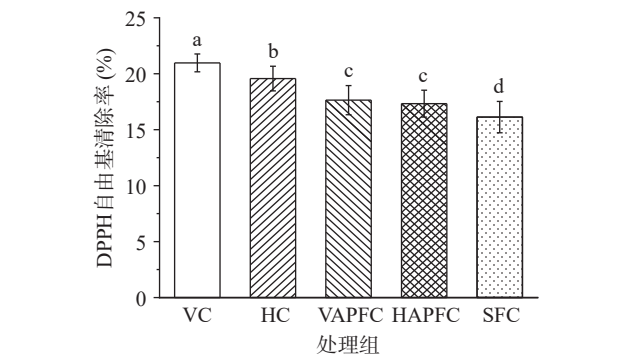


图 5 浓缩方式对 DPPH 自由基清除能力的影响
Fig.5 Effect of concentration method on scavenging ability of DPPH radical

2.7.2 浓缩方式对枸杞汁中的铁离子还原能力影响

具有抗氧化性的黄酮类物质与三价铁离子发生螯合及氧化还原反应后破坏了分子结构中的共轭体系^[39],因此可通过 FRAP 法测定浓缩枸杞汁抗氧化性的强弱。如图 6 所示,除 HAPFC 与 VAPFC 间无显著差异外,不同浓缩方法处理后的枸杞汁铁离子还原能力差异性显著($P<0.05$)。VC 处理组铁离子还原能力显著高于其他处理组,高于 HC 组 5.97%,VAPFC、HAPFC 组 15.64%~17.96%,SFC 组 26.76%($P<0.05$)。这可能是由于枸杞在冷冻浓缩过程中不断被冷槽内的刮板搅动,结构遭到破坏,细胞内的各种氧化酶暴露出来,加速了氧化反应,导致 HAPFC 和 VAPFC 处理的铁离子还原能力分别较 HC 和 VC 组低。SFC 处理的浓缩时间较 HAPFC 和 VAPFC 处理长,因此呈现更低的抗氧化能力;而 VC 组由于总酚含量相对较高,呈现出较高的抗氧化能力^[40]。综上,VC 处理对枸杞汁的铁离子还原能力影响较小。

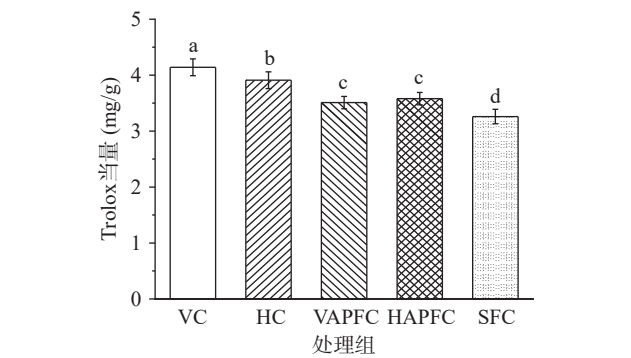


图 6 浓缩方式对铁离子还原能力的影响
Fig.6 Effect of concentration method on ferric ion reducing capacity

2.8 浓缩方式对枸杞汁理化指标影响的聚类热图分析

为更直接地分析比较不同浓缩方式对枸杞汁理化性质的影响,采用聚类热图分析法对浓缩方式与理化指标的关系进行可视化,聚类热图由变量值和聚类结果的树状图两部分组成,色块间颜色的差异对应不同的变量值,对比色标进行分析。聚类热图分析结构如图7所示,浓缩方式分为三类,分别以A~C表示,VC、HC聚为一类(A类),VAPFC、HAPFC聚为一类(B类),SFC为一类(C类)。理化指标大致可聚类为五组,分别以I~V表示,I组共有4种指标,分别为 b^* 值、 L^* 值、柠檬酸、酒石酸;II组共有9种指标,分别为DPPH、玉米黄质、总黄酮、叶黄素、 a^* 值、 β -胡萝卜素、总酚、FRAP、还原糖;III组共有2种指标,分别为苹果酸、草酸;IV组共有3种指标,分别为葡萄糖、果糖、 ΔE ;V组共有3种指标,分别为麦芽糖、乳糖、琥珀酸。聚类热图显示,VC处理的II、III组指标颜色较深,即VC处理对II、III组指标影响呈正相关;HC处理的I、IV组指标颜色较深,即HC处理与I、IV组指标相关性较大;SFC处理的V组指标颜色相对较深,即SFC处理主要影响V组理化品质。综上说明,VC处理能较好地保护酚类物质、部分类胡萝卜素及抗氧化活性;HC处理能减少部分糖和有机酸组分的损失但对色泽的影响较大,因此真空浓缩是一种适宜枸杞汁浓缩的方式。

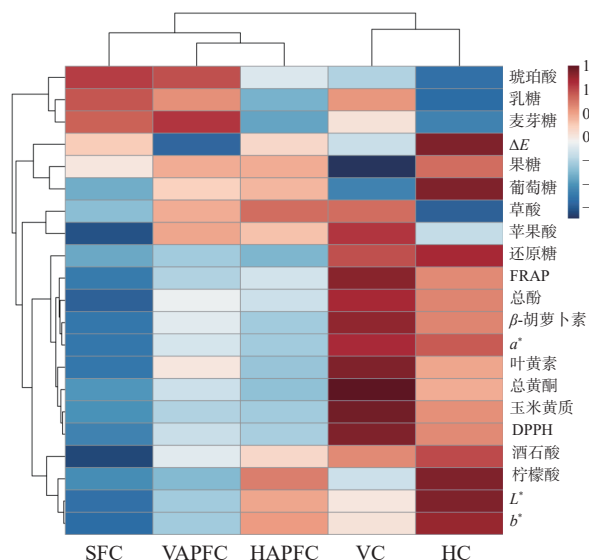


图7 不同浓缩处理后枸杞汁的聚类热图分析

Fig.7 Cluster heat map analysis of *Lycium chinense* juice after different concentration treatments

3 结论

本研究比较了五种浓缩方式对枸杞浓缩汁品质特性的影响,以总酚、总黄酮、DPPH、FRAP、还原糖、糖组分、有机酸组分、类胡萝卜素、色差等作为评价指标并对其分析。结果表明:VC处理能较好地保留枸杞汁中的总酚、总黄酮含量,较其他处理组分别提升8.76%~21.40%及5.41%~13.77%;显著提升类胡萝卜素含量($P<0.05$);DPPH自由基清除能力

和铁离子还原能力均比其他处理组升高6.98%~29.77%和5.97%~26.76%,减少了类胡萝卜素降解并呈现出较高的抗氧化能力。同时,VC处理对苹果酸和酒石酸影响较小,对色泽的保护效果显著优于其他处理组。然而,受到冷冻浓缩设备的限制,浓缩枸杞汁的糖度仅能达到 $35^{\circ}\text{Brix}\pm 0.2^{\circ}\text{Brix}$,HAPFC、VAPFC、SFC枸杞汁品质亦受其限制。因此,为了获得更高品质的浓缩枸杞汁,需要对冷冻浓缩设备进行升级并重复实验进行验证。综合讨论,真空浓缩是一种适宜枸杞汁浓缩的方式,本研究对高品质浓缩枸杞汁生产具有一定的实际指导意义,为果汁浓缩行业提供技术参考。

© The Author(s) 2025. 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] 刘敦华,刘军,李佩佩,等.枸杞深加工产品开发现状及研究进展[J].食品科学技术学报,2020,38(4):10-20. [LIU D H, LIU J, LI P P, et al. Development status and research progress of wolfberry deep-processing products[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 38(4): 10-20.]
- [2] MASCI A, CARRADORI S, CASADEI M A, et al. *Lycium barbarum* polysaccharides: Extraction, purification, structural characterisation and evidence about hypoglycaemic and hypolipidaemic effects. A review[J]. Food Chemistry, 2018, 254: 377-389.
- [3] XING X, LIU F, XIAO J, et al. Neuro-protective mechanisms of *Lycium barbarum* [J]. Neuro Molecular Medicine, 2016, 18(3): 253-263.
- [4] 王晓,徐小迪,陈勇,等.宁夏枸杞鲜果采后病原菌的分离、鉴定及水杨酸的抑病效果研究[J].食品安全质量检测学报,2018,9(22):5837-5842. [WANG X, XU X D, CHEN Y, et al. Isolation and identification of postharvest pathogenic bacteria in fresh wolfberry in Ningxia and research on the anti-disease effect of salicylic acid[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2018, 9(22): 5837-5842.]
- [5] MIYAWAKI O, KATO S, WATABE K. Yield improvement in progressive freeze-concentration by partial melting of ice[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(3): 377-382.
- [6] SÁNCHEZ J, RUIZ Y, RAVENTÓS M, et al. Progressive freeze concentration of orange juice in a pilot plant falling film[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(4): 644-651.
- [7] ONSEKIZOGLU P, BAHCECI K S, ACAR M J. Clarification and the concentration of apple juice using membrane processes: A comparative quality assessment[J]. Journal of Membrane Science, 2010, 352(1): 160-165.
- [8] 徐红雨,鞠葛金悦,肖更生,等.浓缩方式对枸杞汁品质的影响[J].食品研究与开发,2021,42(24):50-58. [XU H Y, JU G J Y, XIAO G S, et al. Effects of concentration methods on the quality of wolfberry juice[J]. Food Research and Development, 2021, 42(24): 50-58.]
- [9] 白小鸣,王华,曾小峰,等.果汁浓缩技术概述[J].食品与发酵工业,2014,40(7):131-135. [BAI X M, WANG H, ZENG X F, et al. Overview of juice concentration technology[J]. Food and Fer-

mentation Industry, 2014, 40(7): 131–135.]

[10] 门戈阳. 局部块冰式多级冷冻浓缩制备高浓度苹果醋的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016. [MEN G Y. Research on the preparation of high-concentration apple cider vinegar by local block ice multi-stage freeze concentration[D]. Nanchang: Nanchang University, 2016.]

[11] CONIDI C, DRIOLI E, CASSANO A. Biologically active compounds from Goji (*Lycium barbarum* L.) leaves aqueous extracts; Purification and concentration by membrane processes[J]. *Biomolecules*, 2020, 10(6): 935.

[12] FUKUMOTO L, DELAQUIS P, GIRARD B. Microfiltration and ultrafiltration ceramic membranes for apple juice clarification[J]. *Journal of Food Science*, 1998, 63(5): 845–850.

[13] 李悦, 拜淑娟, 高庆超, 等. 膜浓缩技术制备黑果枸杞花青素的工艺研究[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(7): 130–136. [LI Y, BAI S J, GAO Q C, et al. Preparation of anthocyanins from *Lycium barbarum* black fruit by membrane concentration technology[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(7): 130–136.]

[14] QIN F G F, ZHAO J C, RUSSELL A B, et al. Simulation and experiment of the unsteady heat transport in the onset time of nucleation and crystallization of ice from the subcooled solution[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(17): 3221–3231.

[15] 丁中祥. 悬浮结晶冷冻浓缩苹果汁的应用基础研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020. [DING Z X. Basic research on the application of suspension crystallization freeze-concentrated apple juice[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.]

[16] 秦贯丰, 丁中祥, 原姣姣, 等. 苹果汁冷冻浓缩与真空蒸发浓缩效果的对比[J]. *食品科学*, 2020, 41(7): 102–109. [QIN G F, DING Z X, YUAN J J, et al. Comparison of the effects of apple juice freeze concentration and vacuum evaporation concentration[J]. *Food Science*, 2020, 41(7): 102–109.]

[17] 丁中祥, 秦贯丰, 原姣姣, 等. 智能控制冷冻浓缩仪的研发及性能分析和测试[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(8): 271–280. [DING Z X, QIN G F, YUAN J J, et al. Development and performance analysis and testing of intelligent control freeze concentrator[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2019, 35(8): 271–280.]

[18] 陈霖虹, 傅曼琴, 陆胜勇, 等. 不同品种南瓜品质和挥发性成分分析[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(5): 223–233. [CHEN L H, FU M Q, LU S Y, et al. Analysis of quality and volatile components of different varieties of pumpkin[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(5): 223–233.]

[19] ORSAVOVÁ J, JURÍKOVÁ T, BEDNAŘÍKOVÁ R, et al. Total phenolic and total flavonoid content, individual phenolic compounds and antioxidant activity in sweet rowanberry cultivars[J]. *Antioxidants*, 2023, 12(4): 913.

[20] WANG Y, LIU F, CAO X, et al. Comparison of high hydrostatic pressure and high temperature short time processing on quality of purple sweet potato nectar[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2012, 16: 326–334.

[21] TABART J, KEVERS C, EVERS D, et al. Ascorbic acid, phenolic acid, flavonoid, and carotenoid profiles of selected extracts from *Ribes nigrum*[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(9): 4763–4770.

[22] PLAZA L, SÁNCHEZ-MORENO C, DE ANCOS B, et al. Carotenoid and flavanone content during refrigerated storage of orange juice processed by high-pressure, pulsed electric fields and low pasteurization[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44

(4): 834–839.

[23] CYWIŃSKA-ANTONIK M, CHEN Z, GROELE B, et al. Application of emerging techniques in reduction of the sugar content of fruit juice: Current challenges and future perspectives[J]. *Foods*, 2023, 12(6): 1181.

[24] GUINÉ R, BARROCA M. Influence of processing and storage on fruit juices phenolic compounds[J]. *International Journal of Medical and Biological Frontiers*, 2014, 20: 45–58.

[25] 田素梅, 李兆云, 马艳粉. 滇藏杜英总酚提取方法的筛选[J]. *食品工业*, 2023, 44(2): 102–107. [TIAN S M, LI Z Y, MA Y F. Evaluation of extraction methods of total phenols of *Elaeocarpus braceanus*[J]. *Food Industry*, 2023, 44(2): 102–107.]

[26] MATIAS A, NUNES S L, POEJO J, et al. Antioxidant and anti-inflammatory activity of a flavonoid-rich concentrate recovered from *Opuntia ficus-indica* juice[J]. *Food & Function*, 2014, 5(12): 3269–3280.

[27] 吴勋萍, 卢有媛, 李海洋, 等. 不同干燥方法对枸杞子药材多类型功效成分的影响及其分析评价[J]. *中草药*, 2022, 53(7): 2125–2136. [WU L P, LU Y Y, LI H Y, et al. Effects of different drying methods on multi-type functional components of *Lycium barbarum* and its analysis and evaluation[J]. *Chinese Herbal Medicine*, 2022, 53(7): 2125–2136.]

[28] 卢琦, 贾棚超, 邓梅, 等. 不同干制方式对沙田柚果渣粉活性物质的影响[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(14): 2825–2836. [LU Q, JIA X C, DENG M, et al. Effects of different drying methods on bioactive components of *Shatianyou* (*Citrus grandis* L. Osbeck) pomace powder[J]. *Chinese Agricultural Sciences*, 2022, 55(14): 2825–2836.]

[29] 喻芬. 枸杞真空-压力脉动联合干燥工艺研究[D]. 南昌: 江西中医药大学, 2021. [YU F. Study on vacuum-pressure pulsation combined drying process of wolfberry[D]. Nanchang: Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, 2021.]

[30] NHI T T Y, PHAT D T, QUYEN N N, et al. Effects of vacuum concentration on color, polyphenol and flavonoid contents and antioxidant activity of pomelo *Citrus maxima* (Burm. f.) Merr. juice[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 991(1): 012060.

[31] 杨青青. 干制及饮料制备对葛根总黄酮含量及抗氧化活性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021. [YANG Q Q. Effects of drying and beverage preparation on total flavonoid content and antioxidant activity of *Pueraria lobata*[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2021.]

[32] 胡雨卿, 余元善, 宋贤良, 等. 多酚对类胡萝卜素抗氧化性和稳定性的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(19): 57–67. [HU Y Q, YU Y S, SONG X L, et al. Effects of polyphenols on the antioxidant properties and stability of carotenoids[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(19): 57–67.]

[33] 魏苑, 张盛贵. 真空浓缩对枸杞营养成分的影响[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(11): 394–396, 399. [WEI Y, ZHANG S G. Effects of the nutritional components of *Lycium barbarum* by vacuum concentration[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2011, 32(11): 394–396, 399.]

[34] BIALIK M, WIKTOR A, RYBAK K, et al. The impact of vacuum and convective drying parameters on kinetics, total phenolic content, carotenoid content and antioxidant capacity of kiwiberri (*Actinidia arguta*) [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(19): 6914.

[35] 陈冰丹, 陈明. DPPH 自由基清除率检测方法优化及在啤酒中的应用[J]. *中外酒业*, 2021(19): 23–30. [CHEN B D, CHEN M. Optimization of detection method for DPPH free radical scav-

enging rate and its application in beer[J]. China and Foreign Wine Industry, 2021(19): 23–30.]

[36] JIMÉNEZ-ESCRIG A, JIMÉNEZ-JIMÉNEZ I, SÁNCHEZ-MORENO C, et al. Evaluation of free radical scavenging of dietary carotenoids by the stable radical 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2000, 80(11): 1686–1690.

[37] 柳杰, 程丽娜, 吴继军, 等. 真空浓缩偶联液氮喷雾速冻对荔枝浓缩汁品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(23): 216–226. [LIU J, CHENG L N, WU J J, et al. Effect of vacuum concentration coupled with liquid nitrogen spray quick freezing on the quality of litchi juice concentrate[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(23): 216–226.]

[38] 李月. 鸭梨膏加工工艺优化及其流变学特性研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022. [LI Y. Optimization of pear paste pro-

cessing technology and its rheological characteristics[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022.]

[39] 张海龙, 虞青婷, 吴清孝, 等. 基于铁离子作用结合高效液相色谱在线筛选金花茶花黄酮中抗氧化物质和体内抗氧化活性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2020, 32(5): 719–726. [ZHANG H L, YU Q T, WU Q X, et al. On-line screening of antioxidant substances and antioxidant activity in *Camellia japonica* flavonoids based on iron ion interaction combined with high performance liquid chromatography[J]. Natural Product Research and Development, 2020, 32(5): 719–726.]

[40] 张丽娟, 邹波, 肖更生, 等. 不同打浆及杀菌处理对荔枝浆品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 329–336. [ZHANG L J, ZHOU B, XIAO G S, et al. Effects of different beating and sterilization treatments on the quality of litchi pulp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 329–336.]