秦力悦, 何代琴, 常雅欣, 等. 基于多元统计学分析余甘子果脯综合品质 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 47−58. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030068

QIN Liyue, HE Daiqin, CHANG Yaxin, et al. Comprehensive Quality Analysis of *Phyllanthus emblica* L. Preserved Fruit Based on Multivariate Statistical Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(2): 47−58. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030068

·特邀主编专栏—地方特色食品: 加工技术、感官品质、风味特性和营养健康（客座主编: 易俊洁、和劲松、郭超凡）·

基于多元统计学分析余甘子果脯综合品质

秦力悦[1], 何代琴[1], 常雅欣[1], 王海丹[1], 胡　昕[1], 黄钰婷[2], 李　茜[3], 马菲菲[1,*]

（1.云南省农业科学院农产品加工研究所, 云南昆明 650221;
2.元谋艾莱克食品有限责任公司, 云南楚雄 651300;
3.云南白药集团健康产品有限公司, 云南昆明 650599）

摘　要: 为了探究余甘子果脯品质评价指标，建立评价体系，本试验以 8 种市售余甘子果脯为样品，测定、分析包括模糊数学感官评价、色值（L^*、a^*、b^*、C^*和 h^*值）、质构（硬度、粘附性、内聚性、弹性、咀嚼性）和理化性质（水分、总糖、还原糖、总酸、抗坏血酸、总酚、黄酮、ABTS$^+$和 DPPH 自由基清除率）在内共 20 个品质指标，并运用相关性分析、主成分分析和聚类分析对品质指标进行综合评价，筛选出影响余甘子果脯品质的关键评价指标。结果表明，8 种市售余甘子果脯的品质指标存在不同程度的变异，变异系数范围为 6.42%~56.34%，在色值参数中 a^*变化最大，质构参数中硬度、粘附性和咀嚼性的差异较大，理化参数中水分、总糖、总酸、抗坏血酸和总酚含量的变化较大；20 个品质指标之间，22 对指标间有显著的相关性（P<0.05），60 对指标间有极显著的相关性（P<0.01），感官评价与水分含量、抗坏血酸含量、L^*呈极显著的正相关（P<0.01），硬度与感官评价呈极显著的负相关（P<0.01）；品质指标的主成分分析提取到 4 个主成分，累计贡献率为 92.77%；利用偏最小二乘法分析，得到 7 个关键品质指标，并利用聚类分析进行验证，以上指标可有效区分不同品质的余甘子果脯。因此，基于多元统计学分析最终确定水分含量、抗坏血酸含量、DPPH 自由基清除率、L^*、h^*、硬度和咀嚼性为评价余甘子果脯品质的关键品质指标，可用于余甘子果脯的品质评价以及为研究加工提供理论基础和科学依据。

关键词: 余甘子, 果脯, 主成分分析, 偏最小二乘法, 品质评价

中图分类号: TS255.41　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)02−0047−12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030068　　本文网刊:

Comprehensive Quality Analysis of *Phyllanthus emblica* L. Preserved Fruit Based on Multivariate Statistical Analysis

QIN Liyue[1], HE Daiqin[1], CHANG Yaxin[1], WANG Haidan[1], HU Xin[1], HUANG Yuting[2], LI Qian[3], MA Feifei[1,*]

（1.The Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650221, China;
2.Yuanmou Aileke Food Company Limited, Chuxiong 651300, China;
3.Yunnan Baiyao Group Health Products Company Limited, Kunming 650599, China）

Abstract: In order to explore the quality evaluation indicators of *Phyllanthus emblica* L. preserved fruit and establish an evaluation system, taking eight commercially available kinds of *P. emblica* L. preserved fruit as samples, this study measured and analyzed 20 quality indicators, including fuzzy mathematical sensory evaluation, color values (L^*, a^*, b^*, C^*, and h^* values), texture (hardness, adhesion, cohesion, elasticity, and chewiness), and physicochemical properties (moisture,

收稿日期: 2025−03−07

基金项目: 云南省科技厅科技计划项目宾川乡村振兴科技创新示范县创建（202304BT090020）; 云南省科技厅科技计划项目乡村振兴科技专项-服务型科技特派员（202204BK090471）。

作者简介: 秦力悦（1991−）, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: qinliyue1120@163.com。

*** 通信作者:** 马菲菲（1988−）, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 729241399@qq.com。

total sugar, reducing sugar, total acid, ascorbic acid, total phenols, flavonoids, $ABTS^{+}$, and DPPH radical scavenging rate). Correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis were used to analyze the quality indicators and screen out the key quality evaluation indicators of *P. emblica* L. preserved fruit. The results showed that there were varying degrees of variation in the quality indicators of the eight commercially available varieties, with a coefficient of variation ranging from 6.42% to 56.34%. Among the color parameters, a^* showed the largest change, there were significant differences in hardness, adhesion, and chewiness among the texture parameters, and there were also significant changes in the content of moisture, total sugar, total acid, ascorbic acid, and total phenols among the physicochemical parameters. Among the 20 quality indicators, there was a significant correlation (P<0.05) between 22 pairs of indicators, and a highly significant correlation (P<0.01) between 60 pairs of indicators. Sensory evaluation was highly positively correlated with moisture content, ascorbic acid content, and L^* (P<0.01), while hardness was highly negatively correlated with sensory evaluation (P<0.01). The principal component analysis of quality indicators extracted four principal components, with a cumulative contribution rate of 92.77%. Using partial least squares analysis, seven key quality indicators were obtained and validated using cluster analysis, and they could distinguish different qualities of *P. emblica* L. preserved fruit effectively. Therefore, based on multivariate statistical analysis, it was ultimately determined that moisture content, ascorbic acid content, DPPH radical scavenging rate, L^*, h^*, hardness, and chewiness were key quality indicators for evaluating the quality of *P. emblica* L. preserved fruit. The research results of this study could provide a theoretical basis and scientific basis for the quality evaluation and processing of *P. emblica* L. preserved fruit.

Key words: *Phyllanthus emblica* L.; preserved fruit; principal component analysis; cluster analysis; quality evaluation

余甘子(*Phyllanthus emblica* L.)又名滇橄榄、油甘,是大戟科叶下珠属植物余甘子的果实,广泛分布于我国西南和东南多个省区,而云南省是全国野生余甘子分布最广,产量最高的省份[1]。余甘子营养丰富,含有多种维生素、氨基酸和生物活性物质(多糖、多酚、黄酮、萜类等),但其可利用率低,鲜果食用量有限。近年来,由于余甘子的独特风味和营养价值,被广泛地应用于食品加工领域,余甘子加工研究主要集中在余甘子果汁[2−4]、果脯[5−7]、软糖[8−9]、酵素[10]、果冻[11]、果粉[12−13]和固态调味品[14]领域。其中,余甘子果脯是近年来的新型果脯品类产品,因其清香回甘、具有多种活性成分等特点而广受消费者欢迎。在购物网站上对余甘子(滇橄榄)干/果脯进行搜索,可出现 1000 多条结果,产地遍布云南各地。但是,云南大多数余甘子果脯加工企业生产规模小、加工设备落后、加工过程不规范,导致产品品控不严,市面上产品品质参差不齐,降低了消费者对其的认可度,难以形成消费忠诚度,从而影响产业发展。

目前,余甘子果脯相关研究主要集中在加工工艺优化方面,张敏等[6]对比了 3 种糖渍工艺(常压预煮糖渍、盐渍糖渍、真空预煮负压糖渍)对余甘子果脯营养成分和品质的影响,何代琴等[5]研究了不同护色剂(柠檬酸、植酸和抗坏血酸)对余甘子果脯的护色效果,并没有涉及余甘子果脯品质分析及标准体系建立等相关研究。同时,我国也没有针对余甘子果脯的产品标准与生产规范,目前市售产品均执行的 GB/T 10782-2021《蜜饯质量通则》或 GB 14884-2016《食品安全国家标准 蜜饯》标准,在 GB/T 10782-2021《蜜饯质量通则》中仅对果脯的感官、含水量和总糖含量进行要求,而 GB 14884-2016《食品安全国家标准 蜜饯》主要对食品安全相关的污染物、微生物等进行要求。余甘子果脯的风味、形态、色泽和口感决定了其品质的优劣,因此对市售产品进行品质差异分析,找到能科学客观地评价指标以及建立品质评价标准,对于进一步从原料、工艺等角度开展质量调控研究和加工规范的制定具有重要的意义。

果脯研究中的品质评价指标主要为感官评价、色泽(包括褐变值)、总糖及水分为主[15−17],其余还涉及硬度、pH、果糖、葡萄糖、总酚、黄酮、抗坏血酸含量等[18−19]。参考以上果脯品质评价指标,本文选购了 8 种云南不同产地、配料及品牌的市售余甘子果脯样品为研究对象,测定、分析包括模糊数学感官评价、色值、质构和理化性质在内共 20 个品质指标,明确市售余甘子果脯之间的品质差异,并通过主成分分析和偏最小二乘法分析探索品质差异与品质指标之间的关联性,筛选出可用于科学全面评价余甘子果脯品质的关键指标并建立综合品质评价标准,以期为余甘子果脯的工艺研究和生产加工提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

8 种余甘子果脯　市售,将其以 1~8 进行编号,样品产地均为云南省境内,其余主要信息见表 1,指

表 1　余甘子果脯样品信息

Table 1　Information list of *P. emblica* L. preserved fruit

序号	配料信息	执行标准	生产地址
1	野生滇橄榄果、白砂糖、食用盐	GB 14884	普洱市
2	滇橄榄、蜂蜜、冰糖	GB 14884	红河哈尼族彝族自治州
3	滇橄榄、白砂糖、食盐	GB 14884	保山市
4	滇橄榄、多晶体冰糖	GB 14884	昆明市
5	滇橄榄、白糖、蜂蜜、食盐	GB/T 10782	曲靖市
6	橄榄、冰糖、蜂蜜	GB 1488	红河哈尼族彝族自治州
7	滇橄榄、冰糖、蜂蜜、食盐	GB 14884	保山市
8	滇橄榄、白糖、蜂蜜、食盐	GB/T 10782	曲靖市

标测定时产品均在保质期内；葡萄糖标准品、抗坏血酸标准品、亚硝酸钠、碳酸钠　广州光华科技股份有限公司；没食子酸标准品　北京索莱宝科技有限公司；芦丁标准品、2,6-二氯靛酚、福林酚、ABTS、DPPH、邻苯二甲酸氢钾　上海源叶生物科技有限公司；硫酸、DNS 溶液、硝酸铝、草酸　天津市风船化学试剂有限公司；蒽酮　国药集团化学试剂有限公司；氢氧化钠　成都金山化学试剂有限公司；无水乙醇　云南景锐科技有限公司；过硫酸钾　天津致远化学试剂有限公司；上述试剂均为分析纯。

ME204 电子分析天平、FE28 pH 计　梅特勒托利多仪器有限公司；BPG-9140A 精密鼓风干燥箱、BWS-5 恒温水槽与水浴锅　上海一恒科学仪器有限公司；TGL-16M 冷冻离心机、Multiskan GO 酶标仪　美国赛默飞世尔科技公司；CM-5 台式色差仪　日本柯尼卡美能达公司；TM-Touch 食品质构测定仪　美国 Food Technology Corporation 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　感官评价　参考 Yu 等[20] 的模糊数学感官评价方法，稍作修改。参照 GB/T 1629.1-2012《感官分析 选拔、培训与管理评价员一般导则》标准的要求挑选定员，依次对余甘子果脯的色泽、组织形态、风味、口感的重要程度进行权重打分，具体评定标准见表 2。

1.2.2　色值测定　参考任二芳等[21] 的方法，稍作修改，测定果脯球面的 L^*、a^*、b^*，每组样品测定 5 次。L^*表示样品亮度，L^*=0 为黑色，L^*=100 为白色；a^*表示样品的红绿度，$-a^*$=绿色，$+a^*$=红色；b^*值表示样品的黄蓝度，$-b^*$=蓝色，$+b^*$=黄色。同时，依据如下公式(1)和公式(2)[22] 进一步根据样品 L^*、a^*和 b^*计算样品色度 C^*和色相 h^*。色度 C^*包含 a^*和 b^*的贡献，是颜色的定量属性，其值越大，颜色越集中，色彩饱和度越高[23]。色调 h^*是颜色的定性属性，表征色彩的总体倾向，等效于吸收光谱的波峰位置，取值 0°(或 360°)、90°、180°和 270°分别为红色、黄色、绿色和蓝色色调[24]。

$$C^* = (a^{*2}+b^{*2})^{1/2} \quad \text{式（1）}$$

$$h^* = \arctan(b^*/a^*) \quad \text{式（2）}$$

1.2.3　质构分析　质构分析选用 50 mm 圆柱型探头，测试样品选取大小均匀、形态完整的半球形果脯，测试条件参考胡翔等[25] 的方法进行修改，检测速度 90 mm/min，形变量 30%，触发力 0.5 N，循环次数 2 次，每组样品检测 5 次。

1.2.4　理化指标测定

1.2.4.1　样品处理　称取余甘子果脯样品 100 g，经液氮速冻后，使用组织粉碎机研磨成粉，于−20 ℃ 密封保存备用。

1.2.4.2　水分、抗坏血酸和总酸测定　余甘子果脯中水分、抗坏血酸和总酸参照 GB/T 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中的水分测定》、GB/T 5009.86-2016《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》、GB/T 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》中所述的方法进行测定。

1.2.4.3　总糖的提取和测定　参照翁霞等[26] 的方法，稍作修改。称取 0.2 g 样品粉末，加入 1 mL 6 mol/L HCl 溶液和 1.5 mL 蒸馏水，沸水浴 0.5 h 后取出，冷却至室温，用 6 mol/L NaOH 溶液中和至中性，过滤，蒸馏水定容至 50 mL，得余甘子果脯总糖提取液。采用蒽酮比色法测定余甘子果脯中的总糖含量，以葡萄糖为标准品，标准曲线方程 Y=4.3672X+0.2698，R^2=0.9997。Y 为 620 nm 处的吸光度，X 为总糖含量(mg/g)。

表 2　余甘子果脯的感官评价标准

Table 2　Sensory evaluation standard of *P. emblica* L. preserved fruit

项目	评价标准	感官标准	评分(分)
色泽	优	黄绿色，色泽均匀，较透明，有光泽	15~20
	良	黄棕色，色泽较均匀，稍透明，稍有光泽	10~14
	中	黄褐色，色泽不均匀，透明度差，略有光泽	5~9
	差	褐色，有杂色，不透明，无光泽	1~4
组织形态	优	果肉饱满光滑，无结晶返砂	15~20
	良	果肉不够饱满，表皮稍有破损，无结晶返砂	10~14
	中	果肉皱缩不饱满，部分开裂，稍有结晶返砂	5~9
	差	果肉干缩严重，开裂，有结晶返砂	1~4
风味	优	酸甜适中，有橄榄特有的果香味，涩味适中，回甘良好	23~30
	良	酸甜比稍不协调，橄榄果味稍淡，涩味稍明显，回甘淡	16~22
	中	偏酸或偏甜，橄榄果味淡，涩味明显，无回甘	8~15
	差	很酸或很甜，无橄榄果香味，涩味很重，稍有异味，无回甘	1~7
口感	优	软硬度适中，果肉厚实有嚼劲，有韧性	23~30
	良	质地稍硬，果肉较厚实有嚼劲，稍有韧性	16~22
	中	质地较硬，果肉干瘪不易咀嚼，韧性差	8~15
	差	质地很硬，口感粗糙，难咀嚼，无韧性	1~7

1.2.4.4 还原糖的提取和测定 参照王丽等[27]的方法进行修改提取样品还原糖，称取 1 g 样品粉末，加入 10 mL 蒸馏水，摇匀，常温 200 W 超声提取 30 min，8000 r/min 离心 15 min，上清液为余甘子果脯还原糖提取液。采用 DNS 法测定余甘子果脯中的还原糖含量，以葡萄糖为标准品，标准曲线方程 Y=3.1637X+0.0139，R^2=0.9949。Y 为 540 nm 处的吸光度，X 为还原糖含量(mg/g)。

1.2.4.5 总酚和黄酮的提取和测定 提取余甘子果脯中的总酚和黄酮，参照刘祚祚等[28]的方法，稍作修改。称取 2 g 样品粉末，加入 30 mL 70% 乙醇溶液，60 ℃、200 W 超声提取 40 min，12000 r/min 离心 15 min，上清液为余甘子果脯的乙醇提取液。

总酚含量测定参照 Rambaran 等[29]采用福林酚法测定余甘子果脯中的总酚含量，以没食子酸为标准品，得到标准曲线方程 Y=25.371X+0.122，R^2=0.9957。Y 为 765 nm 处的吸光度，X 为总酚含量(mg/g)。

黄酮含量测定参照 Dong 等[30]采用 $NaNO_3$-Al$(NO_3)_3$ 比色法测定余甘子果脯中的黄酮含量，以芦丁为标准品，得到标准曲线方程 Y=4.283X+0.0085，R^2=0.9922。Y 为 510 nm 处的吸光度，X 为黄酮含量(mg/g)。

1.2.4.6 DPPH 自由基清除能力测定 参照肖新生等[31]的方法，稍作修改，使用无水乙醇配制 0.2 mmol/L DPPH 工作液，将余甘子果脯的乙醇提取液和 DPPH 工作液等体积混匀，避光反应 40 min，于 517 nm 波长下检测吸光度。按以下公式(3)计算 DPPH 自由基清除率。

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100 \quad \text{式（3）}$$

式中：A_1 为样品+DPPH 自由基工作液的吸光度；A_2 为样品+无水乙醇的吸光度；A_0 为样品溶剂+DPPH 自由基工作液的吸光度。

1.2.4.7 $ABTS^+$自由基清除能力测定 参照王国霞等[32]的方法，稍作修改，将 7 mmol/L ABTS 乙醇溶液和 4.9 mmol/L 过硫酸钾乙醇溶液等比例混合，室温避光放置 12~16 h，使用前用 70% 乙醇稀释，使其在 734 nm 下吸光度为 0.7±0.2，得到 ABTS 工作液。取 20 μL 余甘子果脯的乙醇提取液和 80 μL ABTS 工作液混匀，室温避光反应6 min，于 734 nm 波长下检测吸光度。按以下公式计算 $ABTS^+$自由基清除率。

$$ABTS^+\text{自由基清除率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100 \quad \text{式（4）}$$

式中：A_1 为样品+$ABTS^+$自由基工作液的吸光度；A_2 为样品+70% 乙醇溶液的吸光度；A_0 为样品溶剂+$ABTS^+$自由基工作液的吸光度。

1.3 数据处理

除特殊说明，所有实验均进行 3 次平行实验。数据采用 SPSS 26 软件进行单因素方差分析，结果表示为平均值±标准差，采用 Duncan's Multiple Range Test 计算组间的差异显著性（P<0.05）。将 8 种余甘子果脯样品作为评价单元，以 20 项品质指标为变量，采用 SPSS 26 进行皮尔逊相关性分析、主成分分析。采用 SIMCA 14.1 软件进行偏最小二乘法分析。相关性分析热图、主成分分析载荷图和聚类热图采用 Origin 2021 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 感官分析

模糊数学的方法已被广泛应用于食品研发及品质分析[20,33]中，该方法不仅能使模糊的感官分析科学化，还能有效解决评分方法的主观性和片面性。以色泽、组织形态、风味、口感为评价因素集进行权重打分，得到权重集 A=[0.15, 0.17, 0.32, 0.36]，计算每个指标 4 个等级的得分率，得到 8 个样品的模糊矩阵 R，结合权重集 A 与模糊矩阵 R，得到综合评判的模糊关系集 Y=A×R。以优(90)、良(80)、中(70)、差(60)为评语集，确定评价等级 Z=[90, 80, 70, 60]，则余甘子果脯的感官评分 W=Y×Z，计算得出 8 个样品的感官评分。结果如图 1 所示，1 号和 2 号样品的色泽和风味评分较高，1、2 和 3 号的组织形态评分较高，1、2、4 和 5 号口感评分较高。同时，由权重集 A 可知，感官评价人员对余甘子果脯的风味和口感权重打分较颜色和组织形态高，说明消费者更加关注果脯的风味和口感，总分最高的 2 号样品在风味和口感的评分也比其他样品高。样品的感官评价总分在 67.41~82.15 之间，80 分以上的样品 1 个(2 号)，75~80 分的样品 1 个(1 号)，70~75 分的样品 4 个(3、4、5 和 7 号)，70 分以下的样品 2 个(6 和 8 号)，由此可知目前市售的余甘子果脯品质参差不齐，其中 1 号和 2 号样品品质较高。

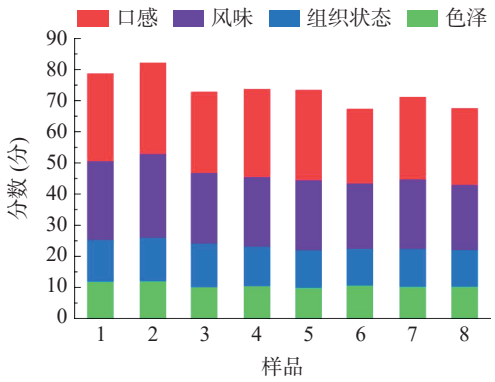


图 1 余甘子果脯的感官评价

Fig.1 Sensory evaluation of *P. emblica* L. preserved fruit

2.2 余甘子果脯的色值分析

余甘子果脯的颜色直接影响消费者对其品质的

判断，8 种余甘子果脯样品的色值检测结果如表 3 所示，a^*的变异系数最大为 39.2%，其次为 b^*和 C^*，L^*和 h^*的变异系数较小，说明余甘子果脯的颜色区别主要在红色、黄色和饱和度的变化。C^*表示样品的饱和度，数值越高则饱和度越高，8 种余甘子果脯样品的 C^*分布在 9.95~16.72 之间，变异系数为 17.51%，以上结果表明余甘子果脯的颜色饱和度均不高，视觉感知到的样本颜色强度较低。8 种余甘子果脯样品的 h^*分布在 66.49°~81.40°之间，变异系数为 6.63%，介于红色（0°）和黄色（90°）之间，说明余甘子果脯均有发生不同程度的褐变反应，导致市售果脯难以保持余甘子原有的绿色。以上颜色变化主要由余甘子果脯加工和储藏过程中的褐变反应造成，杀青和糖渍时间过长、烘干温度过高、储存不当均会导致果脯颜色变深，L^*值和 b^*值降低，a^*升高[5]，以及 C^*和 h^*的降低。其中 1 号样品 h^*最高、a^*最小、L^*较高，2 号样品的 C^*和 L^*最高、h^*也较大，说明 1 号和 2 号样品颜色偏黄且明亮，褐变情况较少，与感官评价结果一致，色泽得分较高。

表 3　余甘子果脯的色值

Table 3　Color values of *P. emblica* L. preserved fruit

样品	L^*	a^*	b^*	C^*	h^*(°)
1	22.97±0.99^{a}	1.50±0.25^{c}	10.01±0.74^{d}	10.13±0.71^{e}	81.40±1.76^{a}
2	23.47±0.74^{a}	3.16±0.32^{b}	16.42±0.53^{a}	16.72±0.58^{a}	79.12±0.78^{ab}
3	19.49±0.59^{c}	3.17±0.72^{b}	12.15±0.70^{c}	12.57±0.84^{d}	75.51±2.59^{cd}
4	20.59±0.68^{b}	1.80±0.44^{c}	9.77±0.67^{d}	9.95±0.65^{e}	79.53±2.67^{ab}
5	21.10±0.93^{b}	3.07±0.69^{b}	13.68±1.31^{b}	14.03±1.42^{bc}	77.48±1.68^{bc}
6	17.93±0.43^{d}	5.30±0.85^{a}	12.15±0.30^{c}	13.28±0.31^{cd}	66.49±3.68^{e}
7	21.17±0.99^{b}	5.25±0.28^{a}	13.65±1.17^{b}	14.63±1.12^{b}	68.88±1.67^{e}
8	18.64±0.99^{cd}	3.15±0.17^{b}	10.29±0.74^{d}	10.76±0.69^{e}	72.93±1.65^{d}
变异系数（%）	8.81	39.20	17.39	17.51	6.63

注：同列数据标注不同字母表示有显著性差异（P<0.05）；表3~表4同。

2.3　余甘子果脯的质构分析

余甘子果脯的口感是消费者关注的主要品质因素之一，果脯的口感主要取决于果脯的硬度和韧性。同时，果脯的质构特征也将影响咀嚼过程中风味物质的释放，从而影响消费者对果脯风味的感知[34]。因此通过质构仪模拟咀嚼过程，以硬度、粘附性、内聚力、弹性、咀嚼性反映果脯的口感[35]，进而对果脯口感进行多维度的评价。

结果由表 4 所示，样品间硬度、粘附性和咀嚼性的变异系数较大，而内聚性和弹性的变异系数较小，说明余甘子果脯的质构差异主要存在于果脯的硬度、粘附性和咀嚼性。8 个样品中 6 号样品硬度和咀嚼性显著大于其他样品（P<0.05），而 1、2 和 4 号样品的硬度和咀嚼性相对较小。在感官评价中，6 号样品口感评分最低，1、2 和 4 号评分最高，说明消费者对硬度和咀嚼性较小的余甘子果脯接受度更高。粘附性可以反映果脯表面的粘性，1、2、3、4 和 8 号样品的粘附性显著高于 5、6 和 7 号样品（P<0.05），粘附性高可能与水分含量高及果脯返砂有关。

表 4　余甘子果脯的质构特性

Table 4　Texture characteristics of *P. emblica* L. preserved fruit

样品	硬度（N）	粘附性（N·mm）	内聚性	弹性（mm）	咀嚼性（mJ）
1	27.84±1.95^{e}	0.20±0.02^{a}	0.43±0.05^{a}	3.04±0.15^{a}	36.31±5.55^{cd}
2	21.19±1.44^{f}	0.17±0.03^{a}	0.44±0.01^{a}	2.70±0.27^{ab}	24.63±1.58^{d}
3	34.44±1.32^{d}	0.20±0.04^{a}	0.44±0.04^{a}	2.82±0.22^{ab}	42.67±5.20^{c}
4	26.47±1.19^{e}	0.23±0.08^{a}	0.41±0.05^{a}	2.29±0.84^{b}	24.26±6.74^{d}
5	32.22±2.86^{d}	0.09±0.02^{b}	0.36±0.05^{a}	2.37±0.28^{ab}	26.93±4.64^{d}
6	64.23±3.31^{a}	0.05±0.01^{b}	0.3±0.03^{a}	2.86±0.30^{ab}	77.55±5.75^{a}
7	49.70±2.04^{c}	0.07±0.01^{b}	0.40±0.05^{a}	2.99±0.34^{ab}	60.12±13.44^{b}
8	57.21±2.73^{b}	0.18±0.07^{a}	0.38±0.11^{a}	2.74±0.58^{ab}	43.65±17.13^{c}
变异系数（%）	37.75	42.61	6.69	9.29	41.83

果脯质地与原料细胞壁结构及多糖[36]、糖渍浓度和加糖[37]种类密切相关，且不同的糖或糖醇对质构的影响很大[38]。同时，使用食用盐腌制水果可使果肉细胞失水，软化组织结构，便于加工[39]；在糖渍时添加食盐可以增大渗透压，缩短渗透时间，改善果脯组织结构[40]。表 1 中所示的市售余甘子果脯中糖的添加种类主要以蔗糖为主，区别在于使用白糖还是冰糖，部分样品中添加了蜂蜜，也有部分果脯中使用了食盐，说明糖渍工艺和糖渍配料均会影响余甘子果脯的质构特征。

2.4　余甘子果脯的理化指标分析

果脯的理化指标中，水分含量对于果脯成品的

表 5　余甘子果脯的理化指标

Table 5　Physicochemical properties of *P. emblica* L. preserved fruit

样品	水分含量（%）	总糖含量（mg/g）	还原糖含量（mg/g）	总酸含量（mg/g）	抗坏血酸含量（mg/g）	黄酮含量（mg/g）	总酚含量（mg/g）	$ABTS^+$自由基清除率（%）	DPPH自由基清除率（%）
1	22.67±0.65^{b}	533.89±1.05^{a}	213.37±2.98^{b}	4.93±0.09^{e}	132.59±1.58^{b}	14.48±0.64^{d}	18.11±0.90^{a}	97.67±0.22^{a}	87.67±0.28^{c}
2	24.56±1.07^{a}	395.12±2.76^{d}	207.57±3.39^{c}	4.55±0.09^{f}	214.18±0.92^{a}	19.29±0.33^{a}	18.51±1.26^{a}	97.02±0.21^{a}	90.96±0.28^{a}
3	19.96±0.80^{c}	423.77±1.60^{c}	218.22±0.87^{a}	3.38±0.08^{h}	38.09±0.01^{g}	13.90±0.33^{d}	15.10±0.85^{b}	91.79±0.57^{d}	82.08±0.59^{f}
4	22.39±0.91^{b}	384.88±2.05^{e}	183.90±2.08^{d}	4.34±0.03^{g}	128.26±2.43^{c}	15.99±0.37^{c}	17.55±0.71^{a}	95.75±0.12^{b}	85.44±0.24^{d}
5	21.29±1.54^{bc}	301.00±1.60^{g}	113.87±1.35^{g}	7.33±0.03^{a}	95.88±2.43^{d}	17.38±0.33^{b}	18.38±1.03^{a}	97.75±0.72^{a}	89.93±0.28^{b}
6	12.88±0.59^{e}	186.27±2.03^{h}	157.90±0.73^{f}	6.49±0.02^{b}	57.13±2.75^{f}	15.80±0.26^{c}	17.09±0.64^{a}	94.48±0.33^{c}	83.05±0.40^{e}
7	17.17±0.72^{d}	349.76±1.71^{f}	157.25±0.70^{f}	5.68±0.05^{c}	84.73±2.43^{e}	16.13±0.23^{c}	18.22±0.78^{a}	95.74±0.16^{b}	84.79±0.58^{d}
8	10.38±1.46^{f}	429.04±1.98^{b}	175.85±1.07^{e}	5.20±0.03^{d}	37.03±0.92^{g}	8.01±0.15^{e}	9.20±0.26^{c}	47.59±1.15^{e}	70.85±0.74^{g}
变异系数(%)	24.88	25.4	18.5	22.35	56.34	17.88	20.54	17.86	6.97

注：不同小写英文字母表示同列数据差异显著，P<0.05。

贮藏有重要意义，而总糖和还原糖含量不仅反映果脯的甜味，还是果脯加工过程的重要控制指标。因此，在 GB/T 10782《蜜饯质量通则》中要求果脯的水分/(g/100 g)≤35、总糖(以葡萄糖计)/(g/100 g)≤85。理化指标检测结果由表 5 所示，8 种果脯的水分含量分布在 10.38%~24.56% 之间，样品的总糖含量在 186.27~533.89 mg/g 之间，均符合上述国家标准的要求。可滴定酸和可溶性糖是水果中的重要风味来源和营养成分，8 个样品的总糖和总酸含量均具有显著性差异，变异系数较大。

抗坏血酸、黄酮和总酚是余甘子中的主要的活性成分[28]，上述活性成分具有较强的抗氧化能力，对 $ABTS^{+}$和 DPPH 自由基有较强的清除能力。由表 5 可知，8 种余甘子果脯的抗坏血酸含量变异系数为 56.34%，均大于其他理化指标，说明样品间的抗坏血酸含量差异较大，可能由于抗坏血酸含量易受加工和储运条件影响导致。DPPH 自由基清除率的变异系数为 6.79%，在理化指标中最小。

2.5 相关性分析

本文对 8 个余甘子样品的 20 个品质指标进行皮尔逊相关性分析，结果如图 2 所示，其中有 22 对指标之间呈显著的相关性(P<0.05)，60 对指标之间呈极显著的相关性(P<0.01)，说明 20 个品质指标之间具有较强的关联。

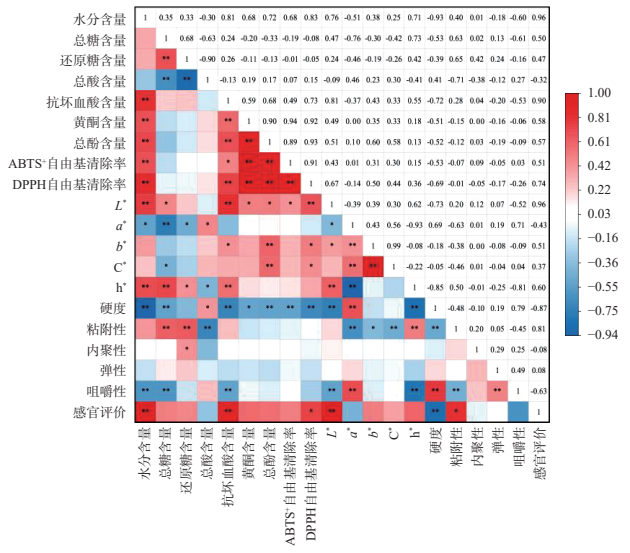


图 2 余甘子果脯品质指标间的相关性分析

Fig.2 Correlation analysis between quality indexes of *P. emblica* L. preserved fruit

注：*表示在 0.05 水平(双侧)上显著，P<0.05；**表示在 0.01 水平(双侧)上极显著，P<0.01。

水分与抗坏血酸、黄酮、总酚、$ABTS^{+}$及 DPPH 自由基清除率、L^{*}和 h^{*}呈极显著的正相关(P<0.01)，与 a^{*}呈显著的负相关(P<0.05)。水分一定程度代表了糖渍和干燥的程度，糖渍和干燥的程度越高，黄酮类、酚类物质在该过程中的渗透和降解就越多[41−42]。Alice 等[43] 的研究显示菠萝、柑橘皮和香橼果脯的 L^{*}与水分成正相关，本研究结果与之一致。水分还与硬度和咀嚼性呈极显著的负相关(P<0.01)，是由于果脯干燥过程中水分蒸发导致[44]；水分与感官评价也呈极显著的正相关(P<0.01)。

总糖含量与还原糖含量呈极显著的正相关(P<0.01)，与胡丽丽等[37] 的研究一致，当使用浓度不超过 50% 的蔗糖溶液糖渍时，果脯中的还原糖和总糖呈相同的上升趋势；总糖和还原糖与总酸呈显著负相关(P<0.01)，可能是由于总酸在果脯加工过程中损失较大[45]，而果脯在糖渍过程中吸收大量糖分，导致两者呈负相关。总糖与 L^{*}呈正相关(P<0.05)，总糖和还原糖与 a^{*}呈负相关(P<0.05)，与 h^{*}呈正相关(P<0.05)。非酶促褐变反应以美拉德反应为主，糖作为美拉德反应的底物，反应加速时，导致果脯褐变颜色加深[46]，但当反应减缓时，对底物的消耗量减少，果脯褐变减少，使总糖和还原糖含量呈现出与色值间的相关性。总糖与硬度及咀嚼性呈极显著的负相关(P<0.01)，总糖和还原糖与粘附性呈极显著的正相关(P<0.01)，还原糖与内聚性呈显著正相关(P<0.05)。以往研究结果显示，当使用较低的浓度蔗糖溶液糖渍时，草莓果脯呈干瘪状，硬度和咀嚼性较大，随着蔗糖浓度增加，果脯形态饱满，硬度和咀嚼性减小[37]。总酸含量值与 a^{*}呈显著正相关(P<0.05)，与 h^{*}呈显著的负相关(P<0.05)，Pham 等[47] 的研究表明橙汁的 pH 越小，产品褐变值越高，在余甘子果脯中可能由于原料中总酸含量较高，pH 较小，导致褐变反应增加，a^{*}升高。

抗坏血酸、黄酮、总酚、$ABTS^{+}$及 DPPH 自由基清除率之间呈不同程度的正相关，上述指标均与 L^{*}呈不同程度的正相关，抗坏血酸及 DPPH 自由基清除率与 b^{*}呈显著正相关(P<0.05)，总酚与 b^{*}和 C^{*}呈极显著的正相关(P<0.01)，这是由于抗坏血酸、黄酮、总酚这一类化合物直接参与果脯的酶促褐变和非酶促褐变反应，一方面这类物质具有抗氧化和护色的作用，另一方面又是褐变反应的底物，当褐变反应被抑制时，这类物质损耗也减少，使果脯维持较高的 L^{*}和 b^{*}[48−49]，较低的 a^{*}[47]。

L^{*}与 a^{*}呈显著负相关(P<0.05)，与 b^{*}呈显著正相关(P<0.05)，与 h^{*}呈极显著正相关(P<0.01)，与柑橘皮和香橼果脯研究结果一致[43]。由于 C^{*}和 h^{*}均由 a^{*}和 b^{*}计算得到，因此与 a^{*}和 b^{*}具有相关性。余甘子果脯的硬度与咀嚼性呈极显著的正相关(P<0.01)，二者与粘附性均呈现极显著的负相关(P<0.01)。

同时，水分、抗坏血酸含量、DPPH 自由基清除率、L^{*}、硬度和粘附性与感官评价均有不同程度的相关性，说明理化、色值和质构指标评价与感官评价之间具有较强的相关性，检测指标在一定程度可以反映消费者对余甘子果脯品质评价。

上述相关性分析结果表明，余甘子果脯的感官

品质、色值、质构、理化特性各指标之间存在较强的相关性，且各项指标所呈现的信息有一定程度的重叠，大量信息造成了分析障碍，因此可通过主成分分析、偏最小二乘法对余甘子果脯的品质指标进行降维简化[50]，消除指标间的重叠性，从而筛选出关键品质指标，提升综合评价的精确性。

2.6　主成分分析

本文通过对 8 种余甘子果脯的感官评价、色值、质构、理化分析共 20 个指标进行主成分分析，由表 6 可知，前 4 个主成分特征值大于 1，累计贡献率为 92.77%，表明这 4 个主成分可以反映余甘子果脯品质评价的主要信息。

表 6　余甘子果脯品质指标主成分特征值、方差贡献率和累计贡献率

Table 6　Eigenvalues, variance contribution rates and cumulative contribution rates of principal components of quality indexes of *P. emblica* L. preserved fruit

主成分	特征值	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)
1	8.82	44.10	44.10
2	5.67	28.33	72.43
3	2.69	13.46	85.89
4	1.38	6.88	92.77

以表 7 中余甘子果脯品质指标旋转后主成分载荷矩阵的数据为基础，绘制主成分分析载荷图(图 3)，图 3 中可直观地显示主成分与变量的直接关系，图 3 中不同变量的分布由载荷因子决定，离象限原点越远，对主成分的贡献值越大。结合图 3 和表 6 可知，第 1 主成分特征值为 8.82，方差贡献率为 44.1%，h^*和粘附性主要起正向作用，载荷值分别为 0.95、0.79，咀嚼性、a^*和硬度起负向作用，载荷值分别为−0.96、−0.89、−0.87。第 2 主成分特征值为 5.67，方差贡献率为 28.33%，抗氧化相关的指标起正向作用，黄酮含量、总酚含量、$ABTS^+$及 DPPH 自由基清除率载荷值较高，分别为 0.97、0.90、0.98、0.91。第 3 主成分特征值为 2.69，方差贡献率为 13.46%，还原糖含量、内聚性和弹性其正向作用，载荷值分别为 0.90、0.89、0.71，总酸含量载荷值为−0.75，起负向作用。第 4 主成分特征值为 1.38，方差贡献率为 6.88%，b^*和 C^*起正向作用，载荷值分别为 0.92 和 0.91。

根据表 8 中 5 个主成分的因子得分系数矩阵，可计算得到每个主成分的因子得分，各主成分的因子得分按下公式计算。

$$F_1=0.07X_1+0.12X_2+0.01X_3-0.03X_4+0.09X_5-0.07X_6-0.04X_7-0.10X_8-0.01X_9+0.10X_{10}-0.13X_{11}+0.04X_{12}+0.01X_{13}+0.14X_{14}-0.12X_{15}+0.11X_{16}-0.11X_{17}-0.10X_{18}-0.19X_{19}+0.10X_{20}$$

$$F_2=0.09X_1-0.12X_2-0.03X_3+0.04X_4+0.01X_5+0.27X_6+0.18X_7+0.30X_8+0.20X_9-0.02X_{10}-0.02X_{11}-0.12X_{12}-0.11X_{13}+0.01X_{14}-0.05X_{15}-0.05X_{16}+0.15X_{17}-0.04X_{18}+0.08\ X_{19}-0.01X_{20}$$

$$F_3=0.01X_1+0.10X_2+0.28X_3-0.22X_4+0.003X_5+0.002X_6-0.02X_7+0.04X_8-0.03X_9+0.02X_{10}+0.06X_{11}+0.01X_{12}+0.02X_{13}-0.05X_{14}+0.02X_{15}+0.06X_{16}+0.31X_{17}+0.27X_{18}+0.14X_{19}+0.06X_{20}$$

$$F_4=0.01X_1+0.06X_2+0.02X_3-0.003X_4+0.14X_5-0.15X_6-0.01X_7-0.21X_8-0.06X_9+0.16X_{10}+0.16X_{11}+0.41X_{12}+0.40X_{13}-0.05X_{14}+0.01X_{15}-0.08X_{16}-0.11X_{17}+0.12X_{18}-0.07X_{19}+0.14X_{20}$$

式中：X_1~X_{20} 分别表示 20 个品质指标；F1~F4 分别表示主成分 1~4 的主成分因子得分。

结合主成分因子得分公式并以相应的主成分方差贡献率为权重进行线性加权求和，通过以下公式计算各种余甘子果脯的综合评价得分。

$$F=\frac{44.10}{92.77}\times F1+\frac{28.33}{92.77}\times F2+\frac{13.46}{92.77}\times F3+\frac{6.88}{92.77}\times F4$$

根据综合得分公式，得出 8 种余甘子果脯的品质综合得分，并进行排序，F 值越大，表明样品品质越

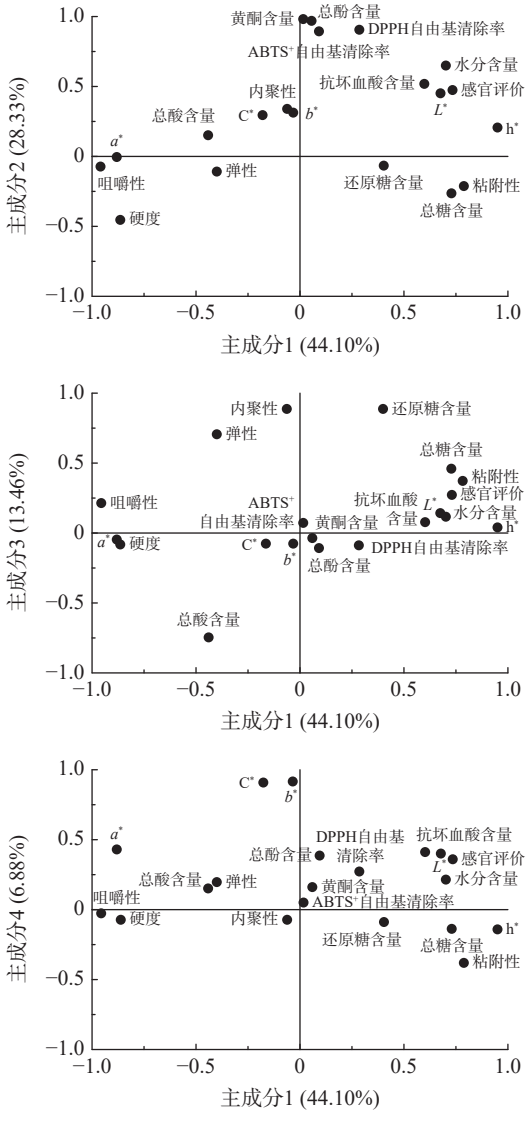


图 3　余甘子果脯品质指标主成分分析载荷图

Fig.3　Principal component analysis load diagram of quality indexes of *P. emblica* L. preserved fruit

注：X、Y 轴参考线原点为 0。

表 7 余甘子果脯品质指标旋转后主成分载荷矩阵

Table 7 Principal component loading matrix after rotation of quality indexes of *P. emblica* L. preserved fruit

指标	成分			
	1	2	3	4
水分含量(X_1)	0.71	0.66	0.12	0.22
总糖含量(X_2)	0.73	−0.27	0.46	−0.14
还原糖含量(X_3)	0.40	−0.07	0.90	−0.09
总酸含量(X_4)	−0.44	0.15	−0.75	0.16
抗坏血酸含量(X_5)	0.60	0.52	0.08	0.41
黄酮含量(X_6)	0.06	0.97	−0.04	0.17
总酚含量(X_7)	0.09	0.90	−0.10	0.39
ABTS$^+$自由基清除率(X_8)	0.02	0.98	0.07	0.05
DPPH自由基清除率(X_9)	0.29	0.91	−0.08	0.28
L^*(X_{10})	0.68	0.46	0.14	0.40
a^*(X_{11})	−0.89	−0.01	−0.04	0.43
b^*(X_{12})	−0.03	0.31	−0.07	0.92
C^*(X_{13})	−0.18	0.30	−0.07	0.91
h^*(X_{14})	0.95	0.21	0.03	−0.14
硬度(X_{15})	−0.87	−0.46	−0.08	−0.07
粘附性(X_{16})	0.79	−0.21	0.38	−0.38
内聚性(X_{17})	−0.06	0.34	0.89	−0.07
弹性(X_{18})	−0.40	−0.11	0.71	0.20
咀嚼性(X_{19})	−0.96	−0.07	0.22	−0.03
感官评价(X_{20})	0.74	0.47	0.28	0.36

表 8 余甘子果脯品质指标主成分得分系数矩阵

Table 8 Principal component score coefficient matrix of quality indexes of *P. emblica* L. preserved fruit

指标	成分			
	1	2	3	4
水分含量(X_1)	0.07	0.09	0.01	0.01
总糖含量(X_2)	0.12	−0.12	0.10	0.06
还原糖含量(X_3)	0.01	−0.03	0.28	0.02
总酸含量(X_4)	−0.03	0.04	−0.22	0.00
抗坏血酸含量(X_5)	0.09	0.01	0.00	0.14
黄酮含量(X_6)	−0.07	0.27	0.00	−0.15
总酚含量(X_7)	−0.04	0.18	−0.02	−0.01
ABTS$^+$自由基清除率(X_8)	−0.10	0.30	0.04	−0.21
DPPH自由基清除率(X_9)	−0.01	0.20	−0.03	−0.06
L^*(X_{10})	0.10	−0.02	0.02	0.16
a^*(X_{11})	−0.13	−0.02	0.06	0.16
b^*(X_{12})	0.04	−0.12	0.01	0.41
C^*(X_{13})	0.01	−0.11	0.02	0.40
h^*(X_{14})	0.14	0.01	−0.05	−0.05
硬度(X_{15})	−0.12	−0.05	0.02	0.01
粘附性(X_{16})	0.11	−0.05	0.06	−0.08
内聚性(X_{17})	−0.11	0.15	0.31	−0.11
弹性(X_{18})	−0.10	−0.04	0.27	0.12
咀嚼性(X_{19})	−0.19	0.08	0.14	−0.07
感官评价(X_{20})	0.10	−0.01	0.06	0.14

高。结果如图 4 所示，2 号样品得分排名第一，其次为 1 号和 4 号，其中 1 和 2 号样品品质较好，得分大于 0.5 分，与感官评价结果一致。

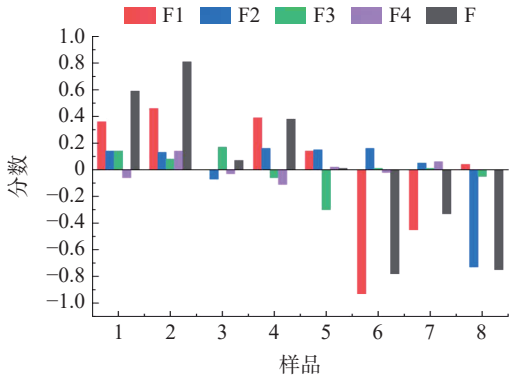


图 4 余甘子果脯品质指标主成分得分与综合得分

Fig.4 Principal component scores and composite scores of quality indexes of *P. emblica* L. preserved fruit

2.7 偏最小二乘法分析

偏最小二乘法是一种新型多元统计分析法，是多元线性回归法、主成分分析法和典型相关分析法的有机结合，可有效对自变量多、样本量少而相关性高的数据进行分析[51]。为了更加直观地体现出感官评价指标和检测指标的相关性。本研究以检测指标为 X 矩阵，感官评价指标为 X 矩阵，进行偏最小二乘法分析。各品质指标与感官评价之间的关系如图 5 所示，其中靠外的两个圆环分别表示 50% 和 100% 的相关性，在两个圆环内表示相关性较好，变量间的距离也表示两者的相关性，位置越接近，正相关性越强，两者在距离圆心的相反位置，负相关性越强，两者位置越垂直越不相关。感官评价与水分含量、抗坏血酸含量、DPPH 自由基清除率、h^*、L^*有较好的相关性且呈正相关；与硬度、咀嚼性、a^*呈负相关。

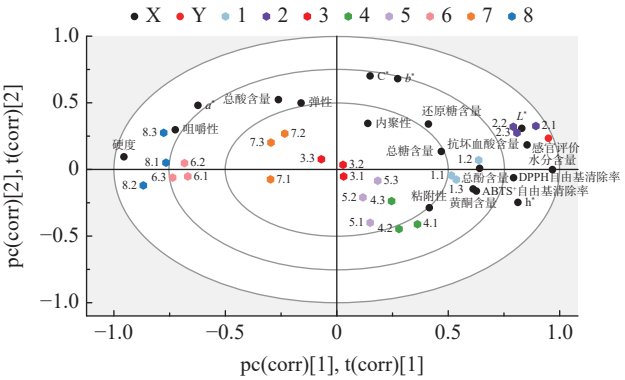


图 5 余甘子果脯品质指标与感官评价的偏最小二乘法分析结果

Fig.5 Partial least squares plot for the correlation between quality indicators and sensory evaluation of *P. emblica* L. preserved fruit

在偏最小二乘法中使用交叉验证和置换检验可以评价模型的性能指标，模型的 R^2X=0.721、R^2Y=0.964、Q^2=0.945，以上数值在 0.5~1 之间，表明模型

的拟合度较好。同时，对模型进行 200 次置换模拟，结果如图 6 所示，模型 0 回归线与横坐标交叉，且截距为负数，所有置换检验 R^2 和 Q^2 均低于原始值，可认为没有发生过拟合，该模型的预测能力很好，能够用于描述不同余甘子果脯样品之间的差异。变量投影重要性（variable important for the projection，VIP）值可以反映变量的贡献程度，当 VIP 值>1 时被认为具有显著影响，结果如图 7 所示，VIP 值>1 的品质指标有 7 个，分别为水分含量、抗坏血酸含量、L^*、硬度、h^*、DPPH 自由基清除率、咀嚼性，说明以上品质指标对感官评价具有显著影响，在一定程度上可代替感官评价，减少评价人员的主观因素，科学客观的评价余甘子果脯的品质。

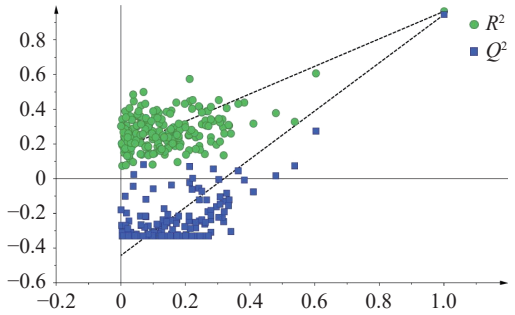


图 6　验证模型

Fig.6　Permutation test plot

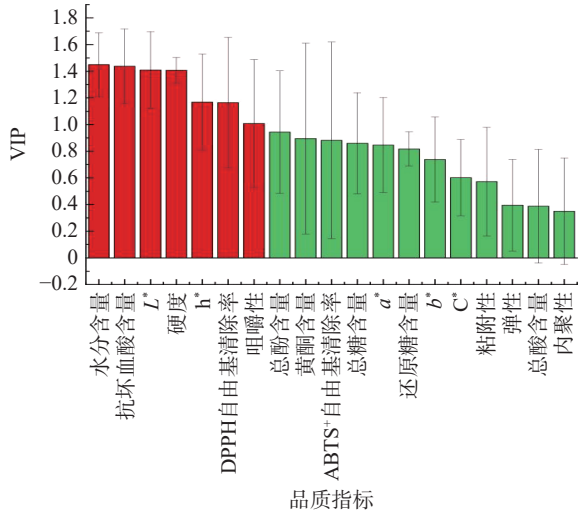


图 7　余甘子果脯品质指标的 VIP 值

Fig.7　VIP values of quality indicators of *P. emblica* L. preserved fruit

2.8　聚类分析

聚类分析是研究样本与指标分类问题的一种多元分析工具，已被广泛运用于各个领域，根据相似程度对变量的特性进行分类[52]，相似度更高的变量优先聚类，类内变量具有较高相似度，类间变量的差异较大[53]。通过偏最小二乘法分析得到 7 个重要的品质指标可用于评价余甘子果脯的优劣，利用聚类分析可进一步验证这 7 个品质指标对于余甘子果脯样品的评价效果。

聚类热图如图 8 所示，颜色越蓝色代表样品对应的指标数值越低，反之颜色越偏橙色，则样品对应的指标数值越高。通过聚类分析，7 个品质指标可将七个样品的 3 个平行样本归为一类，说明关键品质指标可将样品区分开。同时，可将 8 个余甘子果脯分为 2 大类，其中 1、4、5 和 2 号样品为第一类，3、7、6 和 8 号样品为第二类，第一类样品的咀嚼性和硬度较低，h^*、L^*、DPPH 自由基清除率、抗坏血酸含量和水分含量较高，第二类样品则相反。在第一类样品中 1 和 2 号样品被聚为一类，4 和 5 号为一类，区别在于 1 和 2 号样品的 h^*、L^*、DPPH 自由基清除率、抗坏血酸含量和水分含量高于 4 和 5 号样品。在第二类样品中 3 和 7 号样品为一类，6 和 8 号为一类，6 和 7 号样品的硬度叫另外 2 个样品更高，而 L^*、抗坏血酸含量和水分含量更低。由以上结果可知，水分含量、抗坏血酸含量、DPPH 自由基清除率、L^*、h^*、硬度和咀嚼性，这 7 个评价指标将不同品质的余甘子果脯进行区分和分类，可有效评价余甘子果脯样品的品质优劣。

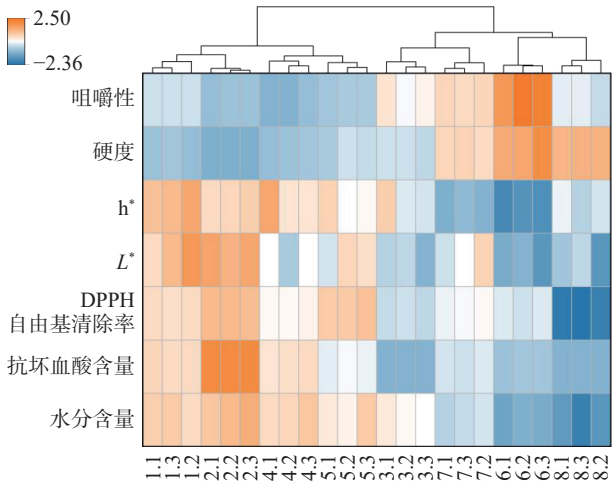


图 8　余甘子果脯品质指标聚类热图

Fig.8　Heatmap of quality indicators in *P. emblica* L. preserved fruit

3　结论

研究所购的余甘子果脯产品的水分和总糖含量均符合 GB/T 10782-2021《蜜饯质量通则》的要求。但目前市售产品质量参差不齐，在不同余甘子果脯样品的色值指标中 a^*变化最大；质构指标中硬度、粘附性和咀嚼性的差异较大；理化指标中水分、总糖、总酸、抗坏血酸和总酚含量的变化较大。通过对 20 个品质指标进行相关性分析，发现各项指标之间有较强的相关性，各指标呈信息重叠现象，采用主成分分析、偏最小二乘法分析和聚类分析对品质指标进行分析和检验，最终确定水分含量、抗坏血酸含量、DPPH 自由基清除率、L^*、h^*、硬度和咀嚼性为综合评价余甘子果脯品质优劣的决定性指标。

目前，GB/T 10782-2021《蜜饯质量通则》仅对果脯的水分和总糖含量进行要求，果脯加工研究中多以

感官评价、色值、质构对果脯品质进行评价[54−56]，而余甘子不仅可食用也可药用，因其含有大量抗坏血酸和单宁类、酚类、黄酮类物质，具有较强的抗氧化、抗炎作用[57]，因此部分研究也会将以上活性成分含量和抗氧化能力作为余甘子的品质评价之一[28]。基于本文研究结果，得到的 7 个关键品质评价指标在果脯品质和余甘子营养价值方面均有涉及，且其中 5 个指标与感官评价具有显著的相关性，说明这 7 个关键品质评价指标可在一定程度上代替感官评价对余甘子果脯品质优劣进行客观科学的评价，可作为考察余甘子果脯产品综合品质的标准，为余甘子果脯的进一步工艺研究和生产质量把控提供了理论依据和科学支持。此外，余甘子果脯的风味和回甘程度也是其重要的品质因素，进一步对其挥发性成分、滋味、回甘效应相关成分进行分析评价，对特征风味物质和回甘物质进行阐释，可为余甘子果脯品质评价提供更多理论依据和科学支持。

© 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］ 黄佳聪, 吴建花, 龚发萍, 等. 两个滇橄榄无性系品种的营养成分及抗氧化活性分［J］. 食品工业, 2015, 36(2): 290−293. ［HUANG J C, WU J H, GONG F P, et al. Nutritional components and antioxidant activity of two *Phyllanthus emblica* L. clones［J］. The Food Industry, 2015, 36(2): 290−293.］

［2］ 宋志姣, 闭金贵, 李如霞, 等. 余甘子果汁加工工艺优化及理化性质分析［J］. 保鲜与加工, 2024, 24(4): 26−30,36. ［SONG Z J, BI J G, LI R X, et al. Optimization of processing technology and analysis of physicochemical properties of *Phyllanthus emblica* juice［J］. Storage and Process, 2024, 24(4): 26−30,36.］

［3］ 吴紫彬, 邹知静, 刘亚男, 等. 基于模糊数学和响应面法优化余甘子果汁饮料生产工艺［J］. 粮食与油脂, 2024, 37(2): 100−105. ［WU Z B, ZOU Z J, LIU Y N, et al. Optimization of the production process of *Phyllanthus emblica* L. fruit juice beverage based on fuzzy mathematics and response surface methodology［J］. Grains and Fats, 2024, 37(2): 100−105.］

［4］ LONG X M, LI R, GU J X, et al. Changes in phenolic compounds of *Phyllanthus emblica* juice during different storage temperature and pH conditions［J］. Journal of Food Science, 2024, 89(7): 4312−4330.

［5］ 何代琴, 李荣辉, 胡昕, 等. 滇橄榄果脯无硫护色工艺优化研究［J］. 食品科技, 2023, 48(4): 104−109,118. ［HE D Q, LI R H, HU X, et al. Optimization of sulfur-free color preserving process for Yunnan olive preserved fruit［J］. Food Science and Technology, 2023, 48(4): 104−109,118.］

［6］ 张敏, 王天生, 朱继信, 等. 不同加工工艺对余甘果脯品质的影响［J］. 贵州农业科学, 2000(2): 41−43. ［ZHANG M, WANG T S, ZHU J X. et al. Effect of different processing ways on quality of candied fruit of *Phyllanthus emblical*［J］. Guizhou Academy of Agricultural Sciences, 2000(2): 41−43.］

［7］ 赵苹, 刘凤书. 余甘子营养成分及果脯加工的研究［J］. 食品工业科技, 1997(4): 73−74. ［ZHAO P, LIU F S. Research on the nutritional composition and preserved fruit processing of *Phyllanthus emblica*［J］. Technology of Food Industry, 1997(4): 73−74.］

［8］ 蔡秀丹, 谭小凤, 吴荣书. 滇橄榄凝胶软糖的研制［J］. 食品科技, 2009, 34(6): 83−87. ［CAI X D, TAN X F, WU R S. Study on preparation of *Phyllanthus embical* fruit jelly-sweets［J］. Food Science and Technology, 2009, 34(6): 83−87.］

［9］ 骆扬, 张福显. 滇橄榄梨膏软糖的研制［J］. 文山学院学报, 2023, 36(5): 19−24. ［LUO Y, ZHANG F X. Development of a kind of *Phyllanthus embical* fruit and snow pear compound soft sweets［J］. Journal of Wensan University, 2023, 36(5): 19−24.］

［10］ 苏春雷. 高压静电场辅助发酵余甘子酵素工艺及其酵素特性研究［D］. 广州: 华南理工大学, 2019. ［SU C L. Study on high-voltage electrostatic field-assisted fermentation of *Phyllanthus emblica* jiaosu and Its characteristics［D］. Guangzhou: South China University of Technology. 2019.］

［11］ 王建超, 陈志峰, 郭林榕. 余甘子果冻加工工艺［J］. 东南园艺, 2018, 6(6): 35−37. ［WANG J C, CHEN Z F, GUO L R. Processing technology of *Phyllanthus emblica* fruit jelly［J］. Southeast Horticulture, 2018, 6(6): 35−37.］

［12］ ZHANG L Y, LIN L T, HU Y, et al. Debittering of emblica (*Phyllanthus emblica* L.) fruit powder: preparation and biological activity［J］. Food Chemistry, 2024, 21: 100853.

［13］ 宋志姣, 陈兰, 李悦, 等. 真空冷冻干燥制备余甘子果粉工艺研究［J］. 保鲜与加工, 2023, 23(4): 28−33. ［SONG Z J, CHEN L, LI Y, et al. Preparation techniques for *Phyllanthus emblica* powder by vacuum freeze-drying［J］. Storage and Process, 2023, 23(4): 28−33.］

［14］ 黄俊生, 邱晨晨, 陈耿廷. 余甘子固态调味品生产工艺研究［J］. 中国调味品, 2017, 42(12): 111−114. ［HUANG J S, QIU C C, CHEN G T. Study on production technology of solid- state condiment *Phyllanthus emblica*［J］. China Condiment, 2017, 42(12): 111−114.］

［15］ 王雪, 王新宇, 李慧, 等. 以杏坯为原料制作杏脯的护色硬化工艺研究［J］. 中国调味品, 2023, 48(6): 47−52,58. ［WANG X, WANG X Y, LI H, et al. Study on the color protection and hardening process of preserved apricots made from apricot billets［J］. China Condiment, 2023, 48(6): 47−52,58.］

［16］ 何臻, 曹永丽, 杨亚静. 青脆李果脯加工过程中的护色工艺研究［J］. 现代食品, 2023, 29(17): 137−140,148. ［HE Z, CAO Y L, YANG Y J. Study on the color protection technology during the processing of green crisp plum preserved fruit［J］. Modern food, 2023, 29(17): 137−140,148.］

［17］ 伊丽达娜·开赛尔, 白羽嘉, 郑丽萍, 等. 杏果脯预处理的烫漂与护色工艺优化［J］. 食品研究与开发, 2023, 44(24): 107−114. ［ELDANA K, BAI Y J, ZHENG L P, et al. Optimization of blanching and color protection process of preserved apricot fruit pretreatment［J］. Food Research and Development, 2023, 44(24): 107−114.］

［18］ 张溟, 梁珀溶, 范方宇, 等. 朝鲜蓟果脯真空糖渍工艺优化及品质评价［J］. 食品研究与开发, 2024, 45(6): 184−189. ［ZHANG H, LIANG P R, FAN F Y, et al. Optimization of vacuum sugar permeability technology and quality evaluation of preserved atichoke fruits［J］. Food Research and Development, 2024, 45(6): 184−189.］

［19］ 张汉禹, 王雪妃, 蒲志平, 等. 不同热风干制温度对赛买提杏干非酶褐变的影响［J］. 食品科技, 2022, 47(7): 38−45. ［ZHANG H Y, WANG X F, PU Z P, et al. Effect of different hot air-drying temperature on non-enzymatic browning of saimaiti apricot［J］. Food Science and Technology, 2022, 47(7): 38−45.］

［20］ YU M, MA J Y, WANG X H, et al. Peanut sprout yogurt: increased antioxidant activity and nutritional content and sensory evaluation by fuzzy mathematics[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(7): e16663.
［21］ 任二芳, 罗朝丹, 黄燕婷, 等. 不同品种芒果果脯和果干的品质比较分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(7): 282−290,183. ［REN E F, LUO C D, HUANG Y T, et al. Comparative analysis on the quality of preserved mango and dried mango of different varieties[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(7): 282−290,183.］
［22］ PATHARE P B, OPARA U L, AL-SAID F A. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 6(1): 36−60.
［23］ BRIZ-CID N, FIGUEIREDO-GONZÁLEZ M, RIAL-OTERO R, et al. The measure and control of effects of botryticides on phenolic profile and color quality of red wines[J]. Food Control, 2015, 50: 942−948.
［24］ 雷用东, 邓小蓉, 罗瑞峰, 等. 3 种颜色体系在食品应用中的研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(1): 241−246. ［LEI Y D, DENG X R, LUO R D, et al. Progress in the application of three types of color system in color measurement of foods[J]. Food Science, 2016, 37(1): 241−246.］
［25］ 胡翔, 李洛欣, 冯建国, 等. 不同渗糖工艺对蓝莓果脯品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 254−260. ［HU X, LI L X, FENG J G, et al. Effect of different sugar infiltration processes on quality of candied blueberry fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(10): 254−260.］
［26］ 翁霞, 辛广, 李云霞. 蒽酮比色法测定马铃薯淀粉总糖的条件研究[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(17): 86−88. ［WENG X, XING G, LI Y X. Study on determination conditions of total sugar from potato starch by anthrone colorimetry[J]. Food Research and Development, 2013, 34(17): 86−88.］
［27］ 王丽, 孙艳, 汤晓娟, 等. 3 种豆豉总糖、还原糖、多酚及抗氧化活性比较[J]. 粮食科技与经济, 2023, 48(3): 93−97. ［WANG L, SUN Y, TANG X J, et al. Comparison of total sugar, reducing sugar, polyphenols and antioxidant activity in three kinds of douchi[J]. Food Science and Technology and Economy, 2023, 48(3): 93−97.］
［28］ 刘祚祚, 赵雪竹, 蒲慧, 等. 滇橄榄不同采摘期果实品质的变化规律[J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 293−301. ［LIU Z Z, ZHAO X Z, PU H, et al. Dynamic quality changes of *Phyllanthus emblica* L. in different picking periods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(6): 293−301.］
［29］ RAMBARAN T F, BOWEN-FORBES C S. Chemical and sensory characterisation of two rubus rosifolius (red raspberry) varieties[J]. International Journal of Food Science, 2020, 2020(1): 1−8.
［30］ DONG J Q, ZHANG M, LU L, et al. Nitric oxide fumigation stimulates flavonoid and phenolic accumulation and enhances antioxidant activity of mushroom[J]. Food Chemistry, 2012, 135(3): 1220−1225.
［31］ 肖新生, 周文君, 奉美桃, 等 基于主成分分析的不同干燥方式对江永香姜营养品质和抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(23): 310−321. ［XIAO X S. ZHOU W J. FENG M T. et al. Effect of different drying method on the nutritional quality and antioxidant activity of Jiangyong fragrant gingers[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(23): 310−321.］
［32］ 王国霞, 祎琳, 牛富婷, 等. 不同提取方法对密银花多糖理化性质及抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(24): 196−203. ［WANG G X, YI L, NlU F T, et al. Effects of different extraction methods on physicochemical properties and antioxidant activity of polysaccharides from *Lonicerae japonicae* flos[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(24): 196−203.］
［33］ 付晓萍, 李凌飞, 李方琴, 等. 模糊数学评判金橘果脯的关键工艺与配方[J]. 四川农业大学学报, 2014, 32(1): 63−67. ［FU X P, LI L F, LI F Q, et al. Comprehensive evaluation on key processing technology and formuta of kumquat dried eruit based on fuzzy math[J]. College of Food Science and Technoloey, 2014, 32(1): 63−67.］
［34］ KAZUHIRO H, YUJI N, ÉTIENNE S, et al. Retronasal aroma of beef pate analyzed by a chewing simulator[J]. Molecules, 2022, 27(10): 3259.
［35］ SIDDIQUI S A, SHRESTHA P, AWAD N M H, et al. A review on textural quality analysis of dried food products[J]. Food Reviews International, 2023, 40(7): 1854−1874.
［36］ SHI F, BI J F, YI J Y, et al. Cell wall polysaccharides and mono-/disaccharides as chemical determinants for the texture and hygroscopicity of freeze-dried fruit and vegetable cubes[J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133574.
［37］ 胡丽丽. 草莓果脯加工及贮藏过程中品质变化研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022. ［HU L L. Study on quality change during processing and storage of preserved strawberry fruit[D]. Yangzhou: Yangzhou university, 2022.］
［38］ WANG F Z, LYU J, JIAN W X, et al. Texture formation of dehydrated yellow peach slices pretreated by osmotic dehydration with different sugars via cell wall pectin polymers modification[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 108080.
［39］ 马菲菲, 胡昕, 王瀚墨, 等. 李子果脯制备工艺优化研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(12): 3873−3879. ［MA F F, HU X, WANG H M, et al. Study on the process optimization of preserved plum[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(12): 3873−3879.］
［40］ 张绍阳, 李洪艳, 李刚凤, 等. 不同工艺条件对沿河沙子空心李果脯品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(23): 127−132. ［ZHANG S Z, LI H Y, LI G F, et al. Effect of different processing conditions on quality of yanhe *Prunussalicina* Lindl. cv 'Shazikongxinli' preserved fruit[J]. Food Research and Development, 2019, 40(23): 127−132.］
［41］ DEVIC E, GUYOT S, DAUDIN J D, et al. Effect of temperature and cultivar on polyphenol retention and mass transfer during osmotic dehydration of apples[J]. Agri-Food Chemistry, 2015, 58(1): 606−614.
［42］ ALMEIDA J A R, MUSSI L P, OLIVERIRA D B, et al. Effect of temperature and sucrose concentration on the retention of polyphenol compounds and antioxidant activity of osmotically dehydrated bananas[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2014, 39(6): 482−492.
［43］ ALICE V, CARLA S, ABRAO A S, et al. Texture quality of candied fruits as influenced by osmotic dehydration agents[J]. Journal of Texture Studies, 2016, 47(3): 239−252.
［44］ 胡筱. 金橘果脯在不同糖渍处理后的理化品质特性分析研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020. ［HU X. Study on the physical and chemical properties of preserved kumquat fruit after different sugar osmosis processin[D]. Changsha: Hunan University, 2020.］
［45］ 杨文博, 刘慧, 刘杰超, 等. 加工条件对青梅果脯营养成分的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(12): 4669−4674. ［YANG W B, LIU H, LIU J C, et al. Effects of different processing methods on the nutrient content of prunus mume[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2017, 8(12): 4669−4674.］

[46] YE Y, DENG W, LI A J, et al. Non-enzymatic browning of a composite puree of choerospondias axillaris, snow pear, and apple: kinetic modeling and correlation analysis[J]. Food Science and Biotechnology, 2023, 32: 1039−1047.
[47] PHAM H T T, KITYO P, BUVE C, et al. Influence of pH and composition on nonenzymatic browning of shelf-stable orange juice during storage[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(19): 5402−5411.
[48] INTARASIT S, SAENGNIL K. Transient production of H2O2 and no induced by ascorbic acid coincides with promotion of antioxidant enzyme activity and reduction of pericarp browning of harvested longan fruit[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 277: 109784.
[49] TILLEY A, MCHENRY M P, MCHENRY J A, et al. Enzymatic browning: The role of substrates in polyphenol oxidase mediated browning[J]. Current Research in Food Science, 2023, 7: 100623.
[50] EROGLU A, DOGAN M, TOKER O S, et al. Classification of kashar cheeses based on their chemical, color and instrumental textural characteristics using principal component and hierarchical cluster analysis[J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(4): 909−921.
[51] SUNG J, SUH J H, CHAMBERS A H, et al. Relationship between sensory attributes and chemical composition of different mango cultivars[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(18): 5177−5188.
[52] GOYENECHE R, ROURA S L, SCALA K D. Principal component and hierarchical cluster analysis to select hurdle technologies for minimal processed radishes[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 57: 522−529.
[53] KEENAN D F, VALVERDE J M, GORMLEY R T, et al. Selecting apple cultivars for use in ready-to-eat desserts based on multivariate analyses of physicochemical properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 48: 308−315.
[54] 卢珍兰, 韦爱珍, 余森艳, 等. 凤梨果脯超声波渗糖工艺的研究[J]. 粮食与食品工业, 2023, 30(1): 28−33. [LU Z L, WEI A Z, YU S Y, et al. Study on ultrasonic osmosis technology of preserved pineapple[J]. Cereal & Food Industry, 2023, 30(1): 28−33.]
[55] 冯颖, 张萍萍, 赵存朝, 等. 响应面优化百香果果皮果脯制备工艺[J]. 食品工业科技, 2022, 43(17): 275−282. [FENG Y, ZHANG P P, ZHAO C C, et al. Optimization of preparation technology of passion fruit peel and preserved fruit by response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(17): 275−282.]
[56] 牛丽影, 陈建, 王锐, 等. 市售草莓脯的品质差异分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(1): 239-246. [NIU L Y, CHEN J, WANG R, et al. Analysis of quality property variations in commercial candied strawberries [J] Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(1): 239-246.]
[57] 杨婉媛, 陈晓维, 刘杜娟, 等. 余甘子的生物活性及加工研究进展[J]. 广东农业科学, 2022, 49(7): 120-130. [YANG W Y, CHEN X W, LIU D J, et al. Research progress in biological activity and processing of *Phyllanthus emblica*[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2022, 49(7): 120-130.]