魏佳仪, 张渌淘, 丁博文, 等. 基于主成分分析和聚类分析对不同采收期枸杞芽菜品质综合评价 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 395−405. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070190
WEI Jiayi, ZHANG Lutao, DING Bowen, et al. Comprehensive Quality Evaluation of *Lycium barbarum* L. Vegetable at Different Harvest Periods Using Principal Component Analysis and Cluster Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 395−405. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070190

· 分析检测 ·

基于主成分分析和聚类分析对不同采收期枸杞芽菜品质综合评价

魏佳仪[1,2], 张渌淘[2], 丁博文[2], 禄　璐[2], 段淋渊[2], 米　佳[2,*], 闫亚美[1,2,*]
（1.宁夏大学食品科学与工程学院, 宁夏银川 750021;
2.宁夏农林科学院枸杞科学研究所, 宁夏银川 750002）

摘　要: 本研究以‘宁杞菜 1 号’枸杞芽菜的 5 个采收期为试材，对其感官指标和理化指标进行测定分析，采用相关性、主成分和系统聚类分析，构建综合评价模型。结果表明：5 个采收期枸杞芽菜感官指标及营养品质间存在不同程度的相关性，L^*与 a^*显著负相关、与 b^*显著正相关（$P<0.05$）；总酚与褐变度显著正相关（$P<0.05$），蛋白质与叶绿素显著正相关、与水分显著负相关（$P<0.05$），水分与叶绿素呈非常显著负相关（$P<0.01$）。不同采收期枸杞芽菜的品质评价指标可由 3 个主成分表示，其累计方差贡献率为 93.229%。系统聚类分析将 5 个采收期枸杞芽菜分为 3 类，分类结果与主成分综合评价结果基本一致。其中，第 1 类：C1（5 月采）和 C2（6 月采）硬度、弹性、咀嚼性、褐变度及水分指标高度相似，其硬度适中、弹性与咀嚼性协同匹配，褐变度低（色泽鲜亮）、水分含量高（芽菜鲜嫩），因此，可判断其表观品质可能更契合鲜食消费需求；第 2 类：C3（7 月采）在色泽、质构及总酚和甜菜碱含量等营养指标表现最优，C4（8 月采）总黄酮、蛋白质含量突出，这两个时期营养品质表现更优秀，适合深加工；第 3 类：C5（9 月采）因其褐变度高、质地干硬、营养积累不足、水分流失严重，与其他样本差异显著，所以综合品质在整个采收期中处于劣势。本研究结果旨在揭示不同采收期对枸杞芽菜造成的质量影响，为后续枸杞芽菜的选取和加工以及产品质量均一化提供理论依据和数据支撑。

关键词: 枸杞芽菜, 采收期, 主成分分析, 偏最小二乘法, 品质评价
中图分类号: TS222.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0395−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070190
本文网刊:

Comprehensive Quality Evaluation of *Lycium barbarum* L. Vegetable at Different Harvest Periods Using Principal Component Analysis and Cluster Analysis

WEI Jiayi[1,2], ZHANG Lutao[2], DING Bowen[2], LU Lu[2], DUAN Linyuan[2], MI Jia[2,*], YAN Yamei[1,2,*]
（1.School of Food Science and Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;
2.Institute of Goji Berry Science Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China）

Abstract: This study used *Lycium barbarum* L. vegetable 'Ningqicai No.1' harvested at five different stages as the experimental material. Sensory and physicochemical indices were measured and analyzed, and a comprehensive evaluation model was established using correlation analysis, principal component analysis, and hierarchical cluster analysis. The results showed that the sensory indices and nutritional quality of *Lycium barbarum* L. vegetable at different harvest stages were correlated to varying degrees. The L^* value was significantly negatively correlated with a^* and significantly positively corre-

收稿日期: 2025−07−17
基金项目: 宁夏重点研发项目（2021BEF02008）; 宁夏“枸杞功效物质基础研究与深加工产品研发”科技创新团队项目（2024CXTDOO7）。
作者简介: 魏佳仪（1998−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 枸杞深加工, E-mail: weijiayi0101@163.com。
*** 通信作者:** 米佳（1989−）, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 枸杞精深加工, E-mail: lorna@126.com。
闫亚美（1982−）, 女, 博士, 研究员, 研究方向: 枸杞精深加工, E-mail: yanyamei@163.com。

lated with b^* (P<0.05). Total phenolic content was significantly positively correlated with browning degree (P<0.05). Protein content was significantly positively correlated with chlorophyll content and significantly negatively correlated with moisture content (P<0.05), while moisture content showed an extremely significant negative correlation with chlorophyll content (P<0.01). The quality evaluation indices of *Lycium barbarum* L. vegetable at the five harvest stages could be represented by three principal components, with a cumulative variance contribution rate of 93.229%. Hierarchical cluster analysis divided the five harvest stages into three groups, and the classification results were generally consistent with those of the principal component comprehensive evaluation. The first group included C1, harvested in May, and C2, harvested in June. These two stages showed high similarity in hardness, springiness, chewiness, browning degree, and moisture content. Their moderate hardness, coordinated springiness and chewiness, low browning degree, bright appearance, and high moisture content indicated tender texture and better visual quality, suggesting that they might be more suitable for fresh consumption.The second group included C3, harvested in July, and C4, harvested in August. C3 exhibited the best overall performance in color, texture, total phenolic content, and betaine content, while C4 showed prominent total flavonoid and protein contents. These two stages demonstrated superior nutritional quality and were therefore more suitable for further processing. The third group consisted of C5, harvested in September, which differed significantly from the other samples due to its high browning degree, dry and hard texture, insufficient nutrient accumulation, and severe moisture loss. Therefore, its comprehensive quality was relatively inferior among all harvest stages. Overall, this study revealed the effects of different harvest stages on the quality of *Lycium barbarum* L. vegetable, providing theoretical guidance and data support for raw material selection, subsequent processing, and quality standardization of *Lycium barbarum* L. vegetable products.

Key words: *Lycium barbarum* L. vegetable; harvest period; principal component analysis; partial least squares method; quality evaluation

叶用枸杞(*Lycium barbarum*)又称天精草、枸杞菜,为茄科(Solanaceae)枸杞属(*Lycium*)多年生灌木[1],现代《中药大辞典》中记载叶用枸杞可“补虚益精,清热明目。主治虚劳发热,烦渴,目赤昏痛”[2];宁夏枸杞叶以枸杞茶之名收录于《宁夏中药材标准》[3]中,具有滋补肝肾、养血益精、明目润肺之功。叶用枸杞现也多作一年生绿叶蔬菜栽培,是近年流行且营养价值极高的药食兼用蔬菜之一[4−5]。据报道,叶用枸杞茎叶粗蛋白含量不仅高达 30%~45%[6],富含甜菜碱[7]、黄酮类物质[8]、枸杞多糖等生物活性物质和多种氨基酸与矿物质[9],具有抗氧化[10]、抗癌[11]、降血脂[12] 和降血糖[13] 等作用。同时还具有一苗十年、管理成本低等种植优势。目前我国已育成宁杞菜 1 号、宁杞 9 号、天精 3 号等叶用枸杞新品种[5],其中,宁杞菜 1 号为当前市场中的主要栽植品种[8],具有营养生长旺盛、适生性广等特性,已分别通过宁夏科技厅的成果鉴定[5] 和国家林木良种审定[6]。宁杞菜 1 号,其具有较强的环境适应性、易于管理、长势好、产菜量高(667 m^2 产菜 1695 kg)、生产周期长以及营养丰富等特征,是一种绿色优质无公害品种,可在田间大量生产[14]。叶用枸杞嫩芽采收季节性强(5~9 月)、采收时间短(10 d 左右),嫩芽长大会失去食用价值,而植物采收期与其营养品质与功能活性成分有着直接密切的关系[14]。因此对于不同采收期枸杞芽菜品质综合评价对枸杞芽菜的开发利用具有重要的经济价值和社会价值。

近年来,对于枸杞叶的研究主要集中在茶制品以及其本身功效成分研究上,如:Li 等[15] 研究发现,宁夏枸杞叶茶的铁含量高于乌龙茶和观音王茶,锌含量则优于明香茶和观音王茶。Pollini 等[16] 证实,枸杞叶总黄酮提取物对胰脂肪酶和 α-淀粉酶具有显著抑制作用。Andrei 等[17] 发现枸杞叶对高血糖、高脂血症患者具有辅助治疗效果。此外,刘静[18] 通过对枸杞叶可溶性糖、游离氨基酸、黄酮类化合物和茶多酚等化学成分的含量进行分析,为得到具有较高活性成分且感官品质良好的保健绿茶提供了理论基础。闫亚美等[19] 研究表明不同生产厂家、品种、栽培条件下的枸杞叶的黄酮、多酚、氨基酸含量与组成差异较大。然而,值得注意的是,宁夏作为我国枸杞主产区,近年来枸杞芽菜产业发展迅速,但对枸杞芽菜的品质及加工并未得到充分探究,而生产实践中已观察到不同季节采收的枸杞芽菜感官品质差异显著,这一现象对枸杞芽菜标准化生产工艺的建立形成了阻碍,相关研究报道的缺失也制约了枸杞芽菜产业的精细化管理与价值提升。

对作为鲜食蔬菜枸杞芽菜的品质综合评价,是明确不同采收期对其品质差异影响的关键前提。针对宁夏地区枸杞芽菜,通过对不同采收期下其品质特性的系统评估,可深入探索品质差异与各项品质指标之间的内在关联,进而揭示采收期这一关键因素对枸杞芽菜质量形成的具体影响机制。该研究成果不仅能为后续枸杞芽菜鲜食选取、加工工艺优化提供科学的理论依据,更能为实现枸杞芽菜产品质量的标准化与均一化提供有力的数据支撑,对推动枸杞芽菜产业的规范化发展具有重要实践意义。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

枸杞芽菜　采自宁夏回族自治区银川市宁夏绿色世纪农业科技有限公司,于 2024 年 5 月至 9 月,每间隔 30 d 取一次,采时从植株顶部向下采集长度

为 8~10 cm 的叶片，共 5 个采收期，并按月份顺序将样品编号为 C1~C5（表 1）；芦丁（纯度≥98%）、甜菜碱（纯度≥98%）、没食子酸（纯度≥98%）、牛血清蛋白（纯度≥98%）　购自上海源叶生物科技有限公司；亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠　分析纯，天津大茂化学试剂有限公司；甲醇、无水乙醇　色谱纯，徐州天鸿化工有限公司；无水碳酸钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、考马斯亮蓝 G-250　分析纯，上海广诺化学科技有限公司。

表 1　样品信息

Table 1　Sample information

C1	C2	C3	C4	C5
5月采收	6月采收	7月采收	8月采收	9月采收

BS 224 S 分析天平　德国赛多利斯公司；UV-1780 紫外可见分光光度计　日本岛津仪器有限公司；R-300 旋转蒸发仪　瑞士 Büchi 有限公司；Waters 2695 高效液相色谱仪及 2487 紫外吸收检测器　美国 Waters 公司；De-500 多功能粉碎机　浙江红景天工贸有限公司；CM-5 分光测色仪　日本柯尼卡美能达控股株式会社；TA-XT.Plus 质构仪　英国 Stable Micro Systems 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品制备　将枸杞芽菜不同采收期的试验材料均分为两部分处理。

第一部分：采收后立即置于 4 ℃ 预冷的保鲜泡沫箱中，在 2 h 内运回实验室，迅速完成色泽、质构特性、褐变度、叶绿素和水分含量等鲜样指标的测定。

第二部分：用于总黄酮、总酚和甜菜碱等理化指标测定。将新鲜芽菜样品立即置于液氮中速冻固定，随后转入真空冷冻干燥机中冻干，至水分含量低于 6%；冻干样品经高速粉碎机粉碎，过 40 目标准筛，得到均匀粉末，密封后避光保存于−80 ℃ 超低温冰箱中待测。每个采样点均重复三次。

1.2.2　感官评价　参考宣仕芬等[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 15 名长期从事食品相关专业的人员组成感官评价小组，评价人员无不良嗜好，感知敏锐且评价前未接触过刺激性物品，依次对不同采收期枸杞芽菜的风味、组织形态、色泽、口感的重要程度进行权重打分，评价不同样品前需漱口，具体评定标准见表 2。对 15 名品评员的评价结果进行汇总分析，分别从风味、组织形态、色泽和口感四个方面确定权重，得到权重集 A=[0.22, 0.23, 0.25, 0.30]。进一步统计每个指标在四个等级中的得票率，构建出 5 个样品所对应的模糊矩阵 R。通过综合评判模型 Y=A×R，计算得到各样品的感官评分。

1.2.3　枸杞芽菜色泽的测定　采用 CM-5 分光测色仪对枸杞芽菜的色泽进行测定[21]，每个样品测定 3 次，记录数据。其中 L^* 表示明度；a^* 表示从红色到绿色之间的色彩指数，正值为红色，负值为绿色；b^* 表示从蓝色到黄色之间的色彩指数，正值为黄色，负值为蓝色。

表 2　枸杞芽菜的感官评价标准

Table 2　Sensory evaluation criteria for *Lycium barbarum* L. vegetable

项目	评价标准	感官标准	评分（分）
风味	优	清香浓郁，具有枸杞芽菜特有的清新香气，无异味	15~20
	良	清香较明显，枸杞芽菜香气稍淡，无异味	10~14
	中	香气较淡，枸杞芽菜香气不突出，无异味	5~9
	差	无香气，或有青草腥味或其他异味	1~4
组织形态	优	叶片大小均匀，无老化纤维	15~20
	良	叶片大小较均匀，轻微纤维感	10~14
	中	叶片大小不均匀，有一定纤维感	5~9
	差	叶片大小差异大，纤维感明显	1~4
色泽	优	嫩绿色，色泽均匀，鲜亮有光泽，无杂色	15~20
	良	绿色，色泽较均匀，较鲜亮，稍有光泽	10~14
	中	深绿色，色泽不均匀，光泽度一般	5~9
	差	黄绿色或有枯黄部分，色泽杂乱，无光泽	1~4
口感	优	鲜嫩，脆爽，咀嚼性好，无渣感	15~20
	良	较鲜嫩，脆度较好，稍有渣感	10~14
	中	质地偏硬，脆度一般，渣感较明显	5~9
	差	质地坚硬，无脆感，渣感重	1~4

1.2.4　枸杞芽菜质构的测定　采用 TA-XT.Plus 质构仪进行测试[21]，试样尺寸 10 mm×10 mm，采用 TPA 程序，P/0.5 探头，试样测试速率为：前 2.0 mm/s，中 1.0 mm/s，后 1.0 mm/s，压缩形变量 30%，停留时间 5 s，依次测得枸杞芽菜的硬度、胶黏性、内聚性、咀嚼性、弹性。

1.2.5　枸杞芽菜水分含量的测定　参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法进行测定，每个样品重复 3 次。

1.2.6　总黄酮含量的测定　参照闫亚美等[21] 的方法进行测定，用 70% 乙醇溶液提取枸杞芽菜中的总黄酮后，采用亚硝酸钠比色法，在 510 nm 下用紫外分光光度计检测，以芦丁做标准品，标准曲线方程式 Y=9.336x+0.0124，R^2=0.9991。

$$W(mg/g) = \frac{c \times n \times v}{m} \quad 式（1）$$

式中：W 表示样品中的黄酮含量，mg/g；c 表示根据标准曲线计算得到的供试液的质量浓度，mg/mL；v 表示供试液的体积，mL；n 表示稀释倍数；m 为样品质量，g。

1.2.7　总酚含量的测定　参照闫亚美等[21] 的方法进行测定，用 60% 乙醇溶液提取枸杞芽菜中的总酚后，采用福林酚试剂法，在 760 nm 下用紫外分光光度计检测，以没食子酸做标准品，标准曲线方程式 Y=1.091x+0.0012，R^2=0.9996。

$$W(mg/g)=\frac{c\times n\times v_1}{m}$$ 式（2）

式中：W 表示样品中的总酚含量，mg/g；c 表示根据标准曲线计算得到的供试液的质量浓度，mg/mL；v_1 表示提取液的总体积；n 表示稀释倍数；m 为样品质量，g。

1.2.8 蛋白质含量的测定 参照张琴等[22]的方法进行测定，采用蒸馏水浸提枸杞芽菜中的可溶性蛋白，选用考马斯亮蓝染色法，于 595 nm 波长处使用紫外分光光度计进行吸光度检测，以牛血清白蛋白为标准品绘制标准曲线，标准曲线方程式 Y=1.179x−0.0098，R^2=0.9993。枸杞芽菜蛋白质含量的测定方法同标准品。

$$W(\%)=\frac{c\times n\times v}{m}\times 100$$ 式（3）

式中：W 表示样品中的蛋白质含量，%；c 表示根据标准曲线计算得到的供试液的质量浓度，mg/mL；v 表示测定液的体积，mL；n 表示稀释倍数；m 为样品质量，g。

1.2.9 甜菜碱含量的测定 参照 NY/T 2947-2016，样品用甲醇提取，用混合型阳离子交换树脂固相萃取柱净化后用 HPLC 检测，以甜菜碱（≥纯度 98%）做标准品，标准曲线方程式 Y=234788x−12354，R^2=0.9990。枸杞芽菜甜菜碱含量的测定方法同标准品。

$$W(mg/g)=\frac{c\times v\times v_1}{m\times v_2}$$ 式（4）

式中：W 表示样品中的甜菜碱含量，mg/g；c 表示根据标准曲线计算得到的供试液的质量浓度，mg/mL；v 表示试样中加入的提取液体积，mL；v_1 表示试样的最终定容体积，mL；v_2 表示提取液分取体积，mL；m 为样品质量，g。

1.2.10 叶绿素含量的测定 参照 Beato 等[23]的方法进行测定，采用乙醇-丙酮（1∶1，v/v）提取法，在 649、665 nm 下用紫外分光光度计检测提取液吸光度，用于计算叶绿素 a、叶绿素 b 与总叶绿素含量。

$$叶绿素a(mg/g)=(12.71\times A_{665})-(2.59\times A_{649}\times v\times m)$$ 式（5）

$$叶绿素b(mg/g)=(22.88\times A_{649})-(4.68\times A_{665}\times v\times m)$$ 式（6）

$$总叶绿素(mg/g)=叶绿素a+叶绿素b$$ 式（7）

式中：叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素分别表示样品中的叶绿素含量，mg/g；v 表示试样的最终定容体积，mL；m 为样品质量，g。

1.2.11 褐变度的测定 参照张菊等[24]的方法进行测定，用 95% 乙醇溶液提取枸杞芽菜中的褐变有色产物后，4000 r/min 离心 20 min，取上清液溶液在 420 nm 处测定吸光度，以吸光度值与样品质量的比值表示褐变度。

1.3 数据处理

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 5 个采收期枸杞芽菜样品作为评价单元，以 15 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

感官评价结果如图 1 所示，5 个采收期枸杞芽菜的感官品质综合得分从高到低依次为：C3>C1>C2>C4>C5。权重集 A 的结果表明，品评人员对色泽和口感的权重赋值高于风味和组织形态，分别为 0.25 和 0.30，说明消费者在评价枸杞芽菜时更注重色泽和口感方面的表现。综合得分最高的样品 C3，在口感方面的评分优于其他样品；得分次高的 C1（72.87 分），则在风味和色泽方面表现更为突出；C2 得分（69.97 分）仅次于 C3 和 C1 时期，而总分较低的 C4（60.33 分），其组织形态评分相对较高，显示出一定的质地优势。由此可见，不同采收期的枸杞芽菜在感官品质上存在明显差异，其中 C3、C1 和 C2 时期的样品整体品质较高，更受消费者青睐。

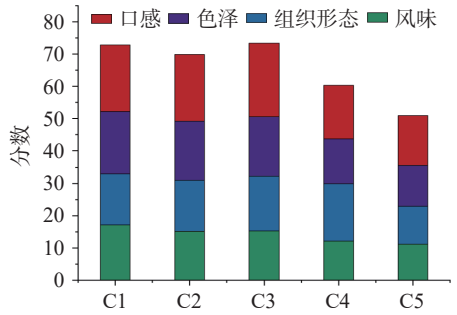


图 1 不同采收期枸杞芽菜的感官评价

Fig.1 Sensory evaluation of *Lycium barbarum* L. vegetable at different harvesting periods

2.2 不同采收期对枸杞芽菜色泽的影响

不同采收期对枸杞芽菜色泽的影响见表 3。通过分光测色仪检测发现，L^*值随采收期推移呈持续降

表 3 不同采收期枸杞芽菜色泽分析

Table 3 Color analysis of *Lycium barbarum* L. vegetable at different harvesting periods

不同采收期	L^*	a^*	b^*
C1	39.25±0.16^a	−5.33±0.39^a	19.30±1.12^a
C2	37.41±0.78^b	−5.41±0.39^a	18.28±1.09^a
C3	34.89±0.16^c	−5.41±0.60^a	15.42±0.51^b
C4	34.03±0.77^c	−6.63±0.60^b	15.42±0.51^b
C5	34.03±0.39^c	−7.59±0.73^c	15.23±0.91^b

注：结果为三次重复实验的平均值±标准差（n=3）。不同小写字母表示不同采收期枸杞芽菜的统计学差异（P<0.05）；表4、表5同。

低趋势，C5 较 C1 的降幅达 13.29%（P<0.05），具体表现：为 C1 的 L^*值最高为 39.25±0.16，且显著高于其他时期（P<0.05），C2 显著低于 C1 且显著高于 C3~C5（P<0.05），C3、C4、C5 之间无显著差异，这一趋势推测可能是因为夏季枸杞芽菜的生长速度较快，且气候差异较小而导致枸杞芽菜在这三个时期的色泽没有明显变化。以上结果与 Thoma 等[25] 发现的气候参数差异小于 10% 时，生菜色泽变异系数低于 5% 的现象一致。

a^*值随采收期推移呈显著降低趋势（P<0.05），C5 的 a^*值最低且与 C4 差异显著（P<0.05），绿度随采收期增强的现象可能与宁夏地区 7~9 月气温升高、降水减少导致的干旱胁迫相关，干旱环境可促进植物叶片叶绿素合成，从而使绿度增加，这与 Zhao 等[26] 的研究结论一致。

b^*值随采收期推移呈持续降低趋势，C5 较 C1 的降幅达 21.08%（P<0.05），其中，C1 和 C2 无显著差异，C3、C4、C5 之间无显著差异但均显著低于 C1 和 C2（P<0.05），黄度的降低可能是随着叶片成熟度提高，叶绿素占比上升，伴随着黄蓝度逐渐减弱[27]。

综合来看，不同采收期对枸杞芽菜色泽影响显著，C1~C2 时期，L^*值和 b^*值较高，a^*值相对较高，整体表现为亮度高、黄度高、绿度低，色泽偏浅绿；C3~C5 时期，L^*值和 b^*值显著降低，a^*值显著降低，整体表现为亮度低、黄度低、绿度高，色泽偏深绿，且 C3~C5 色泽差异较小，这种色泽变化规律主要与枸杞芽菜生长过程中叶绿素的积累密切相关，而环境因素（如干旱胁迫）可能进一步促进了叶绿素合成，从而影响了各色泽指标的变化趋势。

2.3　不同采收期对枸杞芽菜质构的影响

不同采收期对枸杞芽菜质构的影响见表 4。随着采收期的延长，硬度呈持续上升趋势，各时期差异显著（P<0.05），推测可能是由于生长过程中组织纤维化、木质化引起。Afoakwa 等[28] 研究表明，在细胞壁木质化过程中，H_2O_2 积累诱使过氧化物酶（POD）氧化细胞壁的单木质醇为自由基并聚合为木质素，从而导致细胞壁硬化。弹性在 C1~C3 时期呈上升趋势，C4 显著（P<0.05）下降至 0.73±0.06，C5 略有回升至 0.76±0.07，但仍显著低于 C2~C3（P<0.05）。采收前期弹性增加，可能与生长前期细胞水分含量较高、膨压维持细胞壁张力有关[29]，此时受压后形变恢复能力强；而随成熟度提高，水分流失导致膨压降低，弹性减弱。咀嚼性在 C1~C3 时期相对平稳，C4 略有上升，C5 显著升高至 3584.45±584.37（P<0.05），与硬度增加需更多咀嚼能量的趋势一致。回复性在 C3 达到最高值，C5 次之，二者无显著差异（P>0.05），但均显著高于 C1、C2、C4（P<0.05），表明 C3 和 C5 采收期的质构回复能力较好，其中 C3最佳。内聚性波动较大，C2 显著降低至 0.39±0.08（P<0.05），C3 升至峰值 0.50±0.03，显著高于其他时期（P<0.05），C4~C5 回落至 0.44±0.04、0.46±0.06，二者无显著差异。

综合来看，C3 采收期的质构特性更优，弹性与 C2 相当且显著高于 C4~C5，回复性最高，硬度显著低于 C5 且高于 C1 和 C2，适合作为鲜食采收期。

2.4　不同采收期对枸杞芽菜理化指标的影响

由表 5 可知，随着采收期推移，枸杞芽菜水分含量从 C1 的 76.61%±0.12% 降至 C5 的 65.01%±0.32%，降幅达 15.14%（P<0.05）。这可能是由于采收期越晚，成熟度越高，细胞壁木质化程度增加导致细胞结构紧实，同时在 7~9 月宁夏地区气温升高会加速蒸腾作用导致自然脱水[30−31]。由此推测，早采收的枸杞芽菜（C1~C3）因水分含量高（>70%），细胞膨压维持良好，质地更鲜嫩；晚采收组（C4~C5）水分降低至 70% 以下，伴随纤维和木质素积累，质地偏硬。

不同采收期枸杞芽菜的总黄酮含量在 7.23~10.17 mg/g 之间，呈先升后降趋势，C3 采收期达峰值，较 C1 升高 40.66%，C1 与 C5 差异显著（P<0.05）。总酚含量范围为 22.73~39.61 mg/g，变化趋势与总黄

表 4　不同采收期枸杞芽菜质构分析

Table 4　Texture analysis of *Lycium barbarum* L. vegetable at different harvesting periods

不同采收期	硬度（N）	内聚性	回复性	弹性（mm）	咀嚼性（mJ）
C1	14710.21±481.86^{d}	0.45±0.06^{b}	0.21±0.03^{b}	0.82±0.11^{b}	2679.51±862.84^{c}
C2	15470.79±1326.16^{c}	0.39±0.08^{c}	0.21±0.03^{b}	0.86±0.12^{a}	2500.69±765.65^{d}
C3	17160.15±1377.46^{b}	0.50±0.03^{a}	0.25±0.03^{a}	0.86±0.08^{a}	2528.16±631.77^{d}
C4	17510.07±853.84^{b}	0.44±0.04^{b}	0.22±0.01^{b}	0.73±0.06^{c}	2774.57±130.58^{b}
C5	19944.81±1036.00^{a}	0.46±0.06^{b}	0.23±0.02^{b}	0.76±0.07^{c}	3584.45±584.37^{a}

表 5　不同采收期枸杞芽菜理化指标分析

Table 5　Analysis of physicochemical indicators of *Lycium barbarum* L. vegetable at different harvesting periods

不同采收期	水分含量（%）	总黄酮含量（mg/g）	总酚含量（mg/g）	蛋白质含量（%）	甜菜碱含量（mg/g）	叶绿素含量（mg/g）	褐变度
C1	76.61±0.12^{a}	7.23±0.11^{d}	22.73±0.15^{d}	34.43±0.56^{c}	20.56±0.21^{b}	4.46±0.34^{b}	7.15±0.15^{c}
C2	75.22±0.24^{b}	8.71±0.34^{c}	25.08±0.69^{c}	33.00±0.33^{c}	20.51±0.07^{b}	4.66±0.47^{b}	7.21±0.12^{b}
C3	74.16±0.19^{b}	10.17±0.16^{a}	39.61±0.09^{a}	43.08±0.72^{b}	16.15±0.35^{c}	4.88±0.24^{b}	7.51±0.15^{a}
C4	68.91±0.28^{c}	9.94±0.07^{b}	29.36±1.58^{b}	57.68±0.41^{a}	21.90±0.50^{a}	5.58±0.56^{a}	7.54±0.20^{a}
C5	65.01±0.32^{d}	8.80±0.41^{c}	30.63±0.36^{b}	39.38±0.53^{b}	20.11±0.70^{b}	5.59±0.51^{a}	7.57±0.20^{a}

酮一致，C3 时期达 39.61 mg/g，C4~C5 显著低于 C3（P<0.05）。这表明枸杞芽菜总黄酮和总酚含量在生长中期（C3 时期）积累最多。Zhao 等[32] 研究证实逆境胁迫可促进黄酮合成，陈奕琳等[33] 在不同发育期山杏中也观察到类似的先升后降趋势。吴宇昊等[34] 研究发现莲藕不同采收期总酚含量呈先增加后减少趋势，且采收中期总酚含量最高，本研究采收中期总酚含量最高的结果与之一致。

枸杞芽菜在采收期内的蛋白质含量在 33.00%~57.68% 之间，变化呈现先上升、在 C4 采收期达峰值后下降的趋势。这可能是由于生长中期（C2~C4）光合作用旺盛，碳水化合物转化为氮源的效率高，同时硝酸还原酶活性达峰值，促进蛋白质合成；而 C5 时期气温下降，碳氮代谢失衡，蛋白酶活性增强，导致蛋白质降解[35]。该结果与 Wu 等[36] 和 Jia 等[37] 的研究结果一致。

枸杞芽菜在采收期内的甜菜碱含量在 16.15~21.90 mg/g 之间，C1~C2 含量差异不显著，C3 时期降至最低，C4 时期升至峰值，C5 时期回落。这可能是由于采收期前期，甜菜碱的合成和分解处于相对平衡状态，合成相关基因表达稳定，酶活性无显著变化，因此含量波动不明显[38]。Solymosi 等[39] 研究发现甜菜碱在 SL2 样品中含量最高，且在 8 月显著增加，本研究结果与之一致。

叶绿素含量随采收期推移从 C1 的 4.46 mg/g 持续升至 C5 的 5.59 mg/g，增幅达 25.34%（P<0.05），各采收期差异显著。该趋势与色泽分析中 a^*值变化完全一致，随采收期延长，a^*值逐渐降低。Liu 等[40] 在黄魁茶树中也观察到类似的“生长周期越长，叶绿素含量越高”的规律，提示这可能是植物应对环境胁迫的共性机制。

随着采收期延长，褐变程度总体呈上升趋势，其中 C1 采收期褐变程度最低，C5 采收期最高。综合分析表明，采收期对枸杞芽菜各成分含量及褐变程度具有显著影响，特别是 C3 和 C4 采收期，这 2 个时期虽然在多种成分积累方面表现较好，但同时也伴随采收期延长导致的褐变程度加剧。这一现象可能与采收后期水分丧失及植物组织成熟过程中衰老加速，进而促进细胞损伤有关[41]。Shi 等[42] 研究指出，多种植物的多酚氧化酶（PPO）主要存在于健康细胞的质体或叶绿体中；对杨梅果实发育各阶段的研究发现，成熟期果实的 PPO 活性显著高于未成熟果实（约为后者的三倍），表明成熟果实相较于幼果对酶促反应更敏感。据此推测，枸杞芽菜采收后期褐变程度增加可能与上述机制相关。

2.5 不同采收期对枸杞芽菜品质影响的综合评价

2.5.1 不同采收期枸杞芽菜各成分之间的相关性分析 对 5 个采收期枸杞芽菜的 15 种成分含量进行皮尔逊相关性分析，结果如图 2 所示。具体分析如下，在色泽关联中：L^*值与 a^*值呈显著负相关（P<0.05），与 b^*值（黄蓝值）呈显著正相关（P<0.05），这表明枸杞芽菜亮度降低时，绿度增强、黄度减弱，与肖倩等[43] 研究发现丹参花发育过程中亮度逐渐减小、黄度降低、红度加深的趋势一致。在生物活性成分互作上：总酚含量与褐变度呈显著正相关（P<0.05），因总酚是多酚氧化酶（PPO）催化褐变的关键底物，本研究体系中二者呈正相关，侧面反映采收期的变化可能会影响酶促反应从而加剧褐变；此规律与 Leng 等[44] 在开心果芽组织培养中“褐变指数与总酚含量随增殖周期递增”的结论一致，提示可通过调控酚类积累缓解褐变。蛋白质含量与叶绿素含量呈显著正相关（P<0.05），同时，与水分呈显著负相关（P<0.05）。Gáborčíík 等[45] 通过对 3 个草种的研究也证实叶绿素与蛋白质的正向关联；而水分与叶绿素含量成绩显著呈非常显著负相关（P<0.01），这与 Yadav 等[46] 研究发现马铃薯叶片的亮度、水分与叶绿素负相关的结论一致。

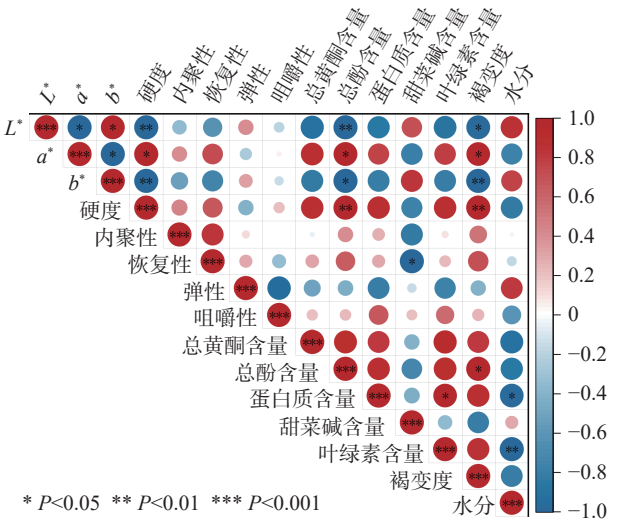


图 2 不同采收期枸杞芽菜感官指标与营养成分的相关性分析热图

Fig.2 Heatmap of correlation analysis between sensory parameters and nutritional components in *Lycium barbarum* L. vegetable across different harvest periods

注：相关性热图以颜色深浅表示相关系数大小，红色代表正相关，蓝色代表负相关；P<0.05 表示相关性显著，P<0.01 表示相关性非常显著，P<0.001 表示相关性极显著。

上述相关性分析结果表明，不同采收期枸杞芽菜中的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、偏最小二乘法对不同采收期枸杞芽菜的品质指标进行降维简化[47]，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。

2.5.2 不同采收期枸杞芽菜主成分分析 基于不同采收期枸杞芽菜感官指标和理化特性之间的相关性，将所有指标数据进行主成分分析，综合评价 15 个指标对 5 个采收期枸杞芽菜的影响。以主成分分析得到特征值的累计方差贡献率大于 80% 为依据[47]，根

表 6　主成分的特征值与方差贡献率

Table 6　Eigenvalues and variance contribution rates of principal components

成分	初始特征值			提取平方和载入			合计		
	合计	方差(%)	累积(%)	17.192	方差(%)	累积(%)	合计	方差(%)	累积(%)
1	17.192	57.307	57.307	7.662	57.307	57.307	10.877	36.258	36.258
2	7.662	25.54	82.847	3.115	25.54	82.847	10.583	35.275	71.533
3	3.115	10.382	93.229		10.382	93.229	6.262	20.873	92.406

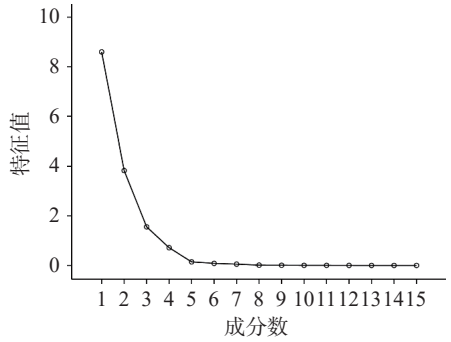


图 3　不同采收期枸杞芽菜中各成分碎石图

Fig.3　Crushed stone diagrams of various components in *Lycium barbarum* L. vegetable at different harvesting periods

据表 6 和图 3 所示，共提取出 3 个主成分，每个主成分的特征值分别为 17.192、7.662 和 3.115，累计贡献率达 93.229%，能表征原始数据的绝大部分有效信息，符合主成分分析方法的要求。

为了更清晰地揭示各指标与主成分因子之间的关系，得到因子载荷矩阵。如表 7 所示，载荷值为正值表示该指标对主成分的影响是正向的，为负值则为负向的影响，载荷值绝对值越大表明对该主成分的影响越深[48]。因此，选择载荷绝对值大于 0.6 的指标为解释指标[49]，主成分 1 主要代表的物质是 L^*、a^*、b^*、内聚性、回复性、总酚含量和甜菜碱含量；主成分 2 主要代表物质是硬度、弹性、咀嚼性、叶绿素含量、褐变度和水分含量；主成分 3 主要代表物质是总黄酮含量和蛋白质含量。

表 7　主成分因子载荷矩阵

Table 7　Principal component factor load matrix

指标	成分		
	1	2	3
L^*(Z1)	−0.634	−0.514	−0.532
a^*(Z2)	0.698	0.453	0.493
b^*(Z3)	−0.703	−0.488	−0.504
硬度(Z4)	0.569	0.801	0.156
内聚性(Z5)	0.732	−0.032	0.048
回复性(Z6)	0.976	0.02	−0.022
弹性(Z7)	0.282	−0.797	−0.471
咀嚼性(Z8)	0.134	0.954	−0.192
总黄酮含量(Z9)	0.454	0.116	0.834
总酚含量(Z10)	0.962	−0.064	0.248
蛋白质含量(Z11)	0.137	0.188	0.952
甜菜碱含量(Z12)	−0.947	−0.086	−0.23
叶绿素含量(Z13)	0.103	0.786	0.501
褐变度(Z14)	−0.159	0.927	0.137
水分含量(Z15)	−0.245	−0.926	−0.282

各品种主成分得分根据标准化后的 15 个指标及主成分载荷矩阵计算，设 3 个主成分为 Y1~Y3，得到各个主成分与 15 个指标的线性方程为：

Y1=−0.624Z1+0.698Z2−0.703Z3+0.569Z4+0.732Z5+0.976Z6+0.282Z7+0.134Z8+0.454Z9+0.962Z10+0.137Z11−0.947Z12+0.103Z13−0.159Z14−0.245Z15

Y2=−0.514Z1+0.453Z2−0.488Z3−0.801Z4−0.032Z5+0.02Z6−0.797Z7+0.954Z8+0.116Z9−0.064Z10+0.188Z11−0.086Z12+0.786Z13+0.927Z14−0.926Z15

Y3=−0.532Z1+0.493Z2−0.504Z3+0.156Z4+0.048Z5−0.022Z6−0.471Z7−0.192Z8+0.834Z9+0.248Z10+0.952Z11−0.23Z12+0.501Z13+0.137Z14−0.282Z15

Z1~Z15 分别代表枸杞芽菜的 15 个指标标准化后的数据。以 3 个主成分所对应的方差贡献率为权重，可得到综合评价函数：Y=0.3685Y1+0.3585Y2+0.2121Y3。其中，Y 值越大，表明该采收期的枸杞芽菜综合品质越好，各采收期枸杞芽菜的因子得分、综合评分及排名如表 8 所示。不同采收期的枸杞芽菜排序从高到低依次为 C3、C1、C2、C4、C5。结果表明：在第一主成分中，C3 的枸杞芽菜得分整体普遍高于其他月份，这与其具有较好的色泽、质构特性，以及丰富的总酚、甜菜碱含量和较高的水分含量直接相关；在第二主成分中，C1 与 C2 的枸杞芽菜得分整体普遍高于其他月份，且二者差异较小，这与二者均表现出水分含量高、褐变度低、质地鲜嫩、硬度与咀嚼性适中的鲜食特性一致；在第三主成分中，C4 的枸杞芽菜得分整体普遍高于其他月份，这说明 C4 的枸杞芽菜含有较高的总黄酮含量和蛋白质含量。

表 8　不同采收期枸杞芽菜品质综合得分及排名

Table 8　Comprehensive score and ranking of quality of *Lycium barbarum* L. vegetable at different harvesting periods

不同采收期-枸杞芽菜	Y1	Y2	Y3	Y	排名
C1	0.867	1.425	0.177	0.925	2
C2	0.909	1.469	−0.890	0.906	3
C3	1.367	1.608	−0.976	1.114	1
C4	0.528	0.025	0.315	0.334	4
C5	−0.007	−0.152	−0.047	−0.036	5

综合得分显示，C3、C1 和 C2 的感官品质较好，

C5 的枸杞芽菜综合得分最低。C5 的硬度、咀嚼性和色泽指标均差于前两类，褐变度最高，外观和商品价值易受影响；水分含量流失较多，导致芽菜萎蔫、质地干硬，表观品质显著下降；关键营养指标也缺乏优势，综合品质最差。值得注意的是，此结果与感官评价及系统聚类分析结果一致。

2.5.3 偏最小二乘法分析 偏最小二乘法（Partial Least Squares Discriminant Analysis，PLS-DA）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[50]。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 Y 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 4 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。感官分析与水分含量、弹性、a^*有较好的相关性，呈正相关；与硬度、回复性、内聚性、总黄酮含量、总酚含量、蛋白质含量、叶绿素含量和褐变度呈负相关。

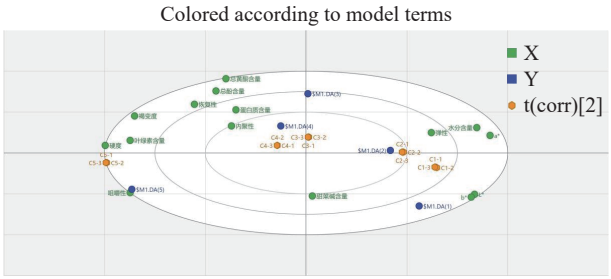


图 4 品质指标与感官评价的偏最小二乘法分析

Fig.4 Partial least squares plot for the correlation between quality indicators and sensory evaluation

在偏最小二乘法中使用交叉验证检验可以评价模型的性能指标，模型的 R^2x=0.926、R^2y=0.994、Q^2=0.975，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 5 所示，该 PLS-DA 模型的 0 回归线与横坐标交叉且截距为负数，经 200 次置换检验，所有置换后的 R^2 和 Q^2 值均低于原始模型对应值，表明模型未发生过拟合。综合来看，该模型具有良好的稳定性与预测能力，可用于描述不同采收期枸杞芽菜样品间的品质差异。变量投影重要性（variable important forthe 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 6 所示，VIP 值>1 的品质指标有 5 个，分别为硬度、咀嚼性、蛋白质含量、总酚含量、甜菜碱含量，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，科学客观的评价不同采收期枸杞芽菜的品质。

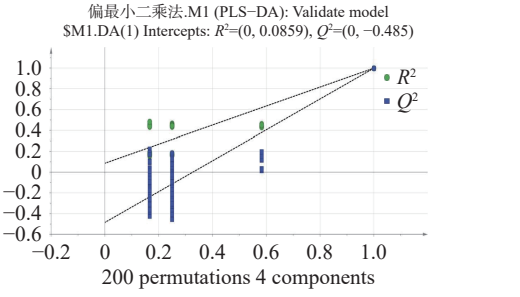


图 5 品质指标的 VIP 值

Fig.5 VIP values of quality indicators

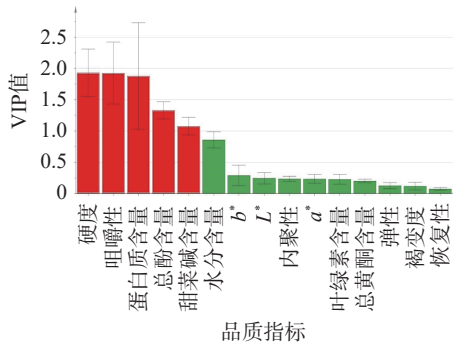


图 6 验证模型

Fig.6 Permutation test plot

2.5.4 不同采收期枸杞芽菜聚类分析 聚类分析通过层次聚类（Hierarchical Clustering）结合欧氏距离法，计算不同采收期样本间的指标差异，生成聚类树状图（图 7）。以相对距离阈值 2000 为截距，可将 5 个采收期枸杞芽菜划分为 3 类，分类结果与 PLS-DA 模型的样本分布规律完全一致：第 1 类为 C1（5 月）和 C2（6 月）；PLS-DA 得分图显示，该类样本与水分含量、弹性、a^*等指标高度相关，二者在鲜食相关指标上表现高度一致，硬度适中、质地鲜嫩、褐变度低、水分充足，表观品质更契合鲜食消费需求；第 2 类为 C3（7 月）和 C4（8 月）：PLS-DA 结果表明，C3 与总酚、甜菜碱含量关联度最高，C4 则更靠近总黄酮、蛋白质含量指标，二者均在功能营养成分上表现突出，营养品质更适合深加工开发；第 3 类为 C5（9 月）：该类样本与褐变度、硬度、咀嚼性、叶绿素含量指标高度相关，表现为褐变度高、质地干硬、水

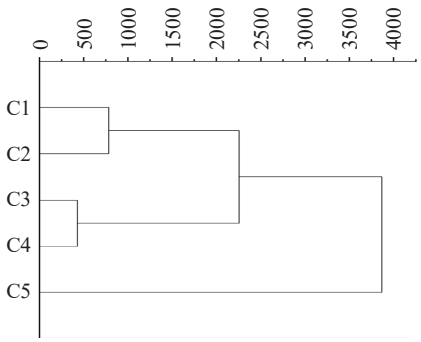


图 7 不同采收期枸杞芽菜系统聚类谱系图

Fig.7 Dendrogram from hierarchical cluster analysis of *Lycium barbarum* L. vegetable across different

分流失严重、营养积累不足，与其他样本差异显著，综合品质最差。

3　讨论

本文对不同采收期枸杞芽菜的感官指标及营养成分进行了对比和综合评价，结果表明，随着采收期的变化，枸杞芽菜中各指标均变幅较大。其中，值得注意的是，在整个分析中与褐变度这一指标显著相关的因素最多。主成分综合分析表明，4 个显著相关的指标均在主成分 1 中，且总酚含量载荷绝对值最大，为 0.962。因此，可推测总酚含量的变化与褐变度变化相关性最强。酚类物质是植物体内普遍存在的次生代谢物，研究表明，酚类物质与果蔬褐变密切相关，酚类物质积累越多，褐变越严重[51]。在整个研究过程中 C1~C3 采收时期的总酚含量变化趋势与褐变度一致，而 C4~C5 时期，总酚含量显著降低但褐变度并未随之降低。由于影响植物发生褐变的因素众多，如果实衰老、机械损伤、环境胁迫、能量匮乏以及采摘后的处理和贮藏等[52]。Kanojia 等[53] 发现，通常植物幼龄部位不易发生褐变，而随着组织逐渐老化，植物体内醌类物质含量增加，褐变现象会相应加重。闫洪波等[54] 研究发现，苯丙氨酸解氨酶基因（PAL）序列广泛存在于各种植物中，不仅参与植物细胞状态、环境胁迫、病害反应，而且参与木质素的合成，影响果实采收时外观品质以及果实的组织褐变。Su 等[55] 和 Duan 等[56] 研究认为，果蔬褐变可能与能量代谢异常有关。而 C4~C5 时期，总酚含量虽呈下降趋势，但褐变度并未同步降低，表明褐变程度并不完全取决于总酚含量。总酚作为酶促褐变的重要底物，其变化可能影响褐变反应的底物基础；但褐变还受 PPO/POD 活性、组织结构破坏、氧气接触及醌类物质聚合等因素共同调控。因此，总酚含量变化可能参与褐变形成，但并非决定褐变程度的唯一因素，因此，在后续研究中需进一步研究褐变的机制且多维度构建褐变调控模型，并将基础研究成果与生产中的加工和贮藏相结合，为枸杞芽菜产品的规范化生产及产品质量均一化提供数据参考。

4　结论

本研究测定了枸杞芽菜 5 个采收期的 15 项指标，发现感官分析与综合评价结果一致，品质排序由高到低依次为：C3>C1>C2>C4>C5。相关性分析显示，5 个采收期枸杞芽菜感官指标及营养品质间存在不同程度的相关性，L^* 与 a^* 显著负相关、与 b^* 显著正相关（$P<0.05$）；总酚与褐变度显著正相关（$P<0.05$），蛋白质与叶绿素显著正相关、与水分显著负相关（$P<0.05$），水分与叶绿素呈极显著负相关（$P<0.01$）。主成分分析提取出 3 个主成分，累计方差贡献率达 93.229%，可有效代表不同采收期的品质特征。系统聚类将 5 个采收期分为 3 类：第一类包括 C1（5 月采）和 C2（6 月采），硬度适中，弹性与咀嚼性协调，褐变度低、水分含量高，表观品质符合鲜食需求；第二类包括 C3（7 月采）和 C4（8 月采），C3 在色泽、质构及总酚、甜菜碱含量方面表现优异，C4 的总黄酮和蛋白质含量突出，营养品质优良，适于深加工；第三类为 C5（9 月采），褐变度高、质地干硬、营养积累不足、水分流失严重，综合品质最差。本研究为枸杞芽菜的采收期选择、加工利用及品质控制提供了理论依据与数据支持。

© 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] 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 Dunhua, LIU Jun, LI Peipei, et al. Development status and research progress of deep processing products of *Lycium barbarum*[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 38(4): 10−20.]

[2] 赵国平, 戴慎, 陈仁寿. 中药大辞典[M]. 2 版. 上海: 上海科学技术出版社, 2006: 2249. [ZHAO Guoping, DAI Shen, CHEN Renshou. Dictionary of traditional Chinese medicine[M]. 2nd ed. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2006: 2249.]

[3] 宁夏食品药品监督管理局. 宁夏中药材标准[M]. 2018 年版. 银川: 阳光出版社, 2018: 69−71. [Ningxia Food and Drug Administration. Ningxia Chinese herbal medicine standard[M]. 2018 Edition. Yinchuan: Ningxia Sunshine Publishing House, 2018: 69−71.]

[4] LEI Z, CHEN X, CAO F, et al. Phytochemicals and bioactivities of Goji (*Lycium barbarum* L. and *Lycium chinense* Mill.) leaves and their potential applications in the food industry: A review[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(3): 1451−1461.

[5] 李永华, 杨柳, 南雄雄, 等. 不同叶用枸杞新品种营养成分及产量的对比[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(13): 113−116. [LI Y H, YANG L, NAN X X, et al. Comparison of nutrient composition and yield of different s *Lycium barbarum* varieties[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(13): 113−116.]

[6] 康超, 杨柳, 王昊, 等. 滴灌条件下不同氮磷耦合对叶用枸杞产量及其构成的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(11): 26−30. [KANG C, YANG L, WANG H, et al. Effects of the ratio of nitrogen and phosphorus concentrations in drip fertigation on yield and yield components of Chinese wolfberry[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(11): 26−30.]

[7] 王娅丽, 王蓉, 王伟, 等. 叶用枸杞新品种‘宁杞 9 号’栽培技术[J]. 林业科技通讯, 2022(2): 79−82. [WANG Yali, WANG Rong, WANG Wei, et al. Cultivation techniques of a new *Lycium barbarum* variety ‘ningqi 9’ for leaf use[J]. Forest Science and Technology, 2022(2): 79−82.]

[8] 胡婷, 王红. 宁夏回族自治区叶用枸杞产业发展现状及对策[J]. 乡村科技, 2022, 13(21): 37−39. [HU T, WANG H. Development status and countermeasures of leaf *Lycium barbarum* industry in Ningxia Hui autonomous region[J]. Rural Science and Technology, 2022, 13(21): 37−39.]

[9] ZHAO X Q, GUO S, YAN H, et al. Analysis of phenolic acids and flavonoids in leaves of *Lycium barbarum* from different habitats by ultra-high-performance liquid chromatography coupled with

triple quadrupole tandem mass spectrometry[J]. Biomedical Chromatography, 2019, 33(8): e4552.
[10] LIU H H, FAN Y L, WANG W H, et al. Polysaccharides from *Lycium barbarum* leaves: Isolation, characterization and splenocyte proliferation activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2012, 51(4): 417−422.
[11] MOCAN A, VLASE L, VODNAR D C, et al. Antioxidant, antimicrobial effects and phenolic profile of *Lycium barbarum* L. flowers[J]. Molecules, 2015, 20(8): 15060−15071.
[12] 邹立思, 李会伟, 严辉, 等. 枸杞叶新资源药材的生药学研究[J]. 中国现代中药, 2022, 24(1): 20−27. [ZOU L S, LI H W, YAN H, et al. Pharmacognosy research on new resource medicinal materials of wolfberry leaves[J]. Modern Chinese Medicine, 2022, 24(1): 20−27.]
[13] 宿树兰, 郭盛, 朱悦, 等. 枸杞叶现代研究进展与资源化利用展望[J]. 中国现代中药, 2022, 24(1): 10−19. [SU S L, GUO S, ZHU Y, et al. Modern research progress and utilization of Chinese wolfberry leaves[J]. Modern Chinese Medicine, 2022, 24(1): 10−19.]
[14] 宁夏农林科学院. 绿色、营养型菜用枸杞——宁杞菜 1 号[J]. 农业新技术, 2006(2): 47. [Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences. Green and nutritious vegetable *Lycium barbarum* L. -Ningqicai No.1[J]. Beijing Agricultural Sciences, 2006(2): 47.]
[15] LI H, PENG L, WANG L. Comparison of trace elements content in wolfberry leaf tea of Ningxia and in other teas[J]. Studies of Trace Elements and Health, 2007, 24(5): 14−16.
[16] POLLINI L, RICCIO A, JUAN C, et al. Phenolic acids from *Lycium barbarum* leaves: *In vitro* and *in silico* studies of the inhibitory activity against porcine pancreatic *α*-amylase[J]. Processes, 2020, 8(11): 1388−1402.
[17] ANDREI M, ZENGIN G, SIMIRGIOTIS M, et al. Functional constituents of wild and cultivated Goji (*L. barbarum* L.) leaves: Phytochemical characterization, biological profile, and computational studies[J]. Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry, 2017, 32(1): 153−168.
[18] 刘静. 枸杞叶茶加工工艺的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2008. [LIU J. Study on processing technology of medlar leaves' tea[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2008.]
[19] 闫亚美, 米佳, 禄璐, 等. 不同枸杞叶茶中黄酮、多酚及氨基酸组成分析[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(23): 27−31. [YAN Y M, MI J, LU L, et al. Analysis of flavones polyphenols, and amino acids in tea of leaves from different wolfberry[J]. Food Research and Development, 2020, 41(23): 27−31.]
[20] 宣仕芬, 朱煜康, 孙楠, 等. 不同采收期坛紫菜感官品质及蛋白组成分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(14): 291−296. [XUAN S F, ZHU Y K, SUN N, et al. Analysis of sensory quality and protein composition of analysis of *Porphyra haitanensis* in different harvest periods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(14): 291−296.]
[21] 闫亚美, 戴国礼, 冉林武, 等. 不同产地野生黑果枸杞资源果实多酚组成分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(22): 4540−4550. [YAN Y M, DAI G L, RAN L W, et al. Analysis of polyphenol composition in fruits of wild *Lycium ruthenicum* resources from different habitats[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(22): 4540−4550.]
[22] 张琴, 李玲, 李亚童, 等. 库尔勒香梨蛋白质提取工艺优化研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(14): 4643−4648. [ZHANG Qin, LI Ling, LI Yatong, et al. Study on the optimum extraction technology of protein from Korla pear[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(14): 4643−4648.]
[23] BEATO V M, ORGAZ F, MANSILLA F, et al. Changes in phenolic compounds in garlic (*Allium sativum* L.) owing to the cultivar and location of growth[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2011, 66(3): 218−223.
[24] 张菊, 边龙义, 韩静, 等. 褐变对黑枸杞抗氧化能力的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(5): 206−217. [ZHANG Ju, BIAN Longyi, HAN Jing, et al. Effects of browning on the antioxidant capacity of black wolfberry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(5): 206−217.]
[25] THOMA F, SOMBORN-SCHULZ A, SCHLEHUBER D, et al. Effects of light on secondary metabolites in selected leafy greens: A review[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 497.
[26] ZHAO Jianhua, LI Haoxia, ZHANG Cunzhi, et al. Physiological response of four wolfberry (*Lycium* Linn.) species under drought stress[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(3): 603−612.
[27] 金笑雨, 王艺光, 赵宏波, 等. 彩叶桂叶色变化及生理特征分析[J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(5): 1056−1065. [JIN Xiaoyu, WANG Yiguang, ZHAO Hongbo, et al. Color change and physiological characteristics in *Osmanthus fragrans* colour group[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2024, 41(5): 1056−1065.]
[28] AFOAKWA E O, SEFA-DEDEH S. Changes in cell wall constituents and mechanical properties during post-harvest hardening of trifoliate yam *Dioscorea dumetorum* (Kunth) *Pax* tubers[J]. Food Research International, 2002, 35(5): 429−434.
[29] LAN C, UMEZURUIKE L O, et al. Texture measurement approaches in fresh and processed foods-A review[J], Food Research International, 2013, 51(2): 823−835.
[30] 杨利. 不同光温环境对青花菜和萝卜芽苗菜采前及采后品质生理的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022. [YANG Li. Effect of different light and temperature environments on pre-and post-harvest physiological properties of broccoli and radish sprouts[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022.]
[31] FANG Y, L Q, PAN S Y, et al. Chemical composition and quality traits of Chinese chestnuts (*Castanea mollissima*) produced in different ecological regions[J]. Food Bioscience, 2015, 11: 33−42.
[32] ZHAO Bolin, LIU Kai, LIU Xing, et al. Plant-derived flavonoids are a potential source of drugs for the treatment of liver fibrosis[J]. Phytotherapy Research, 2024, 38(6): 3122−3145.
[33] 陈奕琳, 崔梦凡, 马晨阳, 等. 不同杏品种成熟期果实生长指标、总酚含量及总黄酮含量的比较[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(15): 208−213. [CHEN Y L, CUI M F, MA C Y, et al. Comparison of fruit growth indicators, total phenols content and total flavonoids content of different apricot varieties at maturity stage[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(15): 208−213.]
[34] 吴宇昊, 戴芳, 丛欣, 等. 不同采收期不同品种莲藕的营养品质变化规律及评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(3): 9−17. [WU Yuhao, DAI Fang, CONG Xin, et al. Changing law and evaluation of nutritional quality of lotus roots with different harvesting periods and varieties[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(3): 9−17.]
[35] JIANG Xinchen, CUI Li, ZHANG Qiuqin, et al. Changes in quality of *Carya illinoinensis* at different harvest periods[J]. Foods, 2024, 13(16): 2553.
[36] WU J. The effects of different harvest time on the quality of walnut fruits[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural

Science Edition)，2018，38(12)：50−54.
[37] JIA X L H. Dynamic changes and correlation analysis of nutrient contents in 'Pawnee' pecan (*Carya illinoinensis*)[J]. Journal of Fruit Science，2016，33(9)：92.
[38] SPANO M，MACCELLI A，DI MATTEO G，et al. Metabolomic profiling of fresh Goji (*Lycium barbarum* L.) berries from two cultivars grown in central Italy：A multi-methodological approach[J]. Molecules，2021，26(17)：5412.
[39] SOLYMOSI K，MYSLIWA-KURDZIEL B. Chlorophylls and their derivatives used in food industry and medicine[J]. Mini Reviews in Medicinal Chemistry，2017，17(13)：1194−1222.
[40] LIU Xuyang，CAO Jingjie，CHENG Xin，et al. CsRVE1 promotes seasonal greening of albino *Camellia sinensis* cv. Huangkui by activating chlorophyll biosynthesis[J]. Tree Physiology，2023，43(8)：1432−1443.
[41] BENJAWAN C，CHUTICHUDET P，KHUMKRATOK S. Effect of harvesting index on browning reaction and changes of tissue structure in santol fruits[J]. Pakistan Journal of Biological Sciences，2008，11(9)：1212−1219.
[42] SHI Ting，SUN Jie，WU Xinxin，et al. Transcriptome analysis of Chinese bayberry (*Myrica rubra* Sieb. Et Zucc.) fruit treated with heat and 1-MCP[J]. Plant Physiology and Biochemistry，2018，133：40−49.
[43] 肖倩，初雷霞，王素娟，等. 不同色泽丹参花酚酮类成分含量差异及其生物活性评价[J]. 北方园艺，2025(8)：105−113. [XIAO Qian，CHU Leixia，WANG Sujuan，et al. Differences in the content of phenolic ketones in *Salvia miltiorrhiza* flower with different colors and their biological activity evaluation[J]. Northern Horticulture，2025(8)：105−113.]
[44] LENG Pingsheng，SU Shuchai，WEI Fang，et al. Correlation between browning，total phenolic content，polyphenol oxidase and several antioxidation enzymes during pistachio tissue culture[J]. Acta Horticulturae，2009(829)：127−132.
[45] GÁBORČÍK N. Relationship between contents of chlorophyll (a+b) (SPAD values) and nitrogen of some temperate grasses[J]. Photosynthetica，2003，41(2)：285−287.
[46] YADAV S P，IBARAKI Y，GUPTA S D. Estimation of the chlorophyll content of micropropagated potato plants using RGB based image analysis[J]. Plant Cell Tissue & Organ Culture，2010，100(2)：183−188.
[47] 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.
[48] 马尚玄，胡小静，付镓榕，等. 云南澳洲坚果果实品质分析与综合评价[J]. 食品工业科技，2025，46(7)：259−271. [MA Shangxuan，HU Xiaojing，FU Jiarong，et al. Quality analysis and comprehensive evaluation of the fruit of *Macadamia integrifolia* grown in Yunnan Province[J]. Science and Technology of Food Industry，2025，46(7)：259−271.]
[49] 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 Xinsheng，ZHOU Wenjun，FENG Meitao，et al. Effect of different drying method on the nutritional quality and antioxidant activity of Jiangyong fragrant ginger based on principal component analysis[J]. Science and Technology of Food Industry，2024，45(23)：310−321.]
[50] 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.
[51] TOMÁS-BARBERÁN F A，GIL M I，CASTAÑER M，et al. Effect of selected browning inhibitors on phenolic metabolism in stem tissue of harvested lettuce[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，1997，45(3)：583−589.
[52] 闫师杰. 鸭梨采后果实褐变的影响因素及发生机理的研究[D]. 北京：中国农业大学，2005. [YAN Shijie. Study on influence factors and mechanism of browning of yali pear fruit after harvest[D]. Beijing：China Agricultural University，2005.]
[53] KANOJIA A，SHRESTHA D K，DIJKWEL P P. Primary metabolic processes as drivers of leaf ageing[J]. Cellular and Molecular Life Sciences，2021，78(19)：6351−6364.
[54] 闫洪波，程玉豆，何近刚，等. 鸭梨 PAL 克隆及其在果实发育和机械伤害过程中的表达[J]. 中国农业科学，2014，47(21)：4341−4348. [YAN Hongbo，CHENG Yudou，HE Jingang，et al. Cloning of PAL gene in 'yali' pear and its expression during fruit development and wounding[J]. Scientia Agricultura Sinica，2014，47(21)：4341−4348.]
[55] SU X G，JIANG Y M，DUAN X W，et al. Effects of pure oxygen on the rate of skin browning and energy status in Longan fruit[J]. Food Technology and Biotechnology，2005，43(4)：359−365.
[56] DUAN Xuewu，JIANG Yueming，SU Xinguo，et al. Role of pure oxygen treatment in browning of *Litchi* fruit after harvest[J]. Plant Science，2004，167(3)：665−668.