DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260324004
引用格式: 阮征. 不同储藏方式下枸杞挥发性成分与品质变化分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(11): 268–277.
RUAN Z. Analysis on changes of volatile components and quality of *Lycium chinensis* under different storage methods [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(11): 268–277. (in Chinese with English abstract).

不同储藏方式下枸杞挥发性成分与品质变化分析

阮 征*

(山东华萌中医药研究有限公司, 济南 250003)

摘 要: 目的 探究不同储藏方式对枸杞挥发性成分及品质的影响, 筛选适宜的短期储藏条件。**方法** 以枸杞鲜果为对照, 设置常温、低温(4 ℃)、冷冻 3 种储藏处理, 采用气相色谱-离子迁移谱技术鉴定挥发性成分, 测定多糖、总酚、类胡萝卜素、丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量及感官品质, 结合正交偏最小二乘-判别分析与 Pearson 相关性分析揭示成分变化与品质的关联。**结果** 共鉴定挥发性成分 52 种, 其中醇类、酯类为特征香气物质, 与多糖、总酚、类胡萝卜素、色泽及口感呈显著正相关, 与 MDA 呈显著负相关; 常温储藏促使醛类、酮类大量积累, MDA 升高, 营养与感官品质显著劣变; 低温储藏可有效抑制劣变进程, 挥发性成分与鲜果高度相似, 总酚、类胡萝卜素保留率分别达 89.22%、85.72%, 感官品质最优; 冷冻储藏因冰晶损伤导致香气流失严重, 品质下降明显。**结论** 4 ℃低温储藏能显著抑制膜脂过氧化与香气成分降解, 有效保持枸杞挥发性风味与营养感官品质, 是枸杞短期储藏的理想方式。

关键词: 枸杞; 储藏方式; 挥发性成分; 气相色谱-离子迁移谱法; 品质指标; 相关性分析

Analysis on changes of volatile components and quality of *Lycium chinensis* under different storage methods

RUAN Zheng*

(*Shandong Huameng Traditional Chinese Medicine Research Co*., *Ltd*., *Ji'nan* 250003, *China*)

ABSTRACT: Objective To explore the impact of different storage methods on the volatile components and quality of *Lycium chinensis*, and screen suitable short-term storage conditions. **Methods** Taking fresh wolfberry fruit as a control, 3 kinds of storage treatments were set up: Room temperature, low temperature (4 ℃) and freezing. Gas chromatography-ion mobility spectroscopy technology was used to identify volatile components, and the content of polysaccharides, total phenols, carotenoids, malondialdehyde (MDA) and sensory quality were determined. Combined with orthogonal partial least squares-discriminant analysis and Pearson correlation analysis, the correlation between component changes and quality was revealed. **Results** A total of 52 kinds of volatile components were identified, among which alcohols and esters were characteristic aroma substances, which were significantly positively correlated with polysaccharides, total phenols, carotenoids, color and taste, and significantly negatively correlated with MDA; storage at room temperature promoted the accumulation of aldehydes and ketones, increased MDA, and significantly deteriorated nutritional and sensory quality; low-temperature storage could effectively inhibit the deterioration process. The volatile components were highly similar to fresh fruits. The retention rates of total phenols

收稿日期: 2026-03-24
第一作者/*通信作者: 阮征(1990—), 男, 硕士, 中级经济师, 主要研究方向为中医药现代化研究。E-mail: 231917677@qq.com

and carotenoids reached 89.22% and 85.72% respectively, and the sensory quality was the best; frozen storage caused serious aroma loss due to ice crystal damage, and the quality declined significantly. **Conclusion** The 4 ℃ low temperature storage can significantly inhibit lipid peroxidation and aroma degradation, which is an ideal method for short-term storage of *Lycium chinensis*.

KEY WORDS: *Lycium chinensis*; storage method; volatile components; gas chromatography-ion mobility spectrometry; quality indicators; correlation analysis

0　引　言

枸杞(*Lycium chinensis*)在采后储藏过程中, 挥发性成分、营养物质及细胞膜完整性会随环境条件发生显著改变, 香气失衡、营养降解、褐变加剧及脂质过氧化是其品质劣变的典型特征[1–3]。研究表明, 挥发性成分的变化通常早于感官与理化指标劣变, 可作为果实衰老与风味受损的早期预警信号。然而, 传统储藏品质评价多依赖感官评分与常规理化检测, 主观性较强, 难以系统揭示挥发性成分的动态演变规律[4–6], 亦无法阐明不同储藏条件下品质差异的内在机制。因此, 建立精准、高效的挥发性成分分析方法, 对揭示枸杞储藏劣变机制具有重要意义。

目前, 已有研究采用气相色谱-质谱技术(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)探究干燥方式对枸杞挥发性物质的影响, 结果显示高温处理易造成醇类等香气成分损失, 而低温处理更有利于保留特征风味物质[7–8]。但现有研究多集中于加工终点静态比较, 针对储藏动态过程中挥发性成分演变规律及其与品质关联性的系统研究仍较为缺乏。同时, GC-MS 存在样品前处理烦琐、分析周期长等不足, 难以实现储藏过程中挥发性成分的快速、高通量监测。

气相色谱-离子迁移谱技术(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)具有无需复杂前处理、检测速度快、灵敏度高、原位表征能力强等优势, 已广泛应用于果蔬、粮食及中药材的挥发性成分快速分析。鉴于此, 本研究采用 GC-IMS 技术, 结合多糖、总酚、类胡萝卜素、丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量及感官评价, 系统比较常温、低温(4 ℃)、冷冻 3 种储藏方式对枸杞挥发性成分及品质的影响, 明确特征标志物与品质劣变的内在关联, 阐释储藏条件对枸杞品质保持的作用机制, 为枸杞采后精准保鲜、风味调控及科学储藏提供理论依据与技术支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

实验枸杞鲜果于 7 月中旬采自宁夏中卫市中宁县枸杞种植基地, 品种“宁杞 7 号”, 清晨采摘八成熟果实, 2 h 内运回实验室, 挑选无损伤、无病虫害果实备用。

高纯氦气、高纯氮气(纯度≥99.999%, 济南德洋特种气体有限公司); 正己烷、无水硫酸钠(分析纯, 烟台市双双化工有限公司); 芳樟醇、香叶醛、柠檬烯等标准品(纯度 99%, 上海麦克林生化科技股份有限公司); 葡萄糖、苯酚、浓硫酸、福林酚等试剂(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

无水硫酸钠使用前置于 550 ℃马弗炉中灼烧 4 h, 置于干燥器中冷却备用。

1.2　实验仪器

FlavourSpec®气相色谱-离子迁移谱联用仪(德国 G.A.S.公司); HWS-150 智能恒温恒湿箱[温度精度±0.1 ℃; 湿度精度±1%相对湿度(relative humidity, RH), 上海精宏实验设备有限公司]; BCD-518WDPF 医用冷藏冰箱(精度±0.5 ℃, 青岛海尔股份有限公司); TF-FD-10S 真空冷冻干燥机(精度±1 ℃, 上海拓纷机械设备有限公司); ME204E 电子天平(精度 0.1 mg, 瑞士 Mettler Toledo 公司); KQ-500DE 超声波清洗机(昆山舒美超声仪器有限公司); Milli-Q Direct 8 纯水仪(美国 Millipore 公司); T700 紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司); NH-A-1808 型高品质电脑色差仪(深圳市三恩时科技有限公司); DB-5ms 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm, 美国安捷伦公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　样品制备

设置常温储藏、低温储藏、冷冻储藏 3 组[9–11], 鲜果为对照组, 储藏时间统一为 30 d。储藏条件如表 1 所示。每日翻动常温样品并定时换气; 低温组记录温度; 冷冻组预冻 4 h, 真空度小于等于 15 Pa。储藏结束后, 所有样品冻干、研磨、过 60 目筛, 氮气密封、–20 ℃保存待测[12–14]。

1.3.2　挥发性成分提取与 GC-IMS 分析

直接称取 2.0 g 样品加入至 20 mL 顶空瓶中, 60 ℃孵育 20 min, 设定振荡频率为 150 r/min, 顶空进样。GC 的载气程序以及柱温程序参数如表 2 所示。

GC-IMS 条件: DB-5ms 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm), 柱温 40 ℃ (2 min)→ 5 ℃/min→180 ℃ (5 min), 载气高纯氮, 流速设定为 150 mL/min, IMS 检测器内部温度维持于 50 ℃; 进样针温度设置为 85 ℃; 进样体积为 100 μL, 进样模式为不分流模式。按照参数对样品进行 GC-IMS 分析, 然后对三维谱图(保留时间×迁移时间×峰强度)进行采集[15–16]。将三维谱图中的背景噪声进行扣除, 然后进行峰对齐以及归一化处理。

挥发性成分定性采用标准品对照、保留指数定性、谱库匹配三重验证: 将样品峰与标准品保留时间、迁移时间比对; 通过 C6~C20 正构烷烃计算保留指数, 与美国国家

表 1 枸杞储藏条件及参数

Table 1 Storage conditions and parameters of *Lycium chinensis*

储藏组别	设备名称	温度/℃	湿度/%RH	时间/d	含水率目标/%
常温储藏组	智能恒温恒湿箱	25.0±1.0	60±5	30	10±1
低温储藏组	医用冷藏冰箱	4.0±0.5	自然对流(40~80)	30	10±1
冷冻储藏组	真空冷冻干燥机	预冻: –40 冻干: 冷阱小于等于–80	冻干过程无湿度控制	30	10±1
对照组(鲜果)	-	室温(20.0±2.0)	自然环境	0(直接分析)	85±1

注: -表示无此项。

表 2 气相色谱载气程序设置参数

Table 2 Setting parameters of gas chromatography carrier gas program

阶段	时间/min	载气流速/(mL/min)	流速变化速率/(mL/min^2)	备注
初始	0.00~2.00	2.0	0.0(恒定)	保持 2 min
第一段升速	2.00~3.00	2.0→10.0	10.0	从 2 min 开始线性升速, 1 min 内升至 10 mL/min
第一段恒速	3.00~6.00	10.0	0.0(恒定)	保持 3 min
第二段升速	6.00~7.33	10.0→20.0	15.0	从6 min开始线性升速, 7.33 min内升至20 mL/min
第二段恒速	7.33~12.33	20.0	0.0(恒定)	保持 5 min

标准技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)数据库偏差小于 20 判定匹配; 与 GC-IMS 内置谱库相似度大于 800 视为有效定性[17]。

采用峰面积归一化法进行相对定量分析。以各挥发性成分对应的 GC-IMS 特征峰峰面积为定量依据, 计算每种成分在样品总挥发性成分中的相对含量(%)。以鲜果组为参照, 计算各储藏组挥发性成分的相对含量变化率, 并采用独立样本 *t* 检验进行差异显著性分析(P<0.05)。

计算各储藏组样品中挥发性成分的相对含量变化率[18–19], 具体公式如(1)所示。

$$\mathrm{RAC}_{i,j}\% = \frac{C_{i,j} - C_{0,j}}{C_{0,j}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\mathrm{RAC}_{i,j}$ 为第 i 个储藏组中第 j 种挥发性成分的相对含量变化率, %; $C_{i,j}$ 为第 i 个储藏组中第 j 种成分的峰面积(V・S); $C_{0,j}$ 为鲜果对照组中第 j 种成分的峰面积(V・S)[20–21]。随后, 对每个储藏组与对照组的挥发性成分开展独立样本 *t* 检验, 筛选出差异显著的成分作为特征标记物。基于标准化后的 GC-IMS 数据生成三维差异谱图, 并开展主成分分析。第 i 个样品在第 k 个主成分上的得分 $T_{i,k}$ 计算公式(2)如下所示。

$$T_{i,k} = \sum_{j=1}^{p} Z_{i,j} \times v_{j,k} \quad (2)$$

式中: $v_{j,k}$ 为第 j 种成分在第 k 个主成分上的载荷系数; $Z_{i,j}$ 为标准化后第 i 个样品中第 j 种成分的数值; p 为挥发性成分的总数。

1.3.3 品质指标测定

多糖含量采用苯酚-硫酸法测定[22]。称取枸杞样品粉末, 加水回流提取, 去除蛋白杂质后乙醇沉淀, 离心收集粗多糖, 以葡萄糖为标准品, 采用紫外分光光度法在 490 nm 处测定吸光度并计算含量。

总酚含量采用福林-酚比色法测定[23]。样品经乙醇超声提取, 以没食子酸为标准品, 在 765 nm 处测定吸光度, 计算总酚含量。

类胡萝卜素含量采用紫外分光光度法测定[24]。样品经无水乙醇-石油醚混合溶剂避光提取, 于 450 nm 处测定吸光度并计算含量。

MDA 含量采用硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)法测定[25]。以三氯乙酸提取样品, 与 TBA 溶液水浴加热显色, 于 532 nm 和 600 nm 处测定吸光度, 计算 MDA 含量以反映脂质氧化程度。

感官品质由 10 名经培训的专业品评员采用 9 分制进行评分, 分别对样品的色泽、口感、果香、异味、整体可接受度进行评价, 取平均值作为最终得分[26]。

1.4 数据处理

采用 GC-IMS 配套 VOCal 0.1.2 数据分析软件对原始三维谱图进行背景扣除、峰对齐与归一化处理, 获取各挥发性成分峰面积数据。采用 SPSS 26.0 软件进行统计学分析, 不同储藏组间指标差异采用独立样本 *t* 检验, 以 P<0.05 表示差异具有统计学意义。采用 OriginPro 2022b 软件绘制图表。基于挥发性成分峰面积数据, 运用 SIMCA 14.1 软件进行正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA), 以变量重要性投影(variable importance projection, VIP)>1 筛选差异标志物; 采用 Pearson 法进行挥发性成分与品质指标的相关性分析, 综合评价不同储藏方式下枸杞品质差异。

2 结果与分析

2.1 不同储藏方式下枸杞挥发性有机物 GC-IMS 与差异图谱分析

采用 GC-IMS 技术对鲜果对照组、常温储藏组、低温

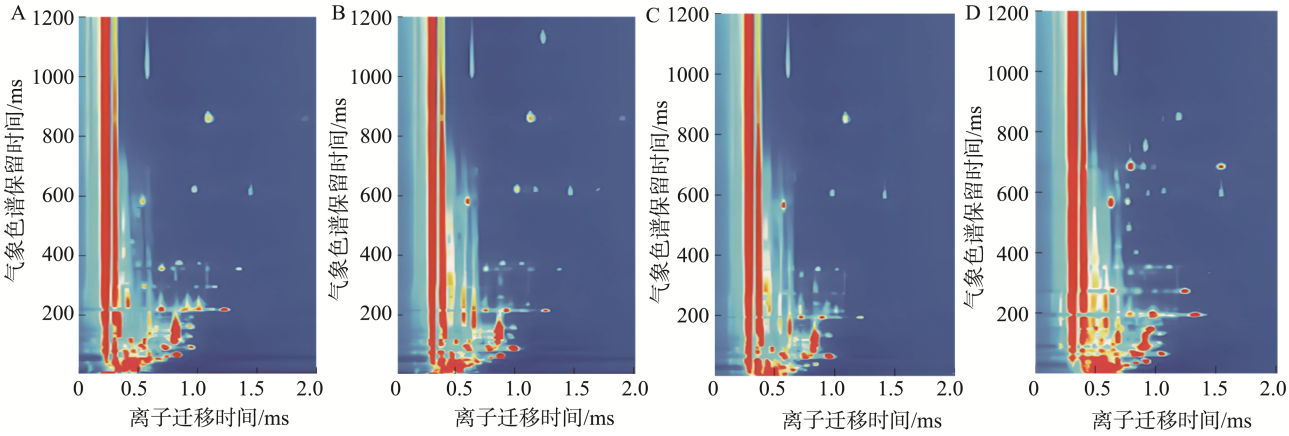
储藏组及冷冻储藏组的枸杞样品进行检测，获得挥发性有机物 GC-IMS 谱图(图 1)。结果表明，不同储藏方式下枸杞挥发性成分图谱存在显著差异。鲜果组挥发性成分信号丰富、分布均匀，特征峰强度较高；常温储藏组部分特征区域信号显著增强，并出现新的特征峰，说明储藏过程中部分成分含量上升且伴随新物质生成；低温储藏组谱图特征与鲜果组高度接近，特征峰数量与强度无明显差异，可较好保持原有挥发性成分组成；冷冻储藏组特征峰缺失明显，部分区域信号减弱并出现新特征峰，表明冷冻处理使挥发性成分发生明显分解与转化。综合分析表明，4 ℃低温储藏能最大程度维持枸杞挥发性成分的原始特征，品质保持效果最优。

2.2　不同储藏方式下枸杞挥发性成分变化定量分析

定量结果显示，4 组样品共检出 52 种挥发性成分，包括醇类 14 种、醛类 14 种、萜烯类 10 种、酮类 7 种、酯类 7 种，具体组成与相对含量见表 3。鲜果组与低温组挥发性成分以醇类和酯类为主，这与蔡尉彤等[27]研究结果一致；常温组醛类相对含量显著升高，醇类相对含量明显下降；冷冻组各类香气成分均大幅降低，特征香气物质流失最为明显。

以鲜果组为对照，通过相对含量变化率计算可知，常温储藏组香叶醛上升 50.0%，芳樟醇下降 27.1%；低温储藏组各成分波动均控制在±15%以内，芳樟醇、香叶醛、香茅醛变化率分别为–8.2%、15.5%、8.1%，整体保持平稳；冷冻储藏组芳樟醇、香叶醛、香茅醛分别下降 35.2%、23.0%、27.1%，特征香气成分损失最为显著。

GC-IMS 定性与相对定量结果表明，储藏温度通过调控挥发性成分降解与转化速率，显著影响枸杞香气轮廓，可有效区分不同储藏方式下枸杞的挥发性成分差异。



注: A. 鲜果组; B. 常温储藏组; C 低温储存组; D. 冷冻储藏组。

图 1　不同储藏方式下枸杞挥发性有机物的 GC-IMS 谱图

Fig.1　GC-IMS spectra of volatile organic compounds in *Lycium chinensis* under different storage methods

表 3　枸杞挥发性成分相对定量分析结果

Table 3　Relative quantitative analysis results of volatile components in *Lycium chinensis*

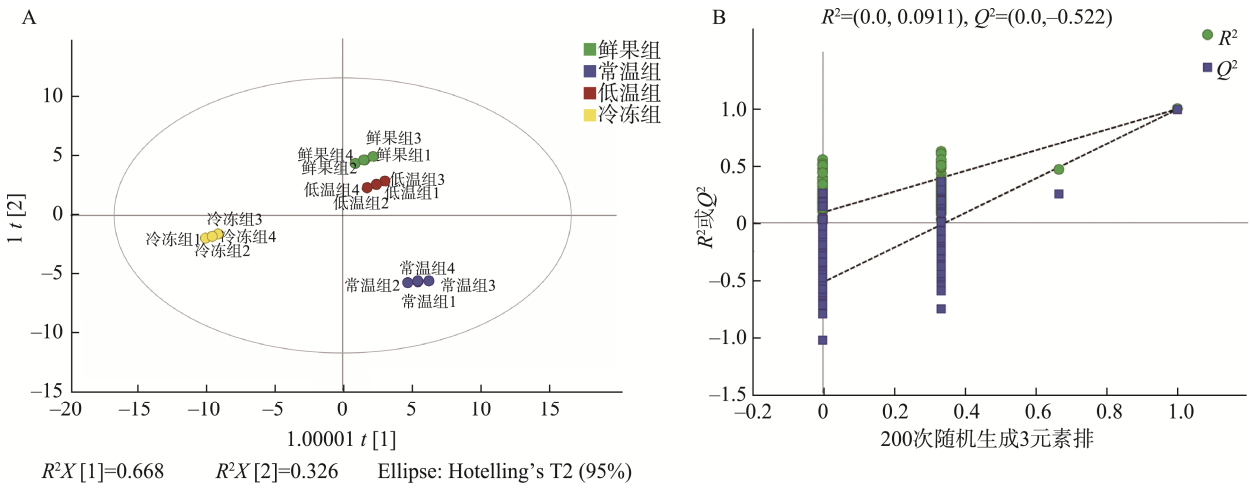
序号	挥发性成分名称	英文名称	类别	鲜果组	常温组	低温组	冷冻组
1	芳樟醇	linalool	醇类	8.54	6.21	7.84	5.53
2	*A*-萜品醇	*α*-terpineol	醇类	1.24	0.86	1.12	0.63
3	苯甲醇	benzylalcohol	醇类	5.51	4.07	5.02	3.22
4	2-苯乙醇	2-phenylethanol	醇类	0.94	0.63	0.84	0.46
5	正己醇	1-hexanol	醇类	1.55	1.07	1.43	0.84
6	正戊醇	1-pentanol	醇类	1.04	0.74	0.96	0.52
7	1-辛烯-3-醇	1-octen-3-ol	醇类	0.83	1.23	0.94	0.33
8	异戊醇	isoamylalcohol	醇类	1.14	0.82	1.02	0.54
9	3-甲基-1-丁醇	3-methyl-1-butanol	醇类	0.72	0.53	0.72	0.34
10	香茅醇	citronellol	醇类	0.62	0.44	0.62	0.22
11	松油醇	terpineol	醇类	0.53	0.34	0.53	0.23
12	正庚醇	1-heptanol	醇类	0.74	0.53	0.64	0.32
13	4-萜烯醇	4-terpineol	醇类	0.83	0.63	0.74	0.33
14	橙花醇	nerol	醇类	0.42	0.22	0.41	0.12
15	香叶醛	geranial	醛类	5.22	7.84	6.03	4.02
16	香茅醛	citronellal	醛类	4.84	6.52	5.23	3.54
17	己醛	hexanal	醛类	2.12	3.82	2.33	1.26
18	庚醛	heptanal	醛类	1.54	2.75	1.63	0.85

表 3(续)

序号	挥发性成分名称	英文名称	类别	鲜果组	常温组	低温组	冷冻组
19	辛醛	octanal	醛类	1.22	2.22	1.31	0.65
20	壬醛	nonanal	醛类	1.04	1.83	1.12	0.51
21	苯甲醛	benzaldehyde	醛类	1.82	2.53	2.00	1.11
22	5-甲基糠醛	5-methylfurfural	醛类	0.61	1.22	0.71	0.32
23	反式-2-戊烯醛	(*E*)-2-pentenal	醛类	0.72	1.33	0.84	0.42
24	反式-2-己烯醛	(*E*)-2-hexenal	醛类	1.13	2.01	1.24	0.62
25	柠檬醛	citral	醛类	0.94	1.55	1.03	0.54
26	癸醛	decanal	醛类	0.56	0.96	0.63	0.23
27	香草醛	vanillin	醛类	2.54	4.03	3.07	1.82
28	*β*-环柠檬醛	*β*-cyclocitral	醛类	0.38	0.74	0.55	0.24
29	柠檬烯	limonene	萜烯类	3.84	5.55	4.24	3.03
30	*α*-蒎烯	*α*-pinene	萜烯类	4.23	3.04	3.83	2.54
31	*β*-蒎烯	*β*-pinene	萜烯类	1.32	0.92	1.22	0.63
32	*β*-月桂烯	*β*-myrcene	萜烯类	3.22	4.85	3.56	2.27
33	罗勒烯	ocimene	萜烯类	3.53	5.02	4.03	2.88
34	*α*-水芹烯	*α*-phellandrene	萜烯类	0.83	1.22	0.93	0.34
35	*γ*-萜品烯	*γ*-terpinene	萜烯类	0.72	1.02	0.81	0.32
36	萜品油烯	terpinolene	萜烯类	0.53	0.83	0.56	0.21
37	对伞花烃	p-cymene	萜烯类	0.63	0.91	0.72	0.30
38	3-蒈烯	3-carene	萜烯类	0.44	0.56	0.34	0.22
39	丙酮	acetone	酮类	1.11	1.82	1.22	0.67
40	2-丁酮	2-butanone	酮类	1.52	2.34	1.62	0.91
41	2-戊酮	2-pentanone	酮类	0.92	1.51	1.02	0.51
42	2-己酮	2-hexanone	酮类	0.82	1.23	0.91	0.42
43	3-羟基-2-丁酮	acetoin	酮类	1.19	1.92	1.33	0.71
44	6-甲基-5-庚烯-2-酮	6-methyl-5-hepten-2-one	酮类	0.73	1.11	0.81	0.32
45	薄荷酮	menthone	酮类	0.51	0.82	0.62	0.21
46	乙酸芳樟酯	linalylacetate	酯类	6.01	4.52	5.51	3.80
47	乙酸香叶酯	geranylacetate	酯类	0.81	0.62	0.82	0.29
48	乙酸苯乙酯	phenethylacetate	酯类	0.61	0.39	0.62	0.22
49	己酸乙酯	ethylhexanoate	酯类	0.72	0.48	0.71	0.36
50	丁酸乙酯	ethylbutyrate	酯类	0.91	0.59	0.82	0.42
51	丙酸乙酯	ethylpropionate	酯类	0.51	0.30	0.52	0.19
52	2-甲基丙酸乙酯	ethyl2-methylpropanoate	酯类	0.42	0.22	0.42	0.09

2.3 多元统计分析

基于挥发性成分数据构建的 OPLS-DA 模型可有效区分鲜果、常温、低温及冷冻贮藏条件下的样品风味特征，模型参数 R^2X=0.999、R^2Y=0.996、Q^2=0.983，且置换检验显示 Q^2 截距为–0.522，无过拟合现象，说明模型稳定可靠，预测能力较强[28]，组间差异真实存在。得分图和置换检验图见图 2，由图 2 可知，4 组样品的平行样本点组内聚集度高，组间完全分离无重叠，表明不同贮藏方式显著改变了样品的挥发性风味轮廓[29]；其中低温组与鲜果组距离更近，风味组成差异较小，而常温组与冷冻组的风味特征发生了明显偏移，尤其是冷冻组与鲜果组的分离度最大，说明低温贮藏对样品原有风味的保留效果更优，常温与冷冻贮藏则会导致挥发性成分发生特征性变化；R^2 和 Q^2 均>0.5，表明该模型预测性能良好，经 200 次置换检验，最后 Q^2 与纵轴交叉点小于 0，表明模型有效，不存在过拟合。基于 OPLS-DA 模型分析，以 VIP>1 为阈值筛选差异标志物，共得到 22 种关键挥发性成分，可有效区分不同储藏方式样品，详见表 4，主要涵盖醇类、酯类、萜烯类及醛类，是区分不同贮藏方式下样品风味特征的关键物质。其中，鲜果组的特征差异物质数量最多，包括正庚醇、4-萜烯醇、丙酸乙酯、2-甲基丙酸乙酯、苯甲醇、2-苯乙醇、乙酸芳樟酯、3-甲基-1-丁醇、*α*-蒎烯、正戊醇、芳樟醇、香茅醇、丁酸乙酯等 15 种，说明这些物质是维持样品原有风味的核心成分；低温组的特征差异物质包括松油醇、橙花醇、乙酸苯乙酯、己酸乙酯、香茅醇、乙酸香叶酯，常温组则以 3-蒈烯、香草醛、罗勒烯、庚醛为主要差异物质，不同贮藏组的特征差异物质分布差异显著，进一步验证了不同贮藏方式对样品挥发性风味组成的影响具有特异性。



注: A. OPLS-DA 得分; B. 置换检验。

图 2　不同储藏方式下枸杞样品的 OPLS-DA 分析

Fig.2　OPLS-DA analysis of *Lycium chinensis* samples under different storage methods

表 4　基于 OPLS-DA 模型分析 VIP 大于 1 的挥发性化合物

Table 4　Volatile compounds with VIP more than 1 analyzed based on OPLS-DA model

序号	名称	VIP	类型
1	正庚醇	1.21963	鲜果组
2	4-萜烯醇	1.17616	鲜果组
3	松油醇	1.16706	低温组
4	橙花醇	1.14960	低温组
5	丙酸乙酯	1.14856	鲜果组
6	2-甲基丙酸乙酯	1.14237	鲜果组
7	苯甲醇	1.09169	鲜果组
8	3-蒈烯	1.07598	常温组
9	2-苯乙醇	1.07393	鲜果组
10	乙酸苯乙酯	1.07007	低温组
11	乙酸芳樟酯	1.06894	鲜果组
12	3-甲基-1-丁醇	1.06863	鲜果组
13	α-蒎烯	1.06774	鲜果组
14	己酸乙酯	1.05398	低温组、鲜果组
15	正戊醇	1.05160	鲜果组
16	芳樟醇	1.04626	鲜果组
17	香茅醇	1.04398	鲜果组、低温组
18	丁酸乙酯	1.04215	鲜果组
19	香草醛	1.03821	常温组
20	罗勒烯	1.02916	常温组
21	乙酸香叶酯	1.00895	低温组、鲜果组
22	庚醛	1.00227	常温组

2.4　不同储藏方式下枸杞品质评价

本研究所得到的不同储藏方式下的枸杞样品如图 3 所示。不同储藏方式对枸杞多糖、总酚、类胡萝卜素、氧化水平、微生物数量及感官品质均有显著影响, 结果见表 5。由表可知, 鲜果组多糖、总酚、类胡萝卜素含量最高, 脂质氧化程度最低, 感官品质最优。低温储藏组各项指标显著优于常温与冷冻组, 多糖保留率高, 总酚与类胡萝卜素保留率分别达 89.22%、85.72%, MDA 含量低, 色泽与口感评分接近鲜果。这是由于常温储藏组因氧化与微生物活动较强, 活性成分损失大、感官品质下降明显[30]; 冷冻储藏组因冰晶损伤导致细胞结构破坏, 活性成分流失严重, 质地与风味劣变显著[31]。

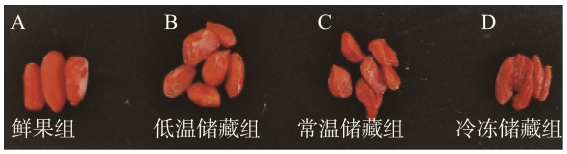


图 3　不同储藏方式下的枸杞样品

Fig.3　*Lycium chinensis* samples under different storage methods

2.5　挥发性成分与品质指标相关性分析

由相关性热图(图 4)可知, 枸杞中醇类和酯类挥发

表 5　不同储藏方式下枸杞品质指标

Table 5　Quality indicators of *Lycium chinensis* under different storage methods

组别	多糖/%	总酚保留率/%	类胡萝卜素保留率/%	MDA/(μmol/g)	色泽	口感
鲜果组	4.21±0.21^{a}	100.00^{a}	100.00^{a}	0.32±0.04^{c}	8.71±0.37^{a}	8.51±0.24^{a}
常温储藏组	3.02±0.33^{b}	68.50±3.13^{c}	59.32±4.23^{c}	1.25±0.09^{a}	5.42±0.26^{c}	4.83±0.47^{c}
低温储藏组	3.81±0.25^{a}	89.22±2.46^{b}	85.72±3.53^{b}	0.41±0.05^{c}	7.92±0.34^{b}	7.66±0.35^{b}
冷冻储藏组	2.53±0.33^{c}	61.32±3.71^{d}	52.17±3.92^{c}	0.88±0.07^{b}	4.53±0.22^{d}	4.21±0.17^{c}

注: 表中不同小写字母代表组间差异显著(P<0.05)。

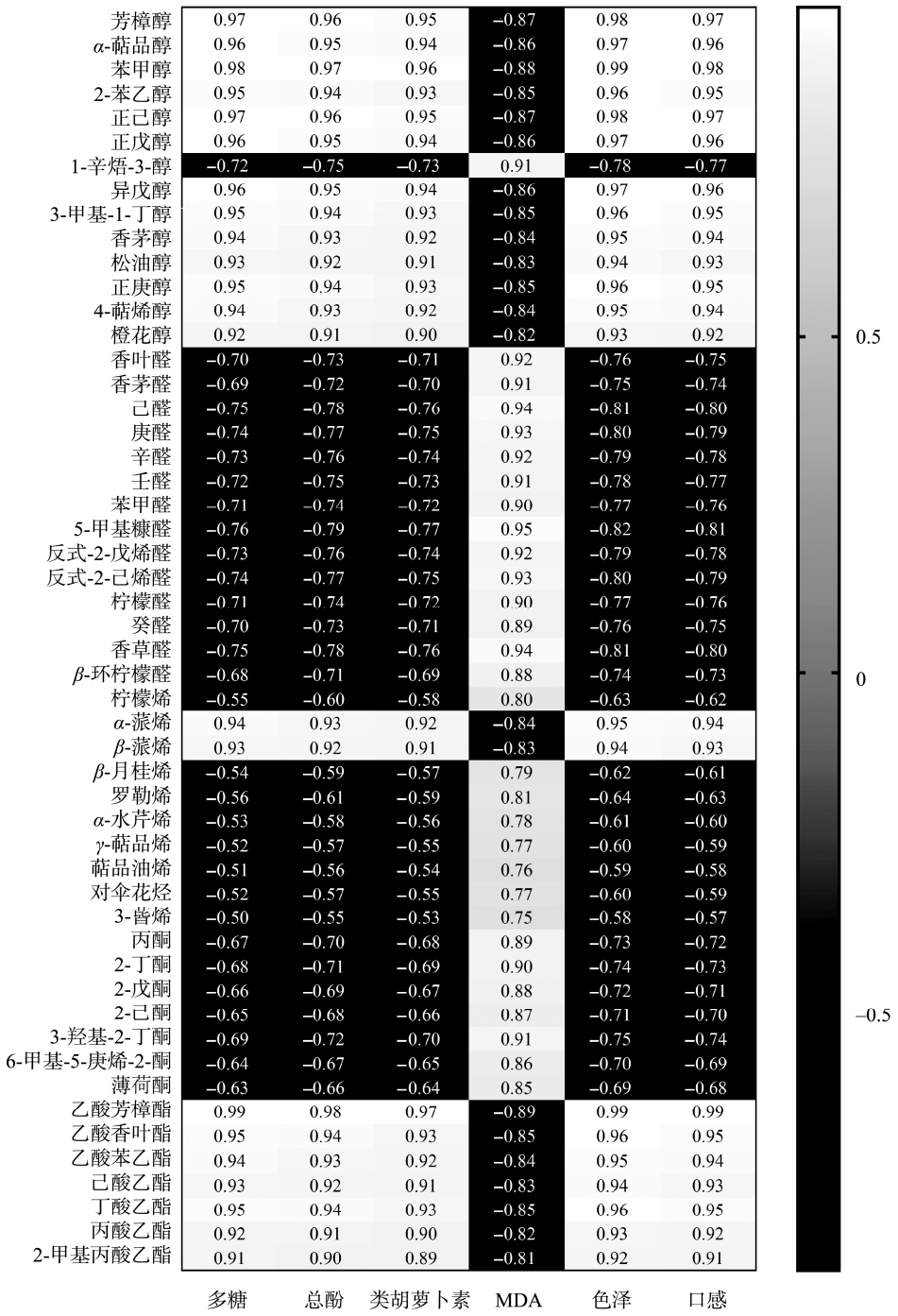


图 4 相关性热图分析

Fig.4 Correlation heatmap analysis

性成分整体上与多糖、总酚、类胡萝卜素、色泽及口感呈显著正相关，与 MDA 含量呈显著负相关，说明这类物质与枸杞营养品质及感官特性的维持密切相关；而多数醛类、酮类及部分萜烯类物质则与上述营养、感官指标呈显著负相关，与 MDA 含量呈显著正相关，表明这些物质的积累与枸杞储藏过程中的品质劣变及膜脂过氧化加剧有关[32]。

3 结论与讨论

本研究采用 GC-IMS 结合多糖、总酚、类胡萝卜素、MDA 及感官品质评价，系统解析常温、低温(4 ℃)、冷冻 3 种储藏方式对枸杞挥发性成分及品质的影响。从挥发性成分变化规律来看，鲜果香气以醇类和酯类为核心，赋予枸杞清甜、果香与花香特征，是维持良好感官品质的关键

物质; 而在常温储藏过程中, 脂氧合酶、醇脱氢酶等活性增强[33], 加速脂肪酸氧化与萜类物质转化, 促使香叶醛、香茅醛、己醛、香草醛等醛类物质大量积累[34], 同时芳樟醇等特征香气成分显著降低, 呈现典型的“醇降醛升”劣变模式, 这与果实采后衰老、风味恶化的内在机制一致。研究表明, 温度升高会加速枸杞挥发性成分失衡, 醛类物质过度积累是导致风味劣变与异味产生的主要原因[35]。此外, 不同储藏条件通过调控酶促反应速率、细胞膜完整性与脂质过氧化程度, 显著改变枸杞的营养保留率, 最终形成差异显著的品质特征。

低温(4 ℃)储藏可显著抑制酶活性与微生物繁殖, 减缓挥发性成分的氧化、分解与转化, 使大部分香气成分波动幅度控制在±15%以内[36], 挥发性成分轮廓与鲜果高度重合, 特征香气保留完整。同时, 低温环境能够维持细胞膜结构完整性, 降低 MDA 累积, 减少多糖、总酚、类胡萝卜素等活性成分降解[37], 使营养保留率与感官品质显著优于其他储藏组。已有研究证实, 4 ℃左右低温可有效延缓枸杞采后衰老, 抑制呼吸强度与腐烂率, 延长保鲜期并保持良好风味品质[38], 与本研究结果一致。冷冻储藏虽可完全抑制生化反应, 但冰晶形成会破坏细胞区室化结构, 导致酶与底物大量接触, 引发香气物质快速降解, 芳樟醇等关键成分降幅高达 35.3%, 同时伴随新的小分子产物生成, 最终造成风味淡薄、感官劣变。尽管冷冻干燥能较好保留部分挥发性成分, 但冰晶对细胞结构的机械损伤难以避免, 会显著影响枸杞整体品质稳定性[39], 表明冷冻并不适合枸杞高品质短期储藏。

相关性分析进一步证实, 醇类、酯类与营养指标、感官品质呈显著正相关, 是枸杞品质保持的标志性物质; 而醛类、酮类与 MDA 呈显著正相关, 可作为枸杞储藏劣变的早期标志物。OPLS-DA 多元统计分析筛选出 22 个 VIP>1 的关键差异成分, 进一步从分子层面证实不同储藏方式对香气轮廓的调控具有特异性, 低温能够最大程度保留鲜果特征香气物质。

本研究仍存在一定局限: 仅考察 30 d 短期储藏, 未涉及长期商业储藏规律; 未比较不同成熟度、产地枸杞的响应差异; 挥发性成分以相对定量为主, 缺乏绝对定量与香气活性值验证。未来可开展长期储藏动力学研究, 结合 GC-MS 与电子鼻、电子舌构建多技术融合评价体系, 并建立基于特征挥发性标志物的枸杞储藏品质在线预警模型, 为枸杞精准化、绿色化采后储藏提供更全面的理论支撑。

参考文献

[1] 李龙祥, 吴俐, 孙钧政, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱比较分析不同干燥方式下海鲜菇副产物干品的风味特征[J]. 核农学报, 2025, 39(10): 2171–2185.
LI XL, WU L, SUN JZ, *et al*. The flavor characteristics of dried seafood mushroom by-products under different drying methods were compared and analyzed based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2025, 39(10): 2171–2185.

[2] ZHANG B, SUI Y, ZHANG X, *et al*. Research progress in the application of gas chromatography-ion mobility spectrometry in food authentication [J]. Food Science, 2025, 46(1): 227–236.

[3] WANG Y, ZHOU Z, CHANG R, *et al*. New method of direct sampling gas chromatography–ion mobility spectrometry to identify the dynamic retronasal volatile compounds in the alcoholic beverage and their release behaviors: A case study on Huangjiu [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(7): 4331–4341.

[4] 李圣胜, 罗鎏欣, 陆华瑜, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)的桂林米粉及其卤水风味分析[J]. 中国调味品, 2025, 50(8): 71–78.
LI SS, LUO LX, LU HY, *et al*. Flavor analysis of Guilin rice noodles and their brine based on gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. China Condiment, 2025, 50(8): 71–78.

[5] 朱晴云, 程伟, 刘耕典, 等. 基于顶空气相色谱-离子迁移谱法解析不同质量等级金裕皖馥香白酒的挥发性组分差异[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(22): 307–316.
ZHU QY, CHENG W, LIU GD, *et al*. Analysis of the differences of volatile components in Jinyuwan Fuxiang Baijiu of different quality grades based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(22): 307–316.

[6] MENG X, XU MQ, ZHANG T, *et al*. Differences of volatile components of different varieties of walnut oils in Xinjiang using gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. China Oils & Fats, 2025, 50(3): 102–109.

[7] 魏紫阳, 黑生花, 魏兆军, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱和电子鼻结合化学计量学分析不同油炸时间鸡米花挥发性风味特征[J]. 肉类研究, 2025, 39(6): 61–67.
WEI ZY, HEI SH, WEI ZJ, *et al*. Analysis of volatile flavor characteristics of popcorn chicken with different frying times using gas chromatography-ion mobility spectrometry and electronic nose combined with chemometrics [J]. Meat Research, 2025, 39(6): 61–67.

[8] YUE LI, BAO X, GUO J, *et al*. Effect of storage conditions on the quality of prepared chicken soup based on gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with quality characterization [J]. Meat Research, 2025, 39(5): 51–59.

[9] 蔡灵喜, 范晨亮, 彭振磊, 等. 气相色谱-离子迁移谱测定轻质烃类中痕量含氧化合物[J]. 石油化工, 2025, 54(8): 1153–1156.
CAI LX, FAN CL, PENG ZL, *et al*. Gas chromatography-ion mobility spectrometry for trace oxygenated compounds in light hydrocarbons [J]. Petrochemical Technology, 2025, 54(8): 1153–1156.

[10] 邵月萍, 郭琳琳, 张馨月, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱和电子鼻分析橘子醋挥发性风味化合物[J]. 中国调味品, 2025, 50(6): 189–194, 218.
SHAO YP, GUO LL, ZHANG XY, *et al*. Analysis of volatile flavor compounds in orange vinegar based on gas chromatography-ion mobility spectrometry and electronic nose [J]. China Condiment, 2025, 50(6): 189–194, 218.

[11] 唐新, 孙少忆, 周泽江, 等. 枸杞油果的活性成分及抗氧化性研究[J]. 中国调味品, 2023, 48(7): 49–55.
TANG X, SUN SY, ZHOU ZJ, *et al*. Study on the active components and antioxidant activity of browned lycium barbarum [J]. China Condiment,

2023, 48(7): 49–55.

[12] 彭择, 陈慧芝, 牛犇, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱分析发酵对蓝靛果-蓝莓果汁挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(16): 275–284.
PENG Z, CHEN HZ, NIU B, *et al*. Effect of fermentation on volatile flavor compounds in blue honeysuckle-blueberry juice mixture based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Food Science, 2025, 46(16): 275–284.

[13] 伍悦, 马娜娜, 韩丽娟, 等. 基于响应面法和气相色谱-离子迁移谱优化藏羊羊肝粉腥味去除工艺[J]. 现代食品科技,2025, 41(8): 215–226.
WU Y, MA NN, HAN LJ, *et al*. Optimization of removal of fishy odor from Tibetan sheep liver powder using response surface methodology and gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(8): 215–226.

[14] 岳丽, 王佳敏, 王卉, 等. 气相色谱-离子迁移谱法和顶空固相微萃取气相色谱-质谱法联用分析不同品种高粱的挥发性化合物[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(18): 369–377.
YUE L, WANG JM, WANG H, *et al*. Characterization of volatile compounds of different colors of sorghum grain after puffing based on gas chromatography-ion migration spectrometry combined with multivariate statistical analysis method [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(7): 187–197.

[15] 曾桥, 温谨瑞, 唐文洁, 等. 基于气相色谱离子迁移谱技术分析枸杞叶茯砖茶加工过程中的挥发性成分[J]. 陕西科技大学学报, 2024, 42(6): 59–68, 78.
ZENG Q, WEN JR, TANG WJ, *et al*. Analysis of volatile components in *Lycium barbarum* leaf Fu brick tea during processing based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2024, 42(6): 59–68, 78.

[16] WEI M, WANG Y, SHAN Y, *et al*. Characteristic volatile product analysis of moldy cigar wrapper and filler using gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Analytical Sciences, 2025, 41(1): 55–62.

[17] 金文刚, 别玲玲, 裴金金, 等. 基于 GC-IMS 技术分析炖煮过程中大鲵头汤挥发性风味物质[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 307–313.
JIN WG, BIE LL, PEI JJ, *et al*. Analysis of volatile flavor compounds in giant salamander head soup during stewing based on GC-IMS [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(19): 307–313.

[18] SONG J, WANG J, WEI F, *et al*. Assessment of the aroma profiles of 15 commercial Chinese jujubes using gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Journal of Future Foods, 2026, 6(3): 430–438.

[19] 孟令帅, 郑婷婷, 王诗琦, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱联用及气相色谱-质谱联用对贵州红托竹荪鲜品特征性香气物质表征及分析[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(16): 314–323.
MENG LS, ZHENG TT, WANG SQ, *et al*. Characterization and analysis of characteristic aroma compounds of fresh *Dictyophora rubrovalvata* in Guizhou based on gas chromatography-ion mobility spectrometry and gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(16): 314–323.

[20] JIN Y, LIU Y, DIAO C, *et al*. Analysis of volatile flavor components in white tea with different storage durations based on GC-IMS technology [J]. China Tea Processing, 2025, 2025(2): 73–79.

[21] FU M, LIAN F. Mildew detection for stored wheat using gas chromatography–ion mobility spectrometry and broad learning network [J]. Food Analytical Methods, 2024, 17(5): 664–678.

[22] 朱鹏, 顾秋亚, 吕蓓蓓, 等. 硒化金耳多糖的制备、结构表征及生物活性[J]. 食品科学技术学报, 2026, 44(2): 135–145, 220.
ZHU P, GU QY, LYU BB, *et al*. Preparation, structural characterization and biological activities of selenium-modified *Tremella aurantialba* polysaccharides [J]. Journal of Food Science and Technology, 2026, 44(2): 135–145, 220.

[23] 沈佳辰, 彭效明, 付伟凭, 等. 紫芝多酚提取、抗氧化活性及稳定性研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2026, 51(2): 124–133.
SHEN JC, PENG XM, FU WP, *et al*. Extraction, antioxidant activity and stability of polyphenols from *Ganoderma sinense* [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2026, 51(2): 124–133.

[24] 曾雨. 基于转录组和代谢组对不同果色枸杞果实类胡萝卜素代谢调控差异研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2025.
ZENG Y. Differential regulation of carotenoid metabolism in *Lycium barbarum* fruits with different colors based on transcriptome and metabolome [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2025.

[25] 罗生虎, 陈春蕊, 李敏, 等. 1-MCP 对果串不同修剪程度‘阳光玫瑰’葡萄贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2026, 26(03): 1–12.
LUO SH, CHEN CR, LI M, *et al*. Effects of 1-MCP on storage quality of ‘Shine Muscat’ grape clusters with different trimming degrees [J]. Storage and Process, 2026, 26(3): 1–12.

[26] 夏诗琪, 周成钏, 郭昌庆, 等. 基于广泛靶向代谢组学分析花榈木不同部位挥发性代谢物差异[J]. 天然产物研究与开发, 2023, 35(12): 2027–2039.
XIA SQ, ZHOU CC, GUO CQ, *et al*. Differential analysis of volatile metabolites in different parts of *Ormosia henryi* based on widely-targeted volatilomics [J]. Natural Product Research and Development, 2023, 35(12): 2027–2039.

[27] 蔡尉彤, 曹烙文, 宋诗清, 等. 基于全二维气相色谱-飞行时间质谱鉴别宁夏中宁枸杞的特征标志物[J]. 食品科学技术学报, 2025, 43(2): 141–150.
CAI WT, CAO LW, SONG SQ, *et al*. Identification of characteristic biomarkers of *Lycium barbarum* L. from Zhongning, Ningxia based on GC×GC-TOFMS [J]. Journal of Food Science and Technology, 2025, 43(2): 141–150.

[28] 胡颖慧, 秦伟, 陈鹏飞, 等. 新疆 20 个枣品种果实品质分析及综合评价 [J/OL]. 食品与发酵工业, 1-15. [2026-05-06]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.045308
HU YH, QIN W, CHEN PF, *et al*. Quality analysis and comprehensive evaluation of 20 jujube cultivars in Xinjiang [J/OL]. Food and Fermentation Industries, 1-15. [2026-05-06]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11- 1802/ts.045308

[29] 王奥迪, 冯作山, 白羽嘉, 等. 不同干燥方式对杏脯品质及香气成分的影响 [J/OL]. 食品与发酵工业, 1-15. [2026-05-06]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.045692
WANG AOD, FENG ZS, BAI YJ, *et al*. Effects of different drying methods on quality and aroma components of preserved apricot [J/OL]. Food and Fermentation Industries, 1-15. [2026-05-06]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.045692

[30] 董雪, 郑宇, 邵晋, 等. 低温、富氮环境对稻谷储藏期间挥发物的影响

[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(12): 1–11.
DONG X, ZHENG Y, SHAO J, *et al*. Effects of low temperature and nitrogen-rich environment on volatiles during rice storage [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(12): 1–11.

[31] 王利萍. 蓝莓与发酵蓝莓酒挥发性风味物质研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2024.
WANG LP. Study on volatile flavor compounds of blueberry and fermented blueberry wine [D]. Guiyang: Guizhou University, 2024.

[32] 程竹林. 干枸杞贮藏期间颜色劣变原因与品质控制的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
CHENG ZL. Study on the causes of color deterioration and quality control of dried *Lycium barbarum* during storage [D]. Urumchi: Xinjiang Agricultural University, 2022.

[33] YOU KY, CAO XH, LI QY, *et al*. Application of magnetic fields in low-temperatures storage of fruits and vegetables [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2025, 24(5): e70252.

[34] 拱健婷, 袁久懿, 王莉, 等. 基于 HS-GC-IMS 联合化学计量学筛选苍术不同炮制品的关键气味标志物[J/OL]. 中国中药杂志, 1-13. [2026-05-07]. https: //doi.org/10.19540/j.cnki.cjcmm.20260403.301
GONG JT, YUAN JY, WANG L, *et al*. Screening of key odor markers in different processed products of *Atractylodes lancea* based on HS-GC-IMS combined with chemometrics [J/OL]. China Journal of Chinese Materia Medica, 1-13. [2026-05-07]. https: //doi.org/10.19540/j.cnki.cjcmm.20260403.301

[35] 高以丹, 胡娜, 王洪伦. 基于GC-IMS比较不同干燥方式对柴达木枸杞中挥发性物质的影响[J]. 天然产物研究与开发, 2022, 34(12): 1989–1998, 2033.
GAO YD, HU N, WANG HL. Comparison of volatile compounds in Qaidam *Lycium barbarum* under different drying methods by GC-IMS [J]. Natural Product Research and Development, 2022, 34(12): 1989–1998, 2033.

[36] 刘康. 梅果实特征香气的鉴定及储藏条件对香气物质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
LIU K. Identification of characteristic aroma of plum fruit and effects of storage conditions on aroma substances [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.

[37] 李新. 低温贮藏对鲜枸杞营养品质及类胡萝卜素代谢的影响[D]. 广州: 暨南大学, 2018.
LI X. Effects of low-temperature storage on nutritional quality and carotenoid metabolism of fresh *Lycium barbarum* [D]. Guangzhou: Ji'nan University, 2018.

[38] 李晓莺, 闫亚美, 刘兰英, 等. 枸杞鲜果贮藏保鲜技术及深加工产品研发现状[J]. 宁夏农林科技, 2025, 66(10): 77–82.
LI XY, YAN YM, LIU LY, *et al*. Research progress on fresh-keeping technology and deep-processing products of fresh *Lycium barbarum* [J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2025, 66(10): 77–82.

[39] 谢带琴, 徐玉娟, 许芷杰, 等. 不同环温液氮冷冻对带梗和无梗枸杞冻结特性及品质的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 378–387.
XIE DQ, XU YJ, XU ZJ, *et al*. Effects of different ambient temperature liquid nitrogen freezing on freezing characteristics and quality of stemmed and stemless *Lycium barbarum* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 378–387.

(责任编辑: 韩晓红　曹岱琳)