油脂化学

DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240324

不同贮藏温度对低温压榨核桃油关键香气成分的影响

张玉壮[1],雷舒雯[1],刘志晨[1],彭春秀[2],龚加顺[1,3]

(1.云南农业大学 食品科学技术学院,昆明 650201;2.云南农业大学 园林园艺学院,昆明 650201;
3.云南省农业科学院 农产品加工研究所,昆明 650224)

摘要:旨在为核桃油的低温贮藏提供参考,研究了不同贮藏温度下低温压榨核桃油关键香气成分的差异。将低温压榨核桃油在25、4、-10、-20 ℃下贮藏8周,考察贮藏过程中其酸值和过氧化值的变化,采用电子鼻与固相微萃取-气相色谱-质谱法测定核桃油的风味物质与挥发性成分含量,并采用相对气味活度值确定关键香气成分。结果表明:随着贮藏时间的延长与贮藏温度的升高,低温压榨核桃油的酸值和过氧化值升高,但均未超出国标限量;电子鼻分析表明,低温压榨核桃油主要含有氮氧化物、烃类、萜烯类、硫化物、醇类、醛酮类等物质,-20 ℃贮藏核桃油的风味与初始核桃油相似,25 ℃贮藏核桃油的风味与初始核桃油差别较大;核桃油中共检测出39种香气成分,包括醛类17种、烃类11种、酸类4种、醇类2种、酮类1种、其他类4种;新鲜核桃油中共检出17种关键香气成分,经25、4、-10、-20 ℃贮藏8周后,核桃油中分别检出12、13、12、13种关键香气成分,其中25、4、-10 ℃贮藏核桃油均与新鲜核桃油有7种共有的关键香气成分,而-20 ℃贮藏核桃油与新鲜核桃油有10种共有的关键香气成分。综上,核桃油在低温下贮藏效果较优,尤其在-20 ℃下贮藏时其品质和风味与新鲜核桃油更接近。

关键词:低温压榨核桃油;低温贮藏;固相微萃取-气相色谱-质谱联用;电子鼻;关键香气成分

中图分类号:TS225.1;TS201.3 **文献标识码**:A **文章编号**:1003-7969(2025)09-0014-06

Effects of different storage temperatures on key aroma components of cold-pressed walnut oil

ZHANG Yuzhuang[1], LEI Shuwen[1], LIU Zhichen[1],
PENG Chunxiu[2], GONG Jiashun[1,3]

(1. College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;
2. College of Landscape Architecture, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;
3. Institute of Agricultural Product Processing, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650224, China)

Abstract: In order to provide references for low-temperature storage of walnut oil, the differences in key aroma components of cold-pressed walnut oil under varying storage temperatures were investigated. The cold-pressed walnut oil samples were stored at 25, 4, -10 ℃ and -20 ℃ for 8 weeks. The changes in acid value and peroxide value of walnut oil during storage were monitored, the flavor compounds and content of volatile components were analyzed using electronic nose (E-nose) and solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry respectively, and the key aroma components were identified via relative odor activity value. The results indicated that acid values and peroxide values increased with the

收稿日期:2024-05-21;**修回日期**:2025-04-07

基金项目:云南省永平县核桃产业科技特派团(202204BI090014)

作者简介:张玉壮(1998),男,硕士研究生,研究方向为生物与医药(E-mail)473690173@qq.com。

通信作者:彭春秀,讲师(E-mail)Pengchunxiu2023@163.com;龚加顺,教授,博士(E-mail)Gong199@163.com。

increasing of storage time and temperatures, yet remained within national standard limits. E - nose analysis revealed that cold - pressed walnut oil primarily contained nitrogen oxides, hydrocarbons, terpenes, sulfide, alcohols, and aldehyde - ketones. Walnut oil stored at -20 ℃ exhibited minimal divergence from fresh walnut oil in flavor, whereas those stored at 25 ℃ showed significant differences. A total of 39 aroma components were detected in walnut oil, including 17 aldehydes, 11 hydrocarbons, 4 acids, 2 alcohols, 1 ketone, and 4 other class. A total of 17 key aroma components were detected in fresh walnut oil. After storage at 25, 4, -10 ℃ and -20 ℃ for 8 weeks, 12, 13, 12 and 13 key aroma components were detected in walnut oil, respectively. Among them, walnut oil stored at 25, 4 ℃ and -10 ℃ shared 7 key aroma components with fresh walnut oil, while walnut oil stored at -20 ℃ shared 10 key aroma components with fresh walnut oil. In conclusion, walnut oil has better storage performance at low temperature, especially when stored at -20 ℃, its quality and flavor are closer to fresh walnut oil.

Key words: cold - pressed walnut oil; low - temperature storage; solid - phase microextraction - gas chromatography - mass spectrometry; electronic nose; key aroma component

核桃(*Juglans regia* L.)又名胡桃,是我国重要的木本油料作物之一,与扁桃、腰果、榛子并称为“世界四大坚果”[1]。核桃有着悠久的栽培历史,分布极为广泛,亚洲、北美洲、中美洲、南欧以及西印度群岛等地均有种植[2]。我国核桃主要生长于山地以及丘陵地带,广泛分布于华北、西北、华中、华南、西南等地,以云南、新疆、陕西等省(区)为主。核桃仁香气浓郁,含有丰富的脂肪、蛋白质、磷脂以及维生素 E 等多种营养物质,而用核桃仁榨取的核桃油中不饱和脂肪酸含量达 90% 以上,以亚油酸、油酸、亚麻酸为主[3],并且 $\omega-6$ 与 $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸配比合理,同时含有多酚、黄酮、维生素 E 等多种生物活性物质[4-7],有预防心脑血管疾病,提高记忆力,增强免疫力,延缓衰老,促进大脑、神经系统和视网膜发育的作用[8]。

低温压榨核桃油因压榨温度较低,可以较好地保留其原有的营养与风味。但低温压榨核桃油不饱和脂肪酸含量高,易氧化酸败,产生“哈喇”味[9]。油脂的气味是用来判断其品质的重要指标之一。电子鼻利用传感器模拟嗅觉以评价产品的整体风味[10],而植物油中挥发性化合物的检测主要以固相微萃取 - 气相色谱 - 质谱联用(SPME - GC - MS)法为主,其具有技术简单、快速、灵敏且对检测样品无损的优点。研究不同贮藏温度下低温压榨核桃油风味的变化,可以为其选择合适的贮藏条件提供参考。另外,实际生活中北方家庭在冬天温度较低时食用油会出现冻结情况。因此,结合核桃油在 -17 ℃时会出现凝固现象,选择 -20、-10、4、25 ℃ 4 个贮藏温度,采用电子鼻联合 SPME - GC - MS 技术对低温压榨核桃油的挥发性风味成分进行检测分析,探讨不同贮藏温度对低温压榨核桃油关键香气成分的影响,以期为核桃油的低温贮藏提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　实验材料

1.1.1　原料与试剂

低温压榨核桃油,原料为云南永平县深纹核桃仁。无水乙醇、乙酸、氢氧化钾、石油醚、酚酞、可溶性淀粉、碘化钾、氢氧化钠、三氯甲烷、冰乙酸,均为分析纯。

1.1.2　仪器与设备

电子天平;TopPette 移液枪 (1、5 mL);-10 ℃恒温冰箱、-20 ℃恒温冰箱;PEN3 型电子鼻,申贝科学仪器(苏州)有限公司;Clarus SQ8 GC/MS 气相色谱 - 质谱联用仪,美国赛默飞世尔科技公司;50/30 μm PDMS/CAR/DVB(2 cm)萃取纤维头,美国 Supelco 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　低温压榨核桃油的贮藏实验

模拟家庭每天用油情况,另外结合一家四口人每周的植物油食用量以及市面上常见的 5 L 包装植物油,一桶植物油大概食用两个月,因此实验设计 8 周。

取 500 mL 低温压榨核桃油于 700 mL 食品级玻璃瓶中,分别于 25、4、-10、-20 ℃贮藏 8 周,期间每天取出开盖摇晃一次,每周取样检测酸值和过氧化值。采用电子鼻和 SPME - GC - MS 仪对新鲜低温压榨核桃油和贮藏 8 周的低温压榨核桃油挥发性风味成分进行测定。以上均进行重复实验。

1.2.2　酸值和过氧化值的测定

酸值采用 GB 5009.229—2016《食品安全国家

标准 食品中酸价的测定》中的第三法进行测定;过氧化值采用 GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》中的第一法进行测定。

1.2.3 电子鼻测定

核桃油的电子鼻测定参照周晔等[10]的方法并稍作修改。取5 mL 核桃油样品于20 mL 顶空瓶中,盖紧密封后常温条件下平衡 10 min。利用 PEN3 型电子鼻进行测定,具体参数:间隔时间 1 s,准备时间 5 s,测试时间 70 s,测量计数时间 1 s,清洗时间 120 s,自动调零时间 10 s,内部流量和进样流量均为 300 mL/min,数据选取时间段 57 ~ 59 s。每个样品重复测定 3 次。PEN3 型电子鼻传感器和对应的敏感物质如表 1 所示。

表 1 电子鼻传感器性能描述

Table 1 Performance description of electronic nose sensors

阵列序号	名称	性能描述
R1	W1C	对芳香物质敏感
R2	W5S	对氮氧化物敏感
R3	W3C	对胺类、芳香性物质敏感
R4	W6S	主要对氢化物敏感
R5	W5C	对烯烃和芳香性物质敏感
R6	W1S	主要对烃类物质敏感
R7	W1W	对萜烯类或硫化物敏感
R8	W2S	对醇类、醛酮类物质敏感
R9	W2W	对芳香成分敏感
R10	W3S	对烷烃类物质敏感

1.2.4 SPME - GC - MS 法测定

采用 SPME - GC - MS 法测定核桃油的挥发性成分。

SPME 条件:萃取温度 70 ℃,萃取时间 30 min,解吸时间 5 min。

GC 条件:Elite - 5MS 色谱柱(30 m × 250 μm,0.25 μm);升温程序为起始温度 40 ℃,保持 3 min,以 5 ℃/min 升至 200 ℃,以 10 ℃/min 升至 230 ℃,保持 2 min;载气为氦气,流速 1.2 mL/min,不分流进样;总运行时间 40 min。

MS 条件:电子电离方式(EI),电子能量 70 eV,离子源温度 240 ℃,接口温度 250 ℃,质量扫描范围 40 ~ 450 u。

1.2.5 关键香气成分的确定

采用相对气味活度值(ROAV)评价每种挥发性化合物对整体风味的贡献。ROAV ≥ 1 的化合物被认为是关键香气成分[11],0.1 < ROAV < 1 的化合物被认为对香气的贡献较小[12]。ROAV 计算公式见式(1)。

$$V_A = C_A T_{Max} / T_A C_{Max} \times 100 \quad (1)$$

式中:V_A 为某个挥发性化合物的 ROAV;C_A 为某个挥发性化合物的相对含量;T_A 某个挥发性化合物的感官阈值;C_{Max} 为对总体风味贡献最大的挥发性化合物的相对含量;T_{Max} 为对总体风味贡献最大的挥发性组分的感官阈值。

1.2.6 数据统计与分析

采用 Origin 2021 和 Excel 2021 软件进行数据的处理和绘图。

2 结果与分析

2.1 贮藏温度对核桃油酸值的影响

酸值是衡量油脂氧化酸败程度的重要指标。不同贮藏温度下核桃油酸值的变化见图 1。

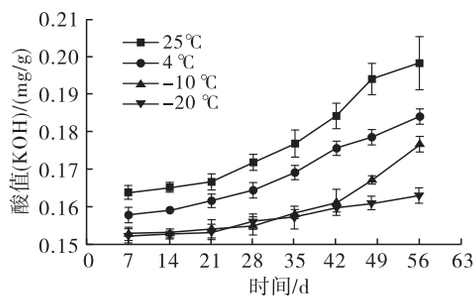

图 1 贮藏温度对核桃油酸值的影响

Fig. 1 Effect of storage temperature on the acid value of walnut oil

由图 1 可以看出,贮藏期间核桃油的酸值均呈现不同程度上升的趋势。这是因为核桃油中含有较多的不饱和脂肪酸,易氧化,氧化产物中可能存在酸类物质。另外,贮藏过程中核桃油在酶等作用下发生水解产生了游离脂肪酸,也会导致酸值上升。贮藏过程中,所有样品的酸值(KOH)均小于 GB/T 22327—2019《核桃油》中一级核桃油要求(≤1.0 mg/g)。4 个贮藏温度中,25 ℃下贮藏核桃油的酸值上升最快,-20 ℃下上升最慢。随着贮藏温度的降低,核桃油的酸值呈下降的趋势,表明低温贮藏可以延缓核桃油的酸败。

2.2 贮藏温度对核桃油过氧化值的影响

过氧化值是评价油脂氧化程度的指标,不同贮藏温度下核桃油过氧化值的变化见图 2。

由图 2 可知,贮藏期间核桃油的过氧化值均呈现不同程度上升的趋势。贮藏过程中所有样品的过氧化值均小于 GB 2716—2018《食品安全国家标准 植物油》限量要求(≤0.25 g/100 g)。4 个贮藏温度中,25 ℃下贮藏核桃油的过氧化值变化最大,贮藏结束后,其过氧化值最高,-20 ℃下贮藏核桃油的过氧化值变化最小。随着贮藏温度的降低,核桃油

的过氧化值呈下降的趋势，这表明低温贮藏可以抑制核桃油的氧化。

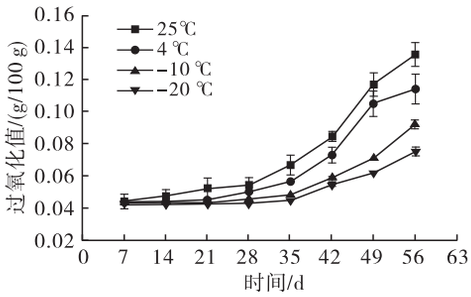

图 2　贮藏温度对核桃油过氧化值的影响

Fig. 2　Effect of storage temperature on the peroxide value of walnut oil

2.3　不同贮藏温度下核桃油的电子鼻测定结果

不同贮藏温度下核桃油的电子鼻分析结果见图 3。

由图 3a 可知，不同贮藏温度下核桃油的主成分分析(PCA)中主成分 1(PC1)和主成分 2(PC2)的方差贡献率分别为 69.79% 和 20.84%，累积方差贡献率为 90.63%，可以代表样品的主要特征信息。另外，在 -20 ℃下贮藏 8 周的核桃油与初始样品有部分重叠，表明两种核桃油的风味既有相似性又有差异性，其余样品与初始样品有明显差异，其中 25 ℃下贮藏 8 周的核桃油与初始样品差异最大。利用电子鼻能够对不同贮藏温度下核桃油的整体风味进行有效评估，且样品间的区分度较高。因此，在核桃油生产中，可利用电子鼻实现利用标准样品对未知样品的质量控制。由图 3b 可以看出，同一样品在 10 个不同的传感器上的响应值存在差异，并且不同样品在同一个传感器上的响应值也有所不同，其中初始样品与 -20 ℃下贮藏 8 周核桃油的响应值差异最小，与 4、25 ℃下贮藏 8 周的差异较大。所有样品在 W5S、W1S、W1W 和 W2S 传感器上的响应值较高，结合表 1 可知，氮氧化物、烃类、萜烯类、硫化物、醇类、醛酮类物质是核桃油氧化酸败后主要的挥发性风味物质，这与彭星星等[13]的研究结果一致。

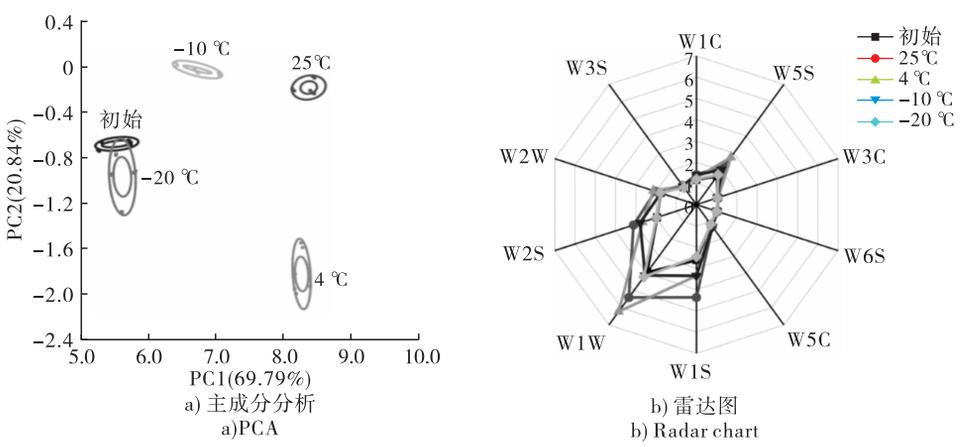

图 3　不同贮藏温度下核桃油的电子鼻分析结果

Fig. 3　Electronic nose analysis results of walnut oil at different storage temperatures

2.4　不同贮藏温度下核桃油挥发性成分相对含量与 ROAV

不同贮藏温度下核桃油挥发性成分相对含量与 ROAV 见表 2。

由表 2 可以看出，核桃油样品中共检测出 39 种挥发性香气成分，包括醛类 17 种、烃类 11 种、酸类 4 种、醇类 2 种、酮类 1 种、其他类 4 种。总体来看，各核桃油样品挥发性香气成分的种类和含量最多的均为醛类和烃类物质。大部分烷烃类、酸类物质因为感官阈值较高，嗅感不明显；而醛类物质的感官阈值较低，是核桃油风味物质中最重要的一类化合物[14]。新鲜核桃油有 24 种挥发性香气成分，25、4、-10、-20 ℃贮藏 8 周的核桃油分别有 24、25、23、24 种挥发性化合物，新鲜核桃油及不同温度贮藏 8 周的核桃油所含有的挥发性香气成分数量基本相同，但种类存在差异，其中：新鲜核桃油中含有 3 种特有的挥发性化合物，分别是癸醛、十五烷、六甲基环三硅氧烷；25 ℃贮藏 8 周的核桃油有 2 种特有的挥发性化合物，分别是十一醇、3,5 - 辛二烯 - 2 - 酮；4 ℃贮藏 8 周的核桃油有 1 种特有的挥发性化合物，为 2,4 - 辛二烯；-10 ℃和 -20 ℃贮藏 8 周的核桃油无特有的挥发性化合物。各核桃油样品共有的挥发性化合物为(*E*,*Z*) - 2,4 - 癸二烯醛、(*Z*) - 2 - 庚烯醛、正己醛、2 - 十一烯醛、正壬醛、(*E*,*E*) - 2,4 - 庚二烯醛、(*Z*) - 2 - 癸烯醛、十二甲基环六硅氧烷，这些物质大都是醛类化合物，多数含有 C═C 或 C═O，这种双键结构可能对核桃油的呈香品质具有重要作用。

表 2 不同贮藏温度下核桃油挥发性成分的相对含量与 ROAV

Table 2 Relative content and ROAV of volatile components in walnut oil at different storage temperatures

化合物	感官阈值[15]/(mg/m³)	初始		25 ℃		4 ℃		-10 ℃		-20 ℃	
		含量/%	ROAV	含量/%	ROAV	含量/%	ROAV	含量/%	ROAV	含量/%	ROAV
醛类											
2-乙基-4-戊烯醛	0.025	5.89	100	6.43	25.08	5.59	27.14				
(*E*,*Z*)-2,4-癸二烯醛	0.008	1.29	68.44	8.20	100	6.59	100	8.29	100	9.13	100
(*Z*)-2-庚烯醛	0.05	7.43	63.07	4.77	9.31	3.82	9.27	3.95	7.62	3.40	5.96
正己醛	0.098	6.34	27.46	19.31	19.22	6.42	7.95	7.50	7.39	10.07	9.00
2-十一烯醛	0.01	0.24	10.19	0.82	8.00	0.76	9.23	0.97	9.36	0.90	7.89
(*E*,*E*)-2,4-癸二烯醛	0.18	4.21	9.93							22.92	11.16
2,4-癸二烯醛	0.135	2.21	6.95	10.00	7.22	18.46	16.60				
正壬醛	0.15	1.49	4.21	0.95	0.62	0.58	0.47	0.66	0.42	0.65	0.38
癸醛	0.65	1.17	0.76								
十一醛	0.14	0.19	0.58					0.28	0.19	0.17	0.11
(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛	0.36	0.45	0.53	1.43	0.39	0.62	0.21	0.67	0.18	1.16	0.28
(*E*)-2-辛烯醛	0.004			1.33	32.44	1.28	38.85	1.35	32.57	1.77	38.77
2,4-壬二烯醛	0.001 5			0.21	13.66	0.40	32.37	0.40	25.73	0.54	31.54
2,4-十一碳二烯醛	0.01			0.70	6.83	0.81	9.83	0.15	1.45		
(*E*,*E*)-2,4-十二碳二烯醛	0.1			0.44	0.43	0.27	0.33	0.37	0.36		
(*Z*)-2-癸烯醛	0.05	0.54	4.58	1.04	2.03	0.99	2.40	1.17	2.26	1.16	2.03
(*E*)-2-壬烯醛	0.15			0.18	0.12	0.25	0.20	0.28	0.18	0.27	0.16
烃类											
(+)-柠檬烯	0.1	5.46	23.17							3.62	3.17
4-甲基-1-十一烯	0.01	0.20	8.49							0.97	8.49
正十四烷	0.11	0.51	1.97			0.31	0.34	1.21	1.06	8.50	6.77
正十七烷	0.14	0.53	1.61					3.09	2.13	5.32	3.33
正十六烷	0.5	1.05	0.89	0.56	0.11					0.90	0.16
正戊烷	1.45	2.90	0.85					17.13	1.14		
十五烷	0.49	0.76	0.66								
正十二烷	0.77	0.34	0.19			0.66	0.10	0.96	0.12	0.88	0.10
2,4-辛二烯	0.1					0.37	0.45				
(*Z*)-6-十二烯	0.033					0.12	0.44	0.19	0.56	0.22	0.58
1,2,3,4-四甲基苯	0.061					0.34	0.68	0.10	0.16		
酸类											
正十六烷酸	0.5	2.12	1.80	2.10	0.41					0.62	0.10
异辛酸	0.005 1			0.71	13.58	0.42	10.00				
十八烷酸	0.02			1.97	9.61	0.21	1.27			1.71	7.49
共轭亚油酸	1.2			1.48	0.12			4.70	0.38		
醇类											
十一醇	0.02			0.11	0.54						
1-辛烯-3-醇	0.001					0.30	36.42	0.73	70.45		
酮类											
3,5-辛二烯-2-酮	0.1			0.61	0.60						
其他类											
十二甲基环六硅氧烷	0.1	4.18	17.74	0.36	0.35	0.21	0.25	0.24	0.23	0.18	0.16
十六甲基环辛硅氧烷	0.12	1.36	4.81	0.42	0.34	0.10	0.10			0.26	0.19
六甲基环三硅氧烷	0.21	0.56	1.13								
环五聚二甲基硅氧烷	0.08			0.48	0.59	0.22	0.33	0.38	0.46	0.12	0.13

注:ROAV≤0.1 的未列出

Note: ROAV≤ 0.1 is not shown

由表 2 还可知，随着贮藏温度升高，醛类物质的数量呈现上升趋势，相对含量呈现先降低后增加的趋势，而烃类物质的数量和相对含量总体均呈现下降趋势。新鲜核桃油中共检测出 17 种关键香气成分，主要是 2－乙基－4－戊烯醛、(*E*,*Z*)－2,4－癸二烯醛、(*Z*)－2－庚烯醛、正己醛、(＋)－柠檬烯、十二甲基环六硅氧烷等，经 25、4、－10、－20 ℃贮藏 8 周后，核桃油中分别检出 12、13、12、13 种关键香气成分，其中 25、4、－10 ℃贮藏核桃油均与新鲜核桃油有 7 种共有的关键香气成分，而－20 ℃贮藏核桃油与新鲜核桃油有 10 种共有的关键香气成分。几种核桃油样品共有的关键风味物质有(*E*,*Z*)－2,4－癸二烯醛、(*Z*)－2－庚烯醛、正己醛、2－十一烯醛、(*Z*)－2－癸烯醛，其中，(*E*,*Z*)－2,4－癸二烯醛呈现类似油类的气味、柑橘味和鸡肉香味，(*Z*)－2－庚烯醛呈现脂肪味、果味，正己醛具有生油脂气味、青草味和苹果味，2－十一烯醛呈现新鲜醛气味，(*Z*)－2－癸烯醛具有有机醛的刺激气味[16]，这几种物质是核桃油主体风味化合物，其他关键香气成分是造成核桃油香气差异的因素[17]。

3　结　论

将新鲜低温压榨核桃油分别在 25、4、－10、－20 ℃下贮藏 8 周，测定贮藏过程中酸值和过氧化值的变化，通过电子鼻对比了不同贮藏温度下核桃油的风味差异，再结合 SPME－GC－MS 技术分析不同贮藏温度下的核桃油挥发性物质相对含量，确定其关键香气物质。结果表明，随着贮藏时间的延长与贮藏温度的升高，低温压榨核桃油的酸值和过氧化值升高，但均未超出国标限量。通过电子鼻的 PCA 可以区分不同温度下贮藏 8 周的核桃油与初始新鲜核桃油样品，其中－20 ℃下贮藏 8 周的核桃油与初始样品有部分重叠，其余样品与初始样品有明显差异。核桃油中主要含有氮氧化物、烃类、萜烯类、硫化物、醇类、醛酮类物质。通过 SPME－GC－MS 技术分析，核桃油中共检测出 39 种香气成分，包括醛类 17 种、烃类 11 种、酸类 4 种、醇类 2 种、酮类 1 种、其他类 4 种。新鲜核桃油中共检测出 17 种关键香气成分，经 25、4、－10、－20 ℃贮藏 8 周后，核桃油中分别检出 12、13、12、13 种关键香气成分，其中 25、4、－10 ℃贮藏核桃油均与新鲜核桃油有 7 种共有的关键香气成分，而－20 ℃贮藏核桃油与新鲜核桃油有 10 种共有的关键香气成分。因此，核桃油在低温下贮藏效果更好，尤其在－20 ℃下贮藏时其品质和风味与新鲜核桃油更接近。

参考文献：

[1] 石卓功. 经济林栽培学[M]. 昆明：云南科技出版社，2013：192.

[2] 徐杰. 核桃油基油凝胶的制备、结构及稳定性研究[D]. 北京：北京林业大学，2020.

[3] POGGETTI L，FERFUIA C，CHIABÀ C，et al. Kernel oil content and oil composition in walnut (*Juglans regia* L.) accessions from north－eastern Italy[J]. J Sci Food Agric，2018，98(3)：955－962.

[4] KRIS－ETHERTON P M. Walnuts decrease risk of cardiovascular disease：A summary of efficacy and biologic mechanisms[J]. J Nutr，2014，144(4)：547S－554S.

[5] LAVEDRINE F，RAVEL A，VILLET A，et al. Mineral composition of two walnut cultivars originating in France and California[J]. Food Chem，2000，68(3)：347－351.

[6] GAO P，LIU R，JIN Q，et al. Comparative study of chemical compositions and antioxidant capacities of oils obtained from two species of walnut：*Juglans regia* and *Juglans sigillata*[J]. Food Chem，2019，279：279－287.

[7] BOTU M，ALABEDALLAT Y F J，BUCURA F，et al. The productive capacity and quality of several walnut cultivars (*Juglans regia* L.) grown in north Oltenia，Romania[J/OL]. Not Bot Horti Agrobot，2019，47(3)：[2024－05－21]. https://doi.org/10.15835/nbha47311475.

[8] 任少东. 加热预处理对核桃油品质的影响[D]. 新疆阿拉尔：塔里木大学，2017.

[9] 赵丹，汪学德，张润阳，等. 制油工艺对油脂品质的影响研究[J]. 中国油脂，2018，43(6)：11－15.

[10] 周晔，樊玮，张俊佩，等. 压榨和精炼核桃油挥发性成分的比较及其电子鼻判别[J]. 中国油脂，2017，42(2)：130－134，140.

[11] TIAN P，ZHAN P，TIAN H，et al. Analysis of volatile compound changes in fried shallot (*Allium cepa* L. var. *aggregatum*) oil at different frying temperatures by GC－MS，OAV，and multivariate analysis[J/OL]. Food Chem，2021，345：128748[2024－05－21]. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128748.

[12] REN L，MA J，LV Y，et al. Characterization of key off－odor compounds in thermal duck egg gels by GC－olfactometry－MS，odor activity values，and aroma recombination[J/OL]. LWT－Food Sci Technol，2021，143：111182[2024－05－21]. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111182.

[13] 彭星星，陈文敏，罗仁仙，等. 电子鼻鉴别核桃油中掺入大豆油、菜籽油及玉米油研究[J]. 中国粮油学报，2015，30(11)：129－134.

[14] 周志帅，李娇，林德贤，等. HS－SPME－GC－MS 结合 OAV 分析不同产地青花椒浸提前、后的关键香气成分[J]. 中国食品学报，2023，23(10)：315－325.

[15] VAN GEMERT L J. Odour thresholds：Compilations of odour threshold values in air，water and other media[M]. Utrecht，the Netherlands：Oliemans Punter & Partners，2011.

[16] Chemical book[EB/OL]. [2024－05－21]. https://www.chemicalbook.com/ProductIndex.aspx，2022.

[17] 赵玉，张玉环，李建科，等. GC－O 结合 OAV 鉴定陇南初榨橄榄油关键香气成分[J]. 食品科学，2022，43(8)：184－189.