

基于 GC - IMS 技术分析新疆不同品种核桃油挥发性成分的差异

孟新涛^{1,2}, 许铭强^{1,2}, 张 婷^{1,2}, 古丽米热·祖努纳^{1,2},
牛道瞳^{1,2}, 郭金宝³, 刘国庆⁴, 马 燕^{1,2}

(1. 新疆农业科学院 农产品贮藏加工研究所, 乌鲁木齐 830091; 2. 新疆主要农副产品精深加工工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830091; 3. 温宿县木本粮油林场, 新疆 阿克苏 843100;
4. 温宿县宝圆果业有限责任公司, 新疆 阿克苏 843100)

摘要:为研究新疆主栽品种核桃油的挥发性成分差异,通过气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)技术对“温185”“新新2”“新早丰”“新萃丰”“扎343”“温81”6个品种低温压榨核桃油中的挥发性成分进行分析,并采用指纹图谱结合主成分分析(PCA)分析不同品种核桃油间挥发性成分的差异。结果显示,6个品种低温压榨核桃油样品中共检测到48种挥发性物质,其中包括醛类13种、醇类10种、酯类10种、酮类7种、烯烃类3种、酸类2种、醚类2种、杂环类1种。酯类是核桃油的主要挥发性成分,其中,乙酸乙酯(单体)相对含量最高,为10.61%~14.95%。指纹图谱结合PCA结果表明,不同品种核桃油挥发性成分存在差异,“新新2”和“温185”核桃油挥发性成分较为相近,“新萃丰”和“温81”核桃油挥发性成分较为相近,“扎343”和“新早丰”核桃油挥发性成分与其他品种差异较大。因此,应用GC-IMS技术并结合指纹图谱的PCA可达到分析不同品种核桃油挥发性成分差异的目的。

关键词:气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS);不同品种;核桃油;挥发性成分

中图分类号:TS225.1;TS201.2 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)03-0102-08

Differences of volatile components of different varieties of walnut oils in Xinjiang using gas chromatography - ion mobility spectrometry

MENG Xintao^{1,2}, XU Mingqiang^{1,2}, ZHANG Ting^{1,2}, GULIMIRE Zununa^{1,2},
NIU Xiaotong^{1,2}, GUO Jinbao³, LIU Guoqing⁴, MA Yan^{1,2}

(1. Research Institute of Farm Products Storage and Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China; 2. Research Center of Main Agricultural Products Processing Engineering in Xinjiang, Urumqi 830091, China; 3. Woody Grain and Oil Forest Farm in Wensu County, Akesu 843100, Xinjiang, China; 4. Wensu County Bao Yuan Fruit Industry Limited Liability Company, Akesu 843100, Xinjiang, China)

Abstract: In order to study the differences of volatile components in low-temperature pressed walnut oil of main cultivars in Xinjiang, the volatile components in low-temperature pressed walnut oils of Wen 185, Xinxin 2, Xinzhaofeng, Xincui Feng, Zha 343 and Wen 81 were analyzed by gas chromatography - ion

mobility spectrometry (GC-IMS), and the differences in volatile components among different varieties of walnut oil was analyzed using fingerprint profile combined with principal component analysis (PCA). The results indicated that there were 48 volatile substances were detected in 6 varieties of walnut oil samples, including 13 aldehydes, 10 alcohols, 10 esters,

收稿日期:2023-09-08;修回日期:2024-10-17

基金项目:国家重点研发计划(2022YFD1000104,2022YFD1000104-02);自治区科技成果转化示范专项——乡村振兴产业发展科技行动计划项目(2022NC032);自治区公益性科研院所基本科研业务费专项项目(KY2022014)

作者简介:孟新涛(1985),女,副研究员,主要从事农产品保鲜与加工研究(E-mail)mengxintao_929@126.com。

通信作者:马 燕,研究员(E-mail)282568949@qq.com。

7 ketones, 3 olefins, 2 acids, 2 ethers and 1 heterocyclic. Esters were the main volatile components of walnut oil, and the relative content of ethyl acetate (monomer) was the highest (10.61% - 14.95%). There were differences in the volatile components of low - temperature pressed walnut oils of different varieties. The volatile components of Xinxin 2 and Wen185 walnut oil were similar, while the volatile components of Wen 81 and Xincui Feng walnut oil were similar, and the volatile components of Zha 343 and Xinzaofeng walnut oil were significantly different from other varieties. Therefore, it is feasible to use GC - IMS combined with fingerprint profile and PCA to quickly analyze the differences of volatile component of different varieties of walnut oils.

Key words: gas chromatography - ion mobility spectroscopy (GC - IMS); different varieties; walnut oil; volatile component

核桃(*Juglans regia* L.)为胡桃科植物,是我国重要经济树种之一,其果实与扁桃、腰果、榛子并称为世界著名的“四大干果”^[1]。核桃仁中脂肪含量(约70%)丰富,核桃油中含有75.8%~81.73%的亚油酸和油酸,且 ω -6脂肪酸和 ω -3脂肪酸配比合理,同时含有黄酮、矿物质元素、生育酚等多种生物活性物质^[2-3],具有预防心脑血管疾病^[4],提高记忆力^[5],增强免疫力^[6],延缓衰老,促进大脑、神经系统和视网膜发育的作用^[2]。挥发性物质影响油脂的感官特性,进而影响消费者对油脂的接受程度^[7]。目前对核桃油挥发性物质的研究主要集中在不同工艺所得核桃油的挥发性成分组成差异^[1-3,8-9],但对不同品种核桃油间挥发性成分差异的研究较少。

核桃油挥发性成分的检测主要以气相色谱-质谱联用法(GC-MS)为主,但此方法存在检测时间长,主要用于高沸点化合物的分析,数据处理难度大等问题。因此,寻求一种快捷、简单、准确性强的核桃油挥发性成分检测方法至关重要。气相色谱-离

子迁移谱(GC-IMS)技术具有操作简单、检测快速、灵敏度高且对检测样品无损的优点,且具有图谱可视化对比分析的优势,更适合快速对比不同品种样品间挥发性成分的差异。近年来GC-IMS在酒^[10]、茶叶^[11]、肉品^[12]、乳制品^[13]、水果^[14]等食品研究领域应用广泛,但将该方法用于探究新疆不同品种低温压榨核桃油挥发性成分差异的研究尚未见报道。

本研究采用GC-IMS技术对新疆6个品种低温压榨核桃油的挥发性成分进行测定和分析,并结合指纹图谱和主成分分析(PCA)分析不同品种核桃油的挥发性成分差异,以期为核桃油生产加工和风味研究提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

“温185”“新新2”“新早丰”“新萃丰”“扎343”“温81”6个品种核桃,由新疆阿克苏市温宿县木本粮油林场提供。不同品种核桃果实特性和产地见表1。

表1 不同品种核桃果实特性和产地

Table 1 Characteristics and origin of walnut fruit of different varieties

品种	果实特性	产地
温185	坚果椭圆形,果基圆,果顶渐尖,单果质量11.2 g,壳厚1.0 mm,出仁率59%左右	新疆和田、阿克苏地区
新新2	早实类型、雌先行,坚果卵圆形,果基平圆,果顶微尖,单果质量14.0 g,壳厚1.2 mm,出仁率66%左右	新疆和田、阿克苏地区
新早丰	坚果椭圆形,果基圆,果顶渐尖,单果质量13.0 g,壳厚1.2 mm,出仁率50%左右	新疆和田、阿克苏地区
新萃丰	坚果椭圆形,单果质量18.3 g,壳厚2.12 mm,出仁率50%左右	新疆阿克苏地区
扎343	坚果卵圆形,单果质量15.9 g,壳厚1.2 mm,出仁率54%左右	新疆阿克苏地区
温81	坚果圆柱形,单果质量11.24 g,壳厚1.23 mm,出仁率61%左右	新疆喀什、阿克苏地区

2-戊酮、2-己酮、2-庚酮、2-辛酮、2-壬酮等有机溶剂,分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

KOMET DD85 榨机,德国 IBG 公司; Flavour Spec[®]气相离子迁移谱联用仪,德国 G. A. S 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 低温压榨核桃油的制备

将核桃破壳取仁,经筛选、除杂、粗破碎后,调整其含水量为7.0%~8.0%,在转速60 r/min、出口温

度 120 °C、出粕口径 8 mm 的条件下采用榨机榨取核桃油,经抽滤除去杂质,得到低温压榨核桃油,于 4 °C 冰箱储存备用。

1.2.2 核桃油挥发性成分的测定

参考孟新涛等^[15]的方法采用 GC-IMS 测定核桃油挥发性成分,并略作修改。称取 5 mL 低温压榨核桃油于顶空进样瓶中,在 80 °C 下以 500 r/min 振动转速孵化 10 min,用进样针抽取进样瓶中的顶空组分后,插入气相色谱进样口解吸,待 GC-IMS 测定。

GC-IMS 条件: MXT-5 色谱柱(15 m × 0.53 mm, 3 μm),IMS 温度 45 °C;进样量 1 mL,不分流进样;顶空进样针温度 85 °C;色谱运行时间 25 min;载气为高纯氮气(≥99.999%);载气程序设置为初始流速 2.00 mL/min 并保持 2 min,在 2~10 min 线性增至 15.00 mL/min,10~15 min 线性增至 50.00 mL/min,在 15~25 min 线性增至 150.00 mL/min。

2-戊酮、2-己酮、2-庚酮、2-辛酮、2-壬酮作为标准品,按照体积比 1:1:1:1:1 混合,采用高纯水稀释 5 000 倍后,再稀释 50 倍配制混标,吸取 1 mL 混标确定其保留时间和漂移时间。采用 GC-IMS 中的 LAV(Laboratory analytical viewer)分析软件和 2014 NIST 数据库对特征挥发性物质进行定性。挥发性物质的相对含量为其峰体积与样品所有物质峰体积总和的比值。风味物质的气味特质来源于 GC-IMS 谱库。

1.2.3 数据处理

采用 SPSS17.0 和 Origin 8.0 软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 6 个品种低温压榨核桃油挥发性成分的 GC-IMS 二维俯视图

6 个品种低温压榨核桃油挥发性成分的 GC-IMS 二维俯视图见图 1。

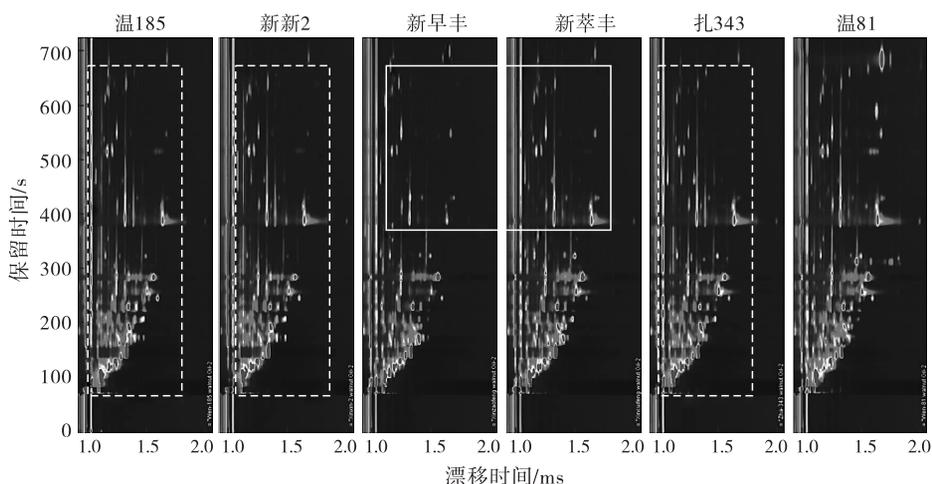


图 1 6 个品种低温压榨核桃油挥发性成分的 GC-IMS 二维俯视图

Fig. 1 GC-IMS 2D topographic plots of volatile components of low-temperature pressed walnut oil of 6 varieties

由图 1 可知,6 个品种低温压榨核桃油的所有挥发性化合物在漂移时间 1.0~2.0 ms、保留时间 700 s 内被全部检出,大部分化合物集中在保留时间 300 s 内,少部分分散在 300~700 s,主要是因为不同化合物极性存在差别,而极性和非极性化合物通过非极性柱子后的保留时间不同^[16]。

由图 1 还可知,6 个品种低温压榨核桃油的信号离子峰形成的光斑具有一定差异性,但“温 185”“新新 2”和“扎 343”核桃油的挥发性化合物种类较为相似(白虚线框)，“新早丰”和“新萃丰”核桃油中挥发性化合物种类较为相似(白实线框),而“温 81”核桃油的挥发性化合物种类与其他 5 个品种的

差异较大。

2.2 6 个品种低温压榨核桃油的挥发性成分相对含量

6 个品种低温压榨核桃油的挥发性成分相对含量如表 2 所示。

由表 2 可知,6 个品种低温压榨核桃油中共检测到 48 种挥发性物质,其中包括醛类 13 种(4 种是单体和二聚体,1 种是单体、二聚体和三聚体)、醇类 10 种(2 种是单体和二聚体)、酯类 10 种(3 种是单体和二聚体)、酮类 7 种(2 种是单体和二聚体)、烯炔类 3 种、酸类 2 种、醚类 2 种、杂环类 1 种。

由表 2 可知,6 个品种低温压榨核桃油中酯类

物质总量最高(30.05% ~ 39.13%),其次为醛类 酮类(9.66% ~ 20.79%),其余几类挥发性物质总(19.29% ~ 32.89%)、醇类(17.72% ~ 20.61%)、量较低。

表 2 6 个品种低温压榨核桃油挥发性成分的相对含量

Table 2 Relative contents of volatile components in low-temperature pressed walnut oil of 6 varieties

化合物	保留时间/ s	迁移时间/ ms	相对含量/%					
			温 185	新新 2	新早丰	新萃丰	扎 343	温 81
酮类								
2-庚酮 D	417.64	1.26	0.58	0.69	0.84	0.89	1.02	0.96
2-庚酮 M	417.64	1.64	0.68	0.80	0.32	0.87	1.19	1.09
2-戊酮 D	189.41	1.12	3.11	3.31	1.12	2.19	5.52	1.89
2-戊酮 M	189.41	1.37	0.46	0.48	0.45	0.55	0.39	0.33
2-丙酮	101.13	1.12	11.27	11.91	4.72	6.56	9.74	9.93
2-丁酮	140.54	1.07	0.57	0.66	1.07	0.80	0.81	0.64
2,3-戊二酮	198.25	1.22	0.49	0.63	0.10	0.15	0.49	0.17
3-戊酮	198.67	1.11	0.65	0.69	0.80	0.59	0.88	0.77
环戊酮	268.78	1.33	0.72	0.77	0.24	0.39	0.75	0.50
总量			18.53	19.94	9.66	12.99	20.79	16.28
醇类								
1-辛烯-3-醇	610.99	1.16	0.59	0.61	0.61	0.83	0.77	0.74
己醇 M	390.57	1.33	2.81	3.04	1.35	2.73	3.22	2.86
己醇 D	389.28	1.64	2.58	2.67	2.37	2.71	2.82	2.81
1-戊醇 M	260.67	1.26	1.66	1.88	1.17	1.46	1.69	1.51
1-戊醇 D	258.29	1.51	1.67	1.84	1.97	1.86	1.92	1.88
3-甲基丁醇	229.67	1.25	0.40	0.42	0.46	0.37	0.35	0.48
3-甲基-3-丁烯-1-醇	230.67	1.42	1.37	1.21	0.78	0.73	1.08	1.02
1-戊烯-3-醇	229.02	1.35	5.41	3.54	6.44	6.63	3.21	6.55
1-丙醇	129.45	1.11	0.49	0.46	1.02	0.62	0.56	0.86
2-甲基丙醇	164.10	1.17	0.44	0.34	1.22	0.80	0.42	0.44
2,3-丁二醇	289.69	1.36	1.21	1.39	0.67	0.65	1.28	0.70
二氢月桂烯醇	833.99	1.23	0.59	0.55	0.36	0.43	0.40	0.76
总量			19.22	17.95	18.42	19.82	17.72	20.61
醚类								
二丙基二硫醚	925.51	1.48	0.13	0.11	0.16	0.13	0.15	0.15
乙二醇二甲醚	169.06	1.31	0.41	0.21	0.74	0.73	0.29	1.00
总量			0.54	0.32	0.90	0.86	0.44	1.15
醛类								
辛醛	666.42	1.40	0.24	0.26	0.41	0.44	0.39	0.46
2-庚烯醛 D	552.99	1.25	1.15	1.06	1.86	1.60	0.76	1.79
2-庚烯醛 M	547.83	1.67	0.40	0.34	0.88	0.79	0.19	1.05
反式-2-己烯醛 D	355.77	1.18	0.21	0.16	0.76	0.78	0.19	0.32
反式-2-己烯醛 M	355.77	1.52	0.10	0.08	0.22	0.30	0.08	0.10
己醛 D	289.29	1.26	1.42	1.52	2.04	1.82	1.25	1.75
己醛 M	286.91	1.56	6.26	4.71	8.85	8.48	7.00	8.58
2-甲基戊醛	248.15	1.22	1.30	1.25	1.40	1.13	1.38	1.44
戊醛 D	196.82	1.19	0.20	0.25	1.10	0.81	0.25	0.74
戊醛 M	195.96	1.42	0.12	0.14	0.60	0.65	0.16	0.45
3-甲基丁醛	171.76	1.40	1.71	2.09	3.43	2.41	0.98	1.34
正丁醛	145.84	1.29	4.55	4.55	4.71	3.04	3.48	4.09
2-甲基-2-戊烯醛 D	325.80	1.16	0.92	0.56	1.26	1.44	1.39	1.38

续表 2

化合物	保留时间/ s	迁移时间/ ms	相对含量/%					
			温 185	新新 2	新早丰	新萃丰	扎 343	温 81
(<i>E,E</i>)-2,4-庚二烯醛	683.47	1.19	0.19	0.17	0.27	0.32	0.20	0.18
糠醛	331.04	1.08	0.09	0.08	0.80	0.65	0.12	0.32
2-甲基-2-戊烯醛 M	324.18	1.50	0.82	0.32	1.19	2.74	1.80	1.79
戊醛 T	206.78	1.41	0.53	0.77	0.63	1.45	0.90	0.86
庚醛	433.45	1.33	0.69	0.62	1.68	1.18	0.79	1.02
5-甲基呋喃醛	303.19	1.10	0.43	0.36	0.80	0.70	0.33	0.68
总量			21.33	19.29	32.89	30.73	21.64	28.34
酯类								
丁酸丁酯 D	643.22	1.33	0.73	0.81	0.24	0.57	0.44	0.51
乙酸异丙酯 M	173.75	1.48	0.38	0.64	0.22	0.11	0.13	0.14
乙酸乙酯 M	151.54	1.34	14.16	14.95	11.83	11.99	12.86	10.61
乙酸乙酯 D	152.68	1.10	0.67	0.84	1.38	0.88	0.67	1.02
乙酸糠酯	87.38	1.05	9.74	9.83	8.92	8.23	9.76	8.43
3-羟基丁酸乙酯	517.65	1.18	2.53	2.35	1.60	1.91	1.87	2.94
γ -丁内酯 D	466.23	1.08	0.63	0.75	0.75	0.70	1.18	0.71
γ -丁内酯 M	465.18	1.30	0.32	0.45	0.24	0.38	0.99	0.35
乙酸丙酯 D	210.43	1.17	0.44	0.49	0.35	0.55	0.57	0.24
乙酸丙酯 M	208.40	1.47	1.43	1.21	0.19	0.89	0.92	0.34
乙酸甲酯	121.60	1.19	2.88	4.44	6.48	4.67	4.93	2.36
丁酸丙酯	430.08	1.70	0.14	0.14	0.62	0.45	0.22	0.37
乙酸异丁酯 D	245.13	1.59	3.14	2.23	1.35	0.99	1.51	2.03
总量			37.19	39.13	34.17	32.32	36.05	30.05
烯烃类								
α -蒎烯	517.65	1.22	1.08	1.05	0.76	0.83	0.83	1.05
3-丁烯腈	166.12	1.13	0.24	0.45	0.08	0.12	0.39	0.17
1-辛烯	286.36	1.46	0.69	0.69	0.63	0.58	0.56	0.50
总量			2.01	2.19	1.47	1.53	1.78	1.72
杂环类								
2-正戊基呋喃	644.77	1.24	0.14	0.16	0.38	0.09	0.08	0.08
总量			0.14	0.16	0.38	0.09	0.08	0.08
酸类								
3-甲基戊酸	313.74	1.58	0.13	0.15	0.28	0.14	0.34	0.36
异丁酸	233.62	1.09	0.91	0.84	1.85	1.55	1.14	1.40
总量			1.04	0.99	2.13	1.69	1.48	1.76

注: M、D 和 T 分别表示为单体、二聚体和三聚体。下同

Note: M. Monomer; D. Dimer; T. Trimer. The same below

酯类主要由有机酸和醇类酯化生成,呈果香^[7]、葡萄香、青香和白酒似香气。由表 2 可知,“温 185”“新新 2”“新早丰”“新萃丰”“扎 343”和“温 81”核桃油中酯类成分相对含量分别为 37.19%、39.13%、34.17%、32.32%、36.05% 和 30.05%。其中:乙酸乙酯(单体)的相对含量最高(10.61%~14.95%),为核桃油提供强烈的醚似的气味,清灵、微带果香的酒香;其次是乙酸糠酯、乙酸甲酯、3-羟基丁酸乙酯,均呈果香,对于核桃油整体风味起到正面作用。 γ -丁内酯(单体)有芳香气

味,在“扎 343”中相对含量为 0.99%,高于其他品种 50%~76%。乙酸丙酯(单体)呈水果香味^[17],在“温 185”和“新新 2”中的相对含量高于其他品种的。丁酸丁酯(二聚体)和乙酸异丙酯(单体)呈菠萝香和生梨香等果香,二者相对含量均在“新新 2”中最高。

醇类是长链酯类化合物的重要前体物质^[7]。由表 2 可知:6 个品种低温压榨核桃油中醇类成分中 1-戊烯-3-醇的相对含量最高(3.21%~6.63%),呈水果香;己醇相对含量(单体 1.35%~3.22%,二聚体 2.37%~2.82%)次之,己醇对油脂

风味具有一定的消极作用^[18]。1-辛烯-3-醇为不饱和醇类,阈值相对较低(0.001 mg/kg),为蘑菇香^[19],是核桃油中的重要成分。1-戊醇(单体和二聚体)由亚油酸分解产生,在6个品种低温压榨核桃油中相对含量差别不大。3-甲基-3-丁烯-1-醇有刺激性味道,在“新早丰”和“新萃丰”核桃油中的相对含量明显低于其他4个品种的。1-丙醇和2-甲基丙醇在“新早丰”核桃油中相对含量较高。2,3-丁二醇在“温185”“新新2”和“扎343”中相对含量分别为1.21%、1.39%和1.28%,高于其他3个品种的。6个品种低温压榨核桃油中醇类成分相对含量存在一定差别,这与核桃生长地理位置和种植条件有关。整体而言,“温185”“新萃丰”“温81”核桃油中醇类相对含量较其他品种高。

大多数醛类对植物油的风味起到积极的作用^[7]。由表2可知,醛类在“新早丰”和“新萃丰”核桃油中相对含量较高,分别为32.89%和30.73%。其中,己醛的相对含量较高,己醛是油脂中一种重要的挥发性化合物,由亚油酸和亚麻酸水解产生^[20],呈现一种令人不愉快的草味^[2],Crowe等^[21]研究发现,随着己醛水平升高,核桃的感官质量降低。整体而言,6个品种低温压榨核桃油中,“新早丰”核桃油的己醛(单体)相对含量最高,为8.85%,但仍然低于液压法所得核桃油的己醛相对含量(10.16%)^[3],这

可能与液压过程中局部热效应及高压可促进压榨过程中醛类物质的生成^[7]密切相关。

酮类成分与酸类成分都是油脂的氧化产物,主要通过脂质氧化、美拉德反应和醇类氧化产生^[7]。由表2可知,“温185”“新新2”“新早丰”“新萃丰”“扎343”“温81”核桃油中酮类成分相对含量分别为18.53%、19.94%、9.66%、12.99%、20.79%、16.28%,酸类成分相对含量分别为1.04%、0.99%、2.13%、1.69%、1.48%、1.76%，“新早丰”核桃油中酮类成分的相对含量最低,但酸类成分的相对含量最高。

杂环类成分被认为是美拉德反应和Strecker降解反应的产物,可以为食品提供烘焙味和坚果味^[7]。呋喃是油料加工中常见的挥发性成分,为油脂提供焦糖味、甜味和烘烤味,在油脂风味中发挥着重要作用^[22]。6个品种低温压榨核桃油中杂环类成分仅检出2-正戊基呋喃,其相对含量较低(0.08%~0.38%)。

2.3 6个品种低温压榨核桃油挥发性成分差异指纹图谱

为分析6个品种低温压榨核桃油挥发性化合物的差异,将其所有挥发性化合物的离子峰汇总,利用GC-IMS LAV中Gallery插件程序构建挥发性成分的指纹图谱,结果如图2所示。

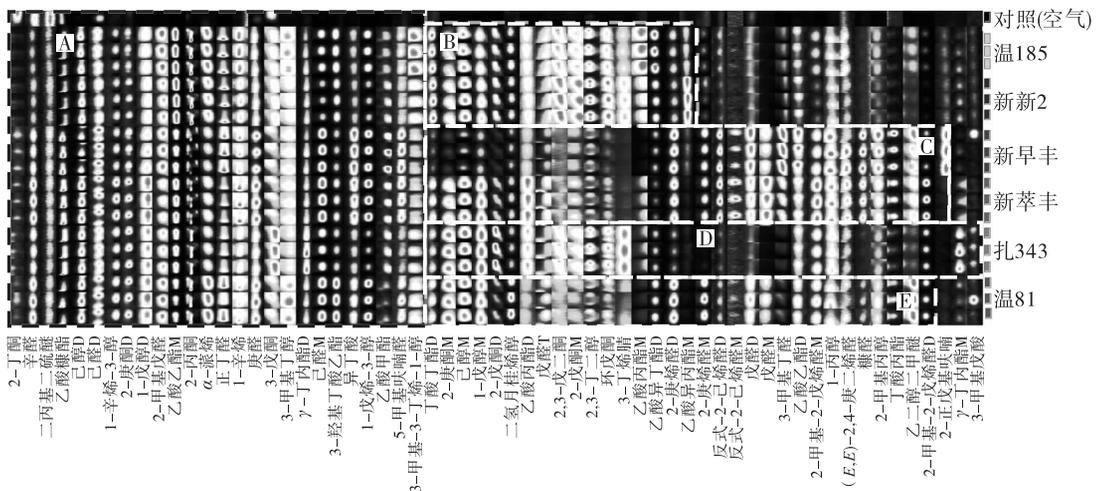


图2 6个品种低温压榨核桃油的挥发性成分指纹图谱

Fig. 2 Fingerprint profiles of volatile compounds of low-temperature pressed walnut oil of 6 varieties

由图2可看出,6个品种低温压榨核桃油样品被直观地区分(图中所示A、B、C、D、E区域),其中A区域中挥发性化合物在6个品种中都存在,包括2-丁酮、辛醛、二丙基二硫醚等26种化合物。B区域中化合物属于“温185”和“新新2”核桃油中的特征挥发性化合物,其中丁酸丁酯(二聚体)、2-庚酮

(单体)、己醇(单体)、1-戊醇(单体)、2-戊酮(单体、二聚体)、二氢月桂烯醇、乙酸丙酯(单体、二聚体)、戊醛(三聚体)、2,3-戊二酮、2,3-丁二醇、环戊酮、3-丁烯腈、乙酸异丁酯(二聚体)、2-庚烯醛(二聚体)、乙酸异丙酯(单体)的离子峰强度呈现出较强的信号。D区域是“扎343”核桃油的特征挥发

性化合物,“扎343”与“温185”和“新新2”呈现较为相似的特征离子峰,但乙酸异丙酯(单体)、2-庚烯醛(二聚体)在“扎343”中的离子峰强度低于“温185”和“新新2”的, γ -丁内酯(单体)为“扎343”独有的特征挥发性化合物。C区域为“新早丰”和“新萃丰”核桃油的特征挥发性化合物,其中2-庚烯醛(单体、二聚体)、反式-2-己烯醛(单体、二聚体)、戊醛(单体、二聚体)、3-甲基丁醛、乙酸乙酯(二聚体)、2-甲基-2-戊烯醛(单体、二聚体)、1-丙醇、(E,E)-2,4-庚二烯醛、糠醛、2-甲基丙醇、丁酸丙酯、乙二醇二甲醚为共有的特征离子峰,但在“新萃丰”核桃油中,还有丁酸丁酯(二聚体)、2-庚酮(单体)、己醇(单体)、1-戊醇(单体)、2-戊酮(二聚体)、二氢月桂烯醇、乙酸丙酯(二聚体)、戊醛(三聚体)8种化合物显示出较强的特征离子峰。E区域为“温81”核桃油的特征挥发性化合物,其中丁酸丁酯(二聚体)、2-庚酮(单体)、己醇(单体)、1-戊醇(单体)、二氢月桂烯醇、3-丁烯腈、乙酸异丁酯(二聚体)、2-庚烯醛(单体、二聚体)、2-甲基-2-戊烯醛(单体)、1-丙醇、戊醛(单体、二聚体、三聚体)、2-甲基丙醇、丁酸丙酯、乙二醇二甲醚显示出较强的特征离子峰。

2.4 6个品种低温压榨核桃油挥发性成分的PCA

依据图2采用Dynamic PCA plug-ins插件程序对6个品种低温压榨核桃油挥发性成分进行PCA,观察6个品种低温压榨核桃油挥发性成分的变化,结果如图3所示。

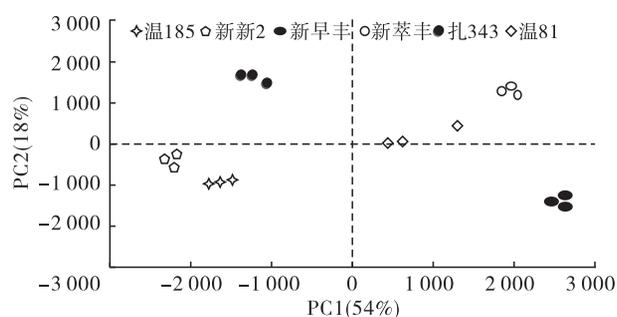


图3 6个品种低温压榨核桃油挥发性成分的PCA

Fig. 3 PCA of volatile components in low-temperature pressed walnut oil of 6 varieties

由图3可以看出,“温185”和“新新2”核桃油位于同一象限,说明二者的挥发性成分较为相近,“新萃丰”和“温81”核桃油位于同一象限,说明二者的挥发性成分较为相近,“扎343”与“新早丰”核桃油分别位于不同象限,说明二者的挥发性物质与其他品种差异较大。

3 结论

本文通过GC-IMS技术从“温185”“新新2”“新早丰”“新萃丰”“扎343”“温81”6个品种低温压榨核桃油中共检测到48种挥发性成分,其中包括醇类10种(2种单体和二聚体)、醛类13种(4种是单体和二聚体,1种是单体、二聚体和三聚体)、酮类7种(2种是单体和二聚体)、酯类10种(3种是单体和二聚体)、酸类2种、杂环类1种、烯炔类3种、醚类2种。6个品种低温压榨核桃油中“温185”和“新新2”核桃油的挥发性成分较为相近,“新萃丰”和“温81”核桃油的挥发性成分较为相近,“扎343”和“新早丰”核桃油的挥发性成分与其他品种差异较大。

参考文献:

- [1] 李欢康, 杨佳玮, 刘文玉, 等. 不同工艺核桃油挥发性物质比对及关键香气成分表征[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 185-192.
- [2] 徐月华. 冷榨核桃油的香味强化及核桃乳稳定性的研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2014.
- [3] 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.
- [4] ALMARIO R U, VONGHAVARAVAT V, WONG R, et al. Effects of walnut consumption on plasma fatty acids and lipoproteins in combined hyperlipidemia [J]. Am J Clin Nutr, 2001, 74(1): 72-79.
- [5] 张清安, 李建科, 范学辉. 核桃油对小鼠学习记忆能力的影响[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2006, 34(4): 89-91.
- [6] 范学辉, 李建科, 张清安, 等. 核桃油对小鼠体内抗氧化酶活性及总抗氧化能力的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(11): 122-124.
- [7] 牛志雅, 王亚杰, 张高虔, 等. 基于GC-IMS技术分析五种市售不同工艺油莎豆油理化品质与风味差异[J]. 食品工业科技, 2024, 45(1): 258-267.
- [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] 李进伟, 方云, 刘元法. 浓香核桃油生产新工艺研究[J]. 中国油脂, 2013, 38(9): 7-10.
- [10] HAO Y, LI J, ZHAO Z, et al. Flavor characteristics of Shanlan rice wines fermented for different time based on HS-SPME-GC-MS-O, HS-GC-IMS, and electronic sensory analyses [J/OL]. Food Chem, 2024, 432: 137150 [2023-09-08]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137150>.
- [11] ZHENG F, GAN S, ZHAO X, et al. Unraveling the chemosensory attributes of Chinese black teas from different regions using GC-IMS combined with sensory analysis[J/OL]. LWT - Food Sci Technol, 2023, 184:

- 114988[2023-09-08]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114988>.
- [12] HE S, ZHANG B, DONG X, et al. Differentiation of goat meat freshness using gas chromatography with ion mobility spectrometry[J/OL]. *Molecules*, 2023, 28(9): 3874 [2023-09-08]. <https://doi.org/10.3390/molecules28093874>.
- [13] SONG Z, CAO Y, QIAO H, et al. Analysis of the effect of *Tenebrio molitor* rennet on the flavor formation of Cheddar cheese during ripening based on gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J/OL]. *Food Res Int*, 2023, 171: 113074 [2023-09-08]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113074>.
- [14] WANG X, LI X, SU M, et al. The construction of volatile profiles of eight popular peach cultivars produced in Shanghai using GC-MS and GC-IMS [J/OL]. *Horticulturae*, 2023, 9(3): 382 [2023-09-08]. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030382>.
- [15] 孟新涛, 潘俨, 邹淑萍, 等. 不同储藏条件下鲜牛肉特征风味动态变化分析[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(15): 289-298.
- [16] CHEN T, CHEN X, LU D, et al. Detection of adulteration in canola oil by using GC-IMS and chemometric analysis[J/OL]. *Int J Anal Chem*, 2018, 2018: 3160265 [2023-09-08]. <https://doi.org/10.1155/2018/3160265>.
- [17] SUN X, WANG Y, LI H, et al. Changes in the volatile profile, fatty acid composition and oxidative stability of flaxseed oil during heating at different temperatures [J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2021, 151: 112137 [2023-09-08]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112137>.
- [18] LEE S, CHO H, LEE K G. Volatile compounds as markers of tofu (soybean curd) freshness during storage [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(3): 772-779.
- [19] 唐春红, 陈旭华, 张春晖, 等. 不同卤制方法对鸡腿肉中挥发性风味化合物的影响[J]. *食品科学*, 2014, 35(14): 123-129.
- [20] KALUA C M, ALLEN M S, BEDGOOD D R, et al. Olive oil volatile compounds, flavour development and quality: A critical review [J]. *Food Chem*, 2007, 100(1): 273-286.
- [21] CROWE T D, CROWE T W, JOHNSON L A, et al. Impact of extraction method on yield of lipid oxidation products from oxidized and unoxidized walnuts [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2002, 79(5): 453-456.
- [22] EL MONFALOUTI H, CHARROUF Z, GIORDANO M, et al. Volatile compound formation during argan kernel roasting [J]. *Nat Prod Commun*, 2013, 8(1): 33-36.
-
- (上接第 94 页)
- [3] 王瑞元. 创新抢占大豆蛋白开发利用的至高点[J]. *中国油脂*, 2021, 46(3): 1-2.
- [4] 朱玉珩, 黄瑶, 邹鲲, 等. 单螺杆挤出的进料均匀性分析及其结构优化设计[J]. *塑料工业*, 2022, 50(2): 80-86.
- [5] 刘忠萍, 华聘聘, 华欲飞. 大豆蛋白的挤压组织化研究[J]. *中国油脂*, 2003, 28(5): 64-66.
- [6] 汤霖森, 郭树国, 王丽艳. 基于 ANSYS 的带行星轮同轴变速单螺杆挤出机三维流场分析[J]. *食品与机械*, 2021, 37(5): 107-110.
- [7] 章梓雄, 董曾南. 粘性流体力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [8] 陈晋南, 胡冬冬, 彭炯. 计算流体力学 (CFD) 及其软件包在双螺杆挤出中的应用[J]. *中国塑料*, 2001(12): 14-18.
- [9] 朱孝录. 齿轮传动设计手册[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [10] 张昕, 于广滨, 亓士远, 等. RV 减速器摆线针轮齿形参数对啮合刚度的影响[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2021, 26(3): 38-44.
- [11] 赵大兴, 明廷伯, 余金舫, 等. 摆线针轮传动中摆线轮齿廓修形技术研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2017(6): 45-49.
- [12] 张洪才. ANSYS14.0 理论解析与工程应用实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [13] 陈峰峰, 李浩杰, 王一飞, 等. 基于 Polyflow 的反螺旋元件对粒子分散性仿真研究[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(9): 82-86.
- [14] 金日光, 马秀清. 高聚物流变学[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2012.
- [15] 金政. 聚合物成型加工原理[M]. 哈尔滨: 黑龙江大学出版社, 2013.
- [16] 王洪武, 林炳鉴. 大豆蛋白质单螺杆挤压熔体输送段的数值模拟[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(9): 75-78.
- [17] 王洪武. 大豆蛋白质挤压加工的实验与数值模拟研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2002.
- [18] 陶璵, 闫宝瑞, 信春玲, 等. 三螺杆挤出机的建压能力与功耗特性[J]. *塑料*, 2016, 45(3): 45-49.
- [19] 耿孝正. 双螺杆挤出机及其应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003.
- [20] 徐文海, 陈安柱, 苏宏林. 开槽三头啮合块双螺杆挤出机数值模拟[J]. *饲料工业*, 2017, 38(15): 9-12.
- [21] 张雪晨, 张丽梅, 黄志刚, 等. 啮合同向双螺杆挤出机不同螺杆构型对其流场的影响[J]. *食品与机械*, 2022, 38(4): 99-103, 206.