

浓香菜籽油和精炼菜籽油氧化稳定性及挥发性成分的差异

刘玉兰^{1,2}, 孙国昊¹, 王小磊², 马宇翔¹, 张慧³, 焦山海³

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 河南工大设计研究院, 郑州 450001;

3. 海南澳斯卡国际粮油有限公司, 海南儋州 571700)

摘要:利用烘箱法加速氧化试验分析研究浓香菜籽油和精炼菜籽油氧化稳定性及挥发性成分变化的差异。结果显示:基于过氧化值达到国标限量(≤ 5 mmol/kg)的精炼菜籽油、浓香菜籽油的预测货架期分别为 64 d 和 80 d,浓香菜籽油的氧化稳定性明显优于精炼菜籽油;利用同时蒸馏萃取结合气相色谱-质谱联用法(SDE-GC-MS)对两种菜籽油中挥发性成分进行检测分析发现,在初始浓香菜籽油和精炼菜籽油中分别检出 10 类 84 种和 6 类 51 种挥发性成分,总量分别为 11 110.78 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 3 831.28 $\mu\text{g}/\text{kg}$;浓香菜籽油中含量最高的是硫苷降解产物,其次是烯烃类和酚类物质,分别占总量的 32.04%、22.74%、22.22%;精炼菜籽油中含量最高的是酚类物质,其次是醛类和酮类物质,分别占总量的 30.32%、23.18%、16.39%,硫苷降解产物、杂环类、酯类、醇类物质均未检出。35 d 的试验结束时,浓香菜籽油和精炼菜籽油中挥发性成分总量均大幅升高,分别为 51 729.62 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 45 671.79 $\mu\text{g}/\text{kg}$,醛类物质成为两种菜籽油中含量最高的挥发性成分,分别占总量的 60.30% 和 68.07%;浓香菜籽油中硫苷降解产物大幅降至仅占总量的 2.64%,同时杂环类物质含量大幅降低,酮类、烯烃类、烷烃类物质含量大幅升高;精炼菜籽油中酮类、烷烃类、烯烃类物质含量升高,醇类物质从初始的未检出升高至占总量的 13.10%。对挥发性成分进行主成分分析发现,造成两种初始菜籽油差异的挥发性成分主要为苯代丙腈、3-甲基-2-丁腈、2-蒎烯、5-己烯腈、4-乙氧基-2,6-二甲氧基-苯酚,这些物质为浓香菜籽油提供独特风味;在加速氧化试验后期,造成两种菜籽油差异的成分则主要为 1-戊烯-3-醇、1-辛烯-3-醇、(E)-2-戊烯醛、(E)-2-庚烯醛、正己醛、壬醛、甲基庚烯酮、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮、白菖烯、甲基环己烯 10 种物质,且前 5 种物质与精炼菜籽油相关,多为亚油酸氧化产物,后 5 种物质则主要与浓香菜籽油相关。研究结果明确了不同工艺生产的菜籽油产品的综合品质差异,可为不同菜籽油产品精准的保质保鲜技术发展提供支持。

关键词:浓香菜籽油;精炼菜籽油;加速氧化试验;氧化稳定性;挥发性成分;SDE-GC-MS 分析技术

中图分类号:TS225;TS227

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2022)06-0035-11

Differences of oxidative stability and volatile components between fragrant and refined rapeseed oils

LIU Yulan^{1,2}, SUN Guohao¹, WANG Xiaolei², MA Yuxiang¹,
ZHANG Hui³, JIAO Shanhai³

(1. College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan University of Technology Design and Research Academy, Zhengzhou 450001, China;

3. Hainan Ausca International Oils and Grains, Ltd., Danzhou 571700, Hainan, China)

收稿日期:2021-12-28;修回日期:2022-03-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0401400)

作者简介:刘玉兰(1957),女,教授,硕士,研究方向为油料油脂加工技术与产品质量安全(E-mail)liuy17446@163.com。

Abstract: An Schaal oven accelerated oxidation experiment was used to examine the differences of oxidative stability and volatile components between fragrant and refined rapeseed oils. The results showed that based on the peroxide value

reaching the national standard limit (≤ 5 mmol/kg), the predicted shelf life of refined and fragrant rapeseed oils were 64 d and 80 d, respectively, and the oxidative stability of fragrant rapeseed oil was considerably better than that of refined rapeseed oil. The simultaneous distillation extraction combined with gas chromatography – mass spectrometry (SDE – GC – MS) was used to detect the volatile components in the two kinds of rapeseed oil, and the results revealed that 84 volatile components of 10 categories and 51 volatile components of 6 categories were detected in the initial fragrant rapeseed oil and refined rapeseed oil, respectively, with total amounts of 11 110.78 $\mu\text{g}/\text{kg}$ and 3 831.28 $\mu\text{g}/\text{kg}$. The most abundant component in fragrant rapeseed oil was glucosinolate degradation products, followed by alkene and phenols, accounting for 32.04%, 22.74% and 22.22% of the total, respectively. The most abundant component in refined rapeseed oil was phenols, followed by aldehydes and ketones, accounting for 30.32%, 23.18% and 16.39% of the total, respectively, while glucosinolate degradation products, heterocyclic, esters and alcohols were not detected. At the end of the 35 d experiment, the total amount of volatile components in fragrant rapeseed oil and refined rapeseed oil increased significantly to 51 729.62 $\mu\text{g}/\text{kg}$ and 45 671.79 $\mu\text{g}/\text{kg}$, respectively, and aldehydes became the highest volatile components in both rapeseed oils, accounting for 60.30% and 68.07% of the total, respectively. The glucosinolate degradation products in fragrant rapeseed oil decreased significantly to only 2.64% of the total, while the content of heterocyclic substances was significantly reduced and the contents of ketones, olefins and alkanes significantly increased. The content of ketones, alkanes and olefins in refined rapeseed oil increased, while the content of alcohols increased from the initial non – detect to 13.10% of the total. The volatile component principal component analysis revealed that the differences between the two original rapeseed oils were mostly caused by benzoylpropionitrile, 3 – methylcrotonitrile, 2 – pinene, 5 – hexenenitrile and 4 – ethenyl – 2,6 – dimethoxyphenol, which contributed to fragrant rapeseed oil's unique flavors. In the late stage of accelerated oxidation experiment, the differences between the two rapeseed oils were mainly caused by 1 – penten – 3 – ol, 1 – octen – 3 – ol, (*E*) – 2 – pentenal, (*E*) – 2 – heptenal, hexanal, nonanal, methylheptenone, (*E,E*) – 3,5 – octadien – 2 – one, leucocalyene and methylcyclohexene, and the first five substances were related to refined rapeseed oil, mostly linoleic acid oxidation products, while the latter five substances were mainly related to fragrant rapeseed oil. The results clarified the comprehensive quality differences of rapeseed oil products produced by different processes and could provide support for the development of precise quality and freshness preservation technology for different rapeseed oil products.

Key words: fragrant rapeseed oil; refined rapeseed oil; accelerated oxidation experiment; oxidative stability; volatile component; simultaneous distillation extraction combined with gas chromatography – mass spectrometry (SDE – GC – MS)

油菜籽制油工艺主要是预榨浸出和炒籽压榨两种,对应的菜籽油产品分别为精炼菜籽油和浓香菜籽油^[1],近年来浓香菜籽油所占比例呈持续增长趋势^[2]。不同制油工艺生产的菜籽油产品不仅风味有明显差异,其中微量成分含量和氧化稳定性也存在差异。袁桥娜等^[3]的研究认为,不同制油工艺对菜籽油中挥发性成分具有重要影响。仲琴^[4]通过对压榨菜籽油加速氧化过程中挥发性成分变化的研究,认为部分挥发性成分可作为监测菜籽油在储存过程氧化程度的标志物。虽然近年有关菜籽油氧化稳定性和挥发性成分的研究较

多,但是对于浓香菜籽油和精炼菜籽油这两个主要菜籽油产品的氧化稳定性差异、挥发性风味成分差异以及储存过程中综合品质变化差异的系统研究还未见报道。本研究以不同工艺生产的浓香菜籽油和精炼菜籽油为试验原料,利用加速氧化试验研究两种菜籽油在氧化稳定性和预测货架期方面的差异,利用同时蒸馏萃取结合气相色谱 – 质谱联用技术(SDE – GC – MS)对两种菜籽油在加速氧化过程中挥发性成分含量及其变化进行定量检测分析,对其感官风味变化的物质基础进行深入研究,并结合主成分分析对两种菜籽油在加

速氧化过程中挥发性成分的差异进行鉴别比较,以期为不同工艺生产的菜籽油品质保鲜和风味保鲜提供支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

浓香菜籽油、精炼菜籽油,取自菜籽油加工企业,未添加抗氧化剂。浓香菜籽油的原料为我国传统油菜籽,精炼菜籽油的原料为双低油菜籽。

α -、 β -、 γ -、 δ -生育酚标准品和 α -、 β -、 γ -、 δ -生育三烯酚标准品(纯度 $\geq 95.0\%$),购自北京三区生物技术有限公司;菜籽甾醇(纯度 $\geq 98\%$)、豆甾醇(纯度 $\geq 95\%$)、 β -谷甾醇(纯度 $\geq 95\%$)、 5α -胆甾烷醇(纯度 $\geq 95\%$)、菜油甾醇(纯度 $\geq 95.5\%$)、胆固醇(纯度 $\geq 99\%$),购自美国 Sigma-Aldrich 公司;4-壬醇(纯度 $\geq 95\%$),购自麦克林化学试剂有限公司;硅烷化衍生试剂(N,O-双三甲基硅基三氟乙酰胺+1%三甲基氯硅烷),购自麦克林化学试剂有限公司;二氯甲烷、三氯甲烷、乙醚、异丙醇、冰乙酸、无水硫酸钠均为分析纯;正己烷、异丙醇均为色谱纯,购自美国 VBS 公司。

1.1.2 仪器与设备

7890B/5975B 气相色谱-质谱联用仪、7890B 气相色谱仪,美国 Agilent 公司;同时蒸馏萃取装置,郑州兴华玻璃仪器厂;e2695-UV2475 高效液相色谱仪,美国 Waters 公司;MTN-2800 氮吹浓缩仪,天津奥特塞恩斯仪器公司。

1.2 试验方法

1.2.1 Schaal 加速氧化试验

将两种菜籽油分别装于 35 个 50 mL 的棕色小瓶中,敞口置于 $(63 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的烘箱储存。每天分别对两种油取样测定其酸值和过氧化值,在储存初始(0 d)、中期(18 d)和结束(35 d)时分别对两种菜籽油取样测定其挥发性成分、维生素 E、甾醇含量。

1.2.2 菜籽油质量指标测定

酸值测定参照 GB 5009.229—2016;过氧化值测定参照 GB 5009.227—2016;维生素 E 含量测定参照 GB/T 26635—2011 和温运启等^[5]的方法;甾醇含量测定参照 GB/T 25223—2010 和郑淑敏^[6]的方法。

1.2.3 菜籽油中挥发性成分的测定

采用同时蒸馏萃取(SDE)与气相色谱-质

谱(GC-MS)联用技术对菜籽油中主要挥发性成分进行萃取并检测,同时采用内标法进行定量^[7]。

同时蒸馏萃取条件:取 30 g 菜籽油、100 mL 蒸馏水、25 mL 饱和氯化钠溶液置于 250 mL 圆底烧瓶中,同时加入 200 μL 0.4 mg/mL 的 4-壬醇作为内标,置于 140°C 的油浴锅中,加入转子并连接至同时蒸馏萃取装置一侧的冷凝管,另一侧连接 50 mL 平底烧瓶(装有 30 mL 二氯甲烷),置于 50°C 的水浴锅中。待同时蒸馏萃取装置顶端有冷凝液流下时开始计时,萃取 3 h 后获得萃取液,向萃取液中加入无水硫酸钠后,放置 -20°C 冰箱中 8 h 以去除萃取液中水分,然后对萃取液进行氮吹,浓缩至 1 mL 后进小瓶,待 GC-MS 分析。

GC 条件:HP-5MS 色谱柱(30 m \times 0.25 mm, 0.25 μm);进样口温度 250°C ;载气为氦气(纯度 $\geq 99.99\%$);进样模式为恒流模式(不分流),流速 1.8 L/min;升温程序为 40°C (3.5 min), $4^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 230°C (8 min), $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 280°C (5 min)。

MS 条件:离子源温度 230°C ;传输线温度 240°C ;EI 离子源,能量为 70 eV;扫描范围(m/z) 30~500。

定性定量分析:利用 Agilent MSD 化学工作站和 NIST17 质谱库进行匹配,去除柱流失的硅烷化杂质后报道正反匹配度大于 80 的化合物。采用内标法对挥发性风味成分进行定量。

1.2.4 数据分析

数据统计分析采用 Excel 365,利用 Graphpad Prism 8 进行绘图,利用 Unscramble 对挥发性成分进行主成分分析及作图。

2 结果与分析

2.1 两种菜籽油在加速氧化储存期间酸值和过氧化值的变化

浓香菜籽油和精炼菜籽油在加速氧化储存期间酸值和过氧化值变化分别见图 1 和图 2。

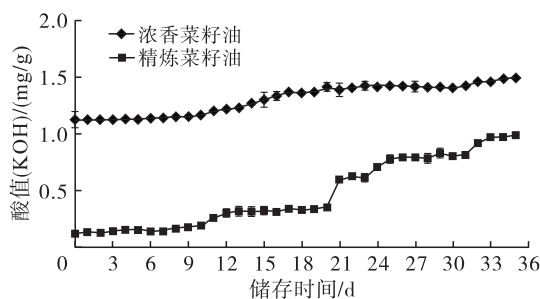


图 1 两种菜籽油在加速氧化储存期间酸值的变化

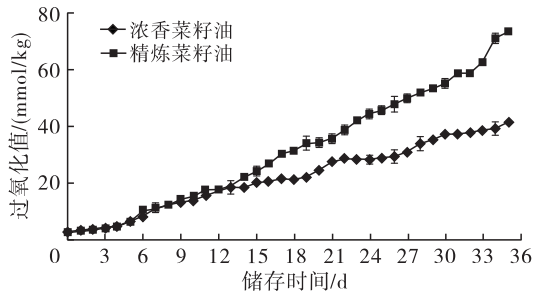


图2 两种菜籽油在加速氧化储存期间过氧化值的变化

从图1可以看出,浓香菜籽油的初始酸值明显高于精炼菜籽油,这是因为浓香菜籽油一般不进行碱炼脱酸或蒸馏脱酸处理。在加速氧化试验结束时,浓香菜籽油和精炼菜籽油的酸值(KOH)分别从初始的1.12 mg/g和0.12 mg/g升至1.49 mg/g和0.99 mg/g,升幅分别为0.37 mg/g和0.87 mg/g,浓香菜籽油的酸值升幅明显小于精炼菜籽油。此外,精炼菜籽油的酸值在前18 d升幅较为平缓,18 d之后出现大幅增长,而浓香菜籽油的酸值在整个试验期间平稳增长。

从图2可以看出,在加速氧化试验的前13 d两种菜籽油的过氧化值变化趋势接近,之后精炼菜籽

油的过氧化值升幅明显超过浓香菜籽油。对照GB 1536—2004《菜籽油》一级菜籽油过氧化值的限量指标(≤ 5 mmol/kg),精炼菜籽油、浓香菜籽油分别在加速氧化试验的第4天、第5天超过国标限量,对应室温条件下的预测货架期分别为64 d和80 d[根据Schaal烘箱法加速氧化试验原理,在 (63 ± 1) °C烘箱中储存1 d,相当于25 °C室温条件储存16 d],说明浓香菜籽油的氧化稳定性明显优于精炼菜籽油。张亮^[8]对不同工艺生产的菜籽油氧化稳定性的研究结果与本文较一致,此外也有研究表明制油前对油菜籽进行烘烤(类似于浓香菜籽油生产工艺)对于提升菜籽油的稳定性具有一定作用^[9]。

2.2 两种菜籽油在加速氧化储存期间挥发性成分的变化

菜籽油的风味会因油菜籽原料不同和制油工艺不同呈现差异,而菜籽油中的挥发性成分是构成其感官风味的重要物质基础。对加速氧化储存期间两种菜籽油中挥发性成分含量的检测结果见表1。

表1 两种菜籽油在加速氧化储存期间挥发性成分含量变化

CAS号	化合物名称	精炼菜籽油中的含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)			浓香菜籽油中的含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)		
		0 d	18 d	35 d	0 d	18 d	35 d
100-41-4	乙基苯	62.51	47.63	74.39	14.12	71.94	100.54
95-47-6	1,2-二甲苯	-	-	-	18.62	169.02	-
27831-13-6	4-乙烯基-1,2-二甲苯	-	5.72	-	5.76	4.08	-
104-51-8	丁苯	-	-	-	6.69	12.92	-
1124-20-5	1-异丙烯基-3-甲基苯	-	-	-	77.19	80.10	134.76
95-93-2	1,2,4,5-四甲苯	-	-	-	14.18	15.57	-
4536-86-1	(1-丙基辛基)-苯	-	-	-	-	11.98	-
108-88-3	甲苯	185.12	182.32	153.46	5.40	23.51	62.19
108-38-3	间二甲苯	76.30	88.83	39.52	6.88	55.20	-
527-84-4	邻异丙基甲苯	-	-	-	50.76	549.07	524.72
71-43-2	苯	-	-	-	97.95	15.25	-
535-77-3	间异丙基甲苯	-	-	-	10.74	13.84	-
106-42-3	对二甲苯	-	20.80	38.05	-	-	307.68
2349-70-4	1,4-二羟基-2-乙基苯	15.45	-	78.37	-	-	-
103-65-1	丙基苯	-	-	63.15	-	-	-
	苯类小计	339.38	345.30	446.94	308.29	1 022.48	1 129.89
616-25-1	1-戊烯-3-醇	-	183.41	2 899.61	9.31	592.76	1 019.43
922-65-6	1,4-戊二烯-3-醇	-	-	-	37.59	38.48	-
91337-07-4	2-异丙基-5-甲基-1-庚烷醇	-	25.74	42.08	-	20.54	-
1000190-98-1	1,7,7-三甲基双环[2.2.1]庚-5-烯-2-醇	-	-	-	-	44.87	-
3391-86-4	1-辛烯-3-醇	-	67.72	1 835.11	-	144.54	549.39
19780-96-2	2,8-二甲基-5-壬醇	-	-	763.98	-	-	-

续表 1

CAS 号	化合物名称	精炼菜籽油中的含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)			浓香菜籽油中的含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)		
		0 d	18 d	35 d	0 d	18 d	35 d
18409-18-2	2-癸烯-1-醇	-	-	122.70	-	-	-
96-41-3	环戊醇	-	-	320.49	-	-	-
	醇类小计	-	276.87	5 983.97	46.90	841.19	1 568.82
123-07-9	4-乙基苯酚	-	12.42	88.12	-	-	63.00
2785-89-9	4-乙基愈创木酚	-	-	-	169.36	-	-
96-76-4	2,4-二叔丁基苯酚	-	199.07	159.86	39.65	25.34	-
28343-22-8	4-乙烯基-2,6-二甲氧基-苯酚	45.27	-	-	2 218.33	1 556.76	1 022.87
128-37-0	2,6-二叔丁基对甲酚	139.16	112.90	93.47	41.61	44.12	-
119-47-1	2,2'-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚)	977.09	739.35	542.16	-	-	-
	酚类小计	1 161.52	1 063.74	883.61	2 468.95	1 626.22	1 085.87
3208-16-0	2-乙基呋喃	-	-	-	230.23	212.46	64.05
32318-87-9	2-乙酰基-2-甲基四氢呋喃	-	-	-	-	27.93	-
3777-69-3	2-正戊基呋喃	-	-	-	192.46	159.02	181.01
	杂环类小计	-	-	-	422.69	399.41	245.06
4786-24-7	3-甲基-2-丁腈	-	-	-	867.38	765.34	426.66
5048-19-1	5-己烯腈	-	-	-	1 279.08	1 087.87	681.10
629-08-3	正庚腈	-	-	-	69.10	54.37	-
3386-97-8	3-丁烯基异硫氰酸酯	-	-	-	82.60	93.60	104.59
645-59-0	苯代丙腈	-	-	-	946.21	565.92	153.07
19424-34-1	5-甲基-己腈	-	-	-	314.98	358.82	-
	硫苷降解产物小计	-	-	-	3 559.35	2 925.92	1 365.42
1576-87-0	(E)-2-戊烯醛	-	159.14	1 508.36	13.66	325.37	764.32
66-25-1	正己醛	24.99	165.88	2 958.74	33.15	854.21	2 495.98
111-71-7	庚醛	53.92	49.12	288.87	30.24	76.87	210.80
18829-55-5	(E)-2-庚烯醛	400.78	358.42	1 807.81	40.11	604.64	1 354.50
5910-85-0	(E,E)-2,4-庚二烯醛	78.03	1 536.83	12 303.77	264.37	3 407.48	8 853.87
124-13-0	正辛醛	8.02	34.83	208.97	53.83	114.22	181.38
124-19-6	壬醛	34.41	294.60	1 785.15	39.80	567.67	2 367.12
4501-58-0	龙脑烯醛	-	-	-	66.15	-	-
18829-56-6	(E)-2-壬烯醛	25.04	-	152.92	8.22	391.52	725.57
34246-54-3	3-乙基苯甲醛	19.43	10.17	42.86	8.04	22.64	-
57129-54-1	5-异丙基-双环[3.1.0]六角-2-烯-2-乙醛	-	-	-	7.24	4.31	-
5910-87-2	(E,E)-2,4-壬二烯醛	29.37	16.70	536.98	84.87	155.29	450.35
3913-81-3	(E)-2-癸烯醛	32.99	114.66	687.61	24.38	344.14	721.49
25152-84-5	(E,E)-2,4-癸二烯醛	148.58	1 689.78	6 904.37	151.14	3 254.28	12 834.01
2463-77-6	2-十一烯醛	15.65	23.25	443.15	46.20	98.38	233.16
13019-16-4	2-丁基-2-辛烯醛	-	-	-	10.85	13.42	-
112-31-2	癸醛	-	-	26.69	10.92	15.72	-
4748-78-1	4-乙基苯甲醛	-	41.49	74.47	-	-	-
2548-87-0	(E)-2-辛烯醛	16.82	10.04	680.49	-	-	-
30361-28-5	(E,E)-2,4-辛二烯醛	-	-	82.96	-	-	-
22927-13-5	2-乙基苯甲醛	-	-	30.16	-	-	-
36431-60-4	5-乙基环戊烯-1-乙醛	-	-	103.49	-	-	-

续表 1

CAS 号	化合物名称	精炼菜籽油中的含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)			浓香菜籽油中的含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)		
		0 d	18 d	35 d	0 d	18 d	35 d
110-62-3	戊醛	-	-	460.62	-	-	-
	醛类小计	888.03	4 504.91	31 088.44	893.17	10 250.16	31 192.55
600-14-6	2,3-戊二酮	-	112.10	-	23.93	65.40	41.87
123-42-2	4-羟基-4-甲基-2-戊酮	-	-	-	-	-	30.41
110-43-0	2-庚酮	-	-	135.93	45.29	57.36	134.29
110-93-0	甲基庚烯酮	-	-	-	42.27	524.41	1 160.65
111-13-7	仲辛酮	209.77	165.10	142.27	75.25	-	-
1669-44-9	3-辛烯-2-酮	-	106.28	217.90	33.67	65.37	185.47
30086-02-3	(<i>E,E</i>)-3,5-辛二烯-2-酮	281.46	73.59	698.19	46.79	1 069.27	2 364.52
38284-27-4	(<i>E,E</i>)-辛-3,5-二烯-2-酮	136.60	286.27	760.71	96.76	364.42	936.93
693-54-9	甲基辛基甲酮	-	-	-	12.65	139.68	284.61
1000342-30-8	二环己二酮	-	-	404.60	-	85.15	-
1629-58-9	1-戊烯-3-酮	-	-	-	4.31	30.67	-
67-64-1	丙酮	-	-	122.13	-	53.33	317.79
78-94-4	丁烯酮	-	-	-	-	3.38	105.93
107-87-9	2-戊酮	-	-	303.69	-	-	-
763-93-9	3-己烯-2-酮	-	-	50.23	-	-	-
10218-02-7	降冰片酮	-	-	32.26	-	-	-
	酮类小计	627.83	743.34	2 867.91	380.92	2 458.44	5 562.47
111-65-9	正辛烷	23.94	83.63	518.63	11.44	298.71	698.50
2213-23-2	2,4-二甲基庚烷	-	158.97	202.87	-	46.89	248.88
2216-34-4	4-甲基辛烷	-	103.18	181.98	-	73.63	252.21
17312-75-3	5-甲基-5-丙基壬烷	-	5.51	20.02	-	14.25	43.97
112-40-3	正十二烷	63.60	126.32	286.37	37.28	93.13	361.41
62185-53-9	5-(2-甲基丙基)壬烷	-	30.29	-	-	17.98	-
13150-81-7	2,6-二甲基癸烷	-	198.38	380.31	-	33.88	-
17301-32-5	4,7-二甲基十一烷	-	-	-	-	41.36	313.36
61141-72-8	4,6-二甲基十二烷	-	72.83	126.70	3.75	82.62	167.49
2980-69-0	4-甲基十一烷	-	79.12	113.55	-	54.02	134.91
629-50-5	正十三烷	167.21	199.25	-	102.98	105.14	-
31295-56-4	2,6,11-三甲基十二烷	12.98	-	-	-	-	160.99
629-62-9	十五烷	16.66	221.40	481.96	17.16	95.62	306.23
629-92-5	十九烷	-	-	-	-	14.26	-
17301-33-6	4,8-二甲基十一烷	-	-	-	2.53	-	-
17301-30-3	3,8-二甲基十一烷	10.80	16.94	-	2.24	64.00	-
17301-25-6	2,8-二甲基十一烷	-	-	-	3.91	7.13	-
629-59-4	正十四烷	35.59	61.39	53.34	30.23	49.92	57.52
3891-99-4	2,6,10-三甲基十三烷	-	-	-	3.79	6.37	-
1000432-25-9	3-乙基-2,6,10-三甲基十一烷	-	-	-	-	5.57	-
544-76-3	正十六烷	25.44	48.30	-	14.90	65.10	101.79
504-44-9	2,6,11,15-四甲基十六烷	-	95.69	121.92	-	15.95	32.26
4537-15-9	5-苯基十一烷	-	-	-	2.27	16.79	-
629-78-7	十七烷	25.52	27.80	-	12.80	24.53	-

续表 1

CAS 号	化合物名称	精炼菜籽油中的含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)			浓香菜籽油中的含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)		
		0 d	18 d	35 d	0 d	18 d	35 d
2719-62-2	6-苯基十二烷	-	-	-	1.60	14.67	-
2719-63-3	十二烷-5-基苯	-	-	-	-	14.47	-
142-82-5	庚烷	-	-	-	-	-	286.30
74645-98-0	2,7,10-三甲基十二烷	-	-	-	-	12.22	227.59
62016-18-6	5-乙基-2-甲基-辛烷	-	-	-	-	42.89	298.06
1000211-14-3	8-亚甲基-3-噁三环 [5.2.0.0(2,4)]壬烷	-	-	283.21	66.09	252.27	-
3891-98-3	2,6,10-三甲基十二烷	-	-	-	-	55.64	-
593-45-3	十八烷	7.51	435.93	131.13	5.15	38.19	-
62016-19-7	6-乙基-2-甲基-辛烷	-	-	-	-	7.64	74.80
5661-80-3	双环[5.3.0]癸烷	-	-	-	-	-	50.75
295-48-7	环十五烷	27.48	26.87	15.86	-	-	-
1560-92-5	2-甲基十六烷	5.50	20.21	-	-	-	-
6785-23-5	十一戊烷	19.63	23.47	-	-	-	-
54105-66-7	正十一烷基环己烷	28.41	26.02	-	-	-	-
1000360-41-0	5,5-二乙基十五烷	15.53	4.08	-	-	-	-
1000360-41-7	5,5-二乙基庚烷	17.56	15.49	-	-	-	-
2882-98-6	1-环戊基壬烷	3.74	4.43	-	-	-	-
594-82-1	2,2,3,3-四甲基丁烷	-	37.14	89.89	-	-	-
52670-34-5	2,3,6,7-四甲基-辛烷	-	25.27	13.46	-	-	-
107079-37-8	螺环[环丙烷-1,6'-[3]噁 三环[3.2.1.0(2,4)]辛烷]	-	35.92	-	-	-	-
17302-01-1	3-乙基-3-甲基庚烷	-	-	151.24	-	-	-
16747-50-5	1-乙基-1-甲基环戊烷	-	-	112.80	-	-	-
17312-53-7	3,6-二甲基癸烷	-	-	57.91	-	-	-
	烷烃类小计	507.10	2 183.83	3 343.15	318.12	1 664.84	3 817.02
14850-23-8	(E)-4-辛烯	42.33	34.26	-	41.28	156.78	-
19549-87-2	2,4-二甲基-1-庚烯	2.48	-	-	-	-	35.19
40085-08-3	5-乙基-环己烷-1,3-二烯	13.94	38.03	-	-	57.50	-
80-56-8	2-蒎烯	-	-	-	1 044.46	923.68	724.01
591-47-9	甲基环己烯	-	-	-	777.81	660.99	2 069.50
3387-41-5	桉烯	-	106.35	-	27.29	8.91	-
18172-67-3	(-)- β -蒎烯	-	-	-	14.42	-	10.19
5989-27-5	d-柠檬烯	47.23	31.02	37.54	225.19	174.67	209.60
515-13-9	β -榄香烯	-	-	-	12.08	14.11	18.45
6831-16-9	马兜铃烯	-	-	-	23.77	26.40	23.22
17334-55-3	白菖烯	-	-	-	148.27	1 002.93	1 704.18
5876-87-9	1,11-十二碳二烯	-	-	-	-	32.14	-
495-61-4	β -双沙伯烯	-	-	-	35.44	48.82	37.55
1898-13-1	西松烯	-	-	-	164.91	42.87	-
586-67-4	4-甲基-1-丙基-1-烯- 2-基环己烯	-	24.99	228.75	-	28.42	-
28634-89-1	4-甲基-1-(1-甲基乙 基)-双环[3.1.0]六角-2- 烯	-	-	-	3.34	23.80	-
99-83-2	2-甲基-5-(1-甲基乙 基)-1,3-环己二烯	1.75	12.00	-	8.66	-	-

续表 1

CAS 号	化合物名称	精炼菜籽油中的含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)			浓香菜籽油中的含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)		
		0 d	18 d	35 d	0 d	18 d	35 d
111-66-0	1-辛烯	-	-	-	-	-	26.63
19841-74-8	1-乙基-1,4-环己二烯	-	-	192.56	-	-	182.20
14919-01-8	(E)-2-辛烯	73.41	19.39	-	-	-	-
14850-22-7	(Z)-3-辛烯	48.81	25.88	-	-	-	-
555-10-2	3-亚甲基-6-(1-甲基乙基)环己烯	6.47	3.57	-	-	-	-
20634-43-9	5-甲基-4-烯	26.33	6.69	-	-	-	-
504-96-1	2-(4,8,12-三甲基十三烷基)丁二烯-1,3-二烯	29.35	42.23	41.55	-	-	-
18435-45-5	1-十九烯	15.32	19.49	-	-	-	-
1000141-67-3	(Z)-3-十七烯	-	33.50	338.47	-	-	-
673-84-7	2,6-二甲基-2,4,6-辛三烯	-	7.37	-	-	-	-
4889-83-2	3,6,6-三甲基-双环(3.1.1)庚-2-烯	-	28.82	-	-	-	-
13466-78-9	3-萘烯	-	28.26	-	-	-	-
81265-03-4	6,9-十七碳二烯	-	18.56	62.47	-	-	-
99-86-5	α -萘品烯	-	13.27	-	-	-	-
99-85-4	萘品烯	-	37.37	-	-	-	-
2539-75-5	1-丙基环己烯	-	-	84.38	-	-	-
30168-57-1	5-丁基-1,3-环己二烯	-	-	24.19	-	-	-
	烯烴类小计	307.42	531.05	1 009.91	2 526.92	3 202.02	5 040.72
141-32-2	丙烯酸丁酯	-	-	-	-	6.28	-
136-36-7	间苯二酚单苯甲酸酯	-	-	-	9.06	18.37	23.99
5655-61-8	左旋乙酸冰片酯	-	-	-	159.22	158.92	202.07
544-35-4	(Z,Z)-9,12-十八烷二烯酸乙酯	-	-	-	-	15.37	-
6114-18-7	反油酸乙酯	-	-	-	9.02	38.05	-
2177-18-6	2-丙烯酸乙酯	-	-	-	-	101.12	483.23
105-38-4	丙酸乙酯	-	-	-	8.17	2.67	12.51
822-23-1	乙酸十八酯	-	25.85	47.86	-	-	-
	酯类小计	-	25.85	47.86	185.47	340.78	721.80

注:含量为平均值(每个样品最少测3次),为节省文章篇幅,省略了标准偏差;-表示未检出

从表1可以看出,在初始的浓香菜籽油中共检出10类84种挥发性成分,总量为11 110.78 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。其中苯类11种、醇类2种、酚类4种、杂环类2种、硫苷降解产物6种、醛类17种、酮类9种、烷烴类16种、烯烴类13种、酯类4种。硫苷降解产物含量(3 559.35 $\mu\text{g}/\text{kg}$)最高,占挥发性成分总量的32.04%,其次是烯烴类(2 526.92 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、酚类(2 468.95 $\mu\text{g}/\text{kg}$)物质,含量分别占挥发性成分总量的22.74%、22.22%。硫苷降解产物是油菜籽中的硫代葡萄糖苷在芥子酶和加热条件下降解产生的独特的挥发性成分^[10],为菜籽油典型辛辣香味作出重要贡献^[11]。烯烴类物质为菜籽油的树脂味或木

香味作出贡献^[12]。酚类物质中含量最高的4-乙炔基-2,6-二甲氧基-苯酚(2 218.33 $\mu\text{g}/\text{kg}$)被认为是油菜籽中的芥子酸在热加工过程发生脱羧反应所形成的一种具有抗氧化作用的成分^[13]。此外,杂环类物质(422.69 $\mu\text{g}/\text{kg}$)能对菜籽油的炒香味和烘烤味作出贡献^[11]。

加速氧化试验结束时,浓香菜籽油中共检出10类70种挥发性成分,总量为51 729.62 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。其中:醛类物质成为含量最高的挥发性成分(31 192.55 $\mu\text{g}/\text{kg}$),占挥发性成分总量的60.30%;其次是酮类(5 562.47 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、烯烴类(5 040.72 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、烷烴类(3 817.02 $\mu\text{g}/\text{kg}$)物质,含量分别占挥发性成分

总量的10.75%、9.74%、7.38%；而硫苷降解产物、酚类物质含量分别降至1 365.42、1 085.87 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，仅分别占挥发性成分总量的2.64%和2.10%；杂环类物质含量降至245.06 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，仅占挥发性成分总量的0.47%。挥发性物质组分含量的大幅改变也使得对样品的嗅闻感觉较初始浓香菜籽油风味发生了明显变化。

在初始的精炼菜籽油中共检出6类51种挥发性成分，总量为3 831.28 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。其中苯类4种、酚类3种、醛类13种、酮类3种、烷烃类17种、烯炔类11种。在浓香菜籽油中所含的硫苷降解产物、杂环类、醇类、酯类成分在精炼菜籽油中均未检出。精炼菜籽油中含量最高的酚类物质(1 161.52 $\mu\text{g}/\text{kg}$)占总挥发性成分总量的30.32%，含量其次的醛类(888.03 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、酮类(627.83 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、烷烃类(507.10 $\mu\text{g}/\text{kg}$)分别占挥发性成分总量的23.18%、16.39%和13.24%。与浓香菜籽油相比，精炼菜籽油中挥发性成分的种类和总量均明显减少。这是因为精炼菜籽油在经水化脱胶、碱炼脱酸、吸附脱色和水蒸气蒸馏脱臭的过程中挥发性成分大量损失的原因，尤其是硫苷降解产物中的大多数组分均为挥发性很好的风味成分，这些组分在菜籽油精炼过程中几乎完全被蒸馏除去，致使精炼菜籽油中已经无法检出，这导致精炼菜籽油完全没有了浓香菜籽油典型的辛香风味。

在加速氧化试验结束时，精炼菜籽油中共检出8类74种挥发性成分，总量升高到45 671.79 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。其中：含量最高的挥发性成分由酚类物质转变为醛类物质，酚类物质含量降至883.61 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，仅占挥发性成分总量的1.93%；醛类物质含量升高至31 088.44 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，占挥发性成分总量的68.07%；酮类、烷烃类物质含量虽分别升高至2 867.91、3 343.15 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，但在挥发性成分总量中的占比却分别下降至6.28%、7.32%；烯炔类物质含量由初始的307.42 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 升高至1 009.91 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，占挥发性成分总量的2.21%；醇类物质从初始的未检出升至5 983.97 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，占挥发性成分总量的13.10%。

对两种菜籽油中挥发性成分进行对比分析可见，在试验初期，在浓香菜籽油中检出的两类重要的挥发性风味成分即硫苷降解产物和杂环类物质在精炼菜籽油中均未检出，这是造成两种菜籽油典型风味不同的重要物质基础。随着加速氧化时间的延长，两种菜籽油中挥发性成分的变化出现了相似的

趋势，即小分子醛、酮、醇类物质如正己醛、(E)-2-庚烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、壬醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮、1-戊烯-3-醇、1-辛烯-3-醇等含量呈现逐渐升高的趋势，这多与油脂的氧化分解有关^[14-16]。此外，浓香菜籽油中杂环类物质和硫苷降解产物含量随加速氧化时间延长持续减少，也为浓香菜籽油典型风味逐渐丧失提供了物质基础的依据。

2.3 两种菜籽油在加速氧化储存期间挥发性成分的主成分分析(PCA)

对浓香菜籽油和精炼菜籽油进行主成分分析，结果如图3所示。

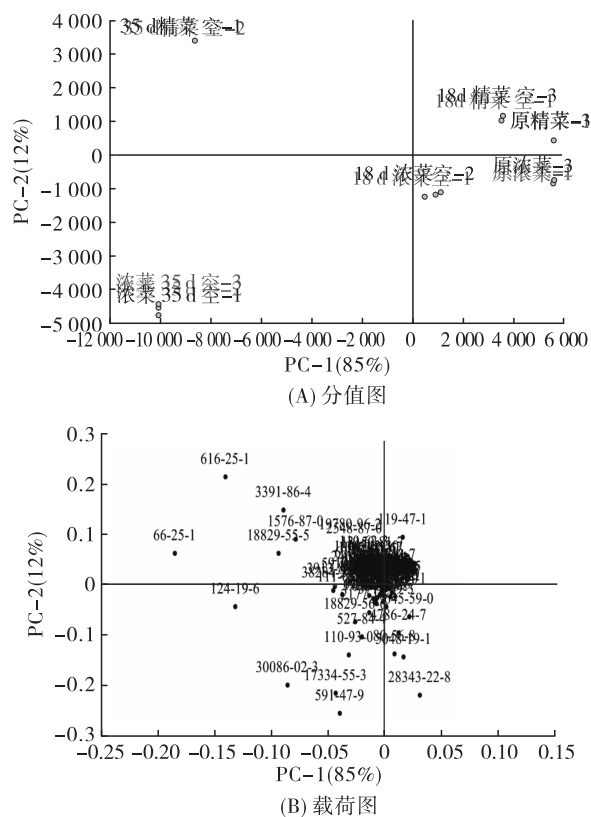


图3 两种菜籽油主成分分析图

从图3可以看出，第一主成分和第二主成分之和为97%，这表明仅在前两个主成分上就可以概括整个数据集97%的样本信息。由图3A可以看出，精炼菜籽油与浓香菜籽油分别分布在坐标轴的上下两侧，且随着试验时间的延长呈现出逐渐远离的趋势。这表明仅从挥发性成分上来看，两种菜籽油随着氧化程度不断加深，差异也逐渐增大。载荷图可具体表现出是哪些挥发性成分可能导致不同样本之间的差异。从图3B可以看出，造成两种初始菜籽油差异的主要挥发性成分为苯代丙腈(645-59-0)、3-甲基-2-丁腈(4786-24-7)、2-蒎烯(80-56-8)、5-己烯腈(5048-19-1)、4-乙烯

基-2,6-二甲氧基-苯酚(28343-22-8),其中苯代丙腈、3-甲基-2-丁腈、5-己烯腈为硫苷降解产物,对菜籽油的辛辣味具有重要贡献^[17-18]。2-萜烯作为萜烯类物质则往往呈现出松香味或树脂味,4-乙炔基-2,6-二甲氧基-苯酚作为菜籽油中常见的酚类物质之一,则往往被报道为刺激性气味^[19-20]。除4-乙炔基-2,6-二甲氧基-苯酚外其余物质在精炼菜籽油中均未检出,且4-乙炔基-2,6-二甲氧基-苯酚在精炼菜籽油中含量远低于浓香菜籽油,可以作为初始精炼菜籽油与浓香菜籽油差异的关键挥发性成分。

在试验的中后期,造成两种菜籽油差异的挥发性成分有10种,分别为1-戊烯-3-醇(616-25-1)、1-辛烯-3-醇(3391-86-4)、(E)-2-戊烯醛(1576-87-0)、(E)-2-庚烯醛(18829-55-5)、正己醛(66-25-1)、壬醛(124-19-6)、甲基庚烯酮(110-93-0)、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮(30086-02-3)、白菖烯(17334-55-3)、甲基环己烯(591-47-9),其中1-戊烯-3-醇、1-辛烯-3-醇、(E)-2-戊烯醛、(E)-2-庚烯醛、正己醛5种物质与精炼菜籽油相关性更高,在加速氧化后期精炼菜籽油中的这些物质含量均高于浓香菜籽油中的,这些物质被认为是亚油酸氧化分解产物^[21-22]。而壬醛、甲基庚烯酮、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮、白菖烯、甲基环己烯5种物质则与浓香菜籽油呈现一定的相关性,有研究报道壬醛和甲基庚烯酮与甾醇总量具有正相关性,而浓香菜籽油中甾醇含量高于精炼菜籽油,这或许是造成这2种物质与浓香菜籽油呈正相关性的原因之一^[23]。对于(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮、白菖烯及甲基环己烯3种物质,文献中仅报道过(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮的味道为青草味,另外两种物质则未见对其气味的相关研究报道,这5种物质与浓香菜籽油呈正相关的原因可能是由于浓香菜籽油在储存过程中更加稳定所造成的^[24]。这10种物质可以作为在加速氧化的中后期区分两种菜籽油的关键挥发性成分。

2.4 两种菜籽油在加速氧化储存期间维生素E和甾醇含量变化

两种菜籽油在加速氧化储存期间维生素E及甾醇含量变化如表2所示。在两种菜籽油中均检出 α -、 γ -、 δ -生育酚,其中含量最高的为 γ -生育酚,其次为 α -生育酚,这与温运启等^[5]的研究结果一致。由表2可知,初始浓香菜籽油中维生素E含量稍高于精炼菜籽油,但两种菜籽油中维生素E含

量均呈现出随储存时间延长而逐渐减少的趋势。在两种菜籽油过氧化值刚超标时检测其中维生素E含量,发现此时维生素E的损失率均为9.9%。从表2还可以看出,浓香菜籽油中甾醇含量高于精炼菜籽油,这说明菜籽油精炼过程中会造成甾醇较多的损失。试验结束时,浓香菜籽油和精炼菜籽油中的甾醇损失率分别为8.81%和21.01%,精炼菜籽油的损失率明显高于浓香菜籽油。

表2 两种菜籽油在加速氧化储存期间维生素E及甾醇含量变化

组别	储存时间/d	维生素E含量/(mg/kg)	甾醇含量/(mg/100g)
浓香菜籽油	0	617.37 ± 2.86	636.01 ± 1.66
	18	367.01 ± 5.99	598.50 ± 0.71
	35	281.98 ± 7.33	579.95 ± 2.14
精炼菜籽油	0	585.45 ± 39.22	575.43 ± 0.95
	18	349.60 ± 39.52	503.96 ± 1.49
	35	255.05 ± 16.37	454.56 ± 1.51

3 结论

通过对浓香菜籽油和精炼菜籽油在加速氧化试验期间多项指标的检测分析研究,明确了两种菜籽油在氧化稳定性和挥发性风味成分方面的差异:①浓香菜籽油的氧化稳定性明显优于精炼菜籽油。②初始浓香菜籽油中挥发性成分的种类和总量都明显优于精炼菜籽油,浓香菜籽油中的硫苷降解产物是其具有独特辛香味及烘烤香味和脂香味的重要成分。在加速氧化试验结束时,醛类物质成为两种菜籽油中含量最高的挥发性成分,分别占总量的60.30%和68.07%。挥发性成分及含量的大幅改变致使菜籽油风味发生了明显劣变。③对挥发性成分结果进行主成分分析发现,造成两种初始菜籽油差异的成分主要为苯代丙腈、3-甲基-2-丁腈、2-萜烯、5-己烯腈、4-乙炔基-2,6-二甲氧基-苯酚,这5种成分为浓香菜籽油提供典型风味;在加速氧化试验后期,造成两种菜籽油差异的成分主要为1-戊烯-3-醇、1-辛烯-3-醇、(E)-2-戊烯醛、(E)-2-庚烯醛、正己醛、壬醛、甲基庚烯酮、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮、白菖烯、甲基环己烯10种成分,其中前5种与精炼菜籽油具有正相关关系,后5种则主要与浓香菜籽油呈正相关关系。

研究结果明确了不同工艺生产的菜籽油产品的综合品质差异,可为不同菜籽油产品精准的保质保鲜技术发展提供支持。

参考文献:

- [1] CHEN T, LIU C Y, CHEN B, et al. Study on discrimination of different grades of rapeseed oil based on flavor fingerprint [J]. *Acta Chromatogr*, 2021, 33 (3): 295 – 301.
- [2] 王瑞元. 中国菜籽油的生产和消费情况[J]. *中国油脂*, 2019, 44(11): 1 – 2.
- [3] 袁桥娜, 涂梦婕, 董志文, 等. 不同制备工艺菜籽油的风味成分比较研究[J]. *中国油脂*, 2020, 45(8): 32 – 38.
- [4] 仲琴. 菜籽油精炼和储藏过程中品质及香气成分变化研究[D]. 四川 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- [5] 温运启, 刘玉兰, 王璐阳, 等. 不同食用植物油中维生素E组分及含量研究[J]. *中国油脂*, 2017, 42 (3): 35 – 39.
- [6] 郑淑敏. 玉米油精炼过程中游离甾醇和甾醇酯含量变化研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016.
- [7] 刘玉兰, 舒垚, 孙国昊, 等. 花生品种对花生酱风味及综合品质的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(9): 15 – 21.
- [8] 张亮. 不同加工工艺的菜籽油品质及其生物学评价[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2016.
- [9] YU J, WANG M Z, ZHANG M, et al. Effect of infrared ray roasting on oxidation stability and flavor of virgin rapeseed oils [J]. *J Food Sci*, 2021, 86(7): 2990 – 3000.
- [10] ZHANG Y F, WU Y Q, CHEN S R, et al. Flavor of rapeseed oil: an overview of odorants, analytical techniques, and impact of treatment [J]. *Compr Rev Food Sci Food*, 2021, 20(4): 3983 – 4018.
- [11] 刘春梅, 刘玉兰, 马宇翔, 等. 油菜籽炒籽温度对其油脂风味及综合品质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35 (3): 67 – 74.
- [12] JIA X, ZHOU Q, WANG J Q, et al. Identification of key aroma – active compounds in sesame oil from microwaved seeds using E – nose and HS – SPME – GC × GC – TOF/MS [J/OL]. *J Food Biochem*, 2019, 43 (10): e12786 [2021 – 12 – 20]. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12786>.
- [13] NANDASIRI R, ESKIN N M, ECK P, et al. Application of green technology on extraction of phenolic compounds in oilseeds (Canola) [J]. *Cold Pressed Oils*, 2020(1): 81 – 96.
- [14] 杨涓, 刘昌盛, 周琦, 等. 加工工艺对菜籽油主要挥发性风味成分的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2010, 32 (4): 551 – 557.
- [15] 赵泽伟, 丁筑红, 顾苑婷, 等. 基于 SPME – GC – MS 和电子鼻分析薏苡仁油加速氧化过程挥发性成分变化 [J]. *食品科学*, 2019, 40(16): 220 – 226.
- [16] 徐星. 植物油氧化过程中脂肪酸和挥发性成分变化的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2013.
- [17] GACA A, KLUDSKÁ E, HRADECKÝ J, et al. Changes in volatile compound profiles in cold – pressed oils obtained from various seeds during accelerated storage [J/OL]. *Molecules*, 2021, 26(2): 285 [2021 – 12 – 20]. <https://doi.org/10.3390/molecules26020285>.
- [18] WEI S H, XIAO X M, WEI L J, et al. Development and comprehensive HS – SPME/GC – MS analysis optimization, comparison, and evaluation of different cabbage cultivars (*Brassica oleracea* L. var *capitata* L.) volatile components [J/OL]. *Food Chem*, 2021, 340: 128166 [2021 – 12 – 20]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128166>.
- [19] POLLNER G, SCHIEBERLE P. Characterization of the key odorants in commercial cold – pressed oils from unpeeled and peeled rapeseeds by the sensomics approach [J]. *J Agric Food Chem*, 2016, 64(3): 627 – 636.
- [20] KANEKO S, SAKAI R, KUMAZAWA K, et al. Key aroma compounds in roasted in – shell peanuts [J/OL]. *Biosci Biotech Bioch*, 2013, 77(7): 130112 [2021 – 12 – 20]. <https://doi.org/10.1271/bbb.130112>.
- [21] 王建辉, 王秀, 陈奇, 等. 氧化分解过程中亚油酸组成成分及挥发性物质的变化[J]. *食品与机械*, 2016 (5): 5 – 10.
- [22] 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.
- [23] DOROTA D, RRPERT M, WOLOSIAK R, et al. Volatiles as markers of bioactive components found in Croatian extra virgin olive oils [J/OL]. *LWT – Food Sci Technol*, 2021, 139: 110532 [2021 – 12 – 20]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110532>.
- [24] PANG X L, YU W S, CAO C D, et al. Comparison of potent odorants in raw and ripened pu – erh tea infusions based on odor activity value calculation and multivariate analysis: understanding the role of pile fermentation [J]. *J Agric Food Chem*, 2019, 67(47): 13139 – 13149.