

小磨芝麻香油在加速储藏过程中气味活性成分、感官品质及氧化稳定性的变化

张恒博¹, 杨晨佳¹, 石成龙¹, 苗红梅², 尹文婷¹, 马雪婷¹, 胡贝贝¹, 汪学德¹

(1. 河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 河南省农业科学院 芝麻研究中心, 郑州 450002)

摘要: 旨在为精准制定小磨芝麻香油的香气储藏策略提供理论基础, 探究其在储藏过程中香气品质劣变规律。将添加 0.02% 叔丁基对苯二酚(TBHQ)的小磨芝麻香油在 63 °C 烘箱中加速储藏 40 d, 测定其氧化指标、色泽、脂肪酸组成、气味活性成分及感官品质的变化, 并与空白小磨芝麻香油组对比。结果表明: 小磨芝麻香油酸值、过氧化值、茴香胺值、共轭二烯值、共轭三烯值、总氧化值和红值在储藏过程中均升高, 氧化诱导时间缩短; 与空白组相比, 添加 TBHQ 的小磨芝麻香油的上述氧化指标显著降低; 与空白组相比, TBHQ 的添加使小磨芝麻香油的杂环类、酚类、醛类和酮类等气味化合物总含量显著降低, 炒芝麻味、烤坚果味、焦香味和烟熏味明显增强, 酸败味明显减弱。综上, 添加 TBHQ 可抑制小磨芝麻香油在储藏过程中的氧化变质, 减缓小磨芝麻香油的香气和感官品质的劣变。

关键词: 小磨芝麻香油; 特丁基对苯二酚; 气味活性成分; 感官品质; 储藏稳定性

中图分类号: TS221; TS225.1

文献标识码: A

文章编号: 1003-7969(2025)08-0042-08

Changes in odor – active compounds, sensory quality, and oxidation stability of ground fragrant sesame seed oil during accelerated storage

ZHANG Hengbo¹, YANG Chenjia¹, SHI Chenglong¹, MIAO Hongmei²,
YIN Wenting¹, MA Xueting¹, HU Beibei¹, WANG Xuede¹

(1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Sesame Research Center, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: To provide a theoretical basis for precisely formulating aroma storage strategies of ground fragrant sesame seed oil, its deterioration law of aroma quality was explored during storage. The ground fragrant sesame seed oil with 0.02% *tert*-butylhydroquinone (TBHQ) added was stored under accelerated oxidation condition in an oven at 63 °C for 40 d, and the changes in its oxidation indexes, color, fatty acid composition, odor – active compounds and sensory quality were determined and compared with the blank ground fragrant sesame seed oil group. The results showed that during the storage period, the acid value, peroxide value, anisidine value, conjugated dienes, conjugated trienes, total oxidation value and red value of the ground fragrant sesame seed oil increased, while the oxidation induction time decreased. Compared with the blank group, the above oxidation indexes of ground fragrant sesame seed oil with TBHQ added were significantly reduced. Compared with the blank group, the total content of odor – active compounds such as heterocycles, phenols, aldehydes and ketones in the ground

fragrant sesame seed oil containing TBHQ was significantly reduced, while the flavors of roasted sesame, roasted nuts, burnt aroma and smoke aroma were significantly enhanced, and the rancid aroma was significantly weakened. In conclusion, adding TBHQ can inhibit the oxidative deterioration of ground fragrant sesame seed oil

收稿日期: 2024-05-13; 修回日期: 2025-04-15

基金项目: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-14);
国家自然科学基金青年科学基金项目(32202210)

作者简介: 张恒博(2004), 男, 在读本科, 食品科学与工程专
业(E-mail) 15237192988@163.com。

通信作者: 尹文婷, 副教授, 博士(E-mail) yin.wenting@
hotmail.com。

during storage and slow down the deterioration of its aroma and sensory quality.

Key words: ground fragrant sesame seed oil; *tert* - butylhydroquinone; odor - active compound; sensory quality; storage stability

小磨芝麻香油营养价值较高,香气浓郁独特,是一种深受我国人民喜爱的植物油。然而,小磨芝麻香油具有较高含量的不饱和脂肪酸,在储藏期间容易受到温度、空气及光照等环境影响而发生氧化、水解和聚合等反应,这不仅降低了小磨芝麻香油的营养价值,还会影响其香气品质^[1-2]。Wu 等^[3]研究发现,压榨芝麻油和精炼芝麻油在常温下储藏 7 个月,其过氧化值、茴香胺值和总氧化值均逐渐增加。Gaca 等^[1]研究发现,低温压榨芝麻油在 60℃ 下加速储藏 10 d 后,其脂质氧化产物如(*E,E*) - 2, 4 - 庚二烯醛、2 - 戊烯醛、2 - 丙烯醛等挥发性化合物的浓度增加。Lee 等^[4]研究发现,热榨芝麻油加速储藏 4 周后,其正戊烷、正己醛、庚醛和 1 - 戊醛等异味化合物的含量增加。然而,小磨芝麻香油在储藏过程中挥发性化合物和感官品质的变化规律尚未被阐明。

长期以来,人们一直致力于解决芝麻油等油脂储藏和销售过程中产生的异味问题。如:Wang 等^[5]研究发现,向葵花籽油中加入石榴皮精油能显著抑制葵花籽油酸值、过氧化值、茴香胺值和总氧化值的增加,并改善其风味和口感;邓金良等^[6]研究发现,与常规储藏相比,添加质量分数 0.02% 叔丁基对苯二酚(TBHQ),可有效延缓花生油特征风味物质的损失。这是因为 TBHQ 能够提供氢质子,将活性自由基转化为稳定的化合物,从而抑制脂质氧化^[7]。由此推测,添加抗氧化剂也可能延缓小磨芝麻香油风味和感官品质的劣变,但目前尚未有相关研究。本文将 TBHQ 添加到小磨芝麻香油中,测定其在加速储藏期间氧化指标、色泽、脂肪酸组成、气味活性成分以及感官品质的变化,并与空白组对比,以期制定小磨芝麻香油香气品质储藏策略提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

小磨芝麻香油,购自国内芝麻油生产商(河北),生产后立即送往实验室,于 -4℃ 的冰箱密封保存。TBHQ(纯度 ≥ 99.0%),广东省食品工业研究所;正己烷,色谱纯,美国 VBS 公司;氯化钠、二氯

甲烷、氢氧化钾、无水硫酸钠、无水乙醇(95%)等均 为分析纯,天津科密欧化学试剂有限公司;4 - 壬醇(纯度 ≥ 99.99%),色谱纯,上海麦克林生化科技有限公司。

溶剂辅助蒸发(SAFE)装置,北京肯堡博美玻璃仪器厂;MTN - 2800W 氮吹浓缩仪;7890B/5977B 气相色谱 - 质谱(GC - MS)联用仪,美国安捷伦公司;ODP - 3 嗅辨仪,德国哲斯泰公司;韦氏浓缩柱;Rancimat 743 氧化酸败仪,瑞士万通公司。

1.2 实验方法

1.2.1 小磨芝麻香油加速储藏实验

按质量分数 0.02% 向小磨芝麻香油中添加 TBHQ,磁力搅拌使其充分溶解。以未加任何抗氧化剂的等量小磨芝麻香油作为空白对照组。将 2 组油样(250 g)分别密封于 300 mL 玻璃瓶中,并放置在(63 ± 1)℃ 的烘箱中,每 5 d 取一次样进行分析,共储藏 40 d。

1.2.2 小磨芝麻香油氧化指标和色泽的测定

酸值参照 GB 5009.229—2016 测定;过氧化值参照 GB 5009.227—2023 测定;茴香胺值(*p* - AV)参照 GB/T 24304—2009 测定;共轭二烯值(K_{232})和共轭三烯值(K_{268})参照 GB/T 22500—2008 测定;总氧化值为 2 倍的过氧化值与茴香胺值之和^[8]。

氧化诱导时间的测定:参照盛冰莹等^[9]的方法,采用氧化酸败仪在油样 3 g、温度 130℃、空气流速 20 L/h、电导率 0 ~ 500 μS/cm 条件下测定。

色泽的测定:参照付元元等^[10]的方法,采用罗维朋自动比色仪测定。

1.2.3 小磨芝麻香油脂肪酸组成测定

脂肪酸组成参照 GB 5009.168—2016 测定。

1.2.4 小磨芝麻香油气味活性成分测定

参照 Yin 等^[11]的方法并稍作修改,采用溶剂辅助风味蒸发法提取小磨芝麻香油中的挥发性化合物。将 50 g 小磨芝麻香油、150 μL 4 - 壬醇(1 mg/mL)和 150 mL 二氯甲烷混合后密封,并放置摇床中振荡 10 h。随后将样品转移到 SAFE 装置中,水浴温度为 50℃,在冷阱中加入液氮(-196℃),在高真空(10⁻³ Pa)下进行萃取。萃取液用无水硫酸钠干燥,

经韦氏浓缩柱浓缩至约 5 mL,用氮气进一步浓缩至约 1 mL,再通过 0.22 μm 微孔滤膜过滤后进行气相色谱-质谱-嗅闻联用(GC-O-MS)测定。

参照 Zhang 等^[12]的方法,使用 GC-MS 联用仪和嗅辨仪对小磨芝麻香油中的气味活性化合物进行分析。GC 条件:HP-5MS 毛细管色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm);载气为氦气(纯度 99.999%),流速 1.8 mL/min;进样口温度 250 $^{\circ}\text{C}$;柱升温程序为初始柱温 40 $^{\circ}\text{C}$,保持 5 min,以 2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升高到 130 $^{\circ}\text{C}$,保持 5 min,然后以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升高到 250 $^{\circ}\text{C}$,保持 5 min。MS 条件:质谱界面温度 230 $^{\circ}\text{C}$,四极杆温度 150 $^{\circ}\text{C}$,电离能量 70 eV,质量扫描范围(m/z) 33~400。由 3 名经验丰富的评价员(2 名女性,1 名男性,20~26 岁)经嗅辨仪嗅闻口进行嗅闻,并对分离出的化合物进行气味描述。

通过比较 NIST 17 质谱库、标准化化合物保留指数(RI)和嗅闻(O)的结果,对所有挥发性化合物进行定性分析。采用内标法进行半定量^[13]。

1.2.5 小磨芝麻香油感官评价

感官评价方法参照团体标准 T/CCOA 29—2020《芝麻油感官评价》,并在根据 ISO 8589:2007 标准设计的独立隔间内进行实验。评价小组由河南工业大学感官小组的 10 名评价员(5 女 5 男)组成,评价员均具有 1 年以上的油脂品评经验。取 10 mL

油样倒入 75 mL 棕色玻璃瓶中密封,每个样品用随机 3 位数字进行编号,置于 35 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温装置中预热 30 min 后进行评价。感官数据由 Compusense Cloud (加拿大 Compusense 有限公司)收集。小磨芝麻香油感官描述词如表 1 所示。

表 1 小磨芝麻香油感官描述词

Table 1 Sensory lexicon for ground fragrant sesame seed oil

感官描述词	定义	参考物
炒芝麻味	炒熟芝麻籽的风味	2,5-二甲基吡嗪
烤坚果味	经过烤制的坚果风味,表现为轻微焙烤味和木质味	2-甲基吡嗪
焦香味	适度焙烤食品产生的香气	2,3,5-三甲基吡嗪
烟熏味	烟气熏制,炒制芝麻籽过程中产生的特殊风味	2-甲氧基苯酚
酸败味	油脂氧化酸败产生的刺鼻、哈喇味、腐臭味等异味	2,4-癸二烯醛
整体强度	芝麻油所具有的独特香气的浓郁程度	

2 结果与分析

2.1 小磨芝麻香油在储藏过程中氧化指标的变化

小磨芝麻香油在储藏过程中酸值(AV)、过氧化值(POV)、共轭二烯值(K_{232})、共轭三烯值(K_{268})、茴香胺值(p -AV)、总氧化值(TOTOX)的变化见图 1。

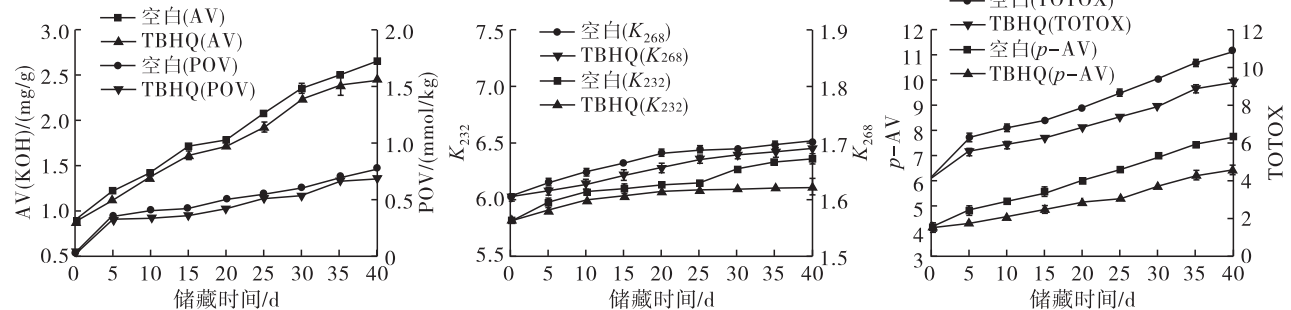


图 1 小磨芝麻香油在储藏过程中酸值、过氧化值、共轭二烯值、共轭三烯值、茴香胺值和总氧化值的变化

Fig. 1 Changes of AV, POV, K_{232} , K_{268} , p -AV and TOTOX of ground fragrant sesame seed oil during storage

由图 1 可知,随着储藏时间的延长,小磨芝麻香油的酸值、过氧化值、共轭二烯值、共轭三烯值、茴香胺值、总氧化值 6 个氧化指标均逐渐增加($p < 0.05$)。这是由于小磨芝麻香油氧化导致酯键断裂,释放大游离脂肪酸^[14],同时,储藏过程中不断氧化产生氢过氧化物,可进一步分解为醛类、酮类等次级氧化产物。与空白组相比,添加 TBHQ 的小磨芝麻香油的上述 6 个氧化指标均降低($p < 0.05$)。这可能是由于 TBHQ 具有 2 个羟基,可以向活性自由基提供氢原子,从而中断脂质氧化的链反应^[3]。

2.2 小磨芝麻香油在储藏过程中红值和氧化诱导时间的变化

小磨芝麻香油在储藏过程中红值和氧化诱导时间的变化见图 2。由图 2 可知,随着储藏时间的延长,2 组小磨芝麻香油的氧化诱导时间均逐渐降低($p < 0.05$),红值均逐渐增加($p < 0.05$),这主要归因于油脂脂肪酸的氧化或聚合产生棕色色素^[15]。相比空白组,添加 TBHQ 的小磨芝麻香油氧化诱导时间更长($p < 0.05$),红值更高($p < 0.05$)。这可能是由于 TBHQ 能够抑制油脂氧化^[7],同时多酚易氧化环化和聚合形成深棕色聚合物^[16]。

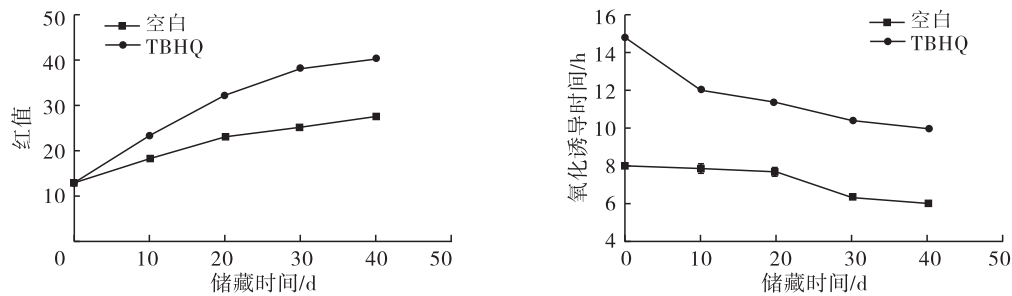


图 2 小磨芝麻香油在储藏过程中红值和氧化诱导时间的变化

Fig. 2 Changes of the red value and oxidation induction time of ground fragrant sesame seed oil during storage

2.3 小磨芝麻香油在储藏过程中脂肪酸组成的变化

实验发现,小磨芝麻香油中不饱和脂肪酸油酸(C18:1,38.2%)和亚油酸(C18:2,46.6%)含量高,此外,含有少量棕榈酸(C16:0,8.2%)、棕榈油酸(C16:1,0.1%)、硬脂酸(C18:0,5.5%)、花生四烯酸(C20:4,0.6%)、 α -亚麻酸(C18:3,0.6%)和山嵛酸(C22:0,0.1%)。随着储藏时间的延长,小磨

芝麻香油的脂肪酸组成无变化,同时小磨芝麻香油和添加 TBHQ 的小磨芝麻香油的脂肪酸组成也无显著差异。

2.4 小磨芝麻香油在储藏过程中气味活性成分的变化

小磨芝麻香油在储藏过程中气味化合物含量的变化如表 2 所示。

表 2 小磨芝麻香油在储藏过程中气味化合物含量的变化

Table 2 The content variation of odor compounds in ground fragrant sesame seed oil during storage

化合物	RI	气味描述	空白组含量/($\mu\text{g/mL}$)					TBHQ 组含量/($\mu\text{g/mL}$)				
			0 d	10 d	20 d	30 d	40 d	0 d	10 d	20 d	30 d	40 d
2,5-二甲基吡嗪	902	坚果味、烤芝麻味	285.0 ^a	279.8 ^a	277.2 ^a	207.6 ^b	185.7 ^c	339.7 ^a	176.2 ^b	ND	ND	ND
2-乙基吡嗪	906	花生味、烤芝麻味	100.8 ^a	95.3 ^b	101.2 ^a	73.2 ^c	68.3 ^d	88.2 ^a	77.8 ^b	68.9 ^c	60.9 ^d	ND
2-甲基-5-异丙基吡嗪	1 033	大蒜味、焙烤味	2.5 ^a	2.3 ^{ab}	2.2 ^b	2.0 ^{bc}	ND	1.5 ^a	1.4 ^b	1.5 ^a	1.6 ^a	1.3 ^b
2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	1 071	甜味、坚果味	10.4	ND	ND	ND	ND	8.1	ND	ND	ND	ND
2-乙基-6-甲基吡嗪	1 005	谷仓味、焙烤味	10.8 ^a	9.7 ^a	9.6 ^a	4.7 ^b	ND	7.6 ^a	5.6 ^b	5.1 ^c	5.7 ^b	5.2 ^c
(3-甲基吡嗪-2-基)甲醇	1 113	炒坚果味	17.4 ^a	17.3 ^a	15.7 ^b	11.1 ^c	10.8 ^c	13.7 ^a	6.7 ^c	8.5 ^b	8.8 ^b	8.4 ^b
2,3-二乙基-5-甲基吡嗪	1 143	红豆味	3.1 ^a	1.0 ^d	1.8 ^b	1.3 ^c	ND	3.1 ^a	1.9 ^b	0.8 ^c	ND	ND
2-甲基-3,5-二乙基吡嗪	1 148	红豆味	9.1 ^a	8.7 ^a	7.9 ^b	ND	ND	6.3 ^a	6.0 ^b	6.1 ^b	4.8 ^c	ND
2-甲基-6-[(1E)-1-丙烯基]吡嗪	1 086	红豆味	9.5	ND	ND	ND	ND	7.0 ^d	9.8 ^a	9.5 ^b	8.2 ^c	ND
2-乙酰基吡嗪	1 012	蒸米饭味、坚果味	40.8 ^a	38.2 ^b	37.0 ^b	29.0 ^c	28.3 ^c	32.2 ^a	23.3 ^{cd}	25.6 ^{bc}	26.4 ^b	24.2 ^c
2-异丙基吡嗪	954	蘑菇味	4.3 ^a	4.6 ^a	2.9 ^a	ND	ND	4.0 ^a	2.6 ^b	ND	ND	ND
异丙烯基吡嗪	1 043	大蒜味	6.4 ^a	5.3 ^a	4.9 ^a	3.9 ^{ab}	1.3 ^b	5.1 ^a	6.7 ^a	6.4 ^a	3.1 ^b	ND
2,3-二甲基吡嗪	909	坚果味、焙烤味	64.3 ^a	66.5 ^a	37.2 ^b	36.3 ^b	ND	52.1 ^a	47.2 ^b	46.3 ^b	46.4 ^b	35.1 ^c
3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	1 070	焙烤味、坚果味	88.0 ^a	87.7 ^a	90.2 ^a	72.9 ^b	73.0 ^b	72.9 ^a	54.6 ^c	60.7 ^b	61.4 ^b	59.9 ^b
2-乙基-6-甲基吡嗪	987	坚果味	81.8 ^a	86.1 ^a	77.9 ^a	62.3 ^b	63.3 ^b	74.8 ^a	51.0 ^b	49.1 ^b	48.0 ^b	40.7 ^c
2,3,5-三甲基吡嗪	992	焙烤味、坚果味	86.8 ^{ab}	129.1 ^a	76.1 ^c	61.8 ^d	53.3 ^d	125.6 ^a	60.2 ^b	114.9 ^a	104.7 ^a	106.2 ^a
2,3-二甲基-5-乙基吡嗪	1 076	焙烤味、坚果味	13.9 ^a	13.2 ^a	14.7 ^a	ND	ND	12.7 ^a	6.8 ^c	11.0 ^b	8.6 ^c	8.4 ^c
(E)-2-甲基-5-(1-丙烯基)吡嗪	1 182	焙烤味、坚果味	13.6 ^a	13.0 ^b	15.5 ^a	11.8 ^c	11.4 ^c	13.0 ^a	8.1 ^c	8.8 ^b	ND	ND
2-乙基-5-甲基吡嗪	1 008	焙烤味、坚果味	8.3 ^b	9.8 ^a	8.8 ^b	6.4 ^c	6.4 ^c	8.1 ^a	5.1 ^b	5.0 ^b	ND	ND

续表 2

化合物	RI	气味描述	空白组含量/($\mu\text{g/mL}$)					TBHQ 组含量/($\mu\text{g/mL}$)				
			0 d	10 d	20 d	30 d	40 d	0 d	10 d	20 d	30 d	40 d
1-(2-吡嗪基)丙酮	1 116	苦味	0.6 ^b	0.7 ^a	0.5 ^c	ND	ND	0.5	ND	ND	ND	ND
2-甲基吡嗪	812	爆米花味、焙烤味	737.2 ^a	680.4 ^{ab}	642.4 ^b	493.2 ^c	449.5 ^c	666.8 ^a	550.3 ^b	526.6 ^b	502.8 ^{bc}	509.1 ^{bc}
2,6-二乙基吡嗪	1 073	焙烤味、坚果味	14.5 ^a	11.4 ^b	8.9 ^c	7.6 ^d	ND	10.7 ^a	8.2 ^b	7.1 ^c	6.3 ^c	ND
2-乙基-3-甲基吡嗪	992	焙烤味、坚果味	29.9 ^a	29.0 ^a	26.5 ^a	13.8 ^{ab}	ND	29.0 ^a	22.9 ^b	ND	ND	ND
5-甲基-6,7-二氢-5H-环戊并吡嗪	1 127	焙烤味、坚果味	17.1 ^a	16.3 ^b	14.8 ^c	12.6 ^d	12.4 ^d	12.1 ^a	9.1 ^b	ND	ND	ND
2-(1-甲基乙烯基)-吡嗪	1 095	焦糖味、焙烤味	27.4 ^a	21.7 ^b	10.5 ^c	7.9 ^d	5.4 ^c	14.2 ^a	5.5 ^b	6.0 ^b	ND	ND
1-(6-甲基-2-吡嗪基)-1-乙醇	1 106	花生味、焙烤味	31.2 ^a	36.4 ^a	34.6 ^a	21.8 ^c	26.1 ^{bc}	28.6 ^a	19.1 ^c	23.9 ^b	22.4 ^b	21.6 ^{bc}
吡嗪类总量			1 714.7 ^a	1 663.5 ^b	1 519.0 ^c	1 141.2 ^d	995.2 ^c	1 637.6 ^a	1 166.1 ^b	991.8 ^c	920.1 ^c	820.1 ^d
1-糠基吡咯	1 173	坚果味、焦糖味	7.6 ^a	7.5 ^a	6.4 ^b	5.4 ^c	4.2 ^d	5.5 ^a	4.8 ^b	3.9 ^c	3.5 ^d	2.9 ^c
2-乙酰基吡咯	1 068	青草味、坚果味	64.1 ^a	59.2 ^b	54.6 ^c	52.0 ^c	45.4 ^d	36.8 ^a	35.3 ^b	30.9 ^c	30.6 ^c	29.3 ^c
N-甲基-2-吡咯甲醛	995	苦味	14.9 ^a	9.0 ^b	7.8 ^{bc}	6.4 ^{bc}	3.0 ^c	6.4 ^d	7.1 ^d	14.9 ^a	13.9 ^b	8.9 ^c
3-乙基-1H-吡咯	803	烤花生味	3.0 ^a	2.3 ^b	1.6 ^c	1.3 ^d	ND	2.9 ^a	1.5 ^b	1.4 ^b	1.4 ^b	0.9 ^c
吡咯	733	焦糖味、爆米花味	54.0 ^a	37.3 ^b	21.1 ^c	17.5 ^d	17.5 ^d	53.1 ^a	23.5 ^b	19.0 ^{bc}	20.6 ^{bc}	18.5 ^c
吡咯类总量			143.6 ^a	115.3 ^b	91.5 ^b	82.6 ^c	70.1 ^{cd}	104.7 ^a	72.2 ^b	70.1 ^b	70.0 ^b	60.5 ^c
2-甲基吡啶	808	药味	2.9 ^b	6.9 ^a	4.8 ^b	4.4 ^b	ND	2.1 ^b	3.1 ^a	2.7 ^a	2.5 ^a	2.6 ^a
2-乙酰基吡啶	1 022	橡胶味	3.0 ^b	3.5 ^a	3.4 ^a	2.5 ^{cd}	2.3 ^d	2.9 ^a	1.8 ^b	1.9 ^b	ND	ND
吡啶类总量			5.9 ^a	10.4 ^a	8.2 ^a	6.9 ^a	2.3 ^b	5.0 ^a	4.9 ^a	4.6 ^a	2.5 ^b	2.6 ^b
2-乙酰基呋喃	904	甜味、爆米花味	20.7 ^a	22.6 ^a	13.7 ^a	16.2 ^a	15.7 ^a	19.5 ^a	16.3 ^b	15.6 ^{bc}	14.0 ^{cd}	13.7 ^d
5-甲基-2-乙酰基呋喃	1 025	谷仓味	4.7 ^a	1.7 ^a	3.4 ^a	3.8 ^a	ND	3.6 ^a	3.3 ^b	3.1 ^c	3.1 ^c	2.9 ^d
2-乙烯基呋喃	702	葱味、焦糖味	2.2 ^a	2.3 ^a	1.4 ^b	1.5 ^b	1.0 ^c	2.1 ^a	1.0 ^d	1.1 ^{cd}	1.3 ^b	1.2 ^{bc}
2-戊基呋喃	979	焦糖味	19.3 ^b	26.2 ^a	26.6 ^a	25.8 ^a	25.3 ^a	18.4 ^c	15.5 ^c	17.3 ^d	22.5 ^a	21.0 ^b
2(5H)-呋喃酮	910	皮革味	12.8 ^a	12.9 ^a	12.1 ^a	9.4 ^b	ND	7.9 ^b	7.3 ^b	8.8 ^b	8.1 ^b	9.2 ^a
5-甲基糠醛	954	杏仁味、焦糖味	30.2 ^c	37.3 ^a	34.4 ^b	22.3 ^d	21.1 ^d	23.8 ^a	19.9 ^{cd}	23.3 ^b	21.3 ^c	19.6 ^d
甲基糠基二硫	1 199	土腥味	21.1 ^c	26.0 ^a	24.9 ^b	20.1 ^c	ND	18.5 ^a	13.7 ^c	17.0 ^b	17.9 ^b	17.4 ^b
糠醇	853	烤花生香	130.9 ^a	100.3 ^b	94.2 ^b	78.7 ^c	77.5 ^c	100.8 ^a	76.2 ^b	81.3 ^b	79.4 ^b	61.7 ^b
2-甲基四氢呋喃-3-酮	795	焙烤味、发酵味	4.4 ^a	1.4 ^b	ND	1.6 ^b	3.0 ^{ab}	19.6 ^a	2.9 ^{bc}	3.2 ^b	2.5 ^c	ND
2-甲氧基-呋喃	723	焦糖味、咸味	2.2 ^a	2.3 ^a	1.1 ^b	0.3 ^c	ND	2.4 ^a	1.8 ^b	1.0 ^c	0.6 ^d	ND
呋喃类总量			248.5 ^a	233.0 ^{ab}	211.8 ^b	179.7 ^c	143.6 ^d	216.6 ^a	157.9 ^{cd}	171.7 ^{bc}	170.7 ^{bc}	146.7 ^d
2-甲基-2-噻唑啉	924	硫磺味、焙烤味	16.0 ^a	11.2 ^b	6.3 ^d	6.8 ^d	8.9 ^c	51.0 ^a	6.6 ^d	5.2 ^c	8.7 ^b	7.6 ^c
2,4-二甲基-2-噻唑啉	944	生坚果味	59.3 ^a	42.7 ^b	25.1 ^d	24.5 ^d	32.7 ^c	41.8 ^a	25.2 ^c	20.1 ^d	29.6 ^b	24.4 ^c
4,5-二甲基异噻唑	895	硫磺味、洋葱味	2.0 ^a	1.9 ^a	1.9 ^a	ND	ND	1.7 ^a	1.2 ^c	1.4 ^b	1.1 ^d	ND
4-甲基噻唑	803	硫磺味、烤花生味	33.6 ^a	30.8 ^b	28.8 ^b	21.3 ^c	19.5 ^c	30.3 ^a	16.5 ^c	21.2 ^b	20.1 ^{bc}	21.8 ^b
2-甲基噻唑	790	硫磺味、洋葱味	7.6 ^a	7.5 ^a	6.5 ^b	4.5 ^c	5.0 ^c	7.7 ^a	3.7 ^c	4.8 ^b	5.0 ^b	4.7 ^b
2,4-二甲基噻唑	871	硫磺味、蒜味	12.5 ^{ab}	12.3 ^{ab}	12.8 ^{ab}	11.2 ^{bc}	10.6 ^c	10.5 ^{ab}	7.6 ^b	11.6 ^a	12.6 ^a	10.5 ^{ab}
异噻唑	702	硫磺味、烤肉味	0.5 ^a	0.5 ^a	ND	ND	ND	0.4 ^a	0.2 ^c	0.2 ^c	0.3 ^b	0.3 ^b
噻唑类总量			131.5 ^a	106.9 ^b	81.4 ^c	68.3 ^{cd}	76.7 ^{cd}	143.4 ^a	61.0 ^{bc}	64.5 ^{bc}	77.4 ^b	69.3 ^{bc}
四氢噻吩-3-酮	937	硫磺味、蘑菇味	6.9 ^a	6.1 ^b	4.3 ^c	4.2 ^c	4.0 ^c	6.0 ^a	3.5 ^c	3.1 ^d	4.1 ^b	3.7 ^c
3-甲基噻吩	757	硫磺味、洋葱味	5.2 ^a	5.5 ^a	3.0 ^b	2.9 ^b	3.4 ^b	5.0 ^a	2.8 ^{bc}	2.2 ^c	3.8 ^b	3.4 ^{bc}
2-甲基四氢噻吩-3-酮	973	硫磺味、爆米花味	2.8 ^a	2.0 ^b	1.5 ^{cd}	1.3 ^d	1.5 ^c	2.1 ^a	1.3 ^c	1.4 ^b	1.0 ^d	ND
噻吩类总量			14.9 ^a	13.6 ^a	8.8 ^b	8.4 ^b	8.9 ^b	13.1 ^a	7.6 ^{bc}	6.7 ^{bc}	8.9 ^b	7.1 ^{bc}
2-甲氧基苯酚	1 084	烟熏味、焦糊味	194.1 ^b	224.9 ^a	215.1 ^a	169.2 ^c	167.5 ^c	168.0 ^a	128.7 ^c	144.1 ^b	143.7 ^b	139.1 ^b
甲基麦芽酚	1 104	焦糖味	22.7 ^a	26.1 ^a	25.9 ^a	20.6 ^b	18.6 ^c	20.4 ^a	8.5 ^c	8.3 ^c	13.3 ^b	12.3 ^b
5-乙烯基-2-甲氧基-苯酚	1 301	焦糊味、烟熏味	61.0 ^b	76.2 ^b	79.0 ^a	55.5 ^c	50.1 ^d	45.1 ^c	52.0 ^a	46.5 ^b	41.9 ^d	36.0 ^c
苯酚类总量			277.8 ^{ab}	327.2 ^a	320.0 ^a	245.3 ^b	236.2 ^b	233.5 ^a	189.2 ^b	198.9 ^b	198.9 ^b	187.4 ^b
正己醛	786	生青味、水果味	4.9 ^c	16.5 ^a	14.1 ^a	6.7 ^b	5.6 ^b	5.3 ^d	7.3 ^b	11.1 ^a	6.4 ^c	4.1 ^e
庚醛	891	油腻味、酸败味	ND	1.3 ^b	1.5 ^a	1.3 ^c	1.2 ^c	1.1 ^a	0.6 ^b	0.9 ^a	1.0 ^a	0.5 ^b
3-甲基丁醛	<700	麦芽味、水果味	2.8 ^b	5.7 ^a	3.1 ^b	3.1 ^b	3.1 ^b	8.2 ^a	5.5 ^a	4.9 ^a	5.3 ^a	5.1 ^a
壬醛	1 096	生青味、油腻味	ND	3.3 ^d	6.0 ^a	4.0 ^b	3.9 ^c	ND	2.4 ^c	3.7 ^b	5.4 ^a	7.4 ^a

续表 2

化合物	RI	气味描述	空白组含量/($\mu\text{g/mL}$)					TBHQ 组含量/($\mu\text{g/mL}$)				
			0 d	10 d	20 d	30 d	40 d	0 d	10 d	20 d	30 d	40 d
(<i>E,E</i>)-2,4-癸二烯醛	1 305	哈喇味、酸败味	ND	11.3 ^d	18.9 ^c	25.4 ^b	31.1 ^a	ND	ND	ND	ND	ND
(<i>E</i>)-2-庚烯醛	947	生青味、酸败味	ND	2.6 ^d	5.3 ^c	10.0 ^b	16.1 ^a	ND	1.7 ^d	2.5 ^c	4.7 ^b	7.6 ^a
(<i>E</i>)-2-辛烯醛	1 049	生青味、油腻味	ND	1.2 ^d	3.7 ^c	7.0 ^b	15.4 ^a	ND	0.8 ^d	1.2 ^c	4.3 ^b	8.2 ^a
醛类总量			7.7 ^c	41.9 ^{bc}	52.6 ^b	57.5 ^b	76.4 ^a	14.6 ^{bc}	18.3 ^b	24.3 ^{ab}	27.1 ^{ab}	32.9 ^a
2-庚酮	881	肥皂味、香蕉味	2.4 ^a	2.2 ^a	2.2 ^a	2.8 ^a	3.4 ^a	2.2 ^b	2.4 ^b	2.1 ^b	2.7 ^b	2.8 ^a
2,3-戊二酮	<700	焦糖味、黄油味	2.1 ^b	6.7 ^a	ND	ND	1.0 ^c	2.1 ^a	1.4 ^b	0.6 ^c	1.7 ^{ab}	ND
3-戊酮	<700	发酵味	2.5 ^a	2.7 ^a	1.8 ^b	2.8 ^a	1.7 ^c	2.4 ^a	1.4 ^{bc}	1.3 ^c	1.7 ^b	2.6 ^{ab}
苯乙酮	1 054	药味	9.3 ^b	11.6 ^a	10.3 ^a	7.9 ^c	7.8 ^c	9.5 ^a	5.8 ^c	7.8 ^b	8.3 ^b	7.2 ^b
环戊酮	771	发酵味、焦糖味	1.1 ^a	1.1 ^a	1.1 ^a	0.6 ^c	0.7 ^b	1.3 ^a	0.6 ^c	0.7 ^{bc}	0.8 ^b	ND
酮类总量			17.4 ^a	24.3 ^a	15.4 ^b	14.1 ^b	14.6 ^b	17.5 ^a	11.6 ^b	12.5 ^b	15.2 ^a	12.6 ^b
1-辛烯-3-醇	973	蘑菇味、土腥味	10.6 ^a	10.8 ^a	10.1 ^{ab}	9.1 ^{ab}	9.0 ^b	8.0 ^a	6.5 ^b	6.0 ^c	6.0 ^c	6.0 ^c
乙酸	<700	酸味	ND	11.7 ^d	24.9 ^c	36.1 ^b	41.2 ^a	ND	8.2 ^d	10.9 ^c	18.2 ^b	24.0 ^a
硫代乙酸甲酯	<700	甜香味、发酵味	4.1 ^a	4.1 ^a	3.7 ^a	3.4 ^a	ND	4.5 ^a	2.2 ^b	2.2 ^b	2.8 ^b	2.0 ^b
二甲基三硫	955	硫磺味、煮白菜味	4.3 ^b	4.9 ^a	4.4 ^b	3.8 ^c	4.0 ^{bc}	3.8 ^a	1.8 ^c	2.4 ^d	3.6 ^b	3.0 ^c
2,4,5-三甲基噻唑	836	咸味、焙烤味	1.9 ^a	2.0 ^a	1.6 ^b	1.1 ^c	1.1 ^c	13.4 ^a	1.0 ^c	1.1 ^c	1.3 ^b	1.1 ^c

注:ND 表示未被检测到;气味描述通过气相色谱-嗅辨(GC-O)仪获得;同组样品同行不同字母表示具有显著差异($p < 0.05$)

Note: ND means not detected. Odor description was obtained by GC-O analysis. Different letters in the same row indicate significant differences among samples in the same group($p < 0.05$)

由表 2 可知,小磨芝麻香油中检测到 73 种气味活性成分,包括 26 种吡嗪类、5 种吡咯类、2 种吡啶类、10 种呋喃类、7 种噻唑类、3 种噻吩类、3 种苯酚类、7 种醛类、5 种酮类、5 种其他类,其中杂环类化合物为主。

吡嗪类是小磨芝麻香油中含量最高的气味化合物,为芝麻油提供坚果味、焙烤味和爆米花味等^[17]。随着储藏时间的延长,2 组小磨芝麻香油中吡嗪类化合物的总含量均逐渐降低($p < 0.05$),这与花生油在加速储藏过程中观察到的结果一致^[6]。这可能是含氮化合物(如蛋白质、氨基酸、酶等)被脂质过氧化自由基降解或与脂质氧化产物结合导致的^[18]。相较于空白组,添加 TBHQ 的小磨芝麻香油的吡嗪类化合物的总含量明显降低($p < 0.05$),这可能是由于 TBHQ 结构中的酚羟基可以抑制许多吡嗪类物质的阳离子自由基的形成,同时,TBHQ 可以抑制包括吡嗪类挥发性物质从芝麻油中释放。

其他杂环类化合物,包括吡咯类、吡啶类、呋喃类、噻唑类和噻吩类化合物,为小磨芝麻香油提供了焙烤味、坚果味和焦糖味等。在加速储藏过程中,2 组小磨芝麻香油样品中杂环类化合物的总含量显著下降($p < 0.05$)。与空白组相比,添加了 TBHQ 的小磨芝麻香油中杂环类气味化合物的总含量明显下降($p < 0.05$)。呋喃是含氧杂环化合物,由美拉德反应、碳水化合物分解或脂质氧化产生^[19],为小磨芝麻香油提供焦糖味和坚果味。在检测到的 10 种

呋喃类气味化合物中,只有 2-戊基呋喃含量在加速储藏过程中总体呈上升趋势($p < 0.05$),这可能是因为储藏过程中亚油酸氧化分解产生了 2-戊基呋喃^[20],且与空白组相比,添加 TBHQ 的小磨芝麻香油中 2-戊基呋喃的含量明显降低($p < 0.05$),这是由于抗氧化剂能够抑制亚油酸在储藏中的损失^[3]。

芳香族酚类化合物由芝麻中存在的羧酸酚或木质素的热降解产生,为小磨芝麻香油提供了焦糊味和烟熏味^[13]。随着储藏时间的延长,3 种苯酚类化合物含量均呈显著下降趋势($p < 0.05$)。添加 TBHQ 的小磨芝麻香油的苯酚类化合物含量低于空白组($p < 0.05$)。

小磨芝麻香油中的醛类化合物含量在储藏过程中总体升高($p < 0.05$)。这可能是由脂质氧化导致的^[19]。与空白组相比,添加 TBHQ 的小磨芝麻香油中醛类、醇类和酮类气味化合物的总含量总体降低($p < 0.05$)。这可能是由于 TBHQ 的酚羟基可以捕获油脂氧化产生的自由基,从而抑制许多羰基化合物的形成^[21]。其中,3-甲基丁醛为 Strecker 醛降解产物^[14],添加 TBHQ 后其含量总体升高($p < 0.05$)。此外,乙酸是检测到的唯一酸类化合物,可能是焦糖化反应的产物^[20],其含量随储藏时间的延长而增加($p < 0.05$)。

2.5 小磨芝麻香油在储藏过程中感官品质的变化

小磨芝麻香油在储藏过程中的感官品质变化见图 3。

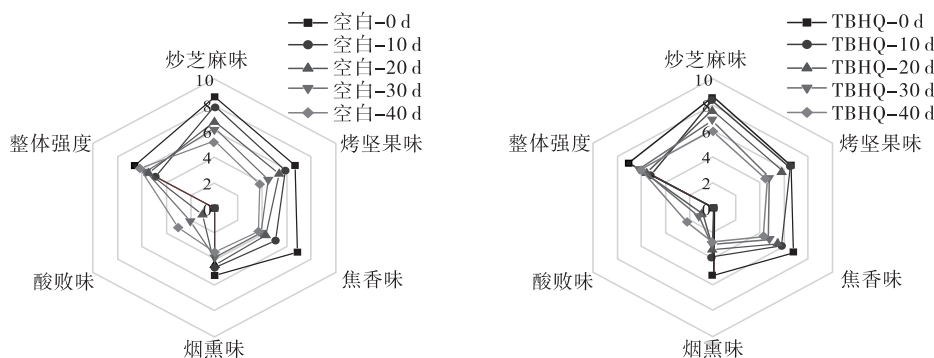


图3 小磨芝麻香油在储藏过程中感官品质的变化

Fig.3 Changes in sensory quality of ground fragrant sesame seed oil during storage

由图3可知,在储藏过程中,小磨芝麻香油的炒芝麻味、烤坚果味、焦香味和烟熏味逐渐减弱($p < 0.05$),而酸败味逐渐增强($p < 0.05$)。这是由于脂质氧化产生游离脂肪酸、氢过氧化物以及小分子异味物质(如醛、酮、酸等),使哈喇味和酸败味增强^[22]。此外,在储藏过程中杂环类化合物和酚类化合物等会分解,导致炒芝麻味、烤坚果味、焦香味和烟熏味减弱^[23]。相较于新鲜的小磨芝麻香油,加速储藏10 d后小磨芝麻香油整体感官强度开始出现显著变化($p < 0.05$)。由于芝麻油在63℃下储存1 d相当于在室温下(25℃)储藏16 d^[24],因此从感官稳定性角度判断,小磨芝麻香油室温储藏超过5个月其风味即发生明显劣变。

在相同的储藏时间下,添加TBHQ的小磨芝麻香油的炒芝麻味、烤坚果味、焦香味和烟熏味的强度均高于空白组的($p < 0.05$),而酸败味低于空白组的($p < 0.05$)。这可能是由于空白组的氧化程度较深(图1),产生了更多的异味物质,如正己醛、庚醛、(E)-2-庚烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇、壬醛和3-戊酮等(表2)。同时,空白组中较强的酸败味可能会掩盖其他感官属性^[25],造成其炒芝麻味、烤坚果味、焦香味和烟熏味低于添加TBHQ小磨芝麻香油的。

3 结 论

随着储藏时间的延长,小磨芝麻香油的氧化程度加深,添加TBHQ降低了小磨芝麻香油的氧化程度。在加速储藏10 d后,小磨芝麻香油的风味即发生劣变,表现为醛类、酸类等异味化合物逐渐增加,而美拉德反应香气产物如吡嗪类、呋喃类等杂环化合物的含量逐渐降低,炒芝麻味、烤坚果味、焦香味和烟熏味均减弱,而酸败味增强。添加TBHQ后,小磨芝麻香油的杂环类、酚类、醛类、酮类化合物的总含量较空白组均降低。添加TBHQ的小磨芝麻香油的炒芝麻味、烤坚果味、焦香味和烟熏味均高于空白

组,酸败味低于空白组。综上,加速储藏期间,小磨芝麻香油的气味活性成分和感官品质都发生了显著劣变,添加TBHQ可以有效抑制其风味的劣变,提高储藏时其整体感官品质。小磨芝麻香油室温储藏5个月其风味品质即发生明显劣变,添加抗氧化剂可以延缓其感官品质劣变。

参考文献:

- [1] 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): E285 [2024-05-13]. <https://doi.org/10.3390/molecules26020285>.
- [2] ZAMORA R, HIDALGO F J. Coordinate contribution of lipid oxidation and Maillard reaction to the nonenzymatic food browning[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2005, 45(1): 49-59.
- [3] WU S, WANG L, SHU F, et al. Effect of refining on the lignan content and oxidative stability of oil pressed from roasted sesame seed[J]. *Int J Food Sci Technol*, 2013, 48(6): 1187-1192.
- [4] LEE J, LEE Y, CHOE E. Effects of sesamol, sesamin, and sesamolol extracted from roasted sesame oil on the thermal oxidation of methyl linoleate[J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2008, 41(10): 1871-1875.
- [5] WANG D, MENG Y, ZHAO X, et al. Sunflower oil flavored by essential oil from *Punica granatum* cv. Heyinshiliu peels improved its oxidative stability and sensory properties[J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2019, 111: 55-61.
- [6] 邓金良, 刘玉兰, 王小磊, 等. 不同储存条件对浓香花生油风味及综合品质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(17): 231-237.
- [7] ZHANG Z, CHEN W, WANG H. The optimization proposal of adding antioxidant TBHQ into biodiesel[J]. *Petrol Sci Technol*, 2022, 40(5): 626-639.
- [8] YU Q, MA Y X, QIN Z, et al. Using solid acid catalysts to improve the oxidative stability of cold-pressed sesame oil [J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2021, 141: 110928 [2024-05-13]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110928>.

- [9] 盛冰莹, 陈振伟, 张晨霞, 等. 微波预处理对芝麻油中芝麻木酚素含量及油脂品质的影响[J]. 中国油脂, 2023, 48(9): 7–14, 29.
- [10] 付元元, 毕艳兰, 彭丹, 等. 分光光度法测定一级大豆油色泽的研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2014, 35(4): 32–38.
- [11] YIN W T, SHI R, LI S J, et al. Changes in key aroma – active compounds and sensory characteristics of sunflower oils induced by seed roasting[J]. J Food Sci, 2022, 87(2): 699–713.
- [12] ZHANG F, WANG X D, LI K, et al. Characterisation of flavourous sesame oil obtained from microwaved sesame seed by subcritical propane extraction [J/OL]. Food Chem X, 2024, 21: 101087[2024–05–13]. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101087>.
- [13] YIN W T, MA X T, LI S J, et al. Comparison of key aroma – active compounds between roasted and cold – pressed sesame oils[J/OL]. Food Res Int, 2021, 150: 110794[2024–05–13]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110794>.
- [14] ZHAO T, CAO Z, YU J, et al. Gas – phase ion migration spectrum analysis of the volatile flavors of large yellow croaker oil after different storage periods[J]. Curr Res Food Sci, 2022, 5: 813–822.
- [15] KOH E, RYU D, SURH J. Ratio of malondialdehyde to hydroperoxides and color change as an index of thermal oxidation of linoleic acid and linolenic acid[J]. J Food Process Preserv, 2015, 39(3): 318–326.
- [16] LUND M N. Reactions of plant polyphenols in foods: Impact of molecular structure [J]. Trends Food Sci Technol, 2021, 112: 241–251.
- [17] SHAKOOR A, ZHANG C, XIE J, et al. Maillard reaction chemistry in formation of critical intermediates and flavour compounds and their antioxidant properties [J/OL]. Food Chem, 2022, 393: 133416[2024–05–13]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133416>.
- [18] WANG S, ADHIKARI K, HUNG Y C. Effects of short storage on consumer acceptability and volatile compound profile of roasted peanuts [J]. Food Packaging Shelf, 2017, 13: 27–34.
- [19] FU M, SHEN X, PENG H, et al. Identification of rancidity markers in roasted sunflower seeds produced from raw materials stored for different periods of time[J/OL]. LWT – Food Sci Technol, 2020, 118: 108721[2024–05–13]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108721>.
- [20] ZHOU Q, GENG F, DENG Q, et al. Dynamic analysis of polar metabolites and volatile compounds in sesame seeds during roasting[J]. Cereal Chem, 2019, 96(2): 358–369.
- [21] WAN Y, LI H, FU G, et al. The relationship of antioxidant components and antioxidant activity of sesame seed oil[J]. J Sci Food Agric, 2015, 95(13): 2571–2578.
- [22] LEE N Y, CHOI D H, KIM M G, et al. Biosynthesis of (R) – (–) – 1 – octen – 3 – ol in recombinant *Saccharomyces cerevisiae* with lipooxygenase – 1 and hydroperoxide lyase genes from *Tricholoma matsutake*[J]. J Microbiol Biotechnol, 2020, 30(2): 296–305.
- [23] OLMEDO R, RIBOTTA P, GROSSO N R. Oxidative stability, affective and discriminative sensory test of high oleic and regular peanut oil with addition of oregano essential oil[J]. J Food Sci Technol, 2018, 55(12): 5133–5141.
- [24] 邓金良, 刘玉兰, 肖天真, 等. 不同抗氧化剂对花生油和大豆油氧化稳定性及预测货架期的影响[J]. 中国油脂, 2019, 44(8): 35–40.
- [25] LESSCHAEVE I, NOBLE A C. Polyphenols: Factors influencing their sensory properties and their effects on food and beverage preferences [J]. Am J Clin Nutr, 2005, 81(1): 330S–335S.
-
- (上接第 19 页)
- [6] 高鸣, 魏佳朔. 加快建设国家粮食安全产业带: 发展定位与战略构想[J]. 中国农村经济, 2021(11): 16–34.
- [7] 王武林, 余翠婵, 税伟, 等. 中国种植业专业化发展的时空格局研究[J]. 地理研究, 2019, 38(5): 1265–1279.
- [8] 马晓蕾, 焦士兴, 张建伟, 等. 东北三省粮食主产区农业比较优势与增长优势时空演变研究[J]. 世界地理研究, 2022, 31(3): 602–612.
- [9] 郭佳君, 李茜. 增长极理论与农业产业空间布局研究[J]. 农学学报, 2021, 11(1): 85–90.
- [10] 肖卫东. 中国种植业地理集聚: 时空特征、变化趋势及影响因素[J]. 中国农村经济, 2012(5): 19–31.
- [11] 杨喆, 褚琳, 肖焱彬, 等. 2017—2021 年东北地区主要粮食作物覆盖类型时空演变及其影响因素[J]. 资源科学, 2023, 45(5): 966–979.
- [12] 杨万江, 陈文佳. 中国水稻生产空间布局变迁及影响因素分析[J]. 经济地理, 2011, 31(12): 2086–2093.
- [13] 高群, 柯杨敏, 曾明. 1978—2015 年中国糖料作物生产集中化水平变迁[J]. 经济地理, 2018, 38(11): 166–173.
- [14] 范筱元, 杜娟, 周晓亮, 等. 中国油茶生产区域比较优势分析与影响因素研究[J]. 中国油脂, 2023, 48(12): 9–19, 39.
- [15] 陶桂任, 梁世夫. 中国畜牧产业集聚时空特征及影响因素[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(5): 1–11.
- [16] 姚成胜, 李政通, 王维, 等. 中国水产养殖业地理集聚特征及空间演化机制[J]. 经济地理, 2016, 36(9): 118–127.
- [18] 周慧秋, 肖雪, 张雯丽, 等. 全球食用油料贸易格局演变及其对中国的启示[J]. 中国油脂, 2023, 48(12): 1–8, 25.
- [17] 王大鹏, 崔茂森. 山东省水果产业集群集中度和竞争力分析: 以烟台苹果、莱阳梨和大泽山葡萄为例[J]. 林业经济, 2020, 42(2): 83–92.
- [19] LORENZ M O. Methods of measuring the concentration of wealth[J]. J Am Stat Ass, 1905, 9(70): 209–219.
- [20] 柴玲欢, 朱会义. 中国粮食生产区域集中化的演化趋势[J]. 自然资源学报, 2016, 31(6): 908–919.