

芥酸含量差异对浓香菜籽油的脂肪酸组成、理化性质及风味品质的影响

吴苏喜¹ 李浩添¹ 何 静¹ 韩小苗^{1,2} 帅富成² 苗永军³ 董 喆¹

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 金健米业股份有限公司, 湖南 常德 415000;
3. 长沙吴瑞生物科技有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要: [目的] 探究芥酸含量对浓香菜籽油风味特征的影响, 明确其关键呈香物质及作用机制。[方法] 以 11 种不同芥酸含量的市售浓香菜籽油为对象, 测定其脂肪酸组成和基本理化指标(酸价、过氧化值和色泽), 利用电子鼻技术结合顶空固相微萃取—气相色谱—质谱联用技术(HS-SPME-GC-MS)对各样品中的挥发性风味物质进行了定性分析, 根据相对气味活度值筛选关键呈香物质, 对比不同芥酸含量样品的风味差异。[结果] 11 种样品的理化指标均符合国家标准。样品间的 W1W(硫化物)和 W2W(有机硫化物)传感器信号差异显著, 说明硫化物在菜籽油风味识别方面起主要作用。HS-SPME-GC-MS 共鉴定出 114 种挥发性化合物, 根据相对香气活度值筛选出 30 种关键呈香物质, 其中高芥酸菜籽油中硫代葡萄糖苷的降解产物(如 3-丁烯腈、甲基烯丙基氰化物、2,4-戊二烯腈、苯代丙腈等)含量更高, 赋予其更强烈的辛辣风味。而低芥酸菜籽油中的主要呈香物质为己醛, 呈现出明显的青草和水果风味。[结论] 高芥酸油因硫化物富集呈现出强烈辛辣风味, 低芥酸油因己醛优势表达青草果香。

关键词: 芥酸; 浓香菜籽油; 脂肪酸组成; 气相色谱—质谱法(GC-MS); 风味物质

Effect of erucic acid content difference on fatty acid composition, physicochemical properties, and flavor quality of fragrant rapeseed oil

WU Suxi¹ LI Haotian¹ HE Jing¹ HAN Xiaomiao^{1,2} SHUAI Fucheng² MIAO Yongjun³ DONG Zhe¹

(1. School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Jinjian Rice Industry Co., Ltd., Changde, Hunan 415000, China; 3. Changsha Haorui Biotechnology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410000, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effect of erucic acid content on the flavor characteristics of fragrant rapeseed oil and clarify the key aroma-active compounds and their action mechanisms. [Methods] Eleven commercial fragrant rapeseed oils with different erucic acid contents were selected as the research objects. Their fatty acid compositions and basic physicochemical indicators (acid value, peroxide value, and color) were determined. Electronic nose technology combined with headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) was used for the qualitative analysis of volatile flavor compounds in each sample. Key aroma-active compounds were screened out based on relative odor activity values, and the flavor differences among samples with different erucic acid contents were compared. [Results] The physicochemical indicators of all eleven samples conform to the national standards. There are significant differences in the sensor signals of W1W (targeting sulfides) and W2W (targeting organic sulfides) among samples, indicating that sulfides play a major role in flavor recognition of fragrant rapeseed oil. A total of 114 volatile compounds are identified via HS-SPME-

基金项目: 湖南省自然科学基金青年基金项目(编号:2024JJ6018); 长沙市自然科学基金项目(编号:kq2402011); 郴州市科技局市局项目(编号:2022sfq49)

通信作者: 韩小苗(1992—), 女, 长沙理工大学讲师, 博士。E-mail: hxm@csust.edu.cn

收稿日期: 2025-05-07 **改回日期:** 2025-11-04

引用格式: 吴苏喜, 李浩添, 何静, 等. 芥酸含量差异对浓香菜籽油的脂肪酸组成、理化性质及风味品质的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(1): 1-9.

Citation: WU Suxi, LI Haotian, HE Jing, et al. Effect of erucic acid content difference on fatty acid composition, physicochemical properties, and flavor quality of fragrant rapeseed oil[J]. Food & Machinery, 2026, 42(1): 1-9.

GC-MS, and 30 key aroma-active compounds are screened out based on relative odor activity values. Among them, the degradation products of glucosinolates (such as 3-butenenitrile, methylallyl cyanide, 2,4-pentadienenitrile, and phenylpropionitrile) are present in higher contents in high erucic acid rapeseed oil, endowing it with a stronger pungent flavor. In contrast, the main aroma-active compound in low erucic acid rapeseed oil is hexanal, which exhibits distinct grassy and fruity flavors. **[Conclusion]** High erucic acid oil exhibits a strong pungent flavor due to the enrichment of sulfides, while low erucic acid oil presents grassy and fruity aromas owing to the dominant presence of hexanal.

Keywords: erucic acid; fragrant rapeseed oil; fatty acid composition; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); aroma-active compound

根据近几年国民消费情况来看,以菜籽油和大豆油为主的食用植物油是消费者的主要食用油来源^[1]。菜籽油富含不饱和脂肪酸、多酚、植物甾醇、脂溶性维生素和胡萝卜素等营养成分,因其独特的风味和卓越的营养价值,深受消费者喜爱^[2-3]。随着生活品质的提高,消费者对食用油风味的追求日益呈现出多样化和个性化的趋势。

浓香菜籽油的风味特性主要源于其原料及加工过程中所经历的复杂化学反应,如美拉德反应与脂质氧化降解等,这些反应产生的挥发性化合物在风味形成中发挥着关键作用。Gracka等^[4]研究表明,烘焙过程中生成的挥发性化合物在不同菜籽种类之间具有一定的共性。然而,周琦等^[5]结合感官评价与气相色谱—嗅觉检测质谱(GC-O-MS)分析发现,菜籽油的风味特征与种植地区密切相关,不同产地的菜籽油呈现出独特的潜在风味标志物,强调了地理因素对风味形成的显著影响。Zhang等^[6]通过结合气相色谱—质谱(GC-MS)与电子鼻技术,运用主成分分析法,成功区分了不同地区市售菜籽油的风味差异,进一步佐证了地理区域对风味特性的决定作用。此外,Mao等^[7]研究指出,烘焙过程中菜籽油的挥发性化合物与葡萄糖异硫氰酸酯(GSL)含量的变化对风味产生显著影响,尤其是GSL的降解倾向于生成碳原子数较少的腈类物质,从而揭示了GSL降解在菜籽油风味形成中的关键作用。

芥酸(erucic acid)是一种长链不饱和脂肪酸,属于n-9脂肪酸类,广泛存在于十字花科植物的种子中,如油菜籽、芥菜籽等。作为传统高芥酸菜籽油的关键脂肪酸,其含量直接影响油的化学性质(氧化稳定性)和营养特性^[8]。此外,芥酸可能与油脂中的其他成分,如脂肪酸、硫苷、碳水化合物和蛋白质等相互作用,进而影响油的整体风味^[9]。初柏君等^[10]分析了不同芥酸含量的菜籽原料与浓香菜籽油中关键风味物质之间的关系,发现菜籽原料中的硫苷含量与“腌菜味”和“刺激味”密切相关,而碳水化合物和蛋白质的含量则与“烤香味”和“焦糊味”显著相关。然而,现有研究大多集中于菜籽油中硫苷对风味的影响,关于芥酸含量与挥发性风味物质之间关系的研究尚属较少。此外,芥酸作为潜在的风味调节因子,其含量

与挥发性风味物质之间的具体关联及对整体风味特征的影响,仍缺乏深入且系统的探讨。

为深入探讨芥酸含量对菜籽油风味特征的影响,明确芥酸与挥发性风味物质之间的关联及其在风味调控中的作用机制。研究拟选取浸出菜籽油和11种不同芥酸含量的市售浓香型菜籽油作为研究对象,采用电子鼻技术、顶空固相微萃取—气相色谱—质谱联用技术(HS-SPME-GC-MS)以及主成分分析(PCA)等多元统计方法,对菜籽油中的挥发性化合物进行鉴定和分析。

1 材料和方法

1.1 材料

1.1.1 原料和试剂

低芥酸浸出菜籽油(标记为1号样品,作为对照组)、11种浓香菜籽油(按芥酸含量由低到高依次标记为2~12号样品,制油工艺分别为小榨、小榨、压榨、压榨、小榨、压榨、压榨、小榨、压榨、小榨、压榨):市售热销产品且处于产品明示保质期内;

乙醇、石油醚、冰乙酸、异辛醇、异丙醇、氢氧化钠、碘化钾等:分析纯,湖南泽洋化玻仪器有限公司。

1.1.2 仪器

罗维朋比色计:WSL-A型,上海现科仪器有限公司;
电子鼻:PEN3型,德国AIRSENSE公司;
气相色谱仪:A00-201 PLUS型,日本岛津公司;
气相色谱—质谱联用仪:436GC/EVOQ TQ/PAL型,美国布鲁克科技有限公司;

色谱柱:DB-5MS型,安捷伦科技中国有限公司;
固相微萃取针:50/30 μm DVB/CAR/PDMS型,美国Supelco公司;

色谱柱:DB-Fast FAME型,安捷伦科技中国有限公司。

1.2 方法

1.2.1 脂肪酸组成分析 按GB 5009.168—2016《食品安全标准 食品中脂肪酸的测定》。气相色谱条件:使用DB-Fast FAME柱(30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm);升温程序为80 $^{\circ}\text{C}$ 保持0.5 min。以40 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至165 $^{\circ}\text{C}$ 保持1 min,再以2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至220 $^{\circ}\text{C}$ 保持2 min;分流比100:1;进样口温度250 $^{\circ}\text{C}$;检测器温度260 $^{\circ}\text{C}$;进样量1 μL 。

1.2.2 浓香菜籽油基础理化指标检测

(1) 酸价:按 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》执行。

(2) 过氧化值:按 GB 5009.227—2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》执行。

(3) 色泽:按 GB/T 22460—2008《动植物油脂 罗维朋色泽的测定》执行。

1.2.3 感官评价 参照郭浩昱等^[11]的方法,选择严格培训的6名成员(4男,2女)组成感官评价小组,样品提供数据为完全随机,样品风味描述指标由小组成员经过讨论后确定,有生青味、哈喇味、焦香味、烤香味、油脂味和辛辣味6个感官描述词,在标准感官评价测试环境下,对随机编码的样品进行描述打分,最终结果取平均值。

1.2.4 电子鼻分析 市售菜籽油的挥发性化合物通过 PEM3 电子鼻进行分析,该电子鼻包含由10个金属氧化半导体(W1C、W5S、W3C、W6S、W5C、W1S、W1W、W2S、W2W和W3S)组成的传感器阵列单元。用15 mL顶空瓶称取5 g菜籽油,该顶空瓶配有顶部开口的白色聚丙烯螺旋盖和聚四氟乙烯(PTFE)隔片,60℃水浴30 min,待顶部气体稳定后使用带管针头刺破瓶口密封,并以600 mL/min的速度抽取顶空区域的气体。每个样品重复3次^[12]。

1.2.5 HS-SPME-GC-MS 鉴定菜籽油挥发性风味成分

(1) 样品预处理:参照吴苏喜等^[13]的方法,量取5 g菜籽油样品和5 μ L 2-甲基-3-庚酮甲醇溶液(0.816 μ g/ μ L,内标物)于20 mL顶空瓶中,用隔垫密封,放入7694E顶空进样器中进行顶空固相微萃取(平衡温度60℃,平衡时间15 min;顶空吸附温度60℃,顶空吸附时间15 min;解吸温度250℃,解吸时间5 min),然后进行气质联用分析。

(2) 气相色谱条件:Rxi-5Sil MS色谱柱(30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m);升温程序为初始温度40℃,保持2 min,以5℃/min升到120℃,以12℃/min升至230℃,保持2 min;进样口温度250℃;载气为高纯氮气,流量1.0 mL/min;分流比1:10。

(3) 质谱条件:电子轰击离子源(EI),离子源温度250℃,四极杆温度150℃,传输线温度250℃,电子能量70 eV,扫描范围30~500。

1.2.6 挥发性化合物的ROAV值分析 挥发性化合物对整体风味的贡献由其在菜籽油中的浓度与气味阈值决定,挥发性化合物在菜籽油中浓度越高且气味阈值越低,代表其对菜籽油整体风味的贡献越大。因此,通过相对香气活性值(ROAV)来评价挥发性化合物对总体香气的贡献值。相对香气活性值的计算参照文献^[14]。

1.2.7 数据分析 差异显著性用图基HSD(tukey's

honestly significant difference)多重比较分析, $P<0.05$,差异显著,采用Origin 2021软件作图。

电子鼻数据利用自带的WinMuster软件对各挥发性成分的传感器响应值进行数据处理,采用Origin 2021软件制图。

HS-SPME-GC-MS试验数据采用MassHunter数据软件得到总离子流图,利用计算机检索NIST11标准质谱库,确定挥发性化合物成分,用峰面积归一化法计算各组分相对含量,采用Origin 2021软件制图。

2 结果与讨论

2.1 市售浓香菜籽油的脂肪酸组成分析

由图1可知,12种菜籽油的脂肪酸组成存在明显差异,但均符合GB/T 1536—2021《菜籽油》中规定的脂肪酸组成范围。具体而言,1~10号样品的芥酸含量均低于3%,因此被归类为低芥酸菜籽油,而11号和12号样品的芥酸含量则超过3%,归属于普通菜籽油类别,研究中称为高芥酸菜籽油。由图1还可知,随着芥酸含量的增加,菜籽油中的油酸含量呈下降趋势,而花生一烯酸含量不断上升,这是因为在高芥酸样品中,油酸是芥酸合成的直接前体,会被FAE1酶大量催化延长,进而促使花生一烯酸和芥酸不断累积^[15]。因此,油酸与芥酸含量的相关性可作为判断菜籽油是否掺伪的重要参考标准之一。

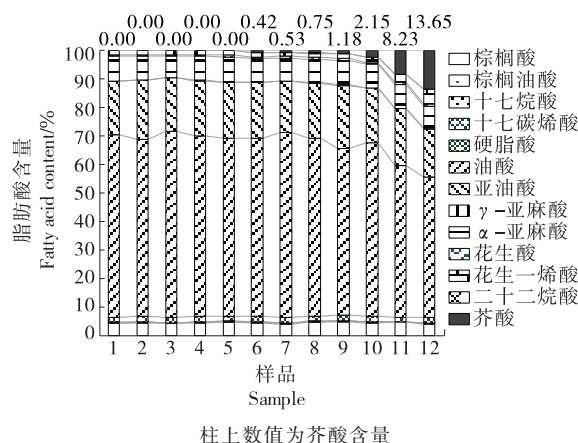


图1 12种菜籽油的脂肪酸组成

Figure 1 Fatty acid composition of 12 types of rapeseed oil

2.2 市售浓香菜籽油的理化性质

由表1可知,12种菜籽油样品的酸价和过氧化值均符合GB/T 1536—2021《菜籽油》的要求,酸价范围为0.59~1.90 mg/g,过氧化值范围为0.02~0.24 g/100 g。进一步分析发现,除1号样品外,4号、5号、6号、8号4种样品的酸价低于1.5 mg/g,且过氧化值低于0.125 g/100 g,符合国家一级菜籽油标准;其余样品的酸价低于3.0 mg/g,且过氧

化值低于 0.250 g/100 g, 满足国家二级菜籽油标准。这表明大部分市售菜籽油产品的氧化稳定性和品质较高, 能够达到国家标准的要求。

值得注意的是, 低温压榨的菜籽油样(3号)酸价最低, 其次酸价较低的样品主要集中在小榨处理的菜籽油(6号和9号), 究其原因在于低温环境能够延缓油脂的氧化反应, 降低酸价升高的风险, 而小榨工艺通常指小规模、传统式压榨, 其加工流程简单, 从原料处理到出油周期较短, 减少了油脂与外界的长期接触, 降低了氧化风险^[16]。此外, 在相同的加工工艺下, 酸价较高的样品主要集中在芥酸含量较高的菜籽油中, 原因在于芥酸的长链结构及其特定的双键位置使其稳定性低于油酸等短链不饱和脂肪酸, 在油脂加工和贮藏过程中更易发生氧化和水解反应导致酸价偏高。

与对照组的浸出菜籽油相比, 浓香菜籽油呈现出更深的色泽, 这主要归因于两方面: ① 在浓香菜籽油的加工过程中, 由于过度炒籽或高温处理, 发生美拉德反应、焦糖化反应等复杂化学反应, 产生了大量深色化合物, 进而使油脂颜色加深^[17]; ② 浓香菜籽油的加工工艺更注重保留油脂的天然特性, 精炼过程中未经过脱色处理, 保留了更多天然色素成分^[18]。这一特性在芥酸含量较高的样品中尤为明显, 进一步突出了高芥酸菜籽油在风味和感官特性方面的独特性。

2.3 浓香菜籽油的感官评价

由图2可知, 市售浓香菜籽油的主要风味特征集中于烤香味和焦香味, 而浸出菜籽油(1号样品)的生青味更加

明显。这可能是由于浸出工艺对风味前体物质的转化程度较低, 未能充分形成浓香菜籽油特有的风味物质。

结合脂肪酸组成分析, 随着芥酸含量的增加, 浓香菜籽油的辛辣风味呈现出明显的增强趋势。这一现象表明高芥酸菜籽油中辛辣风味物质更加丰富, 可能与芥酸含量对硫代葡萄糖苷降解产物的影响有关, 凸显了高芥酸菜籽油在风味特征上的独特性^[19]。相反, 低芥酸菜籽油辛辣味相对较弱, 整体风味更为细腻柔和, 与烤香和焦香味形成了较好的平衡。芥酸含量的差异对菜籽油的风味特征, 尤其是辛辣和烤香风味的表达起到了关键作用。

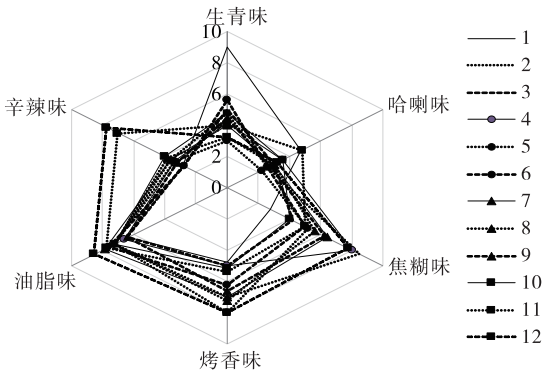


图2 不同芥酸含量浓香菜籽油的感官分析雷达图
Figure 2 Radar chart of sensory evaluation of fragrant rapeseed oil with different erucic acid contents

2.4 电子鼻数据分析

如图3所示, 各传感器对浓香菜籽油样品的响应值呈现出明显的差异, 反映了不同浓香菜籽油样品间挥发性成分的组成及含量存在显著差异, 进而对其整体风味特性产生不同影响^[20]。其中, W1W(硫化物)和W2W(有机硫化物)传感器的响应值最高, 尤其在含高芥酸含量的菜籽油样品中, 响应值表现尤为突出, 说明含硫化合物对浓香菜籽油风味的贡献最大, 并在区分不同芥酸含量的菜籽油样品中起到关键作用^[21]。相比之下, W5S(氮氧化合物)传感器的响应值较低, 表明含氮化合物(如吡嗪、吡咯和吡啶)对浓香菜籽油的整体风味贡献相对较小。与其他研究^[22-23]中浓香菜籽油含硫和含氮化合物传感器响应值较高的结论略有差异, 可能与样品来源、加工工艺及脂肪酸组成等因素相关。

如图4所示, PCA分析中前两个主成分(PC1和PC2)的累计方差贡献率为0.676(PC1为0.477, PC2为0.199), 表明这两个主成分能够解释样品中67.6%的风味信息, 涵盖了大部分菜籽油样品风味特征。不同点的远近代表相似性高低, 相同点的离散程度代表相同样品的均一

表1 不同芥酸含量浓香菜籽油的理化指标[†]
Table 1 Physicochemical indicators of fragrant rapeseed oil with different erucic acid contents

样品	酸价/ (mg·g ⁻¹)	过氧化值/ (10 ⁻² g·g ⁻¹)	色泽		
			黄	红	灰
1	1.17±0.02 ^{bc}	0.02±0.01 ^f	3.0	0.2	0.0
2	1.52±0.03 ^a	0.07±0.01 ^{def}	6.8	1.9	0.5
3	0.59±0.04 ^e	0.15±0.01 ^b	6.4	2.1	0.5
4	1.10±0.05 ^c	0.05±0.01 ^{ef}	6.2	1.8	0.4
5	1.09±0.03 ^c	0.07±0.01 ^{def}	6.5	0.5	0.5
6	0.62±0.01 ^e	0.11±0.01 ^{cd}	5.6	1.7	0.4
7	1.30±0.02 ^b	0.14±0.01 ^{bc}	6.5	1.9	0.4
8	0.90±0.02 ^d	0.06±0.01 ^{def}	6.0	1.6	0.4
9	0.72±0.03 ^e	0.24±0.01 ^a	6.0	1.7	0.4
10	1.53±0.01 ^a	0.10±0.01 ^{cde}	6.7	2.0	0.4
11	1.33±0.05 ^b	0.24±0.01 ^a	6.8	1.8	0.4
12	1.58±0.02 ^a	0.20±0.01 ^{ab}	6.6	1.9	0.4

[†] 同列小写字母不同代表具有显著差异(P<0.05)。

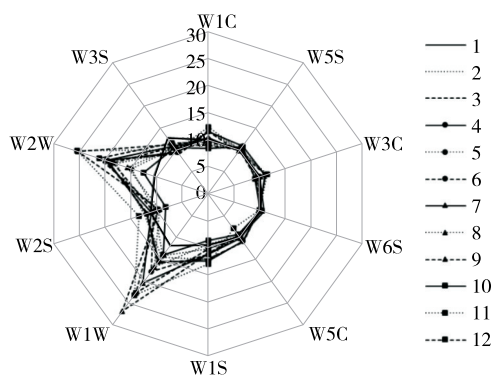


图3 不同芥酸含量浓香菜籽油的电子鼻雷达图

Figure 3 Electronic nose radar chart of fragrant rapeseed oil with different erucic acid contents

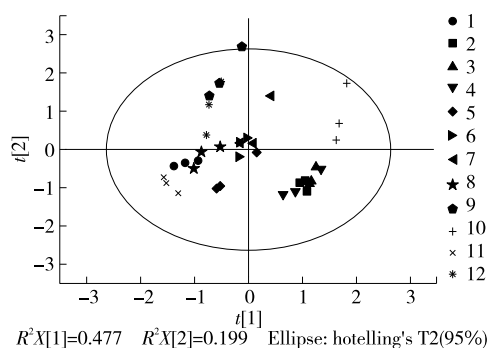


图4 不同芥酸含量浓香菜籽油基于电子鼻传感器响应值的样品分布图

Figure 4 Distribution of fragrant rapeseed oil samples with varying erucic acid content based on electronic nose sensor responses

性^[24]。PCA的结果清晰地展示了不同厂家生产的浓香菜籽油样品之间的差异性,可将样品分为3个主要区域:1号、4号、7号、10号4种样品位于第三象限,2号、3号、6号3种样品位于第四象限,其余菜籽油样品皆位于第一和第二象限。该结果表明,低芥酸菜籽油与高芥酸菜籽油在风味特征上可以实现显著区分,进一步证实了芥酸含量是影响菜籽油风味特性的重要因素。

2.5 有机挥发性化合物组成

采用HS-SPME-GC-MS技术对不同芥酸含量的菜籽油挥发性香气成分进行鉴定,在12种菜籽油中共检测出114种挥发性化合物,包括11种醛类、5种醇类、13种酮类、21种酯类、6种酸类、6种烷烃类、19种杂环类、10种腈类、4种硫化物、6种烯类、4种硅氧烷类以及9种其他化合物。这些化合物的组成和含量变化对菜籽油的风味特征产生了显著影响,并与菜籽油的芥酸含量密切相关。

如图5所示,菜籽油的挥发性化合物组成随着芥酸含

量的增加呈现出显著变化。特别是11号和12号高芥酸菜籽油样品的挥发性化合物总量远高于其他样品,达到60 $\mu\text{g/g}$ 以上,表明高芥酸含量的菜籽油中富含更多的挥发性风味物质,具有更为浓郁的香气。这一现象表明,芥酸含量不仅影响菜籽油的脂肪酸组成,还对其挥发性风味物质的生成与积累起到重要的调控作用。

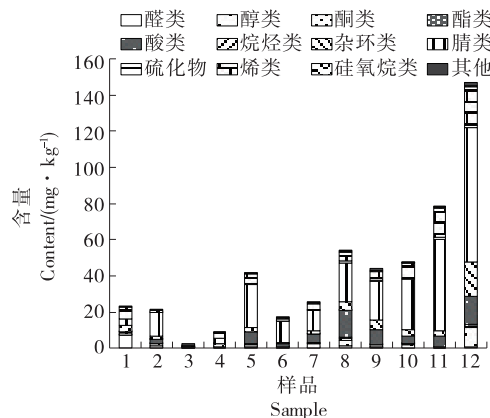


图5 不同芥酸含量浓香菜籽油的挥发性化合物含量

Figure 5 Volatile compound content of fragrant rapeseed oil with different erucic acid levels

硫化物和腈类化合物是菜籽油风味的重要贡献者,通常由硫代葡萄糖苷的降解产物形成。硫代葡萄糖苷的降解产物赋予了菜籽油独特的辛辣和刺激性的风味,因其较低的气味阈值对浓香菜籽油具有极高的风味贡献^[25]。高芥酸菜籽油(11号和12号样品)中硫化物和腈类化合物的含量显著高于低芥酸菜籽油,其原因在于高芥酸的油菜籽可能倾向于含有高浓度的硫代葡萄糖苷,这一特性强化了高芥酸菜籽油的辛辣和刺激性风味^[6]。杂环类化合物主要由美拉德反应形成,是赋予菜籽油烤香、焦香风味的关键物质^[26]。杂环类化合物在高芥酸菜籽油中的含量也显著高于低芥酸菜籽油,推测高芥酸菜籽油在高温炒制和加工过程中更容易产生杂环类化合物,从而增强了浓香菜籽油的独特烤香风味。

2.6 浓香菜籽油关键风味物质分析

计算各挥发性化合物的相对香气活性值发现,共有30种挥发性化合物的ROAV ≥ 1 ,视为对菜籽油整体风味具有显著贡献的关键挥发性化合物,其中包含7种醛类、2种酮类、2种酯类、1种酸类、1种烷烃类、9种杂环类、4种腈类和4种硫化物。

由表2可知,在低芥酸菜籽油样品(1号、3号和4号样品)中,挥发性风味成分以醛类为主,尤其是己醛对风味贡献最大,为菜籽油提供脂肪、水果和青草等清香风味^[27]。这表明低芥酸菜籽油更倾向于清香型风味,这种

表 2 不同芥酸含量浓香菜籽油关键风味物质 (ROVA ≥ 1)
Table 2 Key aroma-active compounds of fragrant rapeseed oil with different erucic acid contents (ROVA ≥ 1)

名称	物质分 类	香气 描述	香气阈值/ (mg·kg ⁻¹)	样品											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2-甲基丙醛	醛类		0.043	<1.00	7.13	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00
3-甲基丁醛	醛类	麦芽、桃、脂肪	0.013	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	100.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00
戊醛	醛类	青草、花香、脂肪	0.24	1.77	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00
己醛	醛类	脂肪、青草、水果	0.073	100.00	29.66	100.00	100.00	8.28	16.58	47.60	11.60	13.97	10.27	5.43	5.43
庚醛	醛类	脂肪、柑橘、酸败、	0.05	7.43	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00
辛醛	醛类	脂肪、柑橘、柠檬	0.32	1.22	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00
壬醛	醛类	脂肪、柑橘、青草	0.15	2.55	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00
1-羟基-2-丙酮	酮类	甜、焦糖	0.12	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	48.83	<1.00	<1.00	15.66	26.73	<1.00	<1.00	<1.00
甲基庚烯酮	酮类	胡椒、蘑菇、苹果	1	1.50	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00
丁位己内酯	酯类	椰子香味	0.23	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	6.57
乙酸酐	酯类	酸败、醋	0.6	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	1.70	<1.00	2.65	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00
乙酸	酸类	酸败、刺激	0.5	<1.00	28.15	<1.00	<1.00	64.37	31.91	82.08	45.61	73.57	29.37	23.91	40.21
正己烷	烷烃类		1.5	1.76	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00
2-甲基吡嗪	杂环类	爆米花	0.25	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	3.01	<1.00	7.87	1.09	<1.00	<1.00	<1.00	5.41
糠醛	杂环类	杏仁、烤面包	3	<1.00	1.09	3.77	<1.00	1.75	<1.00	2.06	1.43	6.90	2.68	1.48	5.78
糠醇	杂环类	甜、香草、烘烤	0.68	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	1.50	<1.00	2.82	1.07	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00
2,5-二甲基吡嗪	杂环类	坚果、烘烤、土豆	2	<1.00	2.52	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	1.72	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	1.40
5-甲基呋喃醛	杂环类	杏仁、焦糖	0.26	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	9.04	1.15	12.69	7.10	14.92	5.52	<1.00	15.80
2-乙基-5-甲基吡嗪	杂环类	水果、甜、烘烤、坚果、青草、咖啡	0.32	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	2.80
2,3,5-三甲基吡嗪	杂环类	烘烤、泥土、坚果	0.29	<1.00	1.64	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	1.91
2,6-二乙基吡嗪	杂环类	坚果、榛子	0.006	<1.00	100.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	4.46	<1.00	47.43	<1.00	<1.00
3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	杂环类	焦糖、泥土、坚果、烘烤、可可、土豆	0.079	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	7.95
3-丁烯醇	醇类	金属、辛辣	0.897	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	9.68	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	22.50
甲基烯丙基氧化物	醇类	辛辣	1	3.76	93.12	16.09	50.90	100.00	100.00	100.00	32.61	100.00	100.00	100.00	83.14
2,4-戊二烯醇	醇类	辛辣、刺激	0.02	<1.00	<1.00	18.42	<1.00	<1.00	<1.00	7.03	1.60	<1.00	1.64	3.94	25.12
苯代丙醇	醇类	辛辣、金莲花	0.015	<1.00	24.06	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	11.67	<1.00	8.12	<1.00	33.07	100.00
二硫化碳	硫化物	甜、醚	1	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	2.72	<1.00	<1.00	1.38	1.11	1.71	2.42	1.70
二甲基二硫醚	硫化物	洋葱、卷心菜	0.05	<1.00	1.72	<1.00	<1.00	<1.00	3.48	3.02	<1.00	<1.00	4.94	<1.00	5.26
二甲基三硫	硫化物	肉味、硫味	0.002	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	96.62	<1.00	58.07
异硫氰酸烯丙酯	硫化物	硫磺、辛辣、大蒜	0.004 6	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	35.24

特征可能是由于低温或短时间的热处理,或较高的精炼程度,使醛类物质得以保留。相比之下,随着芥酸含量的升高,高芥酸菜籽油中的己醛浓度及其ROAV值显著降低,风味中的清香特征逐渐减弱,而辛辣和烘烤风味的腈类和杂环类物质的ROAV值明显增加,表现出更浓郁的辛辣和烤香风味。

高芥酸样品(11号和12号样品)中,甲基烯丙基氰化物(辛辣)、2,4-戊二烯腈(辛辣、刺激)等腈类物质的ROAV值明显增加,这些物质赋予了高芥酸菜籽油独特的辛辣风味特征。同时,二甲基三硫等硫化物含量在高芥酸菜籽油中显著增加,带来了更为浓郁的肉味、硫味和大蒜风味,这一结果说明高芥酸菜籽油中含有更多的硫代葡萄糖苷降解产物,与其他研究^[28]中发现高芥酸菜籽油中腈类物质和硫化物的相对气味活度值显著高于低芥酸菜籽油的结果一致。此外,杂环类化合物如2,6-二乙基

吡嗪、5-甲基呋喃醛在高芥酸菜籽油中的ROAV值显著升高,增强了坚果、焦糖和烤香风味。这表明高芥酸含量能够显著促进美拉德反应,提高美拉德反应产物的生成量,从而强化高芥酸菜籽油的烘烤和辛辣风味。

如图6所示,菜籽油中的芥酸含量与杂环类物质、腈类物质以及硫化物呈显著正相关,而与氧化挥发物(如醛类、酮类、酯类)呈显著负相关,这与Zhang等^[6]发现芥酸含量与硫代葡萄糖苷降解产物存在正相关的结果一致,说明芥酸含量增加会使硫代葡萄糖苷降解产物增多,进而致使腈类物质含量上升,进一步证实了芥酸含量对菜籽油整体风味具有重要影响。相关性分析结果表明,芥酸含量的增加显著促进了辛辣、刺激和烘烤风味的挥发性化合物的生成,同时抑制了醛类等提供青草、水果和脂肪风味的氧化挥发物的形成,这一现象与感官评价和电子鼻分析结果高度一致。

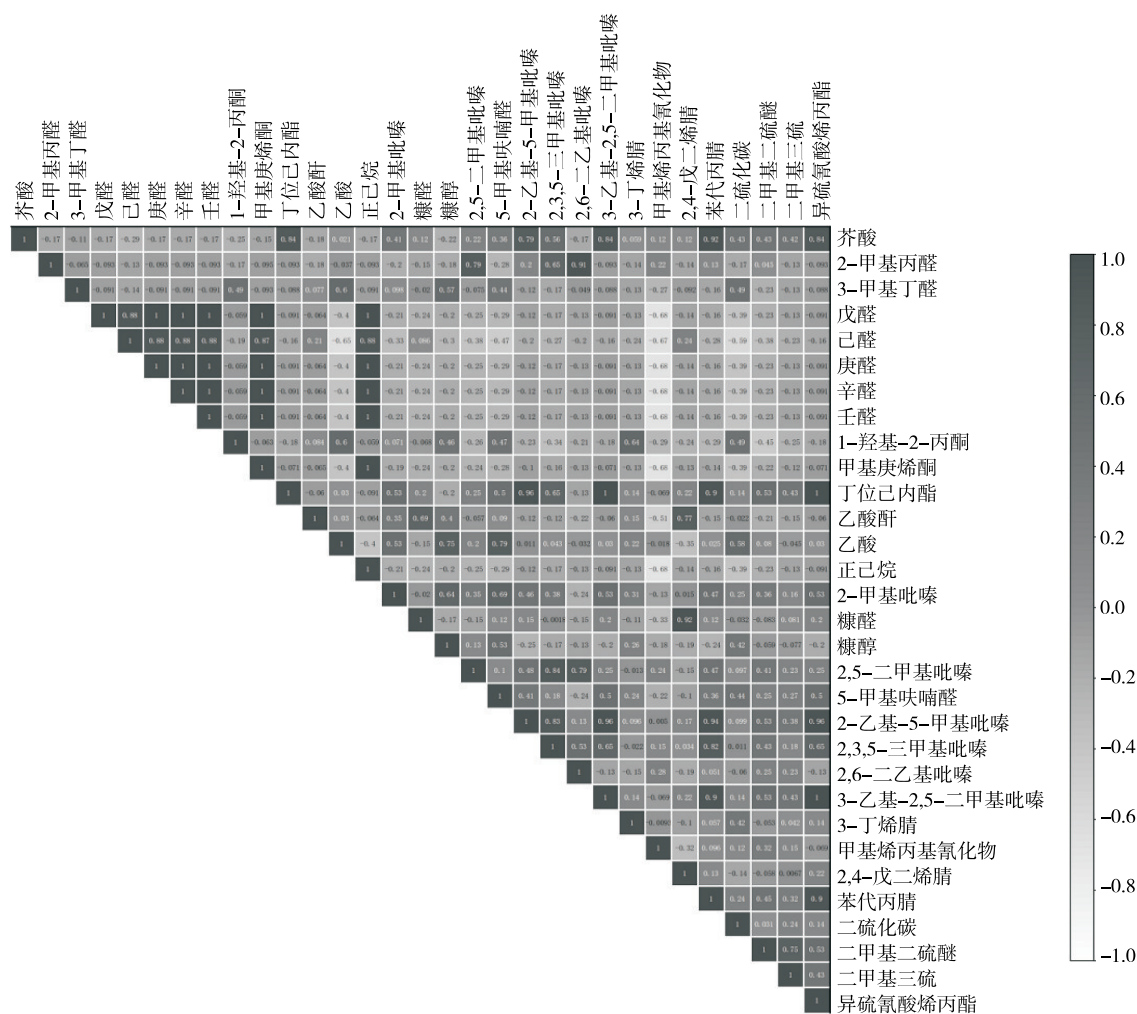


图6 基于关键性挥发性化合物ROAV值的相关性图绘制

Figure 6 Correlation plot based on ROAVs of key volatile compounds

综上所述,芥酸含量与菜籽油风味之间存在明确的关联,低芥酸菜籽油呈现出清香、果香和青草等清淡风味,而高芥酸菜籽油则呈现出辛辣、刺激和烘烤等浓郁风味。这种风味差异与挥发性风味物质的组成变化密切相关,芥酸含量的升高促进了腈类、硫化物和杂环类化合物的生成,抑制了醛类等氧化挥发物风味的表达。

3 结论

菜籽油风味是消费者选择浓香菜籽油的关键指标,研究所选市售浓香菜籽油样品均符合国家标准。感官评价显示,高芥酸菜籽油较低芥酸菜籽油呈现更明显的辛辣风味。电子鼻分析进一步验证了这一结果,表明高芥酸菜籽油中硫代葡萄糖苷降解产物(如腈类和硫化物)含量较高,凸显出其辛辣风味。顶空固相微萃取—气相色谱—质谱联用技术分析发现,高芥酸菜籽油中赋予青草和水果风味的己醛相对香气活性值较低,而辛辣风味的腈类和烤香风味的杂环类化合物相对香气活性值明显升高,与高芥酸含量密切相关。结合脂肪酸组成与风味分析可知,芥酸含量对菜籽油风味具有调控作用,高芥酸菜籽油因其脂肪酸组成,更易生成辛辣和烤香风味的挥发性化合物,呈现独特风味;而低芥酸菜籽油则因较高的油酸和亚油酸含量,表现出清香和果香风味。综上,芥酸含量通过影响菜籽油中挥发性风味化合物的种类与含量,实现对其整体风味的调控,使高芥酸与低芥酸菜籽油呈现截然不同的风味风格。

参考文献

- [1] 杨文光,汪晶晶,张蓓. 粮食安全视角下食用植物油产业发展现状、挑战与前景展望[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(4): 91-97.
YANG W G, WANG J J, ZHANG B. Development status, challenges, and prospects of edible vegetable oil industry from the perspective of food security[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(4): 91-97.
- [2] 余顺波,陈长艳,张品,等. 11种食用植物油的脂肪酸组成及主要营养成分含量[J]. 贵州农业科学, 2022, 50(7): 113-120.
YU S B, CHEN C Y, ZHANG P, et al. Fatty acid composition and main nutritional components of 11 edible vegetable oils[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2022, 50(7): 113-120.
- [3] GANESAN K, SUKALINGAM K, XU B J. Impact of consumption and cooking manners of vegetable oils on cardiovascular diseases- a critical review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 71: 132-154.
- [4] GRACKA A, JELEN H H, MAJCHER M, et al. Flavoromics approach in monitoring changes in volatile compounds of virgin rapeseed oil caused by seed roasting[J]. Journal of Chromatography A, 2016, 1 428: 292-304.
- [5] 周琦,郑畅,万楚筠,等. 不同种植区域双低品种浓香菜籽油的呈香特征[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 287-295.
- [6] ZHOU Q, ZHENG C, WAN C Y, et al. Aroma characteristics of double-low fragrant rapeseed oils from different planting areas [J]. Food Science, 2023, 44(22): 287-295.
- [7] ZHANG Y F, WU G C, CHANG C, et al. Determination of origin of commercial flavored rapeseed oil by the pattern of volatile compounds obtained via GC-MS and flash GC electronic nose[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2020, 122(3): 1900332.
- [8] MAO X H, ZHAO X Z, HUYAN Z, et al. Relationship of glucosinolate thermal degradation and roasted rapeseed oil volatile odor[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(40): 11 187-11 197.
- [9] SCHWARZINGER B, FEICHTINGER M, BLANK-LANDESHAMMER B, et al. Quick determination of erucic acid in mustard oils and seeds[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2022, 164: 105523.
- [10] ZHANG Y F, ZHEN C, ZHAO B X, et al. Comparative characterization of key odorants and aroma profiles of fragrant rapeseed oil under different roasting conditions[J]. Food Research International, 2023, 163: 112195.
- [11] 初柏君,扈柏文,李晓龙,等. 不同品种菜籽原料与浓香菜籽油风味品质的相关性[J]. 食品科学, 2022, 43(14): 272-279.
CHU B J, HU B W, LI X L, et al. Correlation between different varieties of rapeseed and the flavor of fragrant rapeseed oil[J]. Food Science, 2022, 43(14): 272-279.
- [12] 郭浩昱,段卓,黎丽华,等. 浓香菜籽油感官评价方法研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(7): 60-62, 72.
GUO H Y, DUAN Z, LI L H, et al. Study on sensory evaluation method of fragrant rapeseed oil[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(7): 60-62, 72.
- [13] 付群梅,蒋涵,唐华,等. 微波处理对菜籽油风味的影响[J]. 中国油脂, 2024, 49(6): 58-64, 97.
FU Q M, JIANG H, TANG H, et al. Effect of microwave treatment on rapeseed oil flavor[J]. China Oils and Fats, 2024, 49(6): 58-64, 97.
- [14] 吴苏喜,黄艳慧,吴优,等. 不同热处理压榨油茶籽油的风味差异研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(11): 14-20.
WU S X, HUANG Y H, WU Y, et al. Flavor differences of pressed oil-tea camellia seed oils with different heat treatments [J]. China Oils and Fats, 2020, 45(11): 14-20.
- [15] HAN Y B, YOU M Y, WANG S, et al. Enzymatic methods for the preparation of fragrant rapeseed oil: effect of reducing sugars on flavor production using the Maillard reaction[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 189: 115497.
- [16] CAO X, PAN Y Y, QIAO M, et al. Synthesis of human milk fat substitutes based on enzymatic preparation of low erucic acid acyl-donors from rapeseed oil[J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132907.
- [17] HOU N C, GAO H H, QIU Z J, et al. Quality and active

- constituents of safflower seed oil: a comparison of cold pressing, hot pressing, Soxhlet extraction and subcritical fluid extraction[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2024, 200: 116184.
- [17] 李东科. 不同产地菜籽油色泽及脂肪酸组成差异分析[J]. *粮油仓储科技通讯*, 2023, 39(3): 53-55.
- LI D K. Analysis of differences in color and fatty acid composition of rapeseed oil from different producing areas[J]. *Liangyou Cangchu Keji Tongxun*, 2023, 39(3): 53-55.
- [18] 张友峰. 木榨菜籽油品质与安全控制技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017: 5-11.
- ZHANG Y F. Study on wood-pressed rapeseed oil quality and safety control technology[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017: 5-11.
- [19] ZHANG L Y, CHEN J, ZHAO X Z, et al. Influence of roasting on the thermal degradation pathway in the glucosinolates of fragrant rapeseed oil: implications to flavour profiles[J]. *Food Chemistry: X*, 2022, 16: 100503.
- [20] MOHD ALI M, HASHIM N, ABD AZIZ S, et al. Principles and recent advances in electronic nose for quality inspection of agricultural and food products[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 99: 1-10.
- [21] 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]. *Journal of Food Biochemistry*, 2019, 43(10): e12786.
- [22] ZHANG W W, FU Q M, JIANG H, et al. Insight into the microwave pretreatment of rapeseeds on the flavor characteristics of rapeseed oils[J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2023, 184: 115045.
- [23] 韩小苗, 吴苏喜, 吴美芳, 等. 不同工艺制取的茶籽油挥发性风味成分分析[J]. *中国油脂*, 2018, 43(1): 39-42.
- HAN X M, WU S X, WU M F, et al. Detection of volatile flavor compounds in oil-tea camellia seed oils prepared by different processes[J]. *China Oils and Fats*, 2018, 43(1): 39-42.
- [24] 孙海燕, 郝丹青, 李新生, 等. 不同品种及产地鲜天麻挥发性物质差异性分析[J]. *食品与机械*, 2022, 38(4): 58-64.
- SUN H Y, HAO D Q, LI X S, et al. Differential analysis of volatile substances in fresh *Gastrodia elata* from different varieties and origin[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(4): 58-64.
- [25] 张谦益, 包李林, 熊巍林, 等. 不同产地浓香菜籽油中特征风味物质的研究[J]. *中国油脂*, 2018, 43(8): 23-28.
- ZHANG Q Y, BAO L L, XIONG W L, et al. Characteristic flavor substances of fragrant rapeseed oils from different regions[J]. *China Oils and Fats*, 2018, 43(8): 23-28.
- [26] 毛晓慧. 炒籽过程中浓香菜籽油产香机制的研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2020: 16-19.
- MAO X H. Study on the aroma production mechanism of fragrant rapeseed oil during roasting[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2020: 16-19.
- [27] 李官丽, 吴秋月, 陈锡霞, 等. 干燥方式对油茶粉品质及挥发性风味物质的影响[J]. *食品与机械*, 2024, 40(3): 210-216.
- LI G L, WU Q Y, CHEN X X, et al. Effects of drying methods on the quality and volatile flavor compounds of oil tea powder [J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(3): 210-216.
- [28] LIANG Q, XIONG W, ZHOU Q, et al. Glucosinolates or erucic acid, which one contributes more to volatile flavor of fragrant rapeseed oil?[J]. *Food Chemistry*, 2023, 412: 135594.