DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260413007
引用格式: 李仁波, 肖培瑞, 张怀霞, 等. 西兰花籽油和芽油脂肪酸组成及挥发性物质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(18): 78–86.
Li Renbo, Xiao Peirui, Zhang Huaixia, et al. Analysis of fatty acid composition and volatile compounds in *Brassica oleracea var. italica* seeds oil and sprouts oil [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(18): 78–86. (in Chinese with English abstract).

西兰花籽油和芽油脂肪酸组成及挥发性物质分析

李仁波[1#], 肖培瑞[1#], 张怀霞[2], 刘时宇[2], 孟繁耀[2], 张天亮[1], 徐立荣[2], 程学美[1*]

(1. 山东省疾病预防控制中心, 山东省预防医学科学院, 国家卫生健康委食品安全风险评估与标准研制特色实验室, 济南 250014; 2. 青岛大学公共卫生学院, 青岛 266071)

摘 要: 目的 对西兰花籽油和芽油保湿率、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-trinitrophenylhydrazine, DPPH)自由基清除率、脂肪酸含量以及挥发性物质组成进行测定。**方法** 采用气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)分析西兰花籽油和芽油的脂肪酸及挥发性物质组成。**结果** 西兰花籽油脂肪酸组成主要为芥酸(31.94%)、油酸(31.28%), 其中不饱和脂肪酸含量为 84.07%。芽油脂肪酸组成主要为芥酸(29.43%)、油酸(29.62%), 其中不饱和脂肪酸含量为 85.21%。此外, 在西兰花籽油中检测出 57 种化合物, 其中醇类有 15 种, 是种类最多、含量最高的化合物。醇类中含量较高的是古巴醇、丙醇、丁醇等, 乙醇则含量较低。丙氨酸叔丁酯是酯类中含量最高的, 醛类物质只有己醛、壬醛和 2-丙烯醛 3 种。而芽油含有 26 种化合物, 相较于籽油缺乏烯烃类物质。芳香族化合物有 6 种, 是芽油中种类最多、含量最高的挥发性物质。其中含量最高的芳香族化合物是 1-苄基吲哚。同时发现西兰花籽油还具有保湿和 DPPH 自由基清除的功效。其中西兰花籽油对 DPPH 自由基的清除能力呈明显剂量效应, 当质量分数为 10%时清除率可达 97%。**结论** 西兰花籽油和芽油具有较高的安全性和独特的风味, 可进一步开发利用。

关键词: 西兰花籽油; 西兰花芽油; 脂肪酸; 挥发性物质; 气相色谱-质谱法
中图分类号: R151.3 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)18–0078–09

Analysis of fatty acid composition and volatile compounds in *Brassica oleracea var. italica* seeds oil and sprouts oil

LI Ren-Bo[1#], XIAO Pei-Rui[1#], ZHANG Huai-Xia[2], LIU Shi-Yu[2], MENG Fan-Yao[2], ZHANG Tian-Liang[1], XU Li-Rong[2], CHENG Xue-Mei[1*]

(1. *Shandong Center for Disease Control and Prevention*, *Shandong Provincial Academy of Preventive Medicine*, *National Health Commission Specialty Laboratory of Food Safety Risk Assessment and Standard Development*, *Ji'nan* 250014, *China*; 2. *School of Public Health*, *Qingdao University*, *Qingdao* 266071, *China*)

收稿日期: 2026-04-13
基金项目: 国家营养标准体系建设子项目(20232004); 山东省医药卫生项目(202412020343); 齐鲁卫生与健康领军人才项目; 山东省疾病预防控制中心营养与环境健康创新高水平工作室项目
#李仁波和肖培瑞为共同第一作者

第一作者: 李仁波(1983—), 男, 副主任技师, 主要研究方向为化学物质监测与评价。E-mail: lirenbocdc@163.com
肖培瑞(1984—), 男, 副主任医师, 主要研究方向为食品安全。E-mail: 258644007@qq.com
***通信作者:** 程学美(1975—), 女, 博士, 主任医师, 主要研究方向为营养与环境健康流行病学。E-mail: meixuecheng@126.com

ABSTRACT: Objective To determine the moisture retention rate, 1,1-diphenyl-2-trinitrophenylhydrazine (DPPH) free radical scavenging rate, fatty acid content and volatile components composition of the *Brassica oleracea var. italica* seeds oil and sprouts oil respectively. **Methods** Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was employed to analyze the fatty acid profiles and volatile constituents of *Brassica oleracea var. italica* seeds oil and sprouts oil. **Results** The main fatty acids in *Brassica oleracea var. italica* seeds oil were erucic acid (31.94%) and oleic acid (31.28%), with a total unsaturated fatty acid content of 84.07%. For sprouts oil, the predominant fatty acids were erucic acid (29.43%) and oleic acid (29.62%), and the total unsaturated fatty acid content reached 85.21%. In addition, 57 kinds of compounds were identified in *brassica oleracea var. italica* seeds oil. Alcohols were the most abundant class both in species and content, with 15 kinds of alcohol compounds detected; cubanol, propanol and butanol were the major alcohols, while ethanol was present at a low level. Tert-butyl alaninate was the most abundant ester. Only 3 kinds of aldehydes, namely hexanal, nonanal and 2-propenal, were detected. By contrast, 26 kinds of volatile compounds were identified in sprouts oil, which lacked olefins compared with seeds oil. Aromatic compounds were the most diverse and abundant components in sprouts oil, with 6 kinds of species detected, among which 1-benzylindole was the most dominant. Meanwhile, *Brassica oleracea var. italica* seeds oil also exhibited moisturizing and strong DPPH radical scavenging activity. The ability of *Brassica oleracea var. italica* seed oil to scavenge DPPH free radicals showed a significant dose-dependent effect. When the mass fraction was 10%, the scavenging rate could reach 97%. **Conclusion** *Brassica oleracea var. italica* seeds oil and sprouts oil possess high safety and distinctive flavors, supporting their further development and utilization.

KEY WORDS: *Brassica oleracea var. italica* seeds oil; *Brassica oleracea var. italica* sprouts oil; fatty acids; volatile compounds; gas chromatography-mass spectrometry

0　引　言

西兰花(*Brassica oleracea var. italica*)作为十字花科重要蔬菜作物, 其营养价值与功能活性成分日益受到健康食品与生物医药领域的关注[1]。除常见食用部位外, 西兰花种子及新芽作为硫代葡萄糖苷及其水解产物萝卜硫素的高富集部位[2], 具有显著的抗氧化[3]、抗癌及代谢调节潜力, 相关油脂的提取与成分解析对功能脂质资源的开发利用具有重要意义[4–5]。

目前, 西兰花籽油与芽油作为潜在的功能性油脂, 虽已在保健和护肤领域展现出应用前景[6–7], 但国内外研究多集中于药理活性观察[8–10], 缺乏对两类油脂理化性质的系统性比较分析。目前, 西兰花籽油的脂肪酸组成研究有一定报道, 袁芳豪等[11]从种子油中鉴定出 43 种甘油三酯, 芥酸在脂肪酸中占比达 53.13%, 黄忆真等[12]超临界 CO_2 萃取籽油中不饱和脂肪酸总量超 92%。目前缺乏对西兰花芽油脂肪酸组成的研究, 且迄今缺乏对两类油脂脂肪酸组成及挥发性风味物质的系统性比较, 特别是在脂肪酸组成与挥发性风味物质方面的基础数据尚不完善, 制约了相关产品标准化开发与高值化应用。本研究系统比较西兰花籽油与芽油的脂肪酸组成及挥发性成分, 明确揭示两者在脂肪酸组成分布及关键风味标志物上的差异, 为西兰花副产物的差异化开发与高值化利用提供直接科学依据。

因此, 本研究聚焦于西兰花籽油与芽油的脂肪酸组成及挥发性成分的系统分析, 旨在明确二者在成分特征与功能属性上的差异, 为后续产业化中油脂品质控制、产品定位及加工工艺优化提供科学依据。研究成果预期将为西兰花副产物的高值转化提供数据支撑, 推动其在特膳食品、护肤品及植物源功能成分提取等领域的精准应用, 具有明确的科研价值与产业化前景[13]。

1　材料与方法

1.1　材料、试剂与仪器

西兰花籽(江苏市场)。

无水乙醇(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 乙醇-乙醚混合液、0.01 mol/L 的 KOH 乙醇标准溶液、三氯甲烷-冰乙酸混合液、饱和碘化钾溶液、硫代硫酸钠溶液、醋酸钾饱和溶液(分析纯, 南京建成试剂有限公司); 甘油(化妆品级≥99%, 苏州科宁多元醇有限公司); 邻二氯苯[色谱纯, 阿拉丁试剂(上海)有限公司]; 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (1,1-diphenyl-2-trinitrophenylhydrazine, DPPH)(色谱纯)、维生素 E(分析纯)(上海麦克林生化科技股份有限公司)。

JA3003 分析天平(精度 0.01 mg, 上海力辰仪器科技有限公司); VO-6090HC 低温真空热风一体式烘箱(南京苏

恩瑞干燥设备有限公司); Agilent DB-5MS 柱(30 m×250 μm, 0.25 μm)、7890B-7000C 气相色谱-质谱联用仪(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)(美国 Agilent Technologies 公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 西兰花籽油和芽油的提取

先将西兰花种子浸泡 8~12 h, 在 20~28 ℃, 湿度 60%~80%条件下, 催芽 28~32 h 后收集西兰花芽。然后采用物理冷压榨法提取西兰花籽油和芽油。本研究工艺设计初衷为保留芥子酶活性, 促进异硫氰酸酯合成富集, 而非灭酶处理, 全流程可稳定保留油脂中异硫氰酸酯类挥发性组分。并且压榨原料最终含水率控制在 5.5%~6.0%低水分范围。

西兰花芽油提取的工艺/质控标准/物理常规低温压榨参数: 西兰花籽经清洗后室温(25 ℃±1 ℃)避光浸泡 6~8 h; 培养温度 26~32 ℃、全避光培养、环境相对湿度 80%±5%; 实时观测芽体生长状态, 精准控制胚根芽长 0.2~0.6 cm 立即终止萌芽; 采用低温真空热风一体式烘干, 烘干恒定温度(38±1) ℃, 真空度–0.06 MPa, 烘干至萌芽籽最终平衡含水率 5.5%±0.5%; 提前预冷压榨腔体, 控制压榨全程腔体实时温度小于等于 45 ℃(冷榨界定: 全程不外源加热, 摩擦升温上限 45 ℃, 区别热榨大于 100 ℃), 严格符合植物油物理冷压榨工艺定义。

1.2.2 酸价及过氧化值的测定

酸值和过氧化值的测定分别参考GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》和 GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化

值的测定》。

1.2.3 保湿率的测定

依照标准 QB/T 4256—2011《化妆品保湿功效评价指南》, 分别开展常温吸湿试验与常温保湿试验, 评价西兰花籽油吸湿与保湿性能。每组试验设置 3 次生物学平行, 同步设置空白对照组、10%甘油阳性对照组; 全部数据采用 SPSS 26.0 开展单因素方差分析, P<0.05 为组间差异具有统计学意义。

(1)吸湿试验

选用规格一致的干燥培养皿, 准确称取 2.000 g 不同浓度(2%、5%、10%、20%)西兰花籽油基质样品均匀涂布于培养皿底部, 将样品放置于温度 25 ℃、相对湿度 75% 的恒温恒湿干燥器中, 分别于 4、8、12、24、48 h 定时取出称重, 记录样品质量变化。以纯水体系为空白对照、10%甘油基质为阳性对照, 同步进行平行试验。吸湿率计算见公式(1)。

$$吸湿率/\%=[(m_t-m_0)/m_0]\times100\% \quad (1)$$

式中: m_0 为样品初始质量, g; m_t 为放置 t 时刻后样品质量, g。

(2)保湿试验

培养皿预先添加 2.000 g 去离子水, 均匀涂布 1.000 g 不同浓度(2%、5%、10%、20%)西兰花籽油基质完全覆盖水面, 密封置于 25 ℃、相对湿度 43% 恒温恒湿干燥器, 连续检测 48 h, 于 4、8、12、24、48 h 分别称量, 计算各组水分散失量。空白组仅加等量去离子水, 不涂抹油脂; 阳性对照组涂抹等量 10%甘油基质, 每组 3 次重复。保湿率计算见公式(2)。

$$保湿率/\%=[([\Delta m_{空白}-\Delta m_{样品})/\Delta m_{空白}]\times100\% \quad (2)$$

式中: $\Delta m_{空白}$为空白组水分散失质量, g; $\Delta m_{样品}$为样品组水分散失质量, g。

1.2.4 DPPH 自由基清除能力测定

以无水乙醇为溶剂配制系列梯度浓度西兰花籽油待测液, 选用维生素 E 作为本方法阳性对照, 无水乙醇为溶剂空白, 每组设置 3 次技术平行消除操作误差; 所有吸光度数据采用 SPSS 26.0 进行统计分析, P<0.05 为组间差异具有统计学意义。反应体系混匀后室温避光静置反应 30 min, 于 517 nm 处测定吸光度, 自由基清除率计算见公式(3)。

$$自由基清除率/\%=[1-(A_1-A_2)/(A_3-A_4)]\times100\% \quad (3)$$

式中: A_1 表示溶液+溶剂的吸光度; A_2 表示溶液+样品的吸光度; A_3 表示溶剂的吸光度; A_4 表示样品的吸光度[14]。

1.2.5 脂肪酸测定

脂肪酸的测定参照 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》, 采用气相色谱法对西兰花籽油和芽油进行脂肪酸检测, 再通过面积百分比法计算出各脂肪酸的含量。

1.2.6 挥发性物质测定

移取 2 g 样品移入到 20 mL 萃取瓶中, 加入 10 μL 邻二氯苯为内标(质量浓度为 515.5 μg/mL)然后快速密封。将样品瓶置于固相微萃取装置上, 设定温度为 60 ℃, 顶空萃取 30 min。色谱条件: 色谱柱为 DB-5MS (30 m×250 μm, 0.25 μm); 进样口温度 250 ℃; 载气为高纯氦(99.999%); 流速为 1.0 mL/min; 程序升温起始温度 40 ℃, 以 5 ℃/min 的速度升到 180 ℃, 以 10 ℃/min 的速度升到 250 ℃, 保持 2 min。质谱条件: 电子轰击电离源, 离子源温度 230 ℃, 传输线温度 230 ℃, 四极杆温度 150 ℃。GC-MS 仪的测定条件参照本课题组前期研究方法[15–16]。

1.3 数据处理

所有实验数据均以平均值±标准偏差表示。脂肪酸组成及挥发性物质含量分析结果采用峰面积归一化法进行定量计算。保湿率、吸湿率及 DPPH 自由基清除率实验均设置 3 次平行重复, 结果取平均值。采用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析, 采用 Duncan 法进行多重比较, P<0.05 表示差异具有统计学意义。实验数据整理及表格制作采用 Microsoft Excel 2019 软件完成, 图形绘制采用 Origin 2021 软件完成。

2 结果与分析

2.1 西兰花籽油的指标评价

酸价的高低清晰地反映了油脂发生水解变质的程度[17]。

通过测定过氧化值，可以评估油脂的新鲜程度和稳定性，从而指导油品的生产加工和贮存管理[18]。西兰花籽油酸价(KOH)为 1.2 mg/g，过氧化值为 0.016 g/100 g，均处于较低水平。低酸价表明油脂水解程度低，游离脂肪酸含量少，说明原料在采收及加工过程中受酶促或非酶促水解作用较弱，脂肪酶活性受到有效控制，整体品质保持良好；同时，较低的过氧化值表明油脂中不饱和脂肪酸尚未发生明显的自氧化反应，初级氧化产物(如过氧化物)积累较少，说明其氧化稳定性较高，表 1。这可能与原料新鲜度较高以及加工过程中氧暴露和温度控制较为合理有关。因此，该油脂具有较好的贮藏稳定性和食用品质。

该籽油含有异硫氰酸酯类物质(以萝卜硫素为主)，萝卜硫素具有良好的抗癌及保健功效，赋予其较高的营养与功能价值。已有研究表明，萝卜硫素来源于硫代葡萄糖苷在芥子酶作用下的水解产物，在十字花科植物中广泛存在，其具有抗氧化、抗炎及诱导解毒酶表达等生理活性。因此，西兰花籽油不仅在理化性质上表现出较好的品质特征，同时在功能性成分方面亦具有潜在的健康促进作用。

表 1　西兰花籽油品质指标评价

Table 1　Evaluation of quality indicators for *Brassica oleracea var. italica* seeds oil

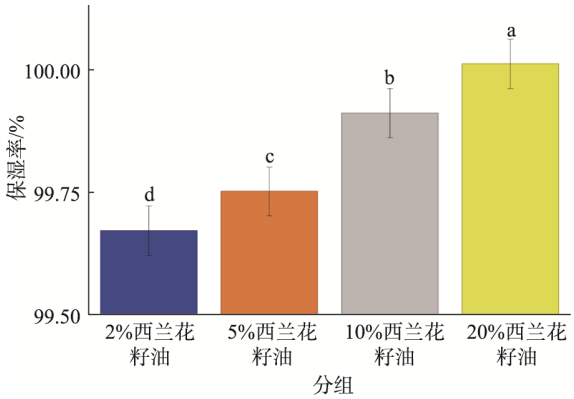
序号	项目	结果
1	酸价(KOH)	1.2 mg/g
2	过氧化值	0.016 g/100 g
3	异硫氰酸酯	1.51 mg/kg
4	黄曲霉毒素 B_1	-

注: -表示未检出。下表同。

2.2　西兰花籽油的保湿率

依据 QB/T 4256—2011 相关要求，采用实验室标准法对西兰花籽油的保湿功效与吸湿功效进行系统测定。图 1 结果显示，在恒温恒湿实验室条件下连续测定 48 h，不同添加浓度的西兰花籽油样品保湿率分别为: 2%添加量时保湿率为 99.67%, 5%添加量时保湿率为 99.75%, 10%添加量时保湿率为 99.91%，20%添加量时保湿率可达 100.01%，保湿效果随籽油浓度升高呈上升趋势。这可能与油脂在基质表面形成连续疏水性薄膜有关，该膜可以有效阻隔水分向外扩散，从而降低水分蒸发速率。

吸湿性能测试结果表明，相同测试条件下 48 h 内，2%、5%及 10%浓度西兰花籽油吸湿率均为 0%，仅 20%浓度样品吸湿率为 0.99%，整体吸湿能力微弱。这说明西兰花籽油基本不具备吸湿功效，其分子结构中缺乏亲水性基团，难以从环境中吸收水分。综合分析可知，西兰花籽油主要通过减少水分散失实现保湿作用，难以从环境中吸收水分。



注: 图中小写字母表示差异显著, $P<0.05$。下同。

图 1　西兰花籽油保湿功效

Fig.1　Moisturizing effects of *Brassica oleracea var. italica* seeds oil

2.3　西兰花籽油的 DPPH 自由基清除率

依据 QB/T 6172—2023《化妆品紧致抗皱功效评价 自由基(DPPH)清除法》相关规范，采用实验室体外检测方法对西兰花籽油的抗氧化及紧致抗皱功效进行测定。图 2 结果显示，在实验室标准条件下，不同添加浓度西兰花籽油的 DPPH 自由基清除能力存在明显剂量效应: 2%添加量时自由基清除率为 31%，5%添加量时为 54%，10%添加量时可达 97%, 20%添加量时清除率高达 103%。说明随着添加量的增加，其抗氧化能力显著增强，呈现良好的浓度依赖关系。

在相同测试体系中，阳性对照维生素 E 在质量浓度为 0.04 mg/mL 时，自由基清除率为 50%。综合对比表明，在较高浓度下西兰花籽油的清除能力已经超过维生素 E。这一结果可能与其富含不饱和脂肪酸及天然抗氧化活性物质有关，这些成分可通过提供氢原子或电子与 DPPH 自由基反应，从而终止自由基链式反应，降低氧化损伤程度。自由基过量是导致皮肤弹性下降的重要因素，其清除能力的提升有助于延缓皮肤老化。综上，西兰花籽油具有显著的自由基清除能力，可通过抗氧化途径减轻皮肤氧化损伤，表明其具有潜在的抗氧化应用价值，为进一步开展皮肤抗衰老相关评价提供实验依据。

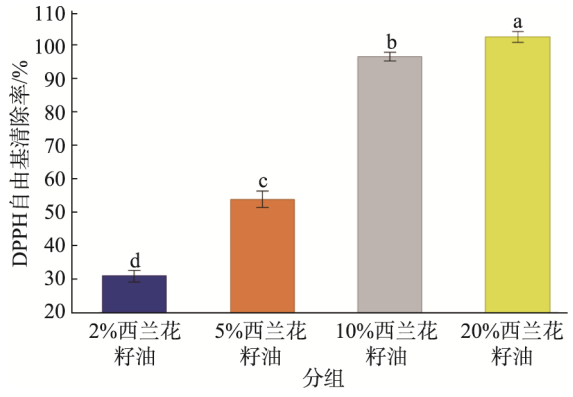


图 2　西兰花籽油 DPPH 自由基清除率

Fig.2　DPPH radical scavenging rate of *Brassica oleracea var. italica* seeds oil

2.4 西兰花籽油和芽油的脂肪酸组成

西兰花籽油中含有 12 种脂肪酸, 含量最多的是芥酸和油酸, 分别为 31.94%和 31.28%。其次是棕榈酸(8.13%)和花生酸(3.49%), 二者均为饱和脂肪酸。芽油中同样含有 12 种脂肪酸, 含量最多的也是油酸和芥酸, 分别为 29.62%和 29.43%。其次是亚油酸(9.91%)和棕榈酸(7.54%)。值得注意的是, 籽油中油酸含量高于芽油中油酸含量。油酸作为一种单不饱和脂肪酸, 不仅化学性质相对稳定[19], 易于贮存, 还能通过调节血脂水平, 起到防治心血管疾病和降低血清胆固醇的功能。相比之下, 芽油中芥酸含量低于籽油, 芥酸是一种二十二碳单不饱和单羧基脂肪酸, 摄入芥酸过多, 容易引起血管壁增厚和心肌脂肪沉积, 不利于人体健康[20]。因此, 较高芥酸含量可能限制其作为食用油的大规模应用。但对于化妆品领域而言, 油脂主要通过皮肤外用方式发挥润肤和屏障保护作用, 并非作为膳食脂肪摄入, 因此芥酸风险需结合具体应用场景进行评价。此外, 芽油中亚油酸含量显著高于籽油中含量, 亚油酸含量(9.91%)约为籽油(2.39%)的 4 倍。亚油酸多为不饱和脂肪酸, 在降低血清胆固醇、防止血管粥样硬化和糖尿病方面起着至关重要的作用[21−22]。除此之外, 芽油中的月桂酸含量是 0.14%, 而籽油中却不含有月桂酸。月桂酸[23]在人体可被整体快速吸收和代谢, 可以作为新陈代谢的调节剂, 被认为是一种健康的饱和脂肪酸, 可有效降低有害胆固醇水平, 减轻体重, 表 2。

表 2 西兰花籽油和芽油脂肪酸组成(%)

Table 2 Fatty acid composition of *Brassica oleracea var. italica* seeds oil and sprouts oil (%)

序号	化合物	面积百分比	
		籽油	芽油
1	月桂酸	-	0.14±0.01
2	十三烷酸	0.19±0.02	-
3	十五烷酸	0.32±0.03	0.31±0.03
4	棕榈酸	8.13±0.81	7.54±0.74
5	十七碳一烯酸	0.45±0.04	0.42±0.04
6	十七烷酸	0.28±0.03	0.32±0.03
7	油酸	31.28±3.13	29.62±1.15
8	硬脂酸	3.52±0.36	3.21±0.31
9	亚油酸	2.39±0.24^{b}	9.91±0.99^{a}
10	α-亚麻酸	2.49±0.25^{a}	1.79±0.18^{b}
11	花生酸	3.49±0.35	3.28±0.33
12	二十碳一烯酸	15.52±1.54	14.04±1.41
13	芥酸	31.94±0.20^{a}	29.43±0.93^{b}

注: 不同上标小写字母表示差异显著(P<0.05), 下同。

2.5 西兰花籽油和芽油挥发性物质组成分析

表 3 展示了西兰花籽油和芽油中的挥发性物质含量。籽油中共检测到 57 种挥发性物质, 包括 10 种烯烃、12 种酯类、3 种醛类、15 种醇类、4 种酮类、5 种酸类、5 种芳香族化合物和 3 种胺类。醇类和酯类是籽油中种类最多的化合物, 但含量最高的却是醇类和烯烃类化合物。醇类中含量较高的是 10-表古巴醇、(*R*)-(-)-2-氨基-1-丙醇、4-丁氧基-1-丁醇、1-戊醇、1-己醇、2-(甲氧基)乙硫醇等, 分别高达 173.29、35.17、16.31、17.03、48.42 和 12.06 μg/L。2-(甲氧基)乙醇、[*S*-(*R**, *R**)]-1,2,3,4-丁四醇、2,4,4-三甲基环戊醇等则含量较低, 仅有 3.21、1.48 和 4.00 μg/L。丙醇类化合物[如(*R*)-(-)-2-氨基-1-丙醇]通常味苦, 呈青草香味[24], 能够赋予油脂清新草本底香。从形成机制来看, 1-己醇通常由亚油酸经脂氧合酶途径氧化生成己醛后, 再经醇脱氢酶还原形成[25], 是植物油氧化过程中典型的特征风味物质, 呈现清新绿叶气味, 对油脂青草风味贡献显著。丙氨酸叔丁酯是酯类中含量最高的, 高达 40.73 μg/L。同样含量较高的还有环己基甲基丙酸酯和反式-马鞭草烯基乙酸酯, 分别高达 18.55 μg/L 和 19.20 μg/L。酯类化合物通常由醇类和有机酸通过酯化反应形成, 其形成与体系中醇类和脂肪酸前体密切相关[26], 该类化合物多带有果香、甜香, 可缓和油脂本身的油腻气味, 提升香气柔和度。3-叔丁氧基二环[3.2.1]辛-2-烯是籽油中含量最高的烯烃类化合物。籽油中有己醛、壬醛和丙烯醛三种醛类物质, 含量分别为 26.77、62.12、6.56 μg/L。醛类物质主要由脂肪氧化降解产生。这类物质在乳制品氧化后普遍存在, 可用于评估 n-6 多不饱和脂肪酸的氧化程度及鲜奶品质[27]。3-溴基呋喃是籽油芳香族化合物中含量最高的物质, 高达 103.14 μg/L。有研究表明, 呋喃类化合物通常来源于脂质氧化产物的进一步反应, 其生成与与加热及氧化程度密切相关[28], 过高含量会带来焦糊、蒸煮异味, 降低油脂感官品质。

与此同时, 芽油中共检测 26 种挥发性物质, 可进一步分为 2 种酯类、4 种醛类、5 种醇类、5 种酮类、1 种酸类、6 种芳香族化合物和 3 种胺类。芳香族化合物是芽油中含量最高的挥发性化合物, 醛类和醇类次之。芳香族化合物中的 1-苄基吲哚含量为 422.14 μg/L, 是芽油中含量最高的物质。从代谢来源来看, 吲哚类化合物通常来源于色氨酸代谢途径[29−30], 赋予芽油独特厚重花香、发酵气息, 是籽油与芽油风味差异化的标志性物质。醛类包括 4-叔丁基苯丙醛、戊醛、己醛和壬醛, 戊醛含量高达 202.69 μg/L。己醛(青草气息)是亚油酸中 13-羧基通过 β-均相裂解产生的分解产物[31]。此外, 戊醛和壬醛同样来源于不饱和脂肪酸的氧化裂解过程[32], 因此芽油中醛类物质的积累反映了脂质氧化反应的发生。10-表古巴醇也是芽油中含量最高的醇类, 含量高达 282.53 μg/L。5-叔丁基-1, 3-苯二甲酸是芽油中唯一检出的酸类化合物, 含量为 15.26 μg/L, 酸性组分易带来酸涩不良风味。

此外, 同时存在于籽油和芽油的物质共 13 种, 分别有 4 种醇类、3 种芳香族化合物、2 种醛类、2 种酯类、1 种酮类和 1 种酸类。醇类包括(*R*)-(-)-2-氨基-1-丙醇、3-甲基-1-丁醇、1-戊醇和 10-表古巴醇。2-戊基呋喃、3-溴呋喃

和对伞花烃是共同含有的芳香族化合物。共同检测出的醛类是己醛和壬醛。共同含有的酯类是丙氨酸叔丁酯和苄基草氨酸乙酯。丙氨酸叔丁酯作为检测到的主要酯类化合物之一, 其形成可能与植物氨基酸代谢及酯化反应有关。酯类物质通常具有较低阈值和特殊香气, 对植物油脂整体风味具有一定贡献, 但其具体形成途径仍需进一步研究。酮类和酸类分别是 2-异丙基-3,3-二甲基-4-苯基-2-氮杂环丁酮和 5-叔丁基-1,3-苯二甲酸。两类油脂共有挥发性成分均来源于脂质氧化、醛醇还原、酯化等共同代谢通路, 说明二者风味形成基础具有同源性; 但组分含量、独有物质种类差异巨大, 最终形成完全不同的感官特征: 籽油以烯烃、醇类、呋喃为主, 整体清香柔和、氧化异味轻; 芽油以吲哚类芳香物、醛类、醇类为主, 香气浓郁厚重, 但脂质氧化衍生的刺激性气味更突出。

籽油与芽油挥发性物质组成差异可能与西兰花萌发过程中的代谢重构有关。种子阶段主要以储藏脂质代谢为主, 脂肪酸氧化途径活跃, 亚油酸、油酸等不饱和脂肪酸经脂氧合酶途径可进一步生成醇类、醛类等挥发性物质, 因此籽油中醇类物质种类及含量较高。而在萌发过程中, 植物由储藏代谢逐渐转向生长发育相关代谢, 次生代谢途径增强, 芳香族化合物及含氮化合物合成增加, 这可能导致芽油中芳香族挥发物比例升高。

与其他十字花科植物油相比, 本研究西兰花籽油挥发性物质组成表现出一定差异。例如, 油菜籽油挥发性成分通常以醛类、异硫氰酸酯类及含硫化合物为主要特征, 而本研究西兰花籽油中醇类和烯烃类化合物占比较高, 可能与原料品种、生长阶段以及加工方式不同有关。此外, 芽油中芳香族化合物比例较高, 体现了萌发阶段特有的代谢特征。

表 3　西兰花籽油和芽油挥发性物质组成(μg/L)

Table 3　Volatile composition of *Brassica oleracea var. italica* seeds oil and sprouts oil (μg/L)

类别	化合物	质量浓度	
		籽油	芽油
烯烃类	1,3-反-5-反-辛三烯	2.05±0.21	-
	4-甲基-1-十一碳烯	1.76±0.17	-
	7-甲基-1-十一碳烯	2.69±0.25	-
	3,7-二甲基-1-辛烯	2.82±0.28	-
	7-亚乙基二环[4.2.1]壬-2,4-二烯	8.36±0.83	-
	(*E*,*E*)-2,4-壬二烯	47.06±4.70	-
	1-异丙基环己烯	75.42±7.54	-
	3-叔丁氧基二环[3.2.1]辛-2-烯	178.00±17.80	-
	3,5-二甲基环己烯	19.22±1.92	-
	1,3-二甲基-1-环己烯	31.77±3.18	-
酯类	甲酸乙烯酯	5.15±0.52	-
	草酸氢乙酯	11.69±1.17	-
	丙氨酸叔丁酯	40.73±4.08^{b}	196.17±19.62^{a}
	碳酸己基-1-丙烯-2-基酯	5.38±0.54	-
	1,2,4-苯三甲酸-1,2-二甲酯	5.18±0.52	-
	苄基草氨酸乙酯	4.70±0.47^{b}	47.42±4.74^{a}
	反式-马鞭草烯基乙酸酯	19.20±1.92	-
	反式-马鞭草烯基月桂酸酯	7.00±0.71	-
	S-丙基戊硫代酸酯	4.80±0.49	-
	环己基甲基丙酸酯	18.55±1.84	-
	(2*R*)-2-羟基-2-甲基丁二酸二甲酯	3.94±0.39	-
	琥珀酸-2-甲基戊-3-基-2-甲氧基苯基酯	11.67±1.17	-
醛类	己醛	26.77±2.68^{a}	19.96±1.98^{b}
	丙烯醛	6.56±0.66	-
	壬醛	62.12±6.22^{b}	144.84±14.50^{a}
	戊醛	-	202.69±20.27
	4-叔丁基苯丙醛	-	11.60±1.17

表 3(续)

类别	化合物	质量浓度	
		籽油	芽油
醇类	(*R*)-(-)-2-氨基-1-丙醇	35.17±3.50	66.95±6.70
	(±)-2-氨基-1-丙醇	14.87±1.50	-
	2-(甲氨基)乙醇	3.21±0.30	-
	2-(甲氨基)乙硫醇	12.06±1.21	-
	3-甲基-1-丁醇	5.62±0.55	6.75±0.68
	[*S*-(*R**, *R**)]-1,2,3,4-丁四醇	1.48±0.15	-
	(*S*)-2-氨基-1-丙醇	2.76±0.28	-
	1-戊醇	17.03±1.71[a]	6.59±0.66[b]
	2-甲基-1-丁醇	-	10.62±1.07
	2-(2-乙基己氧基)乙醇	4.55±0.46	-
	1-己醇	48.42±4.83	-
	2,2,4-三甲基-3-戊醇	2.91±0.29	-
	2,4,4-三甲基环戊醇	4.00±0.41	-
	4-丁氧基-1-丁醇	16.31±1.62	-
	10-表古巴醇	173.29±17.33[b]	282.53±28.30[a]
酮类	2-甲基-4-异丙基-2-环己烯酮	24.84±2.50	-
	5-甲基-2-异丙基-2-环己烯-1-酮	36.65±3.70	-
	3,6-庚二酮	-	-
	6,6-二甲基二环[3.1.1]庚烷-2-酮	1.71±0.18	-
	2-异丙基-3,3-二甲基-4-苯基-2-氮杂环丁酮	6.26±0.63[b]	21.41±2.13[a]
	2-叔丁基-3,3-二甲基-4-苯基-2-氮杂环丁酮	-	27.34±2.72
	N-乙基庚酮	-	4.16±0.40
	反式-4'-(甲硫基)查尔酮	-	2.81±0.28
	2-异丙基-5-甲基-1,3-二氧杂环己烷-4-酮	-	5.45±0.55
酸类	草酸	23.86±2.35	-
	3-苯丙酰甘氨酸	6.80±0.66	-
	4-甲基戊酸	8.58±0.86	-
	3-甲基戊酸	12.15±1.21	-
	5-叔丁基-1,3-苯二甲酸	2.94±0.30[b]	15.26±1.51[a]
芳香族化合物	2-戊基呋喃	34.64±3.50[a]	20.22±2.02[b]
	3-溴呋喃	103.14±10.30[a]	31.23±3.11[b]
	对伞花烃	3.33±3.32[b]	23.56±2.32[a]
	四氢-1H, 3H-呋喃并[3,4-c]呋喃	1.72±0.18	-
	1,3,4,5-四甲基-1H-吡唑	6.42±0.65	-
	1-苄基吲哚	-	422.14±42.2
	3-甲基-2-苯基吡唑并[1,5-a]吡啶	-	108.66±10.90
	7-甲基-2-苯基苯并咪唑	-	29.05±2.91
胺类	二甲胺	16.14±1.62	-
	2-氨基-N-叔丁基丙酰胺	4.05±0.41	-
	N-甲基-1,3-丙二胺	2.62±0.27	-
	异丙胺	-	56.72±5.74
	3,5-二甲基苄基戊胺	-	3.67±1.35
	N-(3-甲基苯基)-2,2,3,3,3-五氟丙酰胺	-	1.98±0.18

3 结 论

本研究采用 GC-MS, 对西兰花籽油和芽油的脂肪酸和挥发性成分进行系统分析。实验表明西兰花籽油脂肪酸组成主要为芥酸(31.94%)、油酸(31.28%)、棕榈酸(8.13%)、花生酸(3.49%), 其中不饱和脂肪酸含量为 84.07%。芽油脂肪酸组成为主要为油酸(29.62%)、芥酸(29.43%)、亚油酸(9.91%)、棕榈酸(7.54%), 其中不饱和脂肪酸含量为 85.21%。在化合物组成方面, 西兰花籽油中检测出 57 种化合物。醇类有 15 种, 种类最多且含量最高, 主要包括古巴醇、丙醇、丁醇、戊醇、己醇、硫醇等, 乙醇含量较低。酯类中含量最高的是丙氨酸叔丁酯, 醛类仅检测到己醛、

壬醛和 2-丙烯醛 3 种。相比之下，芽油只含有 26 种化合物，且缺乏烯烃类物质。其芳香族化合物有 6 种，是芽油中种类最多、含量最高的挥发性成分，其中含量最高的是 1-苄基吲哚。同时，西兰花籽油也具有保湿和抗皱紧致功效。综上所述，本研究成果系统地分析了西兰花籽油和芽油的组成，为后续西兰花在工业和化妆品方面研究提供了重要理论基础。

参考文献

[1] 董雨薇, 张梦琪, 封亚星, 等. 西兰花薄片的研制及品质分析[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(13): 112–119.
Dong Yuwei, Zhang Mengqi, Feng Yaxing, et al. Development and quality analysis of broccoli thin slices [J]. Food Research and Development, 2024, 45(13): 112–119.

[2] 任绍涛. 萝卜硫素预处理减轻力竭运动诱导心肌损伤的机制研究[J]. 分子植物育种, 2025, 23(13): 4514–4522.
Ren Shaotao. Mechanistic study of sulforaphane pretreatment in alleviating exhaustive exercise-induced myocardial injury [J]. Molecular Plant Breeding, 2025, 23(13): 4514–4522.

[3] 朱沥. 日粮中添加西兰花种子提取物对肉牛生长性能和瘤胃微生物区系的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025: 1–6.
Zhu Li. Effect of dietary supplementation with broccoli seed extract on growth performance and rumen microflora in beef cattle [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2025: 1–6.

[4] 唐万, 赖富丽, 郝桂芳, 等. 西兰花种子萝卜硫素提取物制备工艺优化及其免疫调节活性评价[J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 422–430.
Tang Wan, Lai Fuli, Hao Guifang, et al. Optimization of the extraction process of extract containing sulforaphane from broccoli seeds and evaluation of its immunomodulatory activity [J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 422–430.

[5] 曹栋栋, 翁林钢, 游兆彤, 等. 脉冲电浆技术在农业领域的创新应用[J]. 浙江农业科学, 2025, 66(10): 2319–2323.
Cao Dongdong, Weng Lingang, You Zhaotong, et al. Innovative applications of pulsed plasma technology in agriculture [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2025, 66(10): 2319–2323.

[6] 刘启帆. 亚非种业振兴(新)[J]. 长江蔬菜, 2022(3): 67–69.
Liu Qifan. Revitalization of Asian and African seed industry (new) [J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2022(3): 67–69.

[7] 毛佳汶. 新食品原料批准品种及现状分析[J]. 现代食品, 2020, 1(2): 75–78.
Mao Jiawen. Analysis of approved variety and status of new food raw materials [J]. Modern Food, 2020, 1(2): 75–78.

[8] 李鑫, 王鹏, 刘梦璐, 等. 西兰花芽提取工艺及其体外抗氧化活性研究[J]. 现代化工, 2025, 45(增刊 2): 381–386.
Li Xin, Wang Peng, Liu Menglu, et al. Study on extraction technology and *in vitro* antioxidant activity of broccoli sprouts [J]. Modern Chemical Industry, 2025, 45(S2): 381–386.

[9] 吴见乐. 萝卜硫素对变应性鼻炎的康复及作用机制研究[D]. 赣南: 赣南医学院, 2023: 1–5.
Wu Jianle. Research on the rehabilitation and mechanism of action of sulforaphane on allergic rhinitis [D]. Gannan: Gannan Medical University, 2023: 1–5.

[10] 王萌萌. 西兰花种子油的提取及抗氧化和抑制肿瘤细胞增殖的活性研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2014: 1–6.
Wang Mengmeng. A study on the extraction of broccoli seed oil and its antioxidant activity and inhibiting effect on tumor cell proliferation [D]. Hefei: Anhui University, 2014: 1–6.

[11] 袁芳豪, 李艳芳, 高博彦, 等. 西兰花种子油中甘油三酯和脂肪酸组成分析[J]. 中国食品学报, 2022, 22(2): 319–327.
Yuan Fanghao, Li Yanfang, Gao Boyan, et al. Triacylglycerols and fatty acid compositions analyses of broccoli seed oil [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(2): 319–327.

[12] 黄忆真, 李杰, 谈满良, 等. 西兰花籽油超临界 CO_2 萃取工艺及脂肪酸组成分析[J]. 中国油脂, 2018, 43(12): 1–4, 17.
Huang Yizhen, Li Jie, Tan Manliang, et al. Supercritical CO_2 extraction of broccoli seed oil and its fatty acid composition [J]. China Oils and Fats, 2018, 43(12): 1–4, 17.

[13] 杨丽丽, 南占东, 赵静, 等. 富硒西兰花营养保健成分及其硒产品开发探讨[J]. 农产品加工, 2025(5): 92–94, 98.
Yang Lili, Nan Zhandong, Zhao Jing, et al. Exploration on the effective components and functional product development of selenium-rich broccoli [J]. Farm Products Processing, 2025(5): 92–94, 98.

[14] 国家发展和改革委员会. “十四五”生物经济发展规划[R]. 北京: 国家发展改革委员会, 2022.
National Development and Reform Commission. “14th Five-Year Plan” bioeconomy development plan [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2022.

[15] 陆娟, 常清泉, 谢东雪, 等. 洋甘菊多糖超声提取工艺优化及清除自由基能力研究[J]. 中国食品添加剂, 2018, 29(3): 124–130.
Lu Juan, Chang Qingquan, Xie Dongxue, et al. Optimization of ultrasonic-extraction technology and radical scavenging effect of polysaccharide from *Matricaria* chamomila [J]. China Food Additives, 2018, 29(3): 124–130.

[16] Xu Lirong, Mei Xue, Wu Gangcheng, et al. Inhibitory effect of antioxidants on key off-odors in French fries and oils and prolong the optimum frying stage [J]. LWT, 2022, 162: 113417.

[17] 徐祎博. 食用植物油酸价快速检测纸条的制备与性能评价[J]. 黑龙江粮食, 2025(7): 71–73.
Xu Yibo. Preparation and performance evaluation of paper strip for rapid detection of acid value of edible vegetable oil [J]. Heilongjiang Grain, 2025(7): 71–73.

[18] 王茹, 常立娟, 陈阳, 等. 滴定法测定菜籽油中过氧化值的不确定度评定[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 51–55.
Wang Ru, Chang Lijuan, Chen Yang, et al. Determination of uncertainty in peroxide value of rapeseed oil by titration method [J]. Food and Machinery, 2025, 41(7): 51–55.

[19] Xu Lirong, Wu Gangcheng, Huang Jianhua, et al. Sensory-directed flavor analysis of key odorants compounds development of French fries and oils in the break-in, optimum and degrading frying stage [J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(1): 140–150.

[20] 董哲. 高油酸葵花籽油与棕榈硬脂化学酯交换法制备低饱和油脂的研究[J]. 粮食与食品工业, 2025, 32(3): 19–24.
Dong Zhe. Preparation of low saturated food specialty oil base oil by chemical ester exchange of high oleic sunflower oil and palm stearin [J].

Cereal & Food Industry, 2025, 32(3): 19–24.

[21] 张龙珠, 林舒航, 耿予欢, 等. 低芥酸芥菜籽油抗氧化特性及脂肪酸组成比较分析[C]//药食同源与大健康学术研讨会暨 2023 年广东省食品学会年会论文集, 广州, 2023: 8–14.
Zhang Longzhu, Lin Shuhang, Geng Yuhuan, et al. Comparative analysis of antioxidant properties and fatty acid composition of low erucic acid rapeseed oil [C]//Proceedings of Academic Symposium on Food and Medicine Homology and Great Health and 2023 Annual Conference of Guangdong Food Science Society, Guangzhou, 2023: 8–14.

[22] Scott Lacombe R J S, Chouinard-Watkins R, Bazinet R P. Brain docosahexaenoic acid uptake and metabolism [J]. Molecular Aspects of Medicine, 2018, 64: 109–134.

[23] Lacombe R J S, Chouinard-Watkins R, Bazinet R P. Brain docosahexae noic acid uptake and metabolism [J]. Molecular Aspects of Medicine, 2018, 64: 109–134.

[24] Sandhya S, Talukdar J, Ph D D. Chemical and biological properties of lauric acid: a review [J]. International Journal of Advanced Research, 2016, 4(7): 1123–1128.

[25] 张英姿, 彭小东. 气相色谱法测定白酒中正丙醇含量的研究[J]. 酿酒科技, 2023(9): 128–131, 136.
Zhang Yingzi, Peng Xiaodong. Determination of N-propanol in Baijiu by gas chromatography [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2023(9): 128–131, 136.

[26] Hashem C, Hochrinner J, Bürgler M B, et al. From linoleic acid to hexanal and hexanol by whole cell catalysis with a lipoxygenase, hydroperoxide lyase and reductase cascade in *Komagataella phaffii* [J]. Frontiers in Molecular Biosciences, 2022, 9: 965315.

[27] Zhou Wanhai, Kong Wenbin, Yang Can, et al. Alcohol acyltransferase is involved in the biosynthesis of C6 esters in apricot (*Prunus armeniaca* L.) fruit [J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 763139.

[28] Beauchamp J, Zardin E, Silcock P, et al. Monitoring photooxidation-induced dynamic changes in the volatile composition of extended shelf life bovine milk by PTR-MS [J]. Journal of Mass Spectrometry, 2014, 49(9): 952–958.

[29] Grebenteuch S, Kroh L W, Drusch S, et al. Formation of secondary and tertiary volatile compounds resulting from the lipid oxidation of rapeseed oil [J]. Foods, 2021, 10(10): 2417.

[30] Li Rui, Zhou Zihuan, Zhao Xiaofei, et al. Application of tryptophan and methionine in broccoli seedlings enhances formation of anticancer compounds sulforaphane and indole-3-carbinol and promotes growth [J]. Foods, 2024, 13(5): 696.

[31] Ishida M, Hara M, Fukino N, et al. Glucosinolate metabolism, functionality and breeding for the improvement of Brassicaceae vegetables [J]. Breeding Science, 2014, 64(1): 48–59.

[32] Chang Chang, Wu Gangcheng, Zhang Hui, et al. Deep-fried flavor: characteristics, formation mechanisms, and influencing factors [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(9): 1496–1514.

(责任编辑: 蔡世佳 范彩旭)