

微波预处理对油菜籽及其低温压榨油脂脂肪酸含量的影响

胡爱鹏, 魏芳*, 黄凤洪*, 郑畅, 吕昕, 陈洪

(中国农业科学院油料作物研究所, 农业农村部油料加工重点实验室, 农业农村部油料作物生物学与遗传育种重点实验室, 油料脂质化学与营养湖北省重点实验室, 湖北, 武汉, 430062)

摘要: 为了解微波预处理对油菜籽及菜籽油脂肪酸含量的影响, 评价其产生反式脂肪酸的风险, 以8个省14产地的57份油菜籽样品为材料进行微波预处理, 并对微波前后的油菜籽进行压榨, 得到冷榨菜籽油。采用优化后的气相色谱法快速测定油菜籽和菜籽油中脂肪酸组成和含量, 考察油菜品种、油菜产地以及微波预处理对油菜籽脂肪酸含量的影响。结果发现, 与国标方法相比, 优化后样本分析时间缩短一半以上, 显著提高分析通量。研究发现, 产地对油菜籽和冷榨菜籽油脂肪酸组成和含量影响较小, 品种对菜籽和冷榨菜籽油脂肪酸组成和含量影响较大。不同品种的油菜籽和对应冷榨菜籽油中的脂肪酸含量差异极显著($P < 0.01$)。高芥酸菜籽的花生一烯酸、芥酸的平均含量分别是低芥酸菜籽的6.89倍和64.50倍, 油酸的平均含量仅为低芥酸菜籽的71.48%。同一品种不同产地的油菜籽与对应的冷榨菜籽油中的脂肪酸含量之间, 不存在显著性差异。微波预处理不会显著影响油菜籽和菜籽油中的脂肪酸组成和含量水平, 同时也不会产生反式脂肪酸等风险因子, 微波处理后, 产生反式脂肪酸的风险较低。

关键词: 气相色谱法; 脂肪酸; 微波预处理; 油菜籽; 冷榨菜籽油

中图分类号: TS 222+.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-9084(2021)05-0923-10

Effects of microwave pretreatment on fatty acid content of rapeseed and cold-pressed rapeseed oil

HU Ai-peng, WEI Fang*, HUANG Feng-hong*, ZHENG Chang, LYU Xin, CHEN Hong

(Oil Crops Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Oilseeds Processing of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Oil Crops of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hubei Key Laboratory of Lipid Chemistry and Nutrition, Wuhan 430062, China)

Abstract: To investigate the effect of microwave pretreatment on fatty acid, and evaluate to the risk of trans-fatty acids in rapeseed and cold-pressed rapeseed oil, 57 rapeseed samples from 14 producing areas in 8 provinces of China were used for microwave pretreatment test. The rapeseeds (both before and after microwave treatments) were pressed to obtain cold-pressed oil. Fatty acids were quickly determined by using optimized gas chromatography method which reduced the analysis time by more than 50%. Results showed that variety was the main factor ($p < 0.01$) affecting the fatty acid composition and contents, while origin had no statistically significant effect. The average content of eicosenoic acid and erucic acid in low erucic acid rapeseed were 6.89 and 64.50 times higher than that in high erucic acid rapeseed, respectively. The average oleic acid content of high erucic acid rapeseed was only 71.48% of the high erucic acid rapeseed. Thus microwave pretreatment might not significantly affect the composition and content of fatty acids in rapeseed and rapeseed oil. It neither brought risk of trans-fatty acids.

Key words: gas chromatography; fatty acids; microwave pretreatment; rapeseed; cold-pressed rapeseed oil

油菜籽作为我国主要的大宗油料作物, 在全国的播种面积为 753.43 万公顷, 产量为 1493.07 万吨, 两项都位居各油料作物的首位^[1]。近年来, 我国对菜籽油需求量逐年增加, 人们的消费观念也从吃

收稿日期: 2020-06-08

基金项目: 湖北省技术创新项目(2018AHB014); 武汉市科技计划项目(2019020701011468); 中国农业科学院创新工程(CAAS-ASTIP-2013-OCRI)

作者简介: 胡爱鹏(1989-), 博士研究生, 研究方向为农产品加工利用, E-mail: huaipeng1107@163.com

* 通讯作者: 魏芳(1979-), 研究员, 硕士生导师, 研究方向为脂质分析与营养, E-mail: willasa@163.com;

黄凤洪(1965-), 研究员, 博士生导师, 研究方向为油料加工、油脂营养与功能产品、副产物资源化利用, E-mail: huangfh@oilcrops.cn

饱油到吃好油、到吃健康油转变,因此高品质营养健康的菜籽油成为了人们的新需求。微波预处理作为一种绿色高效的加工技术,在高品质菜籽油加工生产过程中被广泛应用^[2-4]。油菜籽经过微波预处理后压榨所得的菜籽油中植物甾醇^[5]、维生素E^[6,7]、菜籽多酚^[8]等有益成分的含量显著增加。与传统焙炒技术相比,微波预处理技术受热均匀可有效降低菜籽焙炒过程中的炒糊炭化进而降低产生苯并芘的风险,还能加速硫甙的降解^[9,10]。此外,微波预处理所得的菜籽油色泽更浅,香味更加浓郁丰富^[11,12]。虽然微波预处理技术有上述优势,但微波预处理过程是否会改变油菜籽的脂肪酸组成,是否会产生危害人体健康的反式脂肪酸,均有待研究。目前,针对微波预处理技术在油菜籽加工过程中的应用研究主要集中在微波预处理对油菜籽微观结构、出油率、菜籽油中的维生素E、甾醇、多酚等微量成分的含量以及毛油酸价和色泽等的影响;有关微波预处理对油菜籽和压榨菜籽油的脂肪酸组成及含量、反式脂肪酸含量的影响研究鲜有报道^[13-16]。本文采用优化后的脂肪酸组成及含量测定方法,对取自8个省14产地的57份油菜籽样品微波预处理,对处理前后油菜籽原料和对应的压榨菜籽油中的脂肪酸组成和反式脂肪酸的含量进行了测定及对比分析,以期微波预处理技术在高品质营养健康菜籽油加工生产中的应用提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

7890A型气相色谱仪(美国Agilent Technologies公司);HP-88色谱柱(100 m × 0.25 mm × 0.25 μm, 美国Agilent Technologies公司);CA59G冷榨机(德国Komet公司);WB6E型微波实验设备(南京凯乐电气微波设备有限公司)。

甲醇、正己烷(色谱纯,英国Fisher公司);石油醚(90–120℃)、2,6-二叔丁基对甲酚(BHT)化学纯、甲苯、氯化钠、浓硫酸(分析纯,上海阿拉丁公司);十七碳酸甲酯标准品(1 g, GC级,纯度>98%,西格玛奥德里奇上海有限公司)、十八碳一烯酸甲酯(反-9)标准品(C18:1T, 100 mg, GC级,纯度>99%,上海ANPEL公司)、(C14–C22)8种反式脂肪酸甲酯混标标准品(100 mg, GC级,纯度>99%,上海ANPEL公司),8种组分分别为反式肉豆蔻烯酸甲酯(C14:1T, 9T)、反棕榈油酸甲酯(C16:1T, 9T)、反异油酸甲酯(C18:1T, 11T)、反式岩芹酸甲酯(C18:1T, 6T)、反油

酸甲酯(C18:1T, 9T)、反亚油酸甲酯(C18:2TT, 9T, 12T)、反二十碳烯酸甲酯(C20:1T, 11T)和巴惟酸甲酯(C22:1T, 13T);十八碳二烯酸甲酯(反-9, 12)标准品(C18:2TT, 100 mg, GC级,纯度>99%,上海ANPEL公司),37种脂肪酸甲酯混合物标品(25 mg, GC级,纯度>99%,上海ANPEL公司)。

57个油菜籽样品取自8个省14个产地,分别为四川省18个(其中蓉油18号2个、川油36号1个、川油37号1个、大地199号1个、德恒油900号1个、德油5号1个、鼎油杂3号1个、福油508号1个、国豪油5号1个、龙庭100号1个、高芥酸绵油15号1个、蓉油16号1个、三峡油5号1个、油研1707号1个、油研57号1个、渝南油683号1个、种都油998号1个);湖北省16个(其中华双5号2个、华油杂12号2个、华油杂13号2个、华油杂62号2个、中双9号2个、禾盛油555号1个、禾盛油868号1个、华油杂9号1个、阳光2009号1个、中双12号1个、中油杂7819号1个);湖南省11个(其中沔油823号3个、沔油730号2个、沔油792号2个、中双11号2个、金香油9号1个、湘杂油188号1个);安徽3个(其中德核杂油8号2个、沔油737号1个);河南省3个(其中穗源988号、沔油10号、杂双4号各1个);云南省3个(其中云油杂51号、云油杂12号、云油双2号各1个);江苏省2个(其中宁杂1818号、秦优10号各1个);贵州省油研50号1个。样品收集后避光保存于4℃冰箱备用。

1.2 方法

1.2.1 溶液配制 试剂配制:5%(体积百分比)浓硫酸/甲醇溶液;0.2%(质量百分比)BHT/甲醇溶液;0.4 mol/L的KOH-甲醇溶液;5 mg/mL碳十七脂肪酸甲酯/石油醚(90–120℃)溶液用作内标;5 mg/mL的37种脂肪酸甲酯混标标准品/石油醚(90–120℃)溶液、10 mg/mL的十八碳一烯酸甲酯(反-9)标准品/石油醚(90–120℃)溶液、10 mg/mL的反式脂肪酸甲酯混标(C14–C22)标准品/石油醚(90–120℃)溶液、10 mg/mL的十八碳二烯酸甲酯(反-9, 12)标准品/石油醚(90–120℃)溶液、0.9%(质量百分比)NaCl/水溶液。

1.2.2 样品前处理 (1)油菜籽微波预处理。取清理除杂后的油菜籽3 kg左右于WB6E型微波实验设备中,设置功率4000 W,微波时间7 min。微波预处理结束后,将油菜籽迅速冷却至室温备用,即得微波预处理油菜籽,将对应的清理除杂后未微波的油菜籽作为对照组。(2)冷榨菜籽油的制取。分别

取400 g油菜籽(包括微波前后的油菜籽,其中微波后的油菜籽需将水分调节到5%)于CA59G冷榨机中进行压榨得到压榨原油,然后以10 000 r/min的转速离心15 min得到冷榨菜籽毛油。(3)油菜籽中脂肪酸甲酯化处理。称取适量样本(油菜籽15 mg);加入十七碳酸甲酯内标70 μ L,再加入5%浓硫酸/甲醇溶液2 mL,甲苯300 μ L,0.2%BHT 25 μ L。用压盖器将顶空瓶用带聚四氟乙烯垫的铝盖封好,将上述混合物轻微晃动混匀,然后于恒温水浴锅中90~95℃水浴1.5 h;取出后冷却至室温,加入0.9% NaCl 2 mL,稍微振荡,用2 mL正己烷萃取,以5000 r/min的转速离心5 min,分层后取上层清液于进样小瓶中,待上机做GC分析,每个样本做3组重复。(4)菜籽油中脂肪酸甲酯化处理。取适量的菜籽油加入十七碳酸甲酯内标70 μ L,2 mL 0.4 mol/L的KOH-甲醇溶液,涡旋15 min;先加入2 mL正己烷,再加入0.9%NaCl 2 mL,涡旋1 min,以5000 r/min的转速离心5 min,分层后取上层清液于进样小瓶中,备用待GC分析,每个样本做3组重复。

1.2.3 气相色谱条件 进样口温度为260℃;采用分流模式进样,分流比为20:1;进样量为2 μ L;检测器温度270℃,氢气流量40 mL/min,空气流量350 mL/min,尾吹流量20 mL/min。载气流速: N_2 流量1.0 mL/min。升温程序:140℃保持5 min,然后以4℃/min升温到240℃,保持10 min。

1.2.4 数据处理 数据整理和图表制作采用Excel2016和Origin9.0软件;采用SPSS22.0软件进行T检验和单因素方差分析。每个样本平行测定3次,文中的结果均为平均值加减标准偏差。

2 结果与分析

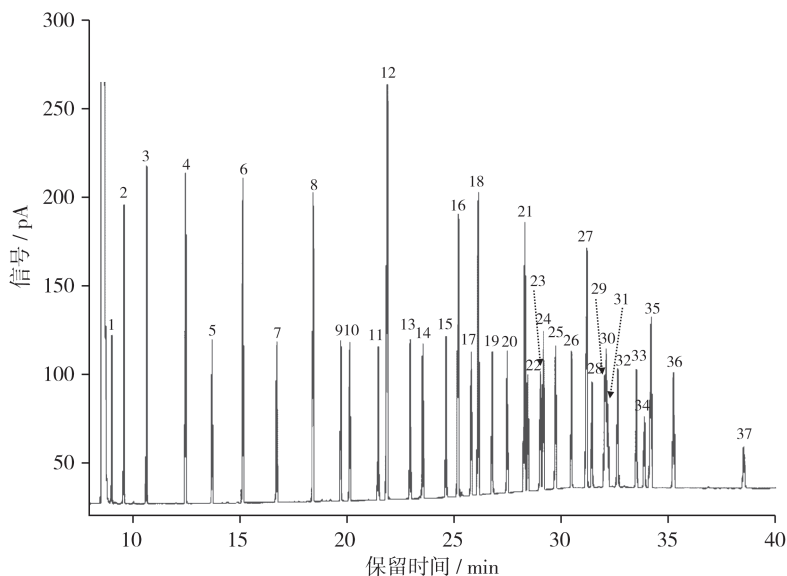
2.1 气相色谱条件优化

为了精准地对反式脂肪酸定性定量,我们按照国标方法《GB5009.168-2016 食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》和《GB5009.257-2016 食品安全国家标准 食品中反式脂肪酸的测定》对37种脂肪酸甲酯标样进行了分析。结果发现食品中脂肪酸的测定方法气相色谱分析时间长,一个样品需要86 min,且C22:1n9、C20:4n6和C20:3n3在HP-88气相毛细管柱上会共流出,出现峰重叠,难以分开。而食品中反式脂肪酸的测定分析方法,虽然耗时有所降低,但不能同时实现37种脂肪酸甲酯标样的基线分离。因此我们对脂肪酸组成GC分析方法进行了进一步优化。

脂肪酸甲酯GC分析时间的长短主要受毛细管柱的长短和程序升温过程的影响。在同时分析37种脂肪酸甲酯过程中,100 m的毛细管色谱柱对37种脂肪酸甲酯的分离效果和完全分离37种脂肪酸甲酯所需的分析时间均要优于30 m的毛细管柱,因此本文选定国标方法推荐的HP-88 100 m的毛细管柱来分离脂肪酸甲酯。在选定色谱柱的情况下,分析时间主要受升温程序的影响。程序升温初始温度的高低对短碳链脂肪酸甲酯的稳定性和出峰时间有影响,考虑到油菜籽及菜籽油中短碳链脂肪酸含量较低,提高初始温度对油菜籽和菜籽油脂肪酸含量的测定影响较小,优化过程中我们提高了程序升温的初始温度(由国标方法GB5009.168-2016的100℃提高到140℃)并将初始温度的维持时间缩短至5 min,这一优化过程相比国标方法可缩短分析时间12 min。此外我们将分析过程中的终止温度从230℃提高至240℃以便于长碳链脂肪酸甲酯的分离,并简化了升温梯度,以4℃/min从140℃升温到240℃,在240℃维持10 min,这样使得37种脂肪酸甲酯在分析过程中均匀的出峰,进一步提高分析通量。

优化后的升温程序为140℃保持5 min,然后以4℃/min升温到240℃,保持10 min。优化后的方法单个样品分析时间为40 min,与国标方法分析时间86 min相比,耗时缩短一半以上,大大提高脂肪酸含量分析的通量。优化后的GC方法分析37种脂肪酸甲酯标样出峰顺序和时间如图1所示。由图1可以看出,优化后的GC分析方法可以实现37种脂肪酸甲酯标样的分离,且对(C14:1T,9T)、(C16:1T,9T)、(C18:1T,11T)、(C18:1T,6T)、(C18:1T,9T)、(C18:2TT,9T,12T)、(C20:1T,11T)和(C22:1T,13T)八种(C14-C22)反式脂肪酸甲酯混标的分离效果与国标方法GB 5009.257-2016相当。

对优化后GC方法的线性范围、检出限(LOD)和定量限(LOQ)进行了研究。取0.1、0.5、1.0、2.0、4.0 mg/mL的37种脂肪酸甲酯标样按照优化后的方法进行测定,每个浓度点测定3次,以信噪比为3($S/N=3$)计算检出限(LOD),信噪比为10($S/N=10$)计算定量限(LOQ)。优化后方法的线性方程、相关系数(R^2)、检出限、定量限及37种脂肪酸甲酯标样在色谱柱上的保留时间见表1。由表1可以看出,在0.1~4.0 mg/mL的线性范围内,各目标物的 R^2 在0.9993~0.9998之间,线性关系良好,检测限在0.010~0.053 mg/mL之间,定量限在0.034~0.177 mg/mL之



注:图中的1~37分别对应如下:1/C4:0 丁酸甲酯,2/C6:0 己酸甲酯,3/C8:0 辛酸甲酯,4/C10:0 癸酸甲酯,5/C11:0 十一碳酸甲酯,6/C12:0 十二碳酸甲酯,7/C13:0 十三碳酸甲酯,8/C14:0 十四碳酸甲酯,9/C14:1 顺-9-十四碳一烯酸甲酯,10/C15:0 十五碳酸甲酯,11/C15:1 顺-10-十五碳一烯酸甲酯,12/C16:0 十六碳酸甲酯,13/C16:1 顺-9-十六碳一烯酸甲酯,14/C17:0 十七碳酸甲酯,15/C17:1 顺-10-十七碳一烯酸甲酯,16/C18:0 十八碳酸甲酯,17/C18:1-n9t 反-9-十八碳一烯酸甲酯,18/C18:1-n9c 顺-9-十八碳一烯酸甲酯,19/C18:2-n6t 反,反-9,12-十八碳二烯酸甲酯,20/C18:2-n6c 顺,顺-9,12-十八碳二烯酸甲酯,21/C20:0 二十碳酸甲酯,22/C18:3-n6 顺,顺,顺-6,9,12-十八碳三烯酸甲酯,23/C18:3-n3 顺,顺,顺-9,12,15-十八碳三烯酸甲酯,24/C20:1 顺-11-二十碳一烯酸甲酯,25/C21:0 二十一碳酸甲酯,26/C20:2 顺,顺-11,14-二十碳二烯酸甲酯,27/C22:0 二十二碳酸甲酯,28/C20:3-n6 顺,顺,顺-8,11,14-二十碳三烯酸甲酯,29/C22:1-n9 顺-13-二十二碳一烯酸甲酯,30/C20:3-n3 顺-11,14,17-二十碳三烯酸甲酯,31/C20:4-n6 顺-5,8,11,14-二十碳四烯酸甲酯,32/C23:0 二十三碳酸甲酯,33/C22:2 顺-13,16-二十二碳二烯酸甲酯,34/C20:5-n3 顺-5,8,11,14,17-二十碳五烯酸甲酯,35/C24:0 二十四碳酸甲酯,36/C24:1 顺-15-二十四碳一烯酸甲酯,37/C22:6-n3 顺-4,7,10,13,16,19-二十二碳六烯酸甲酯

Note: The numbers 1~37 in the figure correspond to the following: 1/C4:0 methyl butyrate; 2/C6:0 methyl hexanoate; 3/C8:0 methyl decanoate; 4/C10:0 methyl decanoate; 5/C11:0 methyl undecanoate; 6/C12:0 methyl dodecanoate; 7/C13:0 methyl tridecanoate; 8/C14:0 methyl myristate; 9/C14:1 cis-9-methyl myristoleate; 10/C15:0 methyl pentadecanoate; 11/C15:1 methyl cis-10-pentadecenoate; 12/C16:0 methyl palmitate; 13/C16:1 cis-9-methyl palmitoleate; 14/C17:0 methyl heptadecanoate; 15/C17:1 methyl cis-10-heptadecenoate; 16/C18:0 methyl stearate; 17/C18:1-n9t trans-9-methyl elaidate; 18/C18:1-n9c cis-9-methyl oleate; 19/C18:2-n6t trans-9,12-methyl linolelaidate; 20/C18:2-n6c cis-9,12-methyl linoleate; 21/C20:0 methyl arachidate; 22/C18:3-n6 cis-6,9,12-methyl- γ -linolenate; 23/C18:3-n3 cis-9,12,15-methyl- α -linolenate; 24/C20:1 methyl cis-11-eicosenoate; 25/C21:0 methyl heneicosanoate; 26/C20:2 cis-11,14-eicosadienoic acid methyl ester; 27/C22:0 methyl behenate; 28/C20:3-n6 cis-8,11,14-eicosatrienoic acid methyl ester; 29/C22:1-n9 methyl cis-13-docosenoate; 30/C20:3-n3 cis-11,14,17-eicosatrienoic acid methyl ester; 31/C20:4-n6 cis-5,8,11,14-methyl arachidonate; 32/C23:0 methyl tricosanoate; 33/C22:2 cis-13,16-docosadienoic acid methyl ester; 34/C20:5-n3 cis-5,8,11,14,17-eicosapentaenoic acid methyl ester; 35/C24:0 methyl tetracosanoate; 36/C24:1 methyl cis-15-tetracosenoate; 37/C22:6-n3 cis-4,7,10,13,16,19-docosahexaenoic acid methyl

图1 优化后的脂肪酸甲酯GC分析方法测定37种脂肪酸甲酯标样图谱

Fig. 1 37 fatty acid methyl esters standards chromatogram determined by the optimized GC method

间,表明该方法可以较好地用于样本中脂肪酸组成的测定。

2.2 油菜品种和产地对油菜籽脂肪酸含量的影响

采用上述优化好的脂肪酸组成测定方法对来自8个省份14个产地微波预处理前后的57个油菜籽样本及其对应冷榨菜籽油的脂肪酸组成进行了测定。对沔油823号、中双11号、中双12号、中双9号、蓉油18号、贵州油研50、穗源988号、绵油15号、华双5号、华油杂13号、大地199号、云油杂12号和云油杂51号等13个不同品种的油菜籽和不同产地

的沔油823号油菜籽中脂肪酸组成和含量进行了差异性分析,分析结果如表2、3所示。

由表2可知,不同品种的油菜籽中检测到了C10:0、C14:0、C16:0、C16:1、C18:0、C18:1、C18:2、C18:3、C20:0、C20:1、C20:2、C22:0、C22:1、C22:2和C24:1等脂肪酸,主要脂肪酸为C16:0、C18:0、C18:1、C18:2、C18:3、C20:1和C22:1,主要脂肪酸含量占总脂肪酸含量的96%以上。油菜籽中富含人体必需的脂肪酸C18:1和C18:2、且饱和脂肪酸平均含量高达92.79%。油菜籽中的多不饱和脂肪酸(PUSFA)与

表1 优化后的GC方法测定37种脂肪酸甲酯的标准曲线
Table 1 Standard curve of 37 fatty acid methyl esters analysed by optimized GC method

名称	线性范围	线性方程	相关系数 R^2	保留时间	定量限	检出限
Name	Linear range /(mg/mL)	Linear equation	Correlation coefficient	RT /(min)	LOQ/(mg/mL)	LOD/(mg/mL)
C4:0	0.1~4.0	$y = 8.7617x + 0.0451$	0.9996	9.03	0.18	0.05
C6:0	0.1~4.0	$y = 13.583x + 0.151$	0.9995	9.60	0.06	0.02
C8:0	0.1~4.0	$y = 15.949x + 0.1296$	0.9997	10.66	0.05	0.02
C10:0	0.1~4.0	$y = 17.355x + 0.054$	0.9998	12.47	0.06	0.02
C11:0	0.1~4.0	$y = 18.27x + 0.0263$	0.9996	13.71	0.06	0.02
C12:0	0.1~4.0	$y = 18.96x + 0.0162$	0.9995	15.14	0.06	0.02
C13:0	0.1~4.0	$y = 18.96x + 0.0162$	0.9995	16.72	0.07	0.02
C14:0	0.1~4.0	$y = 19.762x + 0.1225$	0.9996	18.40	0.07	0.02
C14:1	0.1~4.0	$y = 19.441x + 0.0972$	0.9995	19.71	0.07	0.02
C15:0	0.1~4.0	$y = 20.009x + 0.2062$	0.9996	20.12	0.07	0.02
C15:1	0.1~4.0	$y = 19.739x + 0.2346$	0.9995	21.45	0.07	0.02
C16:0	0.1~4.0	$y = 40.357x + 0.3793$	0.9996	21.84	0.03	0.01
C16:1	0.1~4.0	$y = 20.133x + 0.1027$	0.9996	22.94	0.07	0.02
C17:0	0.1~4.0	$y = 20.259x + 0.2909$	0.9996	23.51	0.07	0.02
C17:1	0.1~4.0	$y = 20.335x + 0.1921$	0.9996	24.61	0.07	0.02
C18:0	0.1~4.0	$y = 20.517x + 0.1904$	0.9997	25.14	0.07	0.02
C18:1-n9t	0.1~4.0	$y = 20.576x + 0.2864$	0.9995	25.77	0.07	0.02
C18:1-n9c	0.1~4.0	$y = 20.546x + 0.2936$	0.9997	26.08	0.07	0.02
C18:2-n6t	0.1~4.0	$y = 20.426x + 0.1976$	0.9996	26.75	0.07	0.02
C18:2-n6c	0.1~4.0	$y = 20.649x + 0.2643$	0.9995	27.45	0.07	0.02
C20:0	0.1~4.0	$y = 20.79x + 0.4630$	0.9995	28.23	0.07	0.02
C18:3-n6	0.1~4.0	$y = 20.405x + 0.1587$	0.9996	28.42	0.07	0.02
C18:3-n3	0.1~4.0	$y = 20.416x + 0.6317$	0.9996	29.00	0.07	0.02
C20:1	0.1~4.0	$y = 20.569x + 0.9112$	0.9994	29.12	0.07	0.02
C21:0	0.1~4.0	$y = 20.297x + 0.9506$	0.9996	29.68	0.07	0.02
C20:2	0.1~4.0	$y = 20.558x + 0.2810$	0.9996	30.44	0.07	0.02
C22:0	0.1~4.0	$y = 20.583x + 0.3481$	0.9995	31.10	0.07	0.02
C20:3-n6	0.1~4.0	$y = 20.564x + 0.3066$	0.9995	31.41	0.07	0.02
C22:1-n9	0.1~4.0	$y = 20.336x - 0.0757$	0.9993	32.00	0.07	0.02
C20:3-n3	0.1~4.0	$y = 20.142x + 0.3003$	0.9996	32.02	0.07	0.02
C20:4-n6	0.1~4.0	$y = 20.269x + 0.2955$	0.9996	32.15	0.08	0.02
C23:0	0.1~4.0	$y = 20.641x + 0.2799$	0.9996	32.56	0.08	0.02
C22:2	0.1~4.0	$y = 20.448x + 0.8995$	0.9995	33.46	0.08	0.02
C20:5-n3	0.1~4.0	$y = 19.970x + 0.1525$	0.9996	33.86	0.09	0.03
C24:0	0.1~4.0	$y = 20.553x + 0.4358$	0.9996	34.09	0.09	0.03
C24:1	0.1~4.0	$y = 20.506x + 0.9952$	0.9997	35.17	0.09	0.03
C22:6-n3	0.1~4.0	$y = 18.361x + 0.5119$	0.9997	38.51	0.11	0.03

单不饱和脂肪酸(MUSFA)与饱和脂肪酸(SFA)的比例为(2.11~4.01):(8.32~12.21):1,其比值远高于WHO、FAO和中国营养家协会推荐值(1:1:1),表明油菜籽是一种优质的食用植物油原料。单因素方差分析结果显示不同品种的油菜籽脂肪酸含量存在显著性差异(P 值均小于0.01),且差异水平有所不同,表明油菜品种会对油菜籽中主要脂肪酸含量产生显著性影响。此外,一般菜籽(绵油15号、华双

5号、华油杂13号、大地199号、云油杂12号)和低芥酸菜籽(沔油823号、中双11号、中双12号、中双9号、蓉油18号、贵州油研50号、云油杂51号、穗源988号)主要脂肪酸种类和含量存在显著差异。一般油菜籽的芥酸(C22:1)、贡多酸(C20:1)的含量要显著高于低芥酸菜籽,油酸(C18:1)含量要低于低芥酸菜籽,特别是高芥酸绵油15号油菜籽中的油酸含量仅为13.30%,显著低于低芥酸菜籽(油酸

表2 不同品种油菜籽脂肪酸含量的差异性分析

Table 2 Difference analysis of fatty acid content of rapeseed from different varieties

名称 Name	C10:0	C14:0	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20:0	C20:1	C20:2	C22:0	C22:1	C22:2	C24:1
沔油 823 号	ND ^a	ND ^a	4.50±	0.27±	2.02±	65.02±	18.18±	8.53±	0.46±	0.89±	ND ^a	ND ^a	ND ^a	ND ^a	ND ^a
Fengyou 823			0.20 ^e	0.03 ^{bcde}	0.28 ^{cde}	1.36 ^f	1.21 ^d	0.24 ^{cd}	0.03 ^a	0.01 ^a					
中双 11 号	0.13±	0.17±	4.02±	0.23±	2.96±	66.45±	17.03±	7.32±	0.60±	0.89±	ND ^a	0.20±	ND ^a	ND ^a	ND ^a
Zhongshaung 11	0.01 ^{ab}	0.02 ^b	0.03 ^{cd}	0.01 ^{ade}	0.17 ^h	0.50 ^f	1.22 ^{cd}	0.13 ^b	0.10 ^{bc}	0.05 ^a		0.03 ^{ab}			
中双 12 号	0.29±	ND ^a	4.12±	0.26±	2.47±	65.44±	17.93±	7.82±	0.56±	0.89±	ND ^a	0.11±	ND ^a	ND ^a	ND ^a
Zhongshaung 12	0.01 ^{bed}		0.33 ^{cd}	0.04 ^{bcd}	0.27 ^{fg}	3.22 ^f	2.17 ^d	0.75 ^{bc}	0.02 ^{ab}	0.02 ^a		0.06 ^{ab}			
中双 9 号	0.44±	ND ^a	4.51±	0.26±	2.04±	61.06±	21.94±	8.15±	0.51±	0.94±	ND ^a	ND ^a	ND ^a	ND ^a	ND ^a
Zhongshaung 9	0.05 ^d		0.02 ^e	0.01 ^{bcd}	0.03 ^{cde}	0.65 ^{de}	0.57 ^e	0.24 ^{bc}	0.03 ^{ab}	0.02 ^a					
蓉油 18 号	0.24±	ND ^a	4.26±	0.33±	2.15±	64.33±	18.74±	8.57±	0.47±	0.81±	ND ^a	ND ^a	ND ^a	ND ^a	ND ^a
Rongyou 18	0.01 ^{bc}		0.08 ^{de}	0.01 ^f	0.11 ^{def}	0.72 ^{ef}	0.03 ^d	0.79 ^{cd}	0.01 ^a	0.01 ^a					
贵州油研 50	0.33±	ND ^a	4.57±	0.33±	2.21±	64.69±	17.05±	8.68±	0.67±	1.12±	ND ^a	0.16±	ND ^a	ND ^a	ND ^a
GuiZhou Youyan 50	0.05 ^{cd}		0.02 ^e	0.03 ^f	0.32 ^{def}	1.70 ^f	1.24 ^{cd}	0.69 ^{cd}	0.01 ^c	0.04 ^a		0.03 ^{ab}			
穗源 988 号	0.28±	ND ^a	4.45±	0.28±	2.26±	64.18±	18.94±	7.82±	0.60±	1.00±	ND ^a	0.13±	ND ^a	ND ^a	ND ^a
Shuiyuan 988	0.04 ^{bed}		0.03 ^e	0.01 ^{cdef}	0.13 ^{ef}	1.31 ^{ef}	0.91 ^d	0.82 ^{bc}	0.04 ^{bc}	0.01 ^a		0.02 ^{ab}			
绵油 15 号	0.27±	ND ^a	2.84±	0.21±	1.04±	13.30±	12.50±	9.27±	0.96±	5.26±	0.42±	0.96±	52.04±	0.93±	0.83±
Mianyou 15	0.04 ^{bed}		0.14 ^a	0.03 ^a	0.02 ^a	0.32 ^a	0.06 ^b	0.03 ^d	0.02 ^c	0.66 ^c	0.05 ^b	0.06 ^c	0.9 ^g	0.03 ^b	0.11 ^d
华双 5 号	0.28±	ND ^a	4.08±	0.32±	1.60±	33.98±	15.39±	7.92±	0.76±	14.38±	0.57±	0.35±	19.58±	ND ^a	0.61±
Huashuang 5	0.02 ^{bed}		0.12 ^{cd}	0.01 ^{ef}	0.25 ^b	0.99 ^b	0.62 ^c	0.83 ^{bc}	0.01 ^d	0.88 ^d	0.10 ^c	0.01 ^b	0.77 ^f		0.12 ^c
华油杂 13 号	0.25±	ND ^a	3.79±	0.29±	1.71±	33.66±	15.26±	8.25±	0.80±	16.79±	0.50±	0.29±	17.77±	ND ^a	0.48±
Huayouza 13	0.03 ^{bc}		0.11 ^c	0.01 ^{def}	0.17 ^{bc}	2.73 ^b	0.18 ^c	0.16 ^{bed}	0.03 ^{de}	2.07 ^e	0.06 ^c	0.01 ^b	0.93 ^e		0.02 ^b
大地 199 号	0.23±	ND ^a	4.11±	0.30±	1.85±	58.49±	16.89±	8.73±	0.57±	5.18±	ND ^a	0.24±	3.24±	ND ^a	ND ^a
Dadi 199	0.09 ^{bc}		0.04 ^{cd}	0.01 ^{def}	0.14 ^{bed}	1.01 ^{cd}	0.63 ^{cd}	0.39 ^{cd}	0.06 ^b	0.37 ^c		0.07 ^{ab}	0.16 ^c		
云油杂 12 号	0.23±	ND ^a	3.91±	0.29±	2.02±	57.35±	15.60±	9.32±	0.55±	3.93±	ND ^a	0.23±	6.46±	ND ^a	ND ^a
Yunyouza 12	0.02 ^{bc}		0.22 ^c	0.02 ^{def}	0.01 ^{cde}	1.40 ^c	0.30 ^c	0.14 ^d	0.01 ^{ab}	1.56 ^{bc}		0.03 ^{ab}	0.47 ^d		
云油杂 51 号	ND ^a	ND ^a	3.03±	0.21±	2.78±	74.24±	9.42±	5.36±	0.86±	2.42±	ND ^a	0.35±	1.33±	ND ^a	ND ^a
Yunyouza 51			0.04 ^b	0.02 ^{ab}	0.05 ^{gh}	0.11 ^g	0.21 ^a	0.05 ^a	0.02 ^c	0.04 ^{ab}		0.02 ^b	0.02 ^b		

注:数据为均值±标准差,ND 含量低于检测限,表示未检出;同列数据上标中不同字母的两项间具有显著差异($P<0.01$)。下同
Note: Each value in the table represents the mean of determinations ± SD. ND represents the content is lower than the detection limit, which means it has not been detected; Values with different lowercase letters in the same column are significantly different ($P<0.01$). Same as below

表3 不同产地的沔油 823 油菜籽中主要脂肪酸含量的差异性分析

Table 3 Difference analysis of main fatty acid contents in rapeseed of Fengyou 823 from different habitats

产地 Site	C10:0	C14:0	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20:0	C20:1	C20:2	C22:0	C22:1	C22:2	C24:1
浏阳市	0.17±	ND	4.44±	0.27±	2.31±	64.52±	18.78±	7.88±	0.50±	0.92±	ND	0.10±	ND	ND	ND
Liuyang	0.05		0.05	0.03	0.04	0.47	0.28	0.48	0.04	0.06		0.02			
常德市	ND	ND	4.54±	0.30±	2.04±	63.82±	19.64±	8.00±	0.50±	0.91±	ND	0.11±	ND	ND	ND
Changde			0.20	0.02	0.17	1.31	1.12	0.03	0.01	0.01		0.01			
株洲市	ND	ND	4.50±	0.27±	2.02±	65.02±	18.18±	8.53±	0.46±	0.89±	ND	ND	ND	ND	ND
Zhuzhou			0.20	0.03	0.28	1.36	1.21	0.24	0.03	0.01					

含量大于 60%)。因此油菜籽的品种和类型(低芥酸型、高芥酸型)均会显著影响油菜籽脂肪酸的种类和含量。
对取自湖南省浏阳市、常德市和株洲市三个不同产地的沔油 823 号油菜籽的脂肪酸进行了单因素方差分析,结果显示三个不同产地的沔油 823 号油

菜籽的脂肪酸种类及含量不存在显著性差异(P 值均大于 0.05),表明同一品种不同产地的油菜籽中脂肪酸含量不存在显著性差异,产地不会对油菜籽中主要脂肪酸含量产生显著性影响。综合表 2、3 分析来看,油菜产地不会显著影响油菜籽的脂肪酸组成,油菜品种是影响油菜籽脂肪酸组成和含量的主

要因素。

2.3 微波预处理前后油菜籽及菜籽油中脂肪酸含量的分析

对来自8个省份14个产地微波预处理前后的57个油菜籽样本及其对应冷榨菜籽油的脂肪酸进行了统计分析。根据检测结果将57个油菜样本分为高芥酸组油菜籽(芥酸含量 $\geq 3.0\%$,共有12个油菜籽样本)和低芥酸组油菜籽(芥酸含量 $< 3.0\%$,共有45个油菜籽样本)。并对微波预处理前后的57种油菜籽及对应的冷榨菜籽油中的主要脂肪酸含量范围和平均值进行了统计,结果如表4所示。

由表4可知,不管是高芥酸组还是低芥酸组,微波预处理前后的油菜籽和菜籽油中均检测到了C16:0、C16:1、C18:0、C18:1、C18:2、C18:3、C20:0、C20:1、C20:2、C22:1和C22:2等脂肪酸;油菜籽和冷榨菜籽油中富含人体必需的脂肪酸C18:1和C18:2,且富含不饱和脂肪酸,含量高达92%以上。高芥酸组与低芥酸组油菜籽中的脂肪酸含量存在显著性差异,高芥酸组油菜籽中的C20:1和C22:1的平均含量分别是低芥酸组油菜籽中的6.89倍和64.5倍,而高芥酸组油菜籽中C18:1的平均含量仅为低芥酸组油菜籽中的71.48%。微波预处理前后的高芥酸组和低芥酸组冷榨菜籽油中C20:1、C22:1和C18:1的含量也存在显著性差异,这与高芥酸和低芥酸组油菜籽中的脂肪酸含量差异具有一致性。微波预处理前后的油菜籽和冷榨菜籽油中均没有检测到C18:1-n9t、C18:2-n6t等反式脂肪酸,表明微波预处理调质增香产生反式脂肪酸的风险较低。但微波预处理后油菜籽中C10:0和C14:0含量有所下降,这与短碳链脂肪酸的热稳定性差,在微波预处理过程中这些短碳链的脂肪酸可能被分解成小分子的醛酮酸有关^[15,17]。微波预处理前后的冷榨菜籽油的主要脂肪酸与油菜籽中的脂肪酸具有一致性,表明制油过程不会显著影响油菜籽的脂肪酸组成和含量。相比于油菜籽的脂肪酸,冷榨菜籽油中的短碳链脂肪酸含量更低,这可能与短碳链的脂肪酸含量低热稳定性差,加工过程中易于氧化分解有关。冷榨菜籽油中的多不饱和脂肪酸(PUSFA)与单不饱和脂肪酸(MUSFA)与饱和脂肪酸(SFA)的平均比例约为3.8:9.7:1,其比值远高于WHO、FAO和中国营养家协会推荐值(1:1:1)。从饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸比例适中的角度来看,菜籽油可作为一种富含单不饱和和多不饱和脂肪酸的优质食用植物油,特别是微波冷榨低芥酸菜籽油中不饱和脂肪

酸平均含量高达93.13%,要显著高于被称为液体黄金的橄榄油,这也可能是菜籽油被誉为“东方橄榄油”的一个重要原因。

油菜籽按芥酸含量的不同可以分为一般(高芥酸)油菜籽和低芥酸油菜籽。为探索微波预处理对油菜籽和冷榨菜籽油脂肪酸组成的影响,分别选取具有代表性的高芥酸油菜籽绵油15号和低芥酸油菜籽云油杂51号为例展开分析,结果见表5。

由表5可知低芥酸云油杂51号和高芥酸绵油15号油菜籽脂肪酸种类和含量存在显著性差异。表5中微波预处理前后脂肪酸的显著性差异主要由油菜品种的不同造成,因为同一品种的油菜籽脂肪酸含量处于同一水平无差异,不同品种的油菜籽脂肪酸含量处于不同水平存在差异。从主要脂肪酸含量上来看,微波预处理前后的菜籽和冷榨菜籽油中的脂肪酸组成和含量具有一致性,微波预处理不会对主要脂肪酸组成及含量产生显著性影响,这与谢亚^[18]等研究结果即微波预处理不会对冷榨菜籽油甘油三酯含量产生影响的结果相一致。低芥酸云油杂51号和高芥酸绵油15号油菜籽和冷榨菜籽油中脂肪酸差异较大的为油酸、亚油酸、亚麻酸、花生一烯酸和芥酸,高芥酸油菜籽及菜籽油中花生一烯酸和芥酸含量分别是低芥酸油菜籽和菜籽油中的2.17倍和38.33倍,而高芥酸油菜籽和菜籽油中的油酸含量仅为低芥酸油菜籽和菜籽油中的17.91%和18.13%。从不饱和脂肪酸含量来看,低芥酸云油杂51号的MUSFA含量要显著高于高芥酸绵油15号,PUSFA则相反,但USFA总量没有显著性差异。

综合来看,微波预处理油菜籽后进行榨油在获得色泽浅^[12]、风味纯正^[11]、canolol等有益成分含量高^[8,14]的冷榨菜籽油的同时不会对油菜籽和冷榨菜籽油中的脂肪酸种类和含量造成显著性影响,也不会像常规焙炒工艺那样可能会产生反式脂肪酸等风险因子^[9,19]。油菜品种的差异是影响油菜籽和冷榨菜籽油中脂肪酸种类和含量差异的主要因素。

3 讨论与结论

气相色谱法是脂肪酸分析方法中应用最广泛的方法,也是我国测定脂肪酸的国家标准方法,不管是国标方法还是文献中报道的分析顺式、反式脂肪酸的方法,均存在分析时间长、检测通量低、分离效果不理想等局限性,有待进一步优化^[20,21]。本文优化后的脂肪酸分析方法,可以在40 min内基本实现37种脂肪酸甲酯的分离,大大缩短了样品分析时

表4 微波前后油菜籽和菜籽油中主要脂肪酸的含量范围和均值

Table 4 Content range and average value of fatty acids in seeds and rapeseed oil before and after microwave treatment /%

名称 Name	油菜籽 Rapeseed	微波油菜籽 Microwaved rapeseed	冷榨菜籽油 Cold pressed rapeseed oil	微波冷榨菜籽油 Cold pressed microwaved rapeseed oil
低芥酸(芥酸含量<3.0%) ^a Low erucic acid (<3.0%)	C10:0	ND~0.54; 0.22	ND~0.17; 0.01	ND
	C14:0	ND~0.09; 0.01	ND~0.10; 0.01	ND
	C16:0	3.03~5.14; 4.35	3.25~5.61; 4.36	3.22~4.61; 4.02
	C16:1	0.21~0.39; 0.30	0.20~0.37; 0.26	ND~0.28; 0.19
	C18:0	1.35~3.00; 2.19	1.44~3.48; 2.26	1.48~2.94; 2.24
	C18:1-n9t	ND	ND	ND
	C18:1-n9c	55.46~74.24; 63.47	55.49~76.46; 63.97	59.67~72.81; 63.93
	C18:2-n6t	ND	ND	ND
	C18:2-n6c	6.94~22.82; 18.82	9.72~23.14; 18.75	10.84~21.67; 18.16
	C18:3n6	5.36~10.76; 8.44	5.31~10.62; 8.33	5.48~9.82; 8.36
	C20:0	0.37~0.69; 0.52	0.33~0.96; 0.54	ND~0.81; 0.55
	C20:1	0.72~5.95; 1.19	0.18~4.38; 0.96	0.89~3.34; 1.63
	C20:2	ND	ND	ND
	C22:0	ND~0.32; 0.12	ND~0.41; 0.15	ND~0.39; 0.03
	C22:1	ND~2.82; 0.22	ND~2.66; 0.27	ND~2.93; 0.85
	C22:2	ND	ND	ND~1.16; 0.05
	C24:0	ND~0.47; 0.01	ND~0.80; 0.01	ND
	C24:1	ND	ND	ND
	SFA	6.74~8.41; 7.43	5.01~11.52; 7.33	6.24~7.61; 6.84
	USFA	91.59~93.26; 92.57	70.90~117.80; 92.67	92.39~93.76; 93.16
	MUSFA	60.00~80.79; 65.31	55.87~84.04; 65.59	61.62~76.52; 66.60
	PUSFA	12.30~32.59; 27.26	15.03~33.75; 27.08	16.32~31.09; 26.56
高芥酸(芥酸含量≥3.0%) ^b High erucic acid (≥3.0%)	C10:0	ND~0.31; 0.21	ND	ND
	C14:0	ND~0.07; 0.01	ND~0.08; 0.01	ND
	C16:0	3.24~4.32; 3.92	3.83~6.45; 4.38	2.77~4.25; 3.63
	C16:1	0.18~0.37; 0.28	ND~0.48; 0.26	ND~0.23; 0.17
	C18:0	1.02~2.75; 1.89	1.35~2.62; 2.07	1.08~2.64; 1.84
	C18:1-n9t	ND	ND	ND
	C18:1-n9c	13.07~60.75; 45.37	0.81~63.50; 48.73	13.89~63.04; 44.45
	C18:2-n6t	ND	ND	ND
	C18:2-n6c	12.46~18.53; 15.81	13.62~24.21; 17.90	11.96~19.07; 15.58
	a-C18:3n6	7.12~9.64; 8.45	7.20~15.44; 9.24	8.08~9.36; 8.64
	C20:0	0.49~0.88; 0.67	0.39~1.24; 0.73	ND~0.93; 0.66
	C20:1	2.32~18.25; 8.20	0.32~4.50; 1.10	2.44~17.34; 8.52
	C20:2	ND~0.64; 0.19	ND~1.01; 0.19	ND~0.60; 0.24
	C22:0	ND~1.00; 0.30	ND~1.19; 0.31	ND~0.98; 0.20
	C22:1	3.42~51.41; 14.22	3.14~62.09; 14.54	3.00~52.61; 15.76
	C22:2	ND~0.85; 0.08	ND~1.10; 0.11	ND
	C24:0	ND	ND	ND
	C24:1	ND~0.91; 0.27	ND~1.26; 0.30	ND~0.96; 0.32
	SFA	6.33~7.85; 6.98	6.35~10.40; 7.50	5.33~7.21; 6.33
	USFA	92.15~93.67; 93.02	89.60~93.65; 92.50	92.79~94.67; 93.67
	MUSFA	65.86~70.61; 68.48	48.53~71.09; 65.06	64.69~73.64; 69.22
	PUSFA	22.77~27.21; 24.54	21.02~41.08; 27.44	20.61~28.26; 24.45

注:^a:45个低芥酸油菜籽中的脂肪酸含量的最小值、最大值和平均值;^b:12个高芥酸油菜籽中脂肪酸含量的最小值、最大值和平均值;USFA 不饱和脂肪酸总量;MUSFA 单不饱和脂肪酸总量;PUSFA 多不饱和脂肪酸总量;下同

Note: ^a: the minimum, maximum and average values of fatty acid content in 45 low erucic acid rapeseeds. ^b: the minimum, maximum and average values of fatty acid content in 12 high erucic acid rapeseeds. USFA means the total amount of unsaturated fatty acids; MUSFA means the total amount of mono-unsaturated fatty acids; PUSFA means the total amount of polyunsaturated fatty acids; Same as below

表5 微波预处理对油菜籽和菜籽油中脂肪酸的含量影响
Table 5 Effect of microwave pretreatment on the content of fatty acids in rapeseed and rapeseed oil /%

名称 Name	低芥酸菜籽云油杂 51 号 Low erucic acid rapeseed yunyouza 51				高芥酸菜籽绵油 15 号 High erucic acid rapeseed mianyou 15			
	菜籽 Rapeseed	微波菜籽 Microwaved rapeseed	冷榨菜籽油 Cold pressed rapeseed oil	微波冷榨菜籽油 Cold pressed micro-waved rapeseed oil	菜籽 Rapeseed	微波菜籽 Microwaved rapeseed	冷榨菜籽油 Cold pressed rapeseed oil	微波冷榨菜籽油 Cold pressed micro-waved rapeseed oil
C16:0	3.03±0.04 ^{ab}	3.29±0.21 ^b	3.22±0.01 ^b	3.24±0.01 ^b	2.84±0.14 ^a	2.89±0.03 ^a	2.79±0.02 ^a	2.80±0.01 ^a
C16:1	0.21±0.02 ^{ab}	0.23±0.01 ^{ab}	0.21±0.02 ^{ab}	0.20±0.01 ^a	0.21±0.03 ^{ab}	0.27±0.03 ^b	0.18±0.01 ^a	0.19±0.01 ^a
C18:0	2.78±0.05 ^b	2.89±0.70 ^b	2.79±0.01 ^b	2.78±0.01 ^b	1.04±0.02 ^a	1.14±0.03 ^a	1.09±0.01 ^a	1.07±0.01 ^a
C18:1-n9t	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C18:1	74.24±0.11 ^b	74.07±2.53 ^b	73.81±0.02 ^b	73.63±0.01 ^b	13.30±0.32 ^a	13.06±0.06 ^a	13.95±0.08 ^a	13.14±0.01 ^a
C18:2-n6t	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C18:2	9.42±0.21 ^a	9.24±2.15 ^a	9.84±0.05 ^a	10.02±0.01 ^a	12.50±0.06 ^b	12.33±0.08 ^b	12.01±0.06 ^b	12.07±0.01 ^b
C18:3	5.36±0.05 ^a	5.38±0.10 ^a	5.48±0.01 ^a	5.51±0.01 ^a	9.27±0.03 ^{bc}	9.37±0.83 ^c	8.27±0.04 ^b	8.27±0.01 ^b
C20:0	0.86±0.02	0.84±0.16	0.81±0.01	0.80±0.01	0.96±0.02	0.97±0.01	0.92±0.01	0.92±0.01
C20:1	2.42±0.04 ^a	2.35±0.16 ^a	2.12±0.02 ^a	2.08±0.01 ^a	5.26±0.66 ^{bc}	5.15±0.19 ^b	6.02±0.02 ^c	6.03±0.01 ^c
C20:2	ND	ND	ND	ND	0.42±0.05	0.50±0.01	0.42±0.01	0.42±0.01
C22:0	0.35±0.02 ^a	0.37±0.06 ^a	0.34±0.01 ^a	0.34±0.01 ^a	0.96±0.06 ^b	1.01±0.11 ^b	0.97±0.01 ^b	0.99±0.01 ^b
C22:1	1.33±0.02 ^a	1.34±0.02 ^a	1.38±0.01 ^a	1.40±0.01 ^a	52.04±0.90 ^b	52.36±1.22 ^b	52.44±0.25 ^b	53.12±0.02 ^b
C22:2	ND ^a	ND ^a	ND ^a	ND ^a	0.93±0.03 ^b	0.95±0.07 ^b	0.96±0.01 ^b	0.97±0.01 ^b
SFA	7.02±0.21 ^b	7.39±1.12 ^b	7.16±0.05 ^b	7.16±0.02 ^b	5.80±0.20 ^a	6.01±0.05 ^a	5.77±0.04 ^a	5.78±0.01 ^a
USFA	92.98±0.21 ^{ab}	92.61±1.12 ^a	92.84±0.02 ^{ab}	92.84±0.02 ^{ab}	93.93±0.20 ^{ab}	93.99±0.05 ^{ab}	94.25±0.04 ^b	94.21±0.01 ^b
MUSFA	78.20±0.04 ^b	77.99±3.18 ^b	77.52±0.01 ^b	77.31±0.01 ^b	70.81±0.15 ^a	70.84±1.04 ^a	72.59±0.14 ^a	72.48±0.01 ^a
PUSFA	14.78±0.02 ^a	14.62±2.05 ^a	15.32±0.01 ^a	15.53±0.01 ^a	23.12±0.05 ^b	23.15±0.99 ^b	21.66±0.11 ^b	21.73±0.01 ^b

注:同行数据上标中不同字母的两项间具有显著差异($P<0.05$)

Note: Values with different lowercase letters in the same row are significantly different ($P<0.05$)

间,显著提高了脂肪酸分析通量,在 0.1~4.0 mg/mL 的线性范围内线性关系良好,可较好地实现植物油料油脂中脂肪酸的快速分析。

微波预处理作为一种绿色高效的加工技术,在浓香菜籽油加工生产中被广泛应用。原料品质和加工工艺都会影响菜籽油的品质。本试验结果表明不同品种的油菜籽脂肪酸含量存在差异,这可能是由于不同品种的油菜籽中与脂肪酸相关基因表达量和生长环境的差异有关^[22,23]。不同品种油菜籽中主要脂肪酸的含量范围分别为棕榈 3.03%~5.14%,硬脂酸 1.02%~3.00%,油酸 13.07%~74.24%,亚油酸 6.94%~22.82%,亚麻酸 5.36%~10.76%,花生一烯酸 0.72%~18.25% 和芥酸 ND~51.41%;与相关文献报道的含量相一致^[22,24,25]。低芥酸油菜籽和高芥酸油菜籽及其对应的冷榨菜籽油中主要脂肪酸含量差异较大。低芥酸油菜籽和菜籽油中油酸含量较高,平均含量高达 63% 以上,芥酸和花生一烯酸含量较低,平均含量分别不超过 0.8% 和 1.2%;而高芥酸油菜籽和菜籽油中的油酸含量相对较低,平均含量仅为 45%,芥酸和花生一

烯酸含量相对较高,分别高达 14% 和 8%。芥酸含量与油酸含量呈负相关,芥酸含量与花生一烯酸含量呈正相关,这与田恩堂等的研究结果相一致^[23]。微波预处理不会影响油菜籽和对应菜籽油中脂肪酸组成和含量,且菜籽油的主要脂肪酸组成和含量与油菜籽原料中的具有一致性,这与文献报道的相关研究结果一致^[13,14,25]。张东东等^[19]研究结果表明采用常规焙炒工艺焙炒油菜籽时容易产生反式脂肪酸等风险因子,本试验采用微波焙炒不会产生反式油酸、反式亚油酸等反式脂肪酸,表明采用微波焙炒产生反式脂肪酸的风险较低。

综上所述,本试验优化建立的油菜籽及其油中脂肪酸组成 GC 测定方法,可在 40 min 内可实现 37 种脂肪酸甲酯的快速分析测定,显著提高了脂肪酸的分析通量。不同油菜品种主要脂肪酸含量存在显著性差异;油菜品种是影响油菜籽和冷榨菜籽油脂肪酸组成和含量的主要因素,油菜产地对其脂肪酸组成影响较小。微波预处理不会对油菜籽及其对应油脂中的主要脂肪酸组成和含量产生显著性影响,微波预处理不会产生反式脂肪酸。较常规炒

籽工艺,微波焙炒更容易获得不含反式脂肪酸的健康营养的高品质菜籽油。

参考文献:

- [1] 刘成, 冯中朝, 肖唐华, 等. 我国油菜产业发展现状、潜力及对策[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(4): 485-489. DOI: 10.7505/j.issn.1007-9084.2019.04.001.
- [2] Valentova O, Novotna Z, Svoboda Z, et al. Microwave heating and γ -irradiation treatment of rapeseed (*Brassica napus*) [J]. J Food Lipids, 2000, 7(4): 237-245. DOI: 10.1111/j.1745-4522.2000.tb00175.x.
- [3] Bansal N, Dhaliwal A S, Mann K S. Dielectric characterization of rapeseed (*Brassica napus* L.) from 10 to 3000 MHz[J]. Biosyst Engin, 2016, 143: 1-8. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.12.014.
- [4] 从艳霞, 郑明明, 郑畅, 等. 微波技术对油菜籽品质影响研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(1): 151-156. DOI: 10.7505/j.issn.1007-9084.2019.01.020.
- [5] Rekas A, Wroniak M, Siger A, et al. Mechanical hulling and thermal pre-treatment effects on rapeseed oil antioxidant capacity and related lipophilic and hydrophilic bioactive compounds[J]. Int J Food Sci Nutr, 2017, 68(7): 788-799. DOI: 10.1080/09637486.2017.1290054.
- [6] Yang M, Huang F H, Liu C S, et al. Influence of microwave treatment of rapeseed on minor components content and oxidative stability of oil[J]. Food Bioproc Technol, 2013, 6(11): 3206-3216. DOI: 10.1007/s11947-012-0987-2.
- [7] Rekas A, Siger A, Wroniak M, et al. Phytochemicals and antioxidant activity degradation kinetics during long-term storage of rapeseed oil pressed from microwave-treated seeds[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2018, 120(2). DOI: 10.1002/ejlt.201700283.
- [8] Yang M, Zheng C, Zhou Q, et al. Influence of microwave treatment of rapeseed on phenolic compounds and canolol content[J]. J Agr Food Chem, 2014, 62(8): 1956-1963. DOI: 10.1021/jf4054287.
- [9] 刘玉兰, 刘春梅, 张东东, 等. 焙炒条件对油菜籽中多环芳烃含量影响的研究[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(7): 24-27. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9578.2018.07.009.
- [10] Niu Y X, Rogiewicz A, Wan C Y, et al. Effect of microwave treatment on the efficacy of expeller pressing of *Brassica Napus* rapeseed and *Brassica Juncea* mustard seeds [J]. J Agr Food Chem, 2015, 63(12): 3078-3084. DOI: 10.1021/jf504872x.
- [11] Zhou Q, Yang M, Huang F, et al. Effect of pretreatment with dehulling and microwaving on the flavor characteristics of cold-pressed rapeseed oil by GC-MS-PCA and electronic nose discrimination[J]. J Food Sci, 2013, 78(7): C961-C970. DOI: 10.1111/1750-3841.12161.
- [12] 陈萌. 微波预处理油菜籽对压榨菜籽饼浸出油品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [13] Wroniak M, Rekas A, Siger A, et al. Microwave pre-treatment effects on the changes in seeds microstructure, chemical composition and oxidative stability of rapeseed oil [J]. Lwt-Food Sci Technol, 2016, 68(68): 634-641. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.01.013.
- [14] 周琦, 杨涓, 黄凤洪, 等. 微波和脱皮处理菜籽对油中活性成分的影响[J]. 中国油料作物学报, 2011, 33(5): 507-512.
- [15] Valentová O, Novotná Z, Svoboda Z, et al. Influence of microwave treatment on the quality of rapeseed oil [J]. J Am Oil Chem Soc, 2002, 79(12): 1271-1272. DOI: 10.1007/s11746-002-0639-7.
- [16] Ponne C T, Möller A C, Tijskens L M M, et al. Influence of microwave and steam heating on lipase activity and microstructure of Rapeseed (*Brassica Napus*) [J]. J Agri Food Chem, 1996, 44(9): 2818-2824. DOI: 10.1021/jf950697l.
- [17] Xu B G, Wei B X, Ren X F, et al. Dielectric pretreatment of rapeseed 1: influence on the drying characteristics of the seeds and physico-chemical properties of cold-pressed oil [J]. Food Bioproc Technol, 2018, 11(6): 1236-1247. DOI: 10.1007/s11947-018-2091-8.
- [18] Xie Y, Wei F, Xu S L, et al. Profiling and quantification of lipids in cold-pressed rapeseed oils based on direct infusion electrospray ionization tandem mass spectrometry [J]. Food Chemistry, 2019: 194-203. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.01.146.
- [19] 张东东. 炒香型油脂生产中多环芳烃的控制[D]. 郑州, 河南工业大学, 2016.
- [20] 李梓铭, 李红爱, 余佳荣, 等. 不同色谱柱对 37 种脂肪酸甲酯的分离条件优化及分离效果比对[J]. 食品工业科技, 2017, 38(24): 53-57. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2017.24.011.
- [21] 李焕, 李美萍, 张生万. 37 种脂肪酸甲酯的色谱分离及 QSRR 研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(19): 49-53. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2013.19.029.
- [22] 蔡东芳, 张书芬, 肖英杰, 等. 甘蓝型油菜油酸、亚油酸和亚麻酸含量的关联分析[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(4): 397-405. DOI: 10.7505/j.issn.1007-9084.2016.04.001.
- [23] 田恩堂, 李鲁峰, 贾世燕, 等. 芥菜型油菜脂肪酸含量的变异、相关性分析及芥酸调控基因 *FAEI* 特异引物设计[J]. 广西植物, 2016, 36(12): 1445-1452. DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201512001.
- [24] 刘淑艳, 刘忠松, 官春云. 芥菜型油菜种质资源研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2007, 8(3): 351-358. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1810.2007.03.022.
- [25] 黄颖, 郑畅, 刘昌盛, 等. 催熟与微波预处理对菜籽油品质的影响[J]. 中国油脂, 2019, 44(7): 39-43.

(责任编辑:郭学兰)