

doi:10.12301/spxb202300049

文章编号:2095-6002(2023)06-0139-11

引用格式:叶乐,李茹,郭军.基于脂肪酸指纹的胡麻油真实性判别模型的建立[J].食品科学技术学报,2023,41(6):139-149.



YE Le, LI Ru, GUO Jun. Establishment of authenticity discrimination model of flaxseed oil based on fatty acid fingerprint [J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(6):139-149.

# 基于脂肪酸指纹的胡麻油真实性判别模型的建立

叶乐,李茹,郭军\*

(内蒙古农业大学食品科学与工程学院,内蒙古呼和浩特 010018)

**摘要:**胡麻油富含 $\alpha$ -亚麻酸,价格其他食用油的3~20倍,极易被掺假和冒充,因此,基于脂肪酸(fatty acids, FAs)指纹建立了胡麻油真实性判别模型。采集胡麻油、菜籽油、葵花籽油、大豆油、花生油、玉米油、芝麻油、调和油8种食用油及餐厨垃圾油和地沟油2种废弃油,利用气相色谱法测定油脂中的12种FAs,进行主成分分析(principal component analysis, PCA),观察10种油脂以FAs聚类的特征,用正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)评价以FAs指纹鉴别胡麻油物种、冷热榨工艺及品级真实性的可行性,并建立胡麻油中菜籽油掺假量的偏最小二乘回归(partial least squares, PLS)定量预测模型。胡麻油与其他油脂FAs指纹极其不同, $C_{18:3\omega3}$ 质量比为 $(50.14 \pm 9.68)$ g/100g,显著高于其他油脂;而 $C_{18:1\omega9}$ 和 $C_{18:2\omega6}$ 质量比分别为 $(16.62 \pm 5.02)$ 、 $(14.62 \pm 4.64)$ g/100g,显著低于其他油脂。PCA和OPLS-DA均可对胡麻油物种、加工方法和品级进行区分,OPLS-DA的鉴别效果更好。PCA和OPLS-DA显示,胡麻油与菜籽油、大豆油聚类最靠近。OPLS-DA对胡麻油物种判别准确率为100.0%,冷热榨判别准确率96.7%,品级判别准确率90.0%。胡麻油物种、加工方法和品级鉴别的关键FAs为 $C_{18:3\omega3}$ 、 $C_{18:1\omega9}$ 和 $C_{18:2\omega6}$ 。胡麻油5种关键FAs与菜籽油掺假量相关性分析显示, $C_{18:3\omega3}$ 含量与菜籽油掺假量呈极显著负相关, $C_{18:1\omega9}$ 和 $C_{18:2\omega6}$ 含量与菜籽油掺假量呈极显著正相关。胡麻油掺菜籽油样品的PLS定量模型相关系数 $R^2$ 为0.986,校正均方差RMSEE为4.2635,交叉验证均方差RMSEcv为4.2648,掺假量预测误差不超过10%。结果表明:基于FAs指纹建立胡麻油真实性判别模型较为可行,该模型有继续优化的空间。

**关键词:**胡麻油;脂肪酸;指纹特征;判别;真实性

**中图分类号:** TS225.1

**文献标志码:** A

胡麻(*Linum usitatissimum* L.),又名油用亚麻,为亚麻科亚麻属草本植物,在我国主要种植于内蒙古、甘肃、宁夏、山西和新疆等地,年产量33.5万t<sup>[1-2]</sup>。胡麻油 $\alpha$ -亚麻酸含量在45%~70%,在人体内可转换为DHA和EPA,具有调节血脂、降低低密度脂蛋白、软化血管和降血压等功效<sup>[3-4]</sup>。目前我国胡麻油市

场价格其他食用植物油的3~20倍,极易受到廉价油脂、餐厨垃圾油和地沟油的掺假或冒充。不同加工精炼方式生产的胡麻油产品级别档次不同<sup>[5]</sup>。热榨胡麻籽油烘烤和压榨温度可高达180℃以上,破坏不饱和脂肪酸,生成反式脂肪酸(TFA)、醛类、多环芳烃等有害物质,显著增高苯并芘<sup>[6-8]</sup>。冷榨

收稿日期:2023-01-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31760489)。

Foundation: National Natural Science Foundation of China(31760489)。

第一作者:叶乐,女,硕士研究生,研究方向为食品营养与安全。

\*通信作者:郭军,男,教授,博士,主要从事食品营养与安全方面的研究。

工艺是在60℃以下压榨,可有效保留营养并控制有害物质生成<sup>[9]</sup>。建立判别胡麻油物种、加工方法和品级的模型具有重要意义。

指纹特征是指研究对象的一系列化学成分的种类和比例,以及仪器指纹谱数据集和矩阵中潜藏的研究对象特有的模式或特征<sup>[10]</sup>。每种植物油应该具有特定的脂肪酸(FAs)构成或模式,即其FAs指纹。化学计量学数据结构分析及可视化、模式和判别分析,为解析和挖掘数据集、数据矩阵等大数据结构和隐藏的规律模式,及利用食物大数据描绘和分类食物,提供了无限的可能<sup>[10-11]</sup>。目前基于FAs指纹进行胡麻油掺假判别的研究较少。Wang等<sup>[12]</sup>在胡麻油中掺不同比例菜籽油、玉米油、花生油、葵花籽油、大豆油和芝麻油,测定了C<sub>16:0</sub>、C<sub>18:0</sub>、C<sub>18:1 $\omega$ 9</sub>、C<sub>18:2 $\omega$ 6</sub>和C<sub>18:3 $\omega$ 3</sub>这5种脂肪酸,并进行了相似性评价、判别分析和主成分分析(principal component analysis, PCA),结果表明掺假体积分数大于10%时判别准确率可达100%。但PCA对胡麻油和其他油脂的聚类分离效果并不直观。Sun等<sup>[13]</sup>用气相色谱-质谱检测胡麻油和其他5种油的FAs,用PCA和递归支持向量机进行胡麻油和非胡麻油二分类判别,鉴别掺伪体积分数为10%的胡麻油样品准确率可达95.6%。这些报道中对照油种类少,且尚未对胡麻油冷榨和热榨工艺及品级开展判别尝试,此外化学计量学解析方法方面也需要进行新的探索。

本研究拟观察胡麻油和其他包括餐厨垃圾油和地沟油样品在内的10种油脂的12种FAs聚类特征,评价以FAs指纹鉴别胡麻油物种、冷热榨工

艺及品级真实性的可行性,建立胡麻油掺菜籽油样品的PLS定量预测模型。研究旨在为打击胡麻油掺假冒充,培育正常市场竞争秩序,维护消费者权益,优化榨油和精炼工艺,促进品牌化发展提供一定帮助,为胡麻油科研、生产和产品标准制定提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

#### 1.1.1 油脂样品信息

在前期植物油近红外光谱和FAs指纹特征研究的基础上,从上百份胡麻油样品中保留30份代表性品牌和小作坊胡麻油样品,进行以FAs指纹判别胡麻油真实性的可行性研究。实验所用油脂样品共116份,详细信息见表1。30份胡麻油样品分别为内蒙古呼和浩特、集宁、锡林郭勒、巴彦淖尔胡麻油加工企业采集的5份冷榨胡麻油(聚类参照样品)及家庭作坊采集的3份热榨胡麻油(聚类参照样品),其余22份市售和联系厂家邮寄的品牌胡麻油样品均来自内蒙古自治区和山西省。采集市售品牌菜籽油、葵花籽油、大豆油、花生油、玉米油、芝麻油和调和油各10份(共70份)。16份废弃油分别为12份餐厨垃圾油(食堂和饭馆废弃剩余饭菜垃圾中提取未精炼的油脂,采集自呼和浩特市某环保公司)、4份精炼地沟油(国家食品安全风险评估中心)。采样后分装于棕色样品瓶,充入氮气拧紧瓶盖用封口膜密封,4℃保存备用。

表1 样品信息

Tab. 1 Sample information

样品	加工方法				品级				产地			品牌	总计
	冷榨	热榨	浸出	水代	一级	二级	三级	四级	内蒙古	山西	其他		
胡麻油	18	12	-	-	20	10	-	-	20	10	-	25	30
菜籽油	4	6	-	-	3	-	4	3	-	-	10	8	10
葵花籽油	10	-	-	-	10	-	-	-	3	-	7	10	10
大豆油	3	-	7	-	6	-	4	-	-	-	10	10	10
花生油	4	6	-	-	9	1	-	-	-	-	10	10	10
玉米油	10	-	-	-	10	-	-	-	1	-	9	10	10
芝麻油	6	-	-	4	9	1	-	-	-	-	10	10	10
调和油	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	9	10
餐厨垃圾油	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12
废弃油 地沟油	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4

-表示未采集样品。

人工制备掺假样本:选择已知背景冷榨胡麻油样本5份和5份菜籽油随机组合,将菜籽油按质量分数0、25%、50%、75%和100%掺入胡麻油中制备掺假样本,每个比例10份,共计50份。

### 1.1.2 实验试剂

甲醇,色谱纯,北京迈瑞达科技有限公司;正庚烷、三氟化硼-甲醇,色谱纯,上海麦克林生化科技有限公司;氢氧化钠、氯化钠、无水硫酸钠,分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司;十一碳酸甘油三酯标准品(纯度99%)、37组分脂肪酸甲酯混合标准品,美国Sigma公司。

### 1.2 仪器与设备

FL-9720型气相色谱仪、FL-9720型氢火焰离子检测器,浙江福立分析仪器有限公司;KQ2200E型超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;JG-HH-S26型数显恒温水浴锅,济南精城实验仪器有限公司;AL204型电子天平,梅特勒-托利多仪器有限公司。

### 1.3 实验方法

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》<sup>[14]</sup>进行前处理,116份样品平行测定2次,获得232套数据。

气相色谱条件:毛细管色谱柱SPTM-2560(100 m×0.25 mm×0.20 μm),美国Suppleco公司。初始温度100℃,保持5 min,以3℃/min升温至240℃,保持35 min;分流式进样,分流比为20:1,载气为氮气,氮气流速30 mL/min,隔垫吹扫2 mL/min,氢气流速30 mL/min,空气流速300 mL/min;注射样品量为1 μL。

### 1.4 数据处理

#### 1.4.1 聚类 and 分类分析

116份样品平行测定获得的232套数据,用SIMCA 14.1化学计量学软件对各研究分类(油脂种类、胡麻油冷榨和热榨、胡麻油一级和二级)进行聚类分析和判别分析。对FAs数据进行center scaling(中心缩放)、unit variance scaling(单位方差缩放)和Pareto scaling(帕累托缩放)等预处理后,利用PCA观察油脂样品以FAs指纹自然聚类的特征。数据最优预处理结合正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA),进行有监督的聚类分析和研究分类的判别分析;通过根向量图找出对分类贡献大的关键FAs。

#### 1.4.2 描述性统计和差异检验

平行测定样品脂肪酸含量并取均值,用SPSS 20.0对FAs含量按研究分类(油脂种类、胡麻油冷榨和热榨、胡麻油一级和二级)进行描述性统计和差异检验。结果用平均值±标准偏差表示。

#### 1.4.3 相关性分析

用Excel对胡麻油5种关键FAs与菜籽油掺假量进行相关性分析。

#### 1.4.4 偏最小二乘回归定量预测模型的建立

用SIMCA 14.1建立胡麻油掺入菜籽油的偏最小二乘回归(partial least squares, PLS)定量预测模型,估计FAs建模判别胡麻油掺菜籽油的敏感阈。利用相关系数( $R^2$ )、校正均方差(RMSEE)、交叉验证均方差(RMSE<sub>cv</sub>)评估PLS模型可靠性, $R^2$ 的值越接近1, RMSEE和RMSE<sub>cv</sub>的值越小说明模型的准确性和精度越高,模型稳定性越好。

## 2 结果与分析

### 2.1 10种油脂脂肪酸指纹特征及真实性判别分析

10种油脂FAs指纹数据进行center scaling预处理后的PCA和OPLS-DA结果见图1。PCA和OPLS-DA前2个主成分方差累计贡献率为71.9%和71.0%,说明对12种FAs指标共性提取率较高。10种油脂以FAs指纹在主轴(横轴)上分开聚类,说明不同种类油脂FAs指纹差别大,且主要因素线性高。胡麻油聚类于主轴最右侧,与其他油脂距离较远,相对而言与菜籽油和大豆油聚类最靠近,与花生油最远,说明胡麻油与其他油脂FAs指纹极其不同,与菜籽油和大豆油FAs指纹最接近,也应该最难鉴别。菜籽油颜色比大豆油深,但与色浅的冷榨胡麻油很接近。并且菜籽油比胡麻油便宜得多,种植加工地域与胡麻油有重叠,我国东北、华北、西北都有菜籽种植和加工,菜籽油也最有可能作为胡麻油的掺假油。因此,本研究着重探究了FAs指纹判别胡麻油与菜籽油的可行性。

调和油聚类较离散,这应该与不同品牌产品调配油种类不同有关。餐厨垃圾油和地沟油在第二轴(纵轴)方向与植物油完全分离,而两者聚类较靠近,说明两者本质上一致,都是来自剩饭菜的废弃油。OPLS-DA的聚类功能属于有监督的聚类分析,按已知分类拟合,因此聚类和判别效果优于PCA<sup>[15]</sup>,不同种类油距离更大,同种油更聚集。

OPLS-DA 模型对不同油脂判别准确率见表 2。OPLS-DA 模型对胡麻油判别准确率为 100.0%，说明以 FAs 区分胡麻油与其他油脂完全可行。对调和油误判率最高在预料之内。精炼地沟油(来自国

家食品安全风险评估中心)全部被判别为餐厨垃圾油(本研究采集),这可能与 2 类样品采样不均匀有关;但两者都是餐厨废弃油,本应设为一类建模,因而并不算误判。

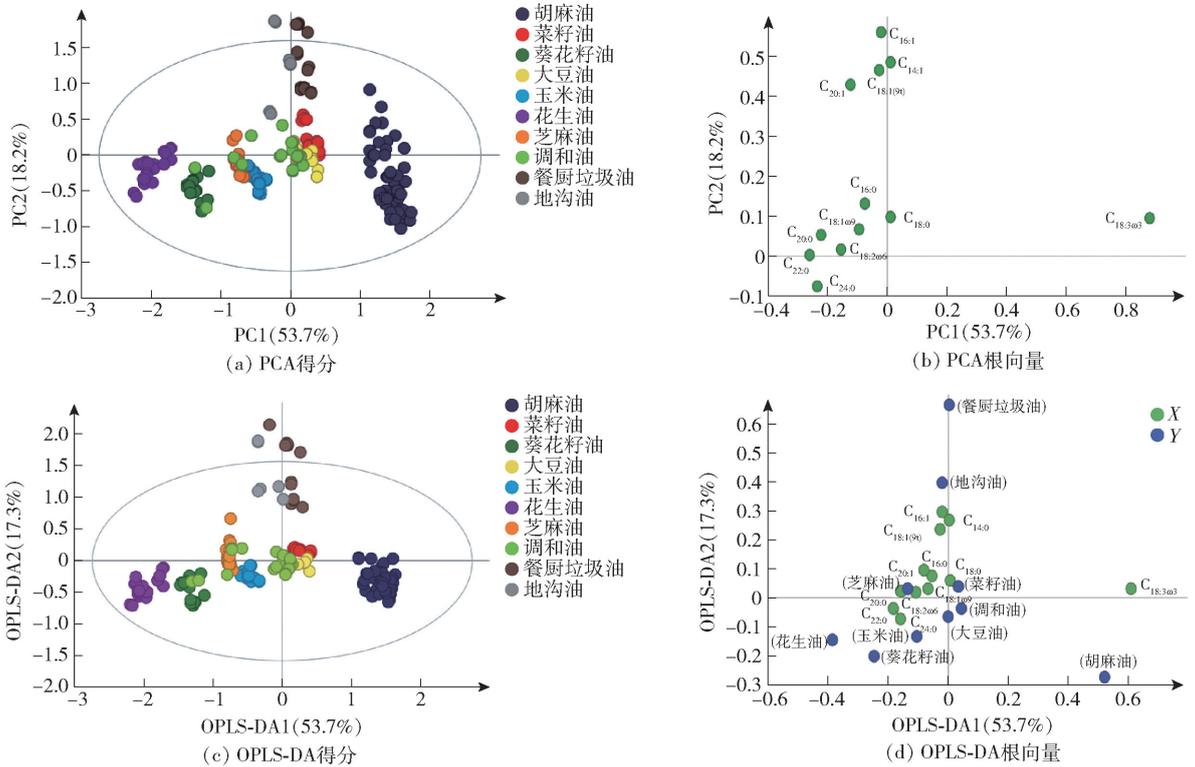


图 1 10 种油脂脂肪酸 PCA 和 OPLS-DA 结果

Fig. 1 PCA and OPLS-DA results for fatty acids of ten kinds of oil

表 2 10 种油脂分类结果

Tab. 2 Classification results of ten kinds of oil

样品	预测结果										样本数	正确数	正确率/%
	胡麻油	菜籽油	葵花籽油	大豆油	玉米油	花生油	芝麻油	调和油	餐厨垃圾油	地沟油			
胡麻油	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	60	100.0
菜籽油	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	20	20	100.0
葵花籽油	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	20	20	100.0
大豆油	0	0	0	19	1	0	0	0	0	0	20	19	95.0
玉米油	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	20	20	100.0
花生油	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	20	20	100.0
芝麻油	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	20	20	100.0
调和油	0	0	2	12	2	3	0	0	0	1	20	0	0
餐厨垃圾油	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	24	24	100.0
废弃油 地沟油	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	8	0	0

10 种油脂 FAs 质量比见表 3。根向量分析 [图 1(b)、图 1(d)] 结合描述性统计结果(表 3)表明:胡麻油聚类分离的关键 FAs 为  $C_{18:3\omega3}$ 、 $C_{18:1\omega9}$  和  $C_{18:2\omega6}$ , 其中  $C_{18:3\omega3}$  几乎可作为判别胡麻油真实性的

单指标。但根据国家标准,亚麻籽油(胡麻油)中  $C_{18:3\omega3}$  的相对含量为 45% ~ 70%<sup>[16]</sup>, 即掺入高达 55% 的低价食用油,  $C_{18:3\omega3}$  含量依然可以达到标准。因此,单指标的孤立分析不足以鉴别胡麻油与其他

表3 10种油脂 FAs 含量比较  
Tab.3 Fatty acid content comparison of ten kinds of oil

g·100g<sup>-1</sup>

脂肪酸	w(油脂)										
	胡麻油	菜籽油	葵花籽油	大豆油	玉米油	花生油	芝麻油	调和油	餐厨垃圾油	地沟油	胡麻/菜籽
C <sub>14:0</sub>	0.04 ±	0.06 ±	0.07 ±	0.08 ±	0.04 ±	0.04 ±	0.02 ±	0.08 ±	0.64 ±	0.55 ±	0.7
	0.02 <sup>b</sup>	0.06 <sup>b</sup>	1.10 <sup>a</sup>	0.74 <sup>a</sup>							
C <sub>16:0</sub>	5.04 ±	4.18 ±	5.77 ±	10.00 ±	11.57 ±	9.35 ±	8.54 ±	9.47 ±	13.00 ±	18.32 ±	1.2
	0.96 <sup>e</sup>	0.98 <sup>e</sup>	2.68 <sup>de</sup>	0.98 <sup>bc</sup>	0.80 <sup>bc</sup>	1.86 <sup>c</sup>	0.76 <sup>cd</sup>	3.88 <sup>c</sup>	4.46 <sup>b</sup>	32.98 <sup>a</sup>	
C <sub>18:0</sub>	3.39 ±	1.71 ±	3.13 ±	3.93 ±	1.55 ±	3.14 ±	4.98 ±	3.00 ±	5.63 ±	3.96 ±	2.0
	0.60 <sup>b</sup>	0.42 <sup>c</sup>	1.36 <sup>b</sup>	0.62 <sup>b</sup>	0.10 <sup>c</sup>	0.82 <sup>b</sup>	0.48 <sup>a</sup>	1.58 <sup>b</sup>	5.08 <sup>a</sup>	3.16 <sup>b</sup>	
C <sub>20:0</sub>	0.15 ±	0.53 ±	0.23 ±	0.36 ±	0.38 ±	1.26 ±	0.57 ±	0.41 ±	0.28 ±	0.38 ±	0.3
	0.12 <sup>f</sup>	0.04 <sup>b</sup>	0.10 <sup>ef</sup>	0.10 <sup>cd</sup>	0.12 <sup>c</sup>	0.50 <sup>a</sup>	0.06 <sup>b</sup>	0.14 <sup>c</sup>	0.04 <sup>de</sup>	0.12 <sup>c</sup>	
C <sub>22:0</sub>	0.28 ±	0.64 ±	1.41 ±	0.79 ±	0.25 ±	4.77 ±	0.29 ±	1.01 ±	0.58 ±	0.32 ±	0.4
	0.14 <sup>e</sup>	0.08 <sup>d</sup>	0.14 <sup>b</sup>	0.12 <sup>cd</sup>	0.06 <sup>e</sup>	1.34 <sup>a</sup>	0.08 <sup>e</sup>	0.78 <sup>c</sup>	0.16 <sup>d</sup>	0.50 <sup>e</sup>	
C <sub>24:0</sub>	0.13 ±	0.22 ±	0.31 ±	0.29 ±	0.30 ±	2.30 ±	0.18 ±	0.47 ±	0.22 ±	0.17 ±	0.6
	0.16 <sup>d</sup>	0.24 <sup>cd</sup>	0.46 <sup>bc</sup>	0.06 <sup>cd</sup>	0.06 <sup>bc</sup>	0.92 <sup>a</sup>	0.06 <sup>cd</sup>	0.32 <sup>b</sup>	0.44 <sup>cd</sup>	0.20 <sup>cd</sup>	
C <sub>16:1</sub>	0.06 ±	0.17 ±	0.07 ±	0.08 ±	0.09 ±	0.06 ±	0.11 ±	0.10 ±	0.87 ±	0.48 ±	1.2
	0.06 <sup>e</sup>	0.14 <sup>c</sup>	0.08 <sup>c</sup>	0.02 <sup>c</sup>	0.02 <sup>c</sup>	0.02 <sup>c</sup>	0.04 <sup>e</sup>	0.02 <sup>c</sup>	0.90 <sup>a</sup>	0.98 <sup>b</sup>	
C <sub>18:1 (9t)</sub>	0.06 ±	0.05 ±	0.02 ±	0.05 ±	0.05 ±	0.05 ±	0.19 ±	0.05 ±	0.33 ±	0.51 ±	1.2
	0.18 <sup>e</sup>	0.06 <sup>c</sup>	0.04 <sup>c</sup>	0.08 <sup>e</sup>	0.04 <sup>c</sup>	0.04 <sup>c</sup>	0.20 <sup>e</sup>	0.04 <sup>c</sup>	0.60 <sup>b</sup>	1.30 <sup>a</sup>	
C <sub>18:1ω9</sub>	16.62 ±	52.24 ±	24.54 ±	19.79 ±	25.10 ±	40.63 ±	34.83 ±	26.41 ±	25.31 ±	33.20 ±	0.3
	5.02 <sup>f</sup>	7.70 <sup>a</sup>	6.50 <sup>d</sup>	3.90 <sup>e</sup>	2.00 <sup>d</sup>	9.24 <sup>b</sup>	1.74 <sup>e</sup>	8.18 <sup>d</sup>	5.90 <sup>d</sup>	6.40 <sup>e</sup>	
C <sub>20:1</sub>	0.37 ±	0.56 ±	0.10 ±	0.31 ±	0.22 ±	0.92 ±	0.16 ±	0.36 ±	0.37 ±	1.03 ±	0.7
	1.12 <sup>cd</sup>	1.42 <sup>bc</sup>	0.14 <sup>d</sup>	0.40 <sup>cd</sup>	0.26 <sup>cd</sup>	0.50 <sup>ab</sup>	0.14 <sup>cd</sup>	0.48 <sup>cd</sup>	0.20 <sup>cd</sup>	2.40 <sup>a</sup>	
C <sub>18:2ω6</sub>	14.62 ±	19.47 ±	57.23 ±	49.47 ±	52.65 ±	31.14 ±	43.14 ±	47.36 ±	38.12 ±	26.46 ±	0.8
	4.64 <sup>g</sup>	3.28 <sup>f</sup>	8.28 <sup>a</sup>	1.98 <sup>bc</sup>	3.66 <sup>ab</sup>	8.14 <sup>f</sup>	2.82 <sup>d</sup>	9.50 <sup>cd</sup>	17.6 <sup>e</sup>	29.20 <sup>f</sup>	
C <sub>18:3ω3</sub>	50.14 ±	7.99 ±	0.14 ±	7.00 ±	0.71 ±	0.10 ±	0.37 ±	3.72 ±	5.28 ±	1.89 ±	6.3
	9.68 <sup>a</sup>	2.50 <sup>b</sup>	0.08 <sup>e</sup>	3.10 <sup>b</sup>	0.24 <sup>e</sup>	0.08 <sup>e</sup>	0.06 <sup>e</sup>	4.56 <sup>cd</sup>	2.20 <sup>bc</sup>	4.20 <sup>de</sup>	
SFA	9.24 ±	7.50 ±	11.50 ±	15.68 ±	14.24 ±	20.83 ±	14.70 ±	14.61 ±	20.98 ±	24.12 ±	1.2
	1.26 <sup>de</sup>	1.32 <sup>e</sup>	0.58 <sup>cd</sup>	1.12 <sup>b</sup>	1.08 <sup>bc</sup>	4.28 <sup>a</sup>	0.80 <sup>bc</sup>	3.04 <sup>bc</sup>	11.18 <sup>a</sup>	34.64 <sup>a</sup>	
MUFA	17.36 ±	54.86 ±	24.79 ±	20.31 ±	25.52 ±	40.93 ±	35.27 ±	27.00 ±	27.30 ±	37.46 ±	0.3
	6.08 <sup>e</sup>	7.78 <sup>a</sup>	6.38 <sup>d</sup>	4.10 <sup>e</sup>	2.06 <sup>d</sup>	12.32 <sup>b</sup>	1.84 <sup>e</sup>	8.38 <sup>d</sup>	7.48 <sup>d</sup>	10.36 <sup>bc</sup>	
PUFA	65.48 ±	28.36 ±	57.49 ±	56.95 ±	53.49 ±	32.32 ±	43.58 ±	51.40 ±	44.04 ±	28.90 ±	2.3
	7.52 <sup>a</sup>	5.84 <sup>e</sup>	8.16 <sup>b</sup>	4.24 <sup>bc</sup>	3.82 <sup>bc</sup>	12.32 <sup>e</sup>	2.82 <sup>d</sup>	9.26 <sup>c</sup>	19.66 <sup>d</sup>	15.12 <sup>e</sup>	
TFA	0.10 ±	0.11 ±	0.04 ±	0.13 ±	0.07 ±	0.09 ±	0.21 ±	0.11 ±	0.35 ±	0.62 ±	0.9
	0.20 <sup>e</sup>	0.12 <sup>c</sup>	0.12 <sup>c</sup>	0.20 <sup>e</sup>	0.06 <sup>c</sup>	0.08 <sup>c</sup>	0.22 <sup>bc</sup>	0.16 <sup>c</sup>	0.60 <sup>b</sup>	1.40 <sup>a</sup>	
ω-3PUFA	50.56 ±	8.31 ±	0.21 ±	7.03 ±	0.73 ±	0.13 ±	0.38 ±	3.74 ±	5.37 ±	1.96 ±	6.1
	9.38 <sup>a</sup>	3.08 <sup>b</sup>	0.20 <sup>f</sup>	3.10 <sup>bc</sup>	0.24 <sup>f</sup>	0.08 <sup>f</sup>	0.06 <sup>f</sup>	4.56 <sup>de</sup>	2.16 <sup>cd</sup>	4.20 <sup>ef</sup>	
ω-6PUFA	14.87 ±	19.95 ±	57.25 ±	49.83 ±	52.73 ±	31.17 ±	43.17 ±	47.59 ±	38.66 ±	26.80 ±	0.7
	4.76 <sup>b</sup>	3.12 <sup>g</sup>	8.28 <sup>a</sup>	1.92 <sup>bc</sup>	5.68 <sup>ab</sup>	8.14 <sup>f</sup>	2.82 <sup>de</sup>	9.24 <sup>cd</sup>	17.78 <sup>e</sup>	29.34 <sup>f</sup>	
ω-6/ω-3	0.3	2.4	272.6	7.1	72.2	239.8	113.6	12.7	7.2	13.7	-

不同字母表示同行数据差异显著( $P < 0.05$ )或差异极显著( $P < 0.01$ )。

油脂,需要多变量指标进行分析。餐厨垃圾油和地沟油聚类分离的关键 FAs 为 C<sub>14:0</sub>、C<sub>16:1</sub> 和 C<sub>18:1(9t)</sub>,结合描述性统计,这3种 FAs 含量显著高于植物油,可能与废弃油含动物油脂有关。

由10种油脂 FAs 质量比结果可知,胡麻油以不饱和脂肪酸为主,占总 FAs 质量的90%,多不饱和

脂肪酸(polyunsaturated fatty acid, PUFA) 占总 FAs 的71%。在测得的12种 FAs 中,以 C<sub>18:3ω3</sub>、C<sub>18:1ω9</sub>、C<sub>18:2ω6</sub>、C<sub>16:0</sub> 和 C<sub>18:0</sub> 为主,分别占总 FAs 质量的54%、18%、16%、5%和4%。胡麻油 C<sub>18:3ω3</sub> 质量比极显著高于其他油脂( $P < 0.01$ ),分别是菜籽油、葵花籽油、大豆油、玉米油、花生油、芝麻油、调和油、餐

厨垃圾油和地沟油的 6.3、358.1、7.2、70.6、501.4、135.5、13.5、9.5 和 26.5 倍;  $C_{18:1\omega9}$  和  $C_{18:2\omega6}$  质量比显著低于其他油脂 ( $P < 0.05$ )。菜籽油  $C_{18:1\omega9}$ 、葵花籽油  $C_{18:2\omega6}$  及花生油  $C_{20:0}$ 、 $C_{22:0}$ 、 $C_{24:0}$  质量比显著高于其他油脂 ( $P < 0.05$ )。餐厨垃圾油和地沟油  $C_{14:0}$ 、 $C_{16:1}$  和  $C_{18:1(9)}$  质量比显著高于其他油脂 ( $P < 0.05$ )。大豆油、玉米油、芝麻油和调和油没有明显的特征 FAs。

从营养学角度出发,胡麻油、菜籽油、葵花籽油、大豆油、玉米油、花生油、芝麻油、调和油、餐厨垃圾油和地沟油  $\omega - 6/\omega - 3$  为 0.3、2.4、272.6、7.1、72.2、239.8、113.6、12.7、7.2 和 13.7, 胡麻油和菜籽油比值最接近中国营养学会建议的 1 或 2<sup>[17]</sup>。

## 2.2 冷榨和热榨胡麻油脂肪酸指纹特征及真实性判别分析

冷榨和热榨胡麻油 FAs 指纹数据进行 center

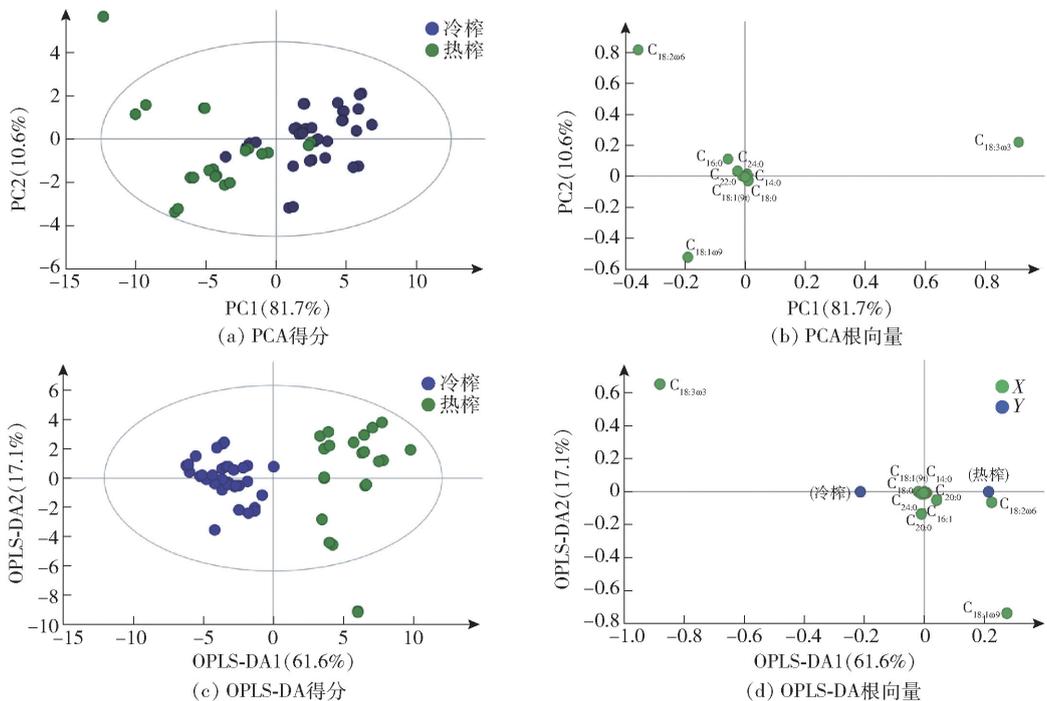


图2 冷榨和热榨胡麻油脂肪酸 PCA 和 OPLS-DA 结果

Fig. 2 PCA and OPLS-DA results for fatty acids of cold and hot pressed flaxseed oil

表4 冷榨和热榨胡麻油分类结果

Tab. 4 Classification results of cold and hot pressed flaxseed oil

样品	预测结果		样本数	正确数	正确率/%
	冷榨	热榨			
冷榨	36	0	36	36	100.0
热榨	2	22	24	22	91.7
合计	38	22	60	58	96.7

scaling 预处理后的 PCA 和 OPLS-DA 结果见图 2。PCA 和 OPLS-DA 前 2 个主成分方差累计贡献率为 92.3% 和 78.7%, 说明对 12 种 FAs 指标共性提取率较高。OPLS-DA 分离效果优于 PCA, 冷榨和热榨样品在 OPLS-DA 分析中可以完全分离 [图 2(c)], 说明不同加工方法的胡麻油 FAs 存在差异, 可能是高温热榨破坏部分 FAs, 导致聚类分离。此外, 同种油脂样本点分布比较分散, 可能是不同厂家或品牌的生产工艺参数存在差异造成的。OPLS-DA 模型对冷榨和热榨胡麻油准确率见表 4, 冷热榨胡麻油整体判别准确率为 96.7%, 说明以 FAs 区分冷榨和热榨胡麻油可行。

冷榨和热榨胡麻油 FAs 含量比较见表 5。根向量分析 [图 2(b)、图 2(d)] 结合描述性统计结果 (表 5) 表明: 冷榨和热榨胡麻油分类的关键 FAs 为  $C_{18:3\omega3}$ 、 $C_{18:2\omega6}$  和  $C_{18:1\omega9}$ 。

由表 5 可知, 冷榨与热榨胡麻油饱和脂肪酸 (saturated fatty acid, SFA) 差异不显著, 冷榨 PUFA 显著高于热榨 ( $P < 0.05$ ), 热榨单不饱和脂肪酸 (monounsaturated fatty acid, MUFA) 显著高于冷榨 ( $P < 0.05$ ), 这是由于高温破坏部分 PUFA, 从而使 MUFA 相对含量增加, 与糟帆等<sup>[18]</sup> 研究结果一致。12 种 FAs 中有 9 种 FAs 存在显著差异 ( $P < 0.05$ ) 或极显著差异 ( $P < 0.01$ ), 其中  $C_{18:3\omega3}$ 、

表5 冷榨和热榨胡麻油 FAs 含量比较

Tab.5 Comparison of fatty acid content between cold and hot pressed flaxseed oil  $g \cdot 100g^{-1}$

脂肪酸	w(冷榨)	w(热榨)	w(冷榨)/w(热榨)
C <sub>14:0</sub>	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02	1.0
C <sub>16:0</sub>	4.91 ± 0.62 <sup>b</sup>	5.25 ± 1.22 <sup>a</sup>	0.9
C <sub>18:0</sub>	3.49 ± 0.54 <sup>a</sup>	3.24 ± 0.56 <sup>b</sup>	1.1
C <sub>20:0</sub>	0.12 ± 0.08 <sup>b</sup>	0.20 ± 0.12 <sup>a</sup>	0.6
C <sub>22:0</sub>	0.26 ± 0.12 <sup>b</sup>	0.30 ± 0.16 <sup>a</sup>	0.9
C <sub>24:0</sub>	0.17 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.07 ± 0.18 <sup>b</sup>	2.4
C <sub>16:1</sub>	0.06 ± 0.04	0.06 ± 0.10	1.0
C <sub>18:1(9t)</sub>	0.09 ± 0.22 <sup>a</sup>	0.02 ± 0.04 <sup>b</sup>	4.5
C <sub>18:1ω9</sub>	15.60 ± 2.62 <sup>b</sup>	18.15 ± 6.14 <sup>a</sup>	0.9
C <sub>20:1</sub>	0.41 ± 1.28	0.30 ± 0.86	1.4
C <sub>18:2ω6</sub>	13.73 ± 1.68 <sup>b</sup>	15.96 ± 6.20 <sup>a</sup>	0.9
C <sub>18:3ω3</sub>	53.21 ± 5.32 <sup>a</sup>	45.54 ± 7.00 <sup>b</sup>	1.2
SFA	9.21 ± 1.18	9.30 ± 1.38	1.0
MUFA	16.23 ± 2.66 <sup>b</sup>	19.05 ± 8.00 <sup>a</sup>	0.9
PUFA	67.23 ± 5.30 <sup>a</sup>	62.85 ± 7.34 <sup>b</sup>	1.1
TFA	0.13 ± 0.26 <sup>a</sup>	0.05 ± 0.08 <sup>b</sup>	2.6
ω-3PUFA	53.29 ± 5.34 <sup>a</sup>	46.48 ± 8.16 <sup>b</sup>	1.1
ω-6PUFA	13.91 ± 1.86 <sup>b</sup>	16.31 ± 6.18 <sup>a</sup>	0.9
ω-6/ω-3	0.3	0.4	-

不同字母表示同行数据差异显著( $P < 0.05$ )或差异极显著( $P < 0.01$ )。

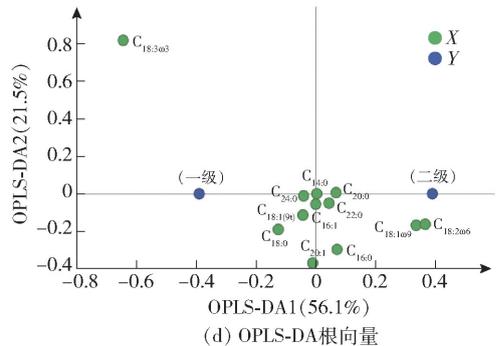
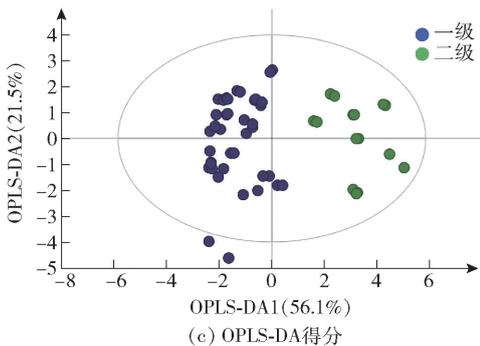
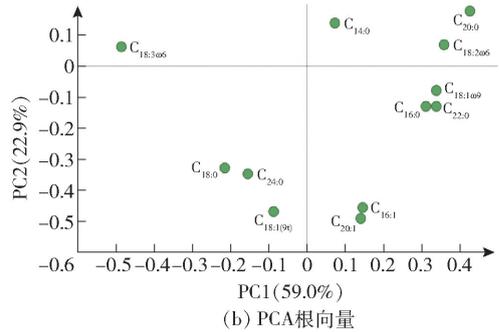
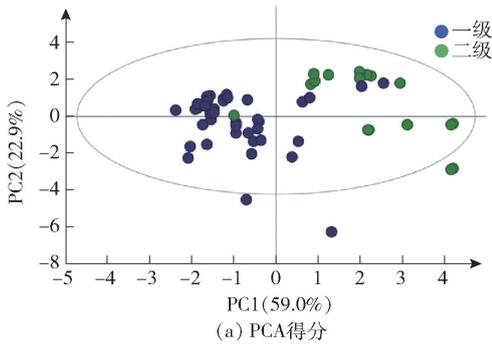


图3 一级和二级胡麻油脂肪酸 PCA 和 OPLS-DA 结果

Fig.3 PCA and OPLS-DA results for fatty acids of first and second grade flaxseed oil

C<sub>18:1ω9</sub>和C<sub>18:2ω6</sub>的绝对差异较大。冷榨C<sub>18:3ω3</sub>质量比显著高于热榨( $P < 0.05$ ),C<sub>18:1ω9</sub>和C<sub>18:2ω6</sub>显著低于热榨( $P < 0.05$ ),这是由于C<sub>18:3ω3</sub>对热处理敏感,高温热榨时被破坏,从而使C<sub>18:1ω9</sub>和C<sub>18:2ω6</sub>相对含量增加<sup>[19]</sup>。

### 2.3 一级和二级胡麻油脂肪酸指纹特征及真实性判别分析

以我国油料品种、质量以及相应加工方法为指标,确定植物油的质量等级。我国食用油质量标准体系规定,市场上的一般食用油根据精炼程度(橄榄油和特种油脂除外)分为4个等级。国家标准将传统压榨胡麻油成品依据色泽、气味、透明度、水分及挥发物、不溶性杂质和酸价分为一级和二级<sup>[16]</sup>。

一级和二级胡麻油 FAs 指纹数据进行 unit variance scaling 预处理后的 PCA 和 OPLS-DA 结果见图3。PCA 和 OPLS-DA 前2个主成分累计方差贡献率为81.9%和77.6%,说明对12种FAs指标共性提取率较高。OPLS-DA 分离效果优于PCA,一级和二级胡麻油在OPLS-DA分析中可以完全分离[图3(c)],说明不同品级胡麻油FAs存在差异。不同品级胡麻油有不同加工方法,因此不同

品级胡麻油聚类分离结果不能排除是否有加工方法的交互作用。OPLS-DA模型对一级和二级胡麻油判别准确率见表6,一级、二级胡麻油整体判别准确率为90.0%,说明以FAs区分一级和二级胡麻油可行。

表6 一级和二级胡麻油分类结果

样品	预测结果		样本数	正确数	正确率/%
	一级	二级			
一级	38	2	40	38	95.0
二级	4	16	20	16	80.0
合计	42	18	60	54	90.0

一级和二级胡麻油FAs比较见表7。根向量分析[图3(b)、图3(d)]结合描述性统计结果(表7)表明:一级和二级胡麻油分类的关键FAs为 $C_{18:3\omega3}$ 、 $C_{18:1\omega9}$ 和 $C_{18:2\omega6}$ 。

由表7可知,一级胡麻油PUFA显著高于二级( $P < 0.05$ ),二级MUFA显著高于一级( $P < 0.05$ ),两者SFA差异不显著( $P > 0.05$ )。12种FAs中8种FAs存在差异显著( $P < 0.05$ )或差异极显著( $P < 0.01$ ),其中 $C_{18:3\omega3}$ 、 $C_{18:1\omega9}$ 和 $C_{18:2\omega6}$ 的绝对差异较大。一级 $C_{18:3\omega3}$ 质量比显著高于二级( $P < 0.05$ ), $C_{18:1\omega9}$ 和 $C_{18:2\omega6}$ 质量比显著低于二级( $P < 0.05$ )。由于 $C_{18:3\omega3}$ 不稳定极易被氧化,加工等级越高其含量应越少,而本结果则相反,可能与加工方法、胡麻籽品种和品质等多方面因素有关<sup>[19-20]</sup>,还有待进一步扩大样本量深入研究。

## 2.4 胡麻油掺菜籽油判别分析

掺不同比例菜籽油的胡麻油FAs指纹数据进行unit variance scaling预处理后的OPLS-DA结果

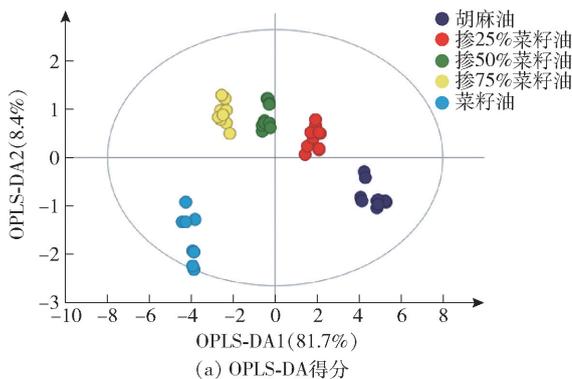


表7 一级和二级胡麻油FAs含量比较

Tab.7 Comparison of fatty acid content between first and second grade flaxseed oil  $g \cdot 100g^{-1}$

脂肪酸	w(一级)	w(二级)	w(一级)/w(二级)
$C_{14:0}$	$0.04 \pm 0.02$	$0.04 \pm 0.02$	1.0
$C_{16:0}$	$4.97 \pm 0.54$	$5.19 \pm 1.88$	0.9
$C_{18:0}$	$3.48 \pm 0.56^a$	$3.21 \pm 0.52^b$	1.1
$C_{20:0}$	$0.12 \pm 0.10^b$	$0.21 \pm 0.08^a$	0.6
$C_{22:0}$	$0.25 \pm 0.12^b$	$0.32 \pm 0.10^a$	0.8
$C_{24:0}$	$0.15 \pm 0.12^a$	$0.08 \pm 0.18^b$	1.9
$C_{16:1}$	$0.06 \pm 0.04$	$0.06 \pm 0.10$	1.0
$C_{18:1(9t)}$	$0.08 \pm 0.22^a$	$0.01 \pm 0.04^b$	8.0
$C_{18:1\omega9}$	$15.73 \pm 2.64^b$	$18.38 \pm 6.64^a$	0.9
$C_{20:1}$	$0.37 \pm 1.24$	$0.35 \pm 0.90$	1.1
$C_{18:2\omega6}$	$13.93 \pm 2.52^b$	$16.01 \pm 6.46^a$	0.9
$C_{18:3\omega3}$	$52.53 \pm 6.52^a$	$45.38 \pm 7.66^b$	1.2
SFA	$9.24 \pm 1.14$	$9.25 \pm 1.50$	1.0
MUFA	$16.32 \pm 2.60^b$	$19.43 \pm 8.58^a$	0.8
PUFA	$66.75 \pm 6.02^a$	$62.93 \pm 7.74^b$	1.1
TFA	$0.13 \pm 0.24^a$	$0.04 \pm 0.06^b$	3.3
$\omega-3$ PUFA	$52.60 \pm 6.52^a$	$46.49 \pm 8.96^b$	1.1
$\omega-6$ PUFA	$14.11 \pm 2.62^b$	$16.39 \pm 6.46^a$	0.9
$\omega-6/\omega-3$	0.3	0.4	-

不同字母表示同行数据差异显著( $P < 0.05$ )或差异极显著( $P < 0.01$ )。

见图4。OPLS-DA前2个主成分方差累计贡献率为90.1%,说明对12种FAs指标共性提取率高。随着菜籽油质量分数的增加,样本呈现明显梯度分离,掺质量分数25%菜籽油的样本最靠近胡麻油,50%和75%的样品依次远离[图4(a)],说明随着菜籽油质量分数的增加,FAs含量有明显差异。OPLS-

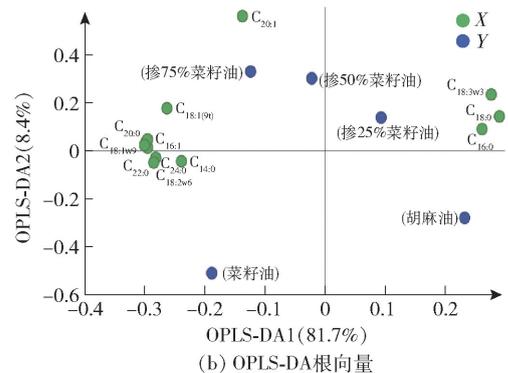


图4 纯胡麻油和掺菜籽油的胡麻油脂肪酸OPLS-DA结果

Fig.4 OPLS-DA results for fatty acids of pure flaxseed oil and flaxseed oil mixed with rapeseed oil

DA模型对纯胡麻油和掺入25%~100%菜籽油的胡麻油样品的二分类判别结果见表8,判别准确率平均为100%。

表8 掺不同比例菜籽油的胡麻油分类结果

Tab.8 Classification results of flaxseed oil mixed with different proportions of rapeseed oil

样品	预测结果		样本数	正确数	正确率/%
	胡麻油	胡麻油 掺菜籽油			
胡麻油	10	0	10	10	100
胡麻油掺菜籽油	0	40	40	40	100
合计	10	40	50	50	100

由图4(b)可知,变量X中 $C_{18:3\omega3}$ 、 $C_{18:0}$ 和 $C_{16:0}$ 与变量Y中胡麻油的位置最接近,与掺25%、50%、75%和100%菜籽油的位置依次远离,说明这3种FAs含量随着菜籽油质量比增加而减少,其余FAs则相反。胡麻油中5种主要FAs质量比与掺菜籽油质量分数进行相关性分析,见图5。 $C_{18:3\omega3}$ 质量比与菜籽油质量分数呈极显著负相关, $C_{16:0}$ 和 $C_{18:0}$ 与菜籽油质量分数呈负相关但不显著, $C_{18:1\omega9}$ 和 $C_{18:2\omega6}$ 呈极显著正相关,与根向量分析结果一致。

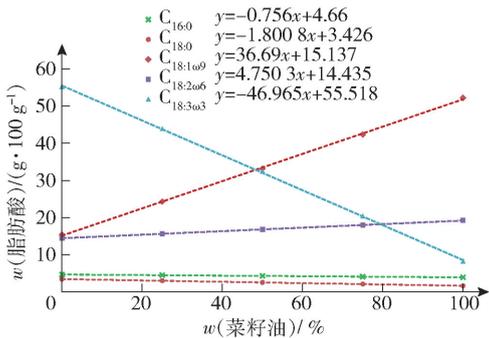


图5 胡麻油5种关键FAs与掺菜籽油质量分数相关性分析

Fig.5 Correlation analysis of five key FAs of flaxseed oil and rapeseed oil mass fraction

胡麻油掺菜籽油PLS定量预测模型见图6。PLS模型的 $R^2$ 为0.986, RMSEE为4.2635, RMSEcv为4.2648,说明模型具有很好的预测能力。依据样品分布范围可确定模型鉴别掺假能力,掺假量预测误差不超过10%,即当掺假质量分数达10%以上,可准确判别纯胡麻油和掺假胡麻油。本研究建立模型的样本量少,有很大的优化空间,完全有望提高模型的精确度和准确度。

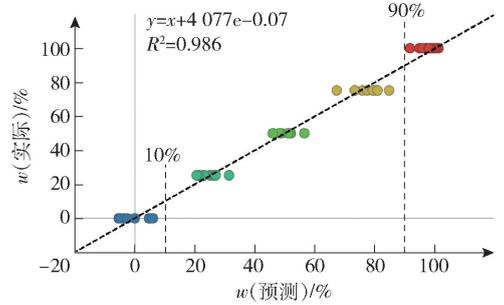


图6 胡麻油掺菜籽油的PLS定量预测模型

Fig.6 PLS quantitative prediction model of flaxseed oil mixed with rapeseed oil

### 3 结论

对10种油脂(包括植物油和餐厨废弃油)的FAs指纹进行聚类分析,结果表明,油脂种类能被有效区分,尤其是胡麻油整体上与其他油脂聚类最远,与菜籽油和大豆油距离最近。OPLS-DA模型对胡麻油物种判别准确率为100.0%,对胡麻油冷热榨工艺判别准确率96.7%,对一级和二级胡麻油判别准确率90.0%。胡麻油物种、冷热榨工艺和品级鉴别的关键FAs为 $C_{18:3\omega3}$ 、 $C_{18:1\omega9}$ 和 $C_{18:2\omega6}$ 。PLS定量分析表明,胡麻油掺入菜籽油的预测误差不超过10%。基于FAs指纹特征建立胡麻油真实性判别模型较为可行,并有继续优化的空间。

#### 参考文献:

[1] YANG Y N, DENG Q C, JIA X, et al. Characterization of key odorants in peeled and unpeeled flaxseed powders using solvent-assisted flavor evaporation and odor activity value calculation [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 138: 110724.

[2] 中华人民共和国统计局. 年度数据-胡麻籽产量[EB/OL]. (2018-12-31)[2022-12-30]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zj=A0D0F&sj=2021>.

[3] AKRAMI A, NIKAEIN F, BABAJAFARI S, et al. Comparison of the effects of flaxseed oil and sunflower seed oil consumption on serum glucose, lipid profile, blood pressure, and lipid peroxidation in patients with metabolic syndrome [J]. Journal of Clinical Lipidology, 2018, 12(1): 70-77.

[4] TANG Z X, YING R F, LV B F, et al. Flaxseed oil: extraction, health benefits and products [J]. Quality Assur-

- ance and Safety of Crops & Foods, 2021, 13(1): 1–19.
- [5] 王淑珍, 李应霞, 王兴瑞, 等. 不同制油方法对青海亚麻籽油品质及货架期的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(11): 92–98.  
WANG S Z, LI Y X, WANG X R, et al. Effects of different preparation methods on quality and shelf life of Qinghai flaxseed oil[J]. Food Science, 2022, 43(11): 92–98.
- [6] 赵丹, 汪学德, 张润阳, 等. 制油工艺对油脂品质的影响研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(6): 11–15.  
ZHAO D, WANG X D, ZHANG R Y, et al. Effect of oil preparation process on oil quality[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(6): 11–15.
- [7] SUN X L, ZHANG B, HAN J J, et al. Effect of roasting temperature and time on volatile compounds, total tocopherols, and fatty acids of flaxseed oil[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(4): 1624–1638.
- [8] 郝梦. 胡麻油苯并芘污染水平的 ELISA 和 HPLC 法检测评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018: 1–48.  
HAO M. Detection and evaluation of benzopyrene pollution level of linseed oil by ELISA and HPLC[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018: 1–48.
- [9] ZENG J P, XIAO T, NI X G, et al. The comparative analysis of different oil extraction methods based on the quality of flaxseed oil[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 107: 104373.
- [10] 郭军, 杨月欣, 王竹, 等. 原奶或液态奶真实性鉴别方法和系统: CN105021736B[P]. 2017–11–07.  
GUO J, YANG Y X, WANG Z, et al. Authenticity identifying method and system for raw milk or liquid milk: CN105021736B[P]. 2017–11–07.
- [11] 杨惠茹, 郭军, 古斯愣图, 等. 六种家畜乳氨基酸特征聚类分析[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(6): 233–240.  
YANG H R, GUO J, GUSILENGTU, et al. Cluster analysis on amino acid properties of six livestock milk[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(6): 233–240.
- [12] WANG X R, HAN Y Z, LI Y X, et al. Detection of Qinghai-Tibet plateau flaxseed oil adulteration based on fatty acid profiles and chemometrics[J]. Food Control, 2021, 130: 108332.
- [13] SUN X M, ZHANG L X, LI P W, et al. Fatty acid profiles based adulteration detection for flaxseed oil by gas chromatography mass spectrometry[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(1): 430–436.
- [14] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定: GB 5009.168—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [15] DOS SANTOS F A, SOUSA I P, FURTADO N A J C, et al. Combined OPLS-DA and decision tree as a strategy to identify antimicrobial biomarkers of volatile oils analyzed by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Revista Brasileira De Farmacognosia, 2018, 28(6): 647–653.
- [16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 亚麻籽油: GB/T 8235—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [17] 杨月欣, 葛可佑. 中国营养科学全书[M]. 2版. 北京: 人民卫生出版社, 2019: 58–75.  
YANG Y X, GE K Y. Encyclopedia of nutrition science[M]. 2nd ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2019: 58–75.
- [18] 糟帆, 丁彩云, 马玉婷, 等. 不同制油工艺对亚麻籽油品质及抗氧化活性的影响[J]. 中国油脂, 2022, 47(9): 13–18.  
ZAO F, DING C Y, MA Y T, et al. Effects of different extraction processes on quality and antioxidant activity of linseed oil[J]. China Oils and Fats, 2022, 47(9): 13–18.
- [19] 余盖文, 史训旺, 洪梦佳, 等. 炒籽温度对压榨亚麻籽油品质的影响[J]. 中国油脂, 2019, 44(6): 29–33.  
YU G W, SHI X W, HONG M J, et al. Effects of frying temperature of flaxseed on quality of pressed flaxseed oil[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(6): 29–33.
- [20] 缪纯庆, 刘秦, 范惠玲, 等. 张掖市不同海拔地区5个胡麻品种品质特性比较分析[J]. 生物技术进展, 2021, 11(3): 330–337.  
MIAO C Q, LIU Q, FAN H L, et al. Analysis on quality character of five flaxseed varieties in different altitude regions of Zhangye[J]. Current Biotechnology, 2021, 11(3): 330–337.

## Establishment of Authenticity Discrimination Model of Flaxseed Oil Based on Fatty Acid Fingerprint

YE Le, LI Ru, GUO Jun\*

(College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

**Abstract:** Flaxseed oil is rich in  $\alpha$ -linolenic acid, and its price is 3 to 20 times higher than that of other edible oils, and it is very vulnerable to be adulterated and counterfeited. The authenticity discrimination model of flaxseed oil based on fatty acid (FAs) fingerprints was established. Eight kinds of edible oil samples (flaxseed oil, rapeseed oil, sunflower oil, soybean oil, peanut oil, corn oil, sesame oil, blended oil), two kinds of waste oil samples (kitchen waste oil and gutter oil) were collected, and 12 FAs were determined by gas chromatography. Principal component analysis (PCA) was conducted to observe the clustering properties of these 10 kinds of oils according to their FAs fingerprint. Orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) was applied to evaluate the feasibility of FAs fingerprint on authenticity of species origin, processing methods (cold or hot pressing) and grade of flaxseed oil, and partial least squares (PLS) quantitative prediction model was established to estimate the adulteration dosage of rapeseed oil in flaxseed oil. The FAs fingerprint of flaxseed oil was extremely different from other oils. Content of  $C_{18:3\omega3}$  [(50.14  $\pm$  9.68) g/100g] was significantly higher than that of other oils, while content of  $C_{18:1\omega9}$  [(16.62  $\pm$  5.02) g/100g] and  $C_{18:2\omega6}$  [(14.62  $\pm$  4.64) g/100g] were significantly lower than that of other oils. PCA and OPLS-DA both could distinguish species origin, processing methods and grade of flaxseed oil. OPLS-DA had better discrimination formance. PCA and OPLS-DA showed that flaxseed oil was the closest cluster to rapeseed and soybean oil. Accuracy of OPLS-DA for flaxseed oil species discrimination was 100%, accuracy of cold and hot pressing discrimination was 96.7%, and accuracy of grade discrimination was 90.0%. The key FAs for discrimination of flaxseed oil species, processing methods and grade were  $C_{18:3\omega3}$ ,  $C_{18:1\omega9}$  and  $C_{18:2\omega6}$ . Correlation analysis of five key FAs contents in flaxseed oil and adulteration dosage of rapeseed oil showed that  $C_{18:3\omega3}$  content was negatively correlated with rapeseed oil adulteration dosage,  $C_{18:1\omega9}$  and  $C_{18:2\omega6}$  content were positively correlated with rapeseed oil adulteration dosage.  $R^2$  of PLS quantitative discrimination model for flaxseed oil adulterated with rapeseed oil was 0.986, RMSEE was 4.2635, while RMSEcv was 4.2648, and the prediction error of adulteration dosage was no more than 10%. The results showed that it was feasible to establish the authenticity discrimination model of flaxseed oil by FAs fingerprint, and there was optimization space of this mold.

**Keywords:** *Linum usitatissimum* L. oil; fatty acids; fingerprint profile; discrimination; authenticity

(责任编辑:张逸群)