

基于标准指纹图谱和特征脂肪酸含量的植物调和油组成分析

高海东, 高火亮, 尹红娜, 高瑞, 张亚勋, 刘兵戈, 董建民

(河南省商业科学研究所有限责任公司, 河南省食品质量安全控制工程技术研究中心, 河南郑州 450002)

摘要: 以大豆油、玉米油、菜籽油、橄榄油为研究对象, 建立大豆油、玉米油、菜籽油和大豆油、玉米油、橄榄油的三元复配模型, 利用气相色谱技术(GC)和共有模式法, 建立四种纯油脂脂肪酸的标准指纹图谱, 并进行相似度分析; 再利用GC结合化学计量法分析不同比例调和油中脂肪酸含量的变化。结果表明: 建立的四种纯油脂脂肪酸标准指纹图谱能量化地反映不同油脂间的共同点和差异性, 选择四种植物油中含量较高的棕榈酸(5.88%~10.72%)、硬脂酸(2.31%~4.57%)、油酸(15.04%~77.45%)、亚油酸(5.92%~53.67%)、 α -亚麻酸(0.61%~6.71%)作为特征脂肪酸。根据相关性($R^2 > 0.95$)和显著性($p < 0.01$)分析, 分别将油酸和亚油酸、 α -亚麻酸和油酸作为两组三元复配模型的代表脂肪酸; 通过对代表脂肪酸的回归预测模型进行实例验证, 两组复配模型验证RSD%分别小于8%和10%, 表明该回归预测模型具有较强的指导意义和实用价值。本研究反映了脂肪酸在不同组分植物调和油中的差异, 可为食用油脂的质量控制和检测提供理论依据。

关键字: 指纹图谱; 相似度; 食用植物调和油; 特征脂肪酸; 回归预测模型

文章编号: 1673-9078(2020)06-310-320

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.6.1223

Component Analysis of Vegetable Blended Oil Based on Standard Fingerprint and Characteristic Fatty Acids

GAO Hai-dong, GAO Huo-liang, YIN Hong-na, GAO Rui, ZHANG Ya-xun, LIU Bing-ge, DONG Jian-min

(Henan Commerce Science Institute Co., Ltd., Henan Food Quality and Safety Control Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Taking soybean oil, corn oil, rapeseed oil and olive oil as research objects, the ternary compound model of soybean oil, corn oil, rapeseed oil and soybean oil, corn oil, olive oil was established. The standard fatty acid fingerprint was established by gas chromatography (GC) and common mode method, and the similarity analysis was carried out at the same time. The change of fatty acid content in different proportion of mixed oil was analyzed by gas chromatography and chemometrics. The results showed that the four standard fatty acid fingerprints established in this experiment could better reflect the commonness and difference of different oils. Palmitic acid (5.88%~10.72%), stearic acid (2.31%~4.57%), oleic acid (15.04%~77.45%), linoleic acid (5.92%~53.67%) and α -linolenic acid (0.61%~6.71%) were selected as the characteristic fatty acids. According to the correlation ($R^2 > 0.95$) and significance ($p < 0.01$), oleic acid and linoleic acid, α -linolenic acid and oleic acid were used as the representative fatty acids of the two ternary compound models. Through the example verification of the regression prediction model of representing fatty acids, the RSD% of the two ternary compound models was verified to be less than 8% and 10% respectively, which indicated that the regression prediction model has strong guiding significance and practical value. This study reflects the differences of fatty acids in different components of vegetable blended oil, which can provide theoretical basis for quality control and detection

引文格式:

高海东,高火亮,尹红娜,等.基于标准指纹图谱和特征脂肪酸含量的植物调和油组成分析[J].现代食品科技,2020,36(6):310-320

GAO Hai-dong, GAO Huo-liang, YIN Hong-na, et al. Component analysis of vegetable blended oil based on standard fingerprint and characteristic fatty acids [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(6): 310-320

收稿日期: 2019-12-12

基金项目: 河南省科学院基本科研业务费项目(190611037)

作者简介: 高海东(1990-), 男, 助理工程师, 研究方向: 食品加工与安全检测

通讯作者: 尹红娜(1979-), 女, 高级工程师, 研究方向: 食品加工与安全检测

of edible oil.

Key words: fingerprint; similarity; vegetable blended oil; characteristic fatty acids; regression prediction model

植物油脂是脂肪酸甘油酯的混合物,绝大多数是以甘油三酯形式存在,整个油脂中脂肪酸含量约占94%~96%^[1]。根据脂肪酸碳氢链的饱和程度,脂肪酸可分为饱和脂肪酸(SFA)和不饱和脂肪酸(UFA),其中不饱和脂肪酸又分为单不饱和脂肪酸(MUFA)和多不饱和脂肪酸(PUFA),饱和脂肪酸对维持细胞膜结构和功能具有重要作用,单不饱和脂肪酸具有降血压的作用^[2,3],多不饱和脂肪酸具有重要的生物学功能^[4-6]。在1977年9月联合国粮农组织和世界卫生组织召开的“人类营养的膳食脂肪”学术研讨会上,部分专家提出膳食脂肪中饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸及多不饱和脂肪酸的比例应为1:1:1^[7,8]。单一油脂受其脂肪酸组成的影响,营养价值远不及由多种油脂调配生成的植物调和油。食用植物调和油是由两种或两种以上食用植物油调配而成的,它能有效改善单一植物油营养成分不均衡的缺陷,使成分更加丰富,营养更加全面,更能满足人体的健康需求^[7]。因此,食用单一品种的植物油难以满足人体日常脂肪酸的需要,应对多种油脂进行适当比例的调配来增强营养^[9,10]。

2018年12月颁布实施的新标准GB 2716-2018《食品安全国家标准 植物油》规定食用植物调和油产品应以“食用植物调和油”命名^[11]。在此之前,“橄榄调和油”、“花生调和油”、“芝麻调和油”等调和油含有的橄榄油和花生油的比例为5%甚至更低,大多是用价格便宜的大豆油或棕榈油勾兑而成^[12,13],由于消费者缺乏相关的脂肪酸营养知识,无法购买符合自身营养需求的调和油。因此,我们应根据人体自身需求,对多种油脂进行调配和营养强化^[9]。目前国内外对油脂的分析大多采用理化特性分析法、色谱分析法以及质谱分析法等^[14-16],其中色谱技术是检测油脂最常用的手段^[17-19],主要是对单一油脂含量进行分析,很少分析调和油中不同油脂的含量^[20-24]。通过考察发现市场上的调和油大多是由两种或者三种植物油复配而成的,本研究建立了大豆油、玉米油、菜籽油、橄榄油的脂肪酸标准指纹图谱,在此基础上,通过采用气相色谱技术结合化学计量法分析大豆油、玉米油、菜籽油和大豆油、玉米油、橄榄油的三元复配模型中脂肪酸的含量变化,选择特征脂肪酸,建立数学回归预测模型,为食用植物调和油的产品质量控制和调和油中油脂比例的检测做了进一步探索。

1 材料与amp;方法

1.1 样品

大豆油(10批次)、玉米油(10批次)、菜籽油(10批次)、橄榄油(7批次);购于郑州市金水区硅谷广场生活超市。

1.2 材料和试剂

37种脂肪酸甲酯(色谱纯),上海安谱实验科技股份有限公司;异辛烷(色谱纯)、甲醇(色谱纯)、氢氧化钾(分析纯)、硫酸氢钠(分析纯),国药集团化学试剂有限公司。

1.3 设备与仪器

7890 B气相色谱仪,安捷伦科技有限公司;万分之一电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;恒温水浴锅,郑州长城科工贸有限公司;振荡器,莱普特科学仪器(北京)有限公司。

1.4 试验方法

1.4.1 样品制备

三元复配模型(大豆油、玉米油、菜籽油):以大豆油为基底油,玉米油和菜籽油为配比油,三者均按照5%的梯度变化,最终使三者的配比总和为100%。基底油大豆油的变化有10个梯度分别为50%、55%、60%、65%、70%、75%、80%、85%、90%、95%,共计66组实验。例如,基底油大豆油为50%,玉米油和菜籽油的配比比例分别为50%和0%、45%和5%、40%和10%、35%和15%、30%和20%、25%和25%、20%和30%、15%和35%、10%和40%、5%和45%、0%和50%,共计11组,其余以此类推。复配模型变化范围见表1。

表1 植物油三元复配

Table 1 Vegetable fat ternary system

基底油	大豆油(50%~100%)	
配比油	玉米油(0%~50%)	菜籽油(0%~50%)

三元复配模型(大豆油、玉米油、橄榄油):大豆油为基底油,按照5%的梯度比例增加,玉米油和橄榄油为配比油,按照1%的梯度变化,最终使三者的配比总和为100%。基底油大豆油的变化有4个梯度分别为80%、85%、90%、95%,共计55组实验。例如,基底油大豆油为80%,玉米油和菜籽油的配比比例分别为20%和0%、19%和1%、18%和2%.....2%

和 18%、1%和 19%、0%和 20%，共计 21 组，其余以此类推。复配模型变化范围见表 2。

表 2 植物油三元复配

Table 2 Vegetable fat ternary system

基底油	大豆油(80%~100%)	
配比油	玉米油(0%~20%)	橄榄油(0%~20%)

1.4.2 甲酯化处理

参照 GB 5009.168-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》^[25]中酯交换法。

1.4.3 色谱条件

进样口：进样量 0.5 μL ，进样口温度 250 $^{\circ}\text{C}$ ，分流进样，分流比 100:1；色谱柱：HP-88 毛细管柱（100 $\text{m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ }\mu\text{m}$ ），柱流速 1 mL/min ；升温程序：初始温度 100 $^{\circ}\text{C}$ ，保持 5 min，然后以 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 到 240 $^{\circ}\text{C}$ ，保持 30 min。

1.4.4 脂肪酸标准指纹图谱的建立及相似度分析^[26]

以气相色谱法结合共有模式法与矢量平均法构建植物油标准脂肪酸指纹图谱，假设以每种油脂中各脂肪酸甲酯峰的共有率大于 70%作为共有峰，统计各种油脂中共有峰的平均保留时间、平均峰面积及信号响应强度，用 Origin 软件绘制脂肪酸标准指纹图谱。利用夹角余弦法计算每类油脂标准指纹图谱与同类中相似度计算公式如下：

$$\text{夹角余弦} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2 \sum_{i=1}^n Y_i^2}}$$

式中： X_i 为某油脂组分 i 保留时间下对应的峰面积； Y_i 为标准指纹图谱组分 i 保留时间下对应的峰面积； n 为某样品和标准指纹图谱中所有组分的数目， i 为样品中某一组分。

1.5 精密度试验和稳定性试验

按 1.4.3 色谱条件，分别吸取处理过的油脂样品溶液 0.5 μL ，24 h 间断进样 5 次，记录色谱图，计算谱图中十六碳酸甲酯、十八碳酸甲酯、顺-9-十八碳一烯酸甲酯和顺、顺-9,12-十八碳二烯酸甲酯等 5 种脂肪酸甲酯的相对保留时间和相对峰面积的相对标准偏差。

1.6 数学方程式在混合油中的定性定量验证

在大豆油、玉米油、菜籽油和大豆油、玉米油、橄榄油的三元复配模型中，脂肪酸组成含量会随着油脂组成比例的变化成规律性变化，通过测定三元复配模型中代表性脂肪酸的含量，建立回归预测模型，利用模型计算混合油中掺混的纯油比例。

1.7 数据处理

以油脂中脂肪酸甲酯的保留时间定性，以峰面积归一化法定量测定油脂中各脂肪酸含量，用 SPSS 18.0 软件、DPS 软件 Origin 9.0 对试验数据进行处理，用邓肯多重比较法检验差异显著性，5%为显著水平。

2 结果与分析

2.1 气相色谱的精密度试验及稳定性试验

指纹图谱方法学考察的精密度试验中各共有峰相对峰面积和相对保留时间的 RSD 值结果显示，RSD 均小于 0.01%，表明仪器精密度良好。重复性试验中各共有峰相对峰面积和相对保留时间的 RSD 值结果显示，RSD 均小于 0.50%，表明该方法重复性良好。稳定性试验中各共有峰相对峰面积和相对保留时间的 RSD 值结果显示，RSD 均小于 0.50%，表示试验样品在 24 h 内稳定性良好。王家明等^[27]研究表明精密度和稳定性试验中各共有峰相对峰面积和相对保留时间的 RSD 值结果只要均小于 5%，即符合指纹图谱的建立要求。

2.2 标准品分离定性

在 1.4.3 色谱条件下将脂肪酸标准品注入到气相色谱仪中，经分析得到 37 种脂肪酸甲酯的色谱图，根据各脂肪酸甲酯碳链的长短确定其保留时间，并依据此保留时间对食用植物调和油中各个脂肪酸成分进行定性分析。37 种脂肪酸甲酯保留时间见图 1 与表 3。与国标 GB 5009.168-2016^[25]和池源等^[28]研究的基于气相色谱法构建葡萄籽油脂肪酸指纹图谱中 37 种脂肪酸的标准溶液出峰顺序一致。

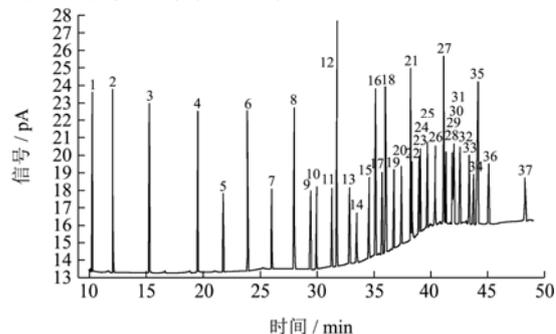


图 1 37 种脂肪酸甲酯标准溶液色谱图

Fig.1 The chromatography of standard solutions of 37 mixed fatty acids

注：图中从小到大的编号对应成分依次为：(1)丁酸甲酯；(2)己酸甲酯；(3)辛酸甲酯；(4)癸酸甲酯；(5)十一碳酸甲酯；(6)十二碳酸甲酯；(7)十三碳酸甲酯；(8)十四碳酸甲酯（豆蔻酸甲酯）；(9)顺-9-十四碳一烯酸甲酯；(10)十五碳酸甲酯；(11)顺-10-十五碳一烯酸甲酯；(12)十六碳酸甲

酯(棕榈酸甲酯);(13)顺-9-十六碳一烯酸甲酯;(14)十七碳酸甲酯;(15)顺-10-十七碳一烯酸甲酯;(16)十八碳酸甲酯(硬脂酸甲酯);(17)反-9-十八碳一烯酸甲酯;(18)顺-9-十八碳一烯酸甲酯(油酸甲酯);(19)反,反-9,12-十八碳二烯酸甲酯;(20)顺,顺-9,12-十八碳二烯酸甲酯(亚油酸甲酯);(21)二十碳酸甲酯(花生酸甲酯);(22)顺,顺,顺-6,9,12-十八碳三烯酸甲酯;(23)顺-11-二十碳一烯酸甲酯(花生一烯酸甲酯);(24)顺,顺,顺-9,12,15-十八碳三烯酸甲酯(α -亚麻酸甲酯);(25)

二十一碳酸甲酯;(26)顺,顺-11,14-二十碳二烯酸甲酯;(27)二十二碳酸甲酯(山嵛酸甲酯);(28)顺,顺,顺-8,11,14-二十碳三烯酸甲酯;(29)顺-13-二十二碳一烯酸甲酯(芥酸甲酯);(30)顺-11,14,17-二十碳三烯酸甲酯;(31)顺-5,8,11,14-二十碳四烯酸甲酯;(32)二十三碳酸甲酯;(33)顺-13,16-二十二碳二烯酸甲酯;(34)二十四碳酸甲酯(木焦油酸甲酯);(35)顺-5,8,11,14,17-二十碳五烯酸甲酯;(36)顺-15-二十四碳一烯酸甲酯;(37)顺-4,7,10,13,16,19-二十二碳六烯酸甲酯。

表 3 37 种脂肪酸甲酯保留时间

Table 3 The retention time of 37 fatty acid methyl esters

脂肪酸甲酯	保留时间/min	脂肪酸甲酯	保留时间/min
丁酸甲酯	10.19	顺,顺-9,12-十八碳二烯酸甲酯(亚油酸甲酯)	37.24
己酸甲酯	12.01	二十碳酸甲酯(花生酸甲酯)	38.00
辛酸甲酯	15.18	顺,顺,顺-6,9,12-十八碳三烯酸甲酯	38.20
癸酸甲酯	19.38	顺-11-二十碳一烯酸甲酯(花生一烯酸甲酯)	38.78
十一碳酸甲酯	21.60	顺,顺,顺-9,12,15-十八碳三烯酸甲酯(α -亚麻酸甲酯)	38.89
十二碳酸甲酯	23.77	二十一碳酸甲酯	39.43
十三碳酸甲酯	25.87	顺,顺-11,14-二十碳二烯酸甲酯	40.19
十四碳酸甲酯(豆蔻酸甲酯)	27.87	二十二碳酸甲酯(山嵛酸甲酯)	40.82
顺-9-十四碳一烯酸甲酯	29.29	顺,顺,顺-8,11,14-二十碳三烯酸甲酯	41.14
十五碳酸甲酯	29.77	顺-13-二十二碳一烯酸甲酯(芥酸甲酯)	41.72
顺-10-十五碳一烯酸甲酯	31.15	顺-11,14,17-二十碳三烯酸甲酯	41.72
十六碳酸甲酯(棕榈酸甲酯)	31.58	顺-5,8,11,14-二十碳四烯酸甲酯	41.87
顺-9-十六碳一烯酸甲酯	32.70	二十三碳酸甲酯	42.24
十七碳酸甲酯	33.30	顺-13,16-二十二碳二烯酸甲酯	43.13
顺-10-十七碳一烯酸甲酯	34.39	二十四碳酸甲酯(木焦油酸甲酯)	43.54
十八碳酸甲酯(硬脂酸甲酯)	34.94	顺-5,8,11,14,17-二十碳五烯酸甲酯	43.72
反-9-十八碳一烯酸甲酯	35.34	顺-15-二十四碳一烯酸甲酯	44.77
顺-9-十八碳一烯酸甲酯(油酸甲酯)	35.87	顺-4,7,10,13,16,19-二十二碳六烯酸甲酯	48.06
反,反-9,12-十八碳二烯酸甲酯	36.54		

2.3 纯油脂的脂肪酸组成

2.3.1 大豆油的脂肪酸组成

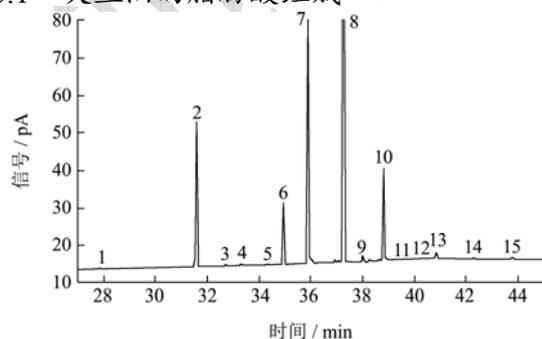


图 2 大豆油的脂肪酸组成

Fig.2 Fatty acid composition of soybean oil

注:图中从小到大的编号对应成分依次为:(1)豆蔻酸甲酯;(2)棕榈酸甲酯;(3)十六碳一烯酸甲酯;(4)十七碳酸

甲酯;(5)十七碳一烯酸甲酯;(6)硬脂酸甲酯;(7)油酸甲酯;(8)亚油酸甲酯;(9)花生酸甲酯;(10) α -亚麻酸甲酯;(11)二十一碳酸甲酯;(12)二十二碳二烯酸甲酯;(13)山嵛酸甲酯;(14)二十三碳酸甲酯;(15)木焦油酸甲酯。

表 4 大豆油脂肪酸

Table 4 Fatty acid information of soybean oil

序号	保留时间/min	含量/%	序号	保留时间/min	含量/%
1	27.87	0.07	8	37.24	53.67
2	31.58	10.72	9	38.00	0.40
3	32.70	0.08	10	38.89	6.71
4	33.30	0.10	11	39.43	0.05
5	34.39	0.06	12	40.19	0.04
6	34.94	4.57	13	42.24	0.05
7	35.87	22.91	14	43.54	0.14

利用气相色谱检测大豆油中脂肪酸组成如图 2 和表 4 所示, 样品中共检测出 14 种脂肪酸, 其中脂肪酸含量较高的为亚油酸甲酯 (53.67%)、油酸甲酯 (22.91%)、棕榈酸甲酯 (10.72%)、 α -亚麻酸甲酯 (6.71%) 和硬脂酸甲酯 (4.57%)。脂肪酸的含量符合 GB/T 1535-2017 《大豆油》^[29] 中规定的脂肪酸种类和含量。

2.3.2 玉米油的脂肪酸组成

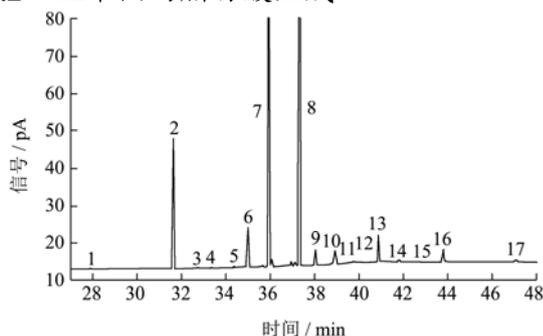


图3 玉米油的脂肪酸组成

Fig.3 Fatty acid composition of corn oil

注: 图中从小到大的编号对应成分依次为: (1) 豆蔻酸甲酯; (2) 棕榈酸甲酯; (3) 棕榈油酸甲酯; (4) 十七碳酸甲酯; (5) 十七碳一烯酸甲酯; (6) 硬脂酸甲酯; (7) 油酸甲酯; (8) 亚油酸甲酯; (9) 花生酸甲酯; (10) 花生一烯酸甲酯; (11) α -亚麻酸甲酯; (12) 二十一碳酸甲酯; (13) 山萘酸甲酯; (14) 芥酸甲酯; (15) 二十三碳酸甲酯; (16) 木焦油酸甲酯; (17) 二十二碳六烯酸甲酯。

表5 玉米油的脂肪酸

Table 5 Fatty acid information of corn oil

序号	保留时间/min	含量/%	序号	保留时间/min	含量/%
1	27.87	0.04	10	38.79	0.20
2	31.58	10.32	11	38.89	1.22
3	32.70	0.07	12	39.43	0.04
4	33.30	0.08	13	40.82	0.05
5	34.39	0.05	14	41.72	0.13
6	34.94	3.23	15	42.24	0.04
7	35.87	41.79	16	43.54	1.20
9	38.00	1.03			

利用气相色谱检测玉米油中脂肪酸组成如图 3 和表 5 所示, 样品中共检测出 17 种脂肪酸, 其中脂肪酸含量较高的为油酸甲酯 (41.79%)、亚油酸甲酯 (35.07%)、棕榈酸甲酯 (10.32%)、硬脂酸甲酯 (3.23%) 和 α -亚麻酸甲酯 (1.22%)。脂肪酸的含量符合 GB/T 19111-2017 《玉米油》^[30] 中规定的脂肪酸种类和含量。

2.3.3 菜籽油的脂肪酸组成

利用气相色谱检测菜籽油中脂肪酸组成如图 4 和表 6 所示, 样品中共检测出 12 种脂肪酸, 其中脂肪酸含量较高的为油酸甲酯 (15.04%)、亚油酸甲酯 (11.17%)、芥酸甲酯 (10.47%)、棕榈酸甲酯 (5.88%)、 α -亚麻酸甲酯 (5.78%) 和硬脂酸甲酯 (2.31%)。脂肪酸的含量符合 GB/T 1536-2004 《菜籽油》^[31] 中规定的脂肪酸种类和含量。

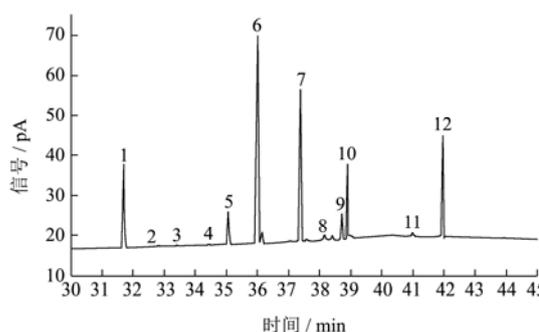


图4 菜籽油的脂肪酸组成

Fig.4 Fatty acid composition of rapeseed oil

注: 图中从小到大的编号对应成分依次为: (1) 棕榈酸甲酯; (2) 棕榈油酸甲酯; (3) 十七碳酸甲酯; (4) 十七碳一烯酸甲酯; (5) 硬脂酸甲酯; (6) 油酸甲酯; (7) 亚油酸甲酯; (8) 花生酸甲酯; (9) 花生一烯酸甲酯; (10) α -亚麻酸甲酯; (11) 山萘酸甲酯; (12) 芥酸甲酯。

表6 菜籽油的脂肪酸

Table 6 Fatty acid information of rapeseed oil

序号	保留时间/min	含量/%	序号	保留时间/min	含量/%
1	31.58	5.88	7	37.24	11.17
2	32.70	0.08	8	38.00	0.33
3	33.30	0.06	9	38.78	3.37
4	34.39	0.05	10	38.89	5.78
5	34.94	2.31	11	40.82	0.21
6	35.87	15.04	12	41.72	10.47

2.3.4 橄榄油的脂肪酸组成

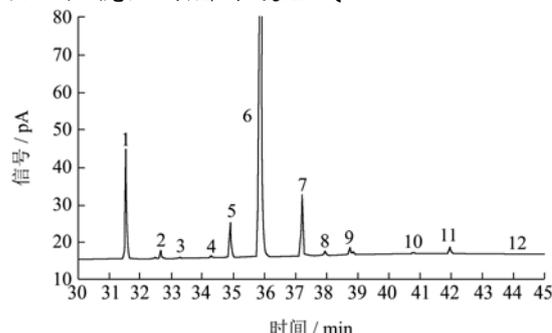


图5 橄榄油的脂肪酸组成

Fig.5 Fatty acid composition of olive oil

注: 图中从小到大的编号对应成分依次为: (1) 棕榈酸甲酯; (2) 棕榈油酸甲酯; (3) 十七碳酸甲酯; (4) 十七碳一烯酸甲酯;

酸甲酯; (5) 硬脂酸甲酯; (6) 油酸甲酯; (7) 亚油酸甲酯; (8) 花生酸甲酯; (9) α -亚麻酸甲酯; (10) 山萘酸甲酯; (11) 二十碳四烯酸甲酯; (12) 二十碳五烯酸甲酯。

表7 橄榄油的脂肪酸

Table 7 Fatty acid information of olive oil

序号	保留时间/min	含量/%	序号	保留时间/min	含量/%
1	31.58	10.47	7	37.24	5.92
2	32.70	0.76	8	38.00	0.38
3	33.30	0.07	9	38.88	0.61
4	34.39	0.15	10	40.82	0.11
5	34.94	3.36	11	41.87	0.07
6	35.87	77.45	12	43.72	0.04

利用气相色谱检测橄榄油中脂肪酸组成如图5和表7所示, 样品中共检测出12种脂肪酸, 其中脂肪酸含量较高的为油酸甲酯(77.45%)、棕榈酸甲酯

表8 不同油脂中所有样品与其对应标准指纹图谱的相似度

Table 8 Similarity between all samples in different oils corresponding to standard fingerprints

油脂类别	相似度	油脂类别	相似度	油脂类别	相似度	油脂类别	相似度
大豆油 1	0.9948	玉米油 1	0.9994	菜籽油 1	0.9998	橄榄油 1	0.9996
大豆油 2	0.9987	玉米油 2	0.9998	菜籽油 2	0.9953	橄榄油 2	0.9923
大豆油 3	0.9938	玉米油 3	0.9984	菜籽油 3	0.9976	橄榄油 3	0.9939
大豆油 4	0.9928	玉米油 4	0.9993	菜籽油 4	0.9981	橄榄油 4	0.9943
大豆油 5	0.9976	玉米油 5	0.9987	菜籽油 5	0.9961	橄榄油 5	0.9957
大豆油 6	0.9954	玉米油 6	0.9939	菜籽油 6	0.9959	橄榄油 6	0.9989
大豆油 7	0.9991	玉米油 7	0.9997	菜籽油 7	0.9989	橄榄油 7	0.9949
大豆油 8	0.9938	玉米油 8	0.9945	菜籽油 8	0.9997		
大豆油 9	0.9927	玉米油 9	0.9928	菜籽油 9	0.9967		
大豆油 10	0.9983	玉米油 10	0.9975	菜籽油 10	0.9987		

表9 各油脂标准指纹图谱间的相似度

Table 9 Similarity between standard fingerprints of various oils

	大豆油	玉米油	菜籽油	橄榄油
大豆油	1.00	0.89	0.75	0.47
玉米油	0.89	1.00	0.84	0.82
菜籽油	0.75	0.84	1.00	0.71
橄榄油	0.47	0.82	0.71	1.00

通过夹角余弦法计算大豆油、玉米油、菜籽油、橄榄油等标准指纹图谱的相似度结果见表9。从表9可知, 每种标准指纹图谱与其他油脂标准指纹图谱的相似度有着明显的差异, 大豆油与玉米油、玉米油与菜籽油、玉米油与橄榄油等之间的相似度均大于0.8, 说明两种油脂之间存在一定的相似性, 这与杨春英等^[33]研究的15种食用植物油脂脂肪酸的气相色谱-质谱分析结论一致。因此, 试验所建立的大豆油、玉米油、

(10.47%)、亚油酸甲酯(5.92%)、硬脂酸甲酯(3.36%)和 α -亚麻酸甲酯(0.61%)。脂肪酸的含量符合GB/T 23347-2009《橄榄油、油橄榄果渣油》^[32]中规定的脂肪酸种类和含量。

2.4 标准指纹图谱的相似度分析

通过夹角余弦法计算大豆油、玉米油、菜籽油、橄榄油等样品与其标准指纹图谱之间的相似度结果见表8。从表8可知, 大豆油(1~10)与标准指纹图谱相似度大于0.9927; 玉米油(1~10)与标准指纹图谱相似度大于0.9928; 菜籽油(1~10)与标准指纹图谱相似度大于0.9953; 橄榄油(1~7)与标准指纹图谱相似度大于0.9923, 这表明上述油脂的标准指纹图谱与其样品的脂肪酸信息相近, 能够有效地反映油脂的整体性。

菜籽油、橄榄油等4种油脂的标准指纹图谱既能反映他们之间存在的共同特性, 也能体现每种油脂间的差异。

2.5 三元复配模型的回归分析

2.5.1 大豆油、玉米油和菜籽油的三元复配模型的回归分析

2.5.1.1 大豆油、玉米油和菜籽油的三元复配的双变量相关性回归分析

以大豆油为基底油, 按照不同比例混合玉米油和菜籽油, 大豆油、玉米油和菜籽油的三元复配模型的双变量相关性回归分析见表10。由表10可知, 除 α -亚麻酸外, 油酸甲酯与大豆油浓度间具有极显著的负相关性, 棕榈酸甲酯含量与大豆油浓度存在显著正相关, 硬脂酸甲酯和亚油酸甲酯含量与大豆油浓度存在极显著正相关, 其中亚油酸甲酯与大豆油浓度的相关

系数最大, 为 0.46, 其次为硬脂酸甲酯 (0.42)、棕榈酸甲酯 (0.32)、 α -亚麻酸甲酯 (0.09)。李斌等^[34]利用气相色谱法检测植物油中的脂肪酸含量, 研究发现大豆油和玉米油中多不饱和脂肪酸多于单不饱和脂肪

酸, 菜籽油则相反。由此可知, 大豆油、玉米油和菜籽油制备的三元复配调和油中, 五种特征脂肪酸与大豆油含量之间的相关性强弱依次为: 油酸甲酯>亚油酸甲酯>硬脂酸甲酯>棕榈酸甲酯> α -亚麻酸甲酯。

表 10 大豆油、玉米油和菜籽油的三元复配中各脂肪酸含量的相关系数分析

Table 10 Analysis of the correlation coefficient between each fatty acid content in ternary system of soybean, corn oil and rapeseed oil

	大豆油	棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	α -亚麻酸
大豆油	1					
棕榈酸	0.32*	1				
硬脂酸	0.42**	-0.11	1			
油酸	-0.61**	-0.91**	-0.22	1		
亚油酸	0.46**	0.99**	-0.03	-0.96**	1	
α -亚麻酸	0.09	-0.81**	0.61**	0.55**	-0.75**	1

注: *表示在 0.05 水平上 (双侧) 显著相关; **表示在 0.01 水平上 (双侧) 显著相关, 下同。

2.5.1.2 大豆油、玉米油和菜籽油的三元复配的显著性回归分析

大豆油、玉米油和菜籽油的三元复配模型中各脂肪酸含量分析见表 11。由表 11 可知, 随着大豆油比例的升高, 棕榈酸甲酯、硬脂酸甲酯、亚油酸甲酯和 α -亚麻酸甲酯含量逐渐升高, 油酸含量逐渐降低, 这可能是因为玉米油和菜籽油中检测到的棕榈酸甲酯、硬脂酸甲酯、亚油酸甲酯和 α -亚麻酸甲酯含量之和与大豆油相差不大, 而玉米油和菜籽油中油酸含量之和

(56.83%) 是大豆油 (22.91%) 的 2.5 倍。调和油中五种特征脂肪酸含量随着大豆油比例的升高变化范围大小依次为油酸甲酯>亚油酸甲酯>棕榈酸甲酯>硬脂酸甲酯> α -亚麻酸甲酯, 但五种特征脂肪酸在大豆油 50%到 95%十个梯度之间的差异显著性不同。棕榈酸甲酯、亚油酸甲酯、 α -亚麻酸甲酯在试验组间浓度相当, 无统计学差异 ($p>0.01$); 硬脂酸甲酯和油酸甲酯含量在试验组间具有极显著差异 ($p<0.01$)。

表 11 大豆油、玉米油和菜籽油的三元复配中各脂肪酸含量分析 (%)

Table 11 Fatty acid content analysis of ternary system of soybean, corn oil and rapeseed oil

大豆油比例/%	棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	α -亚麻酸
50%	9.92±1.40 ^A	3.00±0.02 ^A	31.99±3.70 ^A	45.82±5.72 ^A	5.35±1.17 ^A
55%	10.07±1.28 ^A	3.08±0.04 ^{AB}	31.08±3.32 ^{AB}	46.71±5.27 ^A	5.41±1.11 ^A
60%	10.16±1.14 ^A	3.19±0.03 ^{ABC}	30.30±3.45 ^{ABC}	47.65±4.79 ^A	5.62±1.15 ^A
65%	10.22±1.17 ^A	3.25±0.08 ^{ABC}	30.17±3.01 ^{ABC}	47.52±4.98 ^A	5.66±0.95 ^A
70%	10.52±0.94 ^A	3.41±0.07 ^{ABC}	28.51±2.77 ^{ABC}	49.37±3.84 ^A	5.67±0.82 ^A
75%	10.64±0.94 ^A	3.52±0.04 ^{ABC}	27.57±2.66 ^{ABC}	50.27±3.90 ^A	5.72±0.62 ^A
80%	10.76±1.32 ^A	3.57±1.61 ^{ABC}	27.47±1.57 ^{BC}	51.47±5.41 ^A	5.81±2.73 ^A
85%	10.80±0.62 ^A	3.68±0.04 ^{ABC}	26.21±2.01 ^{BC}	51.97±2.65 ^A	5.85±0.52 ^A
90%	10.95±0.36 ^A	3.80±0.05 ^{BC}	25.24±1.32 ^C	52.44±1.45 ^A	5.93±0.38 ^A
95%	11.05±0.20 ^A	3.91±0.02 ^C	23.89±0.75 ^C	53.49±0.82 ^A	6.03±0.18 ^A

注: 同一脂肪酸甲酯大写字母不同表示差异极显著 ($p<0.01$), 下同。

因此, 综合考虑相关性分析结果和显著性分析结果, 选择油酸、亚油酸作为判断大豆油、玉米油和菜籽油三种纯油脂复配调和油的代表性脂肪酸。以每种代表性脂肪酸含量为因变量, 调和油中每种纯油脂样品原料的含量为自变量 (大豆油含量为 X_1 , 玉米油含量为 X_2 , 橄榄油含量为 X_3), 经 DPS 软件逐步回归分析建立调和油中该代表性脂肪酸的多元线性回归预测模型: $Y_{油酸} = 52.1 - 0.284X_1 - 0.232X_2$ ($R^2 = 0.968, p < 0.01$),

$$Y_{亚油酸} = 18.9 + 0.356X_1 + 0.363X_2 \quad (R^2 = 0.950, p < 0.01)$$

2.5.1.3 大豆油、玉米油和菜籽油的三元复配验证分析

通过气相色谱技术采集 5 组复配调和油样品的原始脂肪酸指纹图谱, 将采集的每组中油酸和亚油酸的含量代入回归方程, 计算得到大豆油、玉米油、菜籽油三种油脂的含量。5 组复配调和油的验证试验结果如表 12 所示。从表 12 中可以看出, 所有复配调和油

中纯油脂含量 X 值的 RSD% 小于 8%，说明上述建立回归模型对大豆油、玉米油、菜籽油三元复配具有较强的指导意义和实用参考价值。彭斌等^[35]研究表明利

用数学方程式计算花生油、大豆油、玉米油添加比例与实际值对比有很好的相关性，说明通过建立数学模型验证混合油中纯油添加比例的方法是可行的。

表 12 大豆油、玉米油和菜籽油的三元复配模型验证分析

Table 12 Model validation analysis of ternary system of soybean, corn oil and rapeseed oil

序号	大豆油/%	玉米油/%	菜籽油/%	油酸甲酯/%	亚油酸甲酯/%	大豆油 X ₁		玉米油 X ₂		菜籽油 X ₃	
						含量/%	RSD/%	含量/%	RSD/%	含量/%	RSD/%
1	50	10	40	34.58	40.33	50.13	0.26	9.95	0.50	39.92	0.20
2	60	10	30	32.74	44.89	60.76	1.26	10.15	1.49	29.09	3.08
3	70	10	20	29.90	47.45	70.61	0.87	10.31	3.05	19.08	4.71
4	80	10	10	27.06	51.01	80.78	0.97	9.95	0.50	9.27	7.58
5	90	5	5	25.38	52.75	90.58	0.64	4.76	4.92	4.66	7.04

2.5.2 大豆油、玉米油和橄榄油的三元复配模型的回归分析

2.5.2.1 大豆油、玉米油和橄榄油的三元复配的双变量相关性回归分析

以大豆油为基底油，按照不同比例混合玉米油和橄榄油，大豆油、玉米油和橄榄油的三元复配模型的双变量相关性回归分析见表 13。由表 13 可知，硬脂酸甲酯、亚油酸甲酯和 α -亚麻酸甲酯与大豆油浓度间具有极显著的正相关性，其中 α -亚麻酸甲酯与大豆油

浓度的相关系数最大，为 0.98，其次为硬脂酸甲酯 (0.64)、亚油酸甲酯 (0.43)；棕榈酸甲酯和油酸甲酯与大豆油浓度间存在极显著的负相关，依次为油酸甲酯相关系数 (-0.53)、棕榈酸甲酯 (-0.45)。由此可知，大豆油、玉米油和橄榄油制备的三元复配调和油中，五种特征脂肪酸与大豆油含量之间的相关性强弱依次为： α -亚麻酸甲酯>硬脂酸甲酯>油酸甲酯>棕榈酸甲酯>亚油酸甲酯。

表 13 大豆油、玉米油和橄榄油的三元复配中各脂肪酸含量的相关系数分析

Table 13 Analysis of the correlation coefficient between each fatty acid content in ternary system of soybean, corn oil and olive oil

	大豆油	棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	α -亚麻酸
大豆油	1					
棕榈酸	-0.45**	1				
硬脂酸	0.64**	-0.93**	1			
油酸	-0.53**	-0.45**	0.28*	1		
亚油酸	0.43**	0.53**	-0.39**	-0.99**	1	
α -亚麻酸	0.99**	-0.40**	0.59**	-0.60**	0.50**	1

表 14 大豆油、玉米油和橄榄油的三元复配中各脂肪酸含量分析 (%)

Table 14 Fatty acid content analysis of ternary system of soybean, corn oil and olive oil

试验组别	大豆油比例/%	棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	α -亚麻酸
I	80	11.33±0.10 ^B	3.73±0.10 ^A	28.9±3.030 ^B	49.41±3.08 ^A	4.99±0.06 ^A
II	85	11.26±0.10 ^{AB}	3.80±0.08 ^{AB}	27.72±2.34 ^B	50.27±2.37 ^{AB}	5.27±0.08 ^B
III	90	11.23±0.08 ^{AB}	3.87±0.05 ^{BC}	26.12±1.69 ^{AB}	51.54±1.71 ^{AB}	5.54±0.04 ^C
IV	95	11.19±0.05 ^A	3.92±0.03 ^C	24.46±0.86 ^A	52.89±0.88 ^B	5.83±0.01 ^D

2.5.2.2 大豆油、玉米油和橄榄油的三元复配的显著性回归分析

大豆油、玉米油和橄榄油的三元复配模型中各脂肪酸含量的分析见表 14。由表 14 可知，随着大豆油比例的升高，硬脂酸甲酯、亚油酸甲酯和 α -亚麻酸甲酯含量逐渐升高，棕榈酸甲酯和油酸甲酯含量逐渐降低，但油酸甲酯含量、亚油酸甲酯和 α -亚麻酸甲酯含量变化较大，这可能是因为玉米油和橄榄油中油酸甲

酯含量、亚油酸甲酯、 α -亚麻酸甲酯含量之和分别为 119.24%、40.98%、1.84%，而大豆油分别为 22.91%、53.67%、6.71%。调和油中五种特征脂肪酸含量随着大豆油比例的升高变化范围大小依次为油酸甲酯>亚油酸甲酯> α -亚麻酸甲酯>硬脂酸甲酯>棕榈酸甲酯，但五种特征脂肪酸在大豆油 80%、85%、90%、95% 四个梯度之间的差异显著性不同。棕榈酸甲酯、硬脂酸甲酯、亚油酸甲酯含量在试验 I 组与试验 IV 组含量

差异极显著 ($p<0.01$); 油酸甲酯含量试验 I 组和 II 组极显著高于试验 IV 组 ($p<0.01$); α -亚麻酸甲酯含量在试验 I、II、III、IV 组依次递增, 且各组间两两比较, 差异均极显著 ($p<0.01$)。

因此, 综合考虑相关性分析结果和显著性分析结果, 选择 α -亚麻酸、油酸作为判断大豆油、玉米油和橄榄油三种纯油脂复配调和油的代表性脂肪酸。黄飞等^[36]研究中也把 α -亚麻酸作为橄榄油掺假判别的特征脂肪酸。以每种代表性脂肪酸含量为因变量, 调和

油中每种纯油脂样品原料的含量为自变量 (大豆油含量为 X_1 , 玉米油含量为 X_2 , 橄榄油含量为 X_3), 经 DPS 软件逐步回归分析建立调和油中该代表性脂肪酸的多元线性回归预测模型。其中, α -亚麻酸的多元线性回归预测模型为: $Y_{\alpha\text{-亚麻酸}}=0.762+0.0534X_1-0.0042X_2$ ($R^2=0.96$, $p<0.01$), 油酸的多元线性回归预测模型为: $Y_{\text{油酸}}=29.7-0.0666X_1+0.481X_2$ ($R^2=0.97$, $p<0.01$)。

2.5.2.3 大豆油、玉米油和橄榄油的三元复配验证分析

表 15 大豆油、玉米油和橄榄油的三元复配模型验证分析

Table 15 Model validation analysis of ternary system of soybean, corn oil and olive oil

序号	大豆油 /%	玉米油 /%	橄榄油 /%	α -亚麻酸甲酯 /%	油酸甲酯 /%	大豆油 X_1		玉米油 X_2		菜籽油 X_3	
						含量/%	RSD%	含量/%	RSD%	含量/%	RSD%
1	80	20	0	4.97	33.37	80.76	0.95	19.18	4.19	0.06	/
2	80	10	10	5.01	29.17	80.76	0.95	10.15	1.49	9.09	9.53
3	85	10	5	5.24	28.96	85.11	0.13	10.31	3.05	4.58	8.77
4	90	5	5	5.54	26.12	90.30	0.33	5.14	2.76	4.56	9.21
5	95	4	1	5.79	25.24	80.76	0.95	19.18	4.19	0.06	/

通过气相色谱技术采集 5 组复配调和油样品的原始脂肪酸指纹图谱, 将采集的每组中 α -亚麻酸和油酸的含量代入回归方程, 计算得到大豆油、玉米油、橄榄油三种油脂的含量。5 组复配调和油的验证试验结果如表 15 所示。从表 15 中可以看出, 所有复配调和油中纯油脂含量 X 值的 RSD% 小于 10%, 说明上述建立回归模型对大豆油、玉米油、橄榄油三元复配具有较强的指导意义和实用参考价值。

3 结论

本研究通过气相色谱技术 (GC) 结合共有模式法对大豆油、玉米油、菜籽油、橄榄油的脂肪酸进行测定分析, 建立了大豆油、玉米油、菜籽油、橄榄油四种食用植物油脂的脂肪酸标准指纹图谱, 在此基础上对大豆油、玉米油、菜籽油和大豆油、玉米油、橄榄油两组三元复配模型中脂肪酸组分进行相关性和显著性分析, 建立回归方程, 并对所建立的模型进行验证分析。基于大豆油、玉米油、菜籽油、橄榄油中脂肪酸标准指纹图谱的相似度分析, 结果表明大豆油与玉米油和菜籽油相似度高, 而与橄榄油相似度低。选择四种植物油中含量较高的棕榈酸 (5.88%~10.72%)、硬脂酸 (2.31%~4.57%)、油酸 (15.04%~77.45%)、亚油酸 (5.92%~53.67%)、 α -亚麻酸 (0.61%~6.71%) 作为特征脂肪酸, 在大豆油、玉米油、菜籽油三元复配模型中, 除 α -亚麻酸甲酯外, 其余四种脂肪酸甲酯与大豆油浓度存在显著或极显著相关, 硬脂酸甲酯和油酸甲酯含量在各实验组间具有极显著差异, 将油酸

和亚油酸作为其代表脂肪酸, 建立回归预测模型验证 RSD% 小于 8%; 在大豆油、玉米油、橄榄油三元复配模型中, 五种特征脂肪酸与大豆油浓度都具有极显著相关性, 且 α -亚麻酸甲酯含量在各实验组间具有极显著差异, 将 α -亚麻酸和油酸作为其代表脂肪酸, 建立回归预测模型验证 RSD% 小于 10%。根据特征脂肪酸的变化规律, 能明显区分出上述模型中不同比例调和油之间的差异。通过本研究发现食用调和油中所含油脂比例的确定不能单单通过脂肪酸检测技术, 而是需要做到多方协作, 主要是从源头即生产厂商做起, 做到诚实守信, 然后加强调和油市场的监管, 最后促进调和油检测技术的发展, 多方协作努力为调和油的健康发展做出贡献。

参考文献

- [1] 徐学兵, 杨天奎. 油脂化学 [M]. 北京: 中国商业出版社, 1993, 12-14
XU Xue-bing, YANG Tian-kui. Oil Chemistry [M]. Beijing: China Business Press, 1993, 12-14
- [2] Lahoz C, Alonso R, Ordovas J, et al. Effects of dietary fat saturation on eicosanoid production, platelet aggregation and blood pressure [J]. European Journal of Clinical Investigation, 1997, 27: 780-787
- [3] Appel L J, Moore T J, Obarzanek E, et al. A clinical trial of the effects of dietary patterns on blood pressure [J]. New England Journal of Medicine, 1997, 336: 1117-1124
- [4] Bang H O, Dyerberg J, Hjörne N. The composition of food

- consumed by greenland eskimos [J]. Acta medica Scandinavica, 1976, 200(1-2): 69-73
- [5] Xie J, Liu T, Yu Y, et al. Rapid detection and quantification by GC-MS of camellia seed oil adulterated with soybean oil [J]. J Am Oil Chem Soc, 2013, 90(5): 641-646
- [6] 毛方华,王鸿飞,周明亮.山茶油的功能特性[J].食品科技, 2010,35(1):189-193
MAO Fang-hua, WANG Hong-fei, ZHOU Ming-liang. Functional properties of *Camellia oleifera* seed oil [J]. Food Science and Technology, 2010, 35(1): 189-193
- [7] 中国营养学会.中国居民膳食营养素参考摄入量[M].北京:中国轻工业出版社,2000
Chinese Nutrition Society. Chinese DRLS [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2000
- [8] 黄玉华.膳食脂肪酸平衡性的调查与营养平衡调和油的研究[D].南昌:南昌大学,2007
HUANG Yu-hua. Investigation on the equipoise of fatty acids in chinese diet and studies on blending oil of fatty acids balance [D]. Nanchang: Nanchang University, 2007
- [9] 邓泽元.我国食用调和油存在的问题和对策探讨[J].中国食品学报,2014,14(5):8-9
DENG Ze-yuan. Problems of vegetable blend oils in China and countermeasures [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(5): 8-9
- [10] 王宪青,孙清瑞,张丽萍.营养型调和油数学模型的建立及求解[J].粮食与食品工业,2009,16(2):37-39
WANG Xian-qing, SUN Qing-rui, ZHANG Li-ping. Establishment and solution of mathematical model for nutritional blend oil [J]. Cereal and Food Industry, 2009, 16(2): 37-39
- [11] GB 2716-2018 食品安全国家标准植物油[S].北京:2018
GB 2716-2018 National Food Safety Standard Vegetable Oil [S]. Beijing: 2018
- [12] 王勇,刘军海.调和油生产与调和数学模型的建立[J].中国油脂,1999,24(3):31-33
WANG Yong, LIU Jun-hai. Foundation of the mathematical model in the process of blending oil [J]. China Oils and Fats, 1999, 24(3): 31-33
- [13] Christopoulou E, Lazaraki M, Komaitis M, et al. Effectiveness of determinations of fatty acids and triglycerides for the detection of adulteration of olive oils with vegetable oils [J]. Food Chem, 2004, 84(3): 463-474
- [14] 原姣姣,王成章,陈虹霞.近红外透射光谱分析油茶籽油掺入豆油的研究[J].中国粮油学报,2012,27(3):110
YUAN Jiao-jiao, WANG Cheng-zhang, CHEN Hong-xia. Study on the quantitative analysis of camellia oil adulterated with soybean oil by near infrared transmittance spectroscopy [J]. Journal of The Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(3): 110
- [15] 黄月华,范璐,李娟.气相色谱法 SIMCA 模式识别 9 种植物油脂的可行性研究[J].河南工业大学学报(自然科学版), 2009,30(5):13-17
HUANG Yue-hua, FAN Lu, LI Juan. SIMCA Analysis of 9 kinds of vegetable oils and fats in a feasibility study by gas chromatography [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 30(5): 13-17
- [16] Ceraci L, Rodriguez-Estrada M T, Lercker G. Solid-phase extraction-thin-layer chromatography-gas chromatography method for the detection of hazelnut oil in olive oils by determination of esterified sterols [J]. Journal of Chromatography A, 2003, 985(1): 211-220
- [17] Sun X, Zhang L, Li P, et al. Fatty acid profiles based adulteration detection for flaxseed oil by gas chromatography mass spectrometry [J]. LWT-Food Sci and Tech, 2015, 63(1): 430-436
- [18] Fang G, Goh J Y, Tay M, et al. Characterization of oils and fats by H-1 NMR and GC/MS fingerprinting: Classification, prediction and detection of adulteration [J]. Food Chem, 2013, 138(2-3): 1461-1469
- [19] Hu W, Zhang L, Li P, et al. Characterization of volatile components in four vegetable oils by headspace two-dimensional comprehensive chromatography time-of-flight mass spectrometry [J]. Talanta, 2014, 129(21): 629-635
- [20] 张菊华,卞建明,刘伟,等.食用植物调和油中单组分油含量检测技术研究进展[J].湖南农业科学,2017,3:109-112
ZHANG Ju-hua, BIAN Jian-ming, LIU Wei, et al. Research progress on detection technology of single component content in edible vegetable oil [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2017, 3: 109-112
- [21] Yang H, Joseph I, Paradkar M M. Discriminant analysis of edible oils and fats by FTIR, FT-NIR and FT-Raman spectroscopy [J]. Food Chem, 2005, 93(1): 25-32
- [22] 王瑞,刘海学,马俪珍,等.几种食用油中脂肪酸含量的测定与分析[J].食品研究与开发,2011,32(7):106-109
WANG Rui, LIU Hai-xue, MA Li-zhen, et al. Several fatty acids in edible oils measurement and analysis [J]. Food Research and Development, 2011, 32(7): 106-109
- [23] 杨帆,薛长勇.常用食用油的营养特点和作用研究进展[J].中国食物与营养,2013,19(3):63-66
YANG Fan, XUE Chang-yong. Research advancement of

- nutritional characteristics and functions of common edible oils [J]. Food and Nutrition in China, 2013, 19(3): 63-66
- [24] 魏永生,郑敏燕,耿薇,等.常用动、植物食用油中脂肪酸组成的分析[J].食品科学,2012,33(16):188-193
WEI Yong-sheng, ZHENG Min-yan, GENG Wei, et al. Fatty acid composition analysis of common animal fats and vegetable oils [J]. Food Science, 2012, 33(16): 188-193
- [25] GB 5009.168-2016 食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定[S]
GB 5009.168-2016 National Food Safety Standard Determination of fatty acids in food [S]
- [26] 吴卫国,彭思敏,唐芳,等.五类食用植物油标准指纹图谱的建立及其相似度分析[J].中国粮油学报,2013,28(6):101-105
WU Wei-guo, PENG Si-min, TANG Fang, et al. Study on fatty acids standard fingerprints of five kinds of vegetable oils and their similarity [J]. Journal of The Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(6): 101-105
- [27] 王家明,王智民,高慧敏,等.预知子指纹图谱的初步研究[J].中国药学杂志,2007,13:978-980
WANG Jia-ming, WANG Zhi-min, GAO Hui-min, et al. Study on fingerprint of fructusakebiae by RP-HPLC [J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2007, 13: 978-980
- [28] 池源,刘玉玲,孙辉,等.基于气相色谱法构建葡萄籽油脂肪酸指纹图谱[J].食品安全质量检测学报,2018,9(9):2020-2025
CHI Yuan, LIU Yu-ling, SUN Hui, et al. Establishment of fatty acid fingerprint of grape seed oil based on gas chromatography [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(9): 2020-2025
- [29] GB/T 1535-2017 大豆油[S].北京:2017
- GB/T 1535-2017 Soybean Oil [S]. Beijing: 2017
- [30] GB/T 19111-2017 玉米油[S]
GB/T 19111-2017 Corn Oil [S]
- [31] GB/T 1536-2004 菜籽油[S]
GB/T 1536-2004 Rapeseed Oil [S]
- [32] GB/T 23347-2007 橄榄油、油橄榄果渣油[S]
GB/T 23347-2007 Olive oil and olive-pomace oil [S]
- [33] 杨春英,刘学铭,陈智毅.15种食用植物油脂肪酸的气相色谱-质谱分析[J].食品科学,2013,34(6):211-214
YANG Chun-ying, LIU Xue-ming, CHEN Zhi-yi. Determination of fatty acid profiles in fifteen kinds of edible vegetable oil by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Science, 2013, 34(6): 211-214
- [34] 李斌,裘立群,宋少芳,等.气相色谱法分析植物油中的脂肪酸[J].分析实验室,2014,33(5):528-532
LI Bin, QIN Li-qun, SONG Shao-fang, et al. Study on the analysis of fatty acids in vegetable oils by gas chromatography [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2014, 33(5): 528-532
- [35] 彭斌,卓成飞,李静,等.混合油脂肪酸组成数学方程式在食用油模拟掺混检测中的验证[J].中国油脂,2017,42(5):60-64
PENG Bin, ZHUO Cheng-fei, LI Jing, et al. Validation of mathematical equation of mixed oil fatty acid composition in simulated edible oil blending detection [J]. China Oils and Fats, 2017, 42(5): 60-64
- [36] 黄飞,奉夏平,唐丽娜,等.橄榄油掺伪的气相色谱质谱鉴别方法研究[J].食品工业科技,2014,35(18):54-58
HUANG Fei, FENG Xia-ping, TANG Li-na, et al. Study on the identification of olive oil adulteration by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(18): 54-58

(上接第 81 页)

- [17] 汤清波,王琛柱.一种测定鳞翅目幼虫取食选择的方法-叶碟法及其改进和注意事项[J].昆虫知识,2007,6:912-915
TANG Qing-bo, WANG Cen-zhu. Leaf disc test used in caterpillar feeding preference study [J]. Chinese Bulletin of Entomology, 2007, 6: 912-915
- [18] 伍燕,申利群,朱华.假芝菌丝体多糖 ARP 的纯化、结构及抗氧化活性[J].食品与发酵工业,2019,45(9):214-219
WU Yan, SHEN Li-qun, ZHU Hua. Purification, structural characteristics, and in vitro antioxidant activities of polysaccharides ARP from a wild *Amauroderma rugosum* mycelium [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(9): 214-219