

脂肪酸检测在食品工业中的应用研究进展

Application of fatty acid detection in food industry

刘元林¹ 龙 鸣¹ 李 儒² 田晓静¹

LIU Yuan-lin¹ LONG Ming¹ LI Ru² TIAN Xiao-jing¹

马忠仁^{1,3} Nurui Izza Nordin⁴ 宋 礼⁵

MA Zhong-ren^{1,3} NURUI Izza Nordin⁴ SONG Li⁵

(1. 西北民族大学生命科学与工程学院, 甘肃 兰州 730124; 2. 兰州海关综合技术中心, 甘肃 兰州 730100;

3. 西北民族大学生物医学研究中心中国—马来西亚国家联合实验室, 甘肃 兰州 730030; 4. 马来西亚标准与工业研究所工业生物技术研究中心, 马来西亚 雪兰莪 40700; 5. 甘南州牦牛乳研究院, 甘肃 兰州 730030)

(1. College of Life Science and Engineering, Northwest Minzu University, Lanzhou, Gansu 730124, China; 2. Integrated Technology Center of Lanzhou Customs, Lanzhou, Gansu 730100, China; 3. Biomedical Research Center, Northwest Minzu University, Lanzhou, Gansu 730030, China; 4. Industrial Biotechnology Research Centre, Selangor 40700, Malaysia; 5. Research Institute of Yak Milk, Lanzhou, Gansu 730030, China)

摘要:脂肪酸是油脂的重要组成部分,不同食品脂肪酸组成与含量存在差异性,通过脂肪酸分析可以溯源产地、区分品种、分析品质优劣、开发高质量产品。文章论述了脂肪酸检测在肉品、乳与乳制品、植物油、药食同源食材中的应用。

关键词:脂肪酸;食品工业;检测

Abstract: As an important component of grease, the composition and content of fatty acids vary with each other for different foods. The analysis of fatty acids can be used in traceability of origin, discrimination of varieties, analyzing food quality, and developing high-quality products. The application of fatty acid analysis in meat, milk and dairy products, vegetable oil, and medicinal and edible homologous food materials were reviewed, providing a new idea and starting point for the further research on food fatty acids.

Keywords: fatty acid; food industry; detection

脂肪酸(fatty acid, FA)从结构角度分饱和脂肪酸(saturated fatty acid, SFA)与不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acid, UFA), 不饱和脂肪酸分单不饱和脂肪酸(mo-

nounsaturated fatty acid, MUFA)和多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA),从营养角度分必需脂肪酸(essential fatty acids, EPA)和非必需脂肪酸(non-essential fatty acid, NEFA)^[1]。FA是细胞膜基础构成成分,有提供代谢能量、影响受体、帮助记忆认知的功能。不同FA具有不同生物学特性和生理活性,如油酸在细胞水平上作为膜磷脂的复合物,能增加膜流动性和转运,刺激酶活性^[2]; *n*-6和*n*-3 PUFAs之间的平衡是心血管疾病风险的重要决定因素,降低*n*-6与*n*-3 PUFAs的比值使细胞摄入较少胆固醇,降低胆固醇酯的合成,进一步防止动脉粥样硬化的发生和发展^[3]。鉴于脂肪酸组成对食品和机体的重要作用,脂肪酸组成分析在食品品质判断、产地溯源、掺假检测等方面有着广泛应用。气相色谱(GC)及气相色谱—质谱联用仪(GC/MS)技术是FA检测的主要手段,具有高精度、高复现、高灵敏、用量少、分离效果好等优点^[4-6]。FA组分复杂且含量差异较大,在FA分析时常采用方差分析与多元统计分析达到信息挖掘的目的。FA是机体所需重要营养物质^[7],不同食品FA组成与含量存在差异,且一些特殊FA与其他成分存在某种联系,通过分析FA可以达到预测作用^[8]。建立食品FA数据库不仅能提供更好膳食建议^[9-10],还可以溯源食品产地、区分品种、品质判定及开发高质量产品。

文章拟从肉品、乳与乳制品、植物油脂、药食同源性食材4个方面对FA特征差异在其溯源产地、区分品种、品质判定等方面应用进行阐述,为FA在食品工业后续的相关研究提供一定的理论依据。

基金项目: 甘肃省自然科学基金(编号:18JR3RA371);西北民族大学引进人才项目(编号:xbmuyjrc201408);中央高校基本科研业务费专项项目(编号:31920180001);科技部援助项目(编号:KY201501005)

作者简介: 刘元林,女,西北民族大学在读硕士研究生。

通信作者: 田晓静(1982—),女,西北民族大学副教授,博士。

E-mail: smile_tian@yeah.net

收稿日期: 2019-06-08

1 脂肪酸分析的方法

1.1 检测方法

目前 FA 含量测定方法有气相色谱法(GC)、气相色谱—质谱联用仪(GC/MS)、液相色谱法(LC)、液相色谱—质谱联用仪(LC/MS),除此之外还有毛细管电泳法(CE)^[11]、近红外吸收光谱法(NTR)^[12]、紫外—可见分光光度法(UV-VIS)^[13]、拉曼光谱法(Ram)^[14]、核磁共振光谱技术(NMRS)^[15]等,针对传统液相检测方法出现的问题,牛倩倩^[16]以植物油为对象,建立高效液相色谱—蒸发光散射检测法(HPLC-ELSD)、高效液相色谱—荧光检测法(HPLC-FLD)以及高效液相色谱—激光诱导荧光检测法(HPLC-LIFD),更简便、灵敏地检测脂肪酸。为适用不同样本中短链脂肪酸(SCFAs)含量变化趋势分析,曾鳞栖^[17]基于固相萃取—气相色谱—质谱联,建立不同生物样品中 SCFAs 的定性半定量分析方法。莫欣欣^[18]将 NIR 以及 Raman 光谱技术应用于食用植物油中反式脂肪酸(TFA)含量的快速检测,通过预处理方法优选、波段优选、变量筛选和建模方法选择等方面在一定程度上简化模型,提高模型稳定性和预测精度。Prado 等^[19]针对具体 TFA 分析,开发具有降低运行时间,使用无环糊精的四硼酸水缓冲液,分析更简单、更便宜,不需要脂质提取,使用更少溶剂和试剂优点的紫外检测方法。

1.2 数据统计方法

FA 具有组分复杂、含量差异较大、信息量大、对 FA 单一结果难以分析等特点,多元统计分析是一种综合分析方法,能够在多个对象和多个指标互相关联的情况下分析数据的规律,达到信息挖掘的目的,故在 FA 分析时常用到多元统计分析。多元统计主要涉及到主成分分析(PCA)、因子分析、聚类分析(CA)、多维标度(MDS)、判别分析(DA)。主成分分析与因子分析是一种降维方法;聚类分析又称数据分割,是一个对象分组的过程分为子集,或“集群”,这样每个集群中的对象就更加紧密彼此相关;多维标度是一种统计技术,用于信息可视化,以探讨数据中的相似性和不相似性;判别分析是线性分类的基本工具^[20]。核磁共振波谱与多元统计分析相结合,为鉴别食品来源提供广阔前景,成功地应用于分析葵花籽、菜籽、芝麻、大豆、花生、玉米和橄榄油等食用油^[21]。FA 化合物特异性同位素分析(CSIA)与主成分分析(PCA)和判别分析(DA)进行判别统计分析相结合,可以建立有效追溯中国沿海刺参的工具,为确定海产品或其他食品的可追溯性提供一种新方法^[22]。

2 脂肪酸分析在食品工业检测中的应用

2.1 在肉品中的应用

受自然环境、基因差异、饲养条件等因素影响,肉与肉制品 FA 组成与含量存在差异,进而影响其硬度、颜色、

风味^[23]。因此,FA 指纹图谱可以用于产地溯源、品种区分、部位判别等作用,打击“挂羊头卖狗肉”等不法行为,为消费者合理选择膳食提供依据。

2.1.1 产地溯源 地理位置和自然天气^[24]等因素使肉品 FA 组成与含量存在差异,FA 分析对产地溯源有重要意义。Shen 等^[25]采用 GC/MS 检测岱衢产地与闽粤东产地大黄鱼肌肉中的 FA 组成,发现不同产地鱼群部分 FA 含量存在较大差异,可作为这两个产地鱼群鉴定的潜在指标。王煜坤等^[26]运用 GC/MS 对广东、广西、福建、海南 4 个罗非鱼产地 FA 进行检测,发现不同地区罗非鱼脂肪酸存在差异,罗非鱼脂肪酸含量高低依次为广东、海南、广西和福建,广东罗非鱼多种脂肪酸(包括 EPA、DHA)含量显著高于广西和福建地区,与海南基本持平。程碧君等^[27]采用 GC 对吉林、宁夏、贵州和河北地区的牛肉后臀部位脂肪样品进行检测,发现不同地域牛肉 FA 组成及含量存在差异特征,FA 差异可实现对牛肉产地的区分。不同产地生态环境差异较大,使 FA 组成与含量存在差异性,运用差异性达到产地判别目的,产地判别对食品工业原产地认证有一定意义,除产地外,同经度或者同纬度对 FA 的影响还没有系统性的研究。

2.1.2 品种检测 受基因^[28]与生活习惯^[29]影响,不同品种动物 FA 组成与含量存在区别。Zhang 等^[30]发现品种是大多数 FA 百分比变异的重要原因。杨晓玲等^[31]通过 GC 研究不同品种鸡肌肉中基本营养成分、FA 成分差异,发现 4 个品种都含有大量 UFA,青爪乌鸡、珍珠鸡、贵妃鸡和大白鸡的 $n-6$ PUFA/ $n-3$ PUFA 分别为 5.78, 2.99, 4.53, 3.85,均处于健康范围内,珍珠鸡肉较其他 3 种鸡品种更利于人体健康。皮立等^[32]通过 GC/MS 研究欧拉羊、高原型藏羊与小尾寒羊 FA 组成的区别,发现欧拉羊与小尾寒羊肌肉 FA 差别较大,同属藏系的欧拉羊和高原型藏羊,肌肉 FA 差别较小。Esquivelzeta 等^[33]对地中海盆地 Lacaune、Ripollesa 和 Lacaune Ripollesa 杂交型羊羔背最长肌肌肉 FA 组成进行分析,发现 3 个品种在 SFA 总量、MUFA 总量、硬脂酸、油酸存在显著性($P < 0.05$)。通过对不同品种 FA 组成与含量检测,找到更适合消费者需求的品种,对养殖产业饲养选择有一定指导作用,提高产品市场竞争力。

2.1.3 品质分析 不同部位肌肉在运动过程中作用不同致使脂肪沉淀的差异,进而使 FA 组分与含量存在差异;适度的脂肪沉积可使肌肉细嫩多汁、香味浓郁。李朝阳等^[34]运用 GC/MS 分析狮白鹅胸部、腿部、腹部、血液及肝脏 FA 成分,发现肝脏有 23 种 FA、胸部 20 种 FA、腿部 18 种 FA、腹部 17 种 FA、血液 10 种 FA;腹部脂肪酸组成中油酸含量最多(45.06%),其次是亚油酸(24.43%),亚麻酸较少(0.49%),未发现花生四烯酸,花生四烯酸含量肝脏最高(13.15%)。Ewa 等^[35]对兔子腰、胸、前腿、后腿

的FA进行定量分析,与其他部分相比,胸肉PUFA、奇支链脂肪酸(OBCFAs)含量较多, $n-6/n-3$ 比例较理想;后腿含有较少的致动脉粥样硬化饱和脂肪酸;前腿富含两种重要的 $n-3$ 长链多不饱和脂肪酸;腰部脂质较少。周恒量等^[36]运用GC/MS对九龙牦牛脖颈、上脑、外脊与牛霖4个部位FA种类和含量进行检测,发现SFA均占有重要比重,且都以棕榈酸和硬脂酸为主;UFA在颈脖肉和牛霖中差异显著($P<0.05$),在上脑和外脊中差异不显著($P>0.05$);4个部位牦牛肉品质存在差异,综合评定各部位FA含量与种类、P/S值与 $n-6/n-3$ 值,发现上脑、外脊与牛霖更适合中国人膳食结构。FA组分与含量的差异不仅影响风味,也是控制食品质量与检测食品掺假的有效途径,通过对不同部位脂肪酸的检测分析,达到品质控制、建立更合理的膳食结构目的。

2.2 在乳与乳制品中的应用

乳是哺乳动物在泌乳期由乳腺分泌的营养物质,天然FA的直接来源。乳制品作为日常饮食的一部分,对生长和健康起重要作用^[37]。养殖条件、自然环境、泌乳阶段、年龄等因素使乳与乳制品中FA有一定差异^[38]。分析乳与乳制品中FA的差异,对配制婴幼儿与特殊人群产品有一定指导作用,同时对原生态产品有保护认定作用。

产乳动物基因的差异致使不同动物乳中FA组成与含量存在较大差异。郭紫玥^[39]应用GC/MS对母乳、萨能山羊乳和荷斯坦牛乳中FA组成及含量进行研究,发现牛、山羊乳及母乳FA组成均在25种以上,牛、山羊乳与母乳在FA组成上存在较大差异;以牛、山羊乳为基料加工婴幼儿配方粉应强化ARA、EPA、DHA含量,使其接近母乳水平。李雷等^[40]采用GC对驼乳、牛乳、羊乳中FA组成及含量进行检测,发现3种乳的FA组成和含量存在显著差异,羊乳检测出34种FA,驼乳检测出33种FA,牛乳检测出29种FA;牛乳S:M:P=1.00:0.44:0.05、羊乳S:M:P=1.00:0.62:0.05、驼乳S:M:P=1.00:0.60:0.08,驼乳更接近FAO/WHO推荐的S:M:P=1:1:1;基于FA组成,PCA可将这3种乳区分开。Yang等^[41]采用GC探究牛、水牛、牦牛、骆驼和山羊乳FA分布特征,发现每一种乳都有其独特的FA组成,骆驼乳具有高UFA、低SMCFA、低动脉粥样硬化指数及低 $n-6/n-3$ 等特点;羊乳具有较高的 $C_{8:0} \sim C_{14:0}$;与牛乳相比,牦牛和水牛乳中SFA含量较高、PUFA含量较低;低 $n-6/n-3$ 值可将牦牛乳与水牛和牛乳区分开来。Teng等^[42]采用改进的GC法分析人、牛、水牛、牦牛、山羊和骆驼乳FA差异,发现油酸在所有乳的MUFA占主导地位;与反刍动物相比,母乳中SFA含量最低,但PUFA比例高;牦牛乳反式MUFA含量最高,而母乳中含量最低;山羊乳中短链FA含量较高;在牦牛和骆驼乳中发现大量OBCFAs;骆驼乳丁酸含量显著高于其他反

刍动物乳。不同种属乳中FA组成与含量存在较大差异,不同乳中FA组成测定可为营养补充剂和替代饮品的开发提供依据。

FA赋予乳制品特殊风味、口感及质地。Sumarmono等^[43]研究山羊乳及其发酵产品(酸奶和浓缩酸奶)的FA谱,发现新鲜羊奶加工成酸奶和浓缩酸奶时发生脂解,使游离FA进一步释放,形成产品独特香气和风味。巨玉佳^[44]采用GC/MS探究甘南牧区牦牛乳硬脂干酪在不同温度(5,10,15℃)、不同贮藏时间(0~6月)下FA变化规律,发现温度和时间对脂肪降解有很大的影响,随干酪成熟时间的延长,脂肪氧化与分解持续进行,游离FA的含量也持续增大。在成熟的0~3月中,FA种类呈增加趋势,主要增加的是短链和中链FA;在0~6月成熟过程中FA含量呈现增加趋势;15℃贮藏的干酪FA含量显著高于5,10℃。Caligiani等^[45]建立基于GC-MS方法的帕尔玛干酪环丙烷脂肪酸(CPFA)数据库,以CPFA作为青贮饲料中干酪的标记物,能够鉴定帕尔玛干酪和其他奶酪。Adamska等^[46]用GC对两类软质凝乳干酪(8种卡门贝干酪和6种布里干酪)FA组成和含量进行检测,共鉴定出36种FA,奶酪中含有大量的SCSFAs和OBCFAs;不同产地同类型奶酪中棕榈酸和5种OBCFA含量差异显著。Vargas-Bello-Pérez等^[47]采用PCA、正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)以及FA剖面差异对零售奶酪进行判别,发现PCA可以区分奶酪种类,但难以区分生产规模;OPLS-DA能区分奶酪生产规模,并揭示大规模生产奶酪和集约化系统间的相关性。乳制品在加工过程中因发酵、贮藏等工艺致使其FA含量和组成发生改变,进而赋予乳制品特殊风味、口感及质地。FA含量和组成的变化增加乳制品品质分析的难度,多元统计分析方法的引入对FA信息深度挖掘具有重要意义。

2.3 在植物油品质检测中的应用

不同植物油在风味与营养上差别较大,用途上也存在区别,致使售价差别较大,不法分子为谋取暴利而掺假。利用植物油FA组成与含量上的差异实现产地区分和种类判别,不仅保护消费者权益,还可以为消费者提供合理的消费指导。

2.3.1 产地判别 不同地域自然条件存在差异,使油料作物在生长过程中FA成分积累不一样,造成不同地区植物油FA组成和含量的差异。宋美蓉等^[48]采用GC/MS研究云南与河南两地茶籽壳和仁的FA组成及各成分相对百分含量的差异,发现这两个地区茶油FA的油酸、亚油酸含量差异较大,可以作为鉴别其产地的依据。Hlima等^[49]以FA成分和酚酸含量为指标研究突尼斯海岸不同位置橄榄油之间的差异,基于方差分析和PCA/分级聚类算法(HCA)相结合改进地理分类,发现橄榄品种和地理区域对FA含量均有显著影响($P<0.05$),以FA含量可

实现橄榄油地理位置的鉴别。张晓霞等^[50]采用 GC/MS 测定宁夏、甘肃、陕西、内蒙古、河北、辽宁 6 个产地亚麻籽含油率及 FA 组成,发现含油率与种子产地生长季积温呈显著负相关。张仁凤等^[51]应用 GC/MS 分析陕西、重庆、陇南、天水、四川、贵州 6 个产地红花椒籽油的 FA 组成,发现不同产地红花椒籽油 FA 组分相同但含量差异较大,陕西样品和贵州样品亚油酸含量最高,而重庆、陇南、天水与四川样品中油酸的含量最高;重庆样品油酸、亚油酸和亚麻酸含量均最高,贵州样品油酸、亚油酸和亚麻酸含量均最低;可将油酸、亚油酸和亚麻酸的含量作为鉴别红花椒籽油产地的指标。FA 直接影响食用油品质,而产地及其自然条件的差异致使同品种油作物在 FA 组分和含量的差异,基于 FA 组分和含量的差异可实现油料作物产地追溯。

2.3.2 品质分析 不同植物油 FA 存在较大差异,为基于 FA 组成分析判别植物油种类提供理论依据,对植物油品质进行监控作用。岳虹等^[52]采用 GC/MS 测定橄榄油和沙棘油 FA,发现橄榄油 UFA 总含量更高,而沙棘油 UFA 的种类更多。姜波等^[53]用 GC/MS 测定大豆、两种葵花籽、白花生、黑花生、白芝麻、黑芝麻、油菜籽和棉花籽 9 种植物油中 FA 组成和相对含量,发现不同种类植物油的 FA 组成和相对含量各不相同,油酸与亚油酸总量可区分不同种类食用植物油。杨水艳等^[54]采用 GC 测定橡胶籽油、葡萄籽油等 10 种云南特色植物油的脂肪酸组成进行了分析与评价。除坝子油和青刺果油外,其余 8 种植物油的不饱和脂肪酸含量均超过 80%;SFA 与 MUFA,PUFA 比例接近推荐膳食脂肪酸比例 1:1:1 的有坝子油、青刺果油和橡胶籽油,这些植物油都具有很好的开发利用价值。

2.4 在药食同源食材中的应用

药食同源食材在中国膳食结构中有着不可替代作用,其品质显得尤为重要。产地与品种对药食同源食材的功能具有影响,准确区分不同产地与品种至关重要。

2.4.1 品种区分 因为基因不同,致使不同品种 FA 组分与含量存在差异,进而使各个组成不同,Zamany 等^[55]采用 GC 对阿富汗 20 种杏仁品种 FA 组成分析,发现杏仁品种对 FA 含量有影响;以 12 种 FA、总脂和 α -生育酚作为 14 种变量进行主成分分析,发现总脂含量与 $C_{18:1}$ 有很强的相关性,与 $C_{18:2\ n-6c}$ 和 $C_{16:0}$ 的相关性较差,PCA 结果显示不同品种杏仁分布呈规律性。Sánchez-Salcedo 等^[56]采用 GC 对西班牙种植的白桑椹和黑桑椹中的 14 种 FA 进行定性和定量测定,两种桑椹最丰富的 FA 均是亚油酸、其次是棕榈酸、油酸和硬脂酸。Ercisli 等^[57]对土耳其东安纳托利亚地区的白、红、黑桑树果实进行 FA 分析,发现桑椹总脂肪含量较低,亚油酸是主要 FA,其次是棕榈酸;桑椹不同品种 FA 含量存在差异性,FA 图谱可用

于桑椹品种的鉴定。陈文学等^[58]采用 GC/MS 对 4 种不同品种人参的 FA 成分进行分析,鉴定出 20 种脂肪酸,(Z,Z)-9,12-十八碳二烯酸、棕榈酸和(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸为主要 FA;(Z,Z)-9,12-十八碳二烯酸含量二马牙最高;棕榈酸含量圆膀圆芦最高;(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸含量二马牙最高,不同品种人参之间的差异,可以成为人参品种选育的一项重要参考指标。利用不同品种药食同源食材 FA 组成的差异,可以实现不同品种的区分,为作物种植因地制宜、优培优品种提供理论依据。

2.4.2 产地溯源 不同产地药食同源食材 FA 差异,致使其效果有所不同。李吉光等^[59]采用 GC/MS 技术建立了 13 种不同产地黑果枸杞 FA 的指纹图谱,利用相似度分析法结合 PCA 分析将样品聚成两类。Cossignani 等^[60]通过 GC/MS 对 3 个国家 19 种枸杞样品 FA 分析,采用 PCA 和线性判别分析(LDA)发现 FA 和甾醇可用于鉴别枸杞地理来源。Tian 等^[61]采用 GC/MS 检测新疆库车县、轮台县、喀什 3 个地区 15 批白杏仁油 FA 组成,聚类分析可成功鉴别白杏仁油与其他油及白杏仁油的产地。Amorello 等^[62]对西西里岛、西班牙和加利福尼亚 3 个地区 21 个杏仁样品进行矿物质和 FA 组成的测定,基于 FA 谱分类的正确率为 77%,基于矿物质和 FA 组成分类的正确率为 82%,为杏仁的地理起源鉴定提供了一种简单的分析方法。药食同源食材在膳食结构中有着举足轻重的位置,通过 FA 差异性实现产地溯源,为监督产品产地提供依据。

3 结束语

系统性地建立食品脂肪酸数据库,利用脂肪酸组分与含量差异可以实现肉品、乳与乳制品、植物油及药食同源食材产地溯源、品种区分、品质判别,有效控制食品质量及检测食品掺假,并在一定程度上指导种养殖及选种育种工作。目前研究基本针对某些产地、产品或者品种,样品量不够大,覆盖面不够广,建立完整且系统的食品脂肪酸数据库需要样品多且齐,样品收集在一定程度上存在困难,对不同样品前期处理方法存在差异,开发适用所有食品脂肪酸的检测方法有待探究,脂肪酸与其他成分的相关性联系也需要进一步深入研究。

参考文献

- [1] MICHIO H, SHAHDAT H. Biochemistry and health benefits of fatty acids[M]. London: IntechOpen, 2018: 2-12.
- [2] PETROVIC S, ARSIC A. Fatty acids; Fatty acids[J]. Encyclopedia of Food and Health, 2016, DOI: 10.1016/B978-0-12-384947-2.00277-4.
- [3] WANG Dong-dong. Dietary *n*-6 polyunsaturated fatty acids and cardiovascular disease: Epidemiologic evidence [J].

- Prostag Leukotr Ess, 2018, 135: 5-9.
- [4] GRAYSON M A. A history of gas chromatography mass spectrometry (GC/MS)[J]. Encyclopedia of Mass Spectrom, 2016, 9: 152-158.
 - [5] CHOI S J, JUNG M Y. Simple and fast sample preparation followed by gas chromatography-tandem mass spectrometry (GC-MS/MS) for the analysis of 2-and 4-methylimidazole in cola and dark beer[J]. J Food Sci, 2017, 82(4): 1 044-1 052.
 - [6] GEYER P M, HULME M C, IRVING J P B, et al. Guilty by dissociation-development of gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and other rapid screening methods for the analysis of 13diphenidine-derived new psychoactive substances (NPSs)[J]. Anal Bioanal Chem, 2016, 408(29): 8 467-8 481.
 - [7] LAYÉ S, NADJAR A, JOFFRE C, et al. Anti-inflammatory effects of omega-3 fatty acids in the brain: Physiological mechanisms and relevance to pharmacology[J]. Pharmacological Reviews, 2018, 70(1): 12-38.
 - [8] PETROVIC M, DEBELJAK Ž, KEZIC A, et al. Relationship between cannabinoids content and composition of fatty acids in hempseed oils[J]. Food Chem, 2015, 170: 218-225.
 - [9] DELLINGER M J, OLSON J T, HOLUB B J, et al. Fatty acids in ten species of fish commonly consumed by the anishinaabe of the upper great lakes[J]. J Great Lakes Res, 2018, 44(3): 521-526.
 - [10] HSU Mei-Chi, TUNG Chia-Yi, CHEN Hsing-E. Omega-3 polyunsaturated fatty acid supplementation in prevention and treatment of maternal depression: Putative mechanism and recommendation[J]. J Affect Disorders, 2018, 238: 47-61.
 - [11] OLIVEIRA M A L D, SOLIS V E S, GIOIELLI L A, et al. Method development for the analysis of trans-fatty acids in hydrogenated oils by capillary electrophoresis[J]. Electrophoresis, 2003, 24(10): 1 641-1 647.
 - [12] 蒋晓杰. 红外光谱法检测稻谷脂肪酸值研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 16-28.
 - [13] BRENDA L S P, ISAURA D L F, THIAGO D O M, et al. Fast screening method for the analysis of trans fatty acids in processed food by CZE-UV with direct detection[J]. Food Control, 2015, 55: 230-235.
 - [14] 付晓雅. 激光拉曼技术对食用油中反式脂肪酸含量检测方法研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2019: 7-15.
 - [15] KNOTHE G, KENAR J A. Determination of the fatty acid profile by ¹H-NMR spectroscopy[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2004, 106(2): 88-96.
 - [16] 牛倩倩. 植物油中脂肪酸检测新方法的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019: 58-59.
 - [17] 曾麟栖. 基于固相萃取—气相色谱—质谱联用的生物样品中短链脂肪酸分析方法建立及应用[D]. 昆明: 云南中医药大学, 2019: 30-48.
 - [18] 莫欣欣. 食用植物油中反式脂肪酸含量的近红外及拉曼光谱快速检测研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2018: 20-33.
 - [19] PRADO T L A, PORTO B L S, OLIVEIRA M A L. Method optimization for trans fatty acid determination by CZE-UV under direct detection with a simple sample preparation[J]. Anal Methods, 2017, 9(6): 958-965.
 - [20] WOLFGANG K H, OKHRIN O, OKHRIN Y. Multivariate statistical analysis[J]. Springer Nature, 2017: 219-241.
 - [21] ZHANG Yan, ZHAO Yan-rong, SHEN Gui-ping, et al. NMR spectroscopy in conjugation with multivariate statistical analysis for distinguishing plant origin of edible oils[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2018, 69: 140-148.
 - [22] LIU Yu, ZHANG Xu-feng, LI Ying, et al. The application of compound-specific isotope analysis of fatty acids for traceability of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) in the coastal areas of China[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(14): 4 912-4 921.
 - [23] WOOD J D, RICHARDSON R I, NUTE G R, et al. Effects of fatty acids on meat quality: A review[J]. Meat Sci, 2004, 66(1): 21-32.
 - [24] OZOGUL Y, POLAT A, UÇAK I, et al. Seasonal fat and fatty acids variations of seven marine fish species from the Mediterranean Sea[J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2015, 113(12): 1 491-1 498.
 - [25] SHEN Xi-quan, YAN Xiao-jun, XU Ji-lin. Fatty acid profiles in muscle of large yellow croakers (*Larimichthys crocea*) can be used to distinguish between the samples of Dai-qu stock and Min-yuedong stock[J]. Biochem Syst Ecol, 2018, 77: 37-43.
 - [26] 王煜坤, 郝淑贤, 李来好, 等. 不同地区、品种及养殖模式罗非鱼营养差异分析[J]. 食品工业科技, 2018, 39(12): 231-237.
 - [27] 程碧君, 郭波莉, 魏益民, 等. 不同地域来源牛肉中脂肪酸组成及含量特征分析[J]. 核农学报, 2012, 26(3): 517-522.
 - [28] YANG Shao-hua, WANG Ying, WANG Lu-lu, et al. RNA-Seq reveals differentially expressed genes affecting polyunsaturated fatty acids percentage in the Huangshan Black chicken population[J]. Plos One, 2018, 13(4): 1-14.
 - [29] RAUW W M, DIAZ I, FRANCÈS F, et al. The relationship between feed intake behaviour with intramuscular fat, cholesterol and fatty acid composition in pork[J]. J Anim Breed Genet, 2015, 129(4): 289-297.
 - [30] ZHANG S, KNIGHT T J, STALDER K J, et al. Effects of breed, sex and halothane genotype on fatty acid composition of triacylglycerols and phospholipids in pork longissimus muscle[J]. J Anim Breed Genet, 2015, 126(4): 259-268.
 - [31] 杨晓玲, 李维红, 席斌, 等. 不同品种鸡肌肉中营养成分及脂肪酸分析[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2018(19): 71-74.

- [32] 皮立, 胡凤祖, 星玉秀, 等. 青海欧拉羊肌肉脂肪酸组成的气相色谱—质谱分析[J]. 食品科学, 2012, 33(6): 190-193.
- [33] ESQUIVELZETA C, CASELLAS J, FINA M, et al. Carcass traits and meat fatty acid composition in Mediterranean light lambs[J]. Can J Anim Sci, 2017, 97(4): 734-741.
- [34] 李朝阳, 李良玉, 贾鹏禹, 等. 狮白鹅不同部位脂肪的脂肪酸组成分析[J]. 食品工业, 2018, 39(6): 261-265.
- [35] EWA R, EWA C S, JAROSLAWA R. Fatty acid and lipid contents differentiation in cuts of rabbit meat[J]. Cyta-J Food, 2018, 16(1): 807-813.
- [36] 周恒量, 李诚, 刘爱平, 等. 九龙牦牛不同部位肉中脂肪酸组成分析评价[J]. 食品与生物技术学报, 2017, 36(11): 1 225-1 231.
- [37] KHANH N B, SANDJAJA S, BEE P, et al. The consumption of dairy and its association with nutritional status in the south east asian nutrition surveys (SEANUTS)[J]. Nutrients, 2018, 10(6): 759-769.
- [38] HENNO M, ARIKO T, KAART T, et al. The fatty acid composition of Estonian and Latvian retail milk, implications for human nutrition compared with a designer milk[J]. J Dairy Res, 2018, 85(2): 247-250.
- [39] 郭紫玥. 牛羊乳及母乳中主要功能性脂肪酸差异分析及评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016: 12-18.
- [40] 李磊, 王昆, 何静, 等. 驼、牛、羊乳中脂肪酸含量的比较分析[J/OL]. 食品科学. [2018-10-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20180724.1107.008.html>.
- [41] YANG Jin-hui, ZHENG Nan, WANG Jia-qi, et al. Comparative milk fatty acid analysis of different dairy species[J]. Int J Dairy Technol, 2017, 71(2): 544-550.
- [42] TENG Fei, WANG Peng, YANG Lin, et al. Quantification of fatty acids in human, cow, buffalo, goat, yak, and camel milk using an improved one-step GC-FID method[J]. Food Anal Method, 2017, 10(8): 2 881-2 891.
- [43] SUMARMO J, SULISTYOWATI M, SOENARTO. Fatty acids profiles of fresh milk, yogurt and concentrated yogurt from peranakan etawah goat milk[J]. Procedia Food Sci, 2015, 3: 216-222.
- [44] 巨玉佳. 牦牛乳硬质干酪成熟过程中脂肪酸变化研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014: 18-30.
- [45] CALIGIANI A, NOCETTI M, LOLLI V, et al. Development of a quantitative GC-MS method for the detection of cyclopropane fatty acids in cheese as new molecular markers for parmigiano reggiano authentication[J]. J Agr Food Chem, 2016, 64(20): 4 158-4 164.
- [46] ADAMSKA A, EWA R, JAROSLAWA R, et al. Fatty acid profile of commercial Camembert-and Brie-type cheeses available on the Polish market[J]. Cyta-J Food, 2017, 15(4): 639-645.
- [47] VARGAS-BELLO-PÉREZ E, GÓMEZ-CORTÉS P, CAROLINA G M, et al. Authentication of retail cheeses based on fatty acid composition and multivariate data analysis[J]. Int Dairy J, 2018, 85: 280-284.
- [48] 宋美蓉, 侯冬岩, 回瑞华. 茶籽壳和仁中脂肪酸的比较分析[J]. 鞍山师范学院学报, 2014(2): 52-55.
- [49] HLIMA H B, AYED R B, ENNOURI K, et al. Geographical discrimination of virgin olive oils from the tunisian coasts by combining fatty acids and phenolic acids profiles within a multivariate analysis[J]. J Oleo Sci, 2017, 66(9): 963-971.
- [50] 张晓霞, 尹培培, 杨灵光, 等. 不同产地亚麻籽含油率及亚麻籽油脂肪酸组成的研究[J]. 中国油脂, 2017, 42(11): 149-153.
- [51] 张仁凤, 陈光静, 屈立武, 等. 不同产地红花椒籽脂肪酸组成的比较研究[J]. 中国调味品, 2017, 42(6): 1-4.
- [52] 岳虹, 张玉霞, 陈芙蓉, 等. GC-MS 法分析橄榄油与沙棘油中的脂肪酸[J]. 华西药学杂志, 2016, 31(5): 521-523.
- [53] 姜波, 胡文忠, 刘长建, 等. 九种植物油中脂肪酸成分的比较研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(8): 108-113.
- [54] 杨水艳, 邵志凌, 聂绪恒. 10 种云南植物油脂肪酸组成比较分析与评价[J]. 中国油脂, 2018, 43(1): 144-146.
- [55] ZAMANY A J, SAMADI G R, KIM D H, et al. Comparative study of tocopherol contents and fatty acids composition in twenty almond cultivars of afghanistan[J]. J Am Oil Chem Soc, 2017, 94(6): 1-13.
- [56] SÁNCHEZ-SALCEDO E M, SENDRA E, ÁNGEL A Carbonell-Barrachina, et al. Fatty acids composition of Spanish black (*Morus nigra* L.) and white (*Morus alba* L.) mulberries[J]. Food Chem, 2016, 190: 566-571.
- [57] ERCISLI S, ORHAN E. Chemical composition of white (*Morus alba*), red (*Morus rubra*) and black (*Morus nigra*) mulberry fruits[J]. Food Chem, 2007, 103(4): 1 380-1 384.
- [58] 陈文学, 赵岩, 杨琦, 等. 基于 GC-MS 法的不同品种人参中脂肪酸成分及含量分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(20): 10 634-10 636.
- [59] 李吉光, 周艳芬, 王蓉. GC-MS 指纹图谱结合主成分分析法评价不同产地黑果枸杞脂肪酸的质量[J]. 宁夏大学学报: 自然版, 2017, 38(4): 365-370.
- [60] COSSIGNANI L, BLASI F, SIMONETTI M S, et al. Fatty acids and phytosterols to discriminate geographic origin of *Lycium barbarum* berry[J]. Food Anal Method, 2018, 11(4): 1 180-1 188.
- [61] TIAN Hong-lei, PING Zhan, HAO Zhang. Development of a fatty acid fingerprint of white apricot almond oil by gas chromatography and gas chromatography-mass spectrometry[J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2014, 116(2): 126-133.
- [62] AMORELLO D, ORECCHIO S, PACE A, et al. Discrimination of almonds (*Prunus dulcis*) geographical origin by minerals and fatty acids profiling[J]. Nat Prod Res, 2016, 30(18): 2 107-2 110.