

气相色谱法检测食品中脂肪酸的研究进展

李小佳, 赵志红*, 杨扬, 朱慧

(杭州娃哈哈集团有限公司, 杭州 310018)

摘要: 脂肪酸是食品的重要组成部分,也是机体能量的主要来源之一。了解脂肪酸的含量,对于合理规划饮食有很大帮助。近年来,食品安全事件频频发生,食品中脂肪酸的检测已成为食品检测领域重点工作。在食品中脂肪酸众多的检测手段中,气相色谱法依然是最常用的检测方法。本文汇总了目前食品中脂肪酸的国家标准检测方法,针对鱼油、植物油和婴幼儿食品等不同食品基质有不同的标准;综述了近年来国内外对食品中脂肪酸的气相色谱检测方法的研究进展,包括气相色谱法在不同食品中的检测应用、气相色谱前处理方法的优化以及串联质谱检测方法的拓展。对前处理条件的优化,从脂肪提取、甲酯化处理和色谱条件的改变等各方面分别进行概述。最后也对其发展趋势作出展望。

关键词: 食品; 脂肪酸; 气相色谱法

Research progress on detection of fatty acids in food by gas chromatography

LI Xiao-Jia, ZHAO Zhi-Hong*, YANG Yang, ZHU Hui

(Hangzhou Wahaha Group Co., Ltd., Hangzhou 310018, China)

ABSTRACT: Fatty acids are the important components of food and one of main sources of the body's energy. It is of great help to create a reasonable diet plan by acquiring the content of fatty acids. As food safety incidents have frequently occurred in recent years, determination of fatty acids in food has become the focus of the food safety work. Gas chromatography is still the most common detection method for fatty acids in food. The national standard detection methods of fatty acids in food and recent progress on gas chromatography in fatty acids at home and abroad were summarized in this paper, including the application of gas chromatography on different kinds of food, optimization of the pre-treatment methods, as well as the tandem mass spectrometry methods. Finally, the future trends of detection methods for fatty acids in food were also prospected.

KEY WORDS: food; fatty acid; gas chromatography

1 引言

脂肪酸(fatty acid),是一类含有长链烃的脂肪族羧酸化合物,通常以酯的形式存在中性脂肪、磷脂和糖脂等各种脂质组分中,以游离形式存在的比较罕见,是机体主要

能量来源之一。

脂肪酸的分类,按照碳链长度,可分为短链脂肪酸(SCFA, 4~6 C),中链脂肪酸(MCFA, 8~12 C)和长链脂肪酸(LCFA, >12 C)。按照双键数量,又可分为饱和脂肪酸(SFA, 碳氢链上没有不饱和键)、单不饱和脂肪酸(MUFA, 碳氢链

基金项目:浙江省公益性技术应用研究(分析测试)项目(2015C37074)

Fund: Supported by Public Welfare Technology Applied Research Projects in Zhejiang Province (2015C37074)

*通讯作者:赵志红,高级工程师,主要研究方向为食品质量与安全相关的理化检验研究。E-mail: zzhxuan@sina.com

*Corresponding author: ZHAO Zhi-Hong, Senior Engineer, Hangzhou Wahaha Group Co., Ltd., Hangzhou 310018, China. E-mail: zzhxuan@sina.com

有 1 个不饱和键)和多不饱和脂肪酸(PUFA, 碳氢链有 2 个或 2 个以上不饱和键)^[1]。

其中, 饱和脂肪酸, 如肉豆蔻酸(C14:0)和月桂酸(C12:0), 会提高血清中的脂蛋白胆固醇水平, 导致动脉血管内壁胆固醇沉积, 增加人体患各种心血管疾病的风险; 但另一方面, 某些饱和脂肪酸, 如丁酸(C4:0), 可以供应能量, 同时有调节免疫应答和炎症反应作用; 棕榈酸(C16:0), 能降低血清中胆固醇的含量^[2]。而不饱和脂肪酸一般被认为是具有降低坏胆固醇、预防动脉粥样硬化的作用, 尤其是血管清道夫二十碳五烯酸(EPA)与脑黄金二十二碳六烯酸(DHA)。但其中的反式脂肪酸却同样会增加坏胆固醇, 影响生长发育^[3,4]。

近年来, 食品安全事件频频发生。国家食药总局发布的调查结果中, 就有不少脂肪酸比例不当、反式脂肪酸(TFA)超标的通告。奶粉市场尤甚, 部分商家为降低成本, 或使用劣质油脂, 或在奶粉中掺杂植脂末, 生产不合格的奶粉产品, 对婴幼儿食品安全造成很大隐患。

为规范市场, 也为了帮助人们对各类食品中脂肪酸含量的了解, 合理规划饮食结构, 以达到健康的膳食平衡, 脂肪酸的检测方法研究一直是食品领域的重点工作。

2 相关检测方法

针对食品中脂肪酸的检测, 目前已经有很多检测技术^[5]。除气相色谱(GC)外, 常见的还有高效液相色谱法(HPLC)^[6,7]、高效液相色谱-串联质谱法(HPLC-MS/MS)^[8,9]、红外光谱法^[10,11]、核磁共振法^[12]等。但因为灵敏度高、分离性好、检出限低, 气相色谱法仍然是当下应用最广泛的检测方法。

国家已相继推出多种标准检测方法。表 1 中详细列出了现行有效的标准方法^[13-19]。由于脂肪酸在食品中大多以甘油酯的形式存在, 一般都涉及水解提取、衍生等前处理方法。

2.1 不同检测物质的应用

脂肪提取、甲酯化处理、FID 氢火焰离子化检测器的气相色谱法是最普及的, 现如今不断有研究者将该方法应用于植物油、动物油、婴幼儿食品和乳品等各类食品的检测。

2.1.1 反式脂肪酸分析

反式脂肪酸一直是食品安全领域的重点工作。相对其他检测方法, 气相色谱法在检测准确性、灵敏度上都拥有着绝对优势, 因此广泛应用于食品中反式脂肪酸的检测。研究主要围绕不同食品基质中的定量分析。

柯润辉等^[20]采用内标定量, 气相色谱串联氢火焰离子化检测器(GC-FID)检测, 对面包、饼干等 11 种焙烤食品中的多种反式脂肪酸含量进行测定。发现反式脂肪酸含量占 1.18%~10.75%, 其中以 C18:1t 为主, 占所测总反式脂肪酸含量的 46.59%~80.65%。对焙烤食品中反式脂肪酸的管理还需严格。杨桂玲等^[21]建立了沙拉酱中 8 种脂肪酸的气相色谱分析方法。样品经二氯甲烷充分提取浓缩、三氟化硼乙醚甲醇法甲酯化后, 在 HP-88 分析柱上分离检测。最终得到 8 种反式脂肪酸的最小检出限为 1.24~1.26 mg/kg, 方法回收率在 70%~110%之间。Tyburczy 等^[22]对 25 种食用油脂样品, 采用傅里叶变换红外光谱法(ATR-FTIR)和 GC-FID 对比分析, 发现反式脂肪含量小于总脂肪 2%的样品中, 二者出现显著的检测差异。ATR-FTIR 法下某些组分产生的光谱吸收导致反式脂肪成分被高估, 气相色谱法有着更好的准确性。陶柏秋等^[23]通过气相色谱法对 7 个婴幼儿配方奶粉品牌、62 个样品中的反-9-十八碳一烯酸甲酯和反-9,12-十八碳二烯酸甲酯 2 种反式脂肪酸含量进行测定。结果表明, 不同品牌奶粉中反式脂肪酸的含量各不相同, 相同品牌不同阶段的奶粉反式脂肪酸的含量也存在着明显差异性。张明霞等^[24]采用气相色谱法对 13 种常见的煎炸食品共计 119 份样品中反式脂肪酸的含量进行测定。发现样品经煎炸后, TFAs 含量有不同程度的变化, 总体呈现增

表 1 食品中脂肪酸检测方法的标准
Table 1 The standards of detection methods for fatty acids in foods

标准编号	检测基质	检测物质	方法	检出限
SN/T 2922-2011	鱼油和鱼油复合胶囊制品	EPA、DHA	甲酯化-气相色谱法	1.0 mg/g
GB/T 5009.168-2003	海鱼类产品、鱼油产品	EPA、DHA	甲酯化-气相色谱法	0.1 mg/kg
GB/T 22110-2008	植物油和含植物油食品	反式脂肪酸	甲酯化-气相色谱法	0.05%(以脂肪计)
SN/T 2326-2009	食品及食用油脂	反式脂肪酸	傅里叶变换红外光谱法	5%(以脂肪计)
GB 5413.36—2010	婴幼儿食品和乳品	反式脂肪酸	甲酯化-气相色谱法	30 mg/kg
GB 5413.27—2010	婴幼儿食品和乳品	37 种脂肪酸	甲酯化--气相色谱法	5~10 mg/kg
GB 22223-2008	食品	37 种脂肪酸	水解提取-甲酯化-气相色谱法	0.10%

加趋势。其中增加趋势最大的为煎蛋、炸面包和方便面,其TFAs含量分别是煎炸前的4.8倍、3.7倍和3.5倍。王浩等^[25]采用KOH-甲醇甲酯化结合GC-FID法对市售5种巧克力进行分析,反式脂肪酸含量范围为0.4%~1.1%(以油脂中含量计),含量较低,因而在营养标签上可表示为0 g/100 g。

2.1.2 常规脂肪酸分析

除针对反式脂肪酸的检测外,气相色谱法也广泛应用于各类食品中脂肪酸的检测,检测结果有很好的解读价值。可以通过脂肪酸组成了解食品的性质从而帮助设置合适的储存条件,也可以从中获悉产品的营养成分含量,例如奶粉中的DHA、鱼油中的EPA等,供消费者参考。

徐静等^[26]采用乙醚-正庚烷提取茶叶中的脂肪酸后以KOH-甲醇甲酯化,用JH-FFAP石英毛细管柱作为分析柱,检测分析茶叶中的6种脂肪酸,发现各类茶叶中的脂肪酸以不饱和脂肪酸(亚油酸和亚麻酸)为主。不饱和脂肪酸易被氧化、酸败是茶叶品质劣变的原因之一,但从营养角度看,不饱和脂肪酸可以降低胆固醇,改善血液微循环,也验证了茶叶的功效。程碧君等^[27]对不同地区的牛肉通过绞碎干燥、石油醚浸提等处理,以1%硫酸-甲醇甲酯化后色谱分析,发现不同地域来源牛肉中脂肪酸组成和含量具有不同特征,因此,脂肪酸组成和含量可以作为牛肉产地溯源的很有潜力的指标。陈树俊等^[28]对国内外7种贮藏前后的核桃仁,通过石油醚的回流萃取,KOH-甲醇的甲酯化处理分析。发现核桃仁中不饱和脂肪酸的含量高达90%左右。在贮藏前后,不同品种核桃各脂肪酸组成占总脂肪比例不同,导致贮藏期不同;不饱和脂肪酸含量高的核桃品种,油脂稳定性差,易被氧化,不宜长时间贮藏。

吴云良等^[29]采用气相色谱技术对苏北草鸡蛋蛋黄中的脂肪酸组分进行分析,共分离和鉴定出12种脂肪酸,其中不饱和脂肪酸8种,相对含量达到62.3%,是饱和脂肪酸含量近2倍。其中棕榈酸、油酸、亚油酸是含量最高的3种脂肪酸。通过与其他文献的对比,其结果大致相同,说明在鸡蛋黄中脂肪酸的组成有一定规律性和相对稳定性。周文娟等^[30]利用不同的热处理方式,包括焙烤加热、微波加热和煎炒加热对槟榔油分别进行15、30、90 min的加热处理,甲酯化后经气相色谱-串联质谱法(GC-MS/MS)分析出其中脂肪酸成分及含量。发现处理后,槟榔油中脂肪酸的不稳定成分会发生一定程度的变化,因而影响到油的品质。李云龙等^[31]采用Agilent HP-88专用脂肪酸甲酯毛细管柱和程序升温方法,建立了一套简单高效的用来测定牛奶中脂肪酸组分的GC-FID方法。采用该检测方法牛奶中的脂肪酸得到了很好的分离,回收率为99.59%,精密度为2.60%,具有较高的准确性和重复度。

黄杰等^[32]以二十一烷酸甲酯为内标物,建立了同时测定奶粉中亚麻酸、ARA、EPA和DHA的毛细管气相色谱方法。该方法简单快速,各物质与内标物均获得良好的

分离,加标回收率为95.4%~104.7%。张鹏等^[33]通过用氨水-乙醇提取结合气相色谱法,研究婴幼儿配方奶粉中二十二碳六烯酸(DHA)、二十碳四烯酸(AA)在高温加速实验条件下,在不同储存时间内其质量分数变化。结果表明,在高温储藏条件下,原料DHA和原料AA质量分数均随着时间的延长而缓慢降低。鲁辉等^[34]建立了保健食品中EPA和DHA的气相色谱分析法,并进行方法学研究,回收率在96.54%~101.0%,该方法前处理简单、准确度高、分析时间较短(GC法20 min以内)、耐用性好,适用于鱼油、海藻油等不同类型保健食品中EPA和DHA的测定。张郢峰等^[35]采用DB-5MS,建立GC-FID定量法快速对11种市售鱼油中的DHA及EPA的含量进行测定。检测值均小于标示值,为此需规范市售鱼油商品的标示含量。

2.2 检测方法的优化

在应用范围不断推广的同时,研究者通过对检测各个环节的条件研究,对方法加以改善。如动物油、奶粉等基质比较复杂的样品,条件优化有助于实验更顺利地进行。

2.2.1 脂肪提取的优化

脂肪提取优化的主要目的,是通过固相萃取、加速溶剂萃取和微波辅助提取等手段改善提取条件,减少提取时间,并最终提高提取效率。

吴琳等^[36]应用Florisor固相萃取柱,能够快速有效地分离甘油三酯、甘油二酯、单甘脂及游离脂肪酸,用此法分离纯化5种不同油脂的酶解产物,经GC分析其sn-2位脂肪酸分布表明植物油、藻油和海豹油中sn-2位主要为中长链不饱和脂肪酸,菌油和鱼油中sn-2位多为长链多不饱和脂肪酸。

徐慧等^[37]应用加速溶剂萃取技术(ASE)对食品中的油脂进行富集,发现在提取温度125℃,提取压力10342 kPa时,以正己烷:二氯甲烷:甲醇(3:2:1, V:V:V),可对食品中反式脂肪酸进行有效提取。以C16:1-t9为例,该方法下的加标回收率在96.1%~99.3%,相对标准偏差为0.5%~2.3%。

张云涛等^[38]采用超临界CO₂流体萃取设备及气相色谱法,分析不同用途的8种葡萄籽中的脂肪酸组分,发现在葡萄籽油中,亚油酸含量最高,其次是油酸。此外不同用途的葡萄籽主要是脂肪酸含量的差异,为葡萄籽提油时的品种选择提供理论依据。

刘有添等^[39]考察索氏提取、超声提取和加速溶剂萃取3种不同提取方法对乌贼膏的粗脂肪抽提效率的影响。发现在考察的试验条件下,加速溶剂萃取的提取效率最高,20 min内提取率达到最值,同时由于高温高压浸提充分,溶剂用量少,提取时间短。超声提取效率次之,索氏提取的提取时间最长,4 h后提取率达到最值,且溶剂用量多。故采用加速溶剂萃取的方法提取乌贼膏中的脂肪。

田小红等^[40]以棉仁为原料,采用微波辅助提取法提

取棉籽油, 通过单因素试验和正交试验, 研究了提取剂、微波功率、料液比、提取时间对棉籽得油率的影响, 确定了棉籽油的最佳提取条件。Brunton 等^[41]也对脂肪酸检测中的微波辅助作了类似研究, 并将方法广泛应用于奶制品等各类食品中。

Pusvaskiene 等^[42]研究了一种用于检测脂肪酸的分散液液微萃取与衍生化同时进行的方法。将丙酮(分散剂)、四氯化碳(萃取溶剂)和氯甲酸乙酯(衍生化试剂)同时加入样品, 离心后气相分析。并对萃取溶剂类型、各溶剂量用量、提取时间进行研究。研究显示该方法线性关系良好, 其中壬酸、棕榈酸、硬脂酸的检出限分别为 14.5、0.67 和 1.06 $\mu\text{g/L}$ 。

2.2.2 甲酯化的优化

甲酯化的优化, 旨在对甲酯化过程各因素的摸索中寻找最优的反应条件, 以获得更高的甲酯化效率, 同时提高实验过程的操作性和安全性。

刘宁等^[43]利用氨水-乙醇法提取牛乳中脂肪, 通过不同条件下各因素试验分析, 确定脂肪酸甲酯化的最优参数条件为: 反应时间为 23.05 min, 反应温度为 84.24 $^{\circ}\text{C}$, KOH-甲醇的添加量为 2.23 mL, 三氟化硼-甲醇添加量为 1.13 mL, 在此条件下牛乳脂肪酸甲酯化率达到 99.2%。比未优化前脂肪酸甲酯化率明显提高。

陈臣等^[44]采用 GC-FID 测定核桃仁、发酵核桃乳中的脂肪酸, 以衍生化试剂加入量、超声时间、超声水浴温度为影响因素, 组合实验进行分析, 确定在 0.5%KOH-甲醇 647 μL 、超声时间 5 min、超声水浴温度 43 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下, 获得更好的甲酯化效率。

黄菲菲等^[45]则比较了乙酰氯/甲醇-甲苯体系和罗兹-哥特里法(即碱性乙醚提取法)2 种方法, 在提取脂肪-甲酯化测定乳制品中脂肪酸的效果。总体来看第一法适用于各类乳与乳制品中脂肪酸的测定, 尤其是对脂肪酸以包埋形式添加的样品提取效果更好, 但涉及冷冻干燥。鉴于冷冻干燥机并不普及, 有一定局限性。第二法也适用于各类制品中脂肪酸的测定, 操作相对复杂。因此可根据实际情况选择合适的方法。

范胜栩等^[46]在气相色谱定量检测大豆中 5 种脂肪酸的方法中, 比较了简易甲酯化提取法和加热甲酯化提取法, 发现 2 种方法所得的脂肪酸组分绝对含量存在显著或者极显著差异。此外, 在甲酯化过程中, 以甲醇钠替代剧毒的三氟化硼甲醇, 在保证甲酯化效果的同时, 一定程度上提高了试验的安全性。

2.2.3 色谱条件的优化

由于脂肪酸种类较多, 研究人员通过对色谱柱类型、升温程序等色谱条件优化, 以期在更短时间内, 实现多种物质更好的分离效果。

刘有添等^[39]在乌贼膏脂肪酸组成的检测工作中对色谱柱进行了考察。选用非极性 HP-5 柱、极性 HP-INNOWax

柱和强极性 HP-88 柱对 40 种脂肪酸甲酯混标样品进行分离。发现只有在 HP-88 柱上检测到 40 个峰, 且保证大部分出峰均达到基本分离。并成功用此方法从乌贼膏中共检出 23 种脂肪酸。

张志超等^[47]比较了聚乙二醇(DB-FFAP)、氰丙基色谱柱(CP-SIL88)和 50%氰丙基苯基-甲基聚硅氧烷色谱柱(DB-225)对脂肪酸甲酯分离效果。DB-FFAP 柱对个别脂肪酸甲酯的分离效果较差; CP-SIL88 柱分离效果很好, 但是分离时间较长; DB-225 色谱柱对各脂肪酸甲酯都能有很好的响应。最终实现在 20 min 内对海产品中 37 种脂肪酸含量的同时分离测定。

解永磊等^[48]运用单因素试验与正交试验相结合, 研究了柱温、载气流量、进样口温度及进样量对气相色谱测定挥发性脂肪酸检测结果的影响, 最终确定在进样量 1.5 μL , 载气流量 75 mL/min, 进样口温度 220 $^{\circ}\text{C}$, 以一定的柱温升温程序, 挥发酸组分可以完全分离且分析速度快。

高宏等^[49]在建立加工食品中反式脂肪酸的分析方法时, 比较了 100 m 和 30 m 毛细管石英柱的分离效果。发现 100 m 长色谱柱虽然可以实现完全分离, 但由于时间过长, 在温度稍有变化时会出现出峰顺序变化的现象; 30 m 长色谱柱在 35 min 内实现各组分基本分离, 由于反式脂肪酸最终结果以 C18:1t 总量计, 不能完全分离并不影响结果。因此, 实验采用 30 m 长 HP 88 毛细管色谱柱。

2.3 GC-MS 检测技术的扩展

近些年, 因为适合微量或痕量分析、灵敏度高、检出限低、分离度好等优点, GC-MS 的应用研究也比较多。且由于已有成熟的商品化标准谱图数据库, 可对未知化合物进行快速检索和鉴定, 是一种较为理想的脂肪酸分析技术。

方国臻等^[50]选定 HP-88 型色谱柱, 以二十三烷酸作为内标物, 通过对样品前处理方法、色谱条件的优化, 建立同时测定奶粉中 DHA、EPA、AA、亚麻酸和亚油酸含量的气相色谱-质谱联用方法。分离效果非常好, 被测物质的回收率均在 90%~110%之间。

梁海东等^[51]采用 HCl-甲醇甲酯化、 BF_3 -甲醇甲酯化以及硅烷化三种预处理方法, 提取样品中的脂肪酸, 并使用气相色谱-质谱(GC-MS)方法进行分离和鉴定。发现 HCl-甲醇甲酯化比 BF_3 -甲醇甲酯化和硅烷化预处理检测和识别的脂肪酸种类多, 操作简单, 是比较理想的前处理手段。

陈小燕等^[52]建立了以 SPB-50 柱分离 37 种脂肪酸的气相色谱-质谱方法, 在满足气相仪器要求的进样量范围内, 进样量与物质峰面积呈良好的线性关系。并对实际鱼油样品的脂肪酸进行检测。方法适合检测复杂的脂肪酸混合物样品, 特别是对顺式和反式脂肪酸以及 ω -3(如 EPA 和 DHA)和 ω -6 等功能性脂肪酸的检测有重要意义。

王建梅等^[53]建立气相色谱-质谱联用法快速测定脂肪

酸的方法,分析新疆罗布麻蜂蜜中的脂肪酸组成。样品用正己烷乙醚混合提取,氢氧化钾-甲醇法甲酯化,归一化法计算含量。蜂蜜中含有28种脂肪酸成分,其主要成分是亚油酸(26.57%)、棕榈酸(17.6%)、十七烷酸(7.34%)等,不饱和和脂肪酸含量丰富。

李海英等^[54]通过气相色谱-质谱联用法(GC-MS)比较分析了16种东海沿海贝类的脂肪酸和甾醇组成,发现分类地位相似的贝类基本具有相似的脂肪酸和甾醇组成,并统计分析发现瓣鳃纲贝类中PUFA以EPA和DHA为主;腹足纲贝类中PUFA以EPA和ARA为主。

Saini等^[55]对8个印度商业种植品种的辣木进行了气相色谱质谱分析,在叶子中, α -亚麻酸(C18:3)含量最高达49%~59%,其次是棕榈酸(C16:0)(16%~18%)和亚油酸(C18:2)(6%~13%),证明辣木叶中含有低量饱和脂肪酸与高不饱和脂肪酸含量,基于辣木的产品对健康的很有益处。

3 展 望

从上述文献总结中可见,随着人们健康观念的不断升级,食品中脂肪酸的检测愈来愈成为食品检测的重点工作,而气相色谱法则是主要检测手段。研究人员将方法拓展应用于各类食品的检测中。尤其是在奶粉与乳制品中,脂肪酸组成是衡量品质常用的考察指标。GC-MS方法作为一种较为新颖的技术,借助质谱检测器的高灵敏度,有很大的发展空间。但由于成本较高,在推广上还存在一定阻力。由于气相方法涉及复杂的衍生处理,比较耗时耗力,研究人员也致力于脂肪提取、甲酯化处理、色谱条件等多方面,对方面进行改进与优化,期望在保证检测结果准确性的同时,提高实验过程的操作性与安全性。

综上所述,食品中脂肪酸的检测方法也在不断进步,并朝向高效、灵敏、前处理优化等方面发展。相信随着技术进步,研究人员一定可以继续完善检测技术,帮助人们更好地了解食品中的各类脂肪酸含量。

参考文献

- [1] 黄凤洪,黄庆德,刘昌盛. 脂肪酸的营养与平衡[J]. 食品科学, 2004, 25: 262-265.
Huang FH, Huang QD, Liu CS. Nutrition and balance of fatty acids [J]. Food Sci, 2004, 25: 262-265.
- [2] 陈银基,鞠兴荣,周光宏. 饱和脂肪酸分类与生理功能[J]. 中国油脂, 2008, 33(3): 35-39.
Chen YJ, Ju XR, Zhou GH. Classification and physiological function of saturated fatty acids [J]. Chin Oils Fat, 2008, 33(3): 35-39.
- [3] 王伟,张伟敏. 单不饱和脂肪酸的功能特性[J]. 中国食物与营养, 2005, 4: 44-46.
Wang W, Zhang WM. Functional characteristic of monounsaturated fatty acids [J]. Food Nutr China, 2005, 4: 44-46.
- [4] 孙翔宇,高贵田,段爱莉,等. 多不饱和脂肪酸的研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 7: 418-423.
- [5] Sun XY, Gao GT, Duan AL, et al. Research progress in polyunsaturated fatty acids[J]. Sci Technol Food Ind, 2012, 7: 418-423.
- [5] 周文斌,吕春明,张宁,等. 脂肪酸检测方法的研究进展[J]. 中国现代应用药学, 2014, 31(2): 246-252.
Zhou WB, Lv CM, Zhang N, et al. Progress in the analytical methods for the determination of fatty acids [J]. Chin J Mod Appl Pharm, 2014, 31(2): 246-252.
- [6] Makahleh A, Saad B, Siang Gh, et al. Determination of underivatized long chain fatty acids using RP-HPLC with capacitively coupled contactless conductivity detection [J]. Talanta, 2010, 81(1/2): 20-24.
- [7] 郑振佳,赵先恩,迟炳海,等. 花生油中游离脂肪酸的HPLC-FLD分析[J]. 分析试验室, 2011, 30(3): 23-27.
Zheng ZJ, Zhao XE, Chi BH, et al. HPLC-FLD analysis of free fatty acids in peanut oil [J]. Chin J Anal Lab, 2011, 30(3): 23-27.
- [8] Xie Y, Li G, You J, et al. A novel labeling reagent of 2-(12-benzo [b] acridin-5-(12H)-yl)-acetohydrazide for determination of saturated and unsaturated fatty acids in traditional Chinese herbs by HPLC-APCI-MS [J]. Chromatography, 2012, 75(11/12): 571-583.
- [9] 胡娜,索有瑞,韩丽娟,等. 柱前衍生 HPLC-MS 法测定黑果枸杞果实中脂肪酸[J]. 分析试验室, 2014, 33(6): 698-701.
Hu N, Suo YR, Han LJ, et al. Determination and analysis of fatty acids in *Lycium ruthenicum* Murr fruits by HPLC-MS with pre-column derivatization [J]. Chin J Anal Lab, 2014, 33(6): 698-701.
- [10] Casale M, Oliveri P, Casolino C, et al. Characterisation of PDO olive oil Chianti classico by non-selective(UV-visible, NIR and MIR spectroscopy) and selective (fatty acid composition) analytical techniques [J]. Anal Chim Acta, 2012(712): 56-63.
- [11] Vongsvivut J, Heraud P, Zhang W, et al. Quantitative determination of fatty acid compositions in micro-encapsulated fish-oil supplements using Fourier transform infrared(FTIR) spectroscopy [J]. Food Chem, 2012, 135(2): 603-609.
- [12] Knothe G, Kenar JA. Determination of the fatty acid profile by ¹H-NMR spectroscopy [J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2004, 106(2): 88-96.
- [13] SN/T 2922-2011 出口食品中 EPA 和 DHA 的测定-气相色谱法[S].
SN/T 2922-2011 Determination of eicosapentaenoic acid (EPA) and docosahexaenoic acid(DHA) in foods for export-gas chromatography [S].
- [14] GB/T 5009.168-2003 食品中二十碳五烯酸和二十二碳六烯酸的测定[S].
GB/T 5009.168-2003 Determination of eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid in foods [S].
- [15] GB/T 22110-2008 食品中反式脂肪酸的测定-气相色谱法[S].
GB/T 22110-2008 Determination of *trans* fatty acids in foods-Gas chromatographic methods [S].
- [16] SN/T 2326-2009 食品及油脂中反式脂肪酸含量的检测-傅里叶变换红外光谱法[S].
SN/T 2326-2009 Determination of *trans* fatty acids in foodstuff and oils-FTIR method [S].
- [17] GB 5413.36-2010 食品安全国家标准 婴幼儿食品和乳品中反式脂肪酸的测定[S].
GB 5413.36-2010 National food safety standard Determination of *trans* fatty acids in foods for infants and young children milk products [S].
- [18] GB 5413.27-2010 食品安全国家标准 婴幼儿食品和乳品中脂肪酸的

- 测定[S].
GB 5413.27-2010 National food safety standard determination of fatty acids in foods for infants and young children milk products [S].
- [19] GB 22223-2008 食品中总脂肪、饱和脂肪(酸)、不饱和脂肪(酸)的测定 水解提取-气相色谱法[S].
GB 22223-2008 Determination of total fat, saturated fat, and unsaturated fat in foods-Hydrolytic extraction-gas chromatography [S].
- [20] 柯润辉, 尹子波, 张英, 等. 气相色谱法测定焙烤食品中反式脂肪酸含量[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(12): 165-168.
Ke RH, Yi ZB, Zhang Y, *et al.* Determination of *trans* fatty acids content in baked food using gas chromatography [J]. Food Res Dev, 2010, 31(12): 165-168.
- [21] 杨桂玲, 孟冰冰, 于林, 等. 气相色谱法检测市售沙拉酱中反式脂肪酸[J]. 中国调味品, 2014, 39(1): 96-98.
Yang GL, Meng BB, Yu L, *et al.* Determination of TFA in salad dressing by gas chromatography [J]. Chin Cond, 2014, 39(1): 96-98.
- [22] Tyburczy C, Mossoba MM, Fardin-Kia AR, *et al.* Evaluation of low *trans* fat edible oils by attenuated total reflection-Fourier transform infrared spectroscopy and gas chromatography: a comparison of analytical approaches [J]. Anal Bioanal Chem, 2012, 404(3): 809-819.
- [23] 陶柏秋, 徐红颖. 婴幼儿配方奶粉中反式脂肪酸含量测定[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(3): 104-107.
Tao BQ, Xu HY. The Content of Trans-fatty Acids in Infant Formula [J]. Food Res Dev, 2015, 36(3): 104-107.
- [24] 张明霞, 庞建光, 薛占永. 煎炸食品中脂肪酸和反式脂肪酸的研究[J]. 食品工业, 2015, 36(6): 294-296.
Zhang MX, Pang JG, Yu L, Xue ZY. Survey of saturated and *trans* fatty acids in fried food [J]. Food Ind, 2015, 36(6): 294-296.
- [25] 王浩, 杨悠悠, 刘冬, 等. 巧克力中脂肪酸组成及反式脂肪酸含量的分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(4): 1143-1147.
Wang H, Yang YY, Liu T, *et al.* Analysis of fatty acids composition and *trans*-fatty acids content in chocolate [J]. J Food Saf Qual, 2015, 6(4): 1143-1147.
- [26] 徐静, 陆建平. 气相色谱法测定茶叶中的脂肪酸组成[J]. 化工技术与开发, 2009, 38(4): 39-41.
Xu J, Lu JP. Determination of fatty acid component in Chinese teas by gas chromatography [J]. Technol Dev Chem Ind, 2009, 38(4): 39-41.
- [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.
Cheng BJ, Guo BL, Wei YM, *et al.* Analysis of fatty acid compositions and content of beef from different geographical origins [J]. J Nucl Agric Sci, 2012, 26(3): 517-522.
- [28] 陈树俊, 田津瑞, 康俊杰, 等. 不同核桃贮藏前后油脂理化特性与脂肪酸气相色谱分析[J]. 食品工业科技, 2015, 8: 324-327.
Chen SJ, Tian JR, Kang JJ, *et al.* Different walnut oil physical and chemical properties analysis and fatty acid gas chromatography analysis before and after storage [J]. Sci Technol Food Ind, 2015, 8: 324-327.
- [29] 吴云良, 林勇, 赵伟. 苏北草鸡蛋中脂肪酸组分的气相色谱分析[J]. 中国家禽, 2015, 37(13): 63-65.
Wu YL, Lin Y, Zhao W. Determination of fatty acids in Subei eggs by gas chromatography [J]. Chin Poultry, 2015, 37(13): 63-65.
- [30] 周文娟, 周文化, 李忠海. 不同热处理方式对棕榈油脂肪酸成分及含量的影响[J]. 北京农业, 2012, 1: 9-11.
Zhou WJ, Zhou WH, Li ZH. Different heat treatment effects on betel nut oil fatty acid composition and content [J]. Beijing Agric, 2012, 1: 9-11.
- [31] 李云龙, 杨章平, 常玲玲, 等. 气相色谱法检测牛奶中脂肪酸组分方法的改进[J]. 中国牛业科学, 2012, 38(3): 18-21.
Li YL, Yang ZP, Chang LL, *et al.* The improvement of Gas chromatography analysis of composition in milk fatty acid [J]. Chin Cattle Sci, 2012, 38(3): 18-21.
- [32] 黄杰, 余孔捷, 钱疆, 等. 毛细管气相色谱内标法同时测定奶粉中亚麻酸, ARA, EPA 和 DHA [J]. 食品发酵工程, 2012, 38(9): 170-173.
Huang J, Yu KJ, Qian J, *et al.* Simultaneous Determination of Linolenic Acid, ARA, EPA and DHA in milk powder with capillary GC by internal standard method [J]. Food Ferment Ind, 2012, 38(9): 170-173.
- [33] 张鹏, 曹素芳, 戴智勇, 等. 婴幼儿配方奶粉中 DHA 和 AA 储藏稳定性研究[J]. 中国乳品工业, 2016, 44(5): 9-11.
Zhang P, Cao SF, Dai ZY, *et al.* Storage stability research of DHA and AA in the infant formula [J]. Chin Dairy Ind, 2016, 44(5): 9-11.
- [34] 鲁辉, 周璇, 钱叶飞, 等. 保健食品中 EPA 和 DHA 含量测定方法研究[J]. 中国食品添加剂, 2015, 4: 190-194.
Lu H, Zhou X, Qian YF, *et al.* Storage stability research of DHA and AA in the infant formula [J]. Chin Dairy Ind, 2015, 4: 190-194.
- [35] 张鄂峰, 赵月然. 气相色谱法测定市售鱼油产品中的 EPA 和 DHA 含量[J]. 应用化工, 2015, 44(7): 1363-1365.
Zhang YF, Zhao YR, Qian YF, *et al.* Content determination of EPA and DHA in commercially available fish oil by GC [J]. Appl Chem Ind, 2015, 44(7): 1363-1365.
- [36] 吴琳, 刘四磊, 魏芳, 等. Florisil 固相萃取法联用气相色谱测定油脂中 sn-2 位脂肪酸[J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(2): 227-233.
Wu L, Liu SL, Wei F, *et al.* Determination of sn-2 position fatty acid in oils by SPE method with Florisil extraction cartridge coupled with gas chromatography [J]. Chin J Oil Crop Sci, 2015, 37(2): 227-233.
- [37] 徐慧, 武晓静, 庄件兵, 等. 加速溶剂萃取-气相色谱法快速测定食品中反式脂肪酸[J]. 现代科学仪器, 2009, 2: 87-89.
Xu H, Wu XJ, Zhuang JB, *et al.* Determination of *trans* fat acids in foods by ASE/GC [J]. Mod Sci Instrum, 2009, 2: 87-89.
- [38] 张云涛, 俞守能, 孔维府, 等. 八种葡萄籽油中主要脂肪酸的检测与分析[J]. 食品工业科技, 2012, 33(4): 86-88.
Zhang YT, Yu SN, Kong WF, *et al.* Detection and analysis of major fatty acids in the seed oil of eight different grapes [J]. Sci Technol Food Ind, 2012, 33(4): 86-88.
- [39] 刘有添, 廖杰良, 谢水清. 加速溶剂萃取-气相色谱法快速测定乌贼膏中的脂肪酸组成[J]. 现代农业科技, 2014, 1: 283-285.
Liu YT, Liao JL, Xie SQ. Analysis of fatty acids compositions in squid extract by accelerated solvent extraction-gas chromatography [J]. Mod Agric Sci Technol, 2014, 1: 283-285.
- [40] 田小红, 解成喜. 微波辅助提取棉籽油及其脂肪酸组成分析[J]. 食品工业科技, 2012, 37(10): 154-157.
Tian XH, Xie CX. Microwave-assisted extraction of cottonseed oil and analysis of its fatty acid [J]. Food Sci Technol, 2012, 37(10): 154-157.
- [41] Brunton NP, Mason C, Collinsrj MJ, *et al.* Rapid microwave assisted preparation of fatty acid methyl esters for the analysis of fatty acid profiles in food [J]. J Anal Chem, 2015, 70(10): 1218-1224.
- [42] Puvaskiene E, Januskevicius B, Prichodko A, *et al.* Simultaneous derivatization and dispersive liquid-liquid microextraction for fatty acid

- GC determination in water [J]. *Chromatography*, 2009, 69(3): 271–276.
- [43] 刘宁, 张振, 任皓威, 等. 气相色谱法测定牛乳脂肪酸前处理方法的优化[J]. *东北农业大学学报*, 2014, 45(2): 60–67.
Liu N, Zhang Z, Ren HW, *et al.* Optimization of pretreatment method for fatty acids in bovine milk by gas chromatography [J]. *J Northeast Agric Univ*, 2014, 45(2): 60–67.
- [44] 陈臣, 李艳, 牟德华. 核桃仁与发酵核桃乳中脂肪酸 GC 法的甲酯化条件优化及含量测定[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(13): 314–320.
Chen C, Li Y, Mou DH. Methyl esterification conditions optimization and content determination of fatty acids for GC analysis in walnut kernel and fermented walnut milk [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36(13): 314–320.
- [45] 黄菲菲, 韩奕奕, 陈美莲. 乳与乳制品中脂肪酸测定方法的比较研究[J]. *乳业科学与技术*, 2010, 2: 63–65.
Huang FF, Han YY, Chen ML. Comparison of measuring method of fatty acid in milk and dairy products [J]. *J Dairy Sci Technol*, 2010, 2: 63–65.
- [46] 范胜栩, 李斌, 孙君明, 等. 气相色谱方法定量检测大豆 5 种脂肪酸[J]. *中国油料作物学报*, 2015, 37(4): 548–553.
Fan SX, Li B, Sun JM, *et al.* A quantitative gas chromatographic method for determination of soybean seed fatty acid components [J]. *Chin J Oil Crop Sci*, 2015, 37(4): 548–553.
- [47] 张志超, 余新威, 方力, 等. 气相色谱法同时测定海产品中 37 种脂肪酸含量[J]. *中国卫生检验杂志*, 2014, 24(12): 1710–1713.
Zhang ZC, Yu XW, Fang L, *et al.* Simultaneous determination of 37 fatty acids in seafood by gas chromatography [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2014, 24(12): 1710–1713.
- [48] 解永磊, 秦松岩, 王昕彤, 等. 气相色谱测定挥发性脂肪酸的条件优化[J]. *广东农业科学*, 2014, 23: 98–105.
Xie YL, Qin SY, Wang XT, *et al.* Optimization on gas chromatographic method for determination of volatile fatty acid [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2014, 23: 98–105.
- [49] 高宏, 徐慧, 贾涛, 等. 气相色谱法测定氢化油脂加工食品中反式脂肪酸含量[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6(1): 321–327.
Gao H, Xu H, Jia T, *et al.* Determination of the trans-fatty acids in hydrogenated fat processed foods by gas chromatography [J]. *J Food Saf Qual*, 2015, 6(1): 321–327.
- [50] 方国臻, 张超, 郑广奇, 等. 气相色谱-质谱法测定婴幼儿奶粉中多不饱和脂肪酸的方法研究[J]. *中国食品学报*, 2010, 10(1): 219–223.
Fang GZ, Zhang C, Zheng GQ, *et al.* Study on determination method of polyunsaturated fatty acids in milk powder for infant and young children by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2010, 10(1): 219–223.
- [51] 梁海东, 乔有明, 裴海昆, 等. 不同前处理分析植物脂肪酸的气相色谱-质谱法研究[J]. *分析科学学报*, 2015, 31(4): 525–528.
Liang HD, Qiao YP, Pei HK, *et al.* Comparison of different pre-processing methods to identify fatty acids in plants by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *J Anal Sci*, 2015, 31(4): 525–528.
- [52] 陈小燕, 王友升, 李丽萍. 3 种色谱柱对 37 种脂肪酸的分离性能比较及鱼油脂肪酸检测[J]. *食品科学*, 2011, 32(22): 156–162.
Chen XY, Wang YS, Li LP. Comparison of three chromatographic columns in separation and analysis of 37 fatty acids in fish oil [J]. *Food Sci*, 2011, 32(22): 156–162.
- [53] 王建梅, 刘河疆, 马玉娥, 等. 气相色谱-质谱联用法分析罗布麻蜂蜜中脂肪酸[J]. *食品安全质量检测学报*, 2016, 7(2): 779–783.
Wang JM, Liu HJ, Ma YE, *et al.* Determination of fatty acids in *Apocynum honey* by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2016, 7(2): 779–783.
- [54] 李海英, 徐继林, 严小军. 16 种贝类脂肪酸和甾醇组成分析[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2009, 22(1): 48–54.
Li HY, Xu JL, Yan XJ. Analysis of fatty acid and sterol composition in 16 kinds of shellfishes [J]. *J Ningbo Univ (Nat Sci & Edit)*, 2009, 22(1): 48–54.
- [55] Saini RK, Shetty NP, Giridhar P. GC-FID/MS analysis of fatty acids in Indian cultivars of *Moringa oleifera*: potential sources of PUFA [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2014, 91 (6): 1029–1034.

(责任编辑: 白洪健)

作者简介



李小佳, 色谱分析工程师, 主要研究方向为气相色谱在食品检测及食品安全中的应用。

E-mail: lixiaojia2015@126.com



赵志红, 高级工程师, 主要研究方向为食品质量与安全相关的理化检验。

E-mail: zzhxuan@sina.com