DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251114004
引用格式: 刘悦阳, 韩浩蕾, 曹艺琳, 等. 大豆脂质组学应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(4): 1–11.
LIU YY, HAN HL, CAO YL, *et al*. Research progress in applied research on *Glycine max* lipidomics [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(4): 1–11. (in Chinese with English abstract).

大豆脂质组学应用研究进展

刘悦阳[1,2], 韩浩蕾[1,2], 曹艺琳[1,2], 吴思瑶[1,2], 伍明璐[1,2], 贾 琪[1,2], 邱 静[1,2*]

(1. 中国农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 北京 100081;
2. 农业农村部农产品质量安全重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 大豆是全球重要的油料作物, 其脂质组成与营养功能特性备受关注。脂质组学技术作为一种高通量分析方法, 近年来在大豆研究, 尤其在大豆脂质成分的定性和定量分析中发挥着重要作用。本文系统阐述了大豆中主要脂质类别, 包括甘油脂、甘油磷脂、固醇、脂肪酰及鞘脂的组成特征及其在营养健康、食品风味与功能特性中的关键作用, 重点综述了脂质组学的分析流程与适用场景, 并详细归纳了其在大豆品质功能分析、质量变化监测及产地真实性鉴别等方面的具体应用。最后, 对脂质组学在大豆产业应用研究中面临的挑战进行了分析, 提出未来可从脂质生物合成调控机制研究、多组学数据整合, 标准化评价体系建立入手, 以促进大豆脂质资源的高值化开发利用, 推动大豆脂质功能食品开发与产业高质量发展。

关键词: 大豆; 脂质; 脂质组学; 营养功能; 应用研究

Research progress in applied research on *Glycine max* lipidomics

LIU Yue-Yang[1,2], HAN Hao-Lei[1,2], CAO Yi-Lin[1,2], WU Si-Yao[1,2], WU Ming-Lu[1,2], JIA Qi[1,2], QIU Jing[1,2*]

(1. *Institute of Quality Standards and Testing Technology for Agro-Products*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Beijing* 100081, *China*; 2. *Key Laboratory of Agri-food Quality and Safety*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100081, *China*)

ABSTRACT: *Glycine max* is identified as a globally significant oilseed crop, with its lipid composition and nutritional functional properties attracting considerable attention. As a high-throughput analytical method, lipidomics technology plays a vital role in *Glycine max* research, particularly in the qualitative and quantitative analysis of *Glycine max* lipid components. This paper systematically discussed the major lipid categories in *Glycine max*, including the compositional characteristics of glycerolipids, glycerophospholipids, sterols, fatty acyls and sphingolipids, alongside their pivotal roles in nutritional health and functional properties. It focused on reviewing the analytical workflow and applicable scenarios of lipidomics, while detailing its specific applications in *Glycine max* quality-function analysis, quality change monitoring and origin authenticity verification. Finally, analysed the challenges in applying lipidomics to *Glycine max* industry research. Future directions were proposed, including

收稿日期: 2025-11-14
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF0606800); 中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-IQSTAP)
第一作者: 刘悦阳(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品科学。E-mail: liuyueyang611@163.com
***通信作者:** 邱静(1979—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为农产品质量分析与安全评估。E-mail: qiujing@caas.cn

investigating lipid biosynthesis regulatory mechanisms, integrating multi-omics data and establishing standardised evaluation systems. These approaches aimed to enhance the high-value utilisation of *Glycine max* lipid resources, advance the development of functional *Glycine max* lipid foods and promote high-quality industrial development.

KEY WORDS: *Glycine max*; lipids; lipidomics; nutritional function; applied research

0 引 言

大豆是全球重要的油料作物之一，是油脂的主要来源，其籽粒富含多类功能性脂质，如甘油脂、脂肪酸、磷脂、鞘脂、固醇等，这些脂质因独特的功能特性而被广泛应用于食品、医药等领域。随着消费者对健康食品关注的增加，大豆的脂质功能成分现已成为研究热点。

然而，传统的色谱分析等方法难以全面解析大豆脂质的复杂组成及其动态变化，而脂质组学检测此方面展现出了优良的技术应用潜力。随着色谱-质谱法、核磁共振法(nuclear magnetic resonance, NMR)、质谱成像法(mass spectrometry imaging, MSI)等技术的快速发展，脂质组学已从传统的单一脂质分析迈向高通量、高分辨的全局脂质分析阶段。通过整合质谱技术和生物信息学方法，脂质组学技术现已能够系统性地鉴定和分析生物样本中脂质分子的组成、结构及其动态变化，揭示脂质代谢的调控机制等信息。目前脂质组学已广泛应用于大豆相关领域研究，在大豆品质挖掘、品种培育、油脂加工及功能性成分开发中具有巨大潜力。本文重点介绍了大豆中脂质的主要组成和功能，以及脂质组学技术在大豆研究中的应用进展，旨在为大豆脂质的功能食品开发及大豆产业高质量发展提供理论依据。

1 大豆脂质及脂质组学

1.1 脂质组学

1.1.1 脂质组学的概念

脂质，也称脂类物质，是一类不易溶于水但易溶于非极性溶剂的有机分子。脂质分子与我们的生命活动息息相关，它们在物质运输、能量转换、信息传递及代谢调控中发挥着不可或缺的作用[1]。随着人们对脂质关注的增加，脂质组学作为代谢组学的一个分支被独立出来深入研究[2−3]。2003 年 7 月，HAN 等[4]首次提出了脂质组学的概念，致力于从系统层面对脂质进行研究，旨在揭示脂质与其他生物分子间的相互作用和调控机制。“脂质代谢途径研究计划”联合会将脂质分为 8 类，分别是：脂肪酰类(fatty acyls, FAs)、甘油脂类(glycerolipids, GLs)、甘油磷脂类(glycerophospholipids, GPs)、鞘脂类(sphingolipids, SPs)、固醇脂类(sterols, STs)、异戊烯醇脂类(prenol lipids, PRs)、糖脂类(saccharolipids, SLs)和聚酮类化合物(polyketides, PKs)[5]。

在具体的研究与实践中，脂质组学主要通过与分析化学、生物信息学等技术手段融合的方式，实现样本中脂质分子的定性定量分析[6]，从而进一步探究脂质与生物活动、生化过程的关联。在食品科学领域，脂质组学常被应用于营养功能评估、质量检测、产地追溯等方面[7]，大豆的相关研究主要也聚焦于此。脂质组学的基本流程如图 1 所示，主要包括脂质提取、分析检测和数据处理 3 部分。

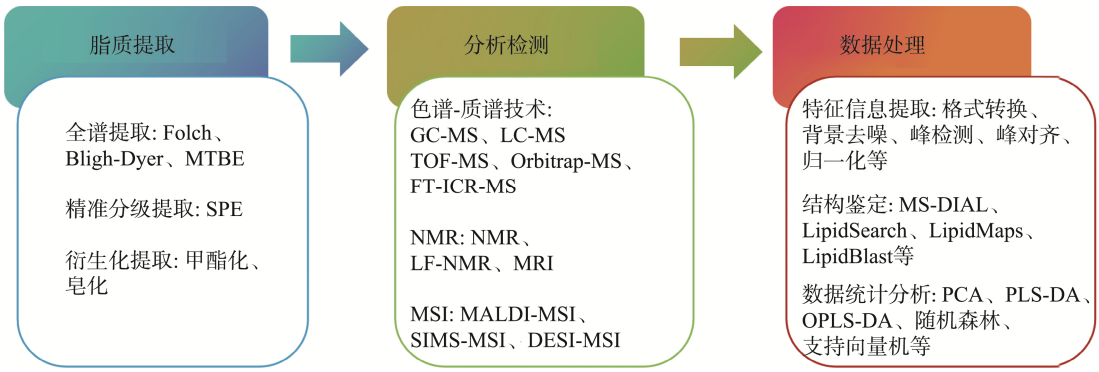
1.1.2 脂质组学的提取手段

脂质提取是脂质组学分析的首要前提，尤其是对于直接进样的分析方法，其结果的准确性在很大程度上取决于提取效率及目标脂质的提取完整性。大豆组分复杂，甘油脂占比高达 90%以上，而功能性磷脂、鞘脂等含量较低[8]，这种极高的丰度差在质谱分析中易产生严重的基质效应，导致低丰度脂质的信号被掩蔽[9]。因此，在具体实验时，需要根据不同的研究目的选择合适的提取方式。

在常规的全谱脂质分析中，多采用基于液液萃取法(liquid-liquid extraction, LLE)原理的全谱提取技术，常用的有 Folch[10]法和 Bligh-Dyer[11]法，此类方法主要利用氯仿/甲醇体系提取总脂，通过分配系数的差异将脂质转移至有机相，从而最大限度地回收大豆中的极性与非极性脂质。对于一些自动化或是高通量的筛查需求，常用 MTBE 法进行脂质提取，这主要是利用 MTBE 的低密度特性，使含有脂质的有机相在离心后位于上层，从而有效规避穿过蛋白质界面层时可能产生的交叉污染[12]。相较于氯仿体系，该方法更易于吸取有机相，极大地简化了高通量操作流程，可用于大豆种质资源的规模化脂质谱筛查工作。不过，MTBE 法的缺点是有机相中水分含量较高，与其他提取法相比，去除溶剂需要更长时间。

在实现全谱提取后，为进一步分析其复杂组成，常需采用 SPE 分级技术以减少基质干扰。其原理是利用不同功能团吸附剂(如 NH_2 柱或硅胶柱)与脂质极性基团间的特异性相互作用，将总脂质划分为中性脂、糖脂和磷脂等类别[13]。在检测微量低丰度脂质时，SPE 预处理能有效降低背景噪声，从而显著提升低丰度脂质分子的检出限与定量精度。

对于特定类别或理化性质特殊的脂质分子，则需结合化学衍生化提取法进行针对性提取。以大豆甾醇为例，由于其常以甾醇酯等结合态形式存在且丰度较低，故需通过碱皂化反应去除甘油脂干扰并释放游离态甾醇[14]，再进行衍生化处理以提升其在气相色谱系统中的分离效率。同样，由于脂肪酸本身的挥发性较差，在上机前需要通过酸/碱催化法先将其转化成脂肪酸甲酯(fatty acid methyl esters, FAMEs)[15]，才能使用 GC-MS 进行准确定量。



注：甲基叔丁基醚(methyl tertiary butyl ether, MTBE)；固相萃取(solid-phase extraction, SPE)；气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)；液相色谱-质谱技术(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS)；飞行时间质谱法(time of flight mass spectrometry, TOF-MS)；轨道阱质谱法(orbitrap-mass spectrometry, Orbitrap-MS)；傅里叶变换离子回旋共振质谱法(Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry, FT-ICR-MS)；低场核磁共振技术(low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)；核磁共振成像技术(magnetic resonance imaging, MRI)；基质辅助激光解析电离质谱成像技术(matrix-assisted laser desorption-ionization mass spectrometry imaging, MALDI-MSI)；二次离子质谱成像技术(secondary ion mass spectrometry imaging, SIMS-MSI)；解吸电喷雾电离质谱成像技术(desorption electrospray ionization mass spectrometry imaging, DESI-MSI)；质谱-数据独立分析(mass spectrometry-data independent analysis, MS-DIAL)；主成分分析(principal component analysis, PCA)；偏最小二乘判别分析(partial least squares discrimination analysis, PLS-DA)；正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discrimination analysis, OPLS-DA)。

图 1　脂质组学的分析流程

Fig.1　Analysis process of lipidomics

1.1.3　脂质组学的分析手段

在具体研究中，脂质组学的分析手段主要以色谱-质谱技术、NMR 和质谱成像技术为主。

色谱-质谱技术是通过色谱系统对复杂脂质进行分离，再利用质谱进行检测与鉴定的技术。根据色谱原理不同，主要分为 GC-MS 和 LC-MS。GC-MS 是通过利用物质固有沸点、极性和吸附性质的差异完成混合组分分离和分析的技术，其对极性大、挥发性低或热不稳定性的代谢物检测存在局限。这主要是其在离子化阶段常采用电子轰击源，较高的电离能量易导致此类不稳定化合物过度碎裂，致使分子离子峰信号弱或缺失，从而影响定性定量的精度[16]，因此，该方法更适用于挥发性代谢物，或经衍生化处理后能够气化的初级代谢物(如脂肪酸、甾醇等低分子量脂质)的分析[17]。LC-MS 是分析不稳定、难挥发物质的常用技术，其分离是基于液相色谱系统中待测物在固定相与流动相间分配系数的差异而实现的，通过解析质谱数据，可得到样品的分子量与结构信息。由于该技术不受样品挥发性的限制，它被广泛应用于极性代谢物(如甘油酯、磷脂等)的分析[18]。

根据研究目的，基于色谱-质谱法的脂质组学可分为靶向脂质组学和非靶向脂质组学两种。靶向脂质组学侧重于对已知或预设的脂质分子进行精确定量与验证，通常采用 GC-MS 或 LC-MS 与三重四极杆等组合，它依赖于标准品或已知脂质数据库，通过高特异性的质谱扫描模式，比如多重反应监测(multiple reaction monitoring, MRM)或选择离子监测(selected ion monitoring, SIM)实现高灵敏度的定量分析。非靶向脂质组学侧重于对脂质组进行全局性分析，即不预设目标地对所有可检测脂质进行系统筛查与相对定量，其目的在于探索新的脂质种类、鉴定差异表达的脂质并识别潜在的生物标志物。由于非靶向脂质组学分析在测定时产生了大量代谢特征，所以在非靶向脂质研究中，应用较多的是高分辨质谱技术(high resolution mass spectrometry, HRMS)[19]。根据现行标准，通常将分辨率在 10^4 以上，质量精确度小于 5×10^{-6} 的质谱称为 HRMS[20]。该技术具有多重优势：(1)其在筛查时不过分依赖标准样品，主要根据其离子化方式、二级碎片信息等数据进行准确的定性和定量[21]；(2)其具备极宽的扫描动态范围，能够在高含量分析物存在下仍保持对痕量组分的高灵敏度检测；(3)其具有较高的质量分辨能力，可清晰区分质量数接近的分子。基于质量分析器结构与检测原理的差异，目前常用的 HRMS 主要有：TOF-MS、Orbitrap-MS 及 FT-ICR-MS 等技术[22]，其中，TOF-MS 与 Orbitrap-MS 凭借其高灵敏度、高分辨率及稳定的定量能力，在食品脂质筛查中应用广泛。

NMR 是一种基于原子核磁特性的波谱技术，通过特定脉冲序列获取氢质子在射频场中的弛豫时间，从而量化该状态下氢质子的迁移率强度，以反映样品中水油含量的变化[23]。由于 NMR 技术为非接触式检测，无需破坏样品，所以避免了样品残留在仪器系统中而导致的灵敏度或稳定性下降等问题，能够有效保证定量的重复性和准确性。在大豆研究中，NMR 主要用于对大豆油脂含量进行定量分析[24]、对油脂品质进行质量监测[25−26]和测定大豆油来源[27]等方面，如张宇等[28]利用 LF-NMR 与 MRI，结合机器学习建立了大豆含油率判别模型，实现了批量无损检测大豆含油率。

MSI 是一种基于质谱分析的高分辨成像技术。该技术将质谱离子扫描与专业图像处理软件相结合，对生物组织

切片进行分析并生成化合物的二维离子密度图, 从而明晰切片相对丰度及空间分布等信息[29–30], 具有分辨率高、灵敏度强、分析速度快等优点。MSI 根据其原理及应用范围的不同主要分为 3 类: MALDI-MSI、SIMS-MSI 和 DESI-MSI[31]。其中, MALDI-MSI 是应用最为广泛的一类, 因为它可以产生完整的分子离子, 且质量检测范围广, 低分子代谢物(脂质、酚类化合物)和高分子量化合物(聚糖、蛋白等)均可被检测[32]。MSI 现已成为可视化脂质动态空间分布的强有力工具, 然而, 受限于较高的成本与庞大的数据量, 其应用范围目前不及前述技术广泛[33]。随着该技术的持续发展与优化, 预计其应用范围将不断扩大。

综上所述, 脂质组学常用的 3 种分析手段侧重不同, 适用于的研究场景也不同。色谱-质谱法以其高灵敏度和广泛的脂质覆盖能力, 成为脂质深度解析的首选工具, 但其对样品前处理要求较高, 且在复杂基质中易受基质效应干扰。NMR 具备无损、重现性好等优点, 适合用于大豆含油率、品质变化等宏观指标的快速监测, 但其灵敏度有限, 难以检测低丰度脂质。质谱成像技术则凭借其独特的空间分辨能力, 能直观展示脂质在大豆组织中的分布差异, 为转基因判别、产地溯源等提供 PCA 可视化依据, 但该技术成本高昂、数据处理复杂, 且难以实现绝对定量。因此, 在实际应用中, 研究者应根据具体的研究目标、样品特性及资源条件, 合理选择或结合多种分析技术, 以充分发挥脂质组学在大豆研究中的技术优势。脂质组学中常用的分析手段对比如表 1 所示。

1.1.4 脂质组学的数据处理

脂质组学的定性定量分析会产生大量质谱数据, 因此, 需要一些专业工具来解析这些复杂数据, 将其转化为具有准确的脂质成分信息, 其数据解析过程通常包括特征信息提取、分子结构鉴定及数据统计分析 3 个阶段。

在特征信息提取阶段, 首先, 需要将质谱采集的原始数进行格式转换(如转换为.mzXML 或.abf 格式), 然后进行背景去噪、峰检测、峰对齐与归一化处理[34]。由于大豆基质复杂, 在这一过程中需特别注意对同位素峰的识别和加合物离子的排除, 以确保代谢物特征提取的完整性。

在分子结构鉴定阶段, 脂质分子的定性分析主要依赖于二级质谱(MS/MS)碎片信息与数据库的匹配。目前, 常用的脂质定性工具有 MS-DIAL、LipidSearch 等软件以及 LipidMaps[35–36]等开放式数据库, 通过这些工具对精确分子量、特征碎片及保留时间等信息进行比对, 即可实现脂质分子的精准鉴定。

在数据统计分析阶段, 通常引入数学模型对脂质数据进行深度挖掘, 以揭示样本间的规律。初步分析时, 研究者常用 PCA 方法来观察样本的整体分布与组间相似性。在此基础上, 可采用 PLS-DA、OPLS-DA 等有监督模型筛选组间差异, 探寻潜在的生物标志物[37]。若有样品分类或是溯源需求, 可以结合随机森林、支持向量机等机器学习模型, 进一步提升判别结果的可靠性[38]。

1.2 大豆脂质组成及功能

大豆脂质是大豆籽粒中重要的营养成分, 主要由 90%以上的 GL、1%~3%的 GP、0.1%~0.8%的 ST、0.1%~0.7%的 FA 和 0.02%~0.07%的 SP 组成[39], 如图 2 所示。

甘油脂类在大豆的所有脂质中占比最高, 有 90%以上, 其中甘油三酯(triacylglycerol, TAG)的含量约占甘油脂总量的 95%~98%[40–41], 大豆中的甘油脂类以 TAG 54:6、54:5 和 54:4 为主[42–43], 作为油料作物, 大豆被人熟知的特性便是用来榨油, TAG 就是大豆油的主要组成部分, 其组成与

表 1 脂质组学中常用的分析手段

Table 1 Common analytical approaches in lipidomics

序号	具体分析方法	原理与特点	优点	缺点	所属类别
1	GC-MS	基于沸点、极性差异分离, 电子轰击源电离	适用于挥发性或可衍生化脂质(如脂肪酸、甾醇), 标准化程度高, 定量准确	对热不稳定、难挥发、大分子脂质不适用, 衍生化步骤烦琐	色谱-质谱法
2	LC-MS	基于分配系数差异分离, 电喷雾等软电离技术	不受样品挥发性的限制, 适用于极性、大分子及不稳定脂质(如甘油脂、磷脂), 应用范围最广	对样品预处理要求较高, 易受到基质效应的影响	色谱-质谱法
3	靶向脂质组学(基于 LC/GC-MS)	预设目标, 采用 MRM/SIM 等高特异性扫描模式	灵敏度与特异性极高, 定量精准, 重复性好, 适合验证性研究	仅针对已知目标, 无法发现新脂质, 依赖标准品	色谱-质谱法
4	非靶向脂质组学(基于 LC/GC-HRMS)	无预设目标, 采用 HRMS 进行全局筛查	能全面探索脂质谱, 发现新脂质或差异标志物, 不过分依赖标准品	数据处理复杂, 多为半定量, 假阳性率高	色谱-质谱法
5	NMR、LF-NMR	基于原子核磁特性, 测量弛豫时间等参数	无损检测、重现性好且无需复杂前处理	灵敏度较低, 难以实现对低丰度脂质分子的精准识别	NMR
6	MALDI-MSI	将质谱离子扫描与图像处理结合, 生成化合物二维分布图	直观展现出空间特性、能够可视化脂质在大豆组织中的分布	设备运行成本高昂, 数据处理压力大, 难以进行绝对定量	MSI

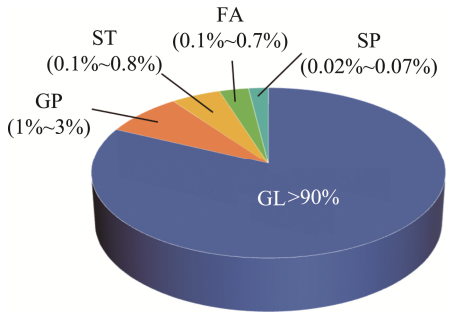


图 2　大豆脂质组成饼图

Fig.2　Composition pie chart of *Glycine max* lipid

含量差异影响着大豆油脂的流动性与结晶过程[44–45]。此外，TAG 还可为人体提供能量。除了 TAG 外，大豆中甘油二酯(diacylglycerol，DAG)的功能活性近年得到了也较大关注，钟碧莹[46]基于中医体质学研究了大豆 DAG 油对糖尿病前期患者的影响，发现膳食食用大豆 DAG 油有助于改善糖尿病患者的痰湿症状，指出了其在糖尿病前期的早期干预中的应用潜力。甘油磷脂是重要的极性脂质，约占大豆总脂质的 1%~3%，大豆中的甘油磷脂主要由磷脂酰胆碱(phosphatidylcholine，PC，35%~40%)、磷脂酰乙醇胺(phosphatidylethanolamine，PE，20%~25%)、磷脂酰肌醇(phosphatidylinositol，PI，15%~20%)和磷脂酰丝氨酸(phosphatidylserine，PS，5%~10%)组成[47–48]。研究表明，大豆磷脂的规律摄入与认知功能维持呈正相关[49]，尤其对阿尔茨海默病的预防效果显著[50]，此外还具有降血脂、抑制肿瘤生长[51]和防止胆结石形成等功能[52]。在医药保健领域，刘丽影等[53]利用大豆磷脂的免疫增强功能[54]，研制出了一款以卵磷脂为核心原料的保健口服液，旨在对冠心病、脑动脉硬化及失眠等慢性病起到辅助干预作用在食品工业中，PC 凭借其优异的乳化性和生物相容性，常作为稳定剂应用于巧克力或冰淇淋等产品中，以改善质地并延长货架期。固醇又称甾醇，大豆籽粒中的甾醇含量约为 0.1%~0.8%，主要由 β-谷甾醇(46.9%)、豆甾醇(27.6%)、菜油甾醇(25.5%)组成[55]。值得注意的是，人体自身无法合成上述植物甾醇，如 β-植物甾醇只能通过饮食的方式摄入[56]。研究表明，大豆甾醇具有降低胆固醇、抗氧化、抗糖尿病、抗动脉粥样硬化等功能[57–58]。早在 2010 年，我国卫生健康委员会就已批准植物甾醇为新资源食品[59]，建议食用量为不超过 2.4 g/d，允许以游离态或者甾醇酯的形式加入食用油、人造奶油中。除了在食品中作为功能性成分，大豆甾醇凭借其独特的物化性质，在化妆品领域也展现出广泛的应用价值。由于其具有良好的乳化与稳定能力，能够有效调和油相与水相成分，因此常被用作面霜、乳液等产品的乳化剂和表面活性剂，提升产品质地均匀性与稳定性[60–61]。此外，将其添加于洗发护发产品中，可增强发丝韧性并减少静电现象[62]。

脂肪酰是一类由乙酰辅酶 A 引物与可能含有环状官能团或杂原子的丙二酰-CoA(或甲基丙二酰-CoA)基团通过链的延长而得到的一类分子。脂肪酸是它的核心组分，也是构成复杂脂质的基本结构单元，其碳链结构(如链长、不饱和度)直接决定了所衍生脂质的理化与功能基础。根据碳链中的双键数量，脂肪酸可分为 3 类：饱和脂肪酸(saturated fatty acid，SFA)、单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acid，MUFA)和多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid，PUFA)。在大豆中，SFA 主要有棕榈酸(16:0，约 11%)和硬脂酸(18:0，约 4%)，MUFA 主要是油酸(18:1，约 23%)，PUFA 主要有亚油酸(18:2，约 54%)和亚麻酸(18:3，约 8%)[63]。脂肪酸组成与大豆功能特性的关联密切，就实际应用而言，不同脂肪酸组成的大豆用途不同。不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acid，UFA)具有防治高血压、降低胆固醇、降低心脑血管疾病发病率等功效[64–65]，而且能使油脂保持良好的流动性，故富含 UFA 的大豆主要被加工为优质食用油；SFA 含量较高的大豆凭借其优异的氧化稳定性，常被应用于润滑油、油墨及生物柴油等工业产品的制备[66]。

鞘脂是生物膜结构的重要组成部分[67]，食物中的鞘脂及其代谢产物能够在小肠和结肠的所有部位被消化，同时促进人体自身神经酰胺的合成[68]，因此它被视为“新型膳食营养成分”。大豆是植物鞘脂的重要膳食来源，其中大豆葡萄糖神经酰胺(glucosylceramide，GlcCer)是主要的鞘脂类型，成熟大豆种子(以干重计)中的大豆 GlcCer 含量约为 110~472 nmol/g[69]。研究表明，植物鞘脂具有抑制结肠癌[70]、降低低密度脂蛋白胆固醇以及保护免受细菌毒素感染[71–72]等功能。例如，它能够在抑制小鼠结肠癌变的同时，将小鼠的血浆胆固醇降低 30%[70]，另有研究证明其可以降低阿尔茨海默病小鼠的淀粉样 β 蛋白水平并改善认知[71]。目前，大豆来源的鞘脂多被用于营养补充剂、婴幼儿食品、烘焙食品等保健食品中。

2　脂质组学在大豆食品研究中的应用

作为大豆及其制品品质评价的重要指标，脂质成分不仅直接影响食品的营养功能特性，更是决定其加工适用性和风味特征的关键。近年来，脂质组学技术在大豆食品科学研究中得到了广泛应用，其应用方向主要有 3 个方面，分别是：品质功能分析、质量特征变化和产地真实性鉴别等研究，相关应用研究情况总结如表 2 所示。

2.1　脂质组学在大豆品质功能研究中的应用

在大豆油脂品质研究中，脂质组学已成为连接基因型与营养表型的关键桥梁，其在解析与改良大豆油脂品质中发挥着强有力的作用。例如，QI 等[73]使用 LC-MS 和 GC-MS 分别对各阶段的野生与 *FA9* 基因敲除大豆种子进行非靶向脂质组学分析，鉴定出了 854 种脂质，分析发现

表 2 脂质组学在大豆食品科学研究中的应用

Table 2 Application of lipidomics in *Glycine max* food science research

序号	样品	分析技术	研究结果	应用方向	参考文献
1	野生大豆种子与 *FA9* 基因敲除大豆种子	LC-MS、GC-MS	*FA9* 基因是调控大豆种子油脂积累与脂质代谢稳态的核心枢纽	品质功能分析研究	[73]
2	野生型与基因编辑后的大豆	电喷雾电离串联质谱(electrospray ionization tandem mass spectrometry, ESI-MS/MS)	敲除 *GmDGATs* 与 *GmPDATs* 基因可使油脂合成途径由 TAG 转向 DAG 与 PC，便于精准改良大豆油脂品质	品质功能分析研究	[74]
3	脱脂大豆产油酵母	GC-MS	产油酵母通过合成 TAG 和 DAG 释放 C14~C18 脂肪酸，正是这些长链脂肪酸酯增强了酱油的风味	品质功能分析研究	[75]
4	普通大豆	液相色谱-四极杆-静电场轨道阱高分辨质谱法(liquid chromatography-quadrupole-exactive orbitrap mass spectrometry, LC-Q-Exactive Orbitrap-MS)	大豆脂质表现出较好的抗血栓和抗炎活性，大豆的高 GL 含量可能是它抗炎能力强的关键	品质功能分析研究	[76]
5	自然老化大豆种子	LC-MS	老化过程中脂质的变化主要表现为游离脂肪酸(free fatty acids, FFA)含量显著上升, TAG 和 GP 含量下降, 老化过程中与脂质代谢相关的关键调控因子为 YABBY 和 IWS1	质量特征变化研究	[77]
6	“走油”的美国大豆	GC	大豆在贮藏过程中发生脂质氧化酸败的主要表现是 PUFA、甾醇以及具有强抗氧化活性的 γ-生育酚和 δ-生育酚含量显著降低	质量特征变化研究	[78]
7	煎炸大豆油	LF-NMR	煎炸过程中产生的极性组分是导致油样品质劣变的主要原因	质量特征变化研究	[79]
8	热处理的大豆油	超高效液相色谱-四极杆线性离子阱串联质谱法(ultra performance liquid chromatography-quadrupole linear ion trap tandem mass spectrometry, UPLC-QTRAP-MS/MS)	热加工导致大豆油中 TAG 氧化降解，生成了氧化甘油三酯(oxidized triacylglycerol, oxTAG)、DAG、FFA 以及短链 TAG。TAG 44:4 、TAG 44:2、TAG 42:2、oxTAG 49:6;10、oxTAG 47:6;10，这些脂质标记物可用于监测大豆油的热加工程度	质量特征变化研究	[80]
9	5 个产区的大豆	GC-MS	黑龙江产区的豆甾醇、菜籽甾醇、菠菜甾醇含量较高，可作为这产区的脂质特征标志物	产地真实性鉴别研究	[81]
10	大豆油	基质辅助激光解析电离质谱法(matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry, MALDI-MS)	可通过大豆油中的 TAG 对阿根廷、美国、巴西和加拿大大豆进行产地鉴定	产地真实性鉴别研究	[82]
11	黑龙江主栽品种的大豆种子	GC	构建了黑龙江大豆品种脂肪酸指纹图谱和黑龙江省主栽大豆品种码	产地真实性鉴别研究	[83]
12	黑龙江临近区域大豆	GC	将大豆中的脂肪酸数据与矿物元素数据结合，可以有效区分临近区域样本	产地真实性鉴别研究	[84]
13	黑龙江省内 4 个产地大豆	GC	棕榈酸、十七烷酸、硬脂酸、顺-13-十八烯酸和花生四烯酸 5 种脂肪酸可作为黑龙江省北安、哈尔滨、建三江和齐齐哈尔 4 个大豆产区溯源的特征指标	产地真实性鉴别研究	[85]
14	国产大豆和掺假大豆	GC-MS	利用随机森林法，仅用 20 棵树就实现了国产大豆与掺假大豆的有效分离	产地真实性鉴别研究	[86]

表 2(续)

序号	样品	分析技术	研究结果	应用方向	参考文献
15	转基因大豆和非转基因大豆	MALDI-MSI	可视化了脂质在大豆种子中的异质分布, 可通过图像快速判别转基因和非转基因大豆	产地真实性鉴别研究	[87]
16	大豆油及掺假大豆油	GC-MS	不同掺杂比例大豆油和山茶油的脂肪酸、角鲨烯与甾醇含量, 绘制了脂质指纹图谱与统计分析方法结合, 成功实现了掺假油(掺杂比例不低于 5%)的鉴定	产地真实性鉴别研究	[88]
17	食用油和地沟油	MALDI-MS	建立食用油初步 MALDI-MS 光谱数据库, 可实现食用油和地沟油的快速筛选	产地真实性鉴别研究	[89]

敲除体中 TAG 含量显著下降, 而其前体 DAG 含量呈明显积累, 从代谢物水平层面证明了 *FA9* 是调控大豆种子油脂积累与脂质代谢稳态的核心枢纽。此外, 该技术在指导功能性油脂成分的定向合成中也展现出巨大潜力。如 ZHAO 等[74]利用 ESI-MS/MS 全面解析了成簇规律间隔短回文重复序列及其相关蛋白 9 (clustered regularly interspaced short palindromic repeats-associated protein 9, CRISPR-Cas9)编辑 *GmDGATs* 与 *GmPDATs* 基因后大豆种子中 DAG、PC 及 TAG 等关键脂质分子的动态变化, 发现敲除 *GmDGATs* 与 *GmPDATs* 基因可显著重塑大豆脂质谱, 使油脂合成途径由 TAG 转向 DAG 与 PC 的积累, 成功创制出“高 DAG-高 PC”大豆新种质。该研究不仅在系统水平上验证了精准改良大豆油脂品质的可行性, 也彰显了脂质组学在功能性油脂设计中的关键作用。

除了在营养品质改良中发挥作用, 脂质组学技术也为风味探寻解析提供了有力手段。大豆制品的风味优劣很大程度上取决于脂质在加工过程中的动态变化, 以酱油为例, 酱油是以大豆(或脱脂大豆)和小麦为主要原料, 通过多种微生物协同发酵制成的传统调味品, 其中大豆脂质氧化生成的醛酮类风味物质是其“酱香”的关键。全脂大豆因其脂质含量高, 脂质衍生风味物质多, 风味较好, 但容易氧化酸败, 贮藏期短; 脱脂大豆因其脂质含量少, 生成的酱油保质期长但风味不足。为了探究脂质与风味的关联, 研究人员利用脂质组学技术对酱油发酵的全过程进行了监测。ZHAO 等[75]利用 GC-MS 对脱脂大豆产油酵母的脂质代谢进行了研究, 发现产油酵母合成的 C14~C18 脂肪酸酯是酱油风味增强的关键, 通过脂质组学调控酵母代谢, 可使风味物质产量提升 37%。研究结果为调节发酵大豆产品中脂质衍生的香气特征提供了理论基础, 解决了贮藏期短和风味不足的问题。

大豆富含多类功能性脂质, 脂质组学技术通过精准测定脂质分子含量, 可实现其健康功效的挖掘评估。LI 等[76]使用 LC-Q-Exactive Orbitrap-MS 对大豆、蛋黄和虾头的脂质进行了测定, 并基于斑马鱼模型评估了其抗血栓、抗氧化和抗炎活性, 发现添加大豆脂质组的斑马鱼表现出明显的抗血栓和抗炎活性, 且大豆的 GP 含量与抗血栓活性呈正相关, GL 含量与抗炎活性呈正相关, 大豆的高 GL 含量是它抗炎能力强的主要原因。

2.2　脂质组学在大豆质量特征变化研究中的应用

大豆富含脂质, 但在加工与贮藏过程中易发生脂质过氧化反应, 这些变化直接影响其品质特性。近年来, 脂质组学技术被广泛用于解析大豆及其制品贮藏期间脂质代谢的变化。李春羽[77]采用高效液相色谱-质谱技术, 对自然老化大豆种子的脂质成分进行分析, 发现脂质在老化过程中的变化主要为: FFA 含量显著上升, TAG 和 GP 含量下降, 结合差异脂质和转录组数据, 并筛选出了与大豆老化过程中脂质代谢相关的关键调控因子 YABBY 和 IWS1, 为未来的品种改良等研究提供了理论依据。卢方圆[78]利用气相色谱法监测了美国大豆“走油”过程中脂质的变化, 发现该过程中, PUFA、甾醇以及具有强抗氧化活性的 γ-生育酚和 δ-生育酚含量显著降低, 这些脂质分子的变化是指征脂质氧化酸败并直接导致品质劣变的关键内在原因。

质量特征变化中, 除了室温状态的“老化”或是“走油”, 高温“热处理”时的脂质动态变化更为复杂。高温热处理一般发生在大豆油的煎炸环节, 为了探究大豆油在热加工条件下的变化, 王永巍等[79]使用 LF-NMR 对煎炸大豆油进行检测, 发现随着煎炸时间延长, 极性组分(PC)含量增加, 油样峰面积(S21)不均匀性增大, 从而使内部分子间的磁场不均匀, 弛豫时间(T2w)变小, 而煎炸过程中产生的 PC 则是导致油样品质劣变的主要原因。HU 等[80]利用拟靶向氧化脂质组学的 UPLC-QTRAP-MS/MS 揭示了大豆油在热加工过程中脂质及其非挥发性衍生物的动态变化, 发现热加工导致大豆油中 TAG 氧化降解, 总含量减少了 31.3%, 生成了 oxTAG、DAG、FFA 以及短链 TAG。通过统计分析, 他们筛选出 5 种与大豆油热加工时间线性相关的非挥发性潜在标志物: TAG 44:4、TAG 44:2、TAG 42:2、oxTAG 49:6;10、oxTAG 47:6;10, 这些标志物的含量随热加工时间延长而线性增加, 可用于监测大豆油的热加工程度。以上通过脂质组学的方法揭示了大豆油在热加工过程中的脂质变化规律及品质劣变原因, 并筛选出可用于监测热加工程度的潜在标志物, 为大豆油的科学合理使用提供了重要依据。

2.3 脂质组学在大豆产地真实性鉴别中的应用

作为植物源性农产品，大豆受地理环境的影响较大，地域来源不同，大豆中的脂质成分含量也有所不同。由于不同大豆的脂质组成存在差异，可以利用脂质组学技术对不同产区、不同品种的大豆进行分析研究，利用脂质分子层面的组成差异为产地溯源和真实性鉴别提供重要依据。王东晖等[81]采用 GC-MS 比较了我国 5 个产区大豆的 11 种甾醇含量，发现不同产区大豆的甾醇含量差异显著，其中黑龙江产区的豆甾醇、菜籽甾醇、菠菜甾醇含量较高，可作为该产区的脂质特征标志物。除了脂质特征标志物外，也可以通过构建不同大豆指纹谱的方式对其进行区分。ZENG 等[82]采用 MALDI-MS 分析大豆油中的 TAG 并建立了光谱鉴定模型，成功区分了阿根廷、美国、巴西和加拿大四国大豆，展示了 MALDI-MS 在快速构建脂质轮廓方面的独特优势。刘雪娇[83]利用气相色谱技术，构建了黑龙江大豆品种脂肪酸指纹谱及主栽品种码，实现了大豆种子的身份识别和管理，将溯源从产区层面深入到品种层面，为大豆的品种保护提供了新思路。针对临近产区环境相似、难以区分的问题，王靖会等[84]采用多元数据融合策略，结合脂肪酸与矿物元素含量建立了支持向量机模型，对黑龙江临近区域大豆进行了有效区分，准确率达 95.38%，为地理标志产品保护提供了新的方案。卢锡纯[85]则侧重于特征指标筛选，确定了棕榈酸、十七烷酸、硬脂酸、顺-13-十八烯酸和花生四烯酸 5 种脂肪酸作为黑龙江省北安、哈尔滨、建三江和齐齐哈尔 4 个大豆产区鉴定的特征脂质指标，反映了脂质特征指标在邻近地区溯源问题上的高灵敏度。

除了产地鉴别，大豆及其制品的真实性也是备受关注的问题。如何区分转基因大豆和非转基因大豆、地沟油或是其他食用油和大豆油是大豆食品安全的重要课题。脂质组学技术为这些问题提供了解决办法。张勇等[86]将 GC-MS 和机器学习相结合，根据测得的脂肪酸组成及含量，利用随机森林法对国产大豆与掺假大豆进行分类，仅用 20 棵树就实现了两类大豆的有效分离。REN 等[87]对转基因大豆 S4003.14 和非转基因大豆 JACK 的种子组织切片表面的脂质进行了正离子 MALDI-MSI 检测，得到了不同的质谱成像图片，直观展现了脂质的异质分布差异，通过图像快速鉴别了转基因和非转基因大豆。SHI 等[88]利用 GC-MS 分别测定了大豆油和山茶油的脂肪酸、甾醇含量并绘制了纯植物油的脂肪酸、甾醇指纹图谱，将指纹图谱与化学计量法结合，实现了不同掺假比例大豆油与山茶油(掺杂比例大于等于 5%)的鉴定。NG 等[89]开发了一种改进的 MALDI-MS 方法，获得了高质量、高重现性的食用油 MALDI-MS 光谱，并建立了大豆油等食用油光谱数据库。该法仅需将测试油样的 MALDI-MS 光谱和主成分分析结果与数据库中的结果进行比较，即可实现地沟油和食用油的鉴别。

3 结束语

作为重要的油料作物，大豆的核心价值之一在于其丰富的功能性脂质。随着脂质组学技术的快速发展，本文对大豆脂质的研究已经从宏观方向转向分子层面。本文系统阐述了大豆脂质组成特征、脂质组学技术的分析流程及其在大豆研究中的应用进展。脂质组学技术的应用极大地拓展了大豆研究的深度和广度，通过利用 LC-MS、GC-MS、MALDI-MSI 等技术，实现了对大豆脂质组成的高通量解析，为大豆的功能风味分析、质量监控和产地真实性鉴别提供了有力支持。这些研究不仅深化了本文对大豆脂质组成的认识，也为大豆品质改良、功能食品开发及产业高值化发展奠定了理论基础。

尽管脂质组学在科研领域取得了显著进展，但在大豆产业的实际落地中仍面临严峻挑战。(1)检测成本与专业性门槛较高，质谱仪器价格昂贵，且数据解析专业性较强，这使得中小型大豆加工企业难以承担；(2)检测通量与时效性不足，目前现有的方法流程复杂分析周期较长，难以应对原料收购、现场检测场景下的批量快速筛查需求；(3)脂质评价标准不规范，目前缺乏从脂质提取、仪器方法到检测报告的行业统一标准，导致各地研究数据难以比对参考，在一定程度上阻碍了脂质组学技术在大豆品质监测中的规范化应用。

随着人们对食品营养与健康需求的不断提升，大豆脂质研究将在未来迎来更加广阔的发展前景。未来研究的重点可从以下 3 个方面展开：(1)深入解析大豆脂质生物合成的分子调控网络，系统阐明脂质代谢通路及其调控机制，为品质改良提供理论依据；(2)整合转录组、蛋白组等多组学数据，全面解析脂质与其他成分的互作机制，为精准膳食指导提供科学依据；(3)建立完善统一的脂质评价标准，推动脂质组学技术在大豆品质监测、加工工艺优化及健康效应评估中的规范化应用。同时，针对产业端的普及需求，应着手研发简便的判别工具并逐步建立大豆脂质图谱数据库。相信随着多学科交叉融合与技术创新的推进，脂质组学将为实现大豆全产业链的价值提升提供强有力的技术支撑，为全球营养食品发展做出重要贡献。

参考文献

[1] SONG Y, CAI C, SONG Y, *et al*. A comprehensive review of lipidomics and its application to assess food obtained from farm animals [J]. Food Science of Animal Resources, 2022, 42(1): 1–17.

[2] WU Z, BAGAROLO GI, THORÖE-BOVELETH S, *et al*. “Lipidomics”: Mass spectrometric and chemometric analyses of lipids [J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2020, 159: 294–307.

[3] LI-BEISSON Y, NAKAMURA Y, HARWOOD J. Lipids: From chemical structures, biosynthesis, and analyses to industrial applications [J]. Sub-Cellular Biochemistry, 2016, 86: 1–18

[4] HAN X, GROSS RW. Global analyses of cellular lipidomes directly from

crude extracts of biological samples by ESI mass spectrometry: A bridge to lipidomics [J]. Journal of Lipid Research, 2003, 44(6): 1071–1079.

[5] ROLIM AEH, HENRIQUE-ARAÚJO R, FERRAZ EG, *et al*. Lipidomics in the study of lipid metabolism: Current perspectives in the omic sciences [J]. Gene, 2015, 554(2): 131–139.

[6] SUN T, WANG X, CONG P, *et al*. Mass spectrometry-based lipidomics in food science and nutritional health: A comprehensive review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(5): 2530–2558.

[7] SHI C, ZI Y, HUANG S, *et al*. Development and application of lipidomics for food research [J]. Advances in Food and Nutrition Research, 2023, 104: 1–42.

[8] HE L, HU Q, YU Y, *et al.* Lipidomic characteristics of eight major legumes and alterations of lipid profiles in legumes in response to soaking and cooking [J]. Food Chemistry, 2025, 490: 145009.

[9] LEOPOLD J, PRABUTZKI P, ENGEL KM, *et al*. A five-year update on matrix compounds for MALDI-MS analysis of lipids [J]. Biomolecules, 2023, 13(3): 546.

[10] FOLCH J, LEES M, SLOANE-STANLEY GH. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues [J]. Journal of Biological Chemistry, 1957, 226(1): 497–509.

[11] BLIGH EG, DYER WJ. A rapid method of total lipid extraction and purification [J]. Canadian Journal of Biochemistry and Physiology, 1959, 37(8): 911–917.

[12] MATYASH V, LIEBISCH G, KURZCHALIA TV, *et al*. Lipid extraction by methyl-tert-butyl ether for high-throughput lipidomics [J]. Journal of Lipid Research, 2008, 49(5): 1137–1146.

[13] KALUZNY MA, DUNCAN LA, MERRITT MV, *et al.* Rapid separation of lipid classes in high yield and purity using bonded phase columns [J]. Journal of Lipid Research, 1985, 26(1): 135–140.

[14] MOREAU RA, WHITAKER BD, HICKS KB. Phytosterols, phytostanols, and their conjugates in foods: Structural diversity, quantitative analysis, and health-promoting uses [J]. Progress in Lipid Research, 2002, 41(6): 457–500.

[15] EDER K. Gas chromatographic analysis of fatty acid methyl esters [J]. Journal of Chromatography B: Biomedical Sciences and Applications, 1995, 671(1-2): 113–131.

[16] 田鹤, 税光厚. 基于质谱技术的代谢组学分析方法研究进展[J]. 生物技术通报, 2021, 37(1): 24–31.
TIAN H, SHUI GH. Research progress in metabolomics analysis methods based on mass spectrometry [J]. Biotechnology Bulletin, 2021, 37(1): 24–31.

[17] 金俊, 张俊辉, 金青哲, 等. 植物油中甾醇含量、存在形式及其在掺伪检验中的作用[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(6): 118–122.
JIN J, ZHANG JH, JIN QZ, *et al*. Content, existing forms of sterols in vegetable oils and their roles in adulteration detection [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(6): 118–122.

[18] 陈怡, 陈贤伟, 姜利民. 色谱-质谱联用技术在油脂检验中的应用研究进展[J]. 山东化工, 2021, 50(19): 94–95, 98.
CHEN Y, CHEN XW, JIANG LM. Research progress on application of chromatography-mass spectrometry in oil inspection [J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(19): 94–95, 98.

[19] LEE H C, YOKOMIZO T. Applications of mass spectrometry-based targeted and non-targeted lipidomics [J/OL]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 1-6. [2018-06-01]. DOI: 10.1016/j.bbrc.2018.03.081

[20] 王国秀, 张琦, 陆佳, 等. 高分辨质谱-色谱联用技术在食品接触材料迁移物筛查中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(7): 346–356.
WANG GX, ZHANG Q, LU J, *et al*. Application progress of high-resolution mass spectrometry-chromatography coupling technology in screening of migrants from food contact materials [J]. Food Science, 2025, 46(7): 346–356.

[21] 邱亚锋, 郭路遥, 雷婉婷, 等. 高分辨质谱技术在食用农产品质量安全检测中应用的研究进展[J]. 食品安全导刊, 2024(19): 187–189.
QIU YF, GUO LY, LEI WT, *et al*. Research progress on application of high-resolution mass spectrometry in quality and safety detection of edible agricultural products [J]. China Food Safety Magazine, 2024(19): 187–189.

[22] 赵浩然, 胡利喆, 陈昊昊, 等. 高分辨质谱法在药食同源农产品农药残留分析中的应用进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(19): 13–19.
ZHAO HR, HU LZ, CHEN HH, *et al.* Application progress of high-resolution mass spectrometry in pesticide residue analysis of medicinal and edible homologous agricultural products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(19): 13–19.

[23] SONG P, YUE X, GU Y, *et al*. Assessment of maize seed vigor under saline-alkali and drought stress based on low field nuclear magnetic resonance [J]. Biosystems Engineering, 2022, 220: 135–145.

[24] ZHANG Y, ZHAO J, GU Y, *et al*. A methodology study on the optimal detection of oil and moisture content in soybeans using LF-NMR and its 2D T_1-T_2 nuclear magnetic technology [J]. Agronomy, 2023, 13(4): 1102.

[25] 张瑜, 刘睿杰, 金青哲, 等. 低场核磁共振技术检测大豆煎炸油品质的研究[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(9): 115–119, 123.
ZHANG Y, LIU RJ, JIN QZ, *et al*. Study on detection of soybean frying oil quality by low-field nuclear magnetic resonance technology [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(9): 115–119, 123.

[26] 荣菡, 杨丹, 甘露菁, 等. 氢谱核磁共振与随机森林算法联用快速检测大豆油过氧化值[J]. 中国油脂, 2021, 46(6): 125–129.
RONG H, YANG D, GAN LJ, *et al*. Rapid detection of peroxide value of soybean oil by 1H NMR spectroscopy combined with random forest algorithm [J]. China Oils and Fats, 2021, 46(6): 125–129.

[27] GUYADER S, THOMAS F, PORTALURI V, *et al*. Authentication of edible fats and oils by non-targeted 13C INEPT NMR spectroscopy [J]. Food Control, 2018, 91: 216–224.

[28] 张宇, 赵亚楠, 赵健翔, 等. 基于不同维度低场核磁共振技术的大豆含油率检测与判别[J]. 农业工程学报, 2024, 40(4): 337–344.
ZHANG Y, ZHAO YN, ZHAO JX, *et al*. Detection and discrimination of soybean oil content based on multi-dimensional low-field nuclear magnetic resonance technology [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(4): 337–344.

[29] HUANG H, LIU H, MA W, *et al*. High-throughput MALDI-MSI metabolite analysis of plant tissue microarrays [J]. Plant Biotechnology Journal, 2023, 21(12): 2574–2584.

[30] MCDONNELL LA, RÖMPP A, BALLUFF B, *et al*. Discussion point: Reporting guidelines for mass spectrometry imaging [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2015, 407: 2035–2045.

[31] 马海潇, 封雪, 蒋宜轩, 等. 质谱成像技术在食品领域的研究进展[J]. 分析试验室, 2024, 43(11): 1641–1654.
MA HX, FENG X, JIANG YX, *et al*. Research progress of mass spectrometry imaging in food field [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2024, 43(11): 1641–1654.

[32] HEIJS B, HOLST S, BRIAIRE-DE BIH, *et al*. Multimodal mass spectrometry imaging of N-glycans and proteins from the same tissue section [J]. Analytical Chemistry, 2016, 88(15): 7745–7753.

[33] 袁俊鹏, 马艳, 郭庆梅. 质谱成像技术在药用植物研究中的应用[J]. 植物生理学报, 2024, 60(1): 56–62.
YUAN JP, MA Y, GUO QM. Application of mass spectrometry imaging in medicinal plant research [J]. Plant Physiology Journal, 2024, 60(1): 56–62.

[34] TSUGAWA H, CAJKA T, KIND T, *et al*. MS-DIAL: Data-independent MS/MS deconvolution for comprehensive metabolome analysis [J]. Nature Methods, 2015, 12(6): 523–526.

[35] FAHY E, SUD M, COTTER D, *et al*. LIPID MAPS online tools for lipid research [J]. Nucleic Acids Research, 2007, 35: W606–W612.

[36] KIND T, LIU KH, LEE DY, *et al*. LipidBlast in silico tandem mass spectrometry database for lipid identification [J]. Nature Methods, 2013, 10(8): 755–758.

[37] WORLEY B, POWERS R. Multivariate analysis in metabolomics [J]. Current Metabolomics, 2013, 1(1): 92–107.

[38] YAN S, YUAN Y, PAN F, *et al.* Distinguishing the botanical origins of rare honey through untargeted metabolomics and machine learning interpreting flavonoid profiles [J]. Food Chemistry, 2025, 470: 142752.

[39] HU A, WEI F, HUANG F, *et al*. Comprehensive and high-coverage lipidomic analysis of oilseeds based on ultrahigh-performance liquid chromatography coupled with electrospray ionization quadrupole time-of-flight mass spectrometry [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(32): 8964–8980.

[40] 许海锦. 人工老化对大豆种子脂质及抗氧化系统的影响研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
XU HJ. Effects of artificial aging on lipids and antioxidant system in soybean seeds [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018.

[41] 涂安琪. 甘油酯成分测定在食用油真伪鉴别及乳品分析中的应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
TU ANQ. Application of glyceride composition determination in authenticity identification of edible oils and dairy analysis [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.

[42] WEI W, SUN C, JIANG W, *et al*. Triacylglycerols fingerprint of edible vegetable oils by ultra-performance liquid chromatography-Q-TOF-MS [J]. LWT, 2019, 112: 108261.

[43] 吕瑞, 冯坤, 罗梦阳, 等. 大豆油抗冻性的影响因素[J]. 中国油脂, 2021, 46(8): 25–29, 38.
LYU R, FENG K, LUO MY, *et al*. Factors influencing the freeze resistance of soybean oil [J]. China Oils and Fats, 2021, 46(8): 25–29, 38.

[44] WANG T, BRIGGS JL. Rheological and thermal properties of soybean oils with modified FA compositions [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2002, 79(8): 831–836.

[45] RIBEIRO APB, GRIMALDI R, GIOIELLI LA, *et al*. Thermal behavior, microstructure, polymorphism, and crystallization properties of zero trans fats from soybean oil and fully hydrogenated soybean oil [J]. Food Biophysics, 2009, 4(2): 106–118.

[46] 钟碧莹. 基于中医体质学探讨大豆甘油二酯油对糖尿病前期患者的影响[D]. 广州: 广州中医药大学, 2025.
ZHONG BY. Investigation of the effect of soybean diacylglycerol oil on pre-diabetic patients based on traditional Chinese medicine constitution theory [D]. Guangzhou: Guangzhou University of Chinese Medicine, 2025.

[47] FEDELI E, JACINI G. Lipid composition of vegetable oils [J]. Advances in Lipid Research, 1971, 9: 335–382.

[48] 刘悦含, 刘婷婷, 牛静琪, 等. 基于液相色谱-离子阱飞行时间质谱的大豆磷脂组分分析[J]. 卫生研究, 2023, 52(3): 465–473, 496.
LIU YH, LIU TT, NIU JQ, *et al*. Analysis of soybean phospholipid components by liquid chromatography-ion trap time-of-flight mass spectrometry [J]. Journal of Hygiene Research, 2023, 52(3): 465–473, 496.

[49] ROMÁN GC, JACKSON RE, GADHIA R, *et al*. Mediterranean diet: The role of long-chain ω-3 fatty acids in fish; polyphenols in fruits, vegetables, cereals, coffee, tea, cacao and wine; probiotics and vitamins in prevention of stroke, age-related cognitive decline, and Alzheimer disease [J]. Revue Neurologique, 2019, 175(10): 724–741.

[50] LE NTT, CAO VD, NGUYEN TNQ, *et al*. Soy lecithin-derived liposomal delivery systems: Surface modification and current applications [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(19): 4706.

[51] 谷梦莹. 大豆磷脂防治肿瘤的实验研究[D]. 昆明: 昆明医科大学, 2024.
GU MY. Experimental study on the prevention and treatment of tumors by soybean phospholipids [D]. Kunming: Kunming Medical University, 2024.

[52] CAO ZH, GREEN-JOHNSON JM, BUCKLEY ND, *et al*. Bioactivity of soy-based fermented foods: A review [J]. Biotechnology Advances, 2019, 37(1): 223–238.

[53] 刘丽影, 刘国华, 张士英, 等. 大豆卵磷脂口服液的研制[J]. 食品工业科技, 2002(6): 91–92.
LIU LY, LIU GH, ZHANG SY, *et al*. Development of soybean lecithin oral liquid [J]. Science and Technology of Food Industry, 2002(6): 91–92.

[54] 马挺军, 秦晓健, 贾昌喜. 大豆卵磷脂增强免疫活性的研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(15): 97–99.
MA TJ, QIN XJ, JIA CX. Study on immunoenhancing activity of soybean lecithin [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(15): 97–99.

[55] 杨福明, 冯丽丽, 罗淑年, 等. 大豆中生物活性成分及其检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(3): 858–865.
YANG FM, FENG LL, LUO SN, *et al*. Research progress on bioactive components in soybean and their detection technologies [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(3): 858–865.

[56] GERALD S, EH-AHRENS JR, SCOTT MG. Metabolism of β-sitosterol in man [J]. The Journal of Clinical Investigation, 1970, 49(5): 952–967.

[57] FRASINARIU O, SERBAN R, TRANDAFIR LM, *et al*. The role of phytosterols in nonalcoholic fatty liver disease [J]. Nutrients, 2022, 14(11): 2187.

[58] SALEHI B, QUISPE C, SHARIFI-RAD J, *et al*. Phytosterols: From preclinical evidence to potential clinical applications [J]. Frontiers in Pharmacology, 2020, 11: 599959.

[59] 中华人民共和国卫生部公告 2010 年第 3 号[J]. 中国食品卫生杂志, 2010, 22(2): 167.
Ministry of Health of the People's Republic of China. Announcement No. 3 of 2010 [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2010, 22(2): 167.

[60] Final report of the amended safety assessment of PEG-5, -10, -16, -25, -30, and -40 soy sterol1 [J]. International Journal of Toxicology, 2004, 23(2): 23–47.

[61] CHERIAN P, BERGFELD WF, BELSITO DV, *et al*. PEG soy sterols [J]. International Journal of Toxicology, 2023, 42: 83S–85S.

[62] 王立刚, 刘功权. 大豆甾醇[J]. 大豆通报, 2004(4): 34–36.
WANG LG, LIU GQ. Soybean sterols [J]. Soybean Bulletin, 2004(4): 34–36.

[63] 牛红红, 孟繁磊, 张国辉, 等. 大豆脂肪酸含量的快速测定[J]. 食品工业, 2017, 38(6): 282–285.
NIU HH, MENG FL, ZHANG GH, *et al*. Rapid determination of fatty acid content in soybean [J]. Food Industry, 2017, 38(6): 282–285.

[64] HEGSTED DM. Dietary fat intake and the risk of coronary heart disease in women [J]. The New England Journal of Medicine, 1997, 337: 1491–1499.

[65] 高瑞萍, 彭见林, 刘辉, 等. 脂肪酸分析方法研究进展[J]. 食品工业科技, 2011, 32(8): 473–477.
GAO RP, PENG JL, LIU H, *et al*. Research progress on fatty acid analysis methods [J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(8): 473–477.

[66] 金文. 充氮气调大豆的储藏及加工品质研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013.
JIN W. Study on storage and processing quality of soybeans under nitrogen controlled atmosphere [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013.

[67] MERRILL AH, SCHMELZ EM, DILLEHAY DL, *et al*. Sphingolipids—the enigmatic lipid class: Biochemistry, physiology and pathophysiology [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 1997, 142(1): 208–225.

[68] 江寒瑞. 海洋球石藻(*Emiliania huxleyi*)鞘脂类的液质分析及其活性初探[D]. 厦门: 集美大学, 2018.
JIANG HR. Liquid mass analysis and preliminary activity study of sphingolipids in *Emiliania huxleyi* [D]. Xiamen: Jimei University, 2018.

[69] ELIZABETH GUTIERREZ, TONG WANG. Effect of processing on sphingolipid content in soybean products [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2004, 81: 971–977.

[70] KOBAYASHI T, SHIMIZUGAWA T, OSAKABE T, *et al*. A long-term feeding of sphingolipids affected the levels of plasma cholesterol and hepatic triacylglycerol but not tissue phospholipids and sphingolipids [J]. Nutrition Research, 1997, 17(1): 111–114.

[71] YUYAMA K, TAKAHASHI K,USUKI S, *et al*. Plant sphingolipids promote extracellular vesicle release and alleviate amyloid-β pathologies in a mouse model of Alzheimer's disease [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 16827.

[72] JIANG C, CHEONG LZ, ZHANG X, *et al*. Dietary sphingomyelin metabolism and roles in gut health and cognitive development [J]. Advances in Nutrition, 2022, 13(2): 474–491.

[73] QI Z, GUO C, LI H, *et al*. Natural variation in fatty acid 9 is a determinant of fatty acid and protein content [J]. Plant Biotechnology Journal, 2024, 22(3): 759–773.

[74] ZHAO Y, ZHANG B, TIAN H, *et al*. Design of high-diacylglycerol and lecithin soybean seed oil using *GmPDATs* and *GmDGATs* knockout via a CRISPR-Cas9 system [J]. Plant Biotechnology Journal, 2025, 10: 1–3.

[75] ZHAO S, XU X, LI Z, *et al*. Long-chain fatty acid esters produced by sporidiobolus pararoseus or rhodotorula mucilaginosa enhance the fat flavor of soy sauce fermented by defatted soybeans [J]. Food Chemistry, 2025, 490: 145097.

[76] LI X, LI C, ZHU Y, *et al*. Lipid fingerprinting of different material sources by UPLC-Q-Exactive Orbitrap/MS approach and their zebrafish-based activities comparison [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(7): 2007–2015.

[77] 李春羽. 整合转录组和脂质组解析大豆种子的老化机制[D]. 开封: 河南大学, 2024.
LI CY. Integrating transcriptome and lipidome to analyze the aging mechanism of soybean seeds [D]. Kaifeng: Henan University, 2024.

[78] 卢方圆. 进口美国大豆"走油"的环境条件及对其品质的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
LU FY. Study on environmental conditions of "oil leakage" of imported American soybeans and its impact on quality [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.

[79] 王永巍, 王欣, 刘宝林, 等. 低场核磁共振技术检测煎炸油品质[J]. 食品科学, 2012, 33(6): 171–175.
WANG YW, WANG X, LIU BL, *et al*. Detection of frying oil quality by low-field nuclear magnetic resonance technology [J]. Food Science, 2012, 33(6): 171–175.

[80] HU Q, ZHANG J, HE L, *et al*. Revealing oxidative degradation of lipids and screening potential markers of four vegetable oils during thermal processing by pseudotargeted oxidative lipidomics [J]. Food Research International, 2024, 175: 113725.

[81] 王东晖, 张玥, 范蓓, 等. 气相色谱-质谱联用法分析不同产地豆类中植物甾醇形态及含量[J]. 农产品质量与安全, 2017(3): 21–27, 37.
WANG DH, ZHANG Y, FAN B, *et al*. Analysis of forms and contents of phytosterols in beans from different origins by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Quality and Safety of Agro-products, 2017(3): 21–27, 37.

[82] ZENG G, WANG Z, HOU Y, *et al*. Identification of soybean origin via TAGs profile analysis using MALDI-TOF/MS [J]. Food Analytical Methods, 2024, 17(5): 766–772.

[83] 刘雪娇. 黑龙江省主栽大豆脂肪酸指纹图谱的构建研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2017.
LIU XJ. Construction of fatty acid fingerprint of main soybean varieties in Heilongjiang Province [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2017.

[84] 王靖会, 刘洋, 郑淇友, 等. 基于多元素和脂肪酸指纹特征的中国北方大豆产地鉴别研究[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(3): 532–538.
WANG JH, LIU Y, ZHENG QY, *et al*. Identification of soybean origins in northern China based on multi-element and fatty acid fingerprint characteristics [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2022, 44(3): 532–538.

[85] 卢锡纯. 基于脂肪酸含量的大豆产地溯源的研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(16): 55–59.
LU XC. Study on traceability of soybean origin based on fatty acid content [J]. Food Research and Development, 2018, 39(16): 55–59.

[86] 张勇, 李雪, 汪雪芳, 等. 基于脂肪酸组成的进口大豆鉴别技术研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(8): 2375–2379.
ZHANG Y, LI X, WANG XF, *et al*. Identification of imported soybeans based on fatty acid composition [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(8): 2375–2379.

[87] REN Z, QIN L, CHEN L, *et al*. Spatial lipidomics of EPSPS and PAT transgenic and non-transgenic soybean seeds using matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry imaging [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(26): 10190–10202.

[88] SHI T, WU G, JIN Q, *et al*. Detection of camellia oil adulteration using chemometrics based on fatty acids GC fingerprints and phytosterols GC-MS fingerprints [J]. Food Chemistry, 2021, 352: 129422.

[89] NG TT, SO PK, ZHENG B, *et al*. Rapid screening of mixed edible oils and gutter oils by matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry [J]. Analytica Chimica Acta, 2015, 884: 70–76.

(责任编辑: 蔡世佳　安香玉)