

# 溶血磷脂的制备、分离、检测及应用研究进展

李 招<sup>1</sup>, 谷克仁<sup>1,2</sup>, 张海臣<sup>2</sup>, 潘 丽<sup>1,3</sup>, 康世宗<sup>1</sup>

(1. 河南工业大学 化学化工与环境学院, 郑州 450001; 2. 吉林工程技术学院, 吉林 四平 136001;

3. 哈尔滨商业大学 食品工程学院, 哈尔滨 150076)

**摘要:**溶血磷脂(Lysophospholipids)是磷脂在自然降解或磷脂酶的作用下从1位或2位酯键断裂产生的单链脂肪酰磷脂衍生物,是一类仅含有1条脂肪酸链的甘油磷脂。溶血磷脂具有良好的表面活性、乳化性等性能,应用于食品、医药等行业,也作为信号分子参与生命活动。我国在溶血磷脂方面的研究未达到世界先进水平。综述了溶血磷脂的制备方法、分离提取方法、检测方法以及应用的研究进展,以期对溶血磷脂的研究有所帮助。

**关键词:**溶血磷脂;制备;分离提取;检测;应用

中图分类号:TQ645;Q545

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2018)06-0132-06

## Progress in preparation, separation, determination and application of lysophospholipids

LI Zhao<sup>1</sup>, GU Keren<sup>1,2</sup>, ZHANG Haichen<sup>2</sup>, PAN Li<sup>1,3</sup>, KANG Shizong<sup>1</sup>

(1. College of Chemical and Environmental Engineering, Henan University of Technology,

Zhengzhou 450001, China; 2. Jilin Institute of Engineering Technology, Siping 136001, Jilin, China;

3. School of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China)

**Abstract:** Lysophospholipids (LPLs) are the single chain fatty acid phospholipid derivative derived from the cleavage of phospholipids from 1 or 2 ester bond under the action of natural degradation or phospholipase. They are the class of glycerophospholipids containing only one fatty acid chain. Lysophospholipids have good surface activity, emulsifying properties, etc., and used in food, medicine and other industries, also as a signal molecule to participate in life activities. China's researches in lysophospholipids does not reach the world's advanced level. The researches in preparation methods, separation and extraction methods, determination methods and application of lysophospholipids were reviewed in order to help the research of lysophospholipids.

**Key words:** lysophospholipids; preparation; separation and extraction; determination; application

溶血磷脂(Lysophospholipids)是磷脂水解失去1个脂肪酰基得到的产物。溶血磷脂是体内磷脂代谢的中间产物,是细胞膜的组分,其功能是介导各种磷脂的合成和嵌入蛋白质到细胞膜<sup>[1]</sup>。溶血磷脂有较强的表面活性,其浓度过高,能使红细胞及其他

细胞膜破裂,导致溶血现象或细胞死亡。

溶血磷脂的来源十分广泛,主要从大豆等天然油料种子、蛋黄、内脏或血液中分离提取,也可以用酶解、醇解等化学方法制备。溶血磷脂的乳化性能突出,范勋涛<sup>[2]</sup>测得粉末溶血磷脂的亲水亲油平衡值(HLB)为10,而一般磷脂的HLB为3~4<sup>[3]</sup>。溶血磷脂乳化性、渗透性、表面活性等性能优于普通磷脂,可作为食品添加剂、抑菌剂和乳化剂等,目前广泛用于食品、畜牧、医药等行业。溶血磷脂在体内参与多种生命活动,在抑制肿瘤、抵抗艾滋病毒、治疗糖尿病等多种疾病中起作用。

收稿日期:2017-09-14;修回日期:2017-11-29

基金项目:河南省高等学校重点科研项目(164550007);谷物资源转化与利用省级重点实验室开放课题(001251,001256)

作者简介:李 招(1991),男,在读硕士,主要从事天然产物方面的研究工作(E-mail)419440602@qq.com。

通信作者:谷克仁,教授(E-mail)gkr@haut.edu.cn。

人们对于溶血磷脂的认识日益加深,对溶血磷脂的制备及生产工艺提出了新的要求,本文对溶血磷脂的制备、分离、检测及应用研究进展进行综述,为形成溶血磷脂产品多样化、系列化和专用化提供参考。

## 1 溶血磷脂组成

不同的磷脂分子水解得到不同的溶血磷脂。溶血磷脂主要包括溶血磷脂酰胆碱(LPC),溶血磷脂酸(LPA),溶血磷脂酰乙醇胺(LPE),溶血磷脂酰丝氨酸(LPS),溶血磷脂酰肌醇(LPI)。溶血磷脂的来源广泛,在蛋黄中的含量丰富,其中溶血磷脂酰胆碱在蛋黄磷脂中的含量最高,约为5.8%,溶血磷脂酰乙醇胺的含量为2.1%<sup>[4]</sup>。

## 2 溶血磷脂的制备方法

### 2.1 磷脂酶水解制备溶血磷脂

目前,通过酶水解制备溶血磷脂主要采用磷脂酶。磷脂酶A<sub>1</sub>水解1-位酰基,磷脂酶A<sub>2</sub>水解2-位酰基。Sn-2溶血磷脂酰胆碱不稳定,受溶剂极性、温度、溶剂pH、水解时间等影响,易发生自动酰基转移现象,生成Sn-1溶血磷脂酰胆碱。甲醇等极性大的溶剂体系能溶解Sn-2溶血磷脂酰胆碱,且溶剂极性增大,酰基转移速率增加。在35~45℃条件下,随温度升高,Sn-2溶血磷脂酰胆碱的酰基转移速率加快<sup>[5]</sup>。该反应条件温和、反应速度快、作用部位准确、反应过程完全、不破坏磷脂的空间结构。

孙浩洋等<sup>[6]</sup>研究用磷脂酶A<sub>1</sub>催化水解大豆磷脂制备溶血磷脂,得到改性磷脂中溶血卵磷脂的含量达9.87%。张薇薇<sup>[7]</sup>在水相体系中利用磷脂酶A<sub>1</sub>制备溶血磷脂酰乙醇胺,得到溶血磷脂酰乙醇胺的含量为42.0%。胡铭畔等<sup>[8]</sup>采用正己烷为溶剂,通过磷脂酶A<sub>1</sub>水解大豆浓缩磷脂制备溶血磷脂酰胆碱,最终得到1-酰基-溶血磷脂酰胆碱的含量为3.99%,2-酰基-溶血磷脂酰胆碱的含量为19.6%。

吴伟等<sup>[9]</sup>利用自制的磷脂酶A<sub>2</sub>水解大豆磷脂生成溶血磷脂。水解大豆磷脂的最佳工艺条件为底物浓度4%、温度30℃、pH7.5、钙离子浓度0.1%、反应时间13h,最佳条件下大豆磷脂的转化率为86.3%。Casado等<sup>[10]</sup>通过无溶剂体系,采用磷脂酶A<sub>2</sub>催化磷脂酰胆碱制备溶血磷脂酰胆碱,纯化后的溶血磷脂酰胆碱的含量为95%。

### 2.2 脂肪酶水解制备溶血磷脂

Haas等<sup>[11]</sup>研究了商业固定化脂肪酶制剂(Li-

pozyme)在有机介质中水解大豆磷脂酰胆碱,采用响应面法设计实验检验溶剂极性、水、酸碱值、时间和温度对水解的影响。结果表明溶剂极性对水解反应有影响,在极性较小的溶剂中,水能抑制酶活性。Mustranta等<sup>[12]</sup>在大豆磷脂的水解中比较了来自黑曲霉和青霉菌的两种商业真菌脂肪酶制剂,研究表明当磷脂底物质量浓度为20mg/mL时,脂肪酶的水解能力大于磷脂酶的水解能力。

Kim等<sup>[13]</sup>在无溶剂体系中通过脂肪酶催化酯化1- $\alpha$ -甘油磷脂酰胆碱(GPC)制备溶血磷脂酰胆碱,发现向该反应介质中加入少量水模拟溶剂(如二甲基甲酰胺)可显著提高反应速率及产物产率。在最优条件下,1- $\alpha$ -甘油磷脂酰胆碱对溶血磷脂酰胆碱的转化达到最大,为90%。

### 2.3 醇解制备溶血磷脂

在溶剂体系或非溶剂体系中都能进行醇解制备溶血磷脂<sup>[14]</sup>。醇解法制备溶血磷脂时副产物为脂肪酸低级醇酯,易从产物中分离。

杨国龙等<sup>[15]</sup>在己烷体系中以磷脂酰胆碱为原料,采用磷脂酶A<sub>1</sub>催化磷脂酰胆碱乙醇解制备溶血磷脂酰胆碱。溶血磷脂酰胆碱的转化率达98.3%。王渝鹭等<sup>[14]</sup>采用无溶剂体系,采用脂肪酶Lipozyme RMIM催化大豆磷脂酰胆碱乙醇醇解制备溶血磷脂酰胆碱,得到溶血磷脂酰胆碱的转化率达92.26%。

### 2.4 体内酶催化制备溶血磷脂

Hui<sup>[16]</sup>研究磷脂在进餐后肠腔中的变化,发现磷脂在肠道内经过酶催化水解,消化产物为溶血磷脂酰胆碱。另外,Sun等<sup>[17]</sup>在不同的研究中发现溶血磷脂酰胆碱可以通过自分泌运动因子(ATX)转化成溶血磷脂酸(LPA)。自分泌运动因子是一种酶,通过转录调节作用于受体蛋白。

## 3 溶血磷脂的分离提取方法

### 3.1 柱层析法

Martin等<sup>[18]</sup>以纯硅胶为固定相,将3种溶剂洗脱剂A由异辛烷和乙酸乙酯(体积比99.8:0.2)组成,洗脱液B是丙酮和乙酸乙酯(体积比2:1)(含有乙酸0.02%(体积分数))和洗脱液C是二丙醇和水(体积比85:15)(含有乙酸和乙醇胺,各自为0.05%(体积分数))组合,梯度程序洗脱,实现了16种脂质类别的分离。Leon等<sup>[19]</sup>以硅胶为固定相,采用正己烷体系连续萃取,从荷荷巴豆提取物中分离出溶血磷脂酰胆碱和磷脂酰胆碱。张薇薇<sup>[7]</sup>研究以硅胶和氧化铝为固定相对纯化溶血磷脂酰乙醇胺的效果,建立柱层析纯化溶血磷脂酰乙醇胺的方法。在最佳条件下,溶血磷脂酰乙醇胺的纯度达

99.05%。

柱层析法操作简单,分离效果好,易于实现工业化,是目前制备高纯度磷脂酰胆碱的主要方法。但柱层析法处理样品量有限,使用的有机溶剂有一定毒性,从而限制了此方法的进一步推广。

### 3.2 高效液相色谱法

Suchocka 等<sup>[20]</sup>开发一种高效液相色谱法用于分离磷脂,用反相 Sephasil C8 柱,两步梯度洗脱(洗脱液 A:乙腈和甲醇(体积比 130:5),洗脱液 B:0.01% 三氟乙酸),12 min 内从血浆样品中分离出溶血磷脂酰胆碱(LPC)、磷脂酰胆碱(PC)、磷脂酰乙醇胺(PE)、磷脂酰肌醇(PI)。

在开发利用高效液相色谱的同时,研究者也对该方法进行改进。Zhu 等<sup>[21]</sup>开发使用亲水相互作用液相色谱(HILIC)-离子阱质谱法用于分离宽范围的磷脂。该方法使用二醇柱和二元梯度洗脱,流动相 A:在乙腈中的 53 mmol/L 甲酸(pH 约 4.0)和流动相 B:60 mmol/L 甲酸铵和 53 mmol/L 甲酸水溶液(pH 3.64)。在 14 min 内成功实现溶血磷脂酰胆碱(LPC)等 7 类磷脂的有效分离。

高效液相色谱法分离效果好,选择性好,检测灵敏度高,应用范围广。但分析成本高,溶剂要求纯化,仪器及维护费用昂贵。

### 3.3 有机溶剂萃取法

有机溶剂萃取法是目前磷脂类化合物提取最常用的方法,其是利用各磷脂组分在不同溶剂中溶解度不同,将不同磷脂成分进行分离。

Ali 等<sup>[22]</sup>从鸭、鸡和鹌鹑的蛋黄中提取磷脂,首先用乙醇对蛋黄粉充分溶解,乙醇溶液低温结晶,后将结晶物溶于己烷,置于冰浴中,最后加入冷丙酮析出沉淀物。使用具有四级杆飞行时间质谱的超高效液相色谱(UPLC-Q-TOF-MS)成功鉴定 57 种分子种类的蛋黄磷脂,主要有溶血磷脂酰胆碱(LPC)、磷脂酰胆碱(PC)等。

### 3.4 超临界流体萃取法

超临界流体萃取法是流体在超临界状态下转变为一种介于气体和液体之间的单一相态。该流体扩散系数大,黏度高于气体、低于液体,对物料有强溶解性、渗透性,能将物料中目的物分离出来。通常情况下,选用二氧化碳作为流体,乙醇为夹带剂。

孙清瑞等<sup>[23]</sup>以磷脂酶 A<sub>1</sub> 水解的大豆浓缩磷脂为原料,用超临界二氧化碳流体萃取脱油溶血磷脂,得出该脱油溶血磷脂中溶血磷脂酰胆碱的质量分数为 4.45%。超临界流体萃取法有效保持磷脂特有的生物活性,分离效果好,避免有毒溶剂的使用。

## 4 溶血磷脂的分析检测方法

### 4.1 定性分析

对于磷脂类化合物的检测,利用质谱法(MS)、薄层色谱法(TLC)、核磁共振法(NMR)、红外光谱法(IR)和高效液相色谱法(HPLC)进行定性分析。磷脂种类多,结构复杂,且每类磷脂又包含多种结构相似的化合物。通常联用多种鉴定方法检测溶血磷脂,提高检测结果的准确度。

Fang 等<sup>[24]</sup>用液相色谱-质谱联用(LC-MS)分析大豆蛋白分离物,成功鉴定出 56 种溶血磷脂,包括 18 种溶血磷脂酰胆碱(LPC),12 种溶血磷脂酰乙醇胺(LPE),11 种溶血磷脂酰肌醇(LPI),11 种溶血磷脂酸(LPA)和 4 种溶血磷脂酰甘油(LPG)。Ali 等<sup>[22]</sup>使用具有四级杆飞行时间质谱的超高效液相色谱法(UPLC-Q-TOF-MS)分析蛋黄磷脂,用乙醇-甲酸铵作为流动相梯度洗脱,在亲水相互作用液相色谱与乙烯桥杂化柱上分离蛋黄磷脂。基于质谱碎片离子信息和 MassLynx 4.1 软件鉴定 57 种分子种类的蛋黄磷脂。Calvano 等<sup>[25]</sup>开发了基于亲水液相色谱(HILIC)微柱的新型微固相萃取( $\mu$ -SPE)方法,该方法允许对所研究的物质进行简单和快速的定性分析。

### 4.2 定量分析

定量分析在定性分析的基础上,能得到大量的实验数据,对物质的分析检测更加准确。薄层色谱法和高效液相色谱法在定性分析的同时,也可以进行定量分析。祝艺娟等<sup>[26]</sup>建立高效液相色谱法测定脂肪乳注射液及卵磷脂中的溶血磷脂的含量。

在传统方法的基础上,组合多种定量方法或对现有方法进行改进,定量分析的结果更加可靠。Zhao 等<sup>[27]</sup>开发使用多重扫描模式的亲水相互作用液相色谱-串联质谱(HILIC LC-MS/MS)方法,定量分析 11 种化合物和脂质,包括溶血磷脂酰胆碱(LPC)、溶血磷脂酰乙醇胺(LPE)、甘油磷脂酰胆碱(GPC)等。Koistinen 等<sup>[28]</sup>建立了定量溶血磷脂组学方法,结合亲水相互作用色谱法(HILIC)与计划多反应监测(SMRM)算法同时大量分析溶血磷脂。该方法有利于监测脂质类别和区域异构体的基线分离,克服同位素的重叠效应,基于脂类分离改进每种分子的定量。

## 5 溶血磷脂的应用

### 5.1 溶血磷脂在食品加工中的应用

溶血磷脂的乳化性可改变油脂性状,作为食品添加剂用于食品可增加起酥性,延长贮存期,广泛用

于食品加工。Ishii<sup>[29]</sup>使用乳液液滴尺寸和表面电位评价蛋黄中5种磷脂的乳化性能,基于乳液中油滴的平均直径,表明溶血磷脂酰胆碱显示出优异的乳化剂性能。溶血磷脂作为乳化分散剂不与其他物质发生反应,起到防聚沉的作用。乳制品和茶饮品中的蛋白质和单宁类物质易产生沉淀,加入溶血磷脂后可防止沉淀形成。

直链淀粉可以与脂质形成包合物改善淀粉的功能。Oyeyinka等<sup>[30]</sup>研究高压均质对与溶血磷脂酰胆碱复合的Bambara淀粉的物理化学性质的影响。Bambara淀粉显示比参考样品更高的复合指数,淀粉-溶血磷脂酰胆碱复合物显示低脱水收缩率。均质的Bambara淀粉-溶血磷脂酰胆碱复合物的非凝胶性质表明改性淀粉可用于食品工业中,在冷冻食品和甜品中提供光滑的质地。

另外在食品中加入溶血磷脂能增加抗菌性能,有效防止菌类引起的食物腐败问题。

### 5.2 溶血磷脂在畜牧业上的应用

溶血磷脂作为一种高级营养添加剂配合饲料用于动物的生长发育。饲料中添加溶血磷脂促进动物肠胃对营养元素的吸收,加快新陈代谢,是动物生长发育的促进剂。

Allahyaribake等<sup>[31]</sup>进行两个独立的实验研究不同脂肪源和补充外源溶血磷脂酰胆碱对不同基础饮食喂养的肉鸡的生长情况、抗体产生效价和回肠营养物质消化率的影响。结果表明补充溶血磷脂酰胆碱的膳食补充剂的肉鸡平均日增重提高了4.6%,而且这种肉鸡的胸腺质量更大。添加溶血磷脂的饲料对喂养家禽、反刍动物、水产动物等都有作用,能够改善整体性能。

### 5.3 溶血磷脂在医学上的应用

脂质在细胞的存活、增殖、相互作用和死亡中起关键作用,其参与化学能量储存、细胞信号传导,细胞膜和细胞间的相互作用。人体内的溶血磷脂参与细胞代谢、基因表达、信号传导等各种生命活动,研究溶血磷脂的作用机理对免疫组学、开发新药、临床治疗等的意义重大。

自分泌运动因子——溶血磷脂酸(ATX-LPA)已涉及若干疾病状况<sup>[32]</sup>,特别是在恶性肿瘤和癌症的研究中起重要作用。自分泌运动因子作为重要的肿瘤细胞运动刺激因子<sup>[33]</sup>,成为许多不同类型的癌症的生物标靶。溶血磷脂通过特定细胞表面和潜在的细胞内受体作用,获得疾病期间的繁殖转化的表型。溶血磷脂结合并激活启动细胞生长、增殖和存活途径的特异性细胞表面G蛋白耦联受体。在肿

瘤微环境中,溶血磷脂的潜在来源包括肿瘤细胞和间质。如果溶血磷脂从肿瘤微环境扩散并持续存在,其可作为早期诊断的标志物,以及对癌症的治疗提供潜在可能<sup>[34]</sup>。

血浆溶血磷脂是重要的信号分子,与肥胖症密切相关。Del Bas等<sup>[35]</sup>测定了34名正常体重和38名肥胖受试者血浆中8种溶血磷脂酰胆碱、11种溶血磷脂酰乙醇胺和7种溶血磷脂酰胆固醇的浓度,结果表明肥胖和正常体重受试者具有不同的血浆溶血磷脂分布。肥胖改变了血浆溶血磷脂的代谢,影响溶血磷脂的分泌模式,26种溶血磷脂的多变量组合可区分正常体重和肥胖受试者。Klingler等<sup>[36]</sup>也在代谢组学中表明血浆溶血磷脂酰胆碱的浓度与肥胖症状的相关性。

Xiong等<sup>[37]</sup>研究了抑郁症的临床治疗,发现抑郁症的发病机制涉及包括溶血磷脂酰胆碱在内的9种潜在生物标志物。Liu等<sup>[38]</sup>研究发现溶血磷脂酰胆碱和溶血磷脂酰乙醇胺等物质的增加与抑郁症的严重性呈正相关关系。

溶血磷脂也在心脏代谢疾病<sup>[16]</sup>、肠炎<sup>[39]</sup>、动脉粥样硬化<sup>[40]</sup>、糖尿病、肝病等致病机理或治疗中起作用。

### 5.4 溶血磷脂在其他方面的应用

溶血磷脂酰乙醇胺是在衰老和成熟中具有调节作用的天然存在的脂质。将溶血磷脂酰乙醇胺施用于园艺作物时,影响生长、发育和采后寿命。溶血磷脂酰乙醇胺可以延缓叶子衰老,刺激果实成熟,加速显色,延长保质期,以及延长切花的瓶插寿命<sup>[41]</sup>。

## 6 结束语

我国对溶血磷脂的研究起步较晚,高纯度的溶血磷脂主要依赖进口。经过几十年的发展,我国在溶血磷脂的生产、产品纯化和检测方法等方面取得明显进步。基于溶血磷脂的功能研究、应用研究也取得了显著成果。溶血磷脂在研制新药、功能性食品和保健品等方面的潜在应用价值巨大。

### 参考文献:

- [1] KAI S, SAMPAIO J L. Membrane organization and lipid rafts[J]. Cold Spring Harb Perspect Biol, 2011, 3(10): 1-18.
- [2] 范勋涛. 磷脂酶A<sub>1</sub>水解大豆磷脂及其产物溶血磷脂的应用研究[D]. 黑龙江大庆:黑龙江八一农垦大学, 2009.
- [3] WILLEM V N, LECIPRO C. Lecithins phospholipid classification and characterization [C]. ILPS Lecithin Short Course, 2005:14-15.

- [4] 田育苗. 蛋黄卵磷脂纯化工艺研究[D]. 北京:北京化工大学, 2013.
- [5] 张康逸. 水相体系酶法制备甘油磷脂酰胆碱及酰基转移机理研究[D]. 江苏 无锡:江南大学, 2012.
- [6] 孙浩洋,张雁,林美金,等. 磷脂酶 A<sub>1</sub> 催化水解大豆磷脂制备溶血卵磷脂的研究[J]. 轻工科技, 2017(7): 13-15.
- [7] 张薇薇. 水相体系酶法制备溶血磷脂酰乙醇胺及酰基转移机理研究[D]. 郑州:郑州轻工业学院, 2015.
- [8] 胡铭畔,张东杰,张爱斌,等. 有机相酶促粉末磷脂制备溶血磷脂的研究[J]. 中国油脂, 2012, 37(11): 61-64.
- [9] 吴伟,李维琳,喻子牛,等. 大豆卵磷脂的酶法改性研究[J]. 中国粮油学报, 2005, 20(6):71-75.
- [10] CASADO V, SENORANS F J, REGLERO G, et al. Supercritical and enzymatic technologies for the production of lysophosphatidylcholine[J]. J Chem Technol Biotechnol, 2013, 88(1):153-162.
- [11] HAAS M J, CICHOWICZ D J, PHILLIPS J, et al. The hydrolysis of phosphatidylcholine by an immobilized lipase: optimization of hydrolysis in organic solvents[J]. J Am Oil Chem Soc, 1993, 70(2):111-117.
- [12] MUSTRANTA A, FORSSELL P, POUTANEN K. Comparison of lipases and phospholipases in the hydrolysis of phospholipids [J]. Process Biochem, 1995, 30(5): 393-401.
- [13] KIM J, KIM B G. Lipase-catalyzed synthesis of lysophosphatidylcholine using organic cosolvent for in situ, water activity control[J]. J Am Oil Chem Soc, 2000, 77(7):791-797.
- [14] 王淦鹭,杨国龙,毕艳兰,等. Lipozyme RMIM 催化大豆卵磷脂乙醇解制备溶血卵磷脂[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2012, 33(2):35-38.
- [15] 杨国龙,杨若茜,毕艳兰,等. 己烷体系中磷脂酶 A<sub>1</sub> 催化卵磷脂乙醇解制备溶血卵磷脂的研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(3):64-68.
- [16] HUI D Y. Intestinal phospholipid and lysophospholipid metabolism in cardiometabolic disease [J]. Curr Opin Lipidol, 2016, 27(5):507-512.
- [17] SUN S, ZHANG X, LYU L, et al. Autotaxin expression is regulated at the post-transcriptional level by the RNA-binding proteins HuR and AUF1 [J]. J Biol Chem, 2016, 291(5):25823-25836.
- [18] MARTIN G, DIETER J. Improved separation and quantification of neutral and polar lipid classes by HPLC-ELSD using a monolithic silica phase: application to exceptional marine lipids [J]. J Chromatogr B, 2009, 877: 1815-1819.
- [19] LEON F, VAN B M, DE W P, et al. Isolation and identification of molecular species of phosphatidylcholine and lysophosphatidylcholine from jojoba seed meal (*Simmondsia chinensis*) [J]. J Agric Food Chem, 2004, 52(5): 1207-1211.
- [20] SUCHOCKA Z, GRONOSTAJSKA D, SUCHOCKI P, et al. New HPLC method for separation of blood plasma phospholipids[J]. J Pharmaceut Biomed Anal, 2003, 32(5): 859-865.
- [21] ZHU C, DANE A, SPIJKSMA G, et al. An efficient hydrophilic interaction liquid chromatography separation of 7 phospholipid classes based on a diol column[J]. J Chromatogr A, 2012, 1220(1):26-34.
- [22] ALI A H, ZOU X Q, LU J, et al. Identification of phospholipids classes and molecular species in different types of egg yolk by using UPLC-Q-TOF-MS [J]. Food Chem, 2017, 221: 58-66.
- [23] 孙清瑞,张东杰,鹿保鑫,等. 超临界 CO<sub>2</sub> 萃取脱油溶血磷脂的研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(3): 57-59.
- [24] FANG N, YU S, BADGER T M. LC-MS/MS analysis of lysophospholipids associated with soy protein isolate[J]. J Agric Food Chem, 2003, 51(23):6676-6682.
- [25] CALVANO C D, ARESTA A, ZAMBONIN C G. Detection of hazelnut oil in extra-virgin olive oil by analysis of polar components by micro-solid phase extraction based on hydrophilic liquid chromatography and MALDI-TOF mass spectrometry [J]. J Mass Spectrom, 2010, 45(9): 981-988.
- [26] 祝艺娟,黄媛,晁若冰. HPLC 法测定脂肪乳注射液及卵磷脂中溶血磷脂的含量[J]. 药物分析杂志, 2012(6):1048-1051.
- [27] ZHAO Y Y, XIONG Y, CURTIS J M. Measurement of phospholipids by hydrophilic interaction liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry: the determination of choline containing compounds in foods [J]. J Chromatogr A, 2011, 1218(32):5470-5479.
- [28] KOISTINEN K M, SUONIEMI M, SIMOLIN H, et al. Quantitative lysophospholipidomics in human plasma and skin by LC-MS/MS [J]. Analyt Bioanal Chem, 2015, 407(17): 5091-5099.
- [29] ISHII F. Emulsification properties of egg yolk lecithin and various phospholipids [J]. J Japan Soc Food Sci Technol - Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku kaishi, 2016, 63(8): 363-368.
- [30] OYEYINKA S A, SINGH S, MA Y, et al. Influence of high-pressure homogenization on the physicochemical properties of bambara, starch complexed with lysophosphatidylcholine [J]. LWT - Food Sci Technol, 2016, 74: 120-127.

## 参考文献:

- [1] 邵瑞婷, 张丽华, 史娜, 等. 免疫亲和净化-超高效液相色谱-串联质谱法测定食品中玉米赤霉烯酮类真菌毒素[J]. 食品科学, 2017, 38(16): 274-279.
- [2] DANICKE S, KEESE C, MEYER U, et al. Zearalenone (ZEN) metabolism and residue concentrations in physiological specimens of dairy cows exposed long-term to ZEN-contaminated diets differing in concentrate feed proportions[J]. Arch Anim Nutr, 2014, 68(6): 492-506.
- [3] 王文珺, 刘怡菲, 韩霄, 等. 玉米赤霉烯酮一步ELISA法的建立及应用[J]. 食品工业科技, 2016(14): 78-82, 9.
- [4] 李妍, 裴世春, 王岩, 等. ELISA和UPLC-MS/MS联合检测粮食中玉米赤霉烯酮残留[J]. 食品科学, 2016, 37(16): 229-234.
- [5] 丁木, 姜霞, 王蕊, 等. 原料乳中玉米赤霉烯酮胶体金免疫试纸条检测方法的建立[J]. 中国乳品工业, 2016(11): 59-61.
- [6] 吴文达, 王宝杰, 蔡兰芬, 等. 薄层色谱和高效液相色谱联合检测玉米赤霉烯酮的方法研究[J]. 畜牧与兽医, 2010(7): 17-20.
- [7] 张婷, 向仲朝. 玉米等谷物中玉米赤霉烯酮的高效液相色谱测定法[J]. 中国卫生检验杂志, 2016(16): 2327-2328.
- [8] 徐存宽, 薛云才, 孙宝胜. 高效液相色谱在粮食检测中的应用[J]. 现代面粉工业, 2016(5): 24-25.
- [9] 林有裕. 高效液相色谱法测定玉米赤霉烯酮的方法[J]. 现代食品, 2016(20): 106-107.
- [10] 姚佳. 免疫亲和柱-HPLC/MS/MS检测乳及乳制品中氯霉素、莱克多巴胺、玉米赤霉醇分析方法的研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- [11] 孟娟, 张晶, 张楠, 等. 固相萃取-超高效液相色谱-串联质谱法检测粮食及其制品中的玉米赤霉烯酮类真菌毒素[J]. 色谱, 2010(6): 601-607.
- [12] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中玉米赤霉烯酮的测定: GB 5009.209-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- (上接第136页)
- [31] ALLAHYARIBAKE S, JAHANIAN R. Effects of dietary fat source and supplemental lysophosphatidylcholine on performance, immune responses, and ileal nutrient digestibility in broilers fed corn/soybean meal - or corn/wheat/soybean meal - based diets[J]. Poult Sci, 2017, 96(5): 1149-1158.
- [32] SHAH P, CHEASTY A, FOXTON C, et al. Discovery of potent inhibitors of the lysophospholipase autotaxin[J]. Bioorgan Med Chem Lett, 2016, 26(22): 5403-5410.
- [33] XU A, AHSANUL K K M, CHEN F, et al. Overexpression of autotaxin is associated with human renal cell carcinoma and bladder carcinoma and their progression[J]. Med Oncol, 2016, 33(11): 131.
- [34] MURPH M, TANAKA T, PANG J, et al. Liquid chromatography mass spectrometry for quantifying plasma lysophospholipids: potential biomarkers for cancer diagnosis[J]. Methods Enzymol, 2007, 433: 1-25.
- [35] DEL BAS J M, CAIMARI A, RODRIGUEZ N M I, et al. Impairment of lysophospholipid metabolism in obesity: altered plasma profile and desensitization to the modulatory properties of n-3 polyunsaturated fatty acids in a randomized controlled trial[J]. Am J Clin Nutr, 2016, 104(2): 266-279.
- [36] KLINGLER C, ZHAO X, ADHIKARY T, et al. Lysophosphatidylcholines activate PPAR and protect human skeletal muscle cells from lipotoxicity[J]. Biochim Biophys Acta (BBA) - Mol Cell Biol Lipids, 2016, 1861(12): 1980-1992.
- [37] XIONG Z L, YANG J, HUANG Y, et al. Serum metabolomics study of anti-depressive effect of Xiao-Chai-Hu-Tang on rat model of chronic unpredictable mild stress[J]. J Chromatogr B, 2016(1029/1030): 28-35.
- [38] LIU X, JIA L, PENG Z, et al. Plasma lipidomics reveals potential lipid markers of major depressive disorder[J]. Analyt Bioanal Chem, 2016, 408(23): 1-11.
- [39] STANCIC A, JANDL K, HASENOHRL C, et al. The GPR55 antagonist CID16020046 protects against intestinal inflammation[J]. Neurogastroenterol Motility Official J Eur Gastrointestinal Motility Soc, 2015, 27(10): 1432-1445.
- [40] DENIMAL D, NGUYEN A, JP P D B, et al. Major changes in the sphingophospholipidome of HDL in non-diabetic patients with metabolic syndrome[J]. Atherosclerosis, 2016, 246: 106.
- [41] AMARO A L, ALMEIDA D P F. Lysophosphatidylethanolamine effects on horticultural commodities: a review[J]. Postharvest Biol Technol, 2013, 78(4): 92-102.