

# 肉品屠宰加工副产物中磷脂的含量与 功能活性研究进展

兰毅博<sup>1,2</sup>, 邹 焯<sup>2,3</sup>, 王晓雯<sup>2,3</sup>, 王 哲<sup>2,3</sup>, 杨 彪<sup>2</sup>,  
徐为民<sup>2,3</sup>, 王建康<sup>1\*</sup>, 王道营<sup>2,3\*</sup>

(1. 陕西科技大学食品科学与工程学院, 西安 710021; 2. 江苏省农业科学院农产品加工所, 南京 210014; 3. 江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013)

**摘 要:** 我国是畜禽养殖大国, 发展迅速的畜禽养殖行业导致肉品屠宰加工副产物的产量逐年递增。目前, 我国对于肉品屠宰加工副产物的加工利用程度较低, 造成极大的资源浪费和严重的环境污染, 制约了肉品屠宰加工产业的发展。肉品屠宰加工副产物中含有丰富的磷脂, 然而对于肉品屠宰加工副产物中磷脂的相关研究仍非常稀缺。本文针对肉品屠宰加工副产物中磷脂的研究进展和应用情况进行系统的总结和分析, 主要介绍了磷脂的结构、种类, 以及肉品屠宰加工副产物中磷脂的含量与功能活性(抗炎症功能、抗氧化衰老功能、神经保护功能、抗肿瘤功能)的研究应用现状, 为肉品屠宰加工副产物中磷脂的研究提供创新依据, 并为肉品屠宰加工行业的健康可持续发展提供理论基础。

**关键词:** 副产物; 磷脂; 功能活性; 肉品

## Research on content and functional activities of phospholipids in by-products of meat slaughtering

LAN Yi-Bo<sup>1,2</sup>, ZOU Ye<sup>2,3</sup>, WANG Xiao-Wen<sup>2,3</sup>, WANG Zhe<sup>2,3</sup>, YANG Biao<sup>2</sup>,  
XU Wei-Min<sup>2,3</sup>, WANG Jian-Kang<sup>1\*</sup>, WANG Dao-Ying<sup>2,3\*</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;  
2. Institute of Agricultural Products Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;  
3. College of Food and Bioengineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**ABSTRACT:** China is a big country of livestock and poultry breeding. The rapid development of the livestock and poultry breeding industry lead to the production of meat slaughtering processing by-products increasing year by year.

**基金项目:** 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-41)、江苏省农业科技自主创新基金项目(CX(21)2016)、江苏省重点研发计划(现代农业)项目(BE2020301)、科技部高端外国专家引进计划项目(G2022041012L)

**Fund:** Supported by the Ministry of Finance and Ministry of Agriculture and Rural Affairs: National Modern Agricultural Industrial Technology System Support (CARS-41), the Jiangsu Province Agricultural Science and Technology Independent Innovation Fund Project (CX(21)2016), the Jiangsu Province Key Research and Development Plan (Modern Agriculture) Project (BE2020301), and the Ministry of Science and Technology High-end Foreign Experts Introduction Program (G2022041012L)

\*通信作者: 王建康, 博士, 副教授, 主要研究方向为功能性油脂和酚类物质的开发与利用。E-mail: rjiankangwang@outlook.com

王道营, 博士, 研究员, 主要研究方向为肉品加工与质量控制。E-mail: daoyingwang@yahoo.com

\*Corresponding author: WANG Jian-Kang, Ph.D, Associate Professor, Shaanxi University of Science and Technology, Caotan Street Weiyang District, Xi'an 710021, China. E-mail: rjiankangwang@outlook.com

WANG Dao-Ying, Ph.D, Professor, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, No.50 Zhongling Street Xuanwu District, Nanjing 210014, China. E-mail: daoyingwang@yahoo.com

At present, the degree of processing and utilization of by-products of meat slaughtering processing is low in our country, resulting in a great waste of resources and serious environmental pollution, which restricts the development of the meat slaughtering and processing industry. There are abundant phospholipids in meat slaughtering by-products, but the research on phospholipids in meat slaughtering by-products is still very scarce. This paper systematically summarized and analyzed the research progress and application of phospholipids in meat slaughtering by-products. It mainly introduced the structure and types of phospholipids, and the research and application status of phospholipids content and functional activity (anti-inflammation function, anti-oxidative aging function, neuroprotective function, anti-tumor function) in meat slaughtering by-products, which is expected to provide innovative basis for the research of phospholipids in meat slaughtering by-products. It also provides a theoretical basis for the healthy development of the slaughtering and processing industry.

**KEY WORDS:** by-products; phospholipid; functional activities; meat

## 0 引言

我国是畜禽养殖及出口大国,近年来我国畜禽养殖年产量持续增长。据统计,2022年我国畜禽类养殖行业中猪肉产量高达5100万t<sup>[1]</sup>、肉鸡产量高达1430万t<sup>[2]</sup>。但同时,肉品屠宰加工过程中会产生大量的加工副产物,这些副产物除部分用于烹饪加工食物及宠物饲料添加物等传统的低附加值产物外,尚未得到高值开发利用。因此,解决畜禽屠宰伴生的副产物综合利用问题,尤其对畜禽屠宰产生的副产物——脑组织、肝脏、肺、血浆等进行高值化加工利用,是促进我国畜禽产业可持续发展的必由之路,是产业结构调整 and 产业升级的必要需求。

磷脂(phospholipid),也称磷脂类、磷脂质,是指含有磷酸的脂类,包括甘油磷脂和鞘磷脂两大类。前者为甘油酯衍生物,而后者为鞘氨醇酯衍生物。磷脂分子常与蛋白质、胆固醇、糖脂等物质以结合的状态存在,其广泛分布于动植物组织及微生物中<sup>[3]</sup>。同时,磷脂是细胞和某些活性酶的重要组成成分,能调节机体膜功能,促进和改善胃肠功能<sup>[4]</sup>,保护和增强肝脏功能<sup>[5]</sup>,改善脂肪代谢、防止动脉粥样硬化<sup>[6]</sup>,辅助改善记忆功能<sup>[7]</sup>等。此外,磷脂还具有优异的乳化性、抗氧化性等,在食品、医药等行业具有广泛的应用,如磷脂作为抗氧化剂<sup>[8]</sup>,能够提高糕点、糖果等加工过程中的稳定性;磷脂衍生物也是合成药物常用的原料,可以制备药物复合物,提高药物的利用度<sup>[9]</sup>。本文系统分析了磷脂的化学结构及种类,且深入研究肉品屠宰加工副产物中磷脂的含量及功能活性,以期肉品屠宰加工副产物的高值化及多元化综合加工提供理论依据,对我国屠宰加工行业的健康可持续发展具有重要意义。

## 1 磷脂化学结构

磷脂为双亲分子,一端为亲水的含氮或含磷的

头,另一端为亲油的长烃基链,根据磷脂的主链结构可分为磷酸甘油酯(phosphoglycerides)和鞘氨醇磷脂(sphingophospholipid)<sup>[10]</sup>。其中,磷酸甘油酯是甘油主链在sn-1和sn-2位置被长链脂肪酸酯化,sn-3位羟基被磷酸酯化成为磷脂酸,磷脂酸的磷酸羟基再被氨基醇取代,形成磷脂酰胆碱(phosphatidylcholine, PC)、磷脂酰乙醇胺(phosphatidylethanolamine, PE)、磷脂酰丝氨酸(phosphatidylserine, PS)、磷脂酰肌醇(phosphatidylinositol, PI)等不同的磷酸甘油酯,其结构式如图1所示。此外,脂肪酸酰基残基主要位于甘油骨架的sn-1和sn-2位置,其脂肪酸组成主要包括棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和花生四烯酸等<sup>[11]</sup>,而根据其连接方式的不同或独特的结构特征,磷脂又可分为几种亚类,如溶血磷脂酰胆碱(lysophosphatidylcholine, LPC)、缩醛磷脂(plasmalogen, Pls)等。

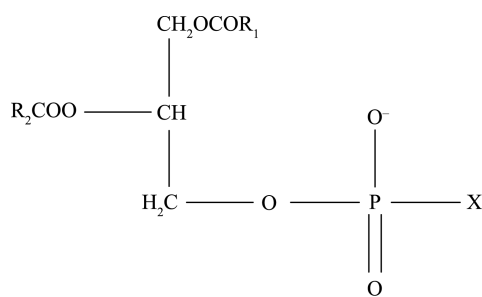


图1 磷酸甘油酯的结构式

Fig.1 Structural formula of phosphoglycerides

鞘氨醇磷脂简称(神经)鞘磷脂(sphingomyelin, SM),是由(神经)鞘氨醇、脂肪酸、磷酸及胆碱(少数是磷脂乙醇胺)各1分子所组成,是一种不含甘油的磷脂<sup>[12]</sup>,其结构式如图2所示。鞘氨醇磷脂也为双亲脂类,极性头部为磷酸胆碱,非极性尾部由脂肪酸和神经氨基醇的长碳链构成。但是,鞘氨醇磷脂与上述磷脂略有差异,其脂肪

酸是通过酰胺键与氨基结合于不同组织当中,且不同组织中鞘氨醇磷脂的脂肪酸种类也不相同,肝脏、脾脏等组织中脂肪酸种类主要包含软脂酸、棕榈酸、木质素酸等<sup>[13]</sup>,而神经组织中则以硬脂酸、二十四碳酸为主。此外,在畜禽类中,鞘氨醇磷脂也广泛分布于脑和神经组织中,是包围某些神经细胞髓鞘的主要成分。

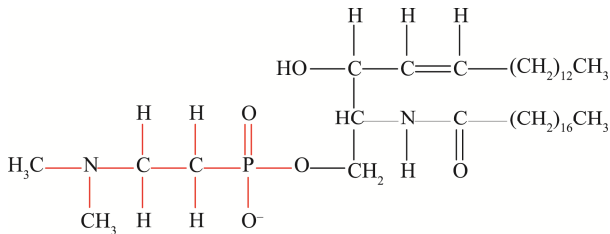


图 2 鞘氨醇磷脂的结构式

Fig.2 Structural formula of sphingophospholipid

## 2 肉品屠宰加工副产物中磷脂含量

磷脂不仅是生命的重要基础物质之一,也是作为神经递质乙酰胆碱、人体必需脂肪酸及不饱和脂肪酸的重要前体物质。由于磷脂具有延缓衰老、保护心血管、促进脂肪代谢等生物功能特性<sup>[14-16]</sup>,因此磷脂含量是作为评价畜禽产品营养品质的重要指标之一。研究发现,畜禽类的脑组织中含有丰富的磷脂,如 PC、PE、PI、PS 等<sup>[17-19]</sup>,且磷脂作为动物脑细胞和神经细胞的重要原料,是动物源磷脂提制的重要来源。研究发现,肉品屠宰加工副产物——牛、羊、猪、鸡等的脑组织中含有丰富的磷脂,其含量分别为 6.79%、8.1%、11.7%、12.1%<sup>[20-21]</sup>。肝脏也是动物源磷脂提制的重要原料之一,其具备植物源磷脂合成所没有的功能分子。据报道,于喆<sup>[22]</sup>采用高效薄板层析法探究猪肝中的磷脂含量,通过成像分析系统对薄板层析结果扫描可知,猪肝中的磷脂含量高达 58.30%。其主要是由于肝脏中存在磷脂的特异合成路径,并与甘油三酯的合成及转运密切相关。肝脏中的磷脂组分主要包含 PC、PE、SM 等,且各组分含量相差不大。其中 PC 占肝脏总磷脂的百分比最多,约为 50%~60%;其次为 PE,二者之和约占肝脏总磷脂的 80%。研究表明,羊、鸡和兔肝脏中的磷脂含量相对较高,可达 57.21%、20.63%和 53.05%<sup>[23]</sup>。此外,畜禽类肺中的磷脂大多与蛋白质、胆固醇等相结合,其广泛分布于肺泡的气-液界面<sup>[24-26]</sup>。且肺中的磷脂活性组分种类十分齐全,如猪肺中磷脂组分包含 PC、PE、PS、PI 和 SM,且 PC 含量最高,大约为 61.26%<sup>[27]</sup>。此外,磷脂也是构成胃肠道黏液层、滑液等的重要组成成分。JUNG 等<sup>[28]</sup>通过氯仿-甲醇法提取黏液层表面活性物质中

的磷脂,其中磷脂含量占 80%,且磷脂种类主要是为 PC、PI 及 PS 等,这与上述研究结果相一致。血浆中的磷脂绝大多数是由食物经消化道吸收而来,少部分是由人体内组织自身合成或体内各组织的分解摄入<sup>[29]</sup>。血浆中的磷脂多与载体蛋白结合,形成脂蛋白,从而随血液循环被转运到各组织完成其生理代谢功能。但血浆中磷脂含量相对较低,如公鸭血浆中磷脂含量为 $(3.59 \pm 0.64)$  mmol/mL,母鸭血浆中的磷脂含量仅为 $(3.33 \pm 0.69)$  mmol/mL<sup>[30-31]</sup>。但即便为同一部位,不同畜禽来源其磷脂含量也略有差异,具体数据如表 1 所示。

表 1 部分动物组织磷脂含量  
Table 1 Phospholipid content in some animal tissues

部位	来源	磷脂含量	参考文献
脑	牛脑	6.83%	[20]
	鸡脑	8.10%	[21]
	养脑	11.70%	[21]
	猪脑	12.10%	[21]
肝	猪肝	58.30%	[22]
	羊肝	57.21%	[23]
	鸡肝	20.63%	[23]
肺	兔肝	53.05%	[23]
	猪肺	61.26%	[27]
血浆	鸭血	$(3.59 \pm 0.64)$ mmol/mL	[30]
	鸭血	$(3.33 \pm 0.69)$ mmol/mL	[30]
	鸡血	182.05 mg/100 g	[31]

目前,畜禽类脑组织、肝脏、肺等屠宰加工副产物尚未得到高值开发利用,多数被用来制成附加值较低的宠物饲料,或当作废料被遗弃,造成环境污染和资源浪费。因此,综合分析肉品屠宰加工副产物中磷脂的含量及功能活性,可为屠宰加工副产物的高值化利用提供技术支撑,对于促进屠宰加工业的健康可持续发展具有重要意义。

## 3 磷脂的功能活性

磷脂在生物系统中发挥着重要的核心作用,包括生物膜的磷脂双分子层的形成、释放信号分子来调节多种生物途径,如参与调节炎症、氧化应激、神经传递等诸多过程<sup>[32-33]</sup>。因此,磷脂不仅具有极高的营养价值,在维持机体生命活动过程中,也具有不可替代的作用。

### 3.1 抗炎症功能

炎症是先天性免疫系统针对不同刺激因素(损伤或感

染)的一种动员防御机制,从而消除刺激来源,使组织得到重塑。然而,过度炎症可导致组织损伤,例如对人体自身组织的攻击,导致发生红肿、发热和疼痛等<sup>[34-35]</sup>。磷脂及其中间代谢物(溶血磷脂酰胆碱)可增强胃肠道黏膜的屏障特性,从而使损伤组织或破坏生物膜的药剂(阿司匹林、对乙酰氨基酚等)和天然损伤剂(胆汁酸、内毒素等)在体内的含量下降。ELBLEHI 等<sup>[36]</sup>以大鼠为实验模型,探究了 PC 对氯化汞(HgCl<sub>2</sub>)诱导的肝肾损伤中炎症的潜在改善作用。研究表明,PC 可抑制促炎因子,进一步对 HgCl<sub>2</sub> 诱导的肝肾损伤具有优异的抗炎和抗氧化活性。溶血磷脂酰胆碱作为 PC 代谢的重要中间产物,是参与炎症所有阶段的重要稳态介质<sup>[37-38]</sup>。可通过增加外源性溶血磷脂酰胆碱的含量,改变其结合态与游离态的比例,从而对血管反应性、内皮细胞活化和浸润以及免疫细胞活化产生影响,使炎症发展得到显著缓解。然而磷脂及其中间代谢物(溶血磷脂酰胆碱)与其他免疫细胞相互作用的复杂性以及参与其他反应过程,因此不可能对其进行完全的非黑即白的描绘。尽管如此,通过使用稳定的磷脂及其中间代谢物类似物显然有助于更好地了解其在健康和疾病中的作用。

### 3.2 抗氧化衰老功能

在正常状态下,机体自身的免疫调节体系和修复体系能够维持体内细胞增殖与凋亡的平衡<sup>[39-40]</sup>。然而,随着年龄的增长或在物理化学等因素的影响下,细胞在能量代谢、氧化还原平衡、自噬水平等方面发生异常变化,导致其产生更多的活性氧和废物物质,从而降低其抵抗氧化应激和清除损伤物质的能力,造成机体衰老、膜系统损伤、疾病等。由于磷脂结构中富含不饱和双键和还原性杂原子,因此能与体内自由基发生反应,具有优异的自由基清除能力。岳大鹏等<sup>[41]</sup>通过体外抗氧化测定实验,研究草鱼头磷脂的抗氧化性能,结果表明,该磷脂的羟自由基( $\cdot\text{OH}$ )清除能力和还原力能力均显著( $P<0.05$ )优于对照的商品大豆磷脂,具有优异的抗氧化性。此外,磷脂作为生物膜的主要成分,能够修复损伤的生物膜系统,完善细胞功能,从而达到延缓衰老的作用<sup>[42]</sup>。其主要得益于磷脂的双亲结构,该结构可使部分磷脂与脂质相结合,达到稳定水相中悬浮脂质的作用;剩余磷脂与蛋白质相结合,从而保证浓度较高的蛋白质与脂质存在于同一水相中。当生物膜损伤时,结合态磷脂可迅速完成生物膜的修补,延缓细胞衰老。

### 3.3 神经保护功能

脑组织是磷脂含量最丰富的器官之一,脑细胞中磷脂含量的变化会引发大脑不同程度的病变,例如阿尔茨海默病(Alzheimer's disease, AD)<sup>[43-44]</sup>。PC 作为神经递质乙酰

胆碱的前体物质,通过摄食可促进乙酰胆碱的合成,从而促进神经传导,提高大脑活力,缓解神经退行性疾病<sup>[45]</sup>。此外,通过体内摄入磷脂可有效维持脑组织中磷脂动态平衡,从而起到间接保护作用。HOSSAIN 等<sup>[46]</sup>对 AD 模型小鼠进行体内摄入缩醛磷脂,其研究表明,摄入缩醛磷脂的 AD 模型小鼠其记忆力、学习能力等具有显著性提高,对 AD 的缓减具有积极作用。磷脂的另一成分——PS 参与脑细胞的主要活动,是大脑细胞膜的活性成分。由于其具有优异的亲脂性,可迅速吸收脂质通过血脑屏障进入大脑,增强脑部供血,舒缓血管,从而提升大脑记忆力,对 AD 具有优异的缓解作用。然而,神经元脂质代谢是一个复杂的系统,不同脂质的协同作用对大脑神经元的作用仍难以捉摸。因此,在全面了解磷脂及其代谢产物参与脑功能的道路上,仍需进一步探索。

### 3.4 抗肿瘤功能

PC、PE 和 PS 等磷酸甘油酯是生物膜的重要组成部分,是形成磷脂双分子层、维持细胞的结构完整性和选择通透性的重要成分。因此,细胞膜结构和功能的改变可间接反映癌症中磷脂代谢的失调,包括卵巢癌、乳腺癌和肺癌等多种癌症,这些变化与肿瘤的恶性转换息息相关<sup>[47-48]</sup>。近年来,研究者不断发现磷脂及其衍生物具有优异的抗肿瘤作用。SEKAR 等<sup>[49]</sup>以小鼠为实验模型,通过靶向摄入磷脂酰丝氨酸合成酶 1 (phosphatidylserine synthase 1, PTDSS1)来调节 PS 的含量,进而调控巨噬细胞扩增和乳腺肿瘤的生长,从而达到抗肿瘤的作用。此外,磷脂抗肿瘤作用的发挥与其相连接的  $\omega$ -3 多不饱和脂肪酸也息息相关<sup>[50]</sup>。研究表明, $\omega$ -3 多不饱和脂肪酸能通过多种生理代谢途径达到调控肿瘤细胞周期、抑制肿瘤细胞增生及促进肿瘤细胞凋亡的作用,对肿瘤的增殖、转移和侵袭具有重要的介导作用,尤其对卵巢癌、前列腺癌等抑制作用更为明显。但是,关于磷脂代谢在卵巢癌、乳腺癌和肺癌等类型的临床研究仍十分有限。因此,有必要进一步研究癌症中磷脂代谢的调节,并筛选磷脂种类差异以潜在地识别可能作为癌症治疗新靶点的基因和分子。

## 4 结束语

畜禽类研究开发已成为国内外研究的重点内容,而其研究对象通常是畜禽类肉品的产品研发、储藏保鲜等。近年来,随着畜禽养殖量持续增长,肉品屠宰加工副产物的产量也呈指数型增长。本文综合论述了磷脂的结构、种类,及肉品屠宰加工副产物中磷脂的含量与功能活性,为肉品屠宰加工副产物的高值化利用提供理论依据,对于促进畜禽屠宰加工业的健康可持续发展具有重要意义。但是,

目前对于肉品屠宰加工副产物中磷脂的工业化生产和应用尚未形成完整的体系, 各类副产物中磷脂的分子结构及组分仍需深入研究。此外, 对于肉品屠宰加工副产物中磷脂的相关研究仍然十分欠缺, 如磷脂的功能活性研究还存在诸多挑战, 由于其研究结果的重现性较低, 应进一步深化基础参数, 为磷脂的功能研究和开发提供良好数据支持及研究方向。鉴于肉品屠宰加工副产物中丰富的磷脂含量和功能活性, 未来应将磷脂的研究利用、工业化生产及保健食品开发集中于肉品屠宰加工副产物, 其不仅能减少资源浪费, 还能产生更高的经济和社会效益。

### 参考文献

- [1] 左宸, 杭熙竣. 我国猪肉产量波动与养殖户数量波动的关联性分析[J]. 中国猪业, 2023, 18(2): 27-33.  
ZUO C, HANG XJ. Correlation analysis between fluctuation of pork production and fluctuation of number of farmers in China [J]. Chin Pig Ind, 2023, 18(2): 27-33.
- [2] 张怡, 毕思恺, 许少成, 等. 2022 年全球肉鸡生产、贸易及产业经济发展研究[J]. 中国畜牧杂志, 2023, 59(3): 280-287.  
ZHANG Y, BI SK, XU SC, *et al.* Study on global broiler production, trade and industrial economic development in 2022 [J]. Chin J Anim Sci, 2023, 59(3): 280-287.
- [3] 李子豪, 张璐, 何强, 等. 乳及乳制品中磷脂检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(7): 2051-2058.  
LI ZH ZHANG L, HE Q, *et al.* Research progress of phospholipid detection technology in milk and dairy products [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(7): 2051-2058.
- [4] 王兆明, 贺稚非, 余力, 等. 动物源卵磷脂功效作用及其分析方法[J]. 食品工业科技, 2014, 35(19): 362-367.  
WANG ZM, HE ZF, YU L, *et al.* Function and analysis method of animal-derived lecithin [J]. Food Ind Sci Technol, 2014, 35(19): 362-367.
- [5] YIN YH, SICHLER A, ECKER J, *et al.* Gut microbiota promote liver regeneration through hepatic membrane phospholipid biosynthesis [J]. J Hepatology, 2023, 78(4): 820-835.
- [6] WANG ZE, HAZEN J, JIA X, *et al.* The nutritional supplement L-alpha glycerylphosphorylcholine promotes atherosclerosis [J]. Int J Mol Sci, 2021, 22(24): 13477.
- [7] JOENSUU M, WALLIS TP, SABER SH, *et al.* Phospholipases in neuronal function: A role in learning and memory [J]. J Neurochem, 2020, 153(3): 300-333.
- [8] 唐史杰. 虾夷扇贝性腺的磷脂提取及其抗氧化活性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.  
TANG SJ. Study on phospholipid extraction and antioxidant activity from gonad of *Scallop praeysi* [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.
- [9] TONG YP, ZHANG Q, SHI W, *et al.* Mechanisms of oral absorption improvement for insoluble drugs by the combination of phospholipid complex and SNEDDS [J]. Drug Deliv, 2019, 26(1): 1155-1166.
- [10] 冉世前, 朱云芬, 徐淑玲, 等. 磷脂结构、膳食来源及营养学研究进展[J]. 中国油脂, 2022, 47(1): 68-74.  
RAN SQ, ZHU YF, XU SL, *et al.* Research progress of phospholipid structure, dietary sources and nutrition [J]. China Oils Fats, 2022, 47(1): 68-74.
- [11] SUN N, CHEN J, BAO Z, *et al.* Egg yolk phosphatidylethanolamine: Extraction optimization, antioxidative activity, and molecular structure profiling [J]. J Food Sci, 2019, 84(5): 1002-1011.
- [12] 罗鑫, 孙万成, 罗毅皓. 食品中鞘磷脂的检测及功能研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(15): 211-218.  
LUO X, SUN WC, LUO YH. Research progress on the detection and function of sphingomyelin in food [J]. Food Res Dev, 2020, 41(15): 211-218.
- [13] ENOMOTO H, TAKEDA S, HATTA H, *et al.* Tissue-specific distribution of sphingomyelin species in pork chop revealed by matrix-assisted laser desorption/ionization-imaging mass spectrometry [J]. J Food Sci, 2019, 84(7): 1758-1763.
- [14] 闫媛媛, 张康逸, 黄健花, 等. 磷脂分离、纯化和检测方法的研究进展[J]. 中国油脂, 2012, 37(5): 61-65.  
YAN YY, ZHANG KY, HUANG JH, *et al.* Research progress of separation, purification and detection methods of phospholipids [J]. China Oil Fats, 2012, 37(5): 61-65.
- [15] MORITA SY, IKEDA Y. Regulation of membrane phospholipid biosynthesis in mammalian cells [J]. Biochem Pharmacol, 2022, 206: 115296.
- [16] HUANG J, LU FY, WU YJ, *et al.* Enzymatic extraction and functional properties of phosphatidylcholine from chicken liver [J]. Poult Sci, 2022, 101(6): 101689.
- [17] 薛山. 动物源肌肉内磷脂及其脂肪酸含量、组成与生理功效研究进展[J]. 肉类研究, 2016, 30(9): 40-44.  
XUE S. Research progress on the contents, composition and physiological effects of animal intramuscular phospholipids and their fatty acids [J]. Meat Res, 2016, 30(9): 40-44.
- [18] NARVAEZ-RIVAS M, GALLARDO E, RIOS JJ, *et al.* A new high-performance liquid chromatographic method with evaporative light scattering detector for the analysis of phospholipids. Application to Iberian pig subcutaneous fat [J]. J Chromatogr A, 2011, 1218(22): 3453-3458.
- [19] 高宏, 丁丽丽, 林孙萍, 等. 从鸡头中提取卵磷脂的方法[J]. 中国乳业, 1999, (1): 22.  
GAO H, DING LL, LIN SP, *et al.* Extraction method of lecithin from chicken head [J]. Chin Dairy Ind, 1999, (1): 22.

- [20] 李国平, 顾冬花. 大通县牦牛脑中磷脂含量的测定[J]. 四川畜牧兽医, 2014, 41(4): 35–38.  
LI GP, GU DH. Determination of phospholipid content in the brains of yaks in Datong County [J]. Sichuan J Anim Sci Vet Med, 2014, 41(4): 35–38.
- [21] 谢朝顺, 李桂华. 羊、猪、鸡脑中磷脂及磷脂脂肪酸组成分析[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2010, 31(4): 29–31.  
XIE CS, LI GH. Composition analysis of phospholipid and phospholipid fatty acid in brain of sheep, pig and chicken [J]. Henan Ind Univ J (Nat Sci Ed), 2010, 31(4): 29–31.
- [22] 于喆. 猪肝磷脂综合利用的初步研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2009.  
YU Z. Preliminary study on comprehensive development and utilization of porcine heparin [D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2009.
- [23] 李亚丽, 马克里, 刘之力, 等. 猪、羊、鸡、兔肝脏中磷脂及脂肪酸组成的比较[J]. 大连医科大学学报, 2004, (4): 259–261.  
LI YL, MA KL, LIU ZL, *et al.* Comparison of phospholipid and fatty acid components in liver of pig, sheep, chicken and rabbit [J]. Dalian Med Univ J, 2004, (4): 259–261.
- [24] AUTILIO C, PEREZ-GIL J. Understanding the principle biophysics concepts of pulmonary surfactant in health and disease [J]. Arch Dis Child Fetal, 2019, 104(4): 443–451.
- [25] TLATELPA-ROMERO B, CAZARES-ORDONEZ V, OYARZABAL LF, *et al.* The role of pulmonary surfactant phospholipids in fibrotic lung diseases [J]. Int J Mol Sci, 2023, 24(1): 326.
- [26] 赵倩. 超临界 CO<sub>2</sub> 提纯猪肺表面活性物质的研究[D]. 广州: 中国人民解放军第一军医大学, 2003.  
ZHAO Q. Study on purification of pig lung surfactant by supercritical [D]. Guangzhou: The first Military Medical University of the People's Liberation Army, 2003.
- [27] 赵群, 柴小龙, 张林丰, 等. 超声辅助提取动物肺表面活性物质及其化学组成和表面活性测试[J]. 云南化工, 2018, 45(5): 74–77.  
ZHAO Q, CHAI XL, ZHANG LF, *et al.* Ultrasonic-assisted extraction of surfactant from animal lung and its chemical composition and surface activity determination [J]. Yunnan Ind, 2018, 45(5): 74–77.
- [28] JUNG HJ, MOON JS, PARK AR, *et al.* Anti-inflammatory, antinociceptive and anti-angiogenic activities of a phospholipid mixture purified from porcine lung tissues [J]. Immunopharm Immunot, 2012, 34(3): 398–407.
- [29] 周淡宜, 朱染枫, 王昌富, 等. 猪血红细胞膜中鞘磷脂的提取及含量测定[J]. 中国生化药物杂志, 2002, (2): 88–89.  
ZHOU DY, ZHU RF, WANG CF, *et al.* Extraction and determination of sphingomyelin in porcine red blood cell membrane [J]. Chin J Biochem Drug, 2002, (2): 88–89.
- [30] 张军, 龚道清, 沈立权, 等. 肉鸭血浆脂类浓度与体脂含量关系的研究[J]. 扬州大学学报, 2003, (4): 23–26.  
ZHANG J, GONG DQ, SHEN LQ, *et al.* Study on the relationship between plasma lipid concentration and body fat content of meat ducks [J]. Yangzhou Univ J, 2003, (4): 23–26.
- [31] 陈国宏, 陈宽维, 王克华, 等. 中国部分地方鸡种血浆、肌肉磷脂含量比较研究[J]. 西北农业学报, 1998, (3): 11–14.  
CHEN GH, CHEN KW, WANG KH, *et al.* Comparative Study on phospholipid content in plasma and muscle of chicken breeds in some parts of China [J]. Northwest Agric Sci, 1998, (3): 11–14.
- [32] MA XH, LI XJ, WANG WJ, *et al.* Phosphatidylserine, inflammation, and central nervous system diseases [J]. Front Aging Neurosci, 2022, 3(14): 975176.
- [33] 付满, 蔡秋杏, 黄海, 等. 北部湾常见牡蛎中磷脂提取及其抗氧化性研究[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(8): 58–63.  
FU M, CAI QX, HUANG H, *et al.* Study on phospholipid extraction and antioxidant activity of common oysters from Beibu Gulf [J]. Chin Food Addit, 2022, 33(8): 58–63.
- [34] MEDZHITOV R. The spectrum of inflammatory responses [J]. Science, 2021, 374(6571): 1070–1075.
- [35] LEUTI A, FAZIO D, FAVA M, *et al.* Bioactive lipids, inflammation and chronic diseases [J]. Adv Drug Deliver Rev, 2020, 159: 133–169.
- [36] ELBLEHI SS, HAFEZ MH, EL-SAYED YS. L-alpha-phosphatidylcholine attenuates mercury-induced hepato-renal damage through suppressing oxidative stress and inflammation [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2019, 26(9): 9333–9342.
- [37] TANAKA T, MORITO K, KINOSHITA M, *et al.* Orally administered phosphatidic acids and lysophosphatidic acids ameliorate aspirin-induced stomach mucosal injury in mice [J]. Digest Dis Sci, 2012, 58(4): 950–958.
- [38] MASQUELIERI, ALHOUAYEK M, TERRASI R, *et al.* Lysophosphatidylinositols in inflammation and macrophage activation: Altered levels and anti-inflammatory effects [J]. BBA Mol Cell Biol, 2018, 1863(12): 1458–1468.
- [39] HAJAM YA, RANI R, GANIE SY, *et al.* Oxidative stress in human pathology and aging: Molecular mechanisms and perspectives [J]. Cells, 2022, 11(3): 552.
- [40] IONESCU-TUCKER A, COTMAN CW. Emerging roles of oxidative stress in brain aging and Alzheimer's disease [J]. Neurobiol Aging, 2021, 107: 86–95.
- [41] 岳大鹏, 王然然, 王琦, 等. 草鱼头磷脂制备工艺优化及抗氧化性能分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 149–154.  
YUE DP, WANG RR, WANG Q, *et al.* Optimization of phospholipid preparation process and analysis of antioxidant properties of grass carp head [J]. Food Ind Sci Technol, 2020, 41(6): 149–154.

- [42] 李子豪, 张璐, 何强, 等. 乳及乳制品中磷脂检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(7): 2051–2058.  
LI ZH, ZHANG L, HE Q, *et al.* Research progress of phospholipid detection in milk and dairy products [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(7): 2051–2058.
- [43] RAMESH S, GOVINDARAJULU M, SUPPIRAMANIAM V, *et al.* Autotaxin–lysophosphatidic acid signaling in Alzheimer’s disease [J]. *Int J Mol Sci*, 2018, 19(7): 1827.
- [44] THOE ES, FAUZI A, TANG YQ, *et al.* A review on advances of treatment modalities for Alzheimer’s disease [J]. *Life Sci*, 2021, 1(276): 119129.
- [45] KOSICEK M, HECIMOVIĆ S. Phospholipids and Alzheimer’s disease alterations, mechanisms and potential biomarkers [J]. *Int J Mol Sci*, 2013, 14(1): 1310–1322.
- [46] HOSSAIN MS, MAWATARI S, FUJINO T. Plasmalogens inhibit neuroinflammation and promote cognitive function [J]. *Brain Res Bull*, 2023, 192: 56–61.
- [47] 杨骥, 于喆, 张媛, 等. 肝源性磷脂对小鼠学习记忆及海马穹蛋白-1表达的影响[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 2013, 36(3): 406–410.  
YANG J, YU Z, ZHANG Y, *et al.* Effects of hepatogenic phospholipids on learning and memory and hippocampal cellin-1 expression in mice [J]. *Liaoning Norm Univ J (Nat Sci Ed)*, 2013, 36(3): 406–410.
- [48] STOICA C, FERREIRA AK, HANNAN K, *et al.* Bilayer forming phospholipids as targets for cancer therapy [J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(9): 5266.
- [49] SEKAR D, DILLMANN C, SIRAIT-FISCHER E, *et al.* Phosphatidylserine synthase PTDSS1 shapes the tumor lipidome to maintain tumor-promoting inflammation [J]. *Cancer Res*, 2022, 82(8): 1617–1632.
- [50] 郑亚, 孙红. 溶血磷脂酸在卵巢癌进展中的机制研究[J]. 国际妇产科学杂志, 2016, 43(6): 673–676.  
ZHENG Y, SUN H. Study on the mechanism of lysophosphatidic acid in ovarian cancer progression [J]. *Int J Obstet Gynecol*, 2016, 43(6): 673–676.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

## 作者简介



兰毅博, 硕士研究生, 主要研究方向为动物源副产物综合利用及高值化开发。  
E-mail: 750807073@qq.com



王建康, 博士, 副教授, 主要研究方向为功能性油脂和酚类物质的开发与利用。  
E-mail: rjiankangwang@outlook.com



王道营, 博士, 研究员, 主要研究方向为肉品加工与质量控制。  
E-mail: daoyingwang@yahoo.com