李金林, 白俊茹, 袁丽萍, 等. 磷脂组学解析鲢鱼鱼油氧化中磷脂及其脂肪酸演变特征 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 365−375. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070006
LI Jinlin, BAI Junru, YUAN Liping, et al. Phospholipidomics Analysis and Their Fatty Acid Evolution of Silver Carp Fish Oil during Oxidation by Phospholipids[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 365−375. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070006

· 分析检测 ·

磷脂组学解析鲢鱼鱼油氧化中磷脂及其脂肪酸演变特征

李金林, 白俊茹, 袁丽萍, 钟比真, 胡明明, 余诚玮, 彭　斌*
（江西师范大学生命科学学院国家淡水鱼加工技术研发专业中心, 江西南昌 330022）

摘　要: 为探究鱼油氧化过程中磷脂组分及其位置上脂肪酸的演变规律，研究以鲢鱼内脏为原料提取鱼油，采用磷脂组学方法对 60 ℃ 烘箱中鲢鱼鱼油磷脂组分及其在磷脂甘油骨架上的脂肪酸进行分析。结果表明，鲢鱼鱼油共鉴定出 373 种甘油磷脂（GP）、39 种鞘磷脂（SP）及 1 种固醇脂，其中 GP 组分呈现显著时间依赖性变化：溶血磷脂（LPA）、溶血磷脂酰胆碱（LPC）、单聚心磷脂（MLCL）、磷脂酰胆碱（PC）、磷脂酰甘油（PG）、磷脂酰肌醇（PI）及磷脂酰甲醇（PMe）含量随氧化时间显著上升（P<0.05），而双甲基磷酸（BisMePA）显著下降（P<0.05）；磷脂酸（PA）、磷脂酰乙醇胺（PE）、磷脂酰乙醇（PEt）、磷脂酰丝氨酸（PS）及心磷脂（CL）则保持稳定。磷脂脂肪酸组成分析显示，饱和脂肪酸（SFA）、单不饱和脂肪酸（MUFA）和多不饱和脂肪酸（PUFA）分布具有显著位置特异性：SFA 占比介于 41.79%~56.91% 之间，MUFA 为 24.16%~38.97%，PUFA 为 8.40%~33.44%。其中，Sn-2 位的 PUFA 含量最高（C18:2、C18:3 和 DHA 为主），显著高于 Sn-1 位（P<0.05）。在氧化过程中，Sn-1 位 MUFA 如 C8:1、C21:1、C22:1 等呈下降趋势（P<0.05），C18:1 和 C25:1 含量呈上升趋势。Sn-2 位的大部分 PUFA 含量均呈显著下降趋势，包括 C10:2、C11:3 与 C18:3 等，仅 C18:2 的含量出现显著上升（P<0.05）。MUFA 中的 C18:1 在 Sn-1、Sn-2 及 Sn-3/4 位呈梯度上升分布，各位置含量在氧化后均显著上升（P<0.05）。SFA 在甘油骨架各位置上分布稳定，氧化未引起显著变化（P>0.05）。综上，烘箱加速氧化对鲢鱼鱼油磷脂中 Sn-1 位 MUFA 与 Sn-2 位 PUFA 氧化敏感，其特异性降解机制与脂肪酸的空间分布特征密切相关。研究为解析水产品脂质氧化机理提供了新的分子维度依据。

关键词: 鲢鱼油, 磷脂, 脂质氧化, 脂肪酸, 位置分布
中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0365−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070006　　本文网刊:

Phospholipidomics Analysis and Their Fatty Acid Evolution of Silver Carp Fish Oil during Oxidation by Phospholipids

LI Jinlin, **BAI Junru**, **YUAN Liping**, **ZHONG Bizhen**, **HU Mingming**, **YU Chengwei**, **PENG Bin***
（National Research and Development Center of Freshwater Fish Processing, College of Life Science, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China）

Abstract: This study aimed to investigate the evolution of phospholipid composition and the positional distribution of fatty acids during the oxidation of fish oil. Phospholipid composition and the positional distribution of fatty acids on the glycerol backbone in silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fish oil extracted from viscera during incubation at 60 ºC were char-

收稿日期: 2025−07−01
基金项目: 江西省自然科学基金杰出青年基金项目（20224ACB215010）；江西省自然科学基金项目（20242BAB25407, 20232BAB215060）；赣鄱俊才支持计划-主要学科学术和技术带头人培养项目（20232BCJ22021）；国家现代农业产业技术体系建设专项（CARS-45）；江西省农业科技特派员项目。
作者简介: 李金林（1983−）（ORCID: 0000−0002−1523−1800），男，博士，教授，研究方向：水产品精深加工和高值化综合利用，E-mail: lijinlin405@126.com。
*** 通信作者:** 彭斌（1992−）（ORCID: 0000−0002−4436−6296），男，博士，助理研究员，研究方向：水产品精深加工和高值化综合利用，E-mail: 18507001686@163.com。

acterized by phospholipidomics. The results showed that a total of 373 glycerophospholipids (GP), 39 sphingophospholipids (SP), and 1 sterol lipid were identified in the accelerated oxidation fish oil. The GP components exhibited distinct time-dependent changes: Lysophosphatidic acid (LPA), lysophosphatidylethanolamine (LPC), monomeric phosphatidylcholine (MLCL), phosphatidylcholine (PC), phosphatidylglycerol (PG), phosphatidylinositol (PI), and phosphatidylmethanol (PMe) showed significant increases in content with oxidation time (P<0.05), while bis (2-methylphosphorodicarbonate) (BisMePA) decreased markedly. Phosphatidic acid (PA), phosphatidylethanolamine (PE), phosphatidylethanol (PEt), phosphatidylserine (PS), and cardiolipin (CL) remained stable. Analysis of phospholipid fatty acid composition revealed significant positional specificity in saturated fatty acids (SFA), monounsaturated fatty acids (MUFA), and polyunsaturated fatty acids (PUFA): SFA accounted for 41.79% to 56.91%, MUFA for 24.16% to 38.97%, and PUFA for 8.40% to 33.44%. Notably, Sn-2-positioned PUFA (predominantly C18:2, C18:3, and DHA) showed the highest content, significantly exceeding Sn-1-positioned counterparts (P<0.05). During the oxidation process, MUFA at the Sn-1 site, such as C8:1, C21:1, and C22:1, showed a decreasing trend (P<0.05), while the content of C18:1 and C25:1 showed an increasing trend. Most PUFA at Sn-2 showed a significant downward trend, including C10:2, C11:3, and C18:3. Only the content of C18:2 showed a significant increase (P<0.05). The C18:1 in MUFA exhibited a gradient increasing distribution at Sn-1, Sn-2, and Sn-3/4 positions, and its content at each position significantly increased after oxidation (P<0.05). Notably, SFA distribution remained stable across glycerol backbone positions without significant changes caused by oxidation (P>0.05). In summary, accelerated oxidation in an oven revealed that MUFA at the Sn-1 position and PUFA at the Sn-2 position in silver carp fish oil phospholipids were highly susceptible to oxidation, and their specific degradation mechanisms were closely associated with the positional distribution characteristics of fatty acids. This study offers novel insights into the molecular mechanism of lipid oxidation in aquatic products.

Key words: silver carp oil; phospholipids; lipid oxidation; fatty acids; positional distribution

鲢鱼(*Hypophthalmichthys molitrix*)作为鲤形目鲢属典型草食性淡水鱼类,广泛分布于我国内陆水域。2022 年鲢鱼养殖产量达 387.9 万吨,仅次于草鱼,是极具经济价值的大宗淡水养殖品种之一[1]。在鱼类产品加工过程中,占鱼体重量约 10%~15% 的内脏器官常被作为废弃物直接丢弃,不仅造成严重的环境污染,更导致其蕴含的高价值鱼油资源被浪费。前期研究表明,鲢鱼内脏鱼油中 ω-3 多不饱和脂肪酸(PUFAs)含量高达 34.9%,尤其是二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)等长链 PUFAs 比例突出,ω-3/ω-6 比值达 1.7,显著高于一般淡水鱼并接近海水鱼水平[2]。富含 PUFAs 和单不饱和脂肪酸(MUFAs)的鱼油,已被证实具有多项健康益处,包括保护心血管系统、发挥抗炎作用、提升认知功能,以及可能对神经退行性疾病产生缓解效果[3−4]。鱼油按来源可分为海洋和淡水鱼油。淡水鱼油中相对含量较高的 C18:2 n-6(亚油酸,LNA)和 C20:4 n-6(花生四烯酸,ARA)来自淡水藻类和陆地饲料。相比之下,C20:5 n-3 和 C22:6 n-3 是海洋鱼油中的主要脂肪酸成分[5]。但目前大多数研究侧重于海洋鱼油,忽略了淡水鱼油[6]。此外,鱼油中高含量的 n-3 多不饱和脂肪酸,如 EPA 和 DHA,虽是其发挥健康功效的核心活性成分,但同时其在热加工过程及储存期间易发生氧化降解与异构化反应。氧化会生成反式脂肪酸(如反式亚麻酸)等有害物质,直接降低产品食用安全性与品质稳定性,这已成为鲢鱼鱼油产业化开发的核心技术瓶颈。

磷脂(Phospholipids, PLs)是鲢鱼内脏鱼油最重要的脂类之一[7]。磷脂是一类由甘油骨架、两个脂肪酸在甘油骨架的 Sn-1 和 Sn-2 位置酯化构成疏水尾部以及一个由磷酸残基(Sn-3 位)连接的极性头基组成的化合物[8],亲水极性头基包括乙醇胺、胆碱、甘油、肌醇和丝氨酸,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)和磷脂酰甘油(Phosphatidylglycerol, PG)等几种主要的甘油磷脂[9]。甘油磷脂是最主要的极性脂,也是生物体中含量最多的一类磷脂,主要存在于动物体的脑、肝脏、卵巢等多种器官中。磷脂富含活性脂质如 EPA,可以抑制内源性甘油三酯和胆固醇的合成,降低动脉粥样硬化因子水平,减少动脉内膜厚度[10] 等作用,广泛应用于食品[11]、医药等行业。适量摄入富含 EPA 和 DHA 的磷脂可以有效降低高血脂症等慢性疾病的发病率[12−14]。脂肪酸在磷脂中的酰化位置分布与鱼的种类、养殖环境、组织部位等密切相关,且酰化位置的不同会直接影响其在人体的消化和吸收[15]。磷脂 Sn-2 位含有丰富的 LC-PUFA,如 ARA、EPA 和 DHA,在促进动物生长、免疫、性腺发育和繁殖性能中发挥着重要作用[16]。目前,尽管鲢鱼鱼油磷脂的营养潜力已被初步认识,其在氧化过程中分子结构的变化规律及脂肪酸位置特异性响应仍缺乏系统研究。特别是在热处理或储运条件下,磷脂分子中不同 sn-位脂肪酸的氧化敏感性与降解路径尚不明确,这严重限制了鲢鱼鱼油磷脂在食品与医药领域的精准开发与质控实践。

本研究以鲢鱼内脏为原料,超声辅助有机试剂提取技术制备鱼油,采用磷脂组学系统解析磷脂分子

组成及其脂肪酸在甘油磷脂骨架不同酰化位点的分布特征。通过烘箱模拟加速氧化条件，探究氧化胁迫对磷脂分子脂肪酸氧化的影响规律，以期为抑制有害物质生成、提升产品稳定性与营养保留率提供理论依据，助力鲢鱼加工副产物的高值化利用与产业化应用。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

鲜活鲢鱼　从南昌市的天虹商场所购买；环己烷、正己烷、正戊烷、氢氧化钠　分析纯，甲醇、甲酸、乙腈、异丙醇　色谱级，广东西陇化工有限公司。

DHG-9023A 型电热恒温鼓风干燥机　上海一恒科学仪器有限公司；KH-500DE 型数控超声波清洗器　昆山禾创超声仪器有限公司；JCS-21002C 型精密电子分析天平　上海然浩电子有限公司；N-1100 旋转蒸发仪　上海爱朗仪器有限公司；UHPLC 液相色谱系统、Q-ExactiveHF-X 型质谱仪　Thermo Scientific 公司；TD5Z 低速离心机、TGL-18M 高速台式冷冻离心机　上海卢湘仪离心机仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　鲢鱼内脏粗鱼油提取　参考张权等[17]方法，略作修改。鲜活鲢鱼在遵守实验动物伦理指导下，采用木棍敲击头部致死。鱼体解剖后内脏去除胆汁并收集鲢鱼内脏。称取 100 g 搅碎的鲢鱼内脏置于 500 mL 离心杯中，按照料液比 1∶3 的比例加入正己烷，充分混匀，双层保鲜膜封口密封，50 ℃，300 W 超声水浴处理 30 min。超声结束后在 4000 r/min，室温下离心 15 min，收集上清液。然后使用旋转蒸发仪在 50 ℃ 下脱除正己烷，得到鲢鱼内脏鱼油。用无水硫酸钠对鲢鱼内脏鱼油进行过滤脱水。除去无水硫酸钠后，得到的鱼油在 4 ℃ 冷藏备用。

1.2.2　鲢鱼内脏油加速氧化及磷脂测定　鱼油样品在 0、3、6、9、12、16、20 d 的 60 ℃ 烘箱中（5% 以下湿度）进行加速氧化，取样进行磷脂组学分析[18]。将 5 μL 的液体样品吸入 1.5 mL 离心管中，加入 400 μL 的萃取液（乙腈∶甲醇=1∶1），涡旋混合 30 s 后，低温超声萃取 30 min（5 ℃，40 kHz），然后静置 30 min 后，高速离心机（13000×g，4 ℃）离心 15 min，去除上清，氮气干燥。加入 100 μL 配合液（乙腈∶水=1∶1）再溶出，低温超声提取 5 min（5 ℃，40 kHz），4 ℃，13000×g 离心 5 min，上清液内插管转入注射瓶（2 mL），上机（2 μL）分析。将所有等体积样品的代谢物混合制成质控样品（QC）。在仪器分析中，每三个样品中插入一个 QC 样品，以调查整个分析过程的重复能力，提高分析脂质谱的灵敏度、准确性和适用性。LC-MS/MS 分析的仪器平台为 Thermo Ferre 的超高效液相色谱-串联傅里叶变换质谱 UHPLC-Q 萃取系统。

色谱条件：样品采用 HSS T3 色谱柱（100 mm×2.1 mm，直径 1.8 μm）分离，质谱法检测。流动相 A 为 95% 水+5% 乙腈（含 0.1% 甲酸），流动相 B 为 47.5% 乙腈+47.5% 异丙醇+5% 水（含 0.1% 甲酸）。分离梯度：0~0.1 min，流动相 B 为 0%~5%；0.1~2.0 min，流动相 B 为 5%~25%；2.0~9.0 min，流动相 B 为 25%~100%；9.0~13.0 min，流动相 B 保持 100%；13.0~13.1 min，流动相 B 从 100% 下降到 0%；13.1~16.0 min，流动相 B 保持 0%。流速为 0.40 mL/min，柱温为 40 ℃。

质谱条件：采用正负离子扫描方式采集样品质量谱信号，质量扫描范围为 m/z：70~1050。离子喷雾电压，正离子电压 3500 V，负离子电压 2800 V，护套气 40 psi，辅助加热气 10 psi，离子源加热温度 400 ℃，20-40-60 V 循环碰撞能量，MS_1 分辨率 70000，MS_2 分辨率 17500。采用 DDA 正离子和负离子模式收集数据，提高脂质覆盖率。

进样完成后，将 LC-MS/MS 原始数据导入代谢组学处理软件 Lipidsearch（Thermo Fisher，USA），进行基线滤波、峰识别、积分、保留时间校正、峰对准，最终得到保留时间、质荷比、峰强度的数据矩阵。同时，MS/MS 质谱信息与公共数据库的代谢 MDB（http://www.hmdb.ca/）和 Metlin（https://metlin.scripps.edu/）及 beauty 自代谢物信息进行匹配得到数据库。

将来自云平台（https://cloud.majorbio.com）的建库后矩阵数据，用于 auspicious life 平台进行数据分析对数据进行处理。数据矩阵采用 80% 规则去除缺失值，即在至少一组样本中保留非零值大于 80% 的变量，然后填充间隙值（原矩阵中的最小值填充间隙值）。为了减小样品制备和仪器不稳定性带来的误差，采用归一化方法对样本质谱峰的响应强度进行归一化。得到归一化数据矩阵。同时，删除 QC 样品中相对标准偏差（RSD）>30% 的变量，进行 $\log_{10}$ 逻辑化，得到最终的数据矩阵，选取磷脂分子数据用于后续分析。

1.3　数据处理

所有实验均进行 3 次平行，描述性统计值使用平均值±标准偏差表示。实验数据用 Origin 2021 绘图，SPSS 16.0 统计软件对数据进行单因素方差分析（ANOVA）。显著性差异分析采用 Duncan 检验，P<0.05 为差异显著。

2　结果与分析

2.1　鲢鱼内脏油的磷脂脂肪酸分子组成分析

2.1.1　磷脂组学技术鉴定烘箱加速氧化鱼油磷脂轮廓　磷脂组学作为脂质组学的核心研究领域，聚焦于系统性解析磷脂（PLs）的分子组成、空间结构及其在生物过程中的动态调控机制[19]。研究基于磷脂组学技术，对 0、3、6、9、12、16 及 20 d 60 ℃ 加速氧化处理的鲢鱼内脏鱼油磷脂谱进行比较分析。如图 1 所示，不同氧化时间下磷脂组成谱呈现阶段性

演变特征：由图 1A 可知，GP 含量随氧化时间延长呈持续上升趋势。0~20 d 内，GP 含量从初始约 2690 $\log_{10}$(峰面积)逐步增加，至 20 d 时接近 2735 $\log_{10}$(峰面积)；其中 16~20 d 阶段上升速率显著加快，表明氧化进程可能通过促进甘油磷脂合成或其他磷脂组分的降解转化，导致 GP 持续积累。图 1B 显示，SP 含量呈现“稳定-下降-急剧上升”的阶段性特征。0~3 d 内，SP 含量维持在约 244 $\log_{10}$(峰面积)的稳定水平；3~16 d 期间，含量逐渐下降至约 240 $\log_{10}$(峰面积)并保持稳定；16~20 d 时，SP 含量快速上升至接近 247.7$\log_{10}$(峰面积)。该趋势表明氧化后期可能存在鞘磷脂的特异性合成/富集机制，或与其他脂质组分氧化分解为鞘磷脂提供前体有关。对于 ST(图 1C)，其含量变化表现为“快速上升-缓慢下降”的动态特征。0~6 d 内，ST 含量从约 5.6 $\log_{10}$(峰面积)迅速上升至近 5.9 $\log_{10}$(峰面积)；6~12 d 继续上升至峰值，约 6.2 $\log_{10}$(峰面积)；随后 12~20 d，ST 含量逐渐下降，但仍高于初始水平，反映氧化过程中甾醇酯可能先因合成积累增加，后因氧化降解或转化而减少的代谢规律。

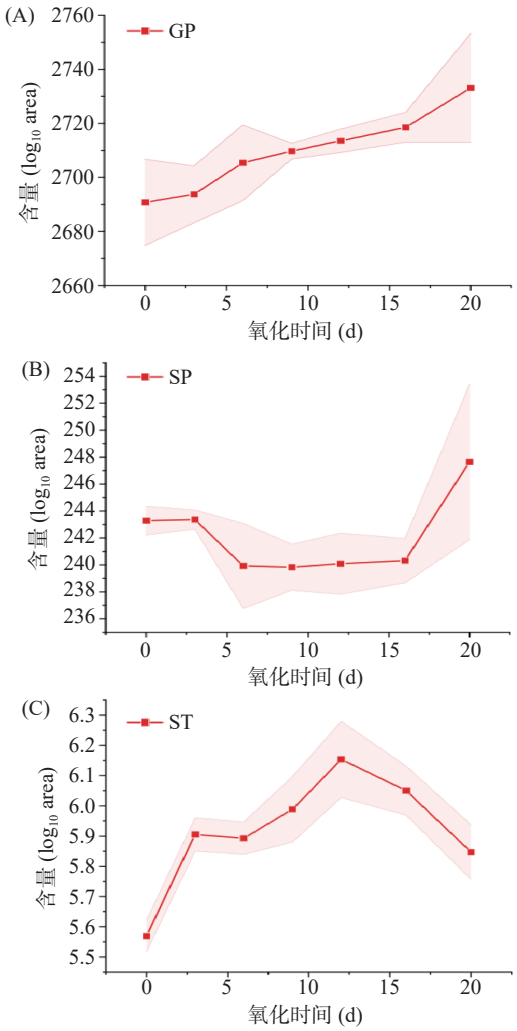


图 1 烘箱加速氧化鲢鱼鱼油磷脂轮廓变化图

Fig.1 Oven-accelerated oxidation of fish oil phospholipid profile

注：(A)烘箱加速氧化鲢鱼鱼油甘油磷脂含量变化；(B)烘箱加速氧化鲢鱼鱼油鞘磷脂含量变化；(C)烘箱加速氧化鲢鱼鱼油甾醇酯含量变化；阴影表示标准差(SD)。

此种动态变化可能与氧化进程密切相关：氧化进程通过调控脂质代谢酶活性、自由基介导的脂质分子攻击及代谢物间的转化，对不同脂质组分产生差异化影响[20]。对于甘油磷脂(GP)，氧化过程中磷脂酶(如磷脂酶 A_2 等)被激活，而磷脂酶 A_2 可特异性作用于甘油磷脂的 Sn-2 位，促使甘油磷脂通过 Sn-2 位酰基水解生成溶血磷脂等氧化中间产物[21]，这些中间产物在代谢中积累，直接推动 GP 含量升高；在此基础上，一方面氧化促进甘油磷脂的从头合成，另一方面其他磷脂组分(如鞘磷脂等)降解产生的甘油二酯、磷酸胆碱等前体物质，进一步为甘油磷脂合成提供充足底物；尤其在氧化后期(16~20 d)，氧化应激持续增强进一步上调甘油磷脂合成相关酶(如 CTP：磷酸胆碱胞苷转移酶)的活性，同时其他磷脂降解速率加快，多重机制共同推动 GP 含量快速积累。

鞘磷脂(SP)的变化则体现氧化不同阶段的代谢平衡与补偿：氧化前期(0~3 d)，氧化程度较低，鞘磷脂的合成与降解速率处于动态平衡，含量稳定；氧化中期(3~16 d)，自由基对鞘磷脂分子的攻击增强，酸性鞘磷脂酶等水解酶活性上升，促使 SP 降解为神经酰胺等产物，导致其含量下降；而氧化后期(16~20 d)，鞘磷脂合成酶被氧化应激信号激活，同时甘油磷脂降解释放的磷酸胆碱等为 SP 合成提供充足前体，进而推动 SP 含量急剧回升。甾醇酯(ST)的“先升后降”则与氧化进程中合成与降解有关：氧化前期，氧化应激激活酰基辅酶 A-胆固醇酰基转移酶(ACAT)等合成酶，促进胆固醇与脂肪酸酯化生成 ST，同时甘油磷脂水解释放的游离脂肪酸为 ST 合成提供酰基供体，使其含量快速上升；随着氧化进程持续(12~20 d)，ST 分子中的不饱和脂肪酸侧链受自由基攻击发生氧化降解，且 ACAT 活性因长期氧化应激受到抑制，最终导致 ST 含量缓慢下降，但由于前期积累效应，其水平仍高于初始值。

2.1.2 PCA 分析 基于主成分分析(PCA)对不同氧化时间(0、3、6、9、12、16、20 d)鱼油的甘油磷脂和鞘磷脂组成进行差异化解析，结果显示各时间点样本在 PC 空间呈现显著的组间离散分布，表明氧化处理对磷脂组成具有显著影响(图 2A、图 2B)。其中，D_0 组与 D_20 组鱼油在所有 PCA 得分图中均表现出独立于其他时间点的分布特征，表明此两个时间点的磷脂组成与氧化过程中(3~16 d)样本存在显著差异。在甘油磷脂组成分析中，D_6、D_9、D_12 和 D_16 组样本在 PC1-PC2 空间形成紧密的簇状聚集，与 D_0 和 D_20 组在 PC2 轴方向呈现明显分离。该 PCA 模型的主成分 PC1 和主成分 PC2 分别占据 38.9% 和 17.29% 的变量差异，累积贡献率达 56.19%，表明前两个主成分能够有效捕捉甘油磷脂组成的核心变异信息。鞘磷脂组成的 PCA 模型表现出更强

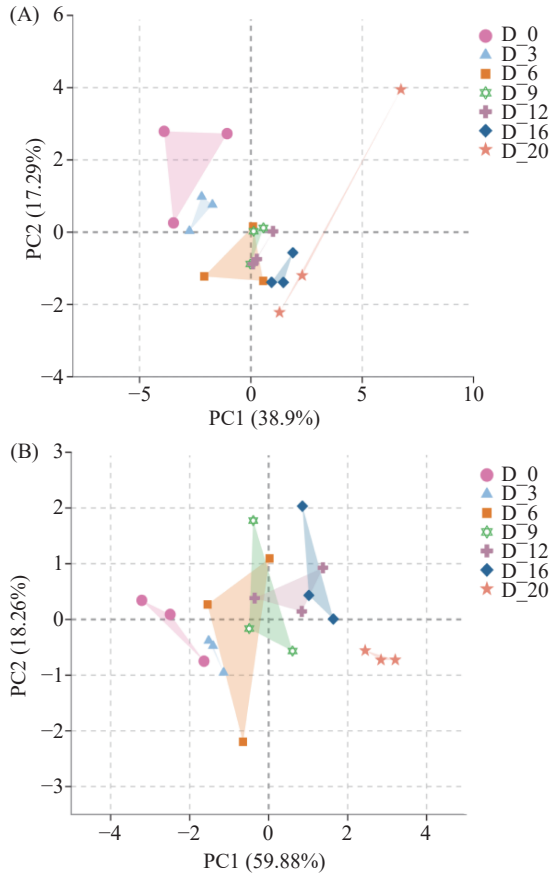


图 2　烘箱加速氧化鲢鱼鱼油磷脂 PCA 图

Fig.2　PCA diagram of accelerated oxidation of silver carp fish oil phospholipids in an oven

注：(A)甘油磷脂；(B)鞘磷脂；图 3 同。

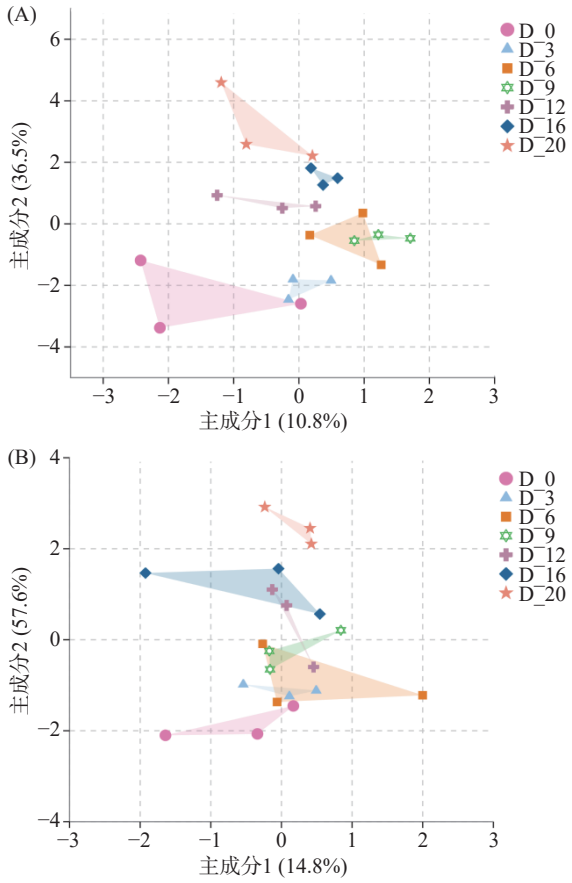


图 3　烘箱加速氧化鲢鱼鱼油磷脂 OPLS-DA 图

Fig.3　Oven accelerated oxidation of silver carp fish oil phospholipids OPLS-DA diagram

的解释能力，主成分 PC1(59.88%)和主成分 PC2(18.26%)累计占据 78.14% 的组间差异，D_3、D_6、D_9、D_12 和 D_16 组的样本比较接近，说明这五类样本的鞘磷脂组成具有相似性，且这五类样本与 D_0 组(氧化初始)和 D_20 组(氧化终末)在 PC1 轴方向存在显著分离，反映出氧化中期(3~16 d)鞘磷脂组成的相对稳定性及与初末期样本的差异性。上述结果表明，甘油磷脂与鞘磷脂的组成均随烘箱加速氧化时间发生显著变化，且各自的主成分能有效捕捉氧化进程中的核心变异，反映出氧化对鲢鱼鱼油磷脂组成的调控具有组分特异性。

2.1.3　OPLS-DA 分析　偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA)作为一种监督判别分析方法，有助于分析样本分类变量[22]。在分析不同烘箱加速氧化时间的油样磷脂组成时，OPLS-DA 的得分图能够清晰地展示样本间的差异。如图 4 所示，Q^2 回归线与垂直轴的交点在 0 以下，表明模型不存在过度拟合，模型得到验证[23]。从图 3(A)来看，D_0、D_3、D_9、D_12、D_16 和 D_20 组的油样呈现出明显的离散分布，表明它们在甘油磷脂组成上存在显著差异。D_6 组鱼油和 D_9 组鱼油在甘油磷脂成分上表现出最高的相似性。由图 3(B)图可知，D_3、D_6、D_9、D_12 和 D_16 组油样鞘磷脂 OPLS-DA 图有重叠，

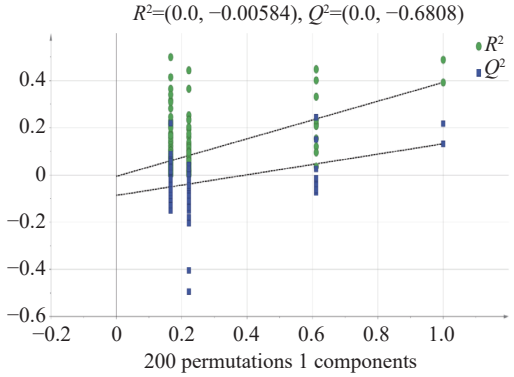


图 4　烘箱加速氧化鲢鱼鱼油磷脂 OPLS-DA 置换校验图

Fig.4　Oven accelerated oxidation of silver carp fish oil phospholipids OPLS-DA displacement verification diagram

但 D_20 与其他组显著分离。表明 D_3、D_6、D_9、D_12 和 D_16 鞘磷脂鱼油更为接近，而与 D_20 组差异较大。这与 PCA 分析结果一致，进一步验证了烘箱加速氧化显著影响鲢鱼鱼油的磷脂组成。

2.2　烘箱加速氧化鲢鱼内脏油磷脂的脂肪酸组成分析

鲢鱼内脏鱼油在加速氧化烘箱中的磷脂含量变化如图 5 所示。鲢鱼内脏鱼油的磷脂主要为 GP 和 SP，其中 PE 是 GP 的主要成分，神经酰胺(Cer)是 SP 的主要成分。基于磷脂组学技术对 D_0(氧化初期)、D_3、D_6、D_9、D_12、D_16 及 D_20 组鱼油

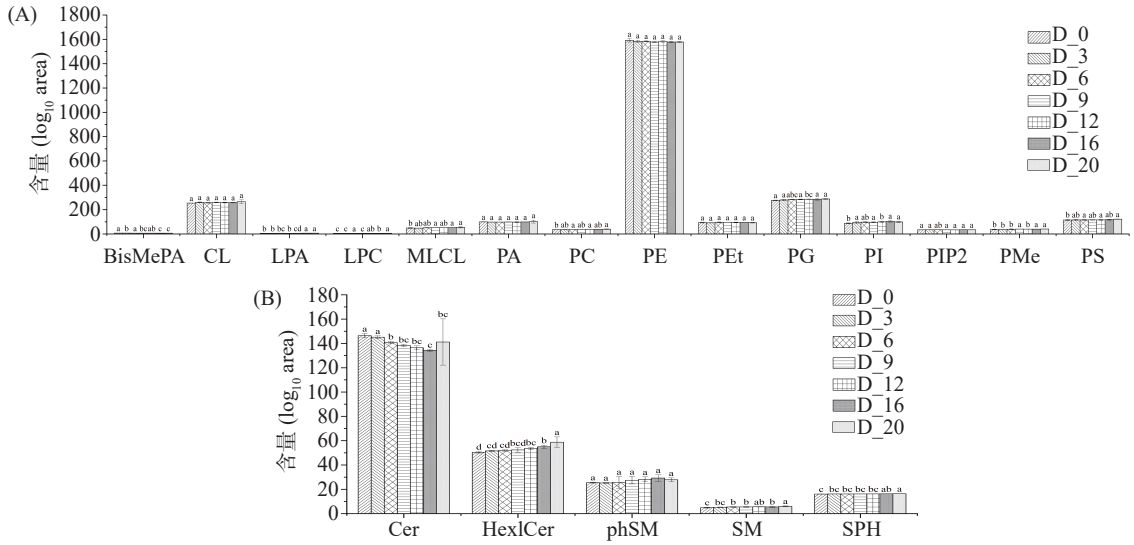


图 5 烘箱中加速氧化鱼油磷脂含量的变化

Fig.5 Accelerated oxidation of changes in the phospholipid content of fish oil in the oven

注:(A)GP 含量变化;(B)SP 含量变化; BisMePA, 二甲基磷脂酸; CL, 心磷脂; LPA, 溶血磷脂酸; LPC, 溶血磷脂酰胆碱 MLCL, 单溶心磷脂; PA, 磷脂酸; PC, 磷脂酰胆碱; PE, 磷脂酰乙醇胺; PEt, 磷脂酰乙醇; PG, 磷脂酰甘油; PI, 磷脂酰肌醇; PIP2, 磷脂酰肌醇; PMe, 磷脂酰甲醇; PS, 磷脂酰丝氨酸; Cer, 神经酰胺; Hex1Cer, 糖基神经酰胺; phSM, 植物鞘磷脂; SM, 鞘磷脂; SPH, 鞘氨醇; AcHexStE, 酰基豆甾醇酯。

的磷脂分子组成进行深度分析,结果显示在鲢鱼内脏鱼油加速氧化过程中,GP 和 SP 脂质含量均有明显差异。随着加热时间的延长,在 GP 中,溶血磷脂酸(LPA)、溶血磷脂酰胆碱(LPC)和磷脂酰甲醇(PMe)的含量逐渐升高(P<0.05),二甲基磷脂酸(BisMePA)显著降低(P<0.05)。在 SP 中,鞘磷脂(phSM)在整个加热过程中保持稳定(P>0.05),而简单 Glc 系列己糖神经酰胺(Hex1Cer)、鞘磷脂(SM)和鞘磷脂(SPH)在整个加热过程中显著升高(P<0.05),神经酰胺(Cer)在加热过程中呈下降趋势(P<0.05)。

上述结果表明,烘箱加热诱导的氧化胁迫显著扰动了鲢鱼内脏鱼油的磷脂分子稳态:甘油磷脂中的溶血磷脂及信号分子磷脂对氧化胁迫响应敏感,其含量变化可能反映了磷脂酶介导的水解反应及氧化诱导的酰基链断裂[24];鞘磷脂类的 Hex1Cer 和 SM 作为膜结构关键组分,其含量波动表明氧化过程对细胞鞘脂代谢通路的干扰[25]。磷脂分子的此种动态演变特征,为解析鱼油氧化过程的分子机制及筛选氧化标志物提供了直接证据。

2.3 烘箱加速氧化鲢鱼内脏油磷脂的脂肪酸位置分布分析

磷脂分子结构由甘油骨架构成,Sn-3 位连接磷酸基团,Sn-1 和 Sn-2 位分别酯化 1~2 个脂肪酸[26]。磷脂组学显示,在鲢鱼内脏油磷脂分子中鉴定出 82 种脂肪酸,包括 30 种 SFA、23 种 MUFA 和 29 种 PUFA,其组成分布和氧化动态分别如图 6 和表 1~表 3 所示。

为探究烘箱加速氧化过程中鲢鱼鱼油磷脂各位置(Sn-1、Sn-2、Sn-3、Sn-4)脂肪酸的组成与动态变化,研究对 0~20 d 氧化周期内 Sn-1 至 Sn-4 位的 SFA、MUFA 和 PUFA 进行了定量分析(图 6A~图 6D)。Sn-1 位以 SFA 为主(56.01%~56.91%),在整个氧化过程中保持稳定,显示出较强的抗氧化性;MUFA 占比为 33.55%~34.38%,变化不显著(P>0.05);PUFA 占比最低(9.54%~9.80%),含量变化显著(P<0.05)。Sn-2 位的 SFA 占比(41.79%~42.60%)明显低于 Sn-1 位,但仍为主要组分;MUFA 相对稳定(24.16%~24.46%);PUFA 占比最高(32.94%~33.44%)。Sn-3 位 SFA 占比为 51.67%~52.63%,略低于 Sn-1 位;MUFA 占比明显增加(37.37%~38.97%),成为第二大组分;PUFA 占比最低(8.40%~10.23%),在氧化 3 d 时出现短暂下降后恢复稳定,表明初期可能存在轻微降解。Sn-4 位 SFA 占比为 42.82%~44.00%,仍居主导;MUFA 次之(36.90%~38.95%);PUFA 则呈持续上升趋势(17.68%~19.10%),与其他位点趋势不同,推测存在向 Sn-4 位的选择性迁移或特异性代谢调控。

不同鱼油磷脂的脂肪酸位置分布存在差异,可能与鱼种、饲料和加工方式有关。例如,无须鳕鱼油中 SFA 富集于 Sn-2 位[27],而本研究的鲢鱼内脏油中 MUFA 主要分布于 Sn-1 和 Sn-3 位;Cui 等[28] 报道 DHA 主要富集于 PL 的 Sn-2 位,与本研究中 Sn-2 位 PUFA 富集的特征一致。此类差异可能影响鱼油的氧化稳定性与营养价值。上述位置分布差异可能与磷脂分子的空间构型、脂肪酸与氧化介质的可接触性以及磷脂酶催化的区域选择性有关。本研究还发现,鲢鱼内脏油磷脂中 SFA 和 MUFA 分别以棕榈酸(C16:0)和油酸(C18:1 n9)为主,与鲑鱼副产品的研究[29] 及崔宁等[30] 研究的四种来源鱿鱼内脏中甘油磷脂的脂肪酸位置分布规律相似。与此同时,Sn-2 位

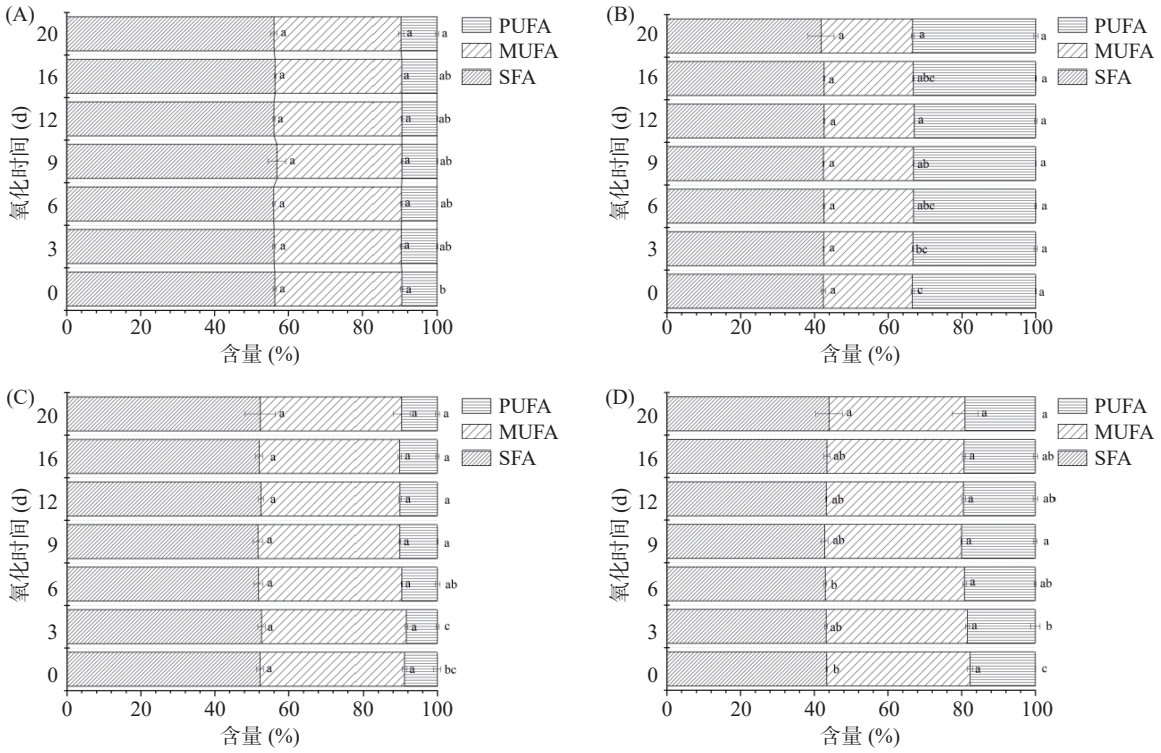


图 6　烘箱加速氧化鲢鱼鱼油磷脂不同位置 SFA、PUFA 和 MUFA 含量

Fig.6　Oven accelerated oxidation of different positions of SFA, PUFA, and MUFA content in carp fish oil phospholipids

注：(A)Sn-1 位 SFA、PUFA 和 MUFA 含量变化；(B)Sn-2 位 SFA、PUFA 和 MUFA 含量变化；(C)Sn-3 位 SFA、PUFA 和 MUFA 含量变化；(D)Sn-4 位 SFA、PUFA 和 MUFA 含量变化。

表 1　烘箱加速氧化鲢鱼鱼油鱼油磷脂 Sn-1 脂肪酸组成及含量变化($\log_{10}$ 峰面积)

Table 1　Oven accelerated oxidation of silver carp fish oil, fish oil phospholipids, Sn-1 fatty acid composition and content changes ($\log_{10}$ area)

脂肪酸	0 d	3 d	6 d	9 d	12 d	16 d	20 d
$C_{4:0}$	16.922±0.140^{b}	17.020±0.011^{ab}	17.105±0.090^{a}	17.020±0.065^{ab}	17.053±0.150^{ab}	17.059±0.065^{ab}	17.068±0.030^{ab}
$C_{6:0}$	5.569±0.091^{b}	5.905±0.095^{ab}	5.893±0.093^{ab}	5.989±0.188^{ab}	6.154±0.219^{a}	5.717±0.678^{ab}	5.847±0.157^{ab}
$C_{8:0}$	122.770±0.289^{a}	121.354±1.559^{a}	122.513±0.684^{a}	121.176±1.277^{a}	122.877±0.255^{a}	122.279±0.767^{a}	122.008±0.501^{a}
$C_{9:0}$	15.821±0.084^{a}	15.787±0.058^{a}	15.457±0.556^{a}	15.743±0.084^{a}	15.626±0.055^{a}	15.680±0.054^{a}	15.636±0.029^{a}
$C_{10:0}$	73.478±2.492^{a}	72.388±0.624^{a}	71.040±2.556^{a}	72.527±0.551^{a}	71.369±0.765^{a}	72.731±0.749^{a}	73.027±0.609^{a}
$C_{11:0}$	9.455±2.918^{ab}	7.940±0.819^{a}	10.800±3.114^{ab}	12.629±0.174^{b}	12.353±0.593^{b}	12.172±0.855^{b}	11.266±1.934^{ab}
$C_{12:0}$	158.450±0.767^{a}	156.858±1.357^{a}	156.839±0.538^{a}	157.253±1.842^{a}	157.774±2.519^{a}	156.815±1.809^{a}	155.013±6.724^{a}
$C_{14:0}$	136.715±2.868^{a}	135.915±1.282^{a}	135.069±2.204^{a}	180.808±77.718^{a}	132.040±1.731^{a}	131.806±1.184^{a}	129.829±5.255^{a}
$C_{15:0}$	94.176±0.889^{a}	92.940±0.935^{a}	92.712±1.644^{a}	92.361±0.672^{a}	93.660±0.841^{a}	93.135±1.220^{a}	93.823±0.458^{a}
$C_{16:0}$	223.315±1.183^{b}	225.413±1.128^{b}	225.045±1.173^{b}	225.870±3.981^{b}	225.647±3.047^{b}	228.497±1.941^{b}	234.707±7.068^{a}
$C_{17:0}$	20.592±0.214^{a}	19.236±0.654^{a}	19.090±1.103^{a}	19.766±0.831^{a}	19.270±0.620^{a}	20.057±0.918^{a}	20.901±1.707^{a}
$C_{18:0}$	117.752±1.818^{a}	117.351±2.636^{a}	119.294±3.497^{a}	118.413±3.163^{a}	119.624±3.752^{a}	121.684±3.457^{a}	120.510±2.607^{a}
$C_{19:0}$	22.084±0.685^{c}	22.243±0.871^{bc}	23.957±1.115^{ab}	23.436±1.499^{abc}	24.423±0.936^{a}	23.687±0.739^{abc}	25.051±0.316^{a}
$C_{20:0}$	79.737±4.915^{b}	82.362±2.270^{ab}	80.974±0.950^{ab}	81.913±0.225^{ab}	81.993±2.052^{ab}	85.097±1.730^{a}	85.126±3.096^{a}
$C_{21:0}$	18.525±1.152^{c}	19.824±0.258^{ab}	19.429±0.262^{bc}	18.624±0.595^{c}	19.779±0.443^{ab}	20.314±0.427^{ab}	20.909±0.748^{a}
$C_{22:0}$	21.690±0.533^{a}	21.519±0.269^{a}	22.035±0.091^{a}	22.190±0.166^{a}	21.934±0.165^{a}	22.046±0.140^{a}	21.616±0.965^{a}
$C_{23:0}$	24.551±1.726^{bc}	23.802±0.520^{c}	27.251±3.285^{ab}	28.908±0.309^{a}	29.316±1.020^{a}	29.222±0.867^{a}	29.959±1.320^{a}
$C_{24:0}$	44.651±1.763^{a}	45.195±0.601^{a}	44.131±0.680^{a}	45.793±0.279^{a}	44.056±0.200^{a}	45.172±2.069^{a}	45.048±1.345^{a}
$C_{25:0}$	42.618±0.770^{b}	43.985±0.434^{ab}	43.129±0.749^{b}	43.447±0.457^{b}	43.955±0.831^{ab}	45.973±1.761^{a}	45.481±1.666^{a}
$C_{26:0}$	110.482±1.044^{a}	110.357±0.357^{a}	109.511±2.206^{ab}	109.731±1.478^{ab}	106.920±2.778^{b}	107.740±1.348^{ab}	109.530±0.884^{ab}
$C_{27:0}$	42.965±0.449^{b}	43.659±0.577^{ab}	43.092±0.823^{ab}	44.318±1.550^{ab}	43.630±0.840^{ab}	45.502±1.693^{a}	44.460±2.007^{ab}
$C_{28:0}$	96.600±2.354^{a}	95.745±2.693^{a}	96.031±1.230^{a}	96.708±1.243^{a}	98.803±0.898^{a}	96.103±3.870^{a}	95.732±2.256^{a}
$C_{29:0}$	22.322±0.675^{a}	21.717±1.823^{ab}	20.235±1.258^{ab}	21.087±1.180^{ab}	19.705±0.322^{b}	21.497±2.034^{ab}	20.923±0.603^{ab}
$C_{30:0}$	31.657±1.213^{b}	32.828±0.338^{ab}	32.810±1.270^{ab}	32.752±0.332^{ab}	33.583±0.464^{a}	33.448±0.777^{a}	33.594±0.978^{a}
$C_{31:0}$	22.473±0.217^{a}	22.835±1.879^{a}	22.613±1.335^{a}	22.309±0.498^{a}	22.404±0.340^{a}	22.450±0.829^{a}	22.435±0.271^{a}

续表 1

脂肪酸	0 d	3 d	6 d	9 d	12 d	16 d	20 d
$C_{33:0}$	15.754±1.241^{a}	15.615±0.676^{a}	15.163±0.392^{a}	16.003±0.776^{a}	15.807±1.431^{a}	15.156±1.307^{a}	15.020±1.585^{a}
$C_{34:0}$	16.148±0.106^{a}	15.414±0.595^{ab}	15.132±0.814^{ab}	15.542±0.822^{ab}	14.871±0.114^{b}	15.201±0.711^{ab}	15.809±0.433^{ab}
$C_{36:0}$	7.825±0.107^{a}	7.737±0.017^{ab}	7.709±0.003^{ab}	7.743±0.056^{ab}	7.724±0.032^{ab}	7.610±0.189^{b}	7.720±0.034^{ab}
$C_{37:0}$	5.807±0.043^{a}	6.000±0.138^{a}	6.149±0.388^{a}	5.865±0.012^{a}	5.987±0.077^{a}	6.061±0.184^{a}	5.951±0.116^{a}
$C_{38:0}$	33.031±0.291^{a}	32.746±0.272^{a}	32.889±0.093^{a}	32.839±0.104^{a}	32.910±0.024^{a}	32.785±0.117^{a}	32.955±0.102^{a}
SFA	1653.936±11.155^{a}	1651.687±9.657^{a}	1653.096±9.479^{a}	1708.763±59.149^{a}	1661.247±6.877^{a}	1672.698±6.610^{a}	1676.954±20.168^{a}
$C_{8:1}$	68.786±0.915^{a}	68.049±0.288^{a}	68.562±0.457^{a}	67.518±0.153^{a}	67.984±0.614^{a}	66.727±0.517^{a}	66.430±0.815^{b}
$C_{10:1}$	15.011±0.243^{a}	14.742±0.078^{a}	14.753±0.083^{a}	14.652±0.079^{a}	14.778±0.019^{a}	14.738±0.096^{a}	14.680±0.081^{a}
$C_{12:1}$	21.368±0.727^{a}	21.543±0.156^{a}	21.555±0.034^{a}	21.515±0.109^{a}	21.616±0.158^{a}	21.609±0.123^{a}	21.477±0.023^{a}
$C_{14:1}$	31.904±0.686^{a}	31.916±0.467^{a}	32.078±0.343^{a}	31.823±0.257^{a}	31.607±0.427^{a}	31.714±0.636^{a}	31.495±0.479^{a}
$C_{16:1}$	107.381±1.318^{a}	103.090±3.396^{ab}	104.099±2.287^{ab}	101.713±2.425^{ab}	103.213±0.773^{ab}	98.817±3.040^{b}	102.363±6.648^{ab}
$C_{17:1}$	51.299±1.162^{a}	51.687±0.520^{a}	51.512±0.286^{a}	51.973±0.261^{a}	52.203±1.111^{a}	51.339±0.860^{a}	52.561±4.781^{a}
$C_{18:1}$	193.235±3.564^{d}	200.279±6.014^{cd}	203.645±2.629^{bc}	200.299±2.322^{cd}	208.447±5.229^{bc}	211.441±3.253^{ab}	218.468±8.972^{a}
$C_{19:1}$	27.536±0.475^{a}	26.437±0.654^{abc}	26.179±0.911^{abc}	25.663±0.649^{abc}	25.185±0.863^{bc}	24.501±0.425^{c}	27.013±2.466^{ab}
$C_{20:1}$	38.229±3.020^{ab}	36.728±0.205^{b}	40.239±2.410^{a}	41.046±0.200^{a}	40.499±0.616^{a}	41.007±0.689^{a}	40.174±1.255^{a}
$C_{21:1}$	22.851±0.043^{a}	22.642±0.262^{ab}	22.479±0.271^{abc}	22.139±0.306^{cd}	21.943±0.173^{de}	22.241±0.035^{bcd}	21.685±0.305^{e}
$C_{22:1}$	16.026±0.105^{a}	15.730±0.351^{ab}	15.923±0.046^{a}	15.795±0.063^{ab}	15.868±0.042^{a}	15.761±0.192^{ab}	15.357±0.484^{b}
$C_{23:1}$	12.114±0.450^{a}	11.756±0.214^{a}	11.535±0.600^{a}	11.729±0.627^{a}	11.607±0.473^{a}	11.938±0.799^{a}	11.836±1.261^{a}
$C_{24:1}$	7.544±0.096^{a}	7.393±0.061^{b}	7.395±0.035^{b}	7.385±0.044^{b}	7.389±0.021^{b}	7.370±0.031^{b}	7.366±0.017^{b}
$C_{25:1}$	17.527±0.651^{b}	20.208±2.183^{ab}	20.248±1.161^{ab}	20.406±2.284^{ab}	21.598±0.703^{a}	19.382±1.026^{ab}	20.646±1.648^{a}
$C_{26:1}$	62.801±0.708^{a}	62.741±0.781^{a}	63.863±0.575^{a}	62.758±0.505^{a}	63.081±0.657^{a}	63.647±1.047^{a}	63.127±1.054^{a}
$C_{27:1}$	27.874±0.323^{a}	27.559±0.251^{a}	26.629±0.413^{a}	27.352±0.971^{a}	28.099±1.528^{a}	26.560±0.827^{a}	27.275±0.470^{a}
$C_{28:1}$	89.153±0.518^{a}	88.879±1.158^{a}	89.560±0.395^{a}	88.223±1.463^{ab}	89.242±1.078^{a}	89.069±0.998^{a}	86.545±0.713^{b}
$C_{29:1}$	40.367±1.119^{a}	40.749±1.600^{a}	39.331±1.221^{a}	39.290±0.441^{a}	40.060±1.253^{a}	39.401±1.525^{a}	40.308±1.088^{a}
$C_{30:1}$	84.328±0.874^{abc}	84.868±1.340^{ab}	84.946±0.935^{ab}	85.251±1.752^{a}	84.482±1.649^{abc}	82.729±1.244^{bc}	82.074±0.889^{c}
$C_{31:1}$	52.549±1.067^{a}	53.959±2.367^{a}	53.718±1.487^{a}	54.053±2.326^{a}	53.415±1.496^{a}	53.069±1.541^{a}	52.849±0.828^{a}
$C_{33:1}$	14.468±0.900^{a}	14.234±1.273^{a}	14.651±0.625^{a}	15.071±0.659^{a}	15.018±1.301^{a}	13.799±0.684^{a}	15.537±0.447^{a}
MUFA	1002.349±9.416^{a}	1005.189±7.427^{a}	1012.898±4.432^{a}	1005.654±3.226^{a}	1017.331±5.332^{a}	1006.859±1.352^{a}	1019.265±18.066^{a}
$C_{11:2}$	6.184±0.324^{b}	6.853±0.507^{ab}	7.300±0.633^{ab}	7.311±1.047^{ab}	7.050±0.819^{ab}	6.729±1.240^{ab}	7.702±0.262^{a}
$C_{11:4}$	5.788±0.096^{b}	6.485±0.298^{ab}	6.710±0.932^{a}	6.682±0.202^{a}	6.690±0.153^{a}	6.431±0.128^{ab}	7.129±0.391^{a}
$C_{12:3}$	5.503±0.062^{b}	5.708±0.244^{ab}	5.555±0.026^{ab}	5.910±0.042^{ab}	5.957±0.164^{ab}	6.021±0.086^{ab}	6.278±0.993^{a}
$C_{14:2}$	4.809±0.486^{b}	4.882±0.561^{b}	4.837±0.315^{b}	4.878±0.626^{b}	4.775±0.319^{b}	5.302±0.065^{ab}	5.952±0.390^{a}
$C_{14:3}$	13.086±0.240^{a}	12.882±0.279^{ab}	12.114±0.250^{ab}	11.993±0.431^{ab}	11.703±0.626^{ab}	11.261±0.053^{b}	12.230±2.256^{ab}
$C_{14:4}$	6.055±0.430^{c}	7.924±2.553^{bc}	9.347±2.863^{ab}	11.573±0.393^{a}	11.789±0.273^{a}	11.725±0.562^{a}	10.921±1.776^{a}
$C_{16:2}$	13.790±0.644^{a}	14.159±0.438^{a}	13.464±0.823^{a}	13.157±0.699^{a}	13.108±0.309^{a}	12.466±0.272^{a}	13.243±1.923^{a}
$C_{18:2}$	49.707±1.016^{a}	52.234±0.273^{a}	50.794±1.897^{a}	49.828±0.820^{a}	50.210±1.163^{a}	50.965±1.792^{a}	53.151±4.362^{a}
$C_{18:3}$	34.916±0.339^{abc}	33.762±0.649^{cd}	35.651±1.097^{ab}	35.362±0.562^{ab}	33.199±1.414^{d}	34.589±0.519^{bcd}	36.203±0.766^{a}
$C_{18:4}$	23.869±0.396^{a}	23.450±0.165^{b}	23.525±0.080^{b}	23.467±0.114^{b}	23.471±0.036^{b}	23.340±0.200^{b}	23.375±0.048^{b}
$C_{19:2}$	18.139±1.848^{a}	18.417±0.102^{a}	17.177±0.214^{a}	17.096±1.080^{a}	16.669±0.834^{a}	16.661±0.494^{a}	17.313±3.018^{a}
$C_{20:3}$	7.365±0.139^{a}	7.255±0.093^{ab}	7.270±0.042^{ab}	7.251±0.052^{ab}	7.270±0.038^{ab}	7.266±0.057^{ab}	7.209±0.023^{b}
$C_{20:5}$(EPA)	14.029±0.729^{ab}	14.531±0.422^{a}	13.561±0.693^{b}	14.378±0.516^{ab}	14.356±0.373^{ab}	14.511±0.213^{ab}	14.661±0.265^{a}
$C_{22:2}$	14.287±0.019^{a}	14.289±0.333^{a}	14.206±0.310^{a}	14.154±0.358^{a}	13.339±0.530^{b}	14.392±0.091^{a}	14.123±0.636^{a}
$C_{22:3}$	15.431±0.445^{ab}	14.940±0.821^{b}	15.281±0.457^{ab}	15.938±0.310^{a}	15.079±0.068^{ab}	15.754±0.578^{ab}	15.439±0.252^{ab}
$C_{22:4}$	15.337±0.539^{a}	15.569±0.501^{a}	15.643±0.407^{a}	14.813±1.114^{a}	15.759±0.340^{a}	15.200±0.846^{a}	15.830±0.158^{a}
$C_{22:6}$(DHA)	15.803±0.082^{a}	15.645±0.048^{b}	15.621±0.061^{b}	15.551±0.055^{b}	15.444±0.071^{c}	15.421±0.029^{c}	15.320±0.008^{d}
$C_{24:2}$	17.341±0.049^{a}	17.150±0.055^{bc}	17.192±0.054^{b}	17.107±0.025^{c}	17.005±0.059^{d}	16.987±0.010^{d}	16.900±0.034^{e}
PUFA	281.440±1.224^{b}	286.135±3.103^{ab}	285.247±1.811^{ab}	286.448±2.899^{ab}	282.873±2.982^{ab}	285.020±0.245^{ab}	292.980±10.318^{a}

注: 同行不同字母表示差异显著(P<0.05), 表2、表3同。

高度富集 PUFA(32.94%~33.44%), 主要包括 C11:3、C11:4、C18:2、C18:3 和 DHA(C22:6)。一般认为, 含有更多不饱和脂肪酸的脂质更容易氧化, 尤其是含有更长不饱和脂肪酸的脂质。富含长链多不饱和脂肪酸(例如 EPA 和 DHA)以适应寒冷环境的海洋鱼油与淡水鱼油相比表现出较低的氧化稳定性[5]。本研究结果显示, C11:3、C11:4 与 C18:3 在 Sn-2 位随氧化时间延长而下降(P<0.05)。Sn-1 位 DHA 因立体暴露易受自由基攻击, 含量显著降低(P<0.05), 而 Sn-2 位 DHA 因受位阻保护仍保持稳定。在氧化过程中, Sn-2 与 Sn-4 位 PUFA 富集可能由磷脂酶的区域选择性水解-再酯化所驱动; Sn-2 位 PUFA 因氧化

表 2　烘箱加速氧化鲢鱼鱼油鱼油磷脂 Sn-2 脂肪酸组成及含量变化（$\log_{10}$ 峰面积）

Table 2　Oven accelerated oxidation of silver carp fish oil, fish oil phospholipids, Sn-2 fatty acid composition and content changes ($\log_{10}$ area)

脂肪酸	0 d	3 d	6 d	9 d	12 d	16 d	20 d
$C_{4:0}$	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
$C_{6:0}$	40.612±0.690^{a}	51.507±0.182^{ab}	50.174±0.641^{c}	51.767±0.350^{ab}	50.837±0.540^{bc}	51.752±0.274^{ab}	51.677±0.522^{ab}
$C_{8:0}$	40.612±0.690^{a}	40.487±0.122^{a}	40.927±0.604^{a}	40.599±0.975^{a}	40.391±0.936^{a}	40.813±0.806^{a}	39.878±0.871^{a}
$C_{9:0}$	22.719±0.467^{c}	22.893±0.124^{c}	23.007±0.186^{bc}	23.039±0.161^{bc}	23.326±0.285^{abc}	23.733±0.283^{a}	23.622±0.339^{ab}
$C_{10:0}$	13.823±0.071^{a}	13.438±0.117^{a}	13.912±0.290^{a}	13.483±0.432^{a}	14.077±0.444^{a}	13.613±0.456^{a}	13.742±0.328^{a}
$C_{11:0}$	22.386±0.143^{a}	23.107±1.175^{a}	21.745±0.343^{a}	21.391±1.125^{a}	22.959±1.549^{a}	22.110±0.193^{a}	21.756±0.460^{a}
$C_{12:0}$	280.165±4.242^{a}	283.860±3.266^{a}	290.814±1.747^{a}	291.951±1.474^{a}	294.036±1.858^{a}	298.031±1.098^{a}	250.395±72.750^{a}
$C_{14:0}$	62.017±0.621^{a}	62.757±0.697^{a}	62.213±0.537^{a}	62.817±0.852^{a}	63.310±0.780^{a}	61.435±2.340^{a}	60.940±1.057^{a}
$C_{15:0}$	123.395±0.858^{a}	120.847±1.827^{ab}	120.775±1.648^{ab}	116.199±3.747^{b}	121.736±0.418^{ab}	118.012±3.380^{ab}	117.054±3.062^{b}
$C_{16:0}$	60.846±0.851^{a}	59.355±0.344^{a}	59.830±0.110^{a}	59.281±1.030^{a}	59.141±0.232^{a}	58.705±0.369^{a}	58.281±2.530^{a}
$C_{17:0}$	305.873±3.853^{a}	309.024±2.052^{a}	308.167±4.139^{a}	312.800±2.367^{a}	308.641±2.019^{a}	311.829±1.040^{a}	313.934±7.855^{a}
$C_{18:0}$	14.317±0.087^{a}	13.970±0.201^{ab}	13.803±0.290^{ab}	13.455±0.170^{ab}	13.304±0.046^{b}	13.310±0.019^{b}	13.724±0.927^{ab}
$C_{19:0}$	44.907±0.861^{b}	45.192±0.646^{b}	44.987±0.020^{b}	45.474±0.672^{b}	46.478±1.378^{ab}	46.323±0.308^{ab}	48.561±2.396^{a}
$C_{20:0}$	5.390±0.064^{ab}	5.298±0.378^{abc}	5.030±0.353^{bc}	4.678±0.015^{c}	5.208±0.167^{abc}	5.780±0.077^{a}	5.797±0.534^{a}
$C_{21:0}$	19.005±0.244^{a}	18.964±0.358^{a}	18.282±0.224^{a}	18.208±0.357^{a}	18.079±0.390^{a}	17.580±0.161^{a}	19.502±2.231^{a}
$C_{22:0}$	17.722±0.631^{c}	19.218±1.429^{bc}	20.725±0.741^{ab}	21.176±1.032^{ab}	20.870±0.676^{ab}	21.033±0.561^{ab}	22.197±0.241^{a}
$C_{23:0}$	44.876±0.174^{b}	44.517±0.559^{b}	45.577±0.824^{ab}	44.816±0.845^{b}	43.894±0.900^{b}	43.804±0.748^{b}	47.949±2.803^{a}
$C_{24:0}$	55.073±2.051^{a}	57.238±0.651^{a}	57.464±1.354^{a}	57.153±1.580^{a}	56.355±1.409^{a}	58.081±0.834^{a}	57.576±1.053^{a}
SFA	1292.172±14.824^{a}	1296.682±2.388^{a}	1302.682±6.688^{a}	1302.106±4.313^{a}	1309.908±3.060^{a}	1312.245±3.455^{a}	1276.375±87.943^{a}
$C_{11:1}$	32.184±0.340^{a}	32.308±0.057^{a}	31.176±1.494^{a}	31.872±0.255^{a}	32.164±0.668^{a}	32.415±0.194^{a}	32.528±0.195^{a}
$C_{14:1}$	7.816±0.446^{a}	7.711±0.319^{a}	7.960±0.041^{a}	7.596±0.448^{a}	7.986±0.018^{a}	7.328±0.444^{a}	7.958±0.007^{a}
$C_{16:1}$	97.311±0.903^{a}	98.386±2.952^{a}	98.091±0.762^{a}	98.577±1.178^{a}	97.629±2.262^{a}	96.927±1.699^{a}	95.501±1.648^{a}
$C_{17:1}$	44.279±0.507^{b}	45.885±0.822^{a}	46.772±0.415^{a}	46.864±0.201^{a}	46.356±0.617^{a}	46.760±0.624^{a}	47.180±0.804^{a}
$C_{18:1}$	360.820±4.578^{d}	361.907±3.577^{cd}	365.627±3.683^{bcd}	369.285±3.453^{abcd}	372.553±1.376^{ab}	369.810±2.964^{abc}	377.617±5.452^{a}
$C_{19:1}$	6.305±0.524^{a}	6.835±0.263^{a}	6.577±0.225^{a}	6.547±0.039^{a}	6.222±0.086^{a}	5.979±0.019^{a}	6.465±0.921^{a}
$C_{20:1}$	18.395±2.364^{ab}	16.442±0.695^{b}	19.276±2.894^{ab}	21.423±0.377^{a}	20.080±0.457^{a}	20.455±0.092^{a}	20.299±1.516^{a}
$C_{21:1}$	21.463±0.370^{a}	21.356±0.163^{a}	20.642±0.510^{a}	20.891±1.007^{a}	20.976±1.208^{a}	20.744±0.184^{a}	21.022±0.519^{a}
$C_{22:1}$	38.729±0.375^{ab}	38.687±0.355^{ab}	39.081±0.190^{a}	38.160±0.385^{b}	38.862±0.049^{a}	38.954±0.077^{a}	38.934±0.059^{a}
$C_{23:1}$	13.244±0.691^{b}	14.236±0.269^{ab}	14.592±0.355^{ab}	13.617±1.134^{ab}	15.395±1.098^{a}	14.221±1.003^{ab}	15.594±1.085^{a}
$C_{24:1}$	95.882±0.863^{a}	95.470±0.662^{a}	95.556±1.409^{a}	94.635±1.858^{a}	93.822±0.730^{a}	92.212±0.853^{a}	94.540±3.563^{a}
MUFA	736.427±9.043^{c}	739.222±4.219^{bc}	745.349±0.895^{bc}	749.468±2.565^{ab}	752.045±1.793^{a}	745.804±4.206^{abc}	757.639±8.392^{a}
$C_{10:2}$	7.900±0.069^{a}	7.755±0.047^{b}	7.751±0.052^{b}	7.696±0.017^{bc}	7.697±0.021^{bc}	7.684±0.010^{bc}	7.651±0.006^{c}
$C_{10:3}$	15.969±0.119^{a}	15.262±0.879^{a}	16.101±0.158^{a}	15.251±0.899^{a}	16.012±0.160^{a}	16.131±0.173^{a}	16.088±0.154^{a}
$C_{10:4}$	14.538±0.088^{a}	14.171±0.296^{a}	14.428±0.135^{a}	14.152±0.125^{a}	14.128±0.234^{a}	14.609±0.222^{a}	14.098±0.683^{a}
$C_{11:2}$	40.106±0.422^{a}	39.523±0.183^{a}	39.574±0.061^{b}	39.428±0.108^{b}	39.403±0.064^{b}	39.332±0.116^{b}	39.197±0.036^{b}
$C_{11:3}$	114.335±0.633^{a}	112.474±0.695^{b}	112.229±0.568^{bc}	112.210±0.505^{bc}	111.084±0.223^{c}	111.515±0.822^{bc}	111.495±0.426^{bc}
$C_{11:4}$	113.787±0.654^{a}	112.643±0.795^{ab}	112.331±0.881^{b}	111.457±0.527^{b}	111.704±0.363^{b}	112.047±0.614^{b}	111.486±0.484^{b}
$C_{14:3}$	14.637±0.175^{b}	15.270±0.706^{ab}	14.768±0.242^{b}	15.965±0.617^{a}	14.559±0.048^{b}	15.252±0.819^{ab}	14.475±0.217^{b}
$C_{14:4}$	7.840±0.591^{a}	7.866±0.770^{a}	7.815±0.687^{a}	8.410±0.142^{a}	8.042±0.774^{a}	7.253±0.978^{a}	8.555±0.044^{a}
$C_{18:2}$	150.189±4.443^{c}	153.299±4.490^{bc}	154.750±3.507^{bc}	156.728±2.711^{bc}	158.432±2.161^{ab}	164.119±1.559^{a}	165.069±1.404^{a}
$C_{18:3}$	198.982±1.058^{a}	196.313±0.195^{bc}	196.242±0.547^{bc}	195.778±0.468^{bc}	196.410±1.809^{bc}	197.154±1.024^{ab}	193.830±1.724^{c}
$C_{18:4}$	50.699±0.587^{a}	50.186±1.025^{a}	50.743±0.537^{a}	50.488±0.818^{a}	50.290±0.546^{a}	49.421±1.377^{a}	48.947±0.655^{a}
$C_{20:2}$	7.383±0.130^{a}	7.253±0.041^{ab}	7.273±0.025^{ab}	7.282±0.036^{ab}	7.255±0.077^{ab}	7.243±0.058^{ab}	7.181±0.014^{b}
$C_{20:3}$	14.569±0.430^{ab}	14.322±0.325^{ab}	13.786±0.526^{b}	14.364±0.453^{ab}	14.268±0.545^{ab}	14.292±0.432^{ab}	14.905±0.467^{a}
$C_{20:4}$	50.097±0.320^{a}	50.334±0.500^{a}	49.868±0.905^{a}	50.385±0.153^{a}	50.302±0.164^{a}	49.793±0.216^{a}	51.241±3.199^{a}
$C_{20:5}$（EPA）	28.139±0.102^{a}	28.246±0.271^{a}	28.225±0.335^{a}	28.641±0.196^{a}	25.114±4.716^{a}	27.657±0.585^{a}	23.034±3.922^{a}
$C_{22:2}$	11.932±0.530^{a}	12.673±0.223^{a}	12.460±0.454^{a}	12.073±0.301^{a}	12.129±0.455^{a}	12.704±0.428^{a}	13.195±1.263^{a}
$C_{22:5}$	39.774±0.438^{a}	40.231±1.268^{a}	39.969±0.460^{a}	40.090±0.238^{a}	39.733±0.402^{a}	39.780±0.207^{a}	41.306±2.407^{a}
$C_{22:6}$（DHA）	96.447±1.259^{a}	96.830±1.506^{a}	96.330±0.112^{a}	96.540±0.431^{a}	95.168±0.778^{a}	95.939±0.573^{a}	95.952±2.167^{a}
$C_{24:2}$	24.374±1.416^{a}	24.935±0.470^{a}	23.646±0.365^{a}	24.188±0.067^{a}	25.211±0.910^{a}	23.908±0.537^{a}	25.139±1.853^{a}
$C_{24:3}$	6.042±0.692^{a}	6.080±0.141^{a}	5.710±0.084^{a}	5.475±0.298^{a}	5.116±0.027^{a}	5.144±0.019^{a}	5.630±0.921^{a}
$C_{24:4}$	5.609±0.302^{a}	5.344±0.110^{a}	5.187±0.085^{a}	4.969±0.471^{a}	5.169±0.364^{a}	5.384±0.243^{a}	5.262±0.997^{a}
$C_{26:2}$	5.601±0.427^{a}	5.578±0.306^{a}	5.672±0.158^{a}	5.888±0.278^{a}	5.753±0.355^{a}	5.755±0.346^{a}	6.227±0.790^{a}
PUFA	980.542±2.817^{a}	979.398±9.736^{a}	976.579±5.119^{a}	980.359±1.851^{a}	975.142±7.680^{a}	983.691±4.247^{a}	982.125±14.416^{a}

表 3 烘箱加速氧化鲢鱼鱼油鱼油心磷脂和单溶血心磷脂 Sn-3/4 脂肪酸组成及含量变化（log_{10} 峰面积）

Table 3 Oven accelerated oxidation of silver carp fish oil, fish oil phospholipids, Sn-3/4 fatty acid composition and content changes (log_{10} area)

脂肪酸	0 d	3 d	6 d	9 d	12 d	16 d	20 d
$C_{12:0}$	27.725±0.140^{b}	28.264±0.289^{b}	27.347±0.507^{b}	27.385±0.959^{b}	28.297±1.110^{b}	28.847±0.577^{b}	31.513±1.690^{a}
$C_{14:0}$	24.729±0.812^{b}	26.880±2.472^{b}	28.177±2.968^{ab}	30.952±1.327^{a}	31.017±1.257^{a}	31.722±0.621^{a}	31.453±0.466^{a}
$C_{16:0}$	52.428±0.205^{a}	54.037±0.94^{a}	52.605±0.849^{a}	52.407±2.005^{a}	54.293±1.473^{a}	51.854±0.474^{a}	51.903±4.149^{a}
$C_{18:0}$	34.476±1.005^{a}	33.680±0.766^{ab}	32.687±0.668^{abc}	32.202±0.069^{abc}	30.918±0.599^{c}	31.203±1.163^{bc}	32.522±2.284^{abc}
$C_{20:0}$	12.565±0.299^{ab}	12.655±0.259^{ab}	12.562±0.138^{ab}	12.254±0.029^{ab}	12.367±0.163^{ab}	12.093±0.143^{b}	13.532±1.346^{a}
$C_{22:0}$	6.440±0.200^{a}	6.309±0.265^{a}	5.720±0.215^{a}	5.954±0.367^{a}	5.712±0.271^{a}	5.487±0.024^{a}	5.969±0.921^{a}
SFA	158.363±2.204^{a}	161.825±2.479^{a}	159.098±2.891^{a}	161.153±3.265^{a}	162.604±1.777^{a}	161.205±2.641^{a}	166.893±10.666^{a}
$C_{16:1}$	37.087±0.566^{a}	37.263±0.266^{a}	36.185±0.846^{ab}	36.221±0.482^{ab}	36.164±0.613^{ab}	35.107±0.527^{b}	34.785±0.814^{b}
$C_{18:1}$	62.729±1.477^{b}	64.077±0.364^{ab}	64.615±0.848^{ab}	64.369±0.633^{ab}	61.738±1.227^{b}	63.154±1.052^{ab}	67.113±3.976^{a}
$C_{20:1}$	6.388±0.559^{ab}	6.706±0.371^{ab}	5.824±0.673^{b}	6.692±0.317^{ab}	6.540±0.298^{ab}	6.698±0.112^{ab}	6.914±0.148^{a}
$C_{24:1}$	11.589±0.041^{a}	11.789±0.177^{a}	11.729±0.156^{a}	11.780±0.091^{a}	11.357±0.653^{a}	12.178±0.143^{a}	12.485±1.243^{a}
MUFA	117.793±1.525^{a}	119.835±0.811^{a}	118.352±0.345^{a}	119.061±0.462^{a}	115.800±0.853^{a}	117.137±1.029^{a}	121.296±5.891^{a}
$C_{18:2}$	13.333±0.548^{a}	13.508±0.709^{a}	13.836±0.131^{a}	13.914±0.251^{a}	13.820±0.556^{a}	13.819±0.223^{a}	14.175±0.727^{a}
$C_{22:3}$	2.539±2.239^{bc}	0.975±0.032^{c}	4.499±1.975^{ab}	5.853±0.143^{a}	5.603±0.469^{a}	5.491±0.694^{ab}	4.708±1.399^{ab}
$C_{22:6}$(DHA)	11.135±0.318^{a}	11.358±0.259^{a}	11.293±0.447^{a}	11.936±0.131^{a}	12.007±0.317^{a}	12.401±0.274^{a}	11.995±1.464^{a}
PUFA	27.007±2.393^{bc}	25.840±0.986^{c}	29.629±1.608^{abc}	31.703±0.268^{a}	31.430±0.073^{a}	31.710±1.082^{a}	30.877±1.416^{a}

敏感和易酶解而含量波动；SFA 则因化学惰性和酶抗性始终保持位置稳定。整体上，C18:1 含量随氧化时间延长而上升，尤其在 Sn-1、Sn-3 和 Sn-4 位分布显著（P<0.05），推测因 Sn-1 位 SFA（如 C16:0）优先水解释放并重新酯化所致。各位置脂肪酸的响应差异体现出甘油磷脂在代谢上的可塑性，也为阐释鱼油氧化的位点特异性机制提供了关键依据。

3 结论

本研究通过磷脂组学技术系统解析了鲢鱼内脏鱼油氧化降解过程中磷脂分子组成及其在甘油骨架上的脂肪酸位置分布变化特征。多元统计分析显示，不同加速氧化时间（0、3、6、9、12、16、20 d）的磷脂谱呈现显著时序性分异：氧化初始组（D-0）与终末组（D-20）在主成分分析（PCA）中完全独立于其他时间点（3~16 d），表明氧化中期（3~16 d）磷脂组成的相对稳定性及与初末期样本的差异性。磷脂中脂肪酸的位置分布呈现明确规律：SFA 主要富集于 Sn-1,3 位，MUFA 大多分布在 Sn-1 和 Sn-3/4 位（心磷脂和单溶血心磷脂），而 PUFA 特异性分布于 Sn-2 位。C18:1 在 Sn-2 位的含量高于 Sn-1 位，且随氧化持续上升；Sn-1 位饱和脂肪酸（如 C16:0）优先水解。DHA（C22:6）在 Sn-2 位具有较高氧化稳定性，而在 Sn-1 位含量随氧化显著下降，其余大部分 PUFA（如 C11:3、C11:4 和 C18:3）在 Sn-2 位因氧化敏感性而呈下降趋势，磷脂中 SFA 的位置分布在氧化过程中整体保持稳定。鲢鱼鱼油磷脂中 Sn-1 位 MUFA 与 Sn-2 位 PUFA 构成氧化敏感部位。研究揭示了鱼油氧化过程中磷脂脂肪酸位置分布的变化模式，为理解鱼油营养价值的氧化依赖性变化提供了分子层面的依据。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 任中阳, 龙斯宇, 康宁哲, 等. 鲢鱼糜漂洗液中不同回收方式肌浆蛋白的结构和功能特性[J]. 食品科学, 2024, 45(7): 225−232. [REN Zhongyang, LONG Siyu, KANG Ningzhe, et al. Structural and functional properties of sarcoplasmic proteins from silver carp surimi wash water recovered by different methods[J]. Food Science, 2024, 45(7): 225−232.]

[2] 王海磊, 罗庆华, 黄美娥, 等. 鲢鱼内脏油提取方法的比较研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(24): 248−252,257. [WANG Hailei, LUO Qinghua, HUANG Meie, et al. Study on comparison of extraction methods on fish oil from the viscera of silver carp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(24): 248−252, 257.]

[3] TUNG T H, LAI W D, LEE H C, et al. Attenuation of chronic stress-induced depressive-like symptoms by fish oil via alleviating neuroinflammation and impaired tryptophan metabolism in aging rats[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(40): 14550−14561.

[4] SASAKI N, JONES L E, CARPENTER D O. Fish consumption and omega-3 polyunsaturated fatty acids from diet are positively associated with cognitive function in older adults even in the presence of exposure to lead, cadmium, selenium, and methylmercury: A cross-sectional study using NHANES 2011-2014 data[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2024, 119(2): 283−293.

[5] PARZANINI C, COLOMBO S M, KAINZ M J, et al. Discrimination between freshwater and marine fish using fatty acids: Ecological implications and future perspectives[J]. Environmental Reviews, 2020, 28(4): 546−559.

[6] HASHIM N A, ABDUL M S K, SULAIMAN S Z, et al. Nutritional values and microencapsulation techniques of fish oil from different sources: A mini review[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 42: 222−228.

［7］ LI Jinlin, YUAN Liping, WENG Linlin, et al. Integration of lipidomics and flavoromics reveals the lipid-flavor transformation mechanism of fish oil from silver carp visceral with different enzymatic hydrolysis[J]. Food Chemistry, 2025, 477: 143507.
［8］ ALHAJJ M J, MONTERO N, YARCE C J, et al. Lecithins from vegetable, land, and marine animal sources and their potential applications for cosmetic, food, and pharmaceutical sectors[J]. Cosmetics, 2020, 7(4): 87.
［9］ HU X, DUAN G X, LIU L J, et al. Advances in phospholipid content, function, separation, and detection technologies in milk and dairy products[J]. Food Science, 2021, 19(42): 351−361.
［10］ BERGE R K, RAMSVIK M S, BOHOV P, et al. Krill oil reduces plasma triacylglycerol level and improves related lipoprotein particle concentration, fatty acid composition and redox status in healthy young adults-a pilot study[J]. Lipids in Health and Disease, 2015, 14(1): 163.
［11］ BERNASCHINA M, LESER M E, LIMBACH H J, et al. Lentil protein stabilized emulsion-Impact of lecithin addition on emulsions properties[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109337.
［12］ DING Lin, ZHANG Lingyu, WEN Min, et al. Eicosapentaenoic acid-enriched phospholipids improve atherosclerosis by mediating cholesterol metabolism[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 32: 90−97.
［13］ PAROLINI C, BJORNDAL B, BUSNELLI M, et al. Effect of dietary components from Antarctic krill on atherosclerosis in apoE-deficient mice[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2017, 61(12): 1700098.
［14］ RUNDBLAD A, HOLVEN K B, BRUHEIM I, et al. Effects of krill oil and lean and fatty fish on cardiovascular risk markers: A randomised controlled trial[J]. Journal of Nutritional Science, 2018, 7: e3.
［15］ 李金林, 胡祥飞, 万亮, 等. 三种淡水鱼不同部位中甘油三酯脂肪酸的位置分布[J]. 食品工业科技, 2023, 44(10): 290−296. ［LI Jinlin, HU Xiangfei, WAN Liang, et al. Positional distribution of fatty acids in triglycerides from different parts of three freshwater fish[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(10): 290−296.］
［16］ ZHAO Y, CHEN Y Q, BONACCI T M, et al. Identification and characterization of a major liver lysophosphatidylcholine acyltransferase[J]. Journal of Biological Chemistry, 2008, 283(13): 8258−8265.
［17］ 张权, 吴思纷, 宁舒娴, 等. 3 种淡水鱼内脏粗鱼油品质及挥发性风味成分分析比较[J]. 食品工业科技, 2023, 44(2): 342−351. ［ZHANG Quan, WU Sifen, NING Shuxian, et al. Analysis and comparison on the quality and volatile flavor components of crude fish oil from the viscera of three freshwater fishes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(2): 342−351.］
［18］ PENG Bin, LI Jinlin, YU Chengwei, et al. Lipidomics profile and volatile compounds of squids (*Illex argentinus, Ommastrephes Bartram* and *Dosidicus gigas*) in the Argentine, North Pacific Ocean, Equator and Peru by UPLC-triple TOF-MS and HS-SPME-GC-O-MS[J]. Food Research International, 2024, 189: 114559.
［19］ 王杰. 低盐三文鱼方便食品加工过程中磷脂组学与品质变化研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2021. ［WANG Jie. Study on the changes of phospholipids and quality during the processing of low-salt salmon convenience food[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2021.］
［20］ YU Ting, CHEN Yuke, CHEN Xiumei, et al. The effect of oxidized fish oil on lipid metabolism in *Rhynchocypris lagowski* Dybowski[J]. Aquaculture Reports, 2020, 17: 100388.
［21］ MAKIDE K, UWAMIZU A, SHINJO Y, et al. Novel lysophosphoplipid receptors: Their structure and function[J]. Journal of Lipid Research, 2014, 55(10): 1986−1995.
［22］ 彭斌, 徐林菊, 余诚玮, 等. 脂质组学解析草鱼肉在低温冷藏中的脂质变化[J]. 食品工业科技, 2024, 45(20): 23−33. ［PENG Bin, XU Linju, YU Chengwei, et al. Lipidomics analysis of lipid changes in grass fish during cold storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(20): 23−33.］
［23］ WANG Renjie, LIU Yu, WANG Yongcheng, et al. Characterization of the flavor profile of four major Chinese carps using HS-SPME-GC-MS combined with ultra-fasted gas chromatography-electronic nose[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141264.
［24］ 杨苗. 次氯酸对磷脂的气-液界面氧化行为及机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021. ［YANG Miao. Research on oxidation behavior and mechanism of hypochlorous acid on phospholipids at air-liquid interface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.］
［25］ HUA Lingyue, WU Na, ZHAO Ruilin, et al. Sphingomyelin synthase 2 promotes endothelial dysfunction by inducing endoplasmic reticulum stress[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(12): 2861.
［26］ 孙艺铭, 杨嘉璐, 后春静, 等. 椒蒿精油成分随生长时间的 OPLS-DA 分析[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(6): 92−98. ［SUN Yiming, YANG Jialu, HOU Chunjing, et al. Chemometrics analysis of the components of *Artemisia dracunculus* L. essential oil with growth time[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(6): 92−98.］
［27］ TENGKU-ROZAINA T M, BIRCH E J. Positional distribution of fatty acids on hoki and tuna oil triglycerides by pancreatic lipase and ^{13}C NMR analysis[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2014, 116(3): 272−281.
［28］ CUI Jingtao, JIANG Xueming, ZHANG Weimin, et al. Positional characterization of DHA/EPA in triacylglycerol and phospholipid and production of DHA/EPA-rich phospholipid[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 129: 106085.
［29］ ZHANG Jing, TAO Ningping, ZHAO Yueliang, et al. Comparison of the fatty acid and triglyceride profiles of big eye tuna (*Thunnus obesus*), Atlantic salmon (*Salmo salar*) and bighead carp (*Aristichthys nobilis*) heads[J]. Molecules, 2019, 24(21): 3983N.
［30］ 崔宁, 李金林, 胡明明, 等. 4 种来源鱿鱼内脏油中甘油三酯和甘油磷脂的脂肪酸组成及位置分布[J]. 中国油脂, 2025, 50(12): 96−105. ［CUI Ning, LI Jinlin, HU Mingming, et al. Composition and positional distribution of fatty acids in triacylglycerols and glycerophospholipids from the viscera oil of four sources squids[J]. China Oils and Fats, 2025, 50(12): 96−105.］