

南极磷虾油氧化稳定性研究进展

余俊文, 朱雪洋, 胡娇娇, 周 圆, 王 旭, 陆圆圆, 谢 丹

(安徽工程大学 生物与食品工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 南极磷虾油是一种富含 $n-3$ 多不饱和脂肪酸的功能性油脂。为提升南极磷虾油的氧化稳定性, 首先简要介绍了影响南极磷虾油氧化稳定性的脂质组成要素, 概括了不同加工方式对南极磷虾油氧化稳定性的影响, 在此基础上详述以传统脂质氧化指标、微量成分含量变化、挥发性成分、脂质组学评估南极磷虾油氧化稳定性的现状。南极磷虾油的脂质劣变机制复杂, 氧化状况评估困难, 未来应筛选出合理化评估南极磷虾油氧化稳定性的方法, 并系统研究其脂质组成与氧化稳定性之间的量效关系。

关键词: 南极磷虾油; 氧化稳定性; 脂质组成; 加工方式; 氧化稳定性评估; 脂质劣变机制

中图分类号: TS225.24; TS201.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7969(2022)09-0084-07

Progress on oxidation stability of Antarctic krill (*Euphausia superba*) oil

YU Junwen, ZHU Xueyang, HU Jiaojiao, ZHOU Yuan, WANG Xu,
LU Yuanyuan, XIE Dan

(College of Biological and Food Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui, China)

Abstract: Antarctic krill oil is a functional oil rich in $n-3$ polyunsaturated fatty acids. In order to improve the oxidation stability of Antarctic krill oil, lipid composition elements influencing the oxidation stability of Antarctic krill oil were introduced firstly in brief, and then the effects of different processing methods on the oxidation stability of Antarctic krill oil were summarized. On this basis, the current situation of evaluating the oxidative stability of Antarctic krill oil by traditional lipid oxidation indexes, changes of trace component content, volatile components and lipidomics was described in detail. The lipid deterioration mechanism of Antarctic krill oil is complex and it is difficult to evaluate the oxidation status. In the future, a reasonable method to evaluate the oxidation stability of Antarctic krill oil should be screened out, and the dose-response relationship between its lipid composition and oxidation stability should be studied systematically.

Key words: Antarctic krill oil; oxidation stability; lipid composition; processing method; oxidation stability evaluation; lipid deterioration mechanism

南极磷虾作为世界上数量最大的单体生物, 分布于整个南大洋, 其营养价值高, 富含高品质蛋白质

和脂质。据估算, 南极磷虾生物量为 6.5 亿 ~ 10 亿 t, 每年的可捕捞量为 6 000 万 ~ 1 亿 t, 相当于全球海洋生物的年总捕捞量^[1]。随着近海渔业资源的日益萎缩, 世界各国逐渐将目光投向远洋渔业, 南极磷虾具有较好的开发价值。

南极磷虾油是以南极磷虾为原料开发的高附加值产品之一。南极磷虾油功能因子丰富, 富含 $n-3$ 多不饱和脂肪酸 ($n-3$ PUFA)、磷脂、虾青素、生育酚、维生素 A 等生理活性成分, 对人体健康具有诸多益处, 可预防心脑血管疾病、抗癌、预防炎症和促

收稿日期: 2021-07-31; 修回日期: 2022-04-07

基金项目: 安徽省自然科学基金项目 (200808QC142); 国家级大学生创新创业训练项目 (202010363057); 安徽工程大学校级科研项目 (Xjky2020063); 安徽工程大学大学生科研项目 (KC22020017)

作者简介: 余俊文 (2000), 男, 在读本科, 研究方向为油脂加工技术 (E-mail) yu2358885632@163.com。

通信作者: 谢 丹, 讲师, 博士 (E-mail) xdawaj@163.com。

进生长发育等^[2]。鱼油是目前市面上应用最为广泛的 $n-3$ PUFA 补充剂,而南极磷虾油已被证明具有比鱼油更好的生物利用度和更高的营养价值^[3]。然而,南极磷虾油脂组成复杂,其加工技术尚未标准化,产品指标缺乏统一性,且评估手段多样化,以至于市面上其产品质量不一,这些因素都使得当前对南极磷虾油氧化稳定性的研究存在困难。基于此,本文首先简要介绍了影响南极磷虾油氧化稳定性的脂质组成要素,概括了不同加工方式对南极磷虾油氧化稳定性的影响,在此基础上对南极磷虾油氧化稳定性的评估现状进行综述,对各种评估方法的特点进行讨论,并指出南极磷虾油的脂质劣变机制的复杂性,旨在为提升南极磷虾油的氧化稳定性及其健康安全使用提供理论参考。

1 南极磷虾油氧化稳定性的影响因素

1.1 脂质组成要素

南极磷虾油富含磷脂、 $n-3$ PUFA、虾青素、生育酚、维生素 A 等生理活性物质,这些活性物质在南极磷虾油氧化过程所呈现的作用不尽相同。

$n-3$ PUFA 是脂质氧化的主要反应底物。二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)是南极磷虾油中主要的 $n-3$ PUFA。与大多数油脂不同,磷脂在南极磷虾油中的含量与甘油三酯相当^[4]。Gigliotti 等^[5]采用薄层色谱法分离了南极磷虾油中的磷脂和甘油三酯,并分别测定了二者的脂肪酸图谱,结果显示,EPA 在磷脂和甘油三酯中的含量比为 120:1,DHA 的为 160:1,证实南极磷虾油中的 EPA 和 DHA 多以磷脂形式存在。磷脂形式存在的 $n-3$ PUFA 比甘油三酯形式的 $n-3$ PUFA 的氧化稳定性更高^[6]。Song 等^[7]对比了不同脂质形式的 EPA、DHA 和体系中生育酚储存 10 周的变化,结果表明,储存 10 周后磷脂组的 EPA 和 DHA 的含量变化不大,只有生育酚衰减较为明显,而甘油三酯组和乙酯组的 EPA 和 DHA 损失较为严重,并且在初始生育酚含量高于磷脂组的条件下,也无法检测到生育酚的存在,因此证实以磷脂形式存在的 EPA 和 DHA 的氧化稳定性明显优于甘油三酯和乙酯形式。磷脂酰胆碱(PC)和磷脂酰乙醇胺(PE)是南极磷虾油中最主要的两种磷脂,分别占总磷脂的 85.37%~95.16% 和 4.84%~12.07%^[8]。有研究指出,在脂质氧化体系中,含伯胺基的 PE 与含羰基的脂质氧化产物可发生美拉德反应,生成一系列非酶褐变产物,其中吡咯作为重要的非酶褐变产物之一,具有一

定的抗氧化性^[9-10]。同时,Lu 等^[11]指出 PE 的氨基相对于游离氨基酸的氨基更容易发生吡咯化,其吡咯化的能力是氨基酸的 10 倍,因此南极磷虾油中的 PE 可能是脂质氧化的重要影响因素之一。此外,虾青素在南极磷虾油中的含量虽只是微量(约 200 mg/100 g)^[12],但其具有抗氧化能力,同时赋予了南极磷虾油更多的生理功能和鲜艳的深红色外观。 α -生育酚也是南极磷虾油中重要的微量活性成分,在维生素 E 同系物中活性最高,其不仅以单体形式存在能够抑制氧化,当与磷脂共存时,两者之间具有协同抗氧化作用^[13],并有研究发现 PE 与 α -生育酚的协同抗氧化作用最优^[14]。维生素 A 作为人体必需的营养素,也具有抗氧化能力,能清除自由基^[15]。此外,为保留磷脂等有益化学成分,南极磷虾油的加工没有像传统食用油脂加工一样的精炼工序,这导致体系中还含有大量的残留氨基酸以及来自磷虾外骨骼残留物质的降解化合物^[16],在加工及储藏过程中,这些成分自身的降解(如游离氨基酸的 Strecker 降解)以及与脂质氧化产物之间的反应也会对南极磷虾油的氧化稳定性产生影响。

1.2 加工方式

作为一种新兴油脂,南极磷虾油的提取工艺尚未标准化。南极磷虾油脂组成复杂,不同的提取工艺易导致南极磷虾油产品组成的差异,进而影响其氧化稳定性。目前,就南极磷虾油的提取而言,以有机溶剂提取法、超临界/亚临界流体萃取法和酶解法最为常用^[17]。

目前,有机溶剂提取法使用率较高,但提取溶剂的不同会对南极磷虾油脂组成造成显著差异。Xie 等^[18]采用油脂工业中常用的 7 种溶剂从南极磷虾粉中提取油脂,发现所提油脂中磷脂、EPA、DHA、虾青素、生育酚等含量存在差异,如表 1 所示。Gigliotti 等^[5]对比了混合溶剂(丙酮和乙醇)一步提取的南极磷虾油和采用丙酮、乙醇顺序提取的南极磷虾油在组成上的差异性,发现顺序提取法中采用乙醇所提取的南极磷虾油中磷脂含量最高,为 32.7%,并且 ABTS 自由基清除实验表明其抗氧化能力也最为突出。Xie 等^[19]采用丙酮、己烷、乙醇分级提取了 3 种磷脂含量递增、微量成分(虾青素、生育酚、维生素 A 和甾醇)含量递减的南极磷虾油,其中磷脂含量最高的南极磷虾油同样展现了最强的 DPPH 自由基清除能力,与 Gigliotti 等^[5]的研究结果相似。

表 1 7 种有机溶剂提取的南极磷虾油的主要活性成分含量

有机溶剂	磷脂/ (g/100 g)	EPA/ %	DHA/ %	虾青素/ (mg/kg)	生育酚/ (mg/100 g)
乙醇	39.2	17.14	11.26	149.85	19.93
异丙醇	38.7	16.82	10.33	167.87	24.48
丙酮	20.6	12.61	8.78	206.74	25.13
乙酸乙酯	32.1	15.43	10.62	116.33	23.92
异己烷	32.0	13.70	9.83	96.29	25.91
正己烷	32.1	13.69	9.42	93.87	26.10
亚临界丁烷	32.1	13.43	9.38	99.40	24.17

超临界流体萃取法具有条件温和、无需溶剂参与等优点。Ali - Nehari 等^[20]对比了超临界 CO₂ 和有机溶剂(己烷)法提取的南极磷虾油,发现超临界 CO₂ 提取的南极磷虾油磷脂含量较低,但 EPA 和 DHA 含量相对较高,同时超临界 CO₂ 法提取的南极磷虾油具有更低的游离脂肪酸含量和过氧化值,这可能是由于超临界更加温和的生产条件减少了南极磷虾油在加工过程中的氧化劣变。此外,Liu 等^[21]以鲜南极磷虾为原料采用亚临界二甲醚提取南极磷虾油,结果显示,与正己烷、乙醇、超临界 CO₂ 和亚临界丁烷相比,亚临界二甲醚提取的南极磷虾油过氧化值最低,虾青素、EPA 和 DHA 含量与乙醇提取的相当,且均高于其他 3 种提取方式的,如表 2 所示。Sun 等^[22]采用亚临界丁烷萃取法、亚临界丁烷 - 二甲醚萃取法、有机溶剂提取法以及 Folch 法提取南极磷虾油并进行分析比较,结果显示,有机溶剂(乙醇)法和 Folch 法对磷脂的提取最有效,但亚临界丁烷所提取的南极磷虾油中虾青素含量高达 940 mg/kg。

表 2 不同提取方法所得产品中虾青素、 α -生育酚、EPA 和 DHA 含量

提取方法	虾青素/ (mg/kg)	α -生育酚/ (mg/100 g)	EPA/ %	DHA/ %
超临界 CO ₂ 萃取	80.55	33.37	11.18	3.76
有机溶剂提取				
正己烷	122.7	49.98	11.92	4.79
乙醇	236.1	35.49	17.83	7.89
亚临界萃取				
亚临界丁烷	127.7	49.87	13.27	6.91
亚临界二甲醚	220.0	39.89	16.38	7.91

酶解法是利用蛋白酶水解“油体”中的蛋白质从而释放油脂。Wang 等^[23]使用 6 种蛋白酶(木瓜蛋白酶、复合蛋白酶、酸性蛋白酶、中性蛋白酶、胰蛋白酶和碱性蛋白酶)水解南极磷虾粉,然后用无水乙醇提取南极磷虾油,并对其得率和品质进行了比较和分析,结果表明,所有蛋白酶组均提高了油脂得

率,其中中性蛋白酶处理组和碱性蛋白酶处理组所获得的南极磷虾油中的磷脂含量较高,碱性蛋白酶组虾青素和生育酚含量最高,酸值较低,综合来说,碱性蛋白酶对南极磷虾油得率和品质的作用更为出众。

综上所述,南极磷虾油的加工方式决定其脂质组成,脂质组成的不同又会造成氧化稳定性的差异,换个角度说,通过对其氧化稳定性的分析,可以在一定程度映射出产品主要成分及其含量、加工技术的有效性和成熟性。目前尽管有个别学者关注到了三者之间相互关联^[5,18],但尚无系统的研究详尽阐述南极磷虾油脂质组成与氧化稳定性之间的量效关系,面对市场上南极磷虾油产品品质的波动化,三者间的链式效应应得到更深的剖析。

2 南极磷虾油氧化稳定性的评估现状

2.1 传统脂质氧化指标评估南极磷虾油氧化状况

脂质氧化是发生一系列化学反应的过程,会生成游离脂肪酸、一级氧化产物(氢过氧化物)、二级氧化产物(醛、酮、酸等)等,酸值(AV)、过氧化值(POV)、茴香胺值(AnV)、硫代巴比妥酸值(TBARS)、共轭二烯值及共轭三烯值等可分别反映出这些氧化产物的水平,常作为传统脂质氧化指标^[24],但南极磷虾油色泽深且磷脂含量高、反应体系易乳化,这些以颜色为判定终点或测定吸光度的方法无法准确获得南极磷虾油的氧化状况。

Thomsen 等^[16]对 40 °C 储藏 21 d 的南极磷虾油与鱼油进行跟踪检测传统脂质氧化指标,发现南极磷虾油的 POV、TBARS、共轭二烯值及共轭三烯值没有明显变化,且数值较小,AV 的上升幅度也比鱼油要小得多,而鱼油的 TBARS、共轭二烯值及共轭三烯值在储藏过程中大幅度提升。但实际上,南极磷虾油和鱼油体系在储藏 21 d 后均发现了大量的挥发性二级氧化产物,推断是虾青素的存在干扰了南极磷虾油传统脂质氧化指标的测定,使之无法有效评估南极磷虾油的氧化。同样,Lu 等^[25]也发现,传统脂质氧化指标低估了南极磷虾油的氧化状况,POV 几乎在南极磷虾油氧化进程中维持不变,但 Strecker 醛、含硫化合物、吡咯、吡啶、吡嗪等的存在证明了南极磷虾油中发生了非酶褐变,这表明体系发生了氧化,生成的初级氧化产物参与了非酶褐变。谢丹^[8]在对南极磷虾油的 Schaal 烘箱储藏实验中发现,由于高含量磷脂的存在,南极磷虾油 POV 测定体系出现了严重的乳化现象,无法获得滴定体积,而 TBARS 由于受到色泽与油脂浑浊度的干扰,也无法有效评估南极磷虾油的氧化程度。同时该研究者发现,由于南极磷虾油高黏度的特性,不适合进行氧

化诱导时间的测定。

2.2 微量成分变化间接反映南极磷虾油氧化状况

南极磷虾油含有虾青素、生育酚等微量活性成分,这些活性成分不仅提升了南极磷虾油的功能价值,还有助于提高南极磷虾油在储藏过程中的氧化稳定性,有学者通过测定这些化学成分的变化来侧面掌握其氧化品质变化状况,但目前相关指标尚未确定,仍有待进一步探究。

谢丹^[8]对分级提取的3种磷脂含量递增、微量成分(虾青素、甾醇、生育酚和维生素A)含量递减的南极磷虾油在60℃储藏期间虾青素及生育酚含量的变化进行实时监控,发现3种南极磷虾油的虾青素含量在储藏期间均呈现下降趋势,但生育酚含量呈现了不同的变化趋势,中等含量磷脂及微量成分南极磷虾油体系中生育酚含量先下降后维持不变甚至略微升高,说明储存后期生育酚得到了再生。Thomsen等^[16]也得出了相似的研究结果,其研究发现南极磷虾油在40℃的储藏条件下,γ-生育酚和虾青素含量持续下降,α-生育酚含量呈现先下降后上升的趋势,推测磷脂和α-生育酚呈现协同抗氧化作用,磷脂的存在发挥了次级抗氧化能力,并有研究^[26-27]发现磷脂可将生育酚氧化后形成的生育醌还原为生育酚,弥补了原本生育酚的损失。

Lu等^[28]测定了商品化南极磷虾油胶囊中虾青素、生育酚等抗氧化物质的含量,发现生育酚含量范围在306~2 515 mg/kg,虾青素酯含量范围在39.10~355 mg/kg,这些成分的差异可能是南极磷虾油产品在运输储藏期间发生了不同程度的氧化所造成,但也有可能由于原料、提取工艺以及外源性抗氧化剂的添加所导致的。因此,想通过测定微量成分去推断品质变化,需结合储藏过程中的系列微量成分动态变化去评估,但这耗时耗力,而且无法研判所衍生的有害氧化成分含量。

2.3 挥发性成分评估南极磷虾油氧化状况

脂质在氧化过程中会产生大量挥发性产物,这为南极磷虾油氧化稳定性的评估提供了新的依据和途径。此外,由于南极磷虾油脂质组成的复杂性,除挥发性脂质氧化产物外,南极磷虾油挥发性物质中还有吡咯类、胺类、吡嗪类和Strecker降解产物等^[11],这些物质在评估南极磷虾油的氧化方面具有一定作用。Hidalgo等^[29]对磷脂氧化进行分析,发现磷脂氧化似乎与吡咯化反应是平行的,而南极磷虾油又富含磷脂,这表明吡咯的测定对研究南极磷虾油的氧化有重要意义。Thomsen等^[16]采用动态顶空(DHS)-GC/MS测定了挥发性物质的含量,比

较了此法对评估鱼油和南极磷虾油氧化稳定性的有效性,鱼油和南极磷虾油储藏过程中的主要挥发性产物见表3。由表3可以看出:南极磷虾油和鱼油中挥发性脂质氧化产物不尽相同,2,4-己二烯醛、2,6-壬二烯醛、4-庚醛、丙醛、丁醛、戊醛、2-戊烯醛和己醛仅在鱼油中检出,南极磷虾油中大多数二级氧化产物含量普遍较低,但辛醛和苯甲醛含量明显高于鱼油;然而,南极磷虾油中发现了大量的挥发性非酶褐变产物,这在鱼油中未检出。Lu等^[30]通过测定挥发性脂质衍生物来研究20℃及40℃储藏条件下南极磷虾油的氧化程度,发现南极磷虾油的挥发性成分中1-戊烯-3-醇含量在储藏7 d内持续上升,可作为南极磷虾油的特征性脂质氧化指标。另外,1-戊烯-3-醇的含量与储藏温度密切相关,40℃与20℃相比,其增加速度更快,并且40℃条件下2-戊基呋喃含量明显增加,同时发现吡咯的含量变化趋势与1-戊烯-3-醇一致,推测吡咯也可以作为评估南极磷虾油氧化程度的良好依据。

表3 鱼油和南极磷虾油储藏过程中主要的挥发性产物含量(40℃,21 d)

挥发性产物	鱼油		南极磷虾油	
	储藏 0 d	储藏 21 d	储藏 0 d	储藏 21 d
二级氧化产物				
2,4-己二烯醛/(ng/g)	-	189	-	-
2,6-壬二烯醛/(ng/g)	-	783	-	-
4-庚醛/(ng/g)	-	39	-	-
丙醛/(ng/g)	-	8 431	-	-
丁醛/(ng/g)	-	85	-	-
戊醛/(ng/g)	9.0	1 187	-	-
2-戊烯醛/(ng/g)	5.1	346	-	-
己醛/(ng/g)	975	919	-	-
1-戊醇/(ng/g)	752.6	817	269	437
2,4-庚二烯醛/(ng/g)	1 433	2 645	309	1 145
1-戊烯-3-酮/(ng/g)	780	1 096	-	152
1-戊烯-3-醇/(ng/g)	-	1 470	508	433
辛醛/(ng/g)	-	113	107	345
苯甲醛/(丰度/g)	102 143	46 300	153 792	324 042
非酶褐变产物				
2-甲基丁醛/(丰度/g)	-	-	-	7 823 212
3-甲基丁醛/(ng/g)	-	-	-	1 632
二甲基二硫醚/(丰度/g)	-	-	2 882 839	43 818
1-甲基-1H-吡咯/(丰度/g)	-	-	1 195 739	423 562
吡啶/(丰度/g)	-	-	15 933 009	1 107 243

注:-为未检出,水平低于检出限

2.4 脂质组学评估南极磷虾油氧化状况

Song 等^[10]采取了一种基于电烙铁离子源与快速蒸发电离质谱联用的原位监测南极磷虾油动态氧化特性的脂质组学方法(ESII-REIMS技术),通过检测磷脂分子种的变化来评估其氧化特性,结果发现,在南极磷虾油加速氧化储藏期间(m/z)707.50、721.50、833.49、837.54是差异最显著的磷脂分子种,推测的分子结构分别为磷脂酸(PA)(O-16:1/20:0)、PE(16:1/20:3)、PC(16:1/20:3)、磷脂酰肌醇(PI)(16:1/18:1)、PI(16:0/18:0)。储藏过程中脂质组学的变化为南极磷虾油脂质氧化的评价提供了新思路,但是该法仪器设备昂贵,对人员操作要求较高,图谱数据量大、处理复杂且需要专业人士进行分析,同时除磷脂分子外,需结合其他脂质组分如甘油三酯、甘油二酯、甘油一酯、游离脂肪酸等的变化进行全面跟踪分析,方可判断南极磷虾油总体氧化情况。

2.5 其他方法评估南极磷虾油氧化状况

Uluata 等^[31]证明 DPPP 荧光法测定南极磷虾油乳状液过氧化物含量的可行性和准确性,在 DPPP 存在的情况下,样品中的脂质过氧化物会与其反应生成 DPPH=O 氧化物,该物质具有很强的荧光性。研究发现,南极磷虾油乳状液在自动氧化/光敏氧化下储存 1~3 d 内荧光强度持续增加,而后降低并趋

向稳定,这可能是在氧化后期氢过氧化物分解生成次级氧化产物所致,实验结合 TBARS、乙醛和丙醛的测定,发现三者的变化趋势符合 DPPP 荧光法所检测的氢过氧化物的荧光动态,支撑了该法测定南极磷虾油乳状液过氧化物含量的准确性和可靠性。但目前该法仅适用于乳状液体系^[32-33],纯油体系的检测是否适用尚未验证。

3 南极磷虾油储藏过程中的脂质劣变机制

南极磷虾油较传统鱼油的脂质劣变机制更为复杂。由于南极磷虾油不经过精炼,含有可参与非酶褐变的化学组分,所以在南极磷虾油的储藏过程中,非酶褐变与脂质氧化交织在一起,产生了大量的脂质劣变产物^[16, 25, 28, 30],这也是导致南极磷虾油氧化状况评估困难的原因之一。南极磷虾油中可能存在的非酶褐变反应机制如图 1 所示^[11]。基于非酶褐变的反应机制,推测南极磷虾油在储藏过程中可通过 3 种途径参与非酶褐变:①机制 A,游离氨基酸的 Strecker 降解;②机制 B,游离氨基酸与脂质氧化产物的吡咯化反应;③机制 C,PE 与脂质氧化产物的吡咯化反应。吡咯不仅是非酶褐变的产物之一,其本身也具有抗氧化能力,已有学者推测吡咯对南极磷虾油的氧化稳定性有促进作用,但实际上,非酶褐变还会对体系色泽、风味产生负面影响,未来可结合此角度全面评估非酶褐变对南极磷虾油品质的影响。

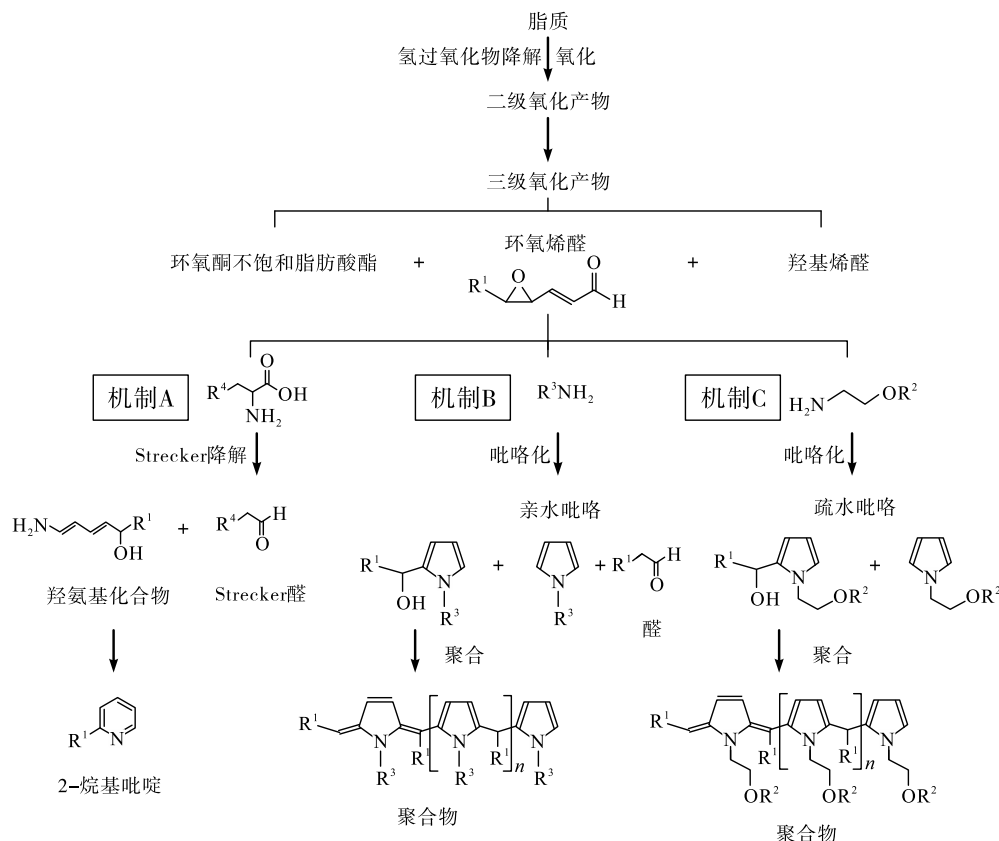


图 1 南极磷虾油中可能存在的非酶褐变反应机制

4 结束语

南极磷虾油作为一种富含 $n-3$ PUFA 的功能性油脂,如何有效避免氧化对于维持其在储藏期间的品质具有重要意义。但由于南极磷虾油脂组成不同于常见食用油,其在储藏过程中的脂质劣变机制较为复杂,目前尚未有标准化的评估其氧化稳定性的方法。因此,探索一种快捷准确、适用于评估南极磷虾油氧化稳定性的方法对于南极磷虾油未来的开发及应用至关重要。此外,南极磷虾油的加工方式影响其脂质组成,而脂质组成又会进一步影响其氧化稳定性,在筛选出合理化评估南极磷虾油氧化稳定性方法的基础上,未来也需着眼于系统研究南极磷虾油脂组成与氧化稳定性之间的量效关系,为科学指南南极磷虾油加工生产及其健康安全使用提供理论依据。

参考文献:

- [1] 李芹,刘欢. 南极磷虾中氟含量迁移影响因素研究进展[J]. 中国渔业质量与标准,2021, 11(1): 55-60.
- [2] 王元好,马岩,袁起新,等. 南极磷虾油制备技术及其生理功能的研究进展[J]. 食品研究与开发,2020(21): 228-232.
- [3] LU F, NIELSEN N S, BARON C P, et al. Impact of primary amine group from aminophospholipids and amino acids on marine phospholipids stability: non-enzymatic browning and lipid oxidation[J]. Food Chem, 2013, 141(2): 879-888.
- [4] LI L, WANG C C, JIANG S, et al. The absorption kinetics of Antarctic krill oil phospholipid liposome in blood and the digestive tract of healthy mice by single gavage[J]. Food Sci Hum Well, 2020, 9(1): 88-94.
- [5] GIGLIOTTI J C, DAVENPORT M P, BEAMER S K, et al. Extraction and characterisation of lipids from Antarctic krill (*Euphausia superba*) [J]. Food Chem, 2011, 125(3): 1028-1036.
- [6] XIE H K, YIN F W, LIU Z Y, et al. Oxidation kinetics of polyunsaturated fatty acids esterified into triacylglycerols and phospholipids in dried scallop (*Argopecten irradians*) adductor muscles during storage[J]. Food Funct, 2020, 11(3): 2349-2357.
- [7] SONG J H, INOUE Y, MIYAZAWA T. Oxidative stability of docosahexaenoic acid-containing oils in the form of phospholipids, triacylglycerols, and ethyl esters[J]. Biosci Biotechnol Biochem, 1997, 61(12): 2085-2088.
- [8] 谢丹. 南极磷虾油的分级制备及功能评价[D]. 江苏无锡: 江南大学, 2019.
- [9] HIDALGO F J, ZAMORA R. Interplay between the Maillard reaction and lipid peroxidation in biochemical systems [J]. Ann N Y Acad Sci, 2010, 1043(1): 319-326.
- [10] SONG G S, WANG H X, ZHANG M N, et al. Real-time monitoring the oxidation characteristics of Antarctic krill oil (*Euphausia superba*) during storage by electric soldering iron ionization mass spectrometry based lipidomics [J]. J Agric Food Chem, 2020, 68(5): 1457-1467.
- [11] LU F, NIELSEN N S, BARON C P, et al. Oxidative degradation and non-enzymatic browning due to the interaction between oxidised lipids and primary amine groups in different marine PL emulsions[J]. Food Chem, 2012, 135(4): 2887-2896.
- [12] TANDY S, CHUNG R, WAT E, et al. Dietary krill oil supplementation reduces hepatic steatosis, glycemia, and hypercholesterolemia in high-fat-fed mice[J]. J Agric Food Chem, 2009, 57(19): 9339-9345.
- [13] BANDARRA N M, CAMPOS R M, BATISTA I, et al. Antioxidant synergy of α -tocopherol and phospholipids [J]. J Am Oil Chem Soc, 1999, 76(8): 905-913.
- [14] WENG X C, GORDON M H. Antioxidant synergy between phosphatidyl ethanolamine and α -tocopherylquinone [J]. Food Chem, 1993, 48(2): 165-168.
- [15] 谢岩黎,周惠明. 维生素A抗氧化作用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2006(3): 46-48.
- [16] THOMSEN B R, HAUGSGJERD B O, GRINARI M, et al. Investigation of oxidative degradation and non-enzymatic browning reactions in krill and fish oils [J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2013, 115(12): 1357-1366.
- [17] 刘志东,陈雪忠,李斌,等. 制备方法对南极磷虾油品质的影响[J]. 现代食品科技, 2017(1): 197-202.
- [18] XIE D, JIN J, SUN J, et al. Comparison of solvents for extraction of krill oil from krill meal: lipid yield, phospholipids content, fatty acids composition and minor components[J]. Food Chem, 2017, 233: 434-441.
- [19] XIE D, MU H Y, TANG T P, et al. Production of three types of krill oils from krill meal by a three-step solvent extraction procedure[J]. Food Chem, 2018, 248: 279-286.
- [20] ALI-NEHARI A, CHUN B S. Characterization of purified phospholipids from krill (*Euphausia superba*) residues deoiled by supercritical carbon dioxide [J]. Korean J Chem Eng, 2012, 29(7): 918-924.
- [21] LIU S L, HU W X, FANG Y Z, et al. Extraction of oil from wet Antarctic krill (*Euphausia superba*) using a subcritical dimethyl ether method[J]. RSC Adv, 2019, 9(59): 34274-34282.

- [14] CLAUMARCHIRANT L, CILLA A, MATENCIO E, et al. Addition of milk fat globule membrane as an ingredient of infant formulas for resembling the polar lipids of human milk[J]. *Int Dairy J*, 2016, 61: 228–238.
- [15] BETTJEMAN B I, HOFMAN K A, BURGESS E J, et al. Seafood phospholipids: extraction efficiency and phosphorous nuclear magnetic resonance spectroscopy (^{31}P NMR) profiles[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2018, 95(7): 779–786.
- [16] YANG Y, HISERODT R, LI J. Rapid identification and relative quantification of the phospholipid composition in commercial lecithins by ^{31}P NMR[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2017, 94(7): 885–892.
- [17] GLONEK T. ^{31}P Nuclear magnetic resonance phospholipid analysis of anionic – enriched lecithins[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1998, 75(5): 569–573.
- [18] FONG B, MA L, NORRIS C. Analysis of phospholipids in infant formulas using high performance liquid chromatography – tandem mass spectrometry[J]. *J Agric Food Chem*, 2013, 61(4): 858–865.
- [19] FOLCH J, LEES M, STANLEY G H S. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues [J]. *J Biol Chem*, 1957, 226(1): 497–509.
- [20] VDIEHI W K. High resolution NMR spectroscopy [J]. *Eur J Lipid Sci Tech*, 2001, 103(12): 830–834.
- [21] MONAKHOVA Y B, DIEHL B. Automated multicomponent phospholipid analysis using ^{31}P NMR spectroscopy: example of vegetable lecithin and krill oil[J]. *Anal Bioanal Chem*, 2018, 410(30): 7891–7900.
- [22] KATO T, NISHIMIYA M, KAWATA A, et al. Quantitative ^{31}P NMR method for individual and concomitant determination of phospholipid classes in polar lipid samples [J]. *J Oleo Sci*, 2018, 67(10): 1279–1289.
- [23] SOTIRHOS N, HERSLIF B, KENNE L. Quantitative analysis of phospholipids by ^{31}P – NMR[J]. *J Lipid Res*, 1986, 27(4): 386–392.
- [24] YAO L, JUNG S. ^{31}P NMR phospholipid profiling of soybean emulsion recovered from aqueous extraction [J]. *J Agric Food Chem*, 2010, 58(8): 4866–4872.
- [25] ZOU X, HUANG J, JIN Q, et al. Lipid composition analysis of milk fats from different mammalian species: potential for use as human milk fat substitutes [J]. *J Agric Food Chem*, 2013, 61(29): 7070–7080.
-
- (上接第 89 页)
- [22] SUN W W, SHI B W, XUE C H, et al. The comparison of krill oil extracted through ethanol – hexane method and subcritical method [J]. *Food Sci Nutr*, 2019, 7(2): 700–710.
- [23] WANG L L, YANG F, RONG Y L, et al. Effects of different proteases enzymatic extraction on the lipid yield and quality of Antarctic krill oil [J]. *Food Sci Nutr*, 2019, 7(1): 2224–2230.
- [24] 谢丹. 精炼及储藏对菜籽油品质的影响[D]. 江苏无锡: 江南大学, 2012.
- [25] LU F, BRUHEIM I, HAUGSGJERD B O, et al. Effect of temperature towards lipid oxidation and non – enzymatic browning reactions in krill oil upon storage [J]. *Food Chem*, 2014, 157: 398–407.
- [26] CUI L, MCCLEMENTS D J, DECKER E A. Impact of phosphatidylethanolamine on the antioxidant activity of α – tocopherol and trolox in bulk oil [J]. *J Agric Food Chem*, 2015, 63(12): 3288–3294.
- [27] CUI L, DECKER E A. Phospholipids in foods: prooxidants or antioxidants? [J]. *J Sci Food Agric*, 2016, 96(1): 18–31.
- [28] LU F, BRUHEIM I, JACOBSEN C. New parameters for evaluating the quality of commercial krill oil capsules from the aspect of lipid oxidation and non – enzymatic browning reactions [J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2015, 117(8): 1214–1224.
- [29] HIDALGO F J, NOGALES F, ZAMORA R. Determination of pyrrolized phospholipids in oxidized phospholipid vesicles and lipoproteins [J]. *Anal Biochem*, 2004, 334(1): 155–163.
- [30] LU H, BRUHEIM I, JACOBSEN C. Oxidative stability and non – enzymatic browning reactions in Antarctic krill oil (*Euphausia superba*) [J]. *Lipid Technol*, 2014, 26(5): 111–114.
- [31] ULUATA S, DURMAZ G, MCCLEMENTS D J, et al. Comparing DPPH fluorescence and UV based methods to assess oxidation degree of krill oil – in – water emulsions [J/OL]. *Food Chem*, 2020, 339: 127898 [2021–07–31]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127898>.
- [32] MOSCA M, CUOMO F, LOPEZ F, et al. Role of emulsifier layer, antioxidants and radical initiators in the oxidation of olive oil – in – water emulsions [J]. *Food Res Int*, 2013, 50(1): 377–383.
- [33] TIKEKAR R V, JOHNSON A, NITIN N. Fluorescence imaging and spectroscopy for real – time, in – situ characterization of interactions of free radicals with oil – in – water emulsions [J]. *Food Res Int*, 2011, 44(1): 139–145.