

# 核磁共振碳谱测定天然鱼油和加工鱼油中 多不饱和脂肪酸的位置分布

李峰<sup>1,2</sup>, 杨雪<sup>1</sup>, 金俊<sup>1</sup>, 金青哲<sup>1</sup>, 韦伟<sup>1</sup>, 王兴国<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学食品学院, 食品安全与营养协同创新中心, 江苏无锡 214122; 2. 中原食品实验室, 河南漯河 462300)

**摘要:** 鱼油是  $n-3$  多不饱和脂肪酸的重要来源, 为明确鱼油中多不饱和脂肪酸的位置分布, 采用气相色谱法测定了 4 种天然鱼油和 3 种加工鱼油的总脂肪酸组成, 并采用核磁共振碳谱( $^{13}\text{C}-\text{NMR}$ ) 分析其多不饱和脂肪酸的位置分布, 同时运用 Novozym 435 醇解结合气相色谱分析了 4 种天然鱼油中甘油三酯上饱和脂肪酸(SFA)和单不饱和脂肪酸(MUFA)的位置分布。结果表明: 加工鱼油中二十二碳六烯酸(DHA)含量为 28.43%~76.63%, 二十碳五烯酸(EPA)含量为 12.72%~56.37%, 总体含量均高于天然鱼油; 天然鱼油中 DHA 主要分布在 sn-2 位, sn-2 DHA 相对含量为 50.39%~63.71%, 而加工鱼油中 DHA 则处于随机分布状态, sn-2 DHA 相对含量为 28.78%~36.76%; 不同天然鱼油中 SFA 和 MUFA 没有明确分布规律。综上, 鱼油的加工工艺可以提高 DHA 的含量但是改变了其在甘油三酯碳骨架的分布。

**关键词:** 鱼油; 加工工艺; sn-2 位脂肪酸; 核磁共振碳谱; 二十二碳六烯酸

中图分类号: TS225.2; O65

文献标识码: A

文章编号: 1003-7969(2024)05-0126-07

## Determination of positional distribution of polyunsaturated fatty acids in natural and processed fish oil by $^{13}\text{C}-\text{NMR}$

LI Feng<sup>1,2</sup>, YANG Xue<sup>1</sup>, JIN Jun<sup>1</sup>, JIN Qingzhe<sup>1</sup>,  
WEI Wei<sup>1</sup>, WANG Xingguo<sup>1,2</sup>

(1. Collaborative Innovation Centre for Food Safety and Nutrition, School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 2. Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe 462300, Henan, China)

**Abstract:** Fish oil is a rich source of  $n-3$  polyunsaturated fatty acids (PUFA). In order to clarify the positional distribution of PUFA in fish oil, gas chromatography (GC) was used to determine the total fatty acid composition of 4 kinds of natural fish oil and 3 kinds of processed fish oil, and  $^{13}\text{C}-\text{nuclear magnetic resonance}$  ( $^{13}\text{C}-\text{NMR}$ ) was used to analyze the positional distribution of PUFA. At the same time, the positional distribution of saturated fatty acids (SFA) and monounsaturated fatty acids (MUFA) on triacylglycerol (TAG) in 4 natural fish oils were analyzed using the alcoholysis of Novozym 435 combined with GC. The results showed that the contents of docosahexaenoic acid (DHA) and eicosapentaenoic acid (EPA) in processed fish oil generally higher than that in natural fish oil, with DHA content of 28.43%–76.63% and EPA content of 12.72%–56.37%. DHA in natural fish oils was mainly esterified at the sn-2 position (relative content of sn-2 DHA 50.39%–63.71%), while that in processed fish oils was in a random distribution state (relative content of sn-2 DHA 28.78%–

36.76%). There was no clear distribution pattern of SFA and MUFA in different natural fish oils. In conclusion, the processing technology of fish oil can increase the content of total DHA, but change the positional distribution of DHA on the TAG

收稿日期: 2023-02-01; 修回日期: 2023-12-02

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2022B0202010001)

作者简介: 李峰(1997), 男, 在读硕士, 研究方向为粮油深加工技术(E-mail) lifengjndx@163.com。

通信作者: 韦伟, 副教授(E-mail) weiw@jiangnan.edu.cn。

glycerol backbone.

**Key words:** fish oil; processing technology; sn-2 fatty acid;  $^{13}\text{C}$ -NMR; DHA

$n-3$  多不饱和脂肪酸(PUFA)在人体具有重要的生理作用,其中二十二碳六烯酸(22:6  $n-3$ , DHA)和二十碳五烯酸(20:5  $n-3$ , EPA)被广泛研究。DHA是大脑中最丰富的  $n-3$  PUFA,占大脑脂质总脂肪酸的7.2%<sup>[1]</sup>;作为细胞膜的重要成分,DHA和EPA还可以维持细胞膜的流动性<sup>[2]</sup>。母乳中含有约0.7%的DHA和0.16%的EPA<sup>[3]</sup>,对婴儿的大脑和视网膜的发育具有重要作用。此外,母亲摄入DHA和EPA也可改善婴儿的生长发育,包括手和眼的协调能力<sup>[4]</sup>。鱼油是DHA和EPA的重要来源,目前已广泛应用于现代营养和功能性食品中<sup>[5]</sup>。

研究表明,甘油三酯(TAG)的营养功能不仅受其总脂肪酸(FA)组成的影响,还受其脂肪酸在甘油骨架上分布的影响。研究发现,位于sn-2位的DHA可以更快地通过肠黏膜被吸收<sup>[6]</sup>。sn-2 DHA结构脂对大脑的发育具有一定的益处,这很可能是脑肠轴在其中发挥作用<sup>[7]</sup>。Linderborg等<sup>[8]</sup>通过5 d饮食干预,从大鼠粪便中脂肪酸的组成来确定TAG不同位置上DHA(sn-22:6  $n-3$ -18:0-18:0, sn-18:0-18:0-22:6  $n-3$ 和sn-18:0-22:6  $n-3$ -18:0)的生物利用度,结果表明,位于sn-2位的DHA能更好地保留在体内。此外,与sn-1位和sn-3位的DHA相比,sn-2位的DHA具有更好的氧化稳定性<sup>[9]</sup>。

如何对TAG甘油骨架上脂肪酸的位置分布进行分析已被广泛研究。通常,sn-1,3位特异性脂肪酶催化水解TAG联合气相色谱法(GC)是应用最广泛的方法。在脂肪酶中,常用的是猪胰脂肪酶,该酶可以水解TAG形成sn-2单甘酯(sn-2 MAG)<sup>[10]</sup>。但是,由于猪胰脂肪酶对PUFA具有一定的抗性,不适合用来测定富含PUFA的TAG<sup>[11-12]</sup>。南极假丝酵母脂肪酶B(*Candida antarctica* lipase B, CAL-B)可以水解sn-1,3位的脂肪酸,其原理是在正常情况下CAL-B表现出非区域选择性,而在过量乙醇存在时CAL-B显示出sn-1,3位特异性<sup>[13]</sup>。这种方法已经被应用于结构脂的鉴定<sup>[14]</sup>。除GC外,核磁共振碳谱法( $^{13}\text{C}$ -NMR)也可用于TAG上脂肪酸的位置分析,并且 $^{13}\text{C}$ -NMR避免了脂肪酶预处理过程中不可避免的

酰基转移反应。此外,在合成的纯品TAG混合物和市售油样中,实验已经证明 $^{13}\text{C}$ -NMR是准确和可重复的<sup>[15]</sup>。

基于此,本研究采用GC测定了4种天然鱼油和3种加工鱼油的总脂肪酸组成,并采用 $^{13}\text{C}$ -NMR分析其PUFA的位置分布;同时运用CAL-B醇解结合GC分析了天然鱼油中饱和脂肪酸(SFA)和单不饱和脂肪酸(MUFA)的位置分布,以期为婴儿配方奶粉中结构脂原料合成的来源,或者含有PUFA结构脂的鉴定提供数据和思路支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

加工鱼油(FO)1~3、金枪鱼油,山东青岛海智源生命科学有限公司;三文鱼油、沙丁鱼油和深海鱼油,购自本地超市。南极假丝酵母脂肪酶B(Novozym 435),诺维信(中国)生物技术有限公司;37种脂肪酸甲酯混合标准品,美国Sigma-Aldrich公司;薄层色谱硅胶板(硅胶60,20 cm × 20 cm, 0.15~0.20 mm),乳山太阳干燥剂有限公司;正己烷、甲醇,色谱级,京凯(北京)科技有限公司;无水乙醇、无水乙醚、氢氧化钾等,分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司。

GC-7820A型气相色谱仪(配氢火焰检测器)、DB-Fast FAME色谱柱(30 m × 0.25 mm × 0.25  $\mu\text{m}$ ),安捷伦科技有限公司;核磁共振波谱仪(400 MHz),德国布鲁克分析仪器公司;TGL-16G型台式离心机,上海安亭科学仪器厂;DF-101S型集热式恒温磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限责任公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 鱼油总脂肪酸组成的测定

脂肪酸甲酯的制备:参照文献<sup>[16]</sup>的方法制备脂肪酸甲酯,并稍作修改。将50 mg油样溶于2 mL正己烷中,加入1 mL 2 mol/L KOH-CH<sub>3</sub>OH溶液,涡旋振荡3 min后,加入无水Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>去除微量残留水,上清液经0.22  $\mu\text{m}$ 有机膜过滤后,待GC分析。

GC条件:检测器和进样口温度均为260℃;升温程序为初始柱温80℃,保持0.5 min,以40℃/min的速率升温到165℃,保持1 min,再以2℃/min的速率升温到220℃,保持2 min;H<sub>2</sub>流量40 mL/min;空气流量400 mL/min;N<sub>2</sub>流量25 mL/min;分流比100:1。

### 1.2.2 鱼油 PUFA 位置分布的测定

参照文献[17]使用  $^{13}\text{C}$ -NMR 检测鱼油中 PUFA 在 TAG 上的位置分布,并稍作改动。取 100 mg 油样溶于 1 mL  $\text{CDCl}_3$  中,然后将样品在 10 000 r/min 下离心 5 min;将上层透明  $\text{CDCl}_3$  相转移到 5 mm 的 NMR 管中,待测。采集参数:扫描次数 1 024 次,脉冲宽度 10.76,采集时间 1.363 1 s,扫描宽度( $\delta$ )238,弛豫时间 2 s,时域 64 K,脉冲序列 zgpg 30,激励脉冲 30 °C。参考 Suárez 等<sup>[18]</sup>的研究鉴定核磁峰,根据 sn-2 DHA 在 172.17 的化学位移( $\delta$ )进行定量分配。

特定脂肪酸在 sn-2 位的相对含量( $c$ )按公式(1)计算。

$$c = F / (F + F') \times 100\% \quad (1)$$

式中: $F$ 为 sn-2 位特定脂肪酸在总脂肪酸中的含量; $F'$ 为 sn-1,3 位特定脂肪酸在总脂肪酸中的含量。

### 1.2.3 天然鱼油中 SFA 和 MUFA 位置分布的测定

sn-2 MAG 的制备:参照 Joint JOCS/AOCS 方法 Ch 3a-19 并稍作修改<sup>[19]</sup>。将 30 mg 鱼油、300 mg 无水乙醇和 4% Novozym 435 混合均匀,置于玻璃反应器中,以 400 r/min 的转速在 30 °C 的集热式恒温磁力搅拌器中恒温水浴反应 3 h 后,将反应混合物转移到 2 mL 离心管中,以 10 000 r/min 的转速离心 3 min 去除脂肪酶,将有机相用氮吹仪浓缩至干,将残留物用 100  $\mu\text{L}$  正己烷溶解上样至硅胶板,以正己烷-乙醚-

乙酸(体积比 50:50:1)为展开剂进行分离。在碘缸中放置 3 min,识别并刮取 sn-2 MAG 条带,然后用无水乙醚多次萃取,除去溶剂后得 sn-2 MAG。

脂肪酸含量测定:采用 GC 法测定,其中脂肪酸甲酯的制备同 1.2.1,GC 条件除分流比为 20:1,其他条件同 1.2.1。

立体异构指数( $R$ )定义为特定脂肪酸在 sn-2 位的含量相对于其在 TAG 上总脂肪酸中的含量的比例<sup>[20]</sup>,按公式(2)计算。

$$R = (F_{\text{sn-2}} - F_{\text{总}}) / F_{\text{总}} \quad (2)$$

式中: $F_{\text{sn-2}}$ 为特定脂肪酸在 sn-2 位的含量; $F_{\text{总}}$ 为特定脂肪酸在总脂肪酸中的含量。

当  $-1 \leq R < 0$  时,给定的脂肪酸主要在 sn-1,3 位发生酯化, $R$  值越小,在 sn-2 位酯化的脂肪酸含量越少;当  $R = 0$  时,给定的脂肪酸 33.33% 在 sn-2 位酯化;当  $0 < R \leq 2$  时,给定的脂肪酸主要在 sn-2 位发生酯化, $R$  值越大,脂肪酸在 sn-2 位酯化的趋势越明显。

### 1.2.4 统计学分析

所有样品平行测定 3 次,结果以“平均值  $\pm$  标准差”表示。采用 IBM SPSS Statistics 26 对数据进行统计分析,分析方法为单因素方差分析法(ANOVA)的 Duncan 检验。采用 Origin 绘制图形。

## 2 结果与讨论

### 2.1 鱼油总脂肪酸组成

不同鱼油的总脂肪酸组成及含量见表 1。

表 1 不同鱼油中总脂肪酸组成及含量

%

脂肪酸	天然鱼油				加工鱼油		
	金枪鱼油	沙丁鱼油	深海鱼油	三文鱼油	FO-1	FO-2	FO-3
C12:0	0.05 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	0.11 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	0.13 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	0.07 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	0.01 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	0.03 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	nd
C13:0	0.02 $\pm$ 0.00 <sup>c</sup>	0.03 $\pm$ 0.00 <sup>b</sup>	0.06 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	0.03 $\pm$ 0.01 <sup>bc</sup>	nd	0.01 $\pm$ 0.00 <sup>d</sup>	nd
C14:0	2.85 $\pm$ 0.06 <sup>d</sup>	7.90 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	7.39 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	5.26 $\pm$ 0.11 <sup>c</sup>	0.07 $\pm$ 0.00 <sup>f</sup>	2.28 $\pm$ 0.07 <sup>e</sup>	0.03 $\pm$ 0.00 <sup>f</sup>
C15:0	0.84 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	0.49 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>	0.74 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	0.37 $\pm$ 0.01 <sup>d</sup>	0.01 $\pm$ 0.00 <sup>f</sup>	0.17 $\pm$ 0.01 <sup>e</sup>	0.01 $\pm$ 0.00 <sup>f</sup>
C16:0	20.10 $\pm$ 0.45 <sup>a</sup>	17.33 $\pm$ 0.08 <sup>c</sup>	19.44 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	13.55 $\pm$ 0.20 <sup>d</sup>	0.54 $\pm$ 0.01 <sup>f</sup>	5.27 $\pm$ 0.16 <sup>e</sup>	0.61 $\pm$ 0.02 <sup>f</sup>
C17:0	0.96 $\pm$ 0.10 <sup>a</sup>	0.51 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>	0.90 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.63 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	0.01 $\pm$ 0.00 <sup>e</sup>	0.18 $\pm$ 0.03 <sup>d</sup>	0.14 $\pm$ 0.01 <sup>d</sup>
C18:0	4.61 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>	3.36 $\pm$ 0.11 <sup>bc</sup>	3.44 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	3.25 $\pm$ 0.06 <sup>c</sup>	0.20 $\pm$ 0.00 <sup>f</sup>	1.17 $\pm$ 0.03 <sup>e</sup>	1.39 $\pm$ 0.00 <sup>d</sup>
C20:0	0.20 $\pm$ 0.01 <sup>bc</sup>	0.14 $\pm$ 0.06 <sup>cd</sup>	0.62 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.25 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	0.04 $\pm$ 0.01 <sup>e</sup>	0.10 $\pm$ 0.06 <sup>de</sup>	0.17 $\pm$ 0.01 <sup>cd</sup>
C22:0	0.53 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>	1.02 $\pm$ 0.06 <sup>b</sup>	1.27 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	4.12 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>	0.67 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	1.10 $\pm$ 0.86 <sup>b</sup>	1.16 $\pm$ 0.09 <sup>b</sup>
C23:0	0.14 $\pm$ 0.03 <sup>c</sup>	0.98 $\pm$ 0.00 <sup>c</sup>	0.43 $\pm$ 0.01 <sup>d</sup>	0.11 $\pm$ 0.01 <sup>e</sup>	1.17 $\pm$ 0.24 <sup>e</sup>	2.37 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	1.50 $\pm$ 0.16 <sup>b</sup>
C24:0	1.00 $\pm$ 0.49 <sup>d</sup>	2.50 $\pm$ 0.08 <sup>c</sup>	1.34 $\pm$ 0.02 <sup>d</sup>	3.55 $\pm$ 0.06 <sup>c</sup>	5.86 $\pm$ 0.39 <sup>b</sup>	7.22 $\pm$ 1.05 <sup>a</sup>	3.10 $\pm$ 0.14 <sup>c</sup>
C14:1 n-5	0.09 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	0.23 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	0.32 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.08 $\pm$ 0.11 <sup>b</sup>	nd	0.06 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	nd
C15:1 n-7	0.10 $\pm$ 0.01 <sup>ab</sup>	0.08 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	0.13 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.03 $\pm$ 0.04 <sup>c</sup>	nd	0.03 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>	nd
C16:1 n-7	4.38 $\pm$ 0.09 <sup>d</sup>	10.34 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	8.71 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	6.60 $\pm$ 0.05 <sup>c</sup>	0.14 $\pm$ 0.06 <sup>f</sup>	3.11 $\pm$ 0.09 <sup>e</sup>	0.11 $\pm$ 0.00 <sup>f</sup>
C17:1 n-7	0.81 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	0.10 $\pm$ 0.05 <sup>d</sup>	0.31 $\pm$ 0.00 <sup>c</sup>	0.49 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	nd	0.04 $\pm$ 0.01 <sup>de</sup>	0.03 $\pm$ 0.01 <sup>e</sup>
C18:1 n-9c	21.20 $\pm$ 0.13 <sup>b</sup>	13.59 $\pm$ 0.23 <sup>d</sup>	15.34 $\pm$ 0.04 <sup>c</sup>	24.94 $\pm$ 0.36 <sup>a</sup>	0.55 $\pm$ 0.02 <sup>e</sup>	3.80 $\pm$ 0.10 <sup>e</sup>	3.04 $\pm$ 0.06 <sup>f</sup>
C20:1 n-9	2.08 $\pm$ 0.18 <sup>c</sup>	1.41 $\pm$ 0.08 <sup>d</sup>	2.99 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	4.72 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	0.25 $\pm$ 0.02 <sup>f</sup>	0.74 $\pm$ 0.04 <sup>e</sup>	0.65 $\pm$ 0.11 <sup>e</sup>
C22:1 n-9	0.02 $\pm$ 0.03 <sup>c</sup>	nd	3.89 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.50 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	0.01 $\pm$ 0.00 <sup>e</sup>	0.03 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>	0.03 $\pm$ 0.01 <sup>e</sup>

续表 1

脂肪酸	天然鱼油				加工鱼油		
	金枪鱼油	沙丁鱼油	深海鱼油	三文鱼油	FO-1	FO-2	FO-3
C18:2 <i>n</i> -6 <sub>c</sub>	1.68 ± 0.03 <sup>c</sup>	1.28 ± 0.06 <sup>d</sup>	3.95 ± 0.01 <sup>b</sup>	9.43 ± 0.19 <sup>a</sup>	0.10 ± 0.01 <sup>g</sup>	0.53 ± 0.01 <sup>e</sup>	0.29 ± 0.04 <sup>f</sup>
C18:3 <i>n</i> -3	0.31 ± 0.06 <sup>bc</sup>	0.80 ± 0.13 <sup>abc</sup>	1.11 ± 0.01 <sup>ab</sup>	1.69 ± 1.82 <sup>a</sup>	0.02 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.19 ± 0.03 <sup>bc</sup>	0.08 ± 0.05 <sup>c</sup>
C18:3 <i>n</i> -6	0.20 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.07 ± 0.08 <sup>b</sup>	0.30 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.27 ± 0.00 <sup>a</sup>	nd	0.07 ± 0.05 <sup>b</sup>	0.01 ± 0.01 <sup>b</sup>
C20:2 <i>n</i> -6	0.35 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.20 ± 0.04 <sup>c</sup>	0.31 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.69 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.04 ± 0.01 <sup>e</sup>	0.14 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.24 ± 0.01 <sup>c</sup>
C20:3 <i>n</i> -3	0.26 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.05 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.15 ± 0.02 <sup>ab</sup>	0.28 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.14 ± 0.20 <sup>ab</sup>	0.02 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.05 ± 0.01 <sup>b</sup>
C20:3 <i>n</i> -6	0.10 ± 0.02 <sup>cd</sup>	0.13 ± 0.00 <sup>c</sup>	0.20 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.25 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.03 ± 0.04 <sup>e</sup>	0.06 ± 0.02 <sup>de</sup>	0.04 ± 0.01 <sup>e</sup>
C20:4 <i>n</i> -6	2.33 ± 0.01 <sup>a</sup>	1.03 ± 0.09 <sup>c</sup>	1.08 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.68 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.17 ± 0.01 <sup>e</sup>	1.09 ± 0.11 <sup>e</sup>	1.38 ± 0.04 <sup>b</sup>
C20:5 <i>n</i> -3 (EPA)	6.36 ± 0.01 <sup>f</sup>	21.80 ± 0.16 <sup>e</sup>	12.42 ± 0.01 <sup>d</sup>	8.34 ± 0.19 <sup>e</sup>	12.72 ± 0.13 <sup>d</sup>	40.70 ± 0.18 <sup>b</sup>	56.37 ± 0.04 <sup>a</sup>
C22:5 <i>n</i> -3	1.56 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.42 ± 0.01 <sup>f</sup>	0.34 ± 0.01 <sup>f</sup>	0.24 ± 0.00 <sup>e</sup>	0.67 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.92 ± 0.08 <sup>c</sup>	1.19 ± 0.06 <sup>b</sup>
C22:6 <i>n</i> -3 (DHA)	26.95 ± 0.20 <sup>e</sup>	14.14 ± 0.25 <sup>d</sup>	12.75 ± 0.03 <sup>e</sup>	9.64 ± 0.19 <sup>f</sup>	76.63 ± 0.02 <sup>a</sup>	28.65 ± 0.32 <sup>b</sup>	28.43 ± 0.20 <sup>b</sup>
SFA	31.28 ± 0.15 <sup>e</sup>	34.36 ± 0.07 <sup>b</sup>	35.74 ± 0.05 <sup>a</sup>	31.17 ± 0.38 <sup>c</sup>	8.58 ± 0.11 <sup>e</sup>	19.89 ± 0.33 <sup>d</sup>	8.09 ± 0.07 <sup>e</sup>
MUFA	28.66 ± 0.30 <sup>c</sup>	25.74 ± 0.25 <sup>d</sup>	31.69 ± 0.04 <sup>b</sup>	37.35 ± 0.48 <sup>a</sup>	0.94 ± 0.07 <sup>f</sup>	7.78 ± 0.12 <sup>e</sup>	3.84 ± 0.12 <sup>f</sup>
PUFA	40.08 ± 0.15 <sup>d</sup>	39.91 ± 0.32 <sup>d</sup>	32.58 ± 0.00 <sup>e</sup>	31.49 ± 0.84 <sup>e</sup>	90.50 ± 0.04 <sup>a</sup>	72.34 ± 0.45 <sup>c</sup>	88.07 ± 0.19 <sup>b</sup>
<i>n</i> -6 PUFA	4.65 ± 0.05 <sup>c</sup>	2.70 ± 0.06 <sup>d</sup>	5.83 ± 0.02 <sup>b</sup>	11.31 ± 0.16 <sup>a</sup>	0.33 ± 0.05 <sup>f</sup>	1.87 ± 0.05 <sup>e</sup>	1.96 ± 0.00 <sup>e</sup>
<i>n</i> -3 PUFA	35.43 ± 0.16 <sup>e</sup>	37.21 ± 0.54 <sup>d</sup>	26.75 ± 0.01 <sup>f</sup>	20.18 ± 1.42 <sup>g</sup>	90.17 ± 0.01 <sup>a</sup>	70.47 ± 0.57 <sup>c</sup>	86.12 ± 0.26 <sup>b</sup>
EPA + DHA	33.31 ± 0.13 <sup>e</sup>	35.94 ± 0.29 <sup>d</sup>	25.16 ± 0.02 <sup>f</sup>	17.97 ± 0.27 <sup>g</sup>	89.34 ± 0.11 <sup>a</sup>	69.35 ± 0.36 <sup>c</sup>	84.80 ± 0.17 <sup>b</sup>

注:nd 为未检出;同行不同上标字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。下同

由表 1 可知,所有鱼油样品中检测到的 PUFA 主要为 DHA 和 EPA,含量分别为 9.64% ~ 76.63% 和 6.36% ~ 56.37%。此外,鱼油中还有含量比较高的 C18:1 *n*-9<sub>c</sub> (0.55% ~ 24.94%) 和 C16:0 (0.54% ~ 20.10%)。所有鱼油中 *n*-6 PUFA 含量较低,仅有 0.33% ~ 11.31%,而 *n*-3 PUFA 含量较高,达到了 20.18% ~ 90.17%。膳食中适当补充 *n*-3 PUFA 和 *n*-6 PUFA 将有助于人体健康,据报道 *n*-3 PUFA 摄入不足会增加心血管疾病的风险<sup>[21]</sup>。

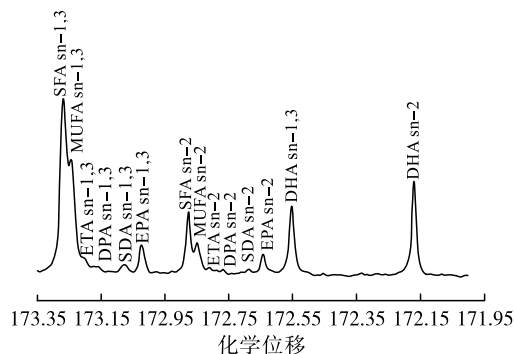
天然鱼油中 DHA 和 EPA 含量分别为 9.64% ~ 26.95% 和 6.36% ~ 21.80%。其中:金枪鱼油中 DHA 含量显著高于其他天然鱼油的( $p < 0.05$ );沙丁鱼油中 EPA 含量最高,约为 22%,而金枪鱼油中 EPA 含量最低,约为 6%。在之前的研究<sup>[22-24]</sup>中也得到了相同的结果。对于 PUFA,三文鱼油中含量最低,约为 31%,金枪鱼油中含量最高,约为 40%,所研究的天然鱼油中 PUFA 含量高于其 MUFA 含量 (25.74% ~ 37.35%) 和 SFA 含量 (31.17% ~ 35.74%),这与文献<sup>[25]</sup>的研究结果一致。

加工鱼油是天然鱼油通过酯化、蒸馏,重新合成 TAG,通过加工提高 EPA 和 DHA 的含量。相较于天然鱼油,3 种加工鱼油中 EPA 和 DHA 含量总体更高 ( $p < 0.05$ ),其中 DHA 含量为 28.43% ~ 76.63%,EPA 含量为 12.72% ~ 56.37%。FO-1 中 DHA 的含量最高,达到了 76.63%。FO-2 中

DHA 的含量与 FO-3 相差不大,但后者中 EPA 的含量更高,达到 56.37%,前者只有 40.70%。加工鱼油中 DHA 和 EPA 的总含量较高,占总脂肪酸的 69.35% ~ 89.34%,而 SFA 和 MUFA 含量比天然鱼油低。

## 2.2 鱼油中 PUFA 的位置分布

脂肪酸在 TAG 中的羰基碳的化学位移是由甘油骨架上羰基所处的特定区域位置 (sn-1, sn-2 或 sn-3) 决定的。对于 PUFA 上的羰基,化学位移也由脂肪酸链上双键的位置和数量决定<sup>[26]</sup>。<sup>13</sup>C-NMR 已经被应用于鱼油品质的鉴定<sup>[27]</sup>。本研究鱼油的典型 <sup>13</sup>C-NMR 谱图如图 1 所示,其中包含 5 种 *n*-3 PUFA 和 2 种脂肪酸组 (SFA、MUFA) 的位置分布。



注:DPA. 二十二碳五烯酸;ETA. 二十碳四烯酸;SDA. 十八碳四烯酸

图 1 鱼油的典型 <sup>13</sup>C-NMR 谱图 (金枪鱼油)

由图 1 可知,总体来看,在羰基区域发现 14 个

羰基信号,这与先前的鱼油脂质  $^{13}\text{C}$ -NMR 分析结果<sup>[17]</sup>是一致的,其化学位移( $\delta$ )范围为 172.17 ~ 173.27。

不同鱼油中脂肪酸的位置分布见表 2。

由表 2 可知,FO-1 中 sn-2 DHA 含量约为 20%,sn-1,3 DHA 含量约为 42%,均高于其他鱼油。加工鱼油中 sn-1,3 DHA 的含量高于 sn-2

DHA,但在天然鱼油中却得到相反的结果。无论是加工鱼油还是天然鱼油,EPA 在 sn-1,3 位的酯化程度大于在 sn-2 位的酯化程度,但在 FO-1 中这一趋势并不明显,sn-1,3 EPA 和 sn-2 EPA 分别为 6.95% 和 6.13%。MUFA 的分布规律与 EPA 一致。在所有样品中,只有 FO-1 的 SFA 在 sn-2 位的含量比 sn-1,3 位的高。

表 2 不同鱼油中脂肪酸的位置分布

脂肪酸	天然鱼油				加工鱼油		
	金枪鱼油	沙丁鱼油	深海鱼油	三文鱼油	FO-1	FO-2	FO-3
SFA (sn-1,3)	27.50 ± 0.80 <sup>ab</sup>	22.60 ± 1.23 <sup>c</sup>	25.40 ± 1.39 <sup>bc</sup>	29.78 ± 1.57 <sup>a</sup>	0.49 ± 0.40 <sup>e</sup>	11.78 ± 0.80 <sup>d</sup>	2.29 ± 1.20 <sup>e</sup>
MUFA, $\Delta 9$ (sn-1,3)	19.41 ± 0.45 <sup>bc</sup>	18.23 ± 2.09 <sup>e</sup>	21.63 ± 1.17 <sup>b</sup>	24.98 ± 0.24 <sup>a</sup>	1.13 ± 1.05 <sup>e</sup>	8.06 ± 0.23 <sup>d</sup>	2.09 ± 0.62 <sup>e</sup>
ETA, $\Delta 8$ (sn-1,3)	2.45 ± 0.00 <sup>a</sup>	2.25 ± 0.70 <sup>a</sup>	2.79 ± 0.04 <sup>a</sup>	2.81 ± 0.75 <sup>a</sup>	2.17 ± 1.89 <sup>a</sup>	2.22 ± 0.21 <sup>a</sup>	0.82 ± 0.30 <sup>b</sup>
DPA, $\Delta 7$ (sn-1,3)	1.53 ± 0.43 <sup>b</sup>	1.56 ± 0.43 <sup>b</sup>	2.11 ± 0.16 <sup>b</sup>	1.50 ± 0.04 <sup>b</sup>	8.32 ± 1.46 <sup>a</sup>	4.00 ± 0.63 <sup>b</sup>	4.02 ± 2.38 <sup>b</sup>
SDA, $\Delta 6$ (sn-1,3)	0.67 ± 0.09 <sup>d</sup>	6.69 ± 0.37 <sup>b</sup>	3.79 ± 0.87 <sup>c</sup>	1.72 ± 0.04 <sup>d</sup>	9.07 ± 0.43 <sup>a</sup>	7.10 ± 0.71 <sup>b</sup>	8.85 ± 1.05 <sup>a</sup>
EPA, $\Delta 5$ (sn-1,3)	5.02 ± 0.69 <sup>f</sup>	13.39 ± 0.05 <sup>e</sup>	8.80 ± 0.51 <sup>d</sup>	4.85 ± 0.08 <sup>f</sup>	6.95 ± 0.18 <sup>e</sup>	22.44 ± 0.80 <sup>b</sup>	35.17 ± 0.52 <sup>a</sup>
DHA, $\Delta 4$ (sn-1,3)	12.06 ± 0.42 <sup>c</sup>	3.63 ± 0.64 <sup>d</sup>	3.36 ± 0.27 <sup>d</sup>	2.25 ± 0.05 <sup>d</sup>	41.54 ± 2.24 <sup>a</sup>	12.59 ± 0.23 <sup>c</sup>	16.76 ± 0.50 <sup>b</sup>
SFA (sn-2)	9.43 ± 0.18 <sup>b</sup>	12.44 ± 0.75 <sup>a</sup>	12.51 ± 0.50 <sup>a</sup>	4.13 ± 0.53 <sup>c</sup>	0.98 ± 1.09 <sup>d</sup>	5.54 ± 0.74 <sup>c</sup>	1.60 ± 0.56 <sup>d</sup>
MUFA, $\Delta 9$ (sn-2)	5.21 ± 0.08 <sup>c</sup>	5.31 ± 0.08 <sup>c</sup>	8.01 ± 0.14 <sup>b</sup>	20.20 ± 0.38 <sup>a</sup>	0.41 ± 0.30 <sup>c</sup>	2.56 ± 0.91 <sup>d</sup>	1.32 ± 0.17 <sup>c</sup>
ETA, $\Delta 8$ (sn-2)	0.98 ± 0.17 <sup>a</sup>	0.82 ± 0.24 <sup>ab</sup>	0.91 ± 0.38 <sup>a</sup>	0.98 ± 0.08 <sup>a</sup>	0.31 ± 0.16 <sup>b</sup>	1.24 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.78 ± 0.26 <sup>ab</sup>
DPA, $\Delta 7$ (sn-2)	0.37 ± 0.17 <sup>d</sup>	1.43 ± 0.29 <sup>abc</sup>	0.80 ± 0.22 <sup>cd</sup>	0.35 ± 0.05 <sup>d</sup>	1.62 ± 0.36 <sup>ab</sup>	1.96 ± 0.49 <sup>a</sup>	0.98 ± 0.16 <sup>bcd</sup>
SDA, $\Delta 6$ (sn-2)	0.43 ± 0.09 <sup>e</sup>	2.91 ± 0.09 <sup>a</sup>	2.14 ± 0.28 <sup>c</sup>	0.87 ± 0.02 <sup>d</sup>	0.70 ± 0.11 <sup>de</sup>	2.66 ± 0.29 <sup>ab</sup>	2.47 ± 0.10 <sup>bc</sup>
EPA, $\Delta 5$ (sn-2)	2.69 ± 0.00 <sup>de</sup>	3.08 ± 0.06 <sup>d</sup>	2.16 ± 0.40 <sup>ef</sup>	1.70 ± 0.05 <sup>f</sup>	6.13 ± 0.71 <sup>c</sup>	10.54 ± 0.37 <sup>b</sup>	18.11 ± 0.34 <sup>a</sup>
DHA, $\Delta 4$ (sn-2)	12.25 ± 0.01 <sup>b</sup>	5.66 ± 0.26 <sup>d</sup>	5.59 ± 0.40 <sup>d</sup>	3.95 ± 0.22 <sup>e</sup>	20.16 ± 0.95 <sup>a</sup>	7.32 ± 0.50 <sup>c</sup>	6.77 ± 0.15 <sup>c</sup>
SFA	36.93 ± 0.99 <sup>ab</sup>	35.04 ± 0.48 <sup>ab</sup>	37.91 ± 1.89 <sup>a</sup>	33.90 ± 1.04 <sup>b</sup>	1.48 ± 1.50 <sup>d</sup>	17.32 ± 1.53 <sup>c</sup>	3.88 ± 0.63 <sup>d</sup>
MUFA, $\Delta 9$	24.61 ± 0.37 <sup>c</sup>	23.54 ± 2.16 <sup>c</sup>	29.63 ± 1.03 <sup>b</sup>	45.18 ± 0.13 <sup>a</sup>	1.54 ± 1.35 <sup>e</sup>	10.62 ± 1.14 <sup>d</sup>	3.41 ± 0.45 <sup>e</sup>
ETA, $\Delta 8$	3.43 ± 0.17 <sup>ab</sup>	3.07 ± 0.94 <sup>ab</sup>	3.70 ± 0.42 <sup>a</sup>	3.80 ± 0.66 <sup>a</sup>	2.48 ± 1.74 <sup>bc</sup>	3.46 ± 0.23 <sup>ab</sup>	1.60 ± 0.56 <sup>c</sup>
DPA, $\Delta 7$	1.90 ± 0.26 <sup>d</sup>	3.00 ± 0.14 <sup>cd</sup>	2.91 ± 0.38 <sup>cd</sup>	1.85 ± 0.01 <sup>d</sup>	9.94 ± 1.10 <sup>a</sup>	5.96 ± 0.14 <sup>b</sup>	5.00 ± 2.55 <sup>bc</sup>
SDA, $\Delta 6$	1.10 ± 0.17 <sup>d</sup>	9.60 ± 0.28 <sup>b</sup>	5.93 ± 1.15 <sup>c</sup>	2.58 ± 0.01 <sup>d</sup>	9.78 ± 0.32 <sup>ab</sup>	9.75 ± 1.00 <sup>ab</sup>	11.33 ± 0.95 <sup>a</sup>
EPA, $\Delta 5$	7.72 ± 0.69 <sup>f</sup>	16.47 ± 0.01 <sup>c</sup>	10.96 ± 0.12 <sup>c</sup>	6.55 ± 0.12 <sup>f</sup>	13.08 ± 0.52 <sup>d</sup>	32.98 ± 0.42 <sup>b</sup>	53.28 ± 0.86 <sup>a</sup>
DHA, $\Delta 4$	24.31 ± 0.41 <sup>b</sup>	9.29 ± 0.90 <sup>d</sup>	8.96 ± 0.13 <sup>d</sup>	6.19 ± 0.06 <sup>d</sup>	61.71 ± 3.18 <sup>a</sup>	19.91 ± 0.26 <sup>c</sup>	23.53 ± 0.65 <sup>b</sup>

鱼油中 DHA 和 EPA 在 sn-2 位的相对含量如图 2 所示。

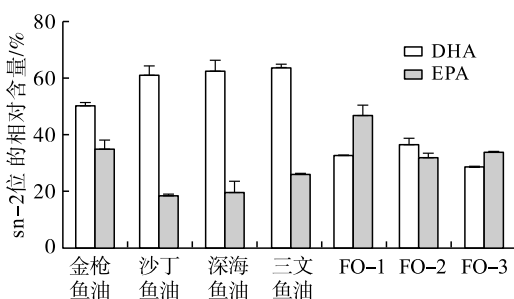


图 2 鱼油中 DHA 和 EPA 的位置分布

由图 2 可知,总体而言,加工鱼油中的 sn-2 DHA 相对含量为 28.78% ~ 36.76%,DHA 几乎均匀分布在 TAG 的 3 个位置。而 DHA 在天然鱼油中较为明显地酯化在 sn-2 位,相对含量达到了 50.39% ~ 63.71%。FO-1 中 sn-2 EPA 的相对含量占 46.77%,接近一半的 EPA 分布在 sn-2 位。

FO-2、FO-3 和金枪鱼油中 EPA 则均匀分布在甘油骨架上,因为其在 sn-2 位相对含量为 31.97% ~ 35.07%。而在沙丁鱼油、深海鱼油和三文鱼油中 sn-2 EPA 相对含量为 18.69% ~ 25.91%,EPA 较少分布在 sn-2 位。

### 2.3 天然鱼油中 SFA 和 MUFA 的位置分布

加工鱼油中脂肪酸主要是 DHA 和 EPA,其他脂肪酸含量较低。因此,使用 Novozym 435 醇解结合 GC 研究了天然鱼油中一些主要的 SFA 和 MUFA 的位置分布,主要的脂肪酸在 TAG 上的酯化位置分布用立体异构指数( $R$ )表示,结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,沙丁鱼油和深海鱼油的 SFA 分布相同,C14:0 和 C16:0 主要分布在 sn-2 位,C18:0 主要分布在 sn-1,3 位。金枪鱼油中的主要 SFA(C14:0、C16:0 和 C18:0)分布呈逐渐变化的趋势,C14:0 主要分布在 sn-2 位,C16:0 几乎平均分布在

3个位置,而C18:0主要分布在sn-1,3位。三文鱼油中的3个SFA都主要位于sn-1,3位。对于MUFA,除三文鱼油外,C16:1在其他3种天然鱼油

中几乎都处于随机分布状态,C18:1主要分布在sn-1,3位。4种天然鱼油中,C20:1主要分布在sn-1,3位。

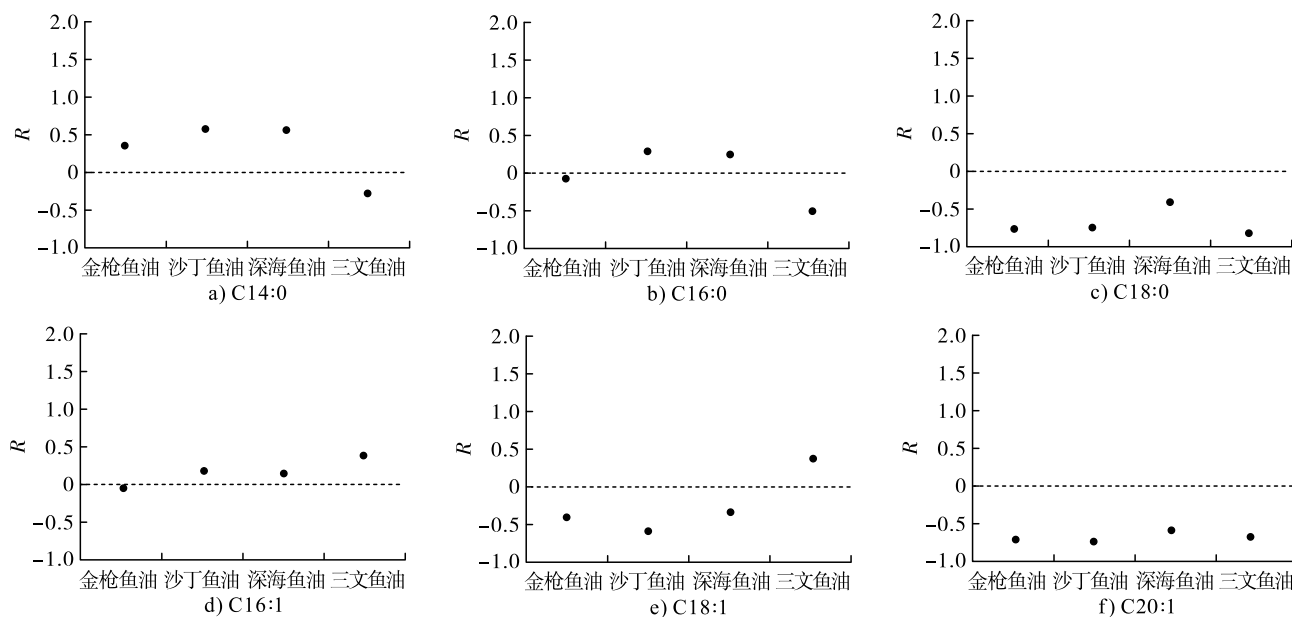


图3 天然鱼油中主要脂肪酸的异构化

### 3 结论

鱼油的脂肪酸组成以及其在TAG上的位置分布是决定鱼油营养功能和生物利用度的关键因素。加工鱼油相较于天然鱼油拥有更高的DHA和EPA含量。但是加工鱼油中DHA在TAG上是均匀分布的,而在天然鱼油中DHA主要分布在sn-2位。EPA的位置分布无明显规律,无论是天然鱼油还是加工鱼油,它都可以主要分布在sn-1,3、sn-2位,或者随机分布。不同天然鱼油中SFA如C14:0、C16:0、C18:0和MUFA如C16:1、C18:1、C20:1也没有明确分布规律。鱼油的加工工艺可以提高DHA的含量但是改变了其DHA在TAG碳骨架的分布。该研究不仅为含有高PUFA的油脂TAG结构分析提供了新方法,而且也为母乳替代脂或者其他结构脂的合成提供了理论依据。不同DHA分布方式的鱼油其生物利用度的差异是接下来的研究重点。

#### 参考文献:

- [1] LAURITZEN L, HANSEN H S, JØRGENSEN M H, et al. The essentiality of long chain  $n-3$  fatty acids in relation to development and function of the brain and retina[J]. *Prog Lipid Res*, 2001, 40(1/2): 1-94.
- [2] VALENTINE R C, VALENTINE D L. *Omega-3* fatty acids in cellular membranes: A unified concept[J]. *Prog Lipid Res*, 2004, 43(5): 383-402.
- [3] QI C, SUN J, XIA Y, et al. Fatty acid profile and the sn-2 position distribution in triacylglycerols of breast milk during different lactation stages[J]. *J Agric Food Chem*, 2018, 66(12): 3118-3126.
- [4] DUNSTAN J A, MITOULAS L R, DIXON G, et al. The effects of fish oil supplementation in pregnancy on breast milk fatty acid composition over the course of lactation: A randomized controlled trial[J]. *Pediatr Res*, 2007, 62(6): 689-694.
- [5] DEWAPRIYA P, KIM S K. Marine microorganisms: An emerging avenue in modern nutraceuticals and functional foods[J]. *Food Res Int*, 2014, 56: 115-125.
- [6] CHRISTENSEN M S, HØY C E. Effects of dietary triacylglycerol structure on triacylglycerols of resultant chylomicrons from fish oil- and seal oil-fed rats[J]. *Lipids*, 1996, 31(3): 341-344.
- [7] JIN J, JIN Q, WANG X, et al. High sn-2 docosahexaenoic acid lipids for brain benefits, and their enzymatic syntheses: A review[J]. *Engineering*, 2020, 6(4): 424-431.
- [8] LINDERBORG K M, KULKARNI A, ZHAO A, et al. Bioavailability of docosahexaenoic acid 22:6( $n-3$ ) from enantiopure triacylglycerols and their regioisomeric counterpart in rats[J]. *Food Chem*, 2019, 283: 381-389.
- [9] DAMERAU A, AHONEN E, KORTESNIEMI M, et al. Docosahexaenoic acid in regio- and enantiopure triacylglycerols: Oxidative stability and influence of chiral antioxidant[J/OL]. *Food Chem*, 2023, 402: 134271 [2023-02-01]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134271>.

- [10] Animal and vegetable fats and oils – determination of the composition of fatty acids in the 2 – position of the triglyceride molecules; ISO 6800: 1997 [S]. Geneva: ISO, 1998.
- [11] BROCKERHOFF H. A stereospecific analysis of triglycerides[J]. *J Lipid Res*, 1965, 6: 10 – 15.
- [12] BOTTINO N R, VANDENBURG G A, REISER R. Resistance of certain long – chain polyunsaturated fatty acids of marine oils to pancreatic lipase hydrolysis[J]. *Lipids*, 1967, 2(6): 489 – 493.
- [13] ZHANG Y, WANG X, XIE D, et al. Synthesis and concentration of 2 – monoacylglycerols rich in polyunsaturated fatty acids[J]. *Food Chem*, 2018, 250: 60 – 66.
- [14] WILLETT S A, AKOH C C. Application of taguchi method in the enzymatic modification of menhaden oil to incorporate capric acid[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2018, 95(3): 299 – 311.
- [15] GOUK S W, CHENG S F, ONG A S H, et al. Rapid and direct quantitative analysis of positional fatty acids in triacylglycerols using  $^{13}\text{C}$  NMR[J]. *Eur J Lipid Sci Tech*, 2012, 114(5): 510 – 519.
- [16] YU J, WEI W, WANG F, et al. Evaluation of total, sn – 2 fatty acid, and triacylglycerol composition in commercial infant formulas on the Chinese market: A comparative study of preterm and term formulas[J/OL]. *Food Chem*, 2022, 384: 132477 [2023 – 02 – 01]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132477>.
- [17] TENGKU – ROZAINA T M, BIRCH E J. Positional distribution of fatty acids on hoki and tuna oil triglycerides by pancreatic lipase and  $^{13}\text{C}$  NMR analysis[J]. *Eur J Lipid Sci Tech*, 2014, 116(3): 272 – 281.
- [18] SUÁREZ E R, MUGFORD P F, ROLLE A J, et al.  $^{13}\text{C}$  – NMR regioisomeric analysis of EPA and DHA in fish oil derived triacylglycerol concentrates [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2010, 87(12): 1425 – 1433.
- [19] MOCHIZUKI M, WATANABE Y, TAHA A Y, et al. Advances in characterization of triacylglycerols: Expansion of materials used in Joint JOCS/AOCS Official Method Ch 3a – 19[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2022, 99(6): 535 – 540.
- [20] GUIL – GUERRERO J L, RAMOS – BUENO R P, GÓMEZ – MERCADO F, et al. Positional distribution assessment of essential fatty acids in several fats and oils including plant, fish, and microbial sources and subcutaneous fat of Galician horse[J]. *Eur J Lipid Sci Tech*, 2014, 117(5): 701 – 709.
- [21] CHIUVE S E, RIMM E B, SANDHU R K, et al. Dietary fat quality and risk of sudden cardiac death in women[J]. *Am J Clin Nutr*, 2012, 96(3): 498 – 507.
- [22] ROBLES, A, JIMÉNEZ M J, ESTEBAN L, et al. Enzymatic production of human milk fat substitutes containing palmitic and docosahexaenoic acids at sn – 2 position and oleic acid at sn – 1,3 positions[J]. *LWT – Food Sci Tech*, 2011, 44(10): 1986 – 1992.
- [23] WATANABE Y, SATO S, ASADA M, et al. Enzymatic analysis of positional fatty acid distributions in triacylglycerols by 1(3) – selective transesterification with *Candida antarctica* lipase B: A collaborative study[J]. *J Oleo Sci*, 2015, 64(11): 1193 – 1205.
- [24] 张惠君, 王兴国, 金青哲. 3 种海洋鱼油脂脂肪酸组成及其位置分布[J]. *食品与机械*, 2017, 33(9): 59 – 63.
- [25] LI G, SINCLAIR A J, LI D. Comparison of lipid content and fatty acid composition in the edible meat of wild and cultured freshwater and marine fish and shrimps from China [J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59(5): 1871 – 1881.
- [26] CARNIELLI V P, LUIJENDIJK I H, VAN GOUDOEVEER J B, et al. Structural position and amount of palmitic acid in infant formulas: Effects on fat, fatty acid, and mineral balance [J]. *J Pediatr Gastr Nutr*, 1996, 23(5): 553 – 560.
- [27] 王楠, 于宏威, 李军国, 等. 鱼油品质光谱检测技术的研究进展[J]. *中国油脂*, 2017, 42(11): 147 – 151.

(上接第 36 页)

生育酚是植物油中天然的抗氧化剂,也是人体所必需的功能活性物质,脱臭作为生育酚损失的关键工段,如何优化工艺参数,提高或降低某种生育酚异构体,是提高成品油中生育酚还是脱臭馏出物中生育酚,以最大程度上提高产品的经济价值,还需要不断探索。

#### 参考文献:

- [1] 潘开林,杨峻豪. 生育酚与生育三烯酚在油脂中稳定性

研究[J]. *中国食品添加剂*, 2018(1): 159 – 164.

- [2] 温运启,刘玉兰,王璐阳,等. 不同食用植物油中生育酚组分及含量研究[J]. *中国油脂*, 2017, 42(3): 35 – 39.
- [3] 甘欢华,张斌,刘钟栋,等. 气相色谱法同时快速测定大豆油脱臭馏出物中的生育酚、植物甾醇和角鲨烯含量[J]. *中国油脂*, 2021, 46(5): 39 – 42, 70.
- [4] 张莉华,许新德,邵斌,等. 油脂加工副产物脱臭馏出物的综合利用[J]. *中国食品添加剂*, 2015(1): 157 – 164.