

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070175

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. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070175

· 分析检测 ·

三种淡水鱼不同部位中甘油三酯脂肪酸的位置分布

李金林^{1,3}, 胡祥飞², 万 亮³, 梁庆喜², 彭 斌¹, 王 辉², 涂宗财^{1,2,*}

(1.江西师范大学生命科学学院国家淡水鱼加工技术研发中心, 江西南昌 330022;

2.南昌大学食品科学与技术国家重点实验室, 江西南昌 330047;

3.南昌市检验检测中心, 江西南昌 330012)

摘 要: 为分析淡水鱼不同部位中甘油三酯脂肪酸的含量与位置分布, 本文以草鱼、青鱼、鲫鱼等淡水鱼为代表, 经过固相萃取、专一性脂肪酶酶解, 再利用气相色谱法测试了四个不同部位 (头部、尾部、背部、内脏) 中脂肪酸在甘油三酯 Sn-1,2,3 上的含量及位置分布。结果显示: 三种淡水鱼共检测到 21 种脂肪酸, 单不饱和脂肪酸 (monounsaturated fatty acids, MUFAs) 含量在 29.58%~49.48%, 除草鱼和青鱼内脏外, 三种鱼类其余各部位甘油三酯 Sn-1,3 位置上 MUFAs 的含量显著高于 Sn-2 位 ($P<0.05$); 多不饱和脂肪酸 (polyunsaturated fatty acids, PUFAs) 含量范围为 17.51%~46.55%, 除草鱼背、尾部以及青鱼头、内脏, 其他样品中甘油三酯 Sn-2 位置上 PUFAs 的含量显著高于 Sn-1,3 位 ($P<0.05$); 三种淡水鱼中, 花生四烯酸 (arachidonic acid, ARA) 在甘油三酯上位置分布均匀, 二十碳五烯酸 (eicosapentaenoic acid, EPA) 主要分布于 Sn-1,3 位上, 二十二碳五烯酸 (docosapentaenoic acid, DPA) 和二十二碳六烯酸 (docosahexaenoic acid, DHA) 主要分布于 Sn-2 位上。因此, 不同淡水鱼以及不同部位脂肪酸组成不同, 相同脂肪酸在不同淡水鱼不同部位甘油三酯上的位置分布也存在差异。

关键词: 鱼油, 甘油三酯, 固相萃取, 位置分布, 脂肪酸组成

中图分类号: TS254.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)10-0290-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070175



本文网刊:

Positional Distribution of Fatty Acids in Triglycerides from Different Parts of Three Freshwater Fish

LI Jinlin^{1,3}, HU Xiangfei², WAN Liang³, LIANG Qingxi², PENG Bin¹, WANG Hui², TU Zongcai^{1,2,*}

(1.National Freshwater Fish Processing Technology Research and Development Center in College of Life Science of Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;

2.State Key Laboratory of Food Science and Technology in Nanchang University, Nanchang 330047, China;

3.Nanchang Center for Inspection and Testing, Nanchang 330012, China)

Abstract: The position distribution of fatty acids in triglycerides from different parts of freshwater fish was investigated in this paper. The position distribution of fatty acids on triglycerides Sn-1,2,3 in four parts (head, tail, back, and viscera) from three freshwater fish species (grass, black, and crucian carp) was analyzed by gas chromatography after the solid phase extraction, enzymatic hydrolysis. The results showed that a total of 21 fatty acids were monitored on triglycerides of three freshwater fish species. The content of monounsaturated fatty acids (MUFAs) ranged from 29.58% to 49.48%, and MUFAs located in Sn-1,3 positions were significantly higher than those in the Sn-2 position in all samples ($P<0.05$), except for viscera of grass and black carp. The content of polyunsaturated fatty acids (PUFAs) varied from 17.51% to 46.55%, and

收稿日期: 2022-07-19

基金项目: 国家自然科学基金 (32060557, 32260604); 江西省重点研发项目 (20203BBFL63062)。

作者简介: 李金林 (1983-), 男, 博士, 高级工程师/教授, 研究方向: 水产加工及副产物高值化利用, E-mail: lijnlin405@126.com。

* 通信作者: 涂宗财 (1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食物资源开发与高效利用, Email: tuzc_mail@aliyun.com。

PUFAs located in the Sn-2 position were significantly higher than those in Sn-1,3 positions in all samples ($P<0.05$), except for back and tail of grass carp and head and viscera of black carp. In the three kinds of fish, arachidonic acid (ARA) was evenly distributed in three positions of triglycerides. Eicosapentaenoic acid (EPA) was mainly distributed in the Sn-1,3 positions. In comparison, docosapentaenoic acid (DPA) and docosahexaenoic acid (DHA) were distributed primarily in the Sn-2 position. It can conclude that the fatty acid composition in different parts of different freshwater fish species was various, and the distribution of the same fatty acids on triglycerides in the varied elements of freshwater fish species was also different.

Key words: fish oil; triglycerides; solid phase extraction; location distribution; fatty acid composition

我国是水产大国,淡水鱼产量与消费量居世界第一。据 2022 年中国渔业统计年鉴统计显示,我国 2021 年的淡水鱼养殖产量为 3183.27 万吨,占水产养殖总量的 59.01%^[1]。目前,对淡水鱼加工主要取其背腹部的肌肉组织,而鱼头、鱼尾、内脏等副产物被当作废弃物丢弃或制成饲料,造成资源浪费。相关研究发现,水产品加工副产物含有蛋白质、氨基酸、矿物质、油脂、有机钙等营养素^[2-3]。鱼脂由于具有抗某些疾病的药理活性而引起广泛关注,并有相关学者围绕鱼副产物中脂类的高值化利用开展了大量研究工作。其中,张朋^[4]采用钾法提取草鱼内脏中的鱼油,使鱼油提取率达 58.61%。在四大家鱼的脂肪酸组成中,鱼粗脂肪含量为 50.24~104.4 g/kg 肌肉^[5]。鲢鱼的脂肪含量最高,且其鱼眼和鱼头中含有更高比例的 PUFAs(占总脂肪酸的 23.7%~37%)^[6],内脏中 DHA 和鱼鳞中 ARA 约占 7.21% 和 8.30%,显著高于其他部位^[7]。前期研究主要是对淡水鱼不同部位全脂分析,而其各部位甘油三酯脂肪酸的种类及其含量尚不明确,因此探明淡水鱼不同部位甘油三酯脂肪酸组成,对实现淡水鱼副产物高值化利用具有重要意义。

甘油三酯是淡水鱼脂质的主要成分,且含有一定比例酰基化的长链多不饱和脂肪酸,其在调节脂质代谢,细胞膜流动性,增强机体免疫功能等方面作用重大^[8-9]。脂肪酸在甘油三酯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消化和吸收。鱼油中, DHA 主要分布在甘油三酯的 Sn-2 位上,其能显著降低脂肪酸合成酶的活性,达到降低肝脏甘油三酯的效果^[10]。前期研究发现,棕榈酸处于 Sn-2 位时,可明显促进人体对钙元素的吸收,提高骨骼质量,同时也影响其他脂肪酸,如硬脂酸和豆蔻酸的吸收和代谢^[11-12]。Ruiz-Lopez 等^[13-15]关于鲑鱼油的测定结果显示, $C_{18:1}$ 和 $C_{18:2}$ 主要分布在 Sn-1,3 位,长链多不饱和脂肪酸(long chain polyunsaturated fatty acids, LCPUFAs)在 Sn-2 位的含量高于 Sn-1,3 位,且 Sn-2 位不饱和脂肪酸的氧化稳定性大于 Sn-1,3 位。脂肪酸在甘油三酯中的位置分布不同,会导致其在体内代谢能力和体外的抗氧化能力差异,最终导致对健康产生影响。Florisil 固相萃取柱中的萃取介质弗罗里硅土作为氧化镁复合的极佳硅胶吸附剂,适用于从非极性基质中

吸附极性化合物;而 Silica 固相萃取柱适于从非极性基质中吸附中等/弱极性化合物。基于此,本研究采用 Florisil 与 Silica 固相萃取相结合,分析三种淡水鱼(草鱼、青鱼、鲫鱼)的头部、尾部、背部、内脏等四个不同部位中甘油三酯上脂肪酸的位置分布,为淡水鱼副产物的高值化利用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

青鱼、草鱼、鲫鱼(1 kg/条,10 条/种) 购于南昌天虹商场,用自来水清洗 3 次,解剖并去除鱼的鳞片后,将其分离成 4 部分,即鱼头、鱼背、内脏和鱼尾。样品密封于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保存备用;0.05 mol/L Tris-HCl 缓冲液 北京索莱宝科技有限公司;Florisil 和 Silica 固相萃取柱(1.5 cm $\times$ 6.5 cm, 500 mg, 6 mL) 德国 CNW 科技有限公司;胰脂酶-L3126(100 units/mg) 美国西格玛奥德里奇贸易有限公司;三氯甲烷、正己烷、甲醇和无水乙醚(色谱纯) 天津大茂化学试剂厂。

7890A 型气相色谱仪(配有氢火焰离子检测器及 Xcalibur1.2 数据处理系统) 美国 Agilent 公司;T10 型均质机 德国 IKA/艾卡;GL-20G-II 型低温高速离心机 湖南凯达科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 鱼脂提取 参照 Folch 等^[16]法,略作调整。取鱼肉 25 g,加入 50:100:50(v/v/v)的氯仿-甲醇-蒸馏水混合液 200 mL,在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰水浴下,采用高速组织匀浆机以 9600 r/min 转速均质 2 min,随后加入氯仿 50 mL,继续均质 1 min,加入 50 mL 蒸馏水再继续均质 30 s。随后采用低温高速离心机分离,温度设置为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$,离心转速 1200 r/min,离心时间 10 min。离心上清液经过分液漏斗分液,氯仿层转入 125 mL 锥形瓶中,加入 2~5 g 无水硫酸钠充分摇匀后过滤,经真空旋转蒸发至干燥,备用。

1.2.2 鱼油甘油三酯的分离 参照 Breil 等^[17]法,取 30 mg 鱼油,上样于 Florisil 固相萃取柱。6 mL 正己烷活化萃取柱,用 12 mL 正己烷/无水乙醚(90/10, v/v)分两次洗脱固相萃取柱,收集洗脱液,用 N_2 (纯度 $>99.99\%$)吹干溶剂,目标组分即为甘油三酯。

1.2.3 甘油三酯 Sn-2, Sn-1,3 位脂肪酸的分离 参照 Gruneis 等^[18]法,将 10 mg 胰脂酶-L3126、10 mg 甘油三酯、0.5 mL BHT(0.01 mol/L)和 2.5 mL 胆酸

钠 (0.05 mg/mL) 添加到 10 mL tris-HCl 缓冲液 (0.05 mol/L, pH7.5) 中, 样品在 37 °C 水浴中振荡 30 min。向混合液加入等量的三氯甲烷, 中止反应, 混合液 5000 r/min 离心 5 min, 取上层有机相, 无水硫酸钠过滤, N₂ 吹干。复溶于 6 mL 正己烷, 上样于 Silica 固相萃取小柱。

参照 Řezanka 等^[19] 法, 采用正己烷/乙醚混合溶剂洗脱, 具体操作如下: 用 6 mL 正己烷活化并平衡小柱; 将酶解混合物上样于萃取小柱, 用 6 mL 正己烷淋洗柱子, 用 12 mL 正己烷/乙醚 (85/15, v/v) 洗脱 Sn-1,3 位脂肪酸, 收集洗脱液 1; 12 mL 正己烷/乙醚 (70/30, v/v) 洗脱甘油二酯, 收集洗脱液 2; 6 mL 乙醚/乙酸 (95/5, v/v) 洗脱 Sn-2 位甘油一酯, 收集洗脱液 3。目标组分用 N₂ 吹干溶剂, 并复溶于 1 mL 正己烷进行气相分析。

1.2.4 气相色谱分析 脂肪酸甲酯化: 取 15 mg 鱼油, 加入 2 mL 己烷, 100 μ L 4% 的甲醇钠溶液, 涡旋反应 1 min, 在 37 °C 反应 35 min 后, 取上层正己烷 1 mL, 过 0.22 μ m 膜, 氮气吹干, 加入 1 mL 正己烷, 待测。

色谱柱: Agilent DB-23 石英毛细柱 (60 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μ m); 升温程序^[20]: 45 °C 保持 4 min, 以 13 °C/min 升至 175 °C, 保持 27 min; 再以 4 °C/min 升温至 215 °C 并保持 35 min, 总共持续 86 min 载气 (N₂) 流速 1.0 mL/min, 压力 2.4 kPa, 进样量 3 μ L; 分

流比: 5:1。通过比较目标峰与标准品的保留时间来定性, 并根据归一化法计算其相对含量。

1.3 数据处理

所有试验均重复 3 次, 用平均值 $\pm$ 标准差表示; 采用 SPSS Statistics V 19.0 对实验数据进行单因素方差分析, 显著性水平设定为 $P<0.05$; 采用 Origin 2022 进行柱状图绘制。

2 结果与分析

2.1 三种淡水鱼不同部位甘油三酯脂肪酸位置分布

如表 1~表 3 所示, 三种淡水鱼甘油三酯中共测出 21 种脂肪酸, 其中包括 6 种 SFAs, 5 种 MUFAs, 10 种 PUFAs。SFAs 含量范围为 18.31%~43.06%, 相对含量最高的是鲫鱼头甘油三酯的 Sn-2 位, 占 43.06%; MUFAs 含量在 29.58%~49.48%, 相对含量最高的是鲫鱼背甘油三酯的 Sn-1,3 位, 占 49.48%; PUFAs 含量范围为 17.62%~46.55%, 相对含量最高的是青鱼头甘油三酯的 Sn-1,3 位, 占 46.55%。另外, 脂肪酸种类数量而言, 这些脂肪酸在不同鱼类中也存在差异, 其中草鱼 16 种, 青鱼 15 种, 鲫鱼 21 种, 三种鱼共有的脂肪酸有 14 种, 分别为 C_{16:0}、C_{18:0}、C_{15:1}、C_{16:1}、C_{18:1}、C_{18:2n6}、C_{18:3n6}、C_{18:3n3}、C_{20:2n6}、C_{20:3n6}、ARA、EPA、DPA 和 DHA, 不同种类鱼甚至同一种类不同个体之间脂质的差异性可能是由于其食物来源、栖息地环境不同所致^[21]。

表 1 草鱼不同部位甘油三酯脂肪酸组成及其相对含量 (%)

Table 1 Fatty acids profile and its relative content of triglycerides in different parts of grass carp (%)

脂肪酸种类	背部		头部		尾部		内脏	
	Sn-2	Sn-1,3	Sn-2	Sn-1,3	Sn-2	Sn-1,3	Sn-2	Sn-1,3
C _{13:0}	1.97 $\pm$ 0.09 ^a	5.24 $\pm$ 0.03 ^B	1.46 $\pm$ 0.04 ^{bc}	4.31 $\pm$ 0.00 ^D	1.42 $\pm$ 0.02 ^c	6.15 $\pm$ 0.02 ^A	1.54 $\pm$ 0.09 ^b	4.74 $\pm$ 0.02 ^C
C _{14:0}	1.43 $\pm$ 0.20 ^a	1.07 $\pm$ 0.10 ^D	1.44 $\pm$ 0.19 ^a	1.46 $\pm$ 0.08 ^A	1.49 $\pm$ 0.02 ^a	1.11 $\pm$ 0.05 ^{CD}	1.40 $\pm$ 0.01 ^a	1.30 $\pm$ 0.02 ^B
C _{16:0}	24.72 $\pm$ 0.71 ^a	13.90 $\pm$ 0.23 ^D	24.98 $\pm$ 1.04 ^a	17.63 $\pm$ 0.40 ^A	24.84 $\pm$ 0.56 ^a	15.30 $\pm$ 0.43 ^C	20.71 $\pm$ 0.28 ^b	15.75 $\pm$ 0.36 ^B
C _{18:0}	2.59 $\pm$ 0.67 ^a	5.58 $\pm$ 0.11 ^D	2.27 $\pm$ 0.15 ^b	7.98 $\pm$ 0.10 ^A	2.17 $\pm$ 0.23 ^b	7.21 $\pm$ 0.30 ^C	1.79 $\pm$ 0.05 ^c	7.47 $\pm$ 0.11 ^B
SFA	30.71 $\pm$ 1.67 ^a	25.79 $\pm$ 0.47 ^C	30.15 $\pm$ 1.42 ^{ab}	31.38 $\pm$ 0.58 ^A	29.92 $\pm$ 0.83 ^b	29.77 $\pm$ 0.80 ^{AB}	25.44 $\pm$ 0.43 ^c	29.26 $\pm$ 0.51 ^B
C _{15:1}	1.30 $\pm$ 0.08 ^c	3.89 $\pm$ 0.02 ^A	0.81 $\pm$ 0.30 ^d	1.90 $\pm$ 0.01 ^D	2.91 $\pm$ 0.25 ^a	2.95 $\pm$ 0.00 ^B	1.96 $\pm$ 0.18 ^b	2.17 $\pm$ 0.01 ^C
C _{16:1}	5.62 $\pm$ 0.71 ^b	2.88 $\pm$ 0.00 ^D	5.72 $\pm$ 0.65 ^{ab}	5.00 $\pm$ 0.00 ^A	5.71 $\pm$ 0.11 ^{ab}	4.18 $\pm$ 0.05 ^C	5.90 $\pm$ 0.04 ^a	4.75 $\pm$ 0.02 ^B
C _{18:1}	35.70 $\pm$ 0.62 ^b	33.40 $\pm$ 0.29 ^B	36.42 $\pm$ 0.36 ^a	34.35 $\pm$ 0.33 ^A	35.00 $\pm$ 0.10 ^c	31.15 $\pm$ 0.52 ^C	34.93 $\pm$ 0.18 ^c	34.62 $\pm$ 0.59 ^A
MUFA	42.62 $\pm$ 1.41 ^b	30.17 $\pm$ 0.31 ^C	42.95 $\pm$ 1.31 ^b	41.25 $\pm$ 0.34 ^A	43.62 $\pm$ 0.46 ^a	38.28 $\pm$ 0.57 ^B	42.79 $\pm$ 0.40 ^b	41.54 $\pm$ 0.62 ^A
C _{18:2n6}	18.73 $\pm$ 1.09 ^c	11.28 $\pm$ 0.52 ^B	19.41 $\pm$ 1.03 ^b	10.54 $\pm$ 0.43 ^C	17.65 $\pm$ 0.76 ^d	10.31 $\pm$ 0.22 ^C	21.82 $\pm$ 0.55 ^a	14.00 $\pm$ 0.11 ^A
C _{18:3n6}	0.48 $\pm$ 0.10 ^b	1.05 $\pm$ 0.08 ^A	0.52 $\pm$ 0.12 ^b	0.21 $\pm$ 0.00 ^C	0.86 $\pm$ 0.05 ^a	0.66 $\pm$ 0.04 ^B	0.86 $\pm$ 0.05 ^a	0.28 $\pm$ 0.00 ^C
C _{18:3n3}	1.37 $\pm$ 0.40 ^b	0.81 $\pm$ 0.01 ^B	1.43 $\pm$ 0.44 ^b	0.58 $\pm$ 0.01 ^C	1.26 $\pm$ 0.02 ^c	0.61 $\pm$ 0.01 ^C	1.77 $\pm$ 0.01 ^a	1.02 $\pm$ 0.05 ^A
C _{20:2n6}	0.46 $\pm$ 0.04 ^b	0.80 $\pm$ 0.01 ^A	0.47 $\pm$ 0.04 ^b	0.76 $\pm$ 0.00 ^A	0.48 $\pm$ 0.01 ^{ab}	0.66 $\pm$ 0.00 ^B	0.52 $\pm$ 0.01 ^a	0.80 $\pm$ 0.01 ^A
C _{20:3n6}	0.44 $\pm$ 0.10 ^b	0.54 $\pm$ 0.00 ^B	0.46 $\pm$ 0.10 ^b	0.46 $\pm$ 0.00 ^C	0.44 $\pm$ 0.05 ^b	0.46 $\pm$ 0.01 ^C	0.59 $\pm$ 0.00 ^a	0.75 $\pm$ 0.01 ^A
C _{20:4n6} (ARA)	0.73 $\pm$ 0.20 ^c	0.61 $\pm$ 0.02 ^A	0.76 $\pm$ 0.21 ^{bc}	0.52 $\pm$ 0.01 ^B	0.81 $\pm$ 0.05 ^b	0.41 $\pm$ 0.04 ^C	0.96 $\pm$ 0.03 ^a	0.69 $\pm$ 0.05 ^A
C _{20:5n3} (EPA)	2.01 $\pm$ 0.36 ^c	26.80 $\pm$ 0.22 ^A	1.63 $\pm$ 1.01 ^d	12.45 $\pm$ 0.13 ^C	2.41 $\pm$ 0.16 ^b	16.74 $\pm$ 0.11 ^B	2.81 $\pm$ 0.15 ^a	10.01 $\pm$ 0.13 ^D
C _{22:5n3} (DPA)	0.68 $\pm$ 0.17 ^b	n. d.	0.69 $\pm$ 0.18 ^b	n. d.	0.80 $\pm$ 0.09 ^a	n. d.	0.75 $\pm$ 0.12 ^a	n. d.
C _{22:6n3} (DHA)	0.38 $\pm$ 0.14 ^a	n. d.	0.39 $\pm$ 0.15 ^a	n. d.	0.41 $\pm$ 0.07 ^a	n. d.	0.41 $\pm$ 0.10 ^a	n. d.
PUFA	25.28 $\pm$ 2.60 ^b	31.89 $\pm$ 0.86 ^A	25.76 $\pm$ 2.29 ^b	25.52 $\pm$ 0.58 ^D	25.12 $\pm$ 1.37 ^b	29.85 $\pm$ 0.43 ^B	30.49 $\pm$ 1.03 ^a	27.55 $\pm$ 0.36 ^C
ω -3 PUFA	4.44 $\pm$ 1.08 ^{bc}	17.61 $\pm$ 0.23 ^A	4.15 $\pm$ 0.78 ^c	13.03 $\pm$ 0.13 ^C	4.88 $\pm$ 0.44 ^b	17.35 $\pm$ 0.11 ^B	5.75 $\pm$ 0.38 ^a	11.02 $\pm$ 0.18 ^D
ω -6 PUFA	20.84 $\pm$ 1.53 ^c	14.28 $\pm$ 0.63 ^B	21.62 $\pm$ 1.50 ^b	12.49 $\pm$ 0.44 ^C	20.24 $\pm$ 0.92 ^d	12.50 $\pm$ 0.31 ^C	24.75 $\pm$ 0.64 ^a	16.52 $\pm$ 0.18 ^A
LCPUFA	3.80 $\pm$ 0.87 ^c	27.47 $\pm$ 0.24 ^A	3.47 $\pm$ 0.55 ^c	12.97 $\pm$ 0.13 ^C	4.43 $\pm$ 0.46 ^b	17.15 $\pm$ 0.15 ^B	4.93 $\pm$ 0.40 ^a	10.70 $\pm$ 0.18 ^D

注: n. d. 未检测出; 同行不同肩标大小写字母分别表示 Sn-1,3 位和 Sn-2 位组间差异显著 ($P<0.05$); 表 2~表 3 同。

表 2 青鱼不同部位甘油三酯脂肪酸组成及其相对含量(%)

Table 2 Fatty acids profile and its relative content of triglycerides in different parts of black carp (%)

脂肪酸种类	背部		头部		尾部		内脏	
	Sn-2	Sn-1,3	Sn-2	Sn-1,3	Sn-2	Sn-1,3	Sn-2	Sn-1,3
C _{16:0}	21.26±0.12 ^a	14.37±0.21 ^C	21.23±0.70 ^a	15.40±0.31 ^A	19.80±0.32 ^b	13.51±0.42 ^D	18.57±0.32 ^c	15.02±0.20 ^B
C _{18:0}	3.83±0.03 ^b	7.46±0.01 ^A	2.36±0.04 ^d	4.06±0.15 ^D	2.58±0.02 ^c	4.80±0.01 ^C	4.05±0.03 ^a	6.97±0.23 ^B
SFA	25.09±0.15 ^a	21.83±0.22 ^A	23.59±0.74 ^b	19.46±0.46 ^B	22.38±0.34 ^c	18.31±0.43 ^C	22.62±0.35 ^c	21.99±0.43 ^A
C _{15:1}	2.34±0.05 ^b	7.74±0.03 ^B	0.31±0.01 ^c	11.7±0.07 ^A	2.50±0.07 ^a	3.94±0.02 ^C	0.33±0.05 ^c	1.26±0.02 ^D
C _{16:1}	1.64±0.02 ^c	1.27±0.05 ^C	2.09±0.02 ^a	1.56±0.01 ^B	1.74±0.02 ^b	1.79±0.01 ^A	0.33±0.00 ^d	1.23±0.07 ^C
C _{17:1}	1.03±0.01 ^a	n. d.	0.18±0.00 ^c	n. d.	0.73±0.00 ^b	n. d.	0.71±0.00 ^b	n. d.
C _{18:1}	26.30±0.24 ^b	24.29±0.52 ^C	27.00±0.71 ^b	18.20±0.25 ^D	26.80±0.44 ^b	32.89±0.76 ^A	40.20±0.12 ^a	31.34±0.88 ^B
MUFA	31.31±0.32 ^b	33.30±0.60 ^B	29.58±0.74 ^c	31.46±0.33 ^C	31.77±0.53 ^b	38.62±0.79 ^A	41.57±0.17 ^a	33.83±0.97 ^B
C _{18:2n6}	35.70±0.75 ^b	20.58±0.22 ^C	36.63±0.43 ^a	13.71±0.12 ^D	36.64±0.53 ^a	27.87±0.47 ^A	25.99±0.13 ^c	26.88±0.64 ^B
C _{18:3n6}	0.71±0.01 ^c	n. d.	0.82±0.02 ^b	n. d.	0.70±0.05 ^c	0.49±0.01 ^A	2.19±0.01 ^a	0.50±0.02 ^A
C _{18:3n3}	2.81±0.03 ^b	1.61±0.00 ^C	3.34±0.05 ^a	1.13±0.00 ^D	2.94±0.01 ^b	2.21±0.04 ^A	2.37±0.09 ^c	2.00±0.01 ^B
C _{20:2n6}	0.62±0.02 ^b	4.14±0.01 ^B	0.29±0.01 ^d	7.50±0.01 ^A	0.42±0.02 ^c	0.93±0.04 ^C	2.95±0.04 ^a	0.85±0.01 ^D
C _{20:3n6}	0.89±0.02 ^a	1.47±0.04 ^A	0.69±0.01 ^b	1.18±0.01 ^C	0.87±0.06 ^a	1.46±0.03 ^A	0.46±0.00 ^c	1.35±0.01 ^B
C _{20:4n6}	0.73±0.02 ^b	0.57±0.05 ^B	0.62±0.02 ^c	0.73±0.01 ^A	0.71±0.03 ^b	0.60±0.00 ^B	0.91±0.01 ^a	0.61±0.01 ^B
C _{20:5n3}	0.79±0.04 ^b	14.97±0.13 ^B	1.31±0.00 ^a	22.30±0.25 ^A	0.39±0.02 ^c	8.45±0.17 ^D	0.71±0.00 ^b	10.06±0.15 ^C
C _{22:5n3}	0.53±0.04 ^a	n. d.	0.25±0.02 ^b	n. d.	0.56±0.03 ^a	n. d.	0.24±0.01 ^b	n. d.
C _{22:6n3}	1.34±0.16 ^a	n. d.	0.76±0.08 ^b	n. d.	1.36±0.10 ^a	n. d.	0.71±0.05 ^b	n. d.
PUFA	44.12±1.09 ^a	43.27±0.45 ^B	44.17±0.64 ^a	46.55±0.40 ^A	44.59±0.85 ^a	42.01±0.76 ^C	36.53±0.34 ^b	42.19±0.85 ^C
ω-3 PUFA	5.47±0.27 ^{ab}	16.51±0.13 ^B	5.66±0.15 ^a	23.43±0.25 ^A	5.25±0.16 ^b	10.66±0.21 ^D	4.03±0.15 ^c	12.00±0.16 ^C
ω-6 PUFA	38.65±0.82 ^b	26.76±0.32 ^C	39.05±0.49 ^{ab}	23.12±0.15 ^D	39.34±0.69 ^a	31.35±0.55 ^A	32.50±0.19 ^c	30.19±0.69 ^B
LCPUFA	3.39±0.26 ^a	15.54±0.18 ^B	2.94±0.12 ^b	23.03±0.26 ^A	3.02±0.18 ^b	9.05±0.17 ^D	2.57±0.07 ^c	10.67±0.16 ^C

表 3 鲫鱼不同部位甘油三酯脂肪酸组成及其相对含量(%)

Table 3 Fatty acids profile and its relative content of triglycerides in different parts of crucian (%)

脂肪酸种类	背部		头部		尾部		内脏	
	Sn-2	Sn-1,3	Sn-2	Sn-1,3	Sn-2	Sn-1,3	Sn-2	Sn-1,3
C _{13:0}	1.33±0.04 ^a	2.73±0.05 ^A	0.89±0.01 ^c	2.74±0.06 ^A	1.00±0.07 ^b	2.56±0.01 ^B	1.06±0.01 ^b	2.35±0.01 ^C
C _{14:0}	2.41±0.01 ^a	0.97±0.00 ^A	1.77±0.00 ^b	0.80±0.00 ^B	2.39±0.01 ^a	1.05±0.04 ^A	1.74±0.03 ^b	0.83±0.01 ^B
C _{15:0}	0.72±0.00 ^a	n. d.	0.66±0.00 ^{ab}	n. d.	0.69±0.00 ^a	n. d.	0.58±0.00 ^b	n. d.
C _{16:0}	29.92±1.01 ^b	12.84±0.22 ^A	23.55±0.78 ^c	11.01±0.50 ^C	32.72±1.13 ^a	12.24±0.54 ^B	20.52±1.00 ^d	11.91±0.62 ^B
C _{17:0}	0.69±0.02 ^b	0.15±0.01 ^A	0.81±0.03 ^a	n. d.	0.60±0.02 ^b	n. d.	0.69±0.01 ^b	0.14±0.12 ^A
C _{18:0}	3.85±0.02 ^b	4.53±0.05 ^C	3.26±0.01 ^c	4.30±0.04 ^C	5.66±0.02 ^a	5.72±0.30 ^A	3.51±0.04 ^{bc}	4.95±0.05 ^B
SFA	38.92±1.10 ^b	21.22±0.33 ^A	30.94±0.83 ^c	18.85±0.60 ^C	43.06±1.25 ^a	21.57±0.89 ^A	28.10±1.09 ^d	20.18±0.81 ^B
C _{14:1}	0.48±0.03 ^a	n. d.	0.43±0.03 ^a	n. d.	0.41±0.01 ^a	n. d.	0.46±0.04 ^a	n. d.
C _{15:1}	1.62±0.00 ^b	1.05±0.01 ^C	1.54±0.00 ^b	1.27±0.01 ^B	2.07±0.01 ^a	1.30±0.01 ^B	1.39±0.00 ^c	2.24±0.02 ^A
C _{16:1}	4.74±0.03 ^a	3.65±0.01 ^A	3.21±0.01 ^b	2.99±0.02 ^B	4.93±0.05 ^a	3.51±0.01 ^A	2.45±0.05 ^c	2.38±0.02 ^C
C _{17:1}	0.57±0.01 ^b	0.41±0.03 ^A	0.49±0.02 ^b	0.39±0.09 ^A	0.91±0.01 ^a	0.36±0.02 ^A	0.36±0.00 ^c	0.35±0.00 ^A
C _{18:1}	32.98±0.51 ^a	44.37±0.42 ^A	28.09±0.51 ^c	37.26±0.37 ^C	30.20±0.61 ^b	41.94±0.78 ^B	27.95±0.34 ^c	35.84±0.85 ^D
MUFA	40.39±0.58 ^a	49.48±0.47 ^A	33.76±0.57 ^c	41.91±0.49 ^C	38.52±0.69 ^b	47.11±0.82 ^B	32.61±0.43 ^d	40.81±0.89 ^D
C _{18:2n6}	15.94±0.11 ^c	13.32±0.16 ^C	26.04±0.13 ^b	19.66±0.12 ^A	13.25±0.14 ^d	12.27±0.12 ^D	28.30±0.20 ^a	19.15±0.24 ^B
C _{18:3n6}	0.41±0.02 ^c	0.38±0.04 ^B	0.96±0.10 ^a	0.58±0.01 ^A	0.48±0.01 ^c	0.34±0.01 ^B	0.79±0.01 ^b	0.50±0.01 ^A
C _{18:3n3}	1.73±0.05 ^c	1.35±0.01 ^C	5.30±0.10 ^a	3.94±0.11 ^A	1.26±0.01 ^d	0.98±0.05 ^D	4.90±0.16 ^b	3.67±0.11 ^B
C _{20:1n9}	1.11±0.02 ^b	3.75±0.05 ^A	1.00±0.02 ^{bc}	3.06±0.03 ^C	0.99±0.01 ^c	3.20±0.01 ^B	1.52±0.03 ^a	3.56±0.01 ^A
C _{20:2n6}	0.38±0.01 ^c	0.57±0.01 ^B	0.58±0.03 ^b	0.69±0.01 ^{AB}	0.31±0.00 ^c	0.52±0.01 ^B	0.67±0.00 ^a	0.70±0.01 ^A
C _{20:3n6}	0.30±0.01 ^c	0.42±0.02 ^B	0.62±0.02 ^b	0.76±0.01 ^A	0.23±0.01 ^c	0.36±0.00 ^B	0.73±0.05 ^a	0.74±0.02 ^A
C _{20:4n6}	0.30±0.01 ^b	0.35±0.00 ^B	1.07±0.02 ^a	0.75±0.01 ^A	0.22±0.01 ^b	0.28±0.01 ^B	0.92±0.03 ^a	0.70±0.01 ^A
C _{20:5n3}	0.14±0.00 ^d	9.02±0.12 ^D	0.89±0.00 ^a	9.65±0.14 ^C	0.77±0.00 ^b	13.25±0.16 ^A	0.57±0.00 ^c	12.10±0.13 ^B
C _{22:5n3}	0.13±0.01 ^a	n. d.	0.17±0.01 ^a	n. d.	0.11±0.01 ^a	n. d.	0.14±0.01 ^a	n. d.
C _{22:6n3}	0.16±0.01 ^c	n. d.	1.11±0.04 ^a	n. d.	0.16±0.01 ^c	n. d.	0.56±0.01 ^b	n. d.
PUFA	20.60±0.25 ^c	29.16±0.41 ^D	37.74±0.47 ^b	39.09±0.44 ^B	17.62±0.21 ^d	31.20±0.37 ^C	39.10±0.50 ^a	41.12±0.54 ^A
ω-3 PUFA	2.16±0.07 ^c	10.37±0.13 ^D	7.47±0.15 ^a	13.59±0.25 ^C	2.14±0.03 ^c	14.23±0.21 ^B	6.17±0.18 ^b	15.77±0.24 ^A
ω-6 PUFA	18.44±0.18 ^c	18.79±0.28 ^B	30.27±0.32 ^b	25.50±0.19 ^A	15.48±0.18 ^d	16.97±0.16 ^C	32.93±0.32 ^a	25.35±0.30 ^A
LCPUFA	0.73±0.03 ^d	9.37±0.12 ^D	3.24±0.07 ^a	10.40±0.15 ^C	1.26±0.03 ^c	13.53±0.17 ^A	2.19±0.05 ^b	12.80±0.14 ^B

草鱼和鲫鱼中 SFAs 组成丰富, $C_{13:0}$ 和 $C_{14:0}$ 仅在草鱼和鲫鱼中检出, $C_{15:0}$ 和 $C_{17:0}$ 仅在鲫鱼中检出。除鲫鱼外, $C_{13:0}$ 、 $C_{18:0}$ 主要分布在 Sn-1,3 中, $C_{14:0}$ 、 $C_{15:0}$ 、 $C_{16:0}$ 、 $C_{17:0}$ 则主要分布于三种鱼甘油三酯的 Sn-2 位置。不同部位其甘油三酯脂肪酸组成和相对含量也有明显的差异。 $C_{16:0}$ 的含量最高, 其在三种鱼的位置分布基本一致, 在背部、头部和尾部甘油三酯 Sn-2 位置上的相对含量显著地高于内脏中 ($P<0.05$), 其中鲫鱼尾部甘油三酯 Sn-2 位置上的 $C_{16:0}$ 含量最为丰富, 高达 32.72%, 其头部甘油三酯 Sn-1,3 位置最低, 仅为 11.01%。 $C_{18:0}$ 含量排名第二, 除鲫鱼外, 青鱼和草鱼各部位甘油三酯中 Sn-1,3 位 $C_{18:0}$ 的含量明显高于 Sn-2 位, 前者约为后者的 2 倍。此外, 值得注意的是, 与青、草鱼不同, 鲫鱼甘油三酯中 SFAs 在 Sn-2 位上的相对含量显著地高于 Sn-1,3 位上 ($P<0.05$), 前者约为后者的 1.5~2 倍, 其中 $C_{15:0}$ 只分布在 Sn-2 位上, $C_{17:0}$ 分布于除头部和尾部甘油三酯 Sn-1,3 位置的所有位置上。

青鱼和鲫鱼中的 MUFAs 组成丰富, 其中 $C_{14:1}$ 仅在鲫鱼中检出, $C_{17:1}$ 仅在草、鲫鱼中检出。除青鱼内脏以及草鱼肉中, 其他两种鱼各部位甘油三酯 Sn-1,3 位上 MUFAs 的相对含量显著地高于 Sn-2 位 ($P<0.05$), 含量最高的是鲫鱼背部和尾部, 分别 49.48% 和 47.11%。 $C_{18:1}$ 含量最大, 且鲫鱼背部甘油三酯 Sn-1,3 位上含量最高, 为 44.37%。除青鱼尾部以及鲫鱼各部位, 其他两种鱼各部位甘油三酯 Sn-2 位上

$C_{18:1}$ 的相对含量显著高于 Sn-1,3 位 ($P<0.05$)。此外, 青、草、鲫鱼各部位中甘油三酯 Sn-2 位上 $C_{16:1}$ 的相对含量显著高于 Sn-1,3 位 ($P<0.05$), 含量最大的是草鱼头、尾和内脏, 为 5.71%~5.90%; 除鲫鱼背、头和尾部, 其他鱼中各部位甘油三酯 Sn-1,3 位上 $C_{15:1}$ 的相对含量显著高于 Sn-2 位 ($P<0.05$), 含量最大的是青鱼头, 为 11.7%。前期研究也表明 Sn-2 位上的 MUFAs 能正向调节血脂代谢, 从而有效保护心血管, 降低动脉粥样硬化、冠心病等心血管疾病的发病率^[22]。

青、草、鲫鱼中, 不同部位 PUFA 的位置分布及含量具有显著性差异。青鱼中 PUFA 的含量总体偏高, 草鱼背、尾部, 青鱼头、内脏和鲫鱼各部位中甘油三酯 Sn-1,3 位上 PUFA 的相对含量显著高于 Sn-2 位 ($P<0.05$), 含量最大的是青鱼头部, 为 46.55%。多不饱和脂肪酸中, 含量最大的是 $C_{18:2n6}$, 且主要分布于各部位甘油三酯 Sn-2 位上。青鱼中 $C_{18:2n6}$ 含量范围为 13.71%~36.64%, 显著高于其他两种鱼 ($P<0.05$), 含量最丰富的是青鱼头、尾部, 均为 36.64%。此外, 青、草、鲫鱼各部位也检出一定含量的 LCP-UFAs, 主要分布在甘油三酯 Sn-1,3 位上, 含量范围为 9.05%~27.47%, 含量最大的是草鱼背。

2.2 三种淡水鱼不同部位甘油三酯 LCPUFAs 的分布及其含量

由上述表 1~表 3 所示, 青、草、鲫鱼均含有一定

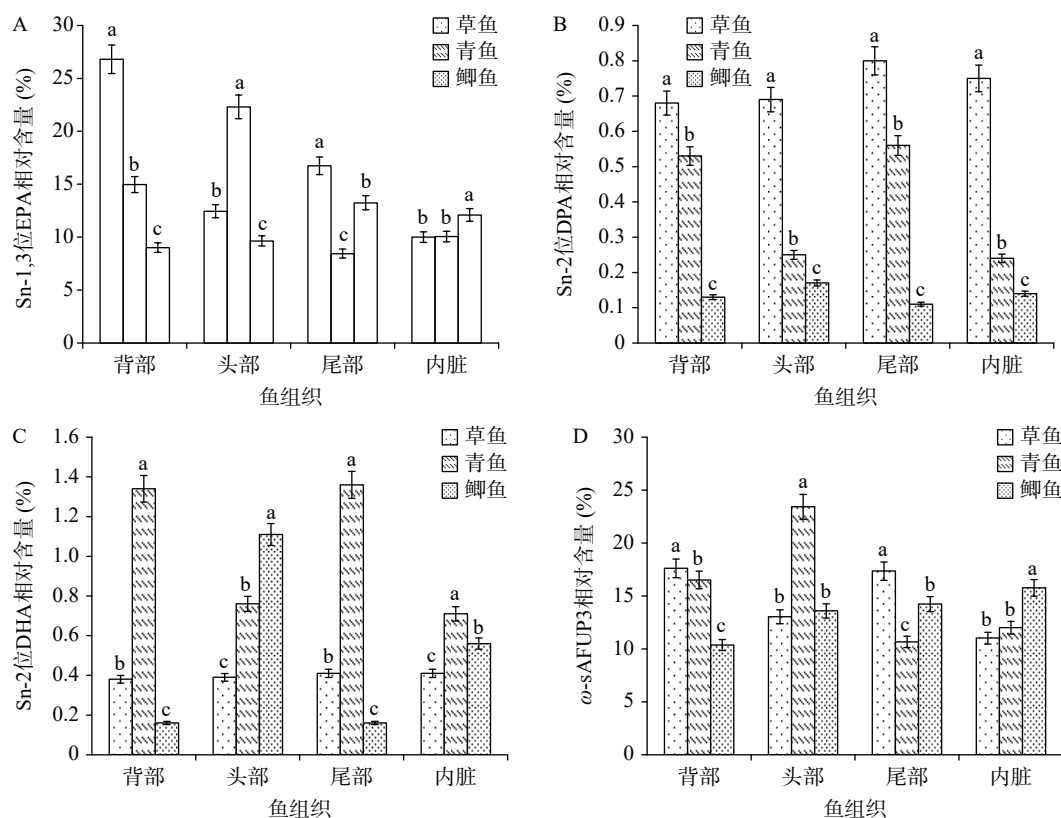


图1 三种淡水鱼不同部位其甘油三酯 LCPUFAs 的分布及其含量

Fig.1 Distribution and content of triglyceride LCPUFAs in different parts of three freshwater fish

注: 不同小写字母表示组间差异显著 ($P<0.05$)。

比例的 LCPUFAs(主要包括 ARA、EPA、DPA 和 DHA), 主要分布在甘油三酯 Sn-1,3 位上。其中, 草鱼甘油三酯 LCPUFAs 含量范围为 10.67%~27.47%, 青鱼中为 9.05%~23.03%, 鲫鱼中为 9.37~13.53%。不同部位其甘油三酯 LCPUFAs 的分布及其含量如图 1 所示, 结果表明, EPA 主要分布于鱼肉甘油三酯 Sn1,3 位上, 草鱼中背部甘油三酯中 EPA 含量最高, 为 26.80%, 内脏最低, 仅为 10.01%; 青鱼中, 头部甘油三酯中 EPA 含量最高, 为 22.30%, 表明青鱼头可作为鱼副产物中 LCPUFAs 高值化利用的重要来源; 在鲫鱼中, 尾部和内脏甘油三酯中 EPA 含量显著地高于头部和背部($P<0.05$), 尾部 EPA 含量为 13.25%; 三种鱼中, DPA 和 DHA 均主要分布于甘油三酯的 Sn-2 位置上, 青、草鱼中 DPA 的相对含量整体偏高, 其尾部甘油三酯 Sn-2 位含量最大, 分别约为 0.56% 和 0.8%; 而青鱼中 DHA 的相对含量则明显高于草、鲫鱼, 含量最高的是背部和尾部, 约为 1.36%; 鲫鱼头部 DHA 含量最大, 为 1.11%; 草鱼四个部位 DHA 含量分布较为均匀, 但含量整体偏低, 仅为 0.38%~0.41%。总体来说, 青、草、鲫鱼甘油三酯 Sn-1,3 位上 ω -3 PUFAs 的含量显著高于 Sn-2, 其中草、青鱼背部 ω -3 PUFAs 的含量显著高于鲫鱼各部位, 前者约为后者的 1.5 倍; 青鱼头部 ω -3 PUFAs 的含量高于草、鲫鱼相同部位, 含量为 23.43%; 三种鱼尾部和内脏中 ω -3 PUFAs 的含量分布趋势和 EPA 一致, 其范围为 10.66%~17.35%。

众所周知, 鱼类富含 ω -3 LCPUFAs, 主要包括 EPA、DPA 和 DHA, 有利于防止某些与炎症相关的疾病的发病率, 如心血管疾病、溃疡性结肠炎和高脂血症^[23-24], 对人的生命健康起着十分重要的作用。因人体不能自身合成, 需长期从饮食中不断摄取和积累 DHA 和 EPA, 因此含有高比例的 EPA 和 DHA 的鱼类是人类饮食所需要的^[25]。青、草、鲫鱼各部位的脂质组成中, 鲫鱼头甘油三酯的 Sn-2 位、鲫鱼背甘油三酯的 Sn-1,3 位以及青鱼头甘油三酯的 Sn-1,3 位分别含有高比例的 SFAs、MUFAs 和 PUFAs, 表明在淡水鱼加工过程中, 其鱼头用作提取 SFAs 和 PUFA 以及作为中国传统汤制食品的原料之一, 张静^[26]也曾报道, 鱼头中的 ω -3 LCPUFAs 具有降低人肝癌细胞脂质聚集的作用并且鱼头汤具有抗氧化、清除体内自由基以及抑制癌细胞生长的作用。此外, 本研究发现具有较高比例的 $C_{16:0}$ 、 $C_{18:1}$ 和 $C_{18:2n6}$ 主要分布于甘油三酯的 Sn-2 位上, 这与张惠君等^[27]研究结果一致, 表明相较于其他哺乳动物和植物油脂, 鱼脂质 Sn-2 位丰富的 $C_{18:1}$ 和 $C_{18:2n6}$ 可提高人体对其利用率。前期研究也证明 Sn-2 位上的脂肪酸被体内脂肪酶水解形成 Sn-2 位甘油一酯, 易与胆汁盐形成乳糜微粒而被机体吸收, 而 Sn-1,3 位上的脂肪酸由于其熔点高于人体体温, 水解为游离脂肪酸后易与金属离子发生皂化反应, 形成不溶物。此外, 各

部位间 ω -3 PUFAs 主要分布于 Sn-1,3 位上(相对含量为 10.37%~23.43%), 其中 EPA 是主要物质。前期研究也发现, 不同鱼类其 EPA 的位置分布也不尽相同, 其中深海鱼甘油三酯中 Sn-2 位 EPA 的含量显著高于 Sn-1,3 位^[28]。因此, 三种淡水鱼中 EPA 的位置分布可能由于体内二酰甘油酰基转移酶的种类和 Sn-1,3 位酰基化偏好所致^[29], 这一点还有待于后期深入研究。三种淡水鱼均含有较低含量的 DPA 和 DHA, 相对含量均低于 1.5%, 与 EPA 不同的是, DPA 和 DHA 主要分布于甘油三酯的 Sn-2 位上。小鼠体内实验表明, DHA 分布于 Sn-2 位可有效地抑制脂肪脂肪酶的活性, 从而有效降低血浆和肝脏中的甘油三酯和胆固醇的浓度^[30]。体外氧化实验也证明, Sn-2 位上的 DHA 的氧化稳定性高于 Sn-1,3 位, 即甘油三酯酰基链呈六边形堆积排列, 降低了 Sn-2 位脂肪酸不饱和和双键的有效浓度, 而附着于同一 TAG 分子的 Sn-1,3 位置上的酰基易与活性氧相互作用, 增加其氧化机率^[31]。草鱼内脏、尾部, 青、鲫鱼头部均含有较高比例的 DPA 和 DHA, 表明上述淡水鱼副产物有望作为 DPA 和 DHA 的原料来源, 进一步进行开发利用。

3 结论

本研究发现青、草、鲫鱼三种淡水鱼中不同部位脂肪酸在甘油三酯中分布规律不同, 在草鱼背, 青鱼背部头部中, SFAs 主要分布于 Sn-2 位; 鲫鱼中, SFAs 主要分布在甘油三酯 Sn-1,3 位。草鱼各部位以及青鱼内脏中, MUFAs 主要分布于 Sn-2 位; 鲫鱼中, MUFAs 则主要分布在甘油三酯 Sn-1,3 位。除草鱼背、尾部与青鱼头、内脏, 其他鱼类各部位甘油三酯上 PUFAs 主要分布于 Sn-2 位。三种淡水鱼均含有较为丰富的 ω -3 PUFAs, 主要分布于 Sn-1,3 位, 青鱼头部含量最高。ARA 在三种淡水鱼甘油三酯中位置分布均匀, EPA 主要分布于 Sn-1,3 位上, DPA 和 DHA 则主要分布于 Sn-2 位上。鱼脂可作为营养补充剂, 对人体健康非常有益, 且脂肪酸组成和含量可作为评价鱼品质的关键指标。本研究结果既有助于消费者充分了解三种淡水鱼不同部位间脂质的差异, 又为其分部位加工和副产品高值化利用提供理论依据。

参考文献

- [1] 陈璠. 2021 年全国渔业统计情况综述[G]. 2022 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2022: 60. [CHEN J. Summary of national fishery statistics in 2021[G]. 2022 China Fisheries Statistical Yearbook. Beijing: China Agricultural Press, 2022: 60.]
- [2] BONACCIO M, RUGGIERO E, CASTELNUOVO A D, et al. Fish intake is associated with lower cardiovascular risk in a Mediterranean population: Prospective results from the Moli-sani study[J]. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 2017, 27(10): 865-873.
- [3] 孙素玲, 李雪, 顾小红, 等. 鲢鱼肌肉和副产物营养成分分析及评价[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 45-49. [SUN S L, LI X, GU X H, et al. Analysis and evaluation of nutritional compositions

- of *Miichthys miuy* muscle and by-products[J]. Food and Machinery, 2020, 36(7): 45–49.]
- [4] 张朋. 鱼油的提取及其纳米脂质体的制备和性质研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013. [ZHANG P. Study on the extraction of fish oil and the preparation and properties of its nanoliposomes[D]. Nanchang: Nanchang University, 2013.]
- [5] 韩迎雪. 我国主要淡水鱼品种脂质特征分析及其鱼肉凝胶性能研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019. [HAN Y X. Analysis of lipid characteristics and gelatinous properties of major freshwater fish species in China[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.]
- [6] ZHANG X, NING X, HE X, et al. Fatty acid composition analyses of commercially important fish species from the Pearl River Estuary, China[J]. *PLoS One*, 2020, 15(1): e0228276.
- [7] KANDYLIARI A, MALLOUCHOS A, PAPANDROULAKIS N, et al. Nutrient composition and fatty acid and protein profiles of selected fish by-products[J]. *Foods*, 2020, 9(2): 190.
- [8] TOMOAKI I, MIO Y, MAKOTO A. Omega-3 fatty acid-derived mediators that control inflammation and tissue homeostasis[J]. *International Immunology*, 2019, 31(9): 559–567.
- [9] LI N, WU X, ZHUANG W, et al. Fish consumption and multiple health outcomes: Umbrella review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 99: 273–283.
- [10] CHEN Y J, ZHOU X H, HAN B, et al. Composition analysis of fatty acids and stereo-distribution of triglycerides in human milk from three regions of China[J]. *Food Research International*, 2020, 133: 109196.
- [11] 胡盛本, 卓成飞, 邹古月, 等. 氢化大豆油和反刍动物油脂中甘油三酯和磷脂反式脂肪酸的位置分布[J]. *食品科学*, 2017, 38(14): 276–283. [HU S B, ZHUO C F, ZHOU G Y, et al. Positional distribution of trans fatty acids in triglycerides and phospholipids of partially hydrogenated soybean oil and ruminant animal fat[J]. *Food Science*, 2017, 38(14): 276–283.]
- [12] 王俊芳, 杨国良, 王荣艳. 婴幼儿配方奶粉中甘油三酯 Sn-2 位脂肪酸的检测[J]. *中国乳业*, 2019(7): 67–70. [WANG J F, YANG G L, WNAG R Y. Detection of triglyceride Sn-2 fatty acids in infant formula milk powder[J]. *China Dairy*, 2019(7): 67–70.]
- [13] RUIZ-LOPEZ N, STUBHAUG I, IPHARRAGUERRE I, et al. Positional distribution of fatty acids in triacylglycerols and phospholipids from fillets of Atlantic Salmon (*Salmo salar*) fed vegetable and fish oil blends[J]. *Marine Drugs*, 2015, 13(7): 4255–4269.
- [14] TOORANI M R, FARHOOSH R, GOLMAKANI M, et al. Antioxidant activity and mechanism of action of sesamol in triacylglycerols and fatty acid methyl esters of sesame, olive, and canola oils[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 103: 271–278.
- [15] HU X F, LI J L, ZHANG L, et al. Effect of frying on the lipid oxidation and volatile substances in grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillet[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022: e16342.
- [16] FOLCH J, LEES M, SLOANE-STANLEY G H. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1957, 226: 495–509.
- [17] BREIL C, VIAN M A, ZEMB T, et al. "Bligh and Dyer" and Folch methods for solid-liquid-liquid extraction of lipids from microorganisms. Comprehension of solvation mechanisms and towards substitution with alternative solvents[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, 18(4): 708.
- [18] GRÜNEIS V, FRUEHWIRTH S, ZEHL M, et al. Simultaneous analysis of epoxidized and hydroperoxidized triacylglycerols in canola oil and margarine by LC-MS[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(36): 10174–10184.
- [19] ŘEZANKA T, LUKAVSKÝ J, ROZMOŠ M, et al. Separation of triacylglycerols containing positional isomers of hexadecenoic acids by enantiomeric liquid chromatography-mass spectrometry[J]. *Journal of Chromatography B*, 2022, 1208: 123401.
- [20] 张瑜, 戚欣, 白艺珍, 等. 紫苏籽油化学组成与检测技术研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(20): 7181–7188. [ZHANG Y, QI X, BAI Y Z, et al. Advance in chemical composition and related detection technologies of perilla seed oil[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2020, 11(20): 7181–7188.]
- [21] RUDE N P, JESSE T T, WHITLEDGE G W. Fatty acid profiles are biomarkers of fish habitat use in a river-floodplain ecosystem[J]. *Hydrobiologia*, 2016, 773: 63–75.
- [22] 袁婷兰. 母乳脂的中长链甘油三酯组成及其代谢特征[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [YUAN T L. The composition and metabolic characteristics of medium- and long chain triacylglycerol in human milk fat[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]
- [23] CHEN J L, MUTHUKUMARAN J, BAI W B, et al. A critical review on the health benefits of fish consumption and its bioactive constituents[J]. *Food Chemistry*, 2022, 369: 130874.
- [24] 程新伟, 梁鹏, 涂晓玲, 等. 养殖大黄鱼各部位磷脂组分及其脂肪酸组成分析[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(4): 49–53. [CHENG X W, LIANG P, TU X L, et al. Molecular species and lipid composition of phospholipids in different parts of cultured large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(4): 49–53.]
- [25] DOMINGO J L. Nutrients and chemical pollutants in fish and shellfish. Balancing health benefits and risks of regular fish consumption[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, 56(6): 979–988.
- [26] 张静. 鱼头脂质指纹图谱及鱼头汤改善 HepG2 高脂细胞模型脂质沉积作用[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020. [ZHANG J. Lipid fingerprints of fish heads and hypolipidemic effects of fish head soup[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.]
- [27] 张惠君, 王兴国, 金青哲. 3 种海洋鱼油脂肪酸组成及其位置分布[J]. *食品与机械*, 2017, 33(9): 59–63. [ZHANG H J, WANG X G, JIN Q Z. Composition and positional distribution of fatty acids in triacylglycerols of three marine fish oils[J]. *Food and Machinery*, 2017, 33(9): 59–63.]
- [28] MOCHIZUKI M, MATSUYAMA H, SUZUKI K, et al. Fatty acid composition and distribution in triacylglycerols of cultured fishes in Japan[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2021, 31: 101687.
- [29] BEPPU F, YASUDA K, OKADA A, et al. Comparison of the distribution of unsaturated fatty acids at the sn-2 position of phospholipids and triacylglycerols in marine fishes and mammals[J]. *Journal of Oleo Science*, 2017, 66(11): 1217–1227.
- [30] BALIĆ A, VLAŠIĆ D, ŽUŽUL K, et al. Omega-3 versus omega-6 polyunsaturated fatty acids in the prevention and treatment of inflammatory skin diseases[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(3): 741.
- [31] OGASAWARA S, OGAWA S, YAMAMOTO Y, et al. Enzymatic preparation and oxidative stability of human milk fat substitute containing polyunsaturated fatty acid located at Sn-2 position[J]. *Journal of Oleo Science*, 2020, 69(8): 825–835.