

鱼油与微藻和植物油脂肪酸成分比较及其替代策略分析*

Comparison on the Fatty Acid Composition of Fish Oil, Microalgae and Plant Oil and the Strategy Analysis of Fish Oil Replacement

孙春晓, 乔洪金**, 王际英, 张利民, 宋志东, 李宝山

SUN Chunxiao, QIAO Hongjin, WANG Jiyong, ZHANG Limin, SONG Zhidong, LI Baoshan

(山东省海洋资源与环境研究院, 山东省海洋生态修复重点实验室, 山东烟台 264006)

(Key Laboratory of Marine Ecological Restoration, Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai, Shandong, 264006, China)

摘要:【目的】水产养殖业的快速发展和鱼油价格的快速上涨,使得寻找能够替代鱼油的脂肪源日趋紧迫。【方法】采用直接转酯化进行气相色谱鉴定的方法测定鱼油、多种常见植物油和两种微藻的脂肪酸组成,以37种脂肪酸标准品作为参照,比较分析3类脂肪源的异同。【结果】鱼油的脂肪酸组成与微绿球藻(*Nannochloropsis* sp.)和裂壶藻(*Schizochytrium* sp.)相似,但植物油与鱼油相比缺乏EPA和DHA等 $n-3$ 高不饱和脂肪酸。在满足必需脂肪酸需求的前提下,提出两种替代鱼油的策略:①使用38.0%亚麻籽油配合27.7%微绿球藻藻油和34.3%裂壶藻藻油替代鱼油的策略获得与鱼油一致的 $n-3/n-6$ 多不饱和脂肪酸比率,能够较好地满足鱼类的营养需求,可作为替代鱼油的首选策略;②使用38.0%大豆油配合27.7%微绿球藻藻油和34.3%裂壶藻藻油替代鱼油的策略则获得与鱼油大体相同的主要脂肪酸类别,价格较亚麻籽油组低廉,可作为备选策略。【结论】使用高EPA和DHA含量的微藻藻油配合植物油替代鱼油在理论上是可行的。

关键词: 植物油 微绿球藻 裂壶藻 鱼油 替代

中图分类号:Q945.1 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2016)02-0125-06

Abstract:【Objective】With the rapid development of aquaculture and the sharp rise of fish oil price, looking for an alternative lipid source of fish oil is increasingly urgent.【Methods】In this paper, direct transesterification plus gas chromatography identification method was used to determine the fatty acid composition of fish oil,

several common vegetable oils and two species of microalgae based on the reference standards of 37 components of fatty acid methyl ester. Comparative analysis of the similarities and differences between three types of lipid source was conducted.【Results】The fatty acid profile of fish oil was similar to that of *Nannochloropsis* sp. oil and *Schizochytrium* sp. oil. However, the lack of $n-3$ high-unsaturated fatty acids in plant oils was obvious compared to fish oil. Under the premise to meet the requirement of essential fatty acids,

收稿日期:2016-04-14

修回日期:2016-04-22

作者简介:孙春晓(1982—),女,助理研究员,硕士生导师,主要从事饲料微藻研究。

*山东省科技发展计划项目(2014GHY115006),海洋生物产业——水生动物营养与饲料研发创新示范平台项目(201501003),山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2013HZ018)和国家自然科学基金青年基金项目(31201973)资助。

**通讯作者:乔洪金(1983—),男,副研究员,硕士生导师,主要从事藻类生物技术研究, E-mail: hongjinqiao@hotmail.com。

two strategies of fish oil replacement were presented; Using 38.0% linseed oil plus 27.7% *Nannochloropsis* sp. oil and 34.3% *Schizochytrium* sp. oil can obtain the similar $n-3/n-6$ polyunsaturated fatty acid ratio to fish oil, which was better able to meet the nutritional requirements of fish and selected as preferred strategy; Using 38.0% soybean oil with 27.7% *Nannochloropsis* sp. oil and 34.3% *Schizochytrium* sp. oil can get the main categories of fatty acids similar to fish oil, which was relatively cheaper than linseed oil group and used as alternative strategy. **【Conclusion】** Fish oil replacement with high EPA and DHA content microalgae plus plant oil is theoretically feasibility.

Key words: plant oil, *Nannochloropsis* sp., *Schizochytrium* sp., fish oil, replacement

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20160511.005

0 引言

【研究意义】随着全球渔业资源的逐年下降和水产养殖业的迅猛发展,鱼油作为水产养殖饲料中主要的脂肪源,其供给日趋紧张^[1]。而在占据我国水产养殖总产量40%的海水养殖业中,由于大多数养殖品种都必需鱼油中的 $n-3$ 高不饱和脂肪酸(主要指EPA和DHA)^[2],因此对鱼油的需求量很大。近年来,为了减少对鱼油的依赖,在海水鱼饲料中开展了大量以动植物油替代鱼油的研究^[3-4]。脂肪在海水鱼体内主要起到产生能量和构成细胞膜的作用。一方面,脂肪通过线粒体的 β -氧化产生ATP,一些短链的三酰基甘油酯类脂肪酸,更易于在肌肉中被氧化从而为鱼的游动提供能量,而长链三酰基甘油酯类多不饱和脂肪酸(LC-PUFA)尤其是DHA则被选择性保留,因而在肌肉中造成了较高的DHA/EPA比率;另一方面,磷脂类脂肪酸构成细胞膜的磷脂双分子层,主要包含 $16:0$, $18:1n-9$, EPA($20:5n-3$)和DHA($22:6n-3$)4种脂肪酸,而且磷脂类的DHA一般是EPA的2倍,通常认为在低温环境中保持高含量的DHA有助于细胞膜的流动性。海水鱼体内通常含有较多的 $n-3$ 多不饱和脂肪酸和较少的 $n-6$ 多不饱和脂肪酸,因而具有较高的 $n-3/n-6$ 比率,这一特点有助于减少心血管病变和其它慢性疾病的发生^[5]。**【前人研究进展】**由于生活在相对稳定的海洋环境中,海水鱼类可以从食物链中源源不断地获得 $n-3$ 高不饱和脂肪酸(微藻和浮游动物中均含量丰富),一般认为海水鱼类不能将 α -亚麻酸($18:3n-3$)全部转化为EPA和DHA,因此必需脂肪酸主要是EPA和DHA^[2]。植物油因价格较低、来源广泛、使用方便等原因,目前已在多种海水鱼饲料中进行替代鱼油的研究,但大多数植物油缺乏DHA和EPA以及 $n-3$ 多不饱和脂肪酸,主要以 $n-6$ 多不饱和脂肪酸为主,具有较高的 $n-6/n-3$ 比率,因此如果用植物油来完全替代鱼油,通常会引起海水鱼各器官脂肪酸成分的改变,特别是 $n-3$ 高不饱和脂肪酸含量的下

降,影响其营养价值,同时也会导致生长下降和脂肪代谢的改变^[6]。作为食物链最底层的生物,微藻含有丰富的 $n-3$ 高不饱和脂肪酸,是许多水产动物幼体的天然饵料,可以弥补植物油缺乏高不饱和脂肪酸的缺点^[7-8],目前微藻的养殖规模呈现逐年上升的趋势,许多富含DHA或EPA的微藻如裂壶藻(*Schizochytrium* sp.)、隐甲藻和微绿球藻(*Nannochloropsis* sp.)等均已实现产业化生产^[9-11],在水产饲料中的应用潜力巨大。**【本研究切入点】**在海水鱼饲料中添加其它油脂替代鱼油除了必须满足最低脂肪需求量以外,还要兼顾 $n-3$ 高不饱和脂肪酸(DHA/EPA比率)的平衡,以及适宜的 $n-3/n-6$ 多不饱和脂肪酸比率。因此,在植物油中补充适量的微藻,可弥补植物油代替鱼油时部分脂肪酸成分失衡的问题。**【拟解决的关键问题】**比较分析鱼油和几种常见植物油以及两种微藻脂肪酸组成的差异,通过策略优化的方法提出植物油混合微藻替代鱼油的搭配比例,以为低鱼油水产饲料的生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

玉米油(福临门,中粮佳悦天津有限公司)、亚麻籽油(欣奇典,河北欣奇典生物科技有限公司)、葵花仁油(鲁花,内蒙古鲁花葵花仁油有限公司)、橄榄油(欧丽薇兰,意大利Wilmar食用油有限公司)、大豆油(鲁花,阜新浓香花生油有限公司)、花生油(鲁花,阜新浓香花生油有限公司)、鱼油(荣成海跃饲料鱼油有限公司)和裂壶藻粉(*Schizochytrium* sp.,美国Alltech公司)购自市场,微绿球藻藻粉(*Nannochloropsis* sp.)由烟台海融生物技术有限公司提供。

1.2 脂肪酸分析

用于测定脂肪酸的样品(植物油和藻粉)按照Qiao等^[12]的方法进行转酯化。取所得脂肪酸甲酯的正己烷溶液2 μ L进行气相色谱(岛津GC-2010)测定,所用毛细管柱为Supelco SP-2560(100 m \times 0.25

mm,膜厚度 0.20 μm),进样口和检测器的温度设定为 260 $^{\circ}\text{C}$,柱温升温程序为自 140 $^{\circ}\text{C}$ 以 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升高至 240 $^{\circ}\text{C}$ 并恒温 10 min,以高纯氮作为载气,通过与 37 种脂肪酸甲酯混标(美国 Supelco 公司)对照确定脂肪酸组分。

1.3 数据处理

采用 Excel 2007 对数据进行处理,结果用平均数 \pm 标准差($M\pm SD$)表示。

2 结果与分析

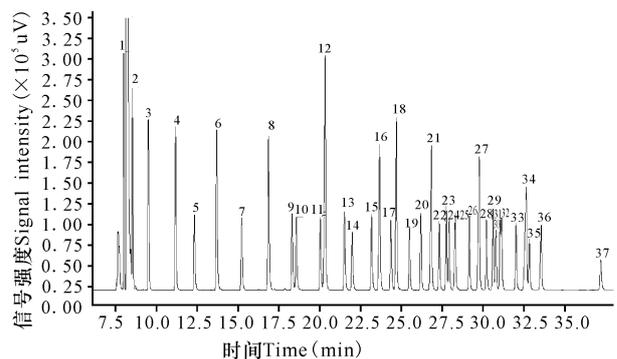
2.1 植物油、微藻和鱼油的脂肪酸成分比较

如图 1 所示,37 种脂肪酸均按照时间顺序依次出峰,峰形均可独立辨别,保留时间可作为分析其它油脂样品的参照。

由表 1 可知,6 种植物油总体上脂肪酸成分相似,主要的脂肪酸均为 C16:0、C18:0、C18:1n-9、C18:2n-6 和 C18:3n-3,这与文献[13-16]报道的植物油脂脂肪酸分析一致。其中亚麻籽油与其它植物油显著的差异在于 C18:3n-3 的含量,在其它几种植物油中仅大豆油的 C18:3n-3 在 5.64%左右,其余均在 1.00%以下,而亚麻籽油的 C18:3n-3 达到 54.56%;橄榄油与其它植物油的显著差异在于其极高的 C18:1n-9 的含量(77.38%),这导致橄榄油和亚麻籽油中 C18:2n-6 的含量显著下降。本文所用大豆油的 C18:3n-3 含量与李丹华等^[13](6.23%~7.41%)和尹兆霞^[14](6.70%)的报道相近,但低于杨春英等^[15](7.95%)的报道,高于金华等^[16](1.04%)的报道;橄榄油 C18:1n-9 含量与李丹华等^[13](75.89%)和杨春英等^[15](75.21%)的报道相近,但高于金华等^[16](67.63%)的报道。这些差异可能主要来源于:①使用的油脂来源于不同的植物品种;②脂肪酸转酯化方法不同导致转酯化效率不同。

鱼油总体的脂肪酸组成与微绿球藻和裂壶藻相似,但与植物油相差甚远,其中最显著的不同即植物油中缺乏 EPA 和 DHA 等 n-3 高不饱和脂肪酸。微绿球藻中 EPA 含量(34.13%)较高,但 DHA 含量(0.79%)极低,而裂壶藻中 DHA 含量(41.45%)较高,但 EPA 含量(1.64%)很低。本文所用微绿球藻 EPA 含量与李秀波等^[17]报道的 *Nannochloropsis limnetica* 的 EPA 含量(38.36%)一致,但远高于他们报道的其它 4 种微绿球藻的 EPA 含量(1.98%~2.53%),在余颖等^[11]综述报道的范围内(27.7%~35%),表明微绿球藻藻种间脂肪酸组成存在较大差异。本文所用裂壶藻的 DHA 含量在魏萍等^[18]综述

报道的范围内(36%~52%),通过进一步解除氧限制可提高裂壶藻的 DHA 含量至 67.61%(文献[19]),因此市售裂壶藻的 DHA 含量仍有进一步提高的余地。



1, C4:0; 2, C6:0; 3, C8:0; 4, C10:0; 5, C11:0; 6, C12:0; 7, C13:0; 8, C14:0; 9, C14:1; 10, C15:0; 11, C15:1; 12, C16:0; 13, C16:1n-7; 14, C17:0; 15, C17:1; 16, C18:0; 17, C18:1n-9t; 18, C18:1n-9c; 19, C18:2n-6t; 20, C18:2n-6c; 21, C20:0; 22, C18:3n-6; 23, C20:1; 24, C18:3n-3; 25, C21:0; 26, C20:2; 27, C20:3n-6; 28, C22:0; 29, C22:1n-9; 30, C20:3n-3; 31, ARA; 32, C20:4n-6; 33, C22:2; 34, C24:0; 35, EPA; 36, C24:1; 37, DHA

图 1 37 种脂肪酸甲酯标准品的气相色谱图谱

Fig. 1 The gas chromatography profile of 37 components of fatty acid methyl ester

2.2 微藻和植物油替代鱼油的策略分析

通过表 1 中鱼油、微藻和各种植物油的比较可以看出,鱼油是一种涵盖短链饱和脂肪酸、中长链单不饱和脂肪酸(Monounsaturated fatty acids, MUFA)、多不饱和脂肪酸(Polyunsaturated fatty acids, PUFA)以及长链 PUFA 的脂肪酸混合物,而微藻的脂肪酸组成与其较为接近,但往往缺乏 DHA 或 EPA 等水产动物必需的长链多不饱和脂肪酸,因此,从替代策略上讲,应首先满足水产动物对必需脂肪酸的需求,这就需要 2 种微藻进行组合,以满足对 DHA 和 EPA 的需求。通过计算,本研究所使用的鱼油其 DHA 和 EPA 完全被替代,需要 27.7%的微绿球藻藻油和 34.3%的裂壶藻藻油。在替代后仍有未被替代的鱼油组分,主要有 C14:0, C16:0, C18:0, C18:1n-9, C18:3n-3, C20:3n-6, C20:3n-3 等,而这些成分恰好是植物油的主要成分(表 2)。由于 C18:1n-9 和 C18:3n-3 在鱼体中发挥着重要作用,因此接下来进一步使用植物油替代应以满足这种脂肪酸的需求为主,特别是满足 C18:3n-3 的需求。从表 1 可以看出,大豆油和亚麻籽油比其它植物油含有较高的 C18:3n-3 含量,同时二者又都含有较高

表 1 6种植物油、2种微藻和鱼油脂肪酸组分(总脂肪酸含量百分比)的比较(%)

Table 1 The comparison of fatty acid composition (% total fatty acids) of 6 plant oils, 2 microalgae and fish oil (%)

脂肪酸 Fatty acids	鱼油 Fish oil	微绿球藻 <i>Nannochloropsis</i> sp.	裂壶藻 <i>Schizochytrium</i> sp.	大豆油 Soybean oil	橄榄油 Olive oil	玉米油 Corn oil	亚麻籽油 Linseed oil	葵花仁油 Sunflower seed oil	花生油 Peanut oil
C14 : 0	6.89±0.06	4.52±0.15	5.55±0.04	0.12±0.01	0.03±0.02	0.04±0.00	0.04±0.00	0.07±0.00	0.04±0.00
C15 : 0	—	0.25±0.01	0.26±0.01	—	—	—	—	—	—
C16 : 0	20.17±0.02	11.73±0.15	20.39±0.44	12.21±0.14	11.22±0.33	11.47±0.03	5.44±0.02	6.08±0.04	11.23±0.41
C16 : 1 n-9	—	1.21±0.03	—	—	—	—	—	—	—
C16 : 1 n-7	6.08±0.05	21.99±0.18	0.09±0.01	0.09±0.01	0.8±0.02	0.08±0.01	0.06±0.00	0.08±0.01	0.06±0.00
C18 : 0	3.33±0.01	3.56±0.10	0.59±0.05	3.53±0.02	2.9±0.07	1.62±0.25	2.97±0.02	3.75±0.06	2.85±0.10
C18 : 1 n-9	13.11±0.07	7.77±0.15	0.07±0.01	23.46±0.15	77.38±0.72	25.63±0.12	17.69±0.00	23.28±0.3	42.01±0.20
C18 : 1 n-7	—	0.43±0.02	0.20±0.00	—	—	—	—	—	—
C18 : 2 n-6	2.21±0.03	1.87±0.04	5.02±1.95	52.77±0.10	5.89±0.09	58.02±0.68	18.00±0.02	64.86±0.38	38.1±0.95
C20 : 0	0.71±0.03	0.06±0.01	0.14±0.01	0.30±0.01	0.35±0.01	0.3±0.02	0.11±0.00	0.23±0.01	1.15±0.13
C18 : 3 n-6	0.14±0.00	0.18±0.01	0.23±0.00	0.32±0.01	—	0.11±0.02	0.36±0.01	—	—
C18 : 3 n-3	3.25±0.07	0.20±0.02	—	5.64±0.05	0.63±0.02	0.72±0.37	54.56±0.01	0.11±0.01	0.99±0.05
C20 : 3 n-6	3.09±0.06	0.34±0.42	0.40±0.00	—	—	—	—	—	—
C22 : 0	0.18±0.01	0.34±0.01	0.09±0.01	0.35±0.00	0.09±0.00	0.14±0.02	0.12±0.01	0.59±0.03	2.30±0.45
C22 : 1 n-11	0.10±0.00	—	—	—	—	—	—	—	—
C20 : 3 n-3	4.54±0.14	0.05±0.01	1.09±0.05	—	—	—	—	—	—
花生回烯酸 (Arachidonic acid,ARA)	0.79±0.01	0.50±0.03	0.72±0.09	0.03±0.01	0.12±0.16	0.01±0.00	—	0.02±0.00	0.05±0.02
C24 : 0	0.12±0.00	—	—	0.12±0.01	0.05±0.01	0.11±0.00	0.08±0.00	0.18±0.01	0.95±0.26
EPA	9.44±0.15	34.13±0.46	1.64±0.11	—	—	—	—	—	—
DPA	0.45±0.01	—	17.28±0.61	—	—	—	—	—	—
DHA	14.2±0.08	0.79±0.02	41.45±2.27	—	—	—	—	—	—

表 2 使用 27.7%微绿球藻藻油,34.3%裂壶藻藻油和 38.0%大豆油替代鱼油的结果

Table 2 The result of fish oil replacement with 27.7% *Nannochloropsis* sp. oil, 34.3% *Schizochytrium* sp. oil and 38.0% soybean oil

脂肪酸 Fatty acids	鱼油 Fish oil	27.7%微绿球藻藻油 27.7% <i>Nannochloropsis</i> sp. oil	34.3%裂壶藻藻油 34.3% <i>Schizochytrium</i> sp. oil	38.0%大豆油 38.0% Soybean oil	替代结果 Replacement result
C14 : 0	6.89	1.25	1.90	0.05	3.20
C15 : 0	0.00	0.07	0.09	0.00	0.16
C16 : 0	20.17	3.24	6.99	4.64	14.87
C16 : 1 n-9	0.00	0.33	0.00	0.00	0.33
C16 : 1 n-7	6.08	6.08	0.03	0.03	6.15
C18 : 0	3.33	0.98	0.20	1.34	2.53
C18 : 1 n-9	13.11	2.15	0.02	8.91	11.09
C18 : 1 n-7	0.00	0.12	0.07	0.00	0.19
C18 : 2 n-6	2.21	0.52	1.72	20.05	22.29
C20 : 0	0.71	0.02	0.05	0.11	0.18
C18 : 3 n-6	0.14	0.05	0.08	0.12	0.25
C20 : 1	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
C18 : 3 n-3	3.25	0.06	0.00	2.14	2.20
C20 : 3 n-6	3.09	0.09	0.14	0.00	0.23
C22 : 0	0.18	0.09	0.03	0.13	0.26
C22 : 1 n-11	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
C20 : 3 n-3	4.54	0.01	0.37	0.00	0.39
花生回烯酸 (Arachidonic acid,ARA)	0.79	0.14	0.25	0.01	0.40
C24 : 0	0.12	0.00	0.00	0.05	0.05
EPA	9.44	9.44	0.56	0.00	10.00
DPA	0.45	0.00	5.92	0.00	5.92
DHA	14.20	0.22	14.20	0.00	14.42
饱和脂肪酸 (Saturated acids,SFA)	31.40				21.08
MUFA	19.36				17.76
PUFA	35.90				33.80
n-3/n-6	5.12				1.42

含量的 C18 : 1 n - 9。因此,使用大豆油和亚麻籽油替代剩余部分的脂肪酸成分较为理想。首先,使用 38.0%的大豆油进行替代,可发现替代后总体成分(SFA、MUFA 和 PUFA)与鱼油较为接近,但含有远高于鱼油的 C18 : 2 n - 6(22.29%),同时造成 n - 3/n - 6 比率远低于鱼油(表 2)。其次,使用 38.0%的亚麻籽油进行替代,可发现替代后的总体成分上与鱼油相比出现较大偏差,特别是 PUFA 含量远高于鱼油,而 SFA 含量又低于鱼油,但是 n - 3/n - 6 的比率与鱼油非常接近(表 3)。

上述两种替代策略主要差别在于 n - 3/n - 6 比率是否失调,而许多研究表明 n - 3/n - 6 比率在调节鱼类营养素的消化吸收^[20],肝脏脂肪沉积^[21],组织脂肪酸组成^[22]等方面均发挥着重要作用,因此 n - 3/n - 6 比率平衡对于鱼油替代至关重要。显然,使用亚麻籽油配合微藻替代鱼油能更好地模拟鱼油中的 n - 3/n - 6 比率,应作为两个替代策略中的首选。使用大豆油的替代策略较好地平衡了各种主要脂肪酸组分的平衡,并且成本上要比亚麻籽油低廉,因此,也可以作为一种备选策略使用。

2.3 植物脂肪源替代鱼油的经济可行性

在可以替代鱼油的脂肪原料中,按照植物种类的不同,植物油的价格在 6 000 元/t 到 10 000 元/t 之

间,远低于目前鱼油的价格(12 000~18 000 元/t),其中本文筛选出的亚麻籽油(10 000 元/t)和大豆油(6 000 元/t)价格低廉,应用价值高,是目前比较理想的大宗鱼油替代品。微藻产品是替代鱼油最理想的脂肪源,但成本太高(高于 3 万元/t),目前只能用于轮虫卤虫强化或加入微粒子饲料中投喂仔稚鱼。然而随着近年来微藻能源和保健品等产业的发展,微藻的养殖规模会进一步扩大,养殖成本也会逐渐降低,当其成本可以满足替代鱼油的需求时,因其无可取代的高 DHA 和 EPA 优势,微藻产品势必会成为替代鱼油的主流脂肪源。

3 结论

本文综合分析了鱼油、多种常见植物油和两种微藻的脂肪酸组成,在满足必需脂肪酸需求的前提下,提出两种替代鱼油的策略,使用亚麻籽油配合微藻替代鱼油的策略可获得与鱼油一致的 n - 3/n - 6 比率,能够较好地满足鱼类的营养需求,而使用大豆油配合微藻替代鱼油的策略则获得与鱼油大体相同的主要脂肪酸类别,价格较亚麻籽油组低廉,可作为备选策略。总之,使用高 DHA 和 EPA 含量的微藻配合植物油替代鱼油在理论上是可行的。

表 3 使用 27.7%微绿球藻藻油,34.3%裂壶藻藻油和 38.0%亚麻籽油替代鱼油的结果

Table 3 The result of fish oil replacement with 27.7% *Nannochloropsis* sp. oil, 34.3% *Schizochytrium* sp. oil and 38.0% linseed oil

脂肪酸 Fatty acids	鱼油 Fish oil	27.7%微绿球藻藻油 27.7% <i>Nannochl - oropsis</i> sp. oil	34.3%裂壶藻藻油 34.3% <i>Schizochy - trium</i> sp. oil	38.0%亚麻籽油 38.0% Linseed oil	替代结果 Replacement result
C14 : 0	6.89	1.25	1.90	0.02	3.17
C15 : 0	0.00	0.07	0.09	0.00	0.16
C16 : 0	20.17	3.24	6.99	2.07	12.30
C16 : 1 n - 9	0.00	0.33	0.00	0.00	0.33
C16 : 1 n - 7	6.08	6.08	0.03	0.02	6.14
C18 : 0	3.33	0.98	0.20	1.13	2.32
C18 : 1 n - 9	13.11	2.15	0.02	6.72	8.90
C18 : 1 n - 7	0.00	0.12	0.07	0.00	0.19
C18 : 2 n - 6	2.21	0.52	1.72	6.84	9.08
C20 : 0	0.71	0.02	0.05	0.04	0.11
C18 : 3 n - 6	0.14	0.05	0.08	0.14	0.27
C20 : 1	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
C18 : 3 n - 3	3.25	0.06	0.00	20.73	20.79
C20 : 3 n - 6	3.09	0.09	0.14	0.00	0.23
C22 : 0	0.18	0.09	0.03	0.04	0.17
C22 : 1 n - 11	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
C20 : 3 n - 3	4.54	0.01	0.37	0.00	0.39
花生回烯酸 (Arachidonic acid, ARA)	0.79	0.14	0.25	0.00	0.38
C24 : 0	0.12	0.00	0.00	0.03	0.03
EPA	9.44	9.44	0.56	0.00	10.00
DPA	0.45	0.00	5.92	0.00	5.92
DHA	14.2	0.22	14.20	0.00	14.42
饱和脂肪酸 (Saturated acids, SFA)	31.40				18.08
MUFA	19.36				15.56
PUFA	35.90				52.40
n - 3/n - 6	5.12				5.17

参考文献:

- [1] TACON A G J, HASAN M R, SUBASINGHE R P. Use of Fishery Resources as Feed Inputs to Aquaculture Development: Trends and Policy Implications[M]. Rome: FAO Fisheries Circular No. 1018, FAO Fisheries Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.
- [2] HALVER J E, HARDY R W. Fish Nutrition[M]. [S. l.]: Academic Press, 2002.
- [3] DÍAZ-LÓPEZ M, PEREZ M J, ACOSTA N G, et al. Effects of dietary fish oil substitution by *Echium oil* on enterocyte and hepatocyte lipid metabolism of gilthead seabream (*Sparus aurata* L.) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, Part B, 2010(155): 371-379.
- [4] CODABACCUS M B, BRIDLE A R, NICHOLS P D, et al. Effect of feeding *Atlantic salmon* (*Salmo salar* L.) a diet enriched with stearidonic acid from parr to smolt on growth and *n*-3 long-chain PUFA biosynthesis [J]. British Journal of Nutrition, 2011(105): 1772-1782.
- [5] SIMOPOULOS A P. The importance of the omega-6/omega-3 fatty acid ratio in cardiovascular disease and other chronic diseases [J]. Experimental Biology and Medicine, 2006(233): 674-688.
- [6] REGOST C, ARZEL J, ROBIN J, et al. Total replacement of fish oil by soybean or linseed oil with a return to fish oil in turbot (*Psetta maxima*) [J]. Aquaculture, 2003(217): 465-482.
- [7] GANUZA E, BENÍTEZ-SANTANA T, ATALAH E, et al. *Cryptocodinium cohnii* and *Schizochytrium* sp. as potential substitutes to fisheries-derived oils from seabream (*Sparus aurata*) microdiets [J]. Aquaculture, 2008(277): 109-116.
- [8] MILLER, M R, NICHOLS P D, CARTER C G, et al. Replacement of fish oil with thraustochytrid *Schizochytrium* sp. L oil in Atlantic salmon parr (*Salmo salar* L.) diets [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, Part A, 2007(148): 382-392.
- [9] 刘振强, 陆向红, 晏荣军, 等. 高密度高含油率微藻培养研究进展 [J]. 农业工程学报, 2011(27): 210-217.
- LIU Z Q, LU X H, YAN R J, et al. Advances on technology of high density and high lipid microalgae culture [J]. Transactions of the CSAE, 2011(27): 210-217.
- [10] 余隽, 田华, 陈涛, 等. 高产 DHA 寇氏隐甲藻突变株的筛选 [J]. 食品科学, 2013(34): 230-235.
- SHE J, TIAN H, CHEN T, et al. Screening of high-yield DHA-producing *Cryptocodinium cohnii* mutant [J]. Food Science, 2013(34): 230-235.
- [11] 余颖, 陈必链. 微绿球藻的研究进展 [J]. 海洋通报, 2005(24): 75-81.
- YU Y, CHEN B L. Progress of the studies on *Nannochloropsis* [J]. Marine Science Bulletin, 2005(24): 75-81.
- [12] QIAO H, WANG J, ZHANG L, et al. An improved direct transesterification method for fatty acid determination of *Phaeodactylum tricornutum* [J]. Journal of Applied Phycology, 2015(27): 697-701.
- [13] 李丹华, 朱圣陶. 气相色谱法测定常见植物油中脂肪酸 [J]. 粮食与油脂, 2006(8): 46-48.
- LI D H, ZHU S T. Determination of fatty acids in vegetable oils by gas chromatography [J]. Cereals and Oils, 2006(8): 46-48.
- [14] 尹兆霞. 毛细管气相色谱法测定食用植物油中主要脂肪酸的相对含量 [J]. 唐山师范学院学报, 2001(23): 23-26.
- YIN Z X. Capillary gas chromatography determination of the relative content of fatty acids in edible vegetable oils [J]. Journal of Tangshan Teachers College, 2001(23): 23-26.
- [15] 杨春英, 刘学铭, 陈智毅. 15 种食用植物油脂脂肪酸的气相色谱-质谱分析 [J]. 食品科学, 2013(34): 211-214.
- YANG C Y, LIU X M, CHEN Z Y. Determination of fatty acid profiles in fifteen kinds of edible vegetable oil by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Science, 2013(34): 211-214.
- [16] 金华, 刘治刚, 高艳, 等. 气相色谱-质谱法测定食用植物油中的脂肪酸 [J]. 食品研究与开发, 2015(10): 107-109.
- JIN H, LIU Z G, GAO Y, et al. Analysis of fatty acid in edible vegetable oil by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Research and Development, 2015(10): 107-109.
- [17] 李秀波, 徐旭东, 孔任秋. 五种微绿球藻产油和产多不饱和脂肪酸的研究 [J]. 水生生物学报, 2010(34): 893-897.
- LI X B, XU X D, KONG R Q. Studies on the production of oil and polyunsaturated fatty acids in five species of *Nannochloropsis* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2010(34): 893-897.
- [18] 魏萍, 马小琛, 任路静, 等. 裂殖壶菌发酵生产 DHA 研究进展 [J]. 食品工业科技, 2010(31): 398-401.
- WEI P, MA X C, REN L J, et al. Research progress on DHA production by *Schizochytrium* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2010(31): 398-401.
- [19] 常桂芳. 氧对裂殖壶藻利用甘油产 DHA 影响机制及其高密度发酵控制策略的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2013.
- CHANG G F. The Influence Mechanism of Oxygen on DHA Production by *Schizochytrium* sp. with High Cell Density Cultivation on Glycerol [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.
- [20] BANDARRA N M, REMA P, BATISTA I, et al. Effects of dietary *n*-3/*n*-6 ratio on lipid metabolism of gilthead seabream (*Sparus aurata*) [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2011(113): 1332-1341.
- [21] ROBAINA L, IZQUIERDO M S, MOYANO F J, et al. Increase of the dietary *n*-3/*n*-6 fatty acid ratio and addition of phosphorus improves liver histological alterations induced by feeding diets containing soybean meal to gilthead seabream, *Sparus aurata* [J]. Aquaculture, 1998(161): 281-293.
- [22] BLANCHARD G, MAKOMBU J G, KESTEMONT P. Influence of different dietary 18:3*n*-3/18:2*n*-6 ratio on growth performance, fatty acid composition and hepatic ultrastructure in *Eurasian perch*, *Perca fluviatilis* [J]. Aquaculture, 2008(284): 144-150.

(责任编辑: 陆雁)