

刀鲚胚胎及胚后发育早期脂肪酸组成变化

施永海 刘永士 严银龙 张海明 谢永德 于爱清

上海市水产研究所, 上海市水产技术推广站 上海 200433

摘要: 为掌握刀鲚 (*Coilia nasus*) 胚胎及胚后发育早期的脂肪酸变化规律, 采用生化分析手段对刀鲚的胚胎 (原肠期, 受精后 7~9 h)、0 日龄仔鱼 (初孵仔鱼)、3 日龄仔鱼和 5 日龄仔鱼 (开口前) 的脂肪酸组成和含量进行了检测分析。结果显示, 刀鲚发育早期的总脂占干物质的相对含量均较高 (53.10% ~ 60.97%), 干物质的总脂相对含量随个体发育显著降低, 单个个体的总脂含量随个体发育呈现剧烈下降趋势, 数值从胚胎的 43.62 $\mu\text{g}/\text{ind}$ 剧烈下降到 5 日龄仔鱼的 16.27 $\mu\text{g}/\text{ind}$; 水分含量随个体发育而升高。刀鲚发育早期上述 4 个时期的干样中检出 6 种饱和脂肪酸 (SFA)、4 种单不饱和脂肪酸 (MUFA) 和 8 种多不饱和脂肪酸 (PUFA)。4 个发育时期脂肪酸相对含量, C18:1n9c 占绝对优势 (50.39% ~ 57.00%), C16:1 丰富且稳定 (13.77% ~ 14.24%), C16:0 也较丰富 (7.45% ~ 9.15%)。单不饱和脂肪酸 (MUFA) 比例占绝对优势 (65.14% ~ 72.26%), n-3 与 n-6 系列多不饱和脂肪酸含量的比值 ($\Sigma\text{n3PUFA}/\Sigma\text{n6PUFA}$) 较小 (1.78 ~ 2.38)。刀鲚胚胎孵化出膜期间, 单个个体单不饱和脂肪酸 (MUFA) 实际减少程度较高, 尤其是 C18:1n9c (减少量为 13.21 $\mu\text{g}/\text{ind}$, 减少比例达到 55.49%) 和 C16:1 (减少量和比例分别为 3.30 $\mu\text{g}/\text{ind}$ 和 53.12%), 而二十碳五烯酸 (EPA) 加二十二碳六烯酸 (DHA) 的减少程度较低 (1.44 $\mu\text{g}/\text{ind}$ 和 38.41%), 尤其是 DHA (0.95 $\mu\text{g}/\text{ind}$ 和 36.52%)。然而, 出膜后, 仔鱼对单不饱和脂肪酸 (MUFA) 的利用相对较低 (1.94 $\mu\text{g}/\text{ind}$ 和 14.17%), 尤其是 C18:1n9c (13.21 $\mu\text{g}/\text{ind}$ 和 12.41%) 和 C16:1 (0.63 $\mu\text{g}/\text{ind}$ 和 21.81%); 而对 EPA + DHA 利用相对较高 (1.04 $\mu\text{g}/\text{ind}$ 和 45.10%), 尤其是 DHA (0.71 $\mu\text{g}/\text{ind}$ 和 42.61%)。研究表明, 刀鲚胚胎优先蓄留 EPA 和 DHA, 仔鱼在摄食前大量利用 EPA + DHA (特别是 DHA), 呈现出海水鱼类脂肪酸的利用特点。因此, 建议在刀鲚亲本强化培育及产后培育中, 增加投喂富含单不饱和脂肪酸 (MUFA) (特别是 C18:1 和 C16:1) 的饵料, 以加强刀鲚亲本的营养积累和产卵后亲本生理机能的恢复; 在刀鲚育苗前期, 要及时补充富含 DHA 和 EPA 的饵料, 如, 单胞藻、蛋黄等, 以提高刀鲚仔鱼开口期间的成活率。

关键词: 刀鲚; 胚胎; 仔鱼; 脂肪酸

中图分类号: Q955 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2019) 03-414-11

The Changes in Fatty Acid Compositions during Embryonic and Early Post-embryonic Development of *Coilia nasus*

SHI Yong-Hai LIU Yong-Shi YAN Yin-Long ZHANG Hai-Ming XIE Yong-De YU Ai-Qing

基金项目 上海市科学技术委员会重点科技攻关项目 (No. 17391900300, 13DZ2251800), 国家公益性行业 (农业) 科研专项 (No. 201203065), 上海市农业领军人才项目 (沪委农办 2018-60 号);

第一作者介绍 施永海, 男, 研究员; 研究方向: 水产养殖及繁殖生物学; E-mail: yonghais@163.com。

收稿日期: 2018-10-05, 修回日期: 2019-01-29 DOI: 10.13859/j.cjz.201903011

Shanghai Fisheries Research Institute, Shanghai Fisheries Technical Extension Station, Shanghai 200433, China

Abstract: *Coilia nasus* is an anadromous fish species with commercial importance and high market value in China, and it has a potential for aquaculture. In order to understand the value of changes in fatty acid compositions during embryonic and early post-embryonic development of *C. nasus*, the fatty acid compositions and contents at different developmental stages (embryos at 7 - 9 h of fertilization, newly hatched larvae at the age of 0-day, larvae at the age of 3-day, and larvae at the age of 5-day before feeding) were collected and analyzed by biochemical analysis methods. The experimental data were statistically analyzed with variance analysis. The results showed that the total lipid percent contents of *C. nasus* larvae at different developmental stages were high (53.10% - 60.97%, Table 1), while decreased significantly with ontogenesis ($P < 0.05$, Table 1). The individual total lipid percent contents decreased sharply with ontogenesis ($P < 0.05$), and the value dropped dramatically from 43.62 $\mu\text{g}/\text{ind}$ in embryos to 16.27 $\mu\text{g}/\text{ind}$ in 5-day-old larvae (Table 1); while, the moisture increased significantly with ontogenesis ($P < 0.05$, Table 1). A total of 6 saturated fatty acids (SFA), 4 mono-unsaturated fatty acids (MUFA), and 8 poly-unsaturated fatty acids (PUFA) were found in the dry sample at different developmental stages (Table 2). The C18:1n9c content of *C. nasus* was the highest and had an absolute advantage at different developmental stages (50.39% - 57.00%, $P < 0.05$, Table 2), the C16:1 content was rich and stable (13.77% - 14.24%, $P > 0.05$, Table 2), the C16:0 content was also rich (7.45% - 9.15%) (Table 2). Simultaneously, the MUFA had an absolute advantage (65.14% - 72.26%), the ratio of n-3 series poly-unsaturated fatty acids ($\sum n3\text{PUFA}$) / n-6 series poly-unsaturated fatty acids ($\sum n6\text{PUFA}$) was low (1.78 - 2.38) (Table 2). During the incubation period, the degree of actual reduction of MUFA was higher, especially in C18:1n9c (13.21 $\mu\text{g}/\text{ind}$ and 55.49%) and C16:1 (3.30 $\mu\text{g}/\text{ind}$ and 53.12%)(Fig. 2), while, the degree of actual reduction of C20:5n3 (eicosapentaenoic acid, EPA) + C22:6n3 (docosahexenoic acid, DHA) was lower (1.44 $\mu\text{g}/\text{ind}$ and 38.41%), especially in DHA (0.95 $\mu\text{g}/\text{ind}$ and 36.52%, Fig. 2). After hatch, at the endogenous feeding stage, the utilization rate of MUFA was lower (1.94 $\mu\text{g}/\text{ind}$ and 14.17%), especially in C18:1n9c (13.21 $\mu\text{g}/\text{ind}$ and 12.41%) and C16:1 (0.63 $\mu\text{g}/\text{ind}$ and 21.81%, Fig. 3), while the utilization rate of EPA + DHA was higher (1.04 $\mu\text{g}/\text{ind}$ and 45.10%), especially in DHA (0.71 $\mu\text{g}/\text{ind}$ and 42.61%, Fig. 3). Therefore, EPA+DHA are preserved by priority during the *C. nasus* embryo incubation period, EPA + DHA (especially DHA) are largely consumed before the *C. nasus* larvae feeding, which is close to the fatty acids utilization characteristics of freshwater fish. In antepartum and postpartum cultivation of *C. nasus* brood stock, in order to improve the nutrition accumulation of brood stock and the recovery of physiological function of postpartum brood stock, diets enriched with the MUFA (especially C18:1 and C16:1) is suggested. In early larval breeding of *C. nasus*, in order to improve the survival rate of larvae, diets enriched with DHA and EPA (e.g., porphyridiophyceae and yolk) is also suggested.

Key words: *Coilia nasus*; Embryo; Larvae; Fatty acid

刀鲚 (*Coilia nasus*), 又名长颌鲚, 俗称刀鱼、毛刀鱼, 属于鲱形目 (Clupeiformes) 鲚科 (Engraulidae) 鲚属, 与长江鲥鱼 (*Tenulosa*

reevesii)、河豚 (*Takifugu*) 并称“长江三鲜”。刀鲚以长江下游产量最高、品质最好 (施永海等 2015)。近年来, 由于酷渔滥捕和自然生境

的变化, 长江刀鲚的年渔获量呈现波动式衰退趋势, 而且大规格刀鲚 (150 g/尾) 的占比明显减少, 而人们的食用需求却有增无减。为此, 长江刀鲚的繁育及养殖关键技术一直是水产专家研究的重点和热点, 20 世纪 90 年代以来, 国内许多科研院所纷纷立项开展长江刀鲚人工繁殖的研究, 特别是上海市水产研究所于 2013 年率先实现了长江刀鲚全人工繁育、苗种室内集约化规模化生产 (施永海等 2015)。虽然长江刀鲚室内全人工繁育技术日益完善和成熟, 但在刀鲚实际苗种培育过程中, 仔鱼开口期间成活率较低。由于刀鲚仔鱼内源性营养及混合营养阶段时间特别长, 体内的营养物质需要长时间支持其生理活动。因此, 弄清刀鲚仔鱼发育早期营养支持和消耗情况可探究刀鲚发育早期成活率低的问题, 为刀鲚苗种培育技术提供科学依据。

脂类作为鱼类胚胎及胚后发育过程中 (特别是内源性营养期间) 的主要营养物质, 不仅参与调节生理活动和构建组织器官, 还是其能量的主要来源 (徐善良等 2013), 因此, 脂类和脂肪酸组成及含量对鱼类发育早期的生长及存活起着关键的作用 (卢素芳等 2008), 特别是 n-3 系列的高不饱和脂肪酸是海水鱼类胚后发育的必需脂肪酸, 如二十二碳六烯酸 (docosahexenoic acid, DHA) 和二十碳五烯酸 (eicosapentaenoic acid, EPA) (王丹丽等 2006)。同时, 脂肪酸的组成及含量随鱼类品种不同而不同的 (黄旭雄等 2013, 施永海等 2017)。在目前有关鱼类发育早期脂肪酸利用的研究中大多数涉及的是海水鱼类或者淡水鱼类, 有关洄游性鱼类的脂肪酸利用规律还没有被揭示。本文检测了刀鲚胚胎孵化期间和仔鱼内源性营养期间的脂肪酸组成及含量, 分析了刀鲚受精卵孵化前后和出膜仔鱼内源性营养期间脂肪酸的利用程度, 旨在掌握刀鲚发育早期阶段的脂肪酸需求特点, 以期揭示刀鲚仔鱼开口期存活率低的原因。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

实验用刀鲚的胚胎和仔鱼, 于 2017 年 6 月初取自上海市水产研究所奉贤科研基地。刀鲚胚胎和仔鱼由全人工繁育获得, 繁殖用亲本的培育及繁育管理方法参照施永海等 (2015)。取 6 月 1 日催产 6 月 2 日产卵受精的优质受精卵 (受精率 95%~98%), 受精后 7~9 h 胚胎发育到原肠期, 用 80 目筛绢网在催产池拉网获取受精卵。然后取约 12 万粒受精卵移至 2 个圆形孵化桶 (100 L) 内孵化, 密度约为 600 ind/L, 孵化桶置于水浴池内, 尽量维持水温稳定, 温度控制为 $(24.05 \pm 0.28) ^\circ\text{C}$, 每个孵化桶内放置 2 个气石, 并连续曝气, 换水 2 次/d, 每次更换孵化桶内 2/3 的水。分别获取胚胎 (原肠期, 受精后 7~9 h)、0 日龄 (d) 仔鱼 (初孵仔鱼)、3 日龄 (d) 仔鱼、5 日龄 (d) 仔鱼 (开口前仔鱼) 4 组样品, 每次随机取样, 每组样品分 3 个平行, 每个平行样品按 2~4 g 鲜重取样, 同时测算每个平行样品 1 g 鲜重的个体数。获取的样品平摊于 80 目筛绢网上, 用定性滤纸吸干表面水分, 而后存放在 5 ml 的密封离心管; 制备后的样品先冷冻于 $-20 ^\circ\text{C}$ 冰箱 24 h, 然后转移保存在 $-76 ^\circ\text{C}$ 的冰箱中。测量时, 将样品真空冷冻干燥至恒重, 碾磨、混匀后待测。

1.2 样品测定方法

水分测定用真空冻干法, 按氯仿甲醇法提取总脂, 再用 Agilent 6890 型气相色谱仪 (GB/T22223-2008) 测定各脂肪酸, 以色谱峰面积归一法计算出各脂肪酸相对含量 (图 1)。

1.3 数据处理和统计

所有数据用平均值 \pm 标准差 (Mean \pm SD) 表示, 采用 Excel 和 SPSS 19.0 处理数据及图表。用 Oneway ANOVA 进行方差分析, 用 Duncan 法作多重比较, 以 $P < 0.05$ 定义为显著差异。

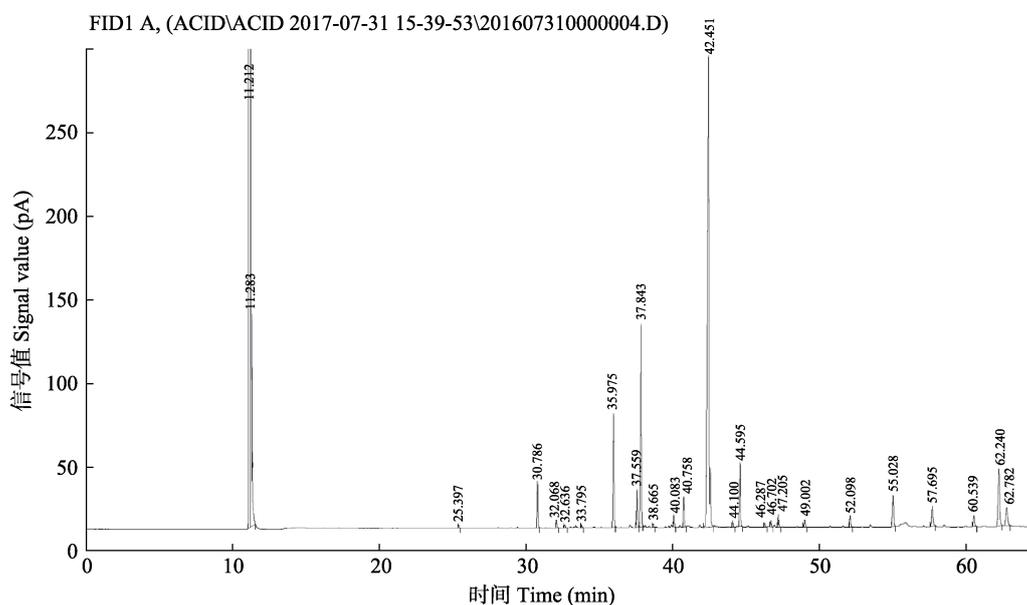


图 1 脂肪酸的气相色谱图

Fig. 1 Gas chromatogram of fatty acid

相关计算公式如下: 单个个体的脂肪酸绝对含量 (M_n , $\mu\text{g}/\text{ind}$) $M_n = (M_{\text{wt}} C / N) 100$, 式中, M_{wt} 是各发育时期每 100 g 鲜重的总脂含量 (%), C 是各发育时期单个脂肪酸的相对含量 (%), N 是各发育时期每 g 鲜重的生物体个数 (ind), 用此公式分别计算获得胚胎 (受精后 7~9 h)、0 日龄仔鱼、3 日龄仔鱼和 5 日龄仔鱼单个个体的脂肪酸绝对含量 ($\mu\text{g}/\text{ind}$), 分别用 M_u 、 M_0 、 M_3 和 M_5 表示; 胚胎孵化出膜期间脂肪酸减少量 (M_g , $\mu\text{g}/\text{ind}$) $M_g = M_u - M_0$, 胚胎孵化出膜期间脂肪酸减少率 (R_g , %) $R_g = [(M_u - M_0) / M_u] 100$, 仔鱼内源营养期间的脂肪酸利用量 (M_f , $\mu\text{g}/\text{ind}$) $M_f = M_0 - M_5$, 仔鱼内源营养期间的脂肪酸利用率 (R_f , %) $R_f = [(M_0 - M_5) / M_0] 100$ 。

2 结果与分析

2.1 各时期的水分和总脂含量变化

刀鲚水分含量随着个体的发育而升高 ($P < 0.05$): 胚胎和 0 日龄仔鱼的水分含量显著低于 3 日龄和 5 日龄仔鱼的 ($P < 0.05$), 但胚胎和 0

日龄仔鱼之间、3 日龄和 5 日龄仔鱼之间的水分相对含量均没有显著性差异 ($P > 0.05$) (表 1)。刀鲚发育早期的总脂占干物质的含量较高, 干物质的总脂含量随个体发育明显降低 ($P < 0.05$): 胚胎和 0 日龄仔鱼的干物质总脂含量显著高于 3 日龄和 5 日龄仔鱼 ($P < 0.05$), 但胚胎和 0 日龄仔鱼之间、3 日龄和 5 日龄仔鱼之间的干物质总脂含量均没有显著性差异 ($P > 0.05$) (表 1)。刀鲚发育早期的总脂占鲜重的含量也呈现类似的现象: 鲜重的总脂含量从胚胎的 14.50% 显著下降至 5 日龄仔鱼的 8.68% ($P < 0.05$) (表 1)。单个个体的总脂含量从胚胎的 43.62 $\mu\text{g}/\text{ind}$ 剧烈下降到 5 日龄仔鱼的 16.27 $\mu\text{g}/\text{ind}$ ($P < 0.05$) (表 1)。

2.2 脂肪酸的组成变化

对刀鲚发育早期 4 时期的干样进行了 C6~C24 脂肪酸 (37 种) 的检测, 各样品均检测到饱和脂肪酸 (SFA) 6 种、单不饱和脂肪酸 (MUFA) 4 种、多不饱和脂肪酸 (PUFA) 8 种, 其相对含量见表 2。

2.2.1 单个脂肪酸相对含量的变化 刀鲚发

表 1 刀鲚各发育时期水分和总脂相对含量 ($n = 3$)

Table 1 The moisture and total lipid content of *Coilia nasus* at different developmental stages

指标 index	胚胎 Embryo	0 日龄仔鱼 0-day-age larvae	3 日龄仔鱼 3-day-age larvae	5 日龄仔鱼 5-day-age larvae
水分 Moisture (%)	76.23 ± 0.61 ^a	76.09 ± 0.30 ^a	83.24 ± 0.33 ^b	83.65 ± 1.10 ^b
干重的总脂 Total lipid of dry weight (%)	60.97 ± 3.31 ^a	58.77 ± 6.96 ^a	57.23 ± 0.47 ^b	53.10 ± 2.70 ^b
鲜重的总脂 Total lipid of wet weight (%)	14.50 ± 1.10 ^a	14.04 ± 1.54 ^a	9.59 ± 0.27 ^b	8.68 ± 0.71 ^b
个体总脂 Total lipid of individual (μg/ind)	43.62 ± 3.33 ^a	21.04 ± 2.28 ^b	19.16 ± 0.54 ^{bc}	16.27 ± 1.33 ^c

同一行数据上标不含相同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Values in the same row with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$).

表 2 刀鲚各发育时期脂肪酸组成及相对含量 ($n = 3, \%$)

Table 2 Fatty acid compositions and contents in *Coilia nasus* at different developmental stages

脂肪酸 Fatty acid	胚胎 Embryos	0 日龄仔鱼 0-day-age larvae	3 日龄仔鱼 3-day-age larvae	5 日龄仔鱼 5-day-age larvae
C12:0	0.20 ± 0.03 ^a	0.20 ± 0.01 ^a	0.06 ± 0.10 ^b	0.15 ± 0.02 ^{bc}
C14:0	2.77 ± 0.04 ^{ab}	2.92 ± 0.17 ^a	2.63 ± 0.08 ^b	2.38 ± 0.01 ^c
C15:0	0.10 ± 0.09 ^{ab}	0.27 ± 0.13 ^a	0.23 ± 0.02 ^{ab}	0.07 ± 0.12 ^b
C16:0	7.71 ± 0.38 ^a	9.15 ± 1.07 ^b	8.01 ± 0.07 ^a	7.45 ± 0.15 ^a
C17:0	0.23 ± 0.01 ^a	0.24 ± 0.02 ^a	0.08 ± 0.15 ^a	0.18 ± 0.16 ^a
C18:0	2.24 ± 0.14 ^{ab}	2.50 ± 0.34 ^a	1.93 ± 0.02 ^b	1.97 ± 0.08 ^b
C16:1	14.24 ± 0.14 ^a	13.77 ± 0.85 ^a	13.66 ± 0.65 ^a	13.98 ± 0.16 ^a
C17:1	0.78 ± 0.02 ^a	0.62 ± 0.41 ^a	0.81 ± 0.03 ^a	0.87 ± 0.02 ^a
C18:1n9c	54.60 ± 0.26 ^a	50.39 ± 3.33 ^b	53.90 ± 0.71 ^a	57.00 ± 0.95 ^a
C20:1n9	0.44 ± 0.01 ^a	0.36 ± 0.07 ^b	0.39 ± 0.04 ^{ab}	0.41 ± 0.00 ^{ab}
C18:2n6c	4.27 ± 0.02 ^a	4.12 ± 0.33 ^a	4.13 ± 0.28 ^a	4.34 ± 0.07 ^a
C20:2	0.56 ± 0.05 ^a	0.68 ± 0.04 ^a	0.72 ± 0.14 ^a	0.13 ± 0.22 ^b
C18:3n6	0.30 ± 0.00 ^a	0.30 ± 0.13 ^a	0.25 ± 0.21 ^a	0.20 ± 0.17 ^a
C18:3n3	0.91 ± 0.03 ^{ab}	0.97 ± 0.04 ^a	0.89 ± 0.03 ^{bc}	0.85 ± 0.03 ^c
C20:4n6	0.93 ± 0.02 ^a	1.18 ± 0.10 ^{ab}	1.36 ± 0.36 ^b	1.00 ± 0.03 ^{ab}
C20:5n3 (EPA)	2.60 ± 0.04 ^b	3.08 ± 0.20 ^a	2.35 ± 0.07 ^c	1.93 ± 0.02 ^d
C22:5n3	1.13 ± 0.08 ^a	1.31 ± 0.10 ^b	1.20 ± 0.06 ^{ab}	1.22 ± 0.02 ^{ab}
C22:6n3 (DHA)	6.00 ± 0.13 ^a	7.89 ± 0.47 ^b	7.39 ± 1.61 ^{ab}	5.87 ± 0.47 ^a
Σ SFA	13.24 ± 0.55 ^a	15.27 ± 1.66 ^b	12.95 ± 0.34 ^a	12.20 ± 0.40 ^a
Σ MUFA	70.06 ± 0.37 ^{ab}	65.14 ± 2.66 ^c	68.76 ± 1.27 ^b	72.26 ± 1.06 ^a
Σ PUFA	16.69 ± 0.22 ^{ab}	19.52 ± 1.01 ^c	18.29 ± 1.33 ^b	15.54 ± 0.66 ^a
EPA+DHA	8.59 ± 0.15 ^{ab}	10.98 ± 0.66 ^c	9.74 ± 1.57 ^{bc}	7.81 ± 0.46 ^a
Σ n3PUFA	10.64 ± 0.22 ^{ab}	13.25 ± 0.74 ^c	11.83 ± 1.59 ^{bc}	9.87 ± 0.45 ^a
Σ n6PUFA	5.49 ± 0.03 ^a	5.59 ± 0.51 ^a	5.74 ± 0.13 ^a	5.54 ± 0.09 ^a
Σ SFA/Σ UFA	0.15 ± 0.01 ^b	0.18 ± 0.02 ^a	0.15 ± 0.00 ^b	0.14 ± 0.01 ^b
Σ n3PUFA/Σ n6PUFA	1.94 ± 0.04 ^a	2.38 ± 0.21 ^b	2.06 ± 0.33 ^{ab}	1.78 ± 0.06 ^a

EPA 为二十碳五烯酸, DHA 为二十二碳六烯酸, SFA 为饱和脂肪酸, MUFA 为单不饱和脂肪酸, PUFA 为多不饱和脂肪酸, UFA 为不饱和脂肪酸, n3PUFA 为 n-3 系列多不饱和脂肪酸, n6PUFA 为 n-6 系列多不饱和脂肪酸; 同一行数据上标不含相同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

EPA is eicosapentaenoic acid, DHA is docosahexenoic acid, SFA is saturated fatty acids, MUFA is mono-unsaturated fatty acids, PUFA is poly-unsaturated fatty acids, UFA is unsaturated fatty acids, n3PUFA is n-3 series poly-unsaturated fatty acids, n6PUFA is n-6 series poly-unsaturated fatty acids; Values in the same row with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$) .

育早期 4 时期的相对含量最高的脂肪酸均是 C18:1n9c, 0 日龄仔鱼的 C18:1n9c 相对含量显著低于其他 3 时期的 ($P < 0.05$), 且其他 3 时期之间无显著性差异 ($P > 0.05$) (表 2)。C16:1 的相对含量丰富且稳定, 在发育早期各时期之间无显著性差异 ($P > 0.05$) (表 2)。C16:0 在各发育时期的相对含量较丰富, 且孵化后随仔鱼发育而显著下降 ($P < 0.05$) (表 2)。

刀鲚仔鱼孵化后, 其 C22:6n3 (DHA) 的相对含量随仔鱼生长发育而明显下降 ($P < 0.05$), 另外 0 日龄仔鱼的 DHA 相对含量明显高于胚胎的和 5 日龄仔鱼的 ($P < 0.05$) (表 2)。C20:5n3 (EPA) 相对含量也出现相似的规律, 孵化后, 其 C20:5n3 (EPA) 的相对含量随仔鱼发育而明显下降 ($P < 0.05$), 另外胚胎的 EPA 相对含量显著低于 0 日龄仔鱼的 ($P < 0.05$), 但显著高于 3 日龄和 5 日龄仔鱼的 ($P < 0.05$) (表 2)。DHA 和 EPA 相似的变化规律也导致了 DHA + EPA 有相似的变化: 孵化后, DHA + EPA 随仔鱼发育呈现显著的下降 ($P < 0.05$), 另外胚胎的 DHA + EPA 显著低于 0 日龄仔鱼的 ($P < 0.05$), 且与 3 日龄、5 日龄仔鱼的无显著性差异 ($P > 0.05$) (表 2)。

2.2.2 SFA、MUFA 和 PUFA 相对含量的变化

刀鲚 0 日龄仔鱼的 SFA 相对含量均明显高于其他时期的 ($P < 0.05$) (表 2), 仔鱼的 SFA 随生长发育而明显下降 ($P < 0.05$); 而胚胎、3 日龄和 5 日龄仔鱼三者之间的 SFA 无显著性差异 ($P > 0.05$) (表 2)。刀鲚早期发育时期的 MUFA 比例占绝对优势 (表 2); 其胚胎的 MUFA 相对含量明显高于 0 日龄仔鱼的 ($P < 0.05$), 但与 3 日龄及 5 日龄仔鱼的无显著差异 ($P > 0.05$) (表 2); 仔鱼的 MUFA 比例随生长发育而明显升高 ($P < 0.05$) (表 2)。刀鲚仔鱼的 PUFA 相对含量随着生长发育而明显下降 ($P < 0.05$) (表 2); 胚胎的 PUFA 比例明显低于 0 日龄仔鱼的 ($P < 0.05$), 但与 3 日龄以及 5 日龄仔鱼的无显著差异 ($P > 0.05$) (表 2)。

2.2.3 Σ SFA/ Σ UFA 和 Σ n3PUFA/ Σ n6PUFA 比率的变化

刀鲚 0 日龄仔鱼的 Σ SFA/ Σ UFA 比例均明显高于其他发育时期的 ($P < 0.05$) (表 2), 仔鱼的 Σ SFA/ Σ UFA 比例随着生长发育而明显下降 ($P < 0.05$) (表 2)。相类似的, 仔鱼的 Σ n3PUFA/ Σ n6PUFA 比例随生长发育而明显下降 ($P < 0.05$) (表 2), 胚胎的 Σ n3PUFA/ Σ n6PUFA 比例明显低于 0 日龄仔鱼的 ($P < 0.05$), 但明显高于 5 日龄仔鱼的 ($P < 0.05$) (表 2)。

2.3 单个个体的主要脂肪酸的绝对含量变化及利用

单个个体的主要脂肪酸的绝对含量见表 3, 计算获得胚胎孵化期间脂肪酸的减少量 ($\mu\text{g}/\text{ind}$) 和减少率 (%) (图 2), 同时也可以通过计算获得仔鱼内源营养期间各脂肪酸的利用量 ($\mu\text{g}/\text{ind}$) 和利用率 (%) (图 3)。

各发育时期刀鲚单个个体的脂肪酸绝对含量前四的分别为 C18:1n9c、C16:1、C16:0 和 C22:6n3 (DHA) (表 3)。各主要脂肪酸单个个体绝对含量随发育均明显下降 ($P < 0.05$), 这也造成了 SFA、MUFA 和 PUFA 单个个体绝对含量也随发育而明显减少 ($P < 0.05$) (表 3)。

从胚胎孵化出膜对单个个体的主要脂肪酸的实际含量减少程度来看, 胚胎孵化出膜造成主要脂肪酸实际减少量前四的分别是 C18:1n9c (13.21 $\mu\text{g}/\text{ind}$)、C16:1 (3.30 $\mu\text{g}/\text{ind}$)、C16:0 (1.44 $\mu\text{g}/\text{ind}$) 和 C18:2n6c (0.99 $\mu\text{g}/\text{ind}$) (图 2), 这也造成了 MUFA 减少量是最多的 (16.84 $\mu\text{g}/\text{ind}$); 而脂肪酸减少率相对较均衡, 均值为 51.77%, 范围为 36.52% ~ 55.49% (图 2), 其中 C18:1n9c 和 C16:1 在胚胎孵化期间的减少率分别为最多 (55.49%) 和第三 (53.12%), 这同样导致了较高的 MUFA 减少率 (55.12%)。

仔鱼内源营养期间, 刀鲚单个个体的各主要脂肪酸的利用量前四的分别是 C18:1n9c (1.32 $\mu\text{g}/\text{ind}$)、C16:0 (0.72 $\mu\text{g}/\text{ind}$) 和 DHA (0.71 $\mu\text{g}/\text{ind}$) 和 C16:1 (0.63 $\mu\text{g}/\text{ind}$) (图 3)。比较单个个体 SFA、MUFA、PUFA 利用量,

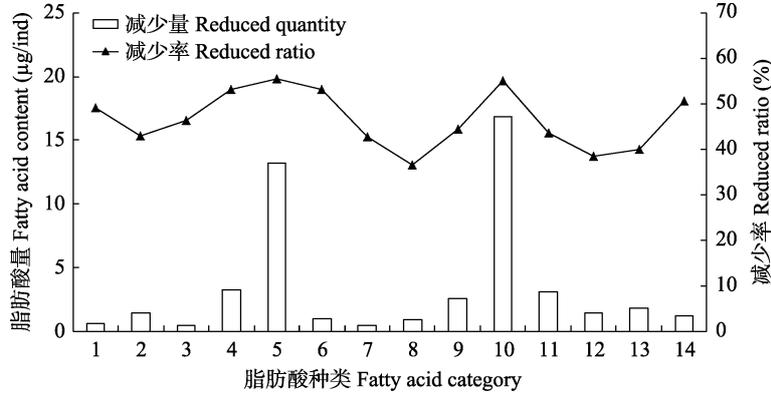


图 2 刀鲚胚胎孵化期间主要脂肪酸的减少程度

Fig. 2 Decrement degree of the main fatty acids in *Coilia nasus* embryos during incubation

1. C14:0; 2. C16:0; 3. C18:0; 4. C16:1; 5. C18:1n9c; 6. C18:2n6c; 7. 二十碳五烯酸 C20:5n3 (EPA); 8. 二十二碳六烯酸 C22:6n3 (DHA); 9. 饱和脂肪酸 (SFA); 10. 单不饱和脂肪酸 (MUFA); 11. 多不饱和脂肪酸 (PUFA); 12. EPA+DHA; 13. n-3 系列多不饱和脂肪酸 (Σn3PUFA); 14. n-6 系列多不饱和脂肪酸 (Σn6PUFA)。

1. C14:0; 2. C16:0; 3. C18:0; 4. C16:1; 5. C18:1n9c; 6. C18:2n6c; 7. C20:5n3 (Eicosapentaenoic acid, EPA); 8. C22:6n3 (Docosahexenoic acid, DHA); 9. Saturated fatty acids (SFA); 10. Mono-unsaturated fatty acids (MUFA); 11. Poly-unsaturated fatty acids (PUFA); 12. EPA + DHA; 13. n-3 series poly-unsaturated fatty acids (Σn3PUFA); 14. n-6 series poly-unsaturated fatty acids (Σn6PUFA).

表 3 刀鲚各发育时期单个个体的主要脂肪酸绝对含量 (n = 3, µg/ind)

Table 3 The main fatty acid absolute contents in the individuals of *Coilia nasus* at different developmental stages

脂肪酸 Fatty acid	胚胎 Embryos	0 日龄仔鱼 0-day-age larvae	3 日龄仔鱼 3-day-age larvae	5 日龄仔鱼 5-day-age larvae
C14:0	1.21 ± 0.09 ^a	0.62 ± 0.09 ^b	0.50 ± 0.03 ^{bc}	0.39 ± 0.03 ^c
C16:0	3.37 ± 0.43 ^a	1.93 ± 0.30 ^b	1.53 ± 0.04 ^{bc}	1.21 ± 0.07 ^c
C18:0	0.98 ± 0.14 ^a	0.53 ± 0.10 ^b	0.37 ± 0.01 ^{bc}	0.32 ± 0.01 ^c
C16:1	6.21 ± 0.41 ^a	2.91 ± 0.49 ^b	2.62 ± 0.19 ^b	2.28 ± 0.21 ^b
C18:1n9c	23.81 ± 1.75 ^a	10.60 ± 1.23 ^b	10.33 ± 0.41 ^b	9.28 ± 0.91 ^b
C18:2n6c	1.86 ± 0.14 ^a	0.87 ± 0.16 ^b	0.79 ± 0.07 ^b	0.71 ± 0.07 ^b
C20:5n3 (EPA)	1.13 ± 0.09 ^a	0.65 ± 0.07 ^b	0.45 ± 0.02 ^c	0.31 ± 0.03 ^d
C22:6n3 (DHA)	2.61 ± 0.14 ^a	1.66 ± 0.16 ^b	1.41 ± 0.26 ^b	0.95 ± 0.02 ^c
Σ SFA	5.79 ± 0.68 ^a	3.22 ± 0.49 ^b	2.48 ± 0.11 ^{bc}	1.98 ± 0.10 ^c
Σ MUFA	30.55 ± 2.19 ^a	13.71 ± 1.56 ^b	13.18 ± 0.61 ^b	11.77 ± 1.13 ^b
Σ PUFA	7.28 ± 0.46 ^a	4.11 ± 0.49 ^b	3.50 ± 0.15 ^b	2.52 ± 0.10 ^c
EPA+DHA	3.75 ± 0.23 ^a	2.31 ± 0.23 ^b	1.86 ± 0.24 ^c	1.27 ± 0.04 ^d
Σ n3PUFA	4.63 ± 0.26 ^a	2.78 ± 0.27 ^b	2.26 ± 0.24 ^c	1.60 ± 0.07 ^d
Σ n6PUFA	2.40 ± 0.18 ^a	1.18 ± 0.22 ^b	1.10 ± 0.05 ^b	0.90 ± 0.07 ^b

EPA 为二十碳五烯酸, DHA 为二十二碳六烯酸, SFA 为饱和脂肪酸, MUFA 为单不饱和脂肪酸, PUFA 为多不饱和脂肪酸, UFA 为不饱和脂肪酸, n3PUFA 为 n-3 系列多不饱和脂肪酸, n6PUFA 为 n-6 系列多不饱和脂肪酸; 同一行数据上标不含相同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

EPA is eicosapentaenoic acid, DHA is docosahexenoic acid, SFA is saturated fatty acids, MUFA is mono-unsaturated fatty acids, PUFA is poly-unsaturated fatty acids, UFA is unsaturated fatty acids, n3PUFA is n-3 series poly-unsaturated fatty acids, n6PUFA is n-6 series poly-unsaturated fatty acids; Values in the same row with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$).

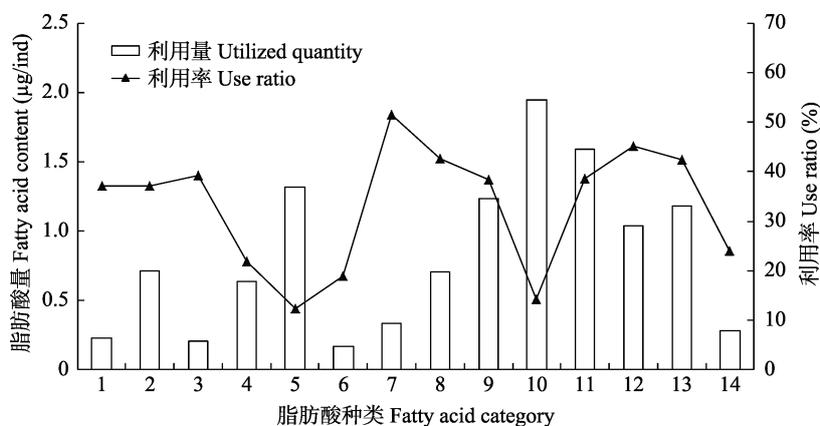


图3 刀鲚仔鱼内源性营养期间主要脂肪酸的利用程度

Fig. 3 Utilization degree of the main fatty acids in *Coilia nasus* larvae at endogenous nutrition stage

1. C14:0; 2. C16:0; 3. C18:0; 4. C16:1; 5. C18:1n9c; 6. C18:2n6c; 7. 二十碳五烯酸 C20:5n3 (EPA); 8. 二十二碳六烯酸 C22:6n3 (DHA); 9. 饱和脂肪酸 (SFA); 10. 单不饱和脂肪酸 (MUFA); 11. 多不饱和脂肪酸 (PUFA); 12. EPA+DHA; 13. n-3 系列多不饱和脂肪酸 (Σn3PUFA); 14. n-6 系列多不饱和脂肪酸 (Σn6PUFA)。

1. C14:0; 2. C16:0; 3. C18:0; 4. C16:1; 5. C18:1n9c; 6. C18:2n6c; 7. C20:5n3 (Eicosapentaenoic acid, EPA); 8. C22:6n3 (Docosahexenoic acid, DHA); 9. Saturated fatty acids (SFA); 10. Mono-unsaturated fatty acids (MUFA); 11. Poly-unsaturated fatty acids (PUFA); 12. EPA + DHA; 13. n-3 series poly-unsaturated fatty acids (Σn3PUFA); 14. n-6 series poly-unsaturated fatty acids (Σn6PUFA)。

MUFA 的利用量最高 (1.94 μg/ind) (图3)。单个个体的脂肪酸利用率相对较低且不平衡, 均值为 22.65%, 范围为 12.41% ~ 51.47% (图3)。值得注意的是, 在仔鱼内源性营养期间的 MUFA 利用率较低 (14.17%), 尤其是 C18:1n9c 和 C16:1 的利用率分别排倒数第一 (12.41%) 和倒数第三 (21.81%); 相反的是, EPA + DHA 的总体利用率为 45.10%, EPA 和 DHA 利用率排前二, 数值分别为 51.47% 和 42.61% (图3)。

3 讨论

3.1 刀鲚胚胎及胚后发育早期的总脂相对含量及脂肪酸组成特点

刀鲚胚胎和仔鱼内源性营养期间的总脂含量较高 (总脂占干物质 60.97% ~ 53.10%), 远高于菊黄东方鲀 (*Takifugu flavidus*) 胚胎到开口前仔鱼 (21.27% ~ 31.70%) (施永海等 2017)、条石鲷 (*Oplegnathus fasciatus*) 胚胎和开口前仔鱼期 (分别为 23.77% 和 9.27%) (徐善良等 2013) 以及日本鬼鲉 (*Inimicus*

japonicus) 胚胎和卵黄囊仔鱼 (13.85% ~ 11.66%) (黄旭雄等 2013) 的干物质总脂含量, 特别是开口前的 5 日龄仔鱼干重的总脂相对含量还比较高 (53.10%), 这也说明在刀鲚开口摄食时体内的内源性营养物质——脂类含量还是比较多的, 也从理论上解释了刀鲚仔鱼开口后、混合营养时间特别长的现象。

鱼类胚胎及胚后的内源营养期间维系生命活动完全依靠鱼卵内的营养储存。脂肪作为鱼卵中最主要的能量储存物质, 不仅是鱼类发育早期重要的代谢能源, 还参与器官组织的构建和生命活动的调节 (黄旭雄等 2013), 因此, 鱼卵的脂肪酸组成及含量对胚胎和胚后发育至关重要 (Tocher et al. 1998)。然而, 鱼卵的脂肪酸组成及含量还与亲本卵巢有非常紧密的联系 (施永海等 2017)。本研究中, 刀鲚发育早期的脂肪酸种类和数量与其亲本卵巢的十分相似 (表4): 刀鲚发育早期的脂肪酸相对含量排前三的分别是 C18:1n9c、C16:1 和 C16:0, 其中 C18:1n9c 占绝对优势, 也导致了 MUFA 比

表 4 刀鲚肌肉、卵巢、卵及仔鱼的主要脂肪酸组成及相对含量 (%)

Table 4 The main fatty acid compositions and contents in *Coilia nasus* muscle, ovary, egg and larva

脂肪酸 Fatty acid	活饵养殖刀鲚肌肉 Muscles of <i>Coilia nasus</i> cultured by live diets (施永海等 2014)	“江刀”和“海刀”肌肉 Muscles of river-anchovy and sea-anchovy (徐钢春等 2009)	产卵前刀鲚肌肉 Muscles pre-spawning (李玉琪等 2015)	产卵期刀鲚肌肉 Muscles in spawning season (刘凯等 2009)	产卵后刀鲚肌肉 Muscles post-spawning (李玉琪等 2015)	刀鲚亲本卵巢 Brood stock ovaries (王桂学等 2009)	卵和仔鱼 (本研究) Eggs and larvae (the present study)
C16:0	25.64	18.54 ~ 20.51	23.02	18.75	28.01	8.21	7.45 ~ 9.15
C16:1	6.96	9.41 ~ 9.53	8.85	9.13	9.62	12.64	13.77 ~ 14.24
C18:1	49.97	47.71 ~ 41.73	44.84	45.34	37.68	44.55	50.39 ~ 57.00
EPA	5.70	4.21 ~ 6.71	5.54	5.51	5.61	5.01	1.93 ~ 2.60
DHA	4.34	2.26 ~ 2.92	8.61	2.76	6.70	2.99	5.87 ~ 7.89
ΣSFA	29.40	29.26 ~ 30.49	28.41	27.54	36.59	17.88	12.20 ~ 15.27
ΣMUFA	57.22	56.10 ~ 61.43	54.59	55.84	48.93	61.13	65.14 ~ 72.26
ΣPUFA	13.38	9.05 ~ 13.20	17.00	16.64	14.48	19.82	15.54 ~ 19.52
EPA + DHA	10.04	6.47 ~ 9.63	14.15	8.27	12.31	8.00	7.81 ~ 10.98
ΣSFA/ΣUFA	0.42	0.41 ~ 0.44	0.60	0.38	0.40	0.22	0.14 ~ 0.18
Σn3PUFA/ Σn6PUFA	8.85		7.71		9.32		1.78 ~ 2.38

EPA 为二十碳五烯酸, DHA 为二十二碳六烯酸, SFA 为饱和脂肪酸, MUFA 为单不饱和脂肪酸, PUFA 为多不饱和脂肪酸, UFA 为不饱和脂肪酸, n3PUFA 为 n-3 系列多不饱和脂肪酸, n6PUFA 为 n-6 系列多不饱和脂肪酸。

EPA is eicosapentaenoic acid, DHA is docosahexenoic acid, SFA is saturated fatty acids, MUFA is mono-unsaturated fatty acids, PUFA is poly-unsaturated fatty acids, UFA is unsaturated fatty acids, n3PUFA is n-3 series poly-unsaturated fatty acids, n6PUFA is n-6 series poly-unsaturated fatty acids.

例占绝对优势; 在刀鲚的卵巢中 (王桂学等 2009), C18:1、C16:1 和 C16:0 的相对含量也是排前三的, MUFA 比例也非常高 (表 4)。另外, 刀鲚卵和仔鱼的脂肪酸组成及含量与活饵养殖的幼鱼肌肉、成鱼肌肉、产卵前及产卵期亲鱼肌肉组织中的虽很相似, 但也有差异: 相对于卵和仔鱼来说, 刀鲚幼鱼、成鱼、产卵前及产卵期的肌肉中 C18:1 和 C16:1 相对含量及 MUFA 比例较低, 而 C16:0 相对含量较高 (刘凯等 2009, 徐钢春等 2009, 施永海等 2014, 李玉琪等 2015) (表 4)。同时, 刀鲚卵及仔鱼的脂肪酸组成及含量与产卵后刀鲚亲本肌肉相差较大: 产卵后刀鲚肌肉脂肪酸组成中相对含量前三的是 C18:1、C16:0 和 C16:1 (李玉琪等 2015) (表 4)。这可能是因为刀鲚为了繁衍后代, 早期发育需要的脂肪酸种类 (如 C18:1 和 C16:1) 被优选转移到性腺 (特别是卵巢)

中, 以支持子代发育早期的生理需求。因此, 在刀鲚亲本强化培育及产后培育中, 增加投喂富含 MUFA 特别是 C18:1 和 C16:1 的饵料, 以加强刀鲚亲本的营养积累和产卵后亲本生理机能的恢复。

鱼类脂肪中 n3PUFA 含量往往多于 n6PUFA, 尤其是海水鱼, 为了维系细胞膜良好的渗透性和流动性, 需要有较高的 n3PUFA (王丹丽等 2006, 施永海等 2017)。一般来说, 海水鱼类的 Σn3PUFA/Σn6PUFA 高于淡水鱼类, 如菊黄东方鲀胚胎和开口前仔鱼 (5.26 ~ 6.55) (施永海等 2017)、条石鲷胚胎和开口前仔鱼 (分别为 6.18 和 7.62) (徐善良等 2013) 和日本鬼鲉胚胎及卵黄囊仔鱼 (2.74 ~ 3.98) (黄旭雄等 2013); 淡水鱼类的 Σn3PUFA/Σn6PUFA 较低, 如黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 的受精卵和开口前仔鱼 (分别为 1.22

~ 1.35 和 1.19 ~ 2.26) (卢素芳等 2008)、白鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 的受精卵和仔鱼 (0.65 ~ 2.68) (朱邦科等 2002)。作为洄游性鱼类的刀鲚, 亲鱼在江河繁育 (朱栋良 1992), 仔稚鱼在淡水环境下生长发育, 等到要发育成幼鱼才会随江河顺流入海越冬。刀鲚胚胎和仔鱼的 $\Sigma n3PUFA/\Sigma n6PUFA$ 较小 (1.78 ~ 2.38), 其脂肪酸特征更接近淡水鱼类, 而刀鲚幼鱼或成鱼肌肉的 $\Sigma n3PUFA/\Sigma n6PUFA$ 数值范围为 7.71 ~ 9.32 (施永海等 2014, 李玉琪等 2015) (表 4), 显示出更接近于海水鱼类脂肪酸特征, 这与对刀鲚仔、幼鱼盐度耐受力的研究结论保持一致 (Xu et al. 2016): 刀鲚早期仔鱼 (0 日龄和 2 日龄) 只能耐受盐度 5 以下, 而随着生长, 体长 (8.33 ± 0.17) cm、体重 (2.12 ± 0.12) g 幼鱼的适宜盐度范围为 6 ~ 12。

3.2 刀鲚胚胎孵化出膜对脂肪酸的影响

鱼类受精卵孵化和胚胎出膜期间, 脂类的减少包括两个因素, 第一个因素是胚胎发育及出膜等生命活动需要消耗脂类来供能; 第二因素是卵膜上结合的大量的脂肪酸随卵膜脱落而随之损失 (朱邦科等 2002)。本研究中, 刀鲚胚胎孵化出膜前后, 受精卵和仔鱼干物质的总脂相对含量没有显著差异, 但单个个体的总脂含量明显下降。胚胎孵化出膜前后, 单个个体 MUFA 实际减少程度较高, 尤其是 C18:1n9c 和 C16:1, 而胚胎孵化出膜对 EPA + DHA 的实际减少程度较低, 尤其是 DHA (表 3, 图 1)。由此可见, 刀鲚胚胎孵化出膜期间, EPA + DHA 被先期暂存, 尤其是 DHA。许多鱼类在发育早期都会出现优先保留 n3PUFA 的现象, 如塞内加尔鲷 (*Solea senegalensis*) (Mourente et al. 1996)、金头鲷 (*Maccullochella macquarensis*) (Gunasekera et al. 2001)、大黄鱼 (*Pseudosciaena crocea*) (王丹丽等 2006)、黄颡鱼 (卢素芳等 2008)、条石鲷 (徐善良等 2013) 和菊黄东方鲀 (施永海等 2017)。

3.3 仔鱼内源营养期间脂肪酸利用的特征

研究人员认为 n-3 和 n-6 系列的脂肪酸是

鱼类的必需脂肪酸, 因为 n-3 和 n-6 系列的脂肪酸需要鱼类通过食物获取, 鱼类自身一般不能合成。另外, 通常淡水和河口性鱼类具备生物转化能力, 即能把短 C 链的脂肪酸转化成为长 C 链的 HUFA, 而海洋鱼类不具备此能力 (朱邦科等 2002)。在饥饿情况下, 淡水鱼仔鱼体内的 DHA 相对含量随生长发育有一定的升高, 如黄颡鱼 (卢素芳等 2008) 和白鲢 (朱邦科等 2002)。造成这现象的可能有两种原因, 一是因为仔鱼对 DHA 的优先暂存。另一原因是淡水鱼仔鱼可能把 18C 的 PUFA 转化成为 20C 和 22C 的 HUFA (卢素芳等 2008)。但在本研究中, 洄游性鱼类刀鲚, 未发现其仔鱼具备脂肪酸生物转化能力的依据: 刀鲚仔鱼出膜后到开口前, 仔鱼对 MUFA 的实际利用相对较低, 尤其是 C18:1n9c 和 C16:1, 而仔鱼对 EPA + DHA 实际利用相对较高, 尤其是 DHA (表 3、图 2)。在摄食前, 仔鱼大量利用体内的 EPA + DHA (尤其是 DHA), 这也证实了 EPA + DHA 对刀鲚摄食前仔鱼的生长发育来说, 是非常重要的。这种摄食前仔鱼大量利用 n3PUFA 的现象与许多海水鱼类的研究结果相似, 如日本鬼鲉 (黄旭雄等 2013)、条石鲷 (徐善良等 2013) 和菊黄东方鲀 (施永海等 2017) 等, 这也说明刀鲚仔鱼对 EPA + DHA (特别是 DHA) 消耗呈现出海水鱼类仔鱼脂肪酸利用的特点。

3.4 刀鲚仔鱼脂肪酸利用特征与育苗前期成活率

DHA 和 EPA 已被认为动物生长发育的必要脂肪酸 (唐雪等 2011), 仔稚鱼时期是鱼类神经发育的快速期, 仔鱼要利用更多的 DHA 来支撑个体发育的需要 (卢素芳等 2008)。本研究中, 刀鲚胚胎和仔鱼的 $\Sigma n3PUFA/\Sigma n6PUFA$ 较小 (1.78 ~ 2.38), 显示出更接近于淡水鱼类的脂肪酸特征, 但又未发现刀鲚仔鱼具备淡水和河口性鱼类能将 18C PUFA 转化为 20C 和 22C HUFA 的功能 (朱邦科等 2002), 刀鲚胚胎优先保留 EPA + DHA、仔鱼大量消耗 EPA + DHA。在刀鲚育苗早期, 其仔鱼在摄食

前大量利用体内的 EPA + DHA, 其机体内的 EPA + DHA 有所匮乏, 需外源大量补充, 但如果仔鱼摄食后, 摄取到的是 EPA + DHA 含量较少的食物, 如淡水轮虫, 这会造成刀鲚仔鱼体内 EPA + DHA 进一步匮乏, 而过低的 DHA 会导致仔鱼对外界反应能力低下甚至死亡 (刘镜恪等 2002), 这或许也是造成刀鲚仔鱼开口期间成活率较低的一个原因。因此, 在刀鲚育苗前期, 要及时增加富含 EPA 和 DHA 的饵料, 如单胞藻、蛋黄等。

参 考 文 献

- Gunasekera R M, De Silva S S, Ingram B A. 2001. Chemical changes in fed and starved larval trout cod, *Maccullochella macquarensis* during early development. *Fish Physiology and Biochemistry*, 25(4): 255–268.
- Mourente G, Vázquez R. 1996. Changes in the content of total lipid, lipid classes and their fatty acids of developing eggs and unfed larvae of the *Senegal sole*, *Solea senegalensis* Kaup. *Fish Physiology and Biochemistry*, 15(3): 221–235.
- Tocher D R, Harvie D G. 1998. Fatty acid compositions of the major phosphoglycerides from fish neural tissues; (n-3) and (n-6) polyunsaturated fatty acids in rainbow trout (*Salmo gairdneri*) and cod (*Gadus morhua*) brains and retinas. *Fish Physiology and Biochemistry*, 5(4): 229–239.
- Xu J B, Deng P P, Shi Y H, et al. 2016. Effect of salinity on the survival and growth of the larvae and juveniles of Japanese grenadier anchovy *Coilia nasus*. *North American Journal of Aquaculture*, 78(1): 1–7.
- 黄旭雄, 冯隆峰, 温文, 等. 2013. 日本鬼鲉胚胎及卵黄囊仔鱼发育过程中脂肪及脂肪酸特性变化. *水产学报*, 37(4): 526–535.
- 李玉琪, 陶宁萍, 朱文倩, 等. 2015. 产卵前后长江刀鲚肉中营养成分差异. *食品工业科技*, 36(15): 338–346.
- 刘镜恪, 陈晓琳. 2002. 海水仔稚鱼的必需脂肪酸—n-3 系列高度不饱和脂肪酸研究概况. *青岛海洋大学学报*, 32(6): 897–902.
- 刘凯, 段金荣, 徐东坡, 等. 2009. 长江下游产卵期凤鲚、刀鲚和湖鲚肌肉生化成分及能量密度. *动物学杂志*, 44(4): 118–124.
- 卢素芳, 赵娜, 刘华斌, 等. 2008. 黄颡鱼早期发育阶段受精卵和鱼体脂肪酸组成变化. *水产学报*, 32(5): 711–716.
- 施永海, 徐嘉波, 刘永士, 等. 2017. 菊黄东方鲀发育早期的脂肪酸组成变化. *水产学报*, 41(8): 1203–1212.
- 施永海, 张根玉, 张海明, 等. 2014. 配合饲料和活饵料喂养刀鲚肌肉营养品质分析与比较. *动物营养学报*, 26(2): 427–436.
- 施永海, 张根玉, 张海明, 等. 2015. 刀鲚的全人工繁殖及胚胎发育. *上海海洋大学学报*, 24(1): 36–43.
- 唐雪, 徐钢春, 徐跑, 等. 2011. 野生与养殖刀鲚肌肉营养成分的比较分析. *动物营养学报*, 23(3): 514–520.
- 王丹丽, 徐善良, 严小军, 等. 2006. 大黄鱼仔、稚、幼鱼发育阶段的脂肪酸组成及其变化. *水产学报*, 30(2): 241–245.
- 王桂学, 刘凯, 徐东坡, 等. 2009. 凤鲚、湖鲚和刀鲚卵巢氨基酸、脂肪酸及矿物元素分析. *广东海洋大学学报*, 29(3): 86–89.
- 徐钢春, 顾若波, 张呈祥, 等. 2009. 刀鲚两种生态类群——“江刀”和“海刀”鱼肉营养组成的比较及品质的评价. *海洋渔业*, 31(4): 401–409.
- 徐善良, 王亚军, 王丹丽, 等. 2013. 条石鲷(*Oplegnathus fasciatus*) 发育早期的脂肪酸组成变化研究. *海洋与湖沼*, 44(2): 438–444.
- 朱邦科, 曹文宣. 2002. 鲢早期发育阶段鱼体脂肪酸组成变化. *水生生物学报*, 26(2): 130–135.
- 朱栋良. 1992. 长江刀鱼的天然繁殖与胚胎发育观察. *水产科技情报*, 19(2): 49–51.