

海水仔稚鱼必需脂肪酸和磷脂的营养需求

Nutrient requirement of marine fish larvae for essential fatty acids and phospholipids

刘镜恪, 徐世宏

(中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071)

中图分类号: S963

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096 (2006) 11-0075-07

仔稚鱼营养研究是鱼类营养研究领域国际前沿的研究,在中国尚未引起足够重视。目前,中国的重要养殖海鱼如牙鲆、真鲷、黑鲷、石斑鱼和大菱鲆等,生产性育苗,因在仔稚鱼阶段容易发生大量死亡,成活率一般低于 20%。仔稚鱼从吸收卵黄内源营养转变为摄取人工培养的浮游动物或人工配合微粒饲料等外源营养后,某些营养物质的缺乏是导致仔稚鱼大量死亡的一个重要原因。近年来,国外在 n-3 系列高度不饱和脂肪酸 (n-3 HUFA)、n-6 系列高度不饱和脂肪酸 (n-6 HUFA) 和极性脂——磷脂等方面的脂类营养需求研究已取得重要进展,作者现作一综述,旨在为深入开展海水仔稚鱼的脂类营养需求研究提供参考。

1 海水鱼鱼卵的脂肪酸组成及被利用的顺序

1.1 海水鱼鱼卵的脂肪酸组成

由于海水鱼鱼卵含有从胚胎发育到仔鱼吸收卵黄内源营养阶段所必需的各种营养物质,因而分析海水鱼鱼卵的化学成分有助于了解海水仔稚鱼的营养需求。现将大西洋鲱鱼卵、大西洋鳕仔稚鱼和活饵料总脂中的主要脂肪酸成分列于表 1^[1]。

1.2 鱼卵中各种脂肪酸被利用的顺序

大菱鲆和金头鲷等在胚胎发育阶段和仔鱼吸收卵黄内源营养的发育阶段,首先利用饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸,而 n-3 HUFA 被适当地保存下来。脂肪酸按照以下顺序被先后利用: n-9 系列、n-6 系列、

n-3 系列。n-6 系列中的廿碳四烯酸 (AA, 20:4n-6) 和 n-3 系列中的 DHA (22:6n-3) 在各自的系列中被优先保存下来,而饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸作为仔鱼吸收卵黄内源营养发育阶段的重要能源被首先利用^[2,3]。

2 海水仔稚鱼对 n-3 HUFA 的需求

2.1 n-3 HUFA 对海水仔稚鱼生长、存活的影响

n-3 HUFA 是海水仔稚鱼的必需脂肪酸,海水仔稚鱼自身并不合成这些脂肪酸,只能从食物中摄取,活饵料或微粒饲料中 n-3 HUFA 的数量和种类,会直接影响海水仔稚鱼的生长速度、成活率、应激能力和体内相关成分的组成,其中以廿二碳六烯酸 (DHA) 和廿碳五烯酸 (EPA) 尤为重要^[4]。鲷和大西洋鳕的鱼卵中含有丰富的 DHA 和 EPA,但在轮虫 (特别是用面包酵母培养的轮虫) 和卤虫无节幼体活饵料中, DHA 和 EPA 的含量很低,远远不能满足海水仔稚鱼生长、存活的需要^[5]。分别给麒麟仔鱼投喂用 n-3 HUFA 强化的轮虫和藻粉培养的轮虫,在相同条件下,仔鱼的成活率差异明显,前者为 68%,后者仅 30%^[6]。分别给金头鲷仔鱼投喂 n-3 HUFA 质量比为

收稿日期: 2006-04-10; 修回日期: 2006-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30371114)

作者简介: 刘镜恪(1946-), 男, 山东高密人, 研究员, 主要从事海洋动物营养研究, E-mail: liujk@ms.qdio.ac.cn

8.4 mg/g (湿质量) 的强化轮虫和 n-3HUFA 质量比为 0.8 mg/g (湿质量) 的轮虫, 22 d 后的仔稚鱼的生长速度, 前者为后者的 4 倍^[7]。

表 1 大西洋鳕鱼卵和仔稚鱼及活饵料总脂中脂肪酸成分的比较

生物类型	脂肪酸 (%)						
	22 : 6n-3	20 : 5n-3	20 : 4n-6	18 : 3n-3	18 : 2n-6	18 : 1n-9	16 : 0
大西洋鳕鱼卵	29.3	14.8	1.7	0.3	1.1	11.5	18.5
大西洋鳕仔稚鱼	30.2	15.0	1.8	0.6	1.7	7.6	17.4
镖水蚤(<i>Calanoid copepods</i>)	32.2	12.1	1.0	1.7	2.0	7.0	18.1
卤虫(<i>Artemia</i>)无节幼体	0.0	3.9	1.1	22.1	5.9	17.4	11.6
强化卤虫幼体*	19.4	10.8	3.0	14.2	5.7	24.4	16.7

注: *强化卤虫幼体的乳化油组成为 88%的金枪鱼油+12%的鲑鱼卵磷脂

2.2 乳化油强化轮虫、卤虫活饵料

为了提高轮虫活饵料体内 n-3 HUFA 的含量, 有关学者通过选用 n-3 HUFA 含量相对较高的优质微藻[如小球藻(*Chlorella* sp.)、球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*)等]、制作油脂酵母等方法培养轮虫。日本东京水产大学的 Watanabe 等最先将富含 n-3HUFA 的鱼肝油制成乳化油, 直接加入到培养轮虫的海水介质中, 强化后约 12 h, 当富集于轮虫体内的 n-3HUFA 含量达到最大值时, 再将轮虫作为活的营养载体投喂仔鱼, 即将外源 n-3HUFA 转移至仔鱼体内, 供仔鱼消化、吸收, 取得明显效果^[8]。这种乳化油强化活饵料的方法简便、实用, 现已在国内外推广应用。仔稚鱼发育到摄取卤虫阶段, 以同样的方法对卤虫无节幼体进行 n-3HUFA 的营养强化^[9]。

2.3 几种海水仔稚鱼对活饵料中 n-3HUFA 的需要量

Izquierdo 等^[10]采用乳化油直接添加法强化轮虫、卤虫活饵料, 研究了真鲷仔稚鱼 n-3HUFA 的需要量。用 n-3HUFA 含量不同的乳化油强化轮虫活饵料, 投喂给真鲷仔鱼, 10 d 后, 摄取 n-3HUFA 不足的仔鱼不仅生长缓慢, 而且死亡率高。现将真鲷等几种海水仔、稚鱼对活饵料中 n-3HUFA 的需要量列于表 2^[11]。

2.4 DHA 与 EPA 对海水仔稚鱼不同的生理作用

同种海水鱼在仔、稚、幼和成鱼阶段对其食物中 n-3HUFA 的需要量不同, 以仔稚鱼阶段的需要量最高。仔稚鱼阶段, 正是脑神经和视神经迅速生长发育

的时期, 需要从食物中摄取 DHA 等重要营养物质, 以满足其脑神经和视神经发育的需要。DHA 和 EPA 对海水仔稚鱼的生理作用不同, 它们作为必需脂肪酸的营养价值也有差异。用 DHA 强化轮虫, 培育真鲷仔鱼, 显著提高了仔鱼在缺氧等条件下的应激能力^[4]; 用 DHA 强化卤虫, 培育真鲷稚鱼, 也显著提高了稚鱼的应激能力^[12]。分别用 DHA 和 EPA 强化卤虫, 培育五条鲷稚鱼, 8 d 后, 用 DHA 强化卤虫培育的稚鱼生长良好, 但用 EPA 强化卤虫培育的稚鱼则突然死亡^[13]。一些学者认为, 仔、稚鱼生物膜磷脂中的 DHA 和 EPA 有一定的比例关系, EPA 的含量过高和 DHA 的含量过低, 会导致海水仔、稚鱼应激能力的下降及死亡率的增高。

表 2 几种海水仔稚鱼对活饵料中 n-3HUFA 的需要量

种类	饵料	n-3HUFA 需要量(%, 干质量)	必需脂肪酸值的比较
真鲷	轮虫	> 3.5	DHA > EPA
	卤虫	> 3.0	DHA > EPA
五条鲷	卤虫	> 3.9	DHA > EPA
条石鲷	轮虫	> 3.0	
	卤虫	> 3.0	
牙鲆	卤虫	> 3.5	DHA > EPA
大菱鲆	轮虫	1.2 ~ 3.2	

2.5 海水仔稚鱼活饵料或微粒饲料中 DHA 与 EPA 比例的重要性

Rodriguez 等采用 n-3HUFA 含量相同,但 DHA 与 EPA 比例不同的四种乳化强化轮虫活饵料培育 17 日龄的金头鲷,两周后的试验结果表明,随着轮虫体内 DHA 比例的提高,仔鱼的生长速度也随之加快。该作者还曾用 n-3HUFA 含量均为 30%、但 DHA 和 EPA 比例不同的乳化油强化轮虫活饵料培育金头鲷仔鱼,两周后的试验结果表明,当轮虫体内 DHA/EPA 的比例为 2.3/1 时,金头鲷仔鱼的生长速度最快。该作者还发现,金头鲷仔鱼对轮虫活饵料体内 n-3HUFA 的需要量与活饵料体内 DHA、EPA 的比例密切相关,提高轮虫活饵料体内 DHA 与 EPA 的比例,金头鲷仔鱼对活饵料体内 n-3HUFA 的需要量会下降^[14-16]。刘镜格等进行了真鲷微粒饲料中 DHA 与 EPA 最佳比例的研究,30 d 的养殖试验结果表明,真鲷微粒饲料中 DHA 与 EPA 的最佳比例应为 2.3^[17]。

2.6 海水比目鱼非正常色素沉着与 n-3HUFA 的关系

海水鱼细胞膜的磷脂中含有丰富的 DHA 和 EPA,这两种重要的 n-3HUFA,只能从食物中摄取。正如哺乳动物,海水鱼的脑神经和视神经的细胞膜中含有丰富的 DHA^[18,19]。缺乏 DHA 的大西洋鲱幼鱼,由于视神经发育不良,视力减弱,在光强较弱的条件下,捕捉食物的能力则会下降^[20]。一些海水比目鱼如牙鲆和大菱鲆非正常的色素沉着(如育苗中常见的白化症),可能是由于视神经和脑神经功能的错误产生的。活饵料或微粒饲料中 DHA 的含量可能会直接影响细胞膜的色素沉着^[21]。Reitan 等^[22]用 DHA/EPA 为 2/1 的强化活饵料培育大菱鲆仔稚鱼,有效地防止了大菱鲆白化症的产生;而许多海水鱼鱼卵和海水仔、稚鱼体内,DHA 与 EPA 的含量均为 2/1 左右。刘镜格等^[23]将天然鳀鱼油(n-3HUFA 含量约 30%)以 8% 的量和大豆卵磷脂以 2% 的量添加到微粒饲料中,培育牙鲆仔鱼(10 日龄,平均全长约 1cm),每试验组的牙鲆仔稚鱼达 10 万尾,历时 20 d,主要投喂微粒饲料(添加鳀鱼油和大豆卵磷脂)的牙鲆仔稚鱼的白化症发生率低于 1%,全部投喂轮虫、卤虫活饵料的牙鲆仔稚鱼的白化症发生率却高于 10%。这可能是由于微粒饲料中含有丰富的 n-3HUFA、特别是 DHA,充分满足了牙鲆仔稚鱼对 DHA 的营养需要,可以有效地防止牙鲆仔稚鱼白化症的发生。

2.7 乳化油和鱼油中 n-3HUFA 的不同结构形式对海水仔稚鱼生长、存活的影响

用乳化油强化轮虫、卤虫活饵料,不仅要注重强化活饵料体内 n-3HUFA 的含量、DHA 与 EPA 的比例,而且还要注重 n-3HUFA 的存在形式。Izquierdo 等^[24]的研究表明,用分子结构形式为脂肪酸甲酯、n-3HUFA 含量约为 85%的甲酯化鱼油制成的乳化油强化轮虫活饵料培育真鲷仔鱼,尽管强化轮虫体内 n-3HUFA 的含量很高,但仔鱼的生长速度、成活率和应激能力均不理想。刘镜格等^[25]分别用天然鳀鱼油(n-3HUFA 的分子结构形式为甘油三酯,n-3HUFA 含量约 30%)和 75%的天然鳀鱼油+25%的乙酯化鱼油(后者 n-3HUFA 的分子结构形式为脂肪酸乙酯,n-3HUFA 的含量约 70%)制成 n-3HUFA 含量不同的两种乳化油强化轮虫、卤虫活饵料,培育黑鲷仔稚鱼,各自历时 15 d。结果表明,尽管用天然鳀鱼油制成的乳化油强化的轮虫和卤虫体内 n-3HUFA 和 DHA 的含量均低于添加了部分乙酯化鱼油制成的乳化油强化的轮虫和卤虫体内 n-3HUFA 和 DHA 的含量,但用前者强化活饵料培育的仔稚鱼体内 n-3HUFA 和 DHA 的含量却高于用后者强化活饵料培育的仔稚鱼体内 n-3HUFA 和 DHA 的含量,说明黑鲷仔、稚鱼对天然鱼油的消化、吸收要优于对乙酯化鱼油的消化、吸收。陈晓琳、刘镜格等人^[26]25 d 的养殖试验结果也表明,真鲷仔稚鱼对微粒饲料中天然鱼油的消化、吸收明显优于对乙酯化鱼油的消化吸收。

3 海水仔稚鱼对 n-6HUFA 的需求

n-6 系列高度不饱和脂肪酸是海水仔、稚鱼的必需脂肪酸,其中以廿碳四烯酸(AA, 20:4n-6)尤为重要。迄今,n-6HUFA 的有关研究,特别是 AA 的研究,尚未引起足够重视。尽管 AA 不能像 DHA 和 EPA 那样显著提高海水仔稚鱼的生长速度,但它似乎能够显著提高海水仔稚鱼的成活率。将微粒饲料中 AA 的含量从 0.1% 提高到 1.0%,尽管金头鲷仔稚鱼的生长速度仅稍有提高,但其成活率却明显改善;此外,金头鲷仔稚鱼体内总脂和磷脂的含量,特别是磷脂的含量,随着微粒饲料中 AA 含量的提高而增加^[27]。

Castell 等研究了 AA 对大菱鲆幼鱼生长、存活的影响^[28]。在以酪蛋白为基础的精制饲料中均添加 14% 的混合油(椰油/油酸为 1:1),此外,各精制饲料中再添加 1% 的 AA、或 1% 的 DHA、或 1% 的混合

油(AA+DHA)。11周的试验结果表明,用添加了1%AA的饲料饲养的幼鱼,其生长速度和成活率均优于用添加了1%DHA或1%混合油的饲料饲养的幼鱼。养殖试验结束后幼鱼体内组织的化学分析结果证实,DHA在脑和眼的脂类中含量最高,而AA在鳃和肾的脂类中含量最高。虹鳟等淡水鱼具有将十八碳酸如亚麻酸(18:3n-3)转化为EPA和DHA的能力,但海水鱼由于拉长碳链并去饱和的能力很弱,因此EPA和DHA主要依靠从活饵料或微粒饲料中摄取。一些热带淡水鱼,如尼罗罗非鱼等最需要的是n-6系列多不饱和脂肪酸如亚油酸(18:2n-6),而不是n-3系列多不饱和脂肪酸,来满足其生长、存活的需要。

Bell等^[29]指出,尽管大菱鲆饲料和大菱鲆体内的脂类中n-6HUFA的含量不高,但大菱鲆体内磷脂中的磷脂酰肌醇(PI)却富含AA。用C¹⁴标记的AA在大菱鲆体内积极参与了磷脂酰肌醇的生物合成。Henderson等^[30]认为,在大菱鲆鳃、肝、肾等组织器官中,AA作为前列腺素合成的前体物,比EPA有更强的竞争力。尽管大菱鲆和金头鲷等海水仔稚鱼对AA的需要量较小,但AA同DHA、EPA一样,也是海水仔稚鱼的必需脂肪酸。

Zheng等^[31]的研究结果表明,用AA质量分数为3.7%~7.6%的强化卤虫(干质量)培育的鳕鱼(*Gadus morhus*)仔稚鱼与用AA含量低于0.5%的强化卤虫(干质量)培育的鳕鱼仔稚鱼相比,前者仔稚鱼的成活率和生长速度均低于后者,这说明鳕鱼仔稚鱼对活饵中AA的需要量不高,活饵料中AA的含量过高,对鳕鱼仔稚鱼的成活率和生长速度会产生不利影响。

刘镜恪等^[32]研究了海水鱼微粒饲料中AA含量对牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)仔稚鱼生长、存活的影响。26d的养殖试验结果表明,微粒饲料中AA含量为1.5%时,牙鲆仔稚鱼的生长、存活及对不同压力的耐受性达到最佳。养殖试验结束后对仔稚鱼的化学分析结果表明,仔稚鱼体内的AA含量随着微粒饲料中AA含量的增加而增加。海鱼同哺乳动物一样,其类二十烷酸的主要前体物是AA,由AA产生的类二十烷酸的生理活性比由EPA产生的类二十烷酸的生理活性强,并与EPA产生的类二十烷酸竞争^[33]。因此,鱼体内类二十烷酸的活性与AA/EPA的比例有关。如果AA/EPA的比例提高,可提高类二十烷酸的活性。牙鲆微粒饲料中AA/EPA的最佳比例,刘镜恪等已进行了初步研究^[34]。

4 海水仔稚鱼对磷脂的需求

4.1 磷脂的重要性及其作用与功能

活饵料或微粒饲料中的磷脂是一种极性脂,其对仔稚鱼的生长、存活、应激能力、脂类的吸收和运输等均有重要的作用和影响。仔鱼孵出后迅速生长、发育的一段时期内,仔稚鱼需要丰富的磷脂来形成和更新细胞,由于仔稚鱼自身生物合成的磷脂远远不能满足仔稚鱼的需要,因此必须从食物中摄取,直接或间接地用于细胞膜的形成。一些学者认为,仔稚鱼对磷脂的吸收要比对中性脂——甘油三酯的吸收更快、更有效。海水仔稚鱼在天然环境下,主要通过摄取活饵料来得到所需要的磷脂。

活饵料或微粒饲料中的磷脂是仔稚鱼细胞膜磷脂的主要来源,活饵料或微粒饲料磷脂中的磷脂酰胆碱即卵磷脂被仔稚鱼吸收后进入细胞膜,成为细胞膜的主要成分。磷脂酰胆碱和磷脂酰肌醇还被认为是仔稚鱼在胚胎发育和摄取卵黄内源营养阶段无机磷酸盐、胆碱、肌醇、DHA和代谢能量的主要来源。仔稚鱼阶段,作为必需脂肪酸的来源,极性脂——磷脂优于中性脂——甘油三酯,磷脂在仔稚鱼体内更容易被乳化,也更容易被消化、吸收。脂蛋白在仔稚鱼体内的脂类运输中起重要作用,活饵料或饲料中的卵磷脂不仅保障了仔稚鱼体内脂蛋白的合成,而且也提高了仔稚鱼体内脂类的运输能力。

4.2 磷脂在水生生物体内的组成

Fraser等研究证实,大西洋鳕在刚受精时,鱼卵中磷脂酰胆碱(PC)与磷脂酰乙醇胺(PE)的比例为8:1;然而,自受精后到仔鱼孵出前的21d内,受精卵中的磷脂只有磷脂酰胆碱的含量下降,二者比例下降为4:1;仔鱼孵出后未投饵的13d内,仔鱼体内磷脂酰胆碱的含量因利用速度的增加而进一步明显下降,二者比例仅为1.8:1。这说明仔鱼对磷脂酰胆碱的需求量很大^[35]。Teshima等分析了海洋小球藻(*Chlorella pacifica*)以及用小球藻培养的轮虫和真鲷、条石鲷、香鱼等仔、稚鱼体内磷脂的组成。结果表明,以上生物体内的磷脂主要是磷脂酰胆碱和磷脂酰乙醇胺。用小球藻培养的轮虫体内,磷脂在轮虫(干质量计)中的质量分数为4.0%~4.5%,在轮虫总脂中的质量分数为37%~38%。其中磷脂酰胆碱约占磷脂的42%,磷脂酰乙醇胺约占磷脂的37%~39%。由于仔鱼自身生物合成磷脂酰胆碱的能力有限,因而主要

从轮虫活饵料中获取^[36]。

4.3 磷脂对几种海水仔稚鱼的影响

Kanazawa 等^[37]给 10 日龄的真鲷仔鱼连续投喂 20 d 大豆卵磷脂添加量为 5% 的精制饲料, 养殖结果表明, 真鲷仔稚鱼在体质量、全长和成活率三方面均优于未添加大豆卵磷脂的对照组。18 日龄条石鲷仔稚鱼 20 d 的养殖试验结果也进一步证实了大豆卵磷脂的重要影响。刘镜恪等^[38]进行了饲料卵磷脂对金头鲷仔稚鱼生长、存活及应激能力影响的研究。在以鲑鱼粉为基础的两种微粒饲料中, 均添加 8% 的天然沙丁鱼油; 此外, 饲料 A 添加 2% 的卵磷脂, 饲料 B 添

加 2% 的十六碳酸。将 18 日龄的金头鲷仔稚鱼分为两组, 8 000 尾/组, 连续投喂 15 d。结果表明, 饲料 A 组仔稚鱼的平均成活率为 70.5%, 饲料 B 组仔稚鱼的平均成活率仅为 50.4%; 此外, 饲料 A 组仔稚鱼的生长速度也明显优于饲料 B 组, 随后进行了两组金头鲷仔稚鱼应激能力的比较试验 (缺氧、低温和高盐), 结果表明, 饲料 A 组仔稚鱼的试验结果均优于饲料 B 组。

4.4 几种仔稚鱼对卵磷脂的需要量

现将几种仔稚鱼对卵磷脂需要量的研究结果列于表 3。

表 3 不同种类仔稚鱼对卵磷脂的需要量

仔、稚鱼种类	开始全长或质量	试验周期(d)	磷脂种类	基础饲料	最适质量分数(%)
真鲷	4.8 mm	20	大豆卵磷脂	酪蛋白	5
条石鲷	6.0 mm	22	大豆卵磷脂	蛋白混合物	7.4
	26 mg	28	大豆卵磷脂	蛋白混合物	5
牙鲆	4.6 mm	30	大豆卵磷脂	酪蛋白	7
香鱼	2.4 mg	20	鸡蛋卵磷脂		3
			大豆卵磷脂		3
	9.6 mm	50	东方狐鲣卵磷脂	酪蛋白	3
			鸡蛋卵磷脂		3
			大豆卵磷脂		5

参考文献:

- [1] Sargent J R. Lipid nutrition of marine fish during early development: current status and future directions [J]. *Aquaculture*, 1999, 179: 217-229.
- [2] Falk P S, Falk P I B, Sargent J R, et al. Lipid class and fatty acid composition of eggs from the Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*) [J]. *Aquaculture*, 1986, 52: 207-211.
- [3] Mourente G, Rodriguez A, Tocher D R, et al. Effects of dietary doco-sahexaenoic acid (DHA; 22: 6n-3) on lipid and fatty acid compositions and growth in gilthead seabream (*Sparus aurata* L.) larvae during first feeding [J]. *Aquaculture*, 1993, 112: 79-98.
- [4] Watanabe T, Izquierdo M S, Takeuchi T, et al. Comparison between eicosapentaenoic and docosahexaenoic acids in terms of essential fatty acid efficacy in larval red sea bream [J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1989, 55: 1 635-1 640.
- [5] Dendrinis P, Thorpe J P. Experiments on the artificial regulation of amino acid and fatty acid contents of food organisms to meet the assessed nutritional requirements of larval, post-larval and juvenile Dover sole (*Solea solea* L.) [J]. *Aquaculture*, 1987, 61: 121-154.
- [6] Ostrowski A C, Divakaran S. Survival and bioconversion of n-3 fatty acids during early development of dolphin (*Coryphaena hippurus*) larvae fed oil-enriched rotifers [J]. *Aquaculture*, 1990, 89: 273-285.
- [7] Koven W M, Tandler A, Kissil G Wm, et al. The effect of dietary (n-3) polyunsaturated fatty acid on growth, survival and swim bladder development in *Sparus aurata* larvae [J]. *Aquaculture*, 1990, 91: 131-141.
- [8] Watanabe T, Tamiya T, Oka A, et al. Improvement of dietary value of live foods for fish larvae by feeding them on n-3 highly unsaturated fatty acids and fat soluble vitamins [J].

- Bull Jpn Soc Sci Fish**, 1983, **49**(3): 471-479.
- [9] Lemm C A, Lemaria D P. Survival and growth of larval striped bass (*Morone saxatilis*) fed *Artemia* enriched with highly unsaturated fatty acids [J]. **Nutr Absts Rev** (series B), 1992, **62**(2): 928.
- [10] Izquierdo M S, Watanabe T, Takeuchi Arkawa T, *et al.* Optimal levels in *Artemia* to meet the EFA requirements of red seabream (*Pagrus major*)[A]. Takeda M, Watanabe T. The Current Status of Fish Nutrition in Aquaculture [C]. Tokyo: Japan Trabskatuib Cebter, Ltd, 1989. 221-232.
- [11] Watanabe T. Prospects in larval fish dietetics [J]. **Aquaculture**, 1994, **124**: 223-251.
- [12] Takeuchi T. Dietary value to larval red seabream of *Artemia* nauplii enriched EPA and DHA [A]. Japanese Society of Scientific Fisheries. Annual meeting of Japanese Society of Scientific Fisheries (Abstracts) [C]. Tokyo: Japanese Society of Scientific Fisheries, 1991. 327.
- [13] Toyota M, Takeuchi T, Watanabe T. Dietary value to larval yellowtail of *Artemia* nauplii enriched with EPA and DHA[A]. Japanese Society of Scientific Fisheries. Annual meeting of Japanese Society of Scientific Fisheries (Abstracts) [C]. Tokyo: Japanese Society of Scientific Fisheries, 1991.
- [14] Rodriguez C. n-3HUFA requirement of larval gilthead seabream *Sparus aurata* when using high level of eicosapentaenoic acid [J]. **Comp Biochem Physiol**, 1994, **107A**: 693-698.
- [15] Rodriguez C. The effect of n-3HUFA proportions in diets for gilthead seabream (*Sparus aurata*) larval culture [J]. **Aquaculture**, 1994, **124**: 284.
- [16] Rodriguez C. Influence of the EPA/DHA ratio in rotifers on gilthead seabream *Sparus aurata* larval development [J]. **Aquaculture**, 1997, **150**: 77-89.
- [17] 刘镜格, 陈晓琳, 周利, 等. 真鲷仔稚鱼微粒饲料中 DHA 与 EPA 最佳比例的研究 [J]. **海洋科学**, 2004, **28** (2): 18-20.
- [18] Mourente G, Tocher D R, Sargent J R. Specific accumulation of docosahexaenoic acid (22: 6n-3) in brain lipids during development of juvenile turbot *Scophthalmus maximus* L. [J]. **Lipids**, 1991, **26**: 871-877.
- [19] Mourente G, Rodriguez A, Tocher D R, *et al.* Effects of dietary doco-sabexaenoic acid (DHA; 22:6n-3) on lipid and fatty acid compositions and growth in gilthead seabream (*Sparus aurata* L.) larvae during first feeding [J]. **Aquaculture**, 1993, **112**: 79-98.
- [20] Bell M V, Batty R S, Dick J R, *et al.* Dietary deficiency of docosahexaenoic acid impairs vision at low light intensities in juvenile herring (*Clupea harengus* L.) [J]. **Lipids**, 1995, **30**: 373-476.
- [21] Kanazawa A. Nutritional mechanisms involved in the occurrence of abnormal pigmentation in hatchery-reared flatfish [J]. **J World Aquacul Soc**, 1993, **24**: 162-166.
- [22] Reitan K I, Rainuzzo J R, Olsen Y. Influence of lipid composition of live feed on growth, survival and pigmentation of turbot larvae [J]. **Aquacult Int**, 1994, **2**: 33-48.
- [23] 刘镜格, 张百刚, 陈剑慧, 等. 海鱼微粒饲料在牙鲆生产性育苗中的应用[J]. **饲料工业**, 2001, **22**(11): 26-27.
- [24] Izquierdo M S, Watanabe T, Takeuchi A T, *et al.* Requirement of larval red seabream *Pagrus major* for essential fatty acids [J]. **Nippon Suisan Gakkaish**, 1989, **55**: 859-867.
- [25] 刘镜格, 雷霖霖. 人工调节轮虫 n-3HUFA 对黑鲷仔稚鱼生长、存活的影响[J]. **科学通报**, 1997, **42**(12): 1330-1333.
- [26] 陈晓琳, 刘镜格, 徐世宏. 微粒饲料中 n-3HUFA 的分子结构对真鲷仔稚鱼生长、存活的影响[J]. **海洋水产研究**, 2004, **25**(6): 13-18.
- [27] Bessonart M, Izquierdo M S, Salhi M, *et al.* Effect of dietary arachidonic acid levels on growth and survival of gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) larvae [J]. **Aquaculture**, 1999, **179**: 265-275.
- [28] Castell J D, Bell J G, Tocher D R, *et al.* Effects of purified diets containing different combinations of archidonic and docosahexaenoic acid on survival, growth and fatty acid composition of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*) [J]. **Aquaculture**, 1994, **128**: 315-333.
- [29] Bell J G, Castell J, Tocher D R, *et al.* Effects of different

- dietary arachidonic acid: docosahexaenoic acid ratios on phospholipid fatty acid compositions and prostaglandin production in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.) [J]. **Fish Physiol Biochem**, 1995, 14: 139-151.
- [30] Henderson R J, Bell M V, Sargent J R. The conversion of polyunsaturated fatty acids to prostaglandins by tissue homogenates of the turbot, *Scophthalmus maximus* (L.) [J]. **J Exp Mar Biol Ecol**, 1985, 85: 93-99.
- [31] Zheng F, Takenchi T, Yosheda K, *et al.* Requirement of larvae cod for arachidonic acid, eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid using by their enriched *Artemia* nauplii [J]. **Nippon Suisan Gakkaishi**, 1996, 62: 669-676.
- [32] 刘镜恪, 陈晓琳, 李焱然. 实验微粒饲料中花生四烯酸含量对牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)仔稚鱼生长、存活的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2005, **36**(5): 418-422.
- [33] Sargent J R, Bell J G, Bell M V. The metabolism of phospholipids and polyunsaturated fatty acids in fish [A]. Lahlow B, Vitiello P. *Aquaculture: Fundamental and Applied Research* [C]. American: American Geophysical Union, 1994.103-113.
- [34] 刘镜恪, 陈晓琳, 徐世宏. 实验微粒饲料中廿碳五烯酸(EPA)与廿碳四烯酸(AA)的比例对牙鲆仔稚鱼生长、存活的影响[J]. *海洋科学*, 2005, **29**(10): 40-53.
- [35] Fraser A J, Gamble J C, Sargent J R. Changes in lipid content, lipid class composition of developing eggs of cod (*Gadus morhua*) [J]. **Mar Biol**, 1998, 99, 307-313.
- [36] Teshima S, Kanazawa A, Horinouchi K, *et al.* Phospholipids of rotifer, prawn and larval fish [J]. **Nippon Suisan Gakkaishi**, 1987, 53: 609-615.
- [37] Kanazawa A. Effects of dietary phospholipids on growth of larval red sea bream and knife jaw [J]. **Mem Fac Fish Kagoshima Univ**, 1983, 32: 109-114.
- [38] Liu Jingke, Wang Wenqi, Li Kuiran, *et al.* Effects of fish oil, DHA oil and lecithin in microparticulate diets on stress tolerance of larval gilthead seabream (*Sparus aurata*) [J]. **Chin J Oceanol Limnol**, 2002, **20**(4): 338-343.

(本文编辑：刘珊珊)