

延迟首次投喂对胭脂鱼仔鱼氨基酸和脂肪酸的影响

王 川¹, 郭海燕^{1,2}, 李秀明^{1,3}, 袁建明¹,
蒲德永¹, 金 丽¹, 王志坚¹, 张耀光^{1*}

(1. 西南大学生命科学学院, 淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室, 重庆 400715;

2. 重庆水产科学研究所, 重庆 400020;

3. 重庆师范大学进化生理与行为学实验室, 重庆市动物生物学重点实验室, 重庆 400047)

摘要: 为考察饥饿及恢复摄食对胭脂鱼仔鱼氨基酸和脂肪酸的影响。在水温(19 ± 0.5)℃下, 对胭脂鱼仔鱼实施延迟首次投喂 0、1、3、5、7、9 和 11 d 共 7 个处理, 随后进行饱食投喂, 分别在延迟处理结束时以及摄食后(19 日龄和 29 日龄)取材对鱼体的含脂量、脂肪酸和氨基酸含量进行检测。结果如下:(1) 随延迟首次投喂时间的增加, 胭脂鱼仔鱼鱼体的脂肪含量呈显著下降趋势。在实验结束时(29 日龄), 各处理组仔鱼的脂肪含量均与对照组无显著性差异, 表现出完全补偿效应。(2) 胭脂鱼仔鱼在饥饿期间, 主要以单不饱和脂肪酸作为能量代谢基质, 按 n-6 > n-9 > n-3 顺序被先后利用, 且 C22:6n-3(DHA) 优先于 C20:5n-3(EPA) 被保存下来。同时, 鱼体中 DHA 和 ARA 的百分含量与仔鱼体质量和含水率存在极显著相关关系。(3) 随延迟首次投喂时间的增加, 胭脂鱼仔鱼的丙氨酸、异亮氨酸、亮氨酸和组氨酸显著下降; 天冬氨酸和谷氨酸显著上升; 而甘氨酸、赖氨酸和精氨酸则呈先上升后下降的趋势。结果表明: 胭脂鱼仔鱼对饥饿有较强的适应性, 在饥饿初期以消耗脂类物质为主, 当脂类物质趋于阈值, 氨基酸开始被大量消耗; 胭脂鱼仔鱼在饥饿后恢复摄食时, 鱼体氨基酸的恢复比脂肪酸更慢。

关键词: 胭脂鱼; 仔鱼; 延迟首次投喂; 氨基酸; 脂肪酸

中图分类号: Q 493; S 965

文献标志码: A

鱼类是水生生态环境的重要组分, 其在生活中将不可避免地受到各类环境因子的影响, 例如: 光照、水温、溶氧、pH 值、饵料丰度等都会对鱼类的生长、发育和繁殖产生重要的作用^[1-2]。鱼类的早期发育阶段是鱼类发育过程中的重要时期, 是其在人工养殖和自然资源保护过程中最脆弱和最关键的阶段, 决定鱼类的世代发生量和种群规模^[1-3]。在自然水域中, 仔鱼由于个体小、游泳能力弱以及饵料适口性差等原因, 经常面临不同程度的饥饿胁迫, 影响其正常生长、发育和生存^[3-4]。鱼类在面临饥饿胁迫时, 为了维持自身生命活动, 鱼体内主要的能

源物质(脂肪和蛋白质)将会被不同程度地消耗, 然而仔鱼的储能物质十分有限, 如何调节自身的代谢特征, 以度过胁迫期, 这已经引起了众多学者的关注^[5-6]。

胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*) 隶属鲤形目(Cypriniformes), 胭脂鱼科(Catostomidae), 胭脂鱼属, 是我国特有的名贵鱼类, 国家二级保护动物。目前, 对胭脂鱼的研究主要集中在养殖技术、种群遗传和野生资源状况等方面^[7-9], 迄今, 未见饥饿对胭脂鱼仔鱼生理生态学方面的研究报道。本实验以胭脂鱼仔鱼为研究对象, 通过分析在不同延迟投喂时间下, 该鱼的氨基酸和脂肪酸组成

收稿日期: 2014-05-08 修回日期: 2014-10-09

资助项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203086)

通信作者: 张耀光, E-mail: zhangyg@swu.edu.cn

和含量的变化情况,了解此过程中氨基酸和脂肪酸的代谢规律,进而揭示其在早期生活史中适应饥饿胁迫的能量分配机制,为合理投喂、育苗和高密度养殖提供基础资料,同时也为该鱼的全人工繁殖过程中,如何加强亲本营养培育和配制适宜开口饵料提供科学依据。

1 材料方法

1.1 实验材料来源和饲养

胭脂鱼受精卵购于万州水产研究所,带回实验室后在玻璃水族箱(60 cm × 25 cm × 30 cm)中孵化获得实验用仔鱼。仔鱼培育实验用水为曝气48 h的自来水,平均水温(19 ± 0.5)℃,pH 8.09 ± 0.13,DO(7.59 ± 0.63) mg/L,光周期为14 L:10 D,日换水约1/3,并用虹吸法去除死亡仔鱼和残饵。用做饥饿的仔鱼不予投喂,摄食仔鱼每天在09:00和17:00各投喂一次,饲喂饵料为丰年虫卵孵化24 h后的无节幼虫。

1.2 实验设计

根据文献资料和预备实验数据,胭脂鱼仔鱼在本实验条件下出膜7 d后陆续开口摄食。因此,本实验在仔鱼出膜5 d时,选择健康、活泼仔鱼10 500尾移入体积相同的玻璃水族箱,实验共分7个不同饥饿处理组(每组3个重复,每个重复500尾)。分别于仔鱼出膜后第7、8、10、12、14、16和18 d进行首次投喂,即饥饿处理时间相应为0、1、3、5、7、9和11 d,将上述各组依次作为对照组(出膜后7 d,D0)、延迟1 d处理组(出膜后8 d,D1)、延迟3 d处理组(出膜后10 d,D3)、延迟5 d处理组(出膜后12 d,D5)、延迟7 d处理组(出膜后14 d,D7)、延迟9 d处理组(出膜后16 d,D9)和延迟11 d处理组(出膜后18 d,D11)。各处理组在延迟首次投喂实验结束后,剩余仔鱼饱足投喂,直至19日龄和29日龄。分别在延迟首次投喂实验结束时(投喂前)、恢复1期(19日龄)和恢复2期(29日龄时)(禁食12 h后),从每个水族箱中随机取样150、100和100尾仔鱼,蒸馏水冲洗,用滤纸吸去水分,装入5 mL的离心管中,液氮速冻,-80℃冰箱中保存备用。

1.3 样品分析方法

样品前处理 从-80℃冰箱中取出仔鱼样品,迅速放入调试好的超低温真空冷冻干燥机中,在-80℃中冷冻干燥24 h,后转至干燥研钵

中,粉碎均匀后转入5 mL的离心管中,密封备用。

总脂的提取 采用氯仿-甲醇法提取脂质^[10]。用万分之一分析天平准确称取100 mg样品移入5 mL的离心管中,先加0.5 mL氯仿和甲醇混合液(2:1),立即漩涡震荡1 min,再加3 mL氯仿和甲醇溶液(2:1),后再漩涡震荡均匀,室温放置,静置抽提4 h。随后再加1 mL双蒸水,以3 500 r/min速度离心10 min,使其完全分层。分层后收集下层氯仿(含全部脂质),残液中加1.5 mL氯仿震荡,再离心10 min后吸取氯仿层,并入提取液。将提取液放置在康林科技KL512氮吹仪下,氮气吹干,称重,计算得到样品中总脂肪含量比例。将吹干后的脂质密封,于-20℃贮存待测。

脂肪酸甲酯的制备 将上述氯仿挥发物加入1.5 mL乙醚和石油醚(1:1),轻轻摇动使油脂溶解。加入0.4 mol/L氢氧化钾-甲醇溶液,混匀。在室温静置10 min后,加蒸馏水1 mL,放置待澄清,吸取上清液,上机测定。

脂肪酸分析条件 37种脂肪酸甲酯混合标准品购自Sigma公司。采用德国Agilent-7890A型气相色谱仪分析脂肪酸;G4513自动进样器;Sigma公司SP-2380毛细管色谱柱:柱长30 m,内径0.25 mm,膜厚0.2 μm。FID检测器进样口温度260℃;载气为高纯度氮气,流量为1.9 mL/min,氢气流量为30 mL/min,空气流量为300 mL/min。起始温度50℃,保持2 min后,以4℃/min速度升至250℃,保持15 min。进样量1 μL,分流比为100:1。

样品平行测定2次,根据脂肪酸标准品(Sigma)的分析图谱和保留时间对样品脂肪酸进行定性。定量分析采用对各组分峰面积积分,用归一法计算出脂肪酸各组分的相对含量^[11]。

氨基酸含量测定 用万分之一分析天平准确称取100 mg样品于18 mm × 180 mm试管中,向盛有样品的试管中加入10 mL 6 mol/L盐酸,振荡混匀。用酒精喷灯把该试管口下1/3处拉细到4~6 mm,抽真空10 min后封管。处理过的试管置110℃恒温烘箱中水解22 h,后移出,冷至室温,摇匀过滤,取1 mL滤液于50 mL烧杯中,用60℃恒温水浴蒸干滤液,加入盐酸稀释6倍,用0.45 μm滤膜过滤上机。采用日立L-8800氨基

酸自动分析仪测定。

1.4 数据处理和统计分析

实验数据用 EXCEL (2007) 进行常规计算后, 用 SPSS 19.0 软件进行统计分析。各参数均使用单因素方差分析 (One-way ANOVA), 若有差异显著以 LSD 法进行多重比较。所有统计值以平均值 \pm 标准误 (mean \pm SE), 显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 延迟首次投喂对胭脂鱼仔鱼脂类含量的影响

随首次延迟投喂时间的增加, 胭脂鱼仔鱼鱼体的脂类含量 (占湿重百分比) 呈显著下降趋势 ($P < 0.05$) (图 1)。延迟投喂 1、3 和 5 d 组仔鱼, 鱼体的脂肪含量分别比对照组 (D0) 下降了 6.64%、24.45% 和 34.89%; 在延迟 11 d 时, 仔鱼的脂肪含量仅有对照组的 52.93%。在恢复 1 期 (19 日龄时), 仔鱼各处理组脂肪含量均有所回升, 且随着延迟投喂时间的延长呈现明显的 3 个阶段: 延迟 1 d 组仔鱼脂肪含量与对照组相比, 无显著性差异; 延迟 3 和 5 d 组仔鱼的脂肪含量显著低于延迟 1 d 组和对照组 ($P < 0.05$); 而延迟 7、9 和 11 d 组仔鱼的脂肪含量又显著低于延迟 3 和 5 d 组仔鱼 ($P < 0.05$) (图 1)。在实验结束时 (恢复 2 期, 29 日龄时), 各处理组仔鱼的脂肪含量与对照组相比, 均无显著性差异, 表现出完全补偿效应 (图 1)。

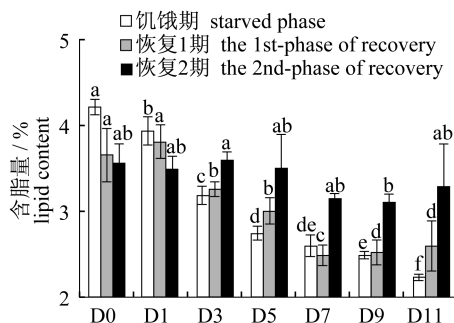


图 1 延迟首次投喂对胭脂鱼仔鱼含脂量的影响 (平均值 \pm 标准误)

相同颜色柱形图上标字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

Fig. 1 The change of lipids of *M. asiaticus* larvae with different delayed first feeding time (mean \pm SE)

Same color bars without a common letter indicate a significant difference ($P < 0.05$)

2.2 延迟首次投喂对胭脂鱼仔鱼的脂肪酸组成和含量的影响

随首次延迟投喂时间的增加, 可检测出的脂肪酸种类明显减少 ($P < 0.05$) (表 1)。如 D0 组可检出脂肪酸 27 种, 其中饱和脂肪酸 (saturated fatty acid, SFA) 9 种, 单不饱和脂肪酸 (monounsaturated fatty acid, MUFA) 8 种, 多不饱和脂肪酸 (polyunsaturated fatty acid, PUFA) 10 种; 然而, 随延迟时间的增加, D11 组仅能检测出脂肪酸 11 种, 降幅达 59.26%, 其中 SFA 有 3 种, MUFA 有 4 种, PUFA 有 4 种 (表 1)。随首次延迟投喂时间的增加, 单不饱和脂肪酸总含量 (Σ MUFA) 持续下降, 从 D0 (17.23% \pm 0.26%) 到 D11 (12.17% \pm 0.35%), 降幅为 29.37% ($P < 0.05$); 多不饱和脂肪酸总含量 (Σ PUFA) 则从 D0 到 D3 显著上升后维持稳定; n-3 系列多不饱和脂肪酸总含量与 n-6 系列多不饱和脂肪酸总含量的比值 (n-3/n-6) 呈显著上升趋势 ($P < 0.05$)。将 C22:6n-3 (DHA) 和 C20:4n-6 (ARA) 与仔鱼体质量和含水率分别做线性相关分析显示, DHA 和 ARA 的百分含量与仔鱼体质量呈极显著的负相关, 与含水率呈显著的正相关 ($P < 0.05$)。

2.3 恢复投喂阶段胭脂鱼仔鱼脂肪酸组成和含量的变化

在恢复 1 期 (19 日龄时), 随延迟首次投喂处理时间的不同, 脂肪酸的组成和含量也存在明显差异 (表 2)。与延迟投喂期相比, 虽可检测的脂肪酸种类有所恢复, 如 D7 组可检测出的脂肪酸从 16 种上升到 19 种, 但 D9 和 D11 组仔鱼的脂肪酸种类并没有增加。在恢复 1 期时, 胭脂鱼仔鱼鱼体中各脂肪酸的含量变化如下, C16:0、C18:0、C20:4n-6 (ARA)、C24:0 和 C22:6n-3 (DHA) 随饥饿胁迫时间的增加呈显著上升趋势 ($P < 0.05$), 而 C18:1n-9t、C18:1n-9c、C18:2n-6c、C18:3n-6、C21:0、C20:3n-3 和 C20:5n-3 (EPA) 则随饥饿胁迫时间的增加显著下降 ($P < 0.05$) (表 2)。 Σ SFA 除 D11 组仔鱼显著高于对照组外 ($P < 0.05$), Σ MUFA 和 Σ PUFA 除 D7、D9 和 D11 组仔鱼与对照组存在显著差异外 ($P < 0.05$), 其余各处理组均恢复至对照组 (D0) 水平。但饥饿较长时间的仔鱼, 如 D7、D9 和 D11 组中的一些重要的脂肪酸 (DHA、EPA 和 ARA) 均未恢复至对照组水平 ($P < 0.05$) (表 2)。在恢复 2 期

(29日龄时),除了D9和D11组仔鱼中的C16:1、C18:0、C18:2n-6c、C18:3n-6、C20:3n-3、C21:0、C20:4n-6(ARA)、C23:0和C20:5n-3(EPA)与对照组(D0组)相比存在显著性差异外($P < 0.05$),其余各脂肪酸均恢复至对照组水平(表3)。

表1 延迟首次投喂对胭脂鱼仔鱼脂肪酸组成和含量的影响(平均值±标准误)
Tab.1 The effect of different delayed first feeding time on fatty acid composition and content of *M. asiaticus* larvae (mean ± SE)

脂肪酸组成 composition of fatty acids	脂肪酸含量(干重) contents of fatty acids(dry weight)							%
	D0	D1	D3	D5	D7	D9	D11	
C14:0	1.15 ± 0.02 ^a	1.17 ± 0.04 ^a	1.01 ± 0.01 ^b	0.85 ± 0.02 ^c	0.72 ± 0.03 ^d	—	—	
C14:1	0.35 ± 0.02 ^a	0.32 ± 0.01 ^b	0.28 ± 0.01 ^c	0.24 ± 0.00 ^d	—	—	—	
C15:0	0.40 ± 0.01 ^a	0.39 ± 0.00 ^a	0.39 ± 0.00 ^a	0.35 ± 0.01 ^b	—	—	—	
C15:1	0.57 ± 0.01 ^a	0.55 ± 0.02 ^{ab}	0.52 ± 0.02 ^b	0.45 ± 0.01 ^c	—	—	—	
C16:0	18.20 ± 0.13 ^d	18.73 ± 0.12 ^{cd}	19.38 ± 0.08 ^{bc}	19.40 ± 0.33 ^{bc}	20.24 ± 0.40 ^{ab}	20.33 ± 1.03 ^{ab}	20.68 ± 1.35 ^a	
C16:1	5.25 ± 0.11 ^a	5.05 ± 0.08 ^b	4.28 ± 0.04 ^c	3.49 ± 0.06 ^d	2.76 ± 0.10 ^e	2.27 ± 0.14 ^f	1.99 ± 0.15 ^g	
C17:0	0.79 ± 0.02 ^b	0.80 ± 0.01 ^b	0.79 ± 0.03 ^b	0.74 ± 0.04 ^b	0.99 ± 0.66 ^a	—	—	
C17:1	0.44 ± 0.02 ^a	0.42 ± 0.01 ^b	0.40 ± 0.01 ^{bc}	0.38 ± 0.00 ^c	—	—	—	
C18:0	10.60 ± 0.09 ^d	10.90 ± 0.23 ^{cd}	10.88 ± 0.07 ^{cd}	11.27 ± 0.19 ^c	12.01 ± 0.28 ^b	12.39 ± 0.27 ^b	13.37 ± 0.84 ^a	
C18:1n-9t	8.49 ± 0.14 ^a	8.43 ± 0.12 ^{ab}	8.01 ± 0.13 ^{bc}	7.82 ± 0.19 ^c	7.51 ± 0.09 ^d	7.70 ± 0.13 ^{cd}	8.20 ± 0.28 ^b	
C18:1n-9c	0.58 ± 0.01	0.57 ± 0.02	0.54 ± 0.01	0.51 ± 0.06	0.55 ± 0.05	0.53 ± 0.08	0.51 ± 0.12	
C18:2n-6t	4.24 ± 0.08 ^a	4.28 ± 0.06 ^a	4.01 ± 0.03 ^b	3.38 ± 0.26 ^c	1.69 ± 0.04 ^d	1.33 ± 0.01 ^e	—	
C18:2n-6c	2.87 ± 0.04 ^a	2.82 ± 0.04 ^a	2.48 ± 0.07 ^b	2.13 ± 0.03 ^c	1.74 ± 0.06 ^d	1.45 ± 0.02 ^e	—	
C18:3n-6	0.37 ± 0.01 ^{bc}	0.37 ± 0.01 ^c	0.38 ± 0.00 ^b	0.41 ± 0.01 ^a	—	—	—	
C18:3n-3	0.35 ± 0.01 ^{ab}	0.37 ± 0.04 ^a	0.37 ± 0.04 ^a	0.30 ± 0.00 ^b	—	—	—	
C20:1n-9	0.80 ± 0.01 ^a	0.76 ± 0.04 ^a	0.64 ± 0.03 ^b	0.60 ± 0.04 ^b	—	—	—	
C20:0	0.20 ± 0.01 ^a	0.19 ± 0.01 ^{ab}	0.19 ± 0.01 ^{ab}	0.19 ± 0.00 ^b	—	—	—	
C21:0	0.35 ± 0.01 ^{ab}	0.37 ± 0.04 ^a	0.37 ± 0.04 ^a	0.30 ± 0.00 ^b	—	—	—	
C20:2	1.34 ± 0.01 ^a	1.38 ± 0.02 ^a	1.35 ± 0.01 ^a	1.26 ± 0.03 ^b	1.16 ± 0.02 ^c	1.18 ± 0.03 ^c	—	
C22:0	0.39 ± 0.00 ^b	0.41 ± 0.00 ^a	0.40 ± 0.01 ^{ab}	0.36 ± 0.01 ^c	—	—	—	
C20:3n-3	3.67 ± 0.04 ^a	3.74 ± 0.03 ^a	3.52 ± 0.06 ^b	3.29 ± 0.04 ^c	2.94 ± 0.06 ^d	2.71 ± 0.01 ^e	2.54 ± 0.06 ^f	
C20:4n-6(ARA)	7.74 ± 0.01 ^d	8.29 ± 0.17 ^d	8.75 ± 0.06 ^{cd}	9.17 ± 0.13 ^c	9.94 ± 0.12 ^{bc}	10.47 ± 0.02 ^b	11.59 ± 1.20 ^a	
C20:3n-6	0.28 ± 0.01	—	—	0.42 ± 0.00	—	—	—	
C20:5n-3(EPA)	5.58 ± 0.06 ^b	5.57 ± 0.04 ^b	5.67 ± 0.04 ^{ab}	5.78 ± 0.07 ^a	5.55 ± 0.07 ^b	5.55 ± 0.07 ^b	5.19 ± 0.10 ^c	
C24:0	0.49 ± 0.01 ^d	0.56 ± 0.02 ^d	0.64 ± 0.00 ^{cd}	0.70 ± 0.00 ^c	0.91 ± 0.08 ^b	1.26 ± 0.16 ^a	1.35 ± 0.05 ^a	
C24:1	0.75 ± 0.01 ^c	0.82 ± 0.03 ^c	0.79 ± 0.02 ^c	0.77 ± 0.00 ^c	0.78 ± 0.02 ^c	1.27 ± 0.09 ^b	1.47 ± 0.06 ^a	
C22:6n-3(DHA)	23.54 ± 0.42 ^e	23.09 ± 0.32 ^e	25.79 ± 1.11 ^d	28.06 ± 0.89 ^c	29.25 ± 0.44 ^{bc}	30.47 ± 0.93 ^b	33.21 ± 2.01 ^a	
Σ SFA	32.57 ± 0.16 ^c	33.52 ± 0.25 ^{bc}	34.04 ± 0.18 ^{abc}	34.17 ± 0.51 ^{abc}	34.88 ± 0.66 ^{ab}	33.97 ± 1.42 ^{abc}	35.40 ± 2.24 ^a	
Σ MUFA	17.23 ± 0.26 ^a	16.92 ± 0.24 ^a	15.46 ± 0.13 ^b	14.26 ± 0.22 ^c	11.61 ± 0.07 ^e	11.76 ± 0.37 ^{de}	12.17 ± 0.35 ^d	
Σ PUFA	50.26 ± 0.26 ^c	50.12 ± 0.30 ^{bc}	52.50 ± 0.91 ^a	54.29 ± 0.39 ^a	52.27 ± 0.63 ^{ab}	53.16 ± 1.00 ^a	52.54 ± 2.79 ^a	
Σ n-3 PUFA	33.42 ± 0.35 ^d	32.99 ± 0.26 ^d	35.53 ± 1.01 ^c	37.53 ± 0.83 ^b	37.74 ± 0.50 ^b	38.73 ± 0.98 ^b	40.94 ± 1.93 ^a	
Σ n-6 PUFA	15.50 ± 0.11 ^a	15.75 ± 0.22 ^a	15.62 ± 0.12 ^a	15.50 ± 0.42 ^a	13.37 ± 0.13 ^b	13.26 ± 0.02 ^b	11.59 ± 1.20 ^c	
n-3/n-6(%)	2.16 ± 0.04 ^d	2.09 ± 0.04 ^d	2.28 ± 0.08 ^{cd}	2.42 ± 0.12 ^c	2.82 ± 0.01 ^b	2.92 ± 0.07 ^b	3.55 ± 0.29 ^a	

注:Σ SFA为饱和脂肪酸总量,Σ MUFA为单不饱和脂肪酸总量,Σ PUFA为多不饱和脂肪酸总量,ARA为二十碳四烯酸,EPA为二十碳五烯酸,DHA为二十二碳六烯酸。上标字母不同的同一行数值差异显著($P < 0.05$),下同

Notes:Σ SFA is total saturated fatty acids(SFA),Σ MUFA is total monounsaturated fatty acids(MUFA),Σ PUFA is total polyunsaturated fatty acids(PUFA),ARA is arachidonic acid,EPA is eicosapentaenoic acid,DHA is docosahexaenoic acid. Values in each row without a common lowercase letter are significantly different($P < 0.05$),the same as the following

表 2 延迟首次投喂后(19日龄)胭脂鱼仔鱼脂肪酸组成和含量的变化(平均值±标准误)

Tab. 2 The change of fatty acid composition and content of *M. asiaticus* larvae with different delayed first feeding time (19 days old) (mean ± SE)

脂肪酸组成 composition of fatty acids	脂肪酸含量(干重) contents of fatty acids(dry weight)							%
	D0	D1	D3	D5	D7	D9	D11	
C14:0	0.78 ± 0.02 ^b	0.82 ± 0.02 ^a	0.81 ± 0.01 ^{ab}	0.79 ± 0.02 ^{ab}	0.72 ± 0.02 ^c	—	—	
C16:0	16.84 ± 0.34 ^d	17.78 ± 0.35 ^c	17.70 ± 0.18 ^c	17.40 ± 0.20 ^{cd}	17.31 ± 0.21 ^{cd}	19.47 ± 0.96 ^b	21.29 ± 0.32 ^a	
C16:1	2.16 ± 0.06 ^a	2.20 ± 0.06 ^a	2.17 ± 0.02 ^a	2.08 ± 0.08 ^{ab}	1.88 ± 0.06 ^c	2.00 ± 0.14 ^{bc}	1.91 ± 0.03 ^c	
C17:0	0.83 ± 0.00 ^a	0.83 ± 0.01 ^a	0.82 ± 0.00 ^a	0.78 ± 0.00 ^b	0.76 ± 0.01 ^c	—	—	
C18:0	9.40 ± 0.18 ^d	9.78 ± 0.23 ^{cd}	9.72 ± 0.12 ^d	9.54 ± 0.10 ^d	10.17 ± 0.22 ^c	11.64 ± 0.62 ^b	13.18 ± 0.14 ^a	
C18:1n-9t	15.36 ± 0.30 ^a	15.00 ± 0.26 ^a	14.87 ± 0.13 ^a	14.86 ± 0.28 ^a	13.92 ± 0.42 ^b	13.63 ± 0.56 ^b	12.68 ± 0.19 ^c	
C18:1n-9c	4.21 ± 0.03 ^a	4.20 ± 0.07 ^a	4.16 ± 0.01 ^a	4.12 ± 0.05 ^{ab}	3.98 ± 0.07 ^{bc}	4.10 ± 0.16 ^{ab}	3.86 ± 0.11 ^c	
C18:2n-6t	0.53 ± 0.07	—	—	—	—	—	—	
C18:2n-6c	5.37 ± 0.08 ^a	5.23 ± 0.13 ^a	5.19 ± 0.03 ^{ab}	5.20 ± 0.06 ^{ab}	4.97 ± 0.19 ^b	4.73 ± 0.16 ^c	3.80 ± 0.20 ^d	
C18:3n-6	1.72 ± 0.03 ^a	1.69 ± 0.02 ^{ab}	1.66 ± 0.07 ^{ab}	1.63 ± 0.04 ^b	1.39 ± 0.02 ^c	—	—	
C18:3n-3	11.78 ± 0.52 ^a	11.51 ± 0.32 ^a	11.50 ± 0.12 ^a	11.68 ± 0.17 ^a	11.36 ± 0.67 ^a	10.87 ± 0.30 ^a	8.15 ± 1.07 ^b	
C20:1n-9	0.71 ± 0.02 ^a	0.63 ± 0.01 ^b	0.64 ± 0.01 ^b	0.63 ± 0.01 ^b	—	—	—	
C21:0	5.16 ± 0.30 ^a	5.13 ± 0.11 ^a	5.02 ± 0.35 ^a	5.02 ± 0.15 ^a	4.24 ± 0.23 ^b	3.74 ± 0.11 ^c	2.37 ± 0.21 ^d	
C20:2	0.62 ± 0.01 ^b	0.62 ± 0.00 ^b	0.64 ± 0.02 ^b	0.63 ± 0.01 ^b	0.74 ± 0.02 ^a	—	—	
C20:3n-3	2.07 ± 0.10 ^a	2.03 ± 0.01 ^a	2.00 ± 0.01 ^a	1.89 ± 0.03 ^b	1.82 ± 0.05 ^b	1.87 ± 0.04 ^b	—	
C20:4n-6(ARA)	3.23 ± 0.13 ^d	3.16 ± 0.17 ^d	3.43 ± 0.25 ^d	3.43 ± 0.14 ^d	4.66 ± 0.37 ^c	6.23 ± 0.14 ^b	8.08 ± 0.26 ^a	
C20:3n-6	0.90 ± 0.05 ^a	0.86 ± 0.05 ^{ab}	0.85 ± 0.04 ^{ab}	0.83 ± 0.01 ^{bc}	0.77 ± 0.02 ^c	—	—	
C23:0	1.79 ± 0.08 ^a	1.66 ± 0.02 ^b	1.68 ± 0.04 ^{ab}	1.75 ± 0.04 ^{ab}	1.67 ± 0.09 ^b	—	—	
C20:5n-3(EPA)	7.00 ± 0.22 ^a	6.78 ± 0.39 ^{ab}	6.60 ± 0.31 ^{ab}	6.48 ± 0.08 ^b	5.05 ± 0.16 ^c	4.30 ± 0.04 ^d	—	
C24:0	0.76 ± 0.08 ^{cd}	0.66 ± 0.02 ^d	0.68 ± 0.05 ^{cd}	0.69 ± 0.04 ^{cd}	0.78 ± 0.04 ^c	0.92 ± 0.05 ^b	1.13 ± 0.10 ^a	
C22:6n-3(DHA)	9.30 ± 0.52 ^c	9.70 ± 0.37 ^{dc}	10.50 ± 0.31 ^d	10.25 ± 0.31 ^{dc}	13.90 ± 1.03 ^c	18.56 ± 0.54 ^b	23.53 ± 1.05 ^a	
Σ SFA	35.56 ± 0.33 ^b	36.65 ± 0.70 ^b	36.42 ± 0.55 ^b	35.96 ± 0.19 ^b	35.63 ± 0.39 ^b	35.77 ± 1.66 ^b	37.98 ± 0.36 ^a	
Σ MUFA	22.43 ± 0.41 ^a	22.03 ± 0.38 ^a	21.84 ± 0.16 ^a	21.69 ± 0.40 ^a	19.78 ± 0.50 ^b	19.73 ± 0.86 ^b	18.45 ± 0.25 ^b	
Σ PUFA	42.52 ± 0.38 ^c	41.58 ± 0.46 ^c	42.38 ± 0.11 ^c	42.01 ± 0.32 ^c	44.66 ± 0.87 ^b	46.56 ± 1.05 ^a	47.20 ± 0.86 ^a	
Σ n-3 PUFA	30.14 ± 0.33 ^c	30.01 ± 0.45 ^c	30.60 ± 0.12 ^c	30.30 ± 0.29 ^c	32.12 ± 0.62 ^b	35.60 ± 0.78 ^a	35.32 ± 1.03 ^a	
Σ n-6 PUFA	11.76 ± 0.16 ^a	10.94 ± 0.22 ^b	11.13 ± 0.15 ^b	11.08 ± 0.10 ^b	11.80 ± 0.23 ^a	10.96 ± 0.28 ^b	11.88 ± 0.18 ^a	
n-3/n-6(%)	2.56 ± 0.04 ^d	2.74 ± 0.07 ^c	2.75 ± 0.05 ^c	2.73 ± 0.03 ^c	2.72 ± 0.00 ^c	3.25 ± 0.03 ^a	2.97 ± 0.13 ^b	

表 3 延迟首次投喂后(29日龄)胭脂鱼仔鱼脂肪酸组成和含量的变化(平均值±标准误)

Tab. 3 The change of fatty acid composition and content of *M. asiaticus* larvae with different delayed first feeding time (29 days old) (mean ± SE)

脂肪酸组成 composition of fatty acids	脂肪酸含量(干重) contents of fatty acids(dry weight)							%
	D0	D1	D3	D5	D7	D9	D11	
C14:0	1.04 ± 0.02 ^a	1.04 ± 0.03 ^a	1.02 ± 0.03 ^a	1.05 ± 0.01 ^a	1.03 ± 0.04 ^a	1.03 ± 0.03 ^a	0.96 ± 0.03 ^b	
C14:1	0.47 ± 0.00 ^{ab}	0.47 ± 0.00 ^{ab}	0.46 ± 0.01 ^b	0.47 ± 0.00 ^{ab}	0.47 ± 0.00 ^a	—	—	
C16:0	18.04 ± 0.11 ^b	17.77 ± 0.01 ^b	17.80 ± 0.18 ^b	17.93 ± 0.06 ^b	17.95 ± 0.53 ^b	18.49 ± 0.12 ^a	17.72 ± 0.21 ^b	
C16:1	2.93 ± 0.02 ^a	3.03 ± 0.15 ^a	2.87 ± 0.15 ^a	2.89 ± 0.06 ^a	2.59 ± 0.02 ^b	2.37 ± 0.09 ^c	2.25 ± 0.10 ^c	
C17:0	0.74 ± 0.02 ^a	0.72 ± 0.00 ^{ab}	0.71 ± 0.01 ^b	0.71 ± 0.01 ^b	0.70 ± 0.01 ^b	0.70 ± 0.01 ^b	0.71 ± 0.01 ^b	
C17:1	—	0.42 ± 0.00	0.42 ± 0.00	0.42 ± 0.02	0.42 ± 0.00	—	—	

续表 3

脂肪酸组成 composition of fatty acids	脂肪酸含量(干重) contents of fatty acids(dry weight)						
	D0	D1	D3	D5	D7	D9	D11
C18:0	8.02 ± 0.07 ^{bc}	7.73 ± 0.16 ^c	7.90 ± 0.13 ^{bc}	7.78 ± 0.01 ^c	8.13 ± 0.41 ^{bc}	8.62 ± 0.23 ^a	8.53 ± 0.11 ^a
C18:1n-9t	16.83 ± 0.07 ^a	16.64 ± 0.13 ^{ab}	16.37 ± 0.09 ^{bc}	16.44 ± 0.12 ^{bc}	16.49 ± 0.35 ^{ab}	16.65 ± 0.16 ^{ab}	16.15 ± 0.27 ^{bc}
C18:1n-9c	3.94 ± 0.01 ^a	3.85 ± 0.01 ^{bc}	3.84 ± 0.03 ^{bc}	3.83 ± 0.02 ^c	3.87 ± 0.10 ^{abc}	3.92 ± 0.02 ^{abc}	3.81 ± 0.06 ^c
C18:2n-6t	0.61 ± 0.01 ^b	0.61 ± 0.01 ^b	0.61 ± 0.00 ^a	0.64 ± 0.01 ^a	0.64 ± 0.01 ^a	—	0.63 ± 0.01 ^a
C18:2n-6c	5.68 ± 0.03 ^b	5.57 ± 0.03 ^{bc}	5.54 ± 0.09 ^c	5.50 ± 0.05 ^c	5.61 ± 0.09 ^{bc}	5.89 ± 0.01 ^a	5.82 ± 0.13 ^a
C18:3n-6	1.78 ± 0.01 ^c	1.78 ± 0.02 ^c	1.80 ± 0.02 ^c	1.86 ± 0.03 ^b	1.91 ± 0.05 ^a	1.94 ± 0.04 ^a	1.94 ± 0.01 ^a
C18:3n-3	13.50 ± 0.06 ^a	13.44 ± 0.26 ^{ab}	13.08 ± 0.46 ^{abc}	12.80 ± 0.28 ^c	12.89 ± 0.17 ^{bc}	13.43 ± 0.21 ^{ab}	13.39 ± 0.53 ^{ab}
C20:1n-9	0.61 ± 0.00	0.61 ± 0.01	0.60 ± 0.01	0.59 ± 0.01	0.61 ± 0.00	—	0.60 ± 0.02
C21:0	5.53 ± 0.03 ^e	5.64 ± 0.15 ^{cde}	5.57 ± 0.09 ^{de}	5.74 ± 0.06 ^{cde}	5.81 ± 0.12 ^{bc}	5.93 ± 0.12 ^b	6.13 ± 0.14 ^a
C20:2	—	0.43 ± 0.02 ^b	0.45 ± 0.00 ^a	0.43 ± 0.00 ^b	0.45 ± 0.00 ^{ab}	—	—
C20:3n-3	1.91 ± 0.01 ^a	1.85 ± 0.02 ^c	1.86 ± 0.02 ^{bc}	1.88 ± 0.01 ^{abc}	1.89 ± 0.06 ^{ab}	1.85 ± 0.02 ^c	1.76 ± 0.00 ^d
C20:4n-6(ARA)	1.37 ± 0.04 ^d	1.35 ± 0.03 ^d	1.49 ± 0.05 ^{bc}	1.39 ± 0.03 ^{cd}	1.57 ± 0.07 ^{bc}	1.78 ± 0.10 ^a	1.75 ± 0.11 ^a
C20:3n-6	0.93 ± 0.00 ^a	0.94 ± 0.04 ^a	0.91 ± 0.01 ^{ab}	0.90 ± 0.01 ^b	0.90 ± 0.00 ^b	0.89 ± 0.00 ^b	0.91 ± 0.02 ^{ab}
C23:0	2.22 ± 0.02 ^b	2.13 ± 0.03 ^c	2.08 ± 0.04 ^c	2.12 ± 0.03 ^c	2.24 ± 0.02 ^b	2.35 ± 0.06 ^a	2.34 ± 0.04 ^a
C20:5n-3(EPA)	7.58 ± 0.03 ^c	7.55 ± 0.12 ^c	7.67 ± 0.32 ^{bc}	8.21 ± 0.29 ^a	8.36 ± 0.27 ^a	8.06 ± 0.16 ^{ab}	8.08 ± 0.36 ^{ab}
C24:0	0.54 ± 0.00 ^d	0.56 ± 0.02 ^{cd}	0.58 ± 0.02 ^{bc}	0.58 ± 0.01 ^{bc}	0.61 ± 0.02 ^{ab}	0.65 ± 0.04 ^a	0.63 ± 0.02 ^a
C22:6n-3(DHA)	5.88 ± 0.06	5.94 ± 0.33	6.25 ± 0.24	5.87 ± 0.24	5.97 ± 0.14	5.92 ± 0.31	6.09 ± 0.33
Σ SFA	36.14 ± 0.18 ^{cd}	35.59 ± 0.09 ^d	35.66 ± 0.12 ^d	35.90 ± 0.01 ^{cd}	36.46 ± 1.04 ^{bc}	37.77 ± 0.27 ^a	37.01 ± 0.17 ^b
Σ MUFA	24.31 ± 0.11 ^{ab}	24.54 ± 0.29 ^a	24.10 ± 0.16 ^{ab}	24.17 ± 0.18 ^{ab}	23.97 ± 0.46 ^b	22.94 ± 0.20 ^c	22.82 ± 0.43 ^c
Σ PUFA	39.23 ± 0.04 ^c	39.46 ± 0.19 ^{bc}	39.65 ± 0.30 ^b	39.47 ± 0.20 ^{bc}	40.19 ± 0.40 ^a	39.75 ± 0.22 ^b	40.38 ± 0.07 ^a
Σ n-3 PUFA	28.86 ± 0.04 ^{bc}	28.77 ± 0.13 ^c	28.86 ± 0.25 ^{bc}	28.76 ± 0.22 ^c	29.11 ± 0.28 ^{ab}	29.26 ± 0.12 ^a	29.32 ± 0.15 ^a
Σ n-6 PUFA	10.37 ± 0.03 ^{cd}	10.26 ± 0.05 ^d	10.34 ± 0.07 ^{cd}	10.28 ± 0.04 ^d	10.63 ± 0.19 ^b	10.50 ± 0.10 ^{bc}	11.06 ± 0.11 ^a
n-3/n-6(%)	2.78 ± 0.01 ^{ab}	2.80 ± 0.01 ^a	2.79 ± 0.02 ^a	2.80 ± 0.03 ^a	2.74 ± 0.05 ^b	2.79 ± 0.02 ^a	2.65 ± 0.04 ^c

2.4 延迟首次投喂对胭脂鱼仔鱼的氨基酸组成和含量的影响

D0组主要氨基酸为天冬氨酸、谷氨酸、丙氨酸、亮氨酸、精氨酸和脯氨酸(表4)。随延迟首次投喂时间的增加,胭脂鱼仔鱼的丙氨酸、异亮氨酸、亮氨酸和组氨酸显著下降($P < 0.05$);天冬氨酸和谷氨酸显著上升($P < 0.05$);而甘氨酸、赖氨酸和精氨酸则呈先上升后下降的趋势。然而,必需氨基酸总含量(Σ EAA)从D1(23.65% ± 0.12%)至D7(26.65% ± 0.18%)显著上升后,急剧下降并维持稳定($P < 0.05$)。必需氨基酸总含量与非必需氨基酸总含量的比值(Σ EAA/ Σ NEAA)除了D1和D3组仔鱼的与对照组无显著差异外,D5、D7、D9和D11组均显著低于对照组水平($P < 0.05$)(表4)。

2.5 恢复投喂阶段胭脂鱼仔鱼的氨基酸组成和含量变化

在恢复1期(19日龄时),必需氨基酸中的缬氨酸、蛋氨酸、赖氨酸和组氨酸随延迟首次投喂时间的增加显著下降($P < 0.05$);非必需氨基酸中的天冬氨酸、谷氨酸、丙氨酸和脯氨酸也呈下降趋势($P < 0.05$);而必需氨基酸总含量与氨基酸总含量的比值(Σ EAA/ Σ AA)却无显著变化(表5)。在实验结束时,恢复2期(29日龄时),必需氨基酸中的苏氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸和组氨酸均明显下降,非必需氨基酸中的天冬氨酸、丝氨酸和丙氨酸显著下降,而脯氨酸的含量显著升高($P < 0.05$)(表6)。在两个恢复期结束时,胭脂鱼仔鱼的氨基酸总含量、必

需氨基酸总含量和非必需氨基酸总含量均随延迟投喂处理时间的增加呈显著下降趋势 ($P < 0.05$) (表 5, 表 6)。

表 4 延迟首次投喂对胭脂鱼仔鱼氨基酸组成和含量的影响 (平均值 \pm 标准误)
Tab. 4 The effect of different delayed first feeding time on amino acids composition and content of *M. asiaticus* (mean \pm SE)

氨基酸组成 composition of amino acids	氨基酸含量(干重) contents of amino acids(dry weight)						
	D0	D1	D3	D5	D7	D9	D11
天门冬氨酸 Asp	4.33 \pm 0.01 ^e	3.84 \pm 0.04 ^s	4.01 \pm 0.05 ^f	4.66 \pm 0.01 ^d	5.52 \pm 0.04 ^a	5.01 \pm 0.02 ^c	5.25 \pm 0.03 ^b
苏氨酸 * Thr	2.49 \pm 0.07 ^a	2.15 \pm 0.01 ^d	2.30 \pm 0.06 ^c	2.44 \pm 0.01 ^{ab}	2.43 \pm 0.00 ^{ab}	2.37 \pm 0.02 ^{bc}	2.21 \pm 0.06 ^d
丝氨酸 Ser	2.02 \pm 0.07 ^b	1.80 \pm 0.03 ^c	2.02 \pm 0.11 ^b	2.15 \pm 0.05 ^a	2.00 \pm 0.05 ^b	2.02 \pm 0.11 ^b	1.77 \pm 0.02 ^c
谷氨酸 Glu	7.13 \pm 0.10 ^e	6.15 \pm 0.02 ^e	6.50 \pm 0.00 ^d	7.25 \pm 0.03 ^c	8.16 \pm 0.04 ^a	7.53 \pm 0.22 ^b	7.27 \pm 0.06 ^c
甘氨酸 Gly	3.08 \pm 0.02 ^d	2.75 \pm 0.01 ^e	3.03 \pm 0.03 ^d	3.72 \pm 0.10 ^b	4.01 \pm 0.08 ^a	3.51 \pm 0.09 ^c	3.76 \pm 0.01 ^b
丙氨酸 Ala	4.05 \pm 0.04 ^a	3.20 \pm 0.04 ^d	3.52 \pm 0.06 ^c	3.67 \pm 0.04 ^b	3.95 \pm 0.03 ^a	3.39 \pm 0.07 ^c	3.73 \pm 0.01 ^b
半胱氨酸 Gys	0.74 \pm 0.02	0.73 \pm 0.02	0.73 \pm 0.02	0.75 \pm 0.01	0.75 \pm 0.02	0.78 \pm 0.01	0.75 \pm 0.04
缬氨酸 * Val	3.44 \pm 0.01 ^a	2.99 \pm 0.02 ^{cd}	3.02 \pm 0.02 ^c	3.21 \pm 0.04 ^b	3.27 \pm 0.04 ^b	2.89 \pm 0.04 ^d	3.08 \pm 0.06 ^c
蛋氨酸 * Met	1.45 \pm 0.01 ^c	1.34 \pm 0.00 ^d	1.51 \pm 0.00 ^b	1.57 \pm 0.03 ^a	1.60 \pm 0.02 ^a	1.46 \pm 0.02 ^c	1.59 \pm 0.02 ^a
异亮氨酸 * Ile	3.15 \pm 0.01 ^a	2.67 \pm 0.04 ^{de}	2.72 \pm 0.04 ^{cd}	2.77 \pm 0.02 ^c	2.96 \pm 0.02 ^b	2.57 \pm 0.04 ^f	2.59 \pm 0.03 ^{ef}
亮氨酸 * Leu	5.41 \pm 0.03 ^a	4.46 \pm 0.08 ^c	4.68 \pm 0.02 ^c	5.01 \pm 0.01 ^b	5.13 \pm 0.08 ^b	4.61 \pm 0.08 ^{cd}	4.76 \pm 0.02 ^c
酪氨酸 Tyr	2.13 \pm 0.03 ^a	1.92 \pm 0.02 ^c	1.99 \pm 0.05 ^{bc}	2.07 \pm 0.02 ^{ab}	2.10 \pm 0.02 ^a	2.05 \pm 0.02 ^{ab}	2.00 \pm 0.03 ^{bc}
苯丙氨酸 * Phe	2.67 \pm 0.01 ^{ab}	2.60 \pm 0.01 ^{bc}	2.59 \pm 0.04 ^c	2.62 \pm 0.01 ^{bc}	2.70 \pm 0.02 ^a	2.50 \pm 0.03 ^d	2.73 \pm 0.04 ^a
赖氨酸 * Lys	2.85 \pm 0.01 ^b	2.55 \pm 0.02 ^c	2.85 \pm 0.06 ^b	2.99 \pm 0.04 ^a	3.02 \pm 0.03 ^a	2.88 \pm 0.02 ^b	2.81 \pm 0.04 ^b
组氨酸 * His	1.76 \pm 0.01 ^a	1.68 \pm 0.01 ^b	1.75 \pm 0.02 ^a	1.61 \pm 0.01 ^c	1.43 \pm 0.02 ^d	1.33 \pm 0.00 ^e	1.36 \pm 0.01 ^e
精氨酸 * Arg	3.83 \pm 0.01 ^b	3.21 \pm 0.04 ^d	3.65 \pm 0.03 ^c	4.10 \pm 0.05 ^a	4.11 \pm 0.01 ^a	3.72 \pm 0.03 ^{bc}	3.64 \pm 0.08 ^c
脯氨酸 Pro	4.41 \pm 0.02 ^a	4.19 \pm 0.03 ^d	4.05 \pm 0.01 ^e	4.24 \pm 0.03 ^{cd}	4.34 \pm 0.02 ^{abc}	4.30 \pm 0.03 ^{bc}	4.37 \pm 0.06 ^{ab}
Σ AA	54.93 \pm 0.17 ^b	48.22 \pm 0.25 ^e	50.90 \pm 0.32 ^d	54.84 \pm 0.18 ^b	57.49 \pm 0.27 ^a	52.93 \pm 0.40 ^c	53.66 \pm 0.20 ^c
Σ EAA	27.06 \pm 0.05 ^a	23.65 \pm 0.12 ^c	25.07 \pm 0.14 ^c	26.32 \pm 0.11 ^b	26.65 \pm 0.18 ^{ab}	24.34 \pm 0.23 ^d	24.76 \pm 0.04 ^c
Σ NEAA	27.87 \pm 0.12 ^c	24.58 \pm 0.13 ^e	25.84 \pm 0.19 ^d	28.52 \pm 0.07 ^b	30.84 \pm 0.12 ^a	28.59 \pm 0.22 ^b	28.90 \pm 0.17 ^{ab}
Σ EAA/ Σ AA (%)	0.49 \pm 0.01 ^a	0.49 \pm 0.03 ^a	0.49 \pm 0.01 ^a	0.48 \pm 0.03 ^b	0.46 \pm 0.02 ^c	0.46 \pm 0.01 ^d	0.46 \pm 0.05 ^{cd}
Σ EAA/ Σ NEAA (%)	0.97 \pm 0.00 ^a	0.96 \pm 0.03 ^a	0.97 \pm 0.02 ^a	0.92 \pm 0.04 ^b	0.86 \pm 0.09 ^c	0.85 \pm 0.01 ^d	0.86 \pm 0.09 ^{cd}

注: * 表示必需氨基酸, Σ AA 为氨基酸总含量, Σ EAA 为必需氨基酸总含量, Σ NEAA 为非必需氨基酸总含量, 下同

Notes: * indicates essential amino acid. Σ AA is total amino acids. Σ EAA is total essential amino acids. Σ NEAA is total nonessential amino acids, the same as the following

表 5 延迟首次投喂后(19 日龄)胭脂鱼仔鱼氨基酸组成和含量的变化(平均值 \pm 标准误)
Tab. 5 The change of amino acids composition and content of *M. asiaticus* larvae with different delayed first feeding time(19 days old) (mean \pm SE)

氨基酸组成 composition of amino acids	氨基酸含量(干重) contents of amino acids(dry weight)						
	D0	D1	D3	D5	D7	D9	D11
天门冬氨酸 Asp	5.04 \pm 0.02 ^a	4.88 \pm 0.03 ^b	4.85 \pm 0.01 ^b	4.81 \pm 0.01 ^{bc}	4.62 \pm 0.00 ^e	4.73 \pm 0.04 ^{cd}	4.66 \pm 0.03 ^{de}
苏氨酸 * Thr	2.40 \pm 0.01 ^a	2.42 \pm 0.01 ^a	2.38 \pm 0.00 ^{ab}	2.42 \pm 0.01 ^a	2.26 \pm 0.00 ^c	2.33 \pm 0.06 ^{bc}	2.31 \pm 0.02 ^{bc}
丝氨酸 Ser	2.05 \pm 0.01 ^b	2.09 \pm 0.03 ^b	2.05 \pm 0.01 ^b	2.19 \pm 0.02 ^a	1.94 \pm 0.02 ^c	2.18 \pm 0.01 ^a	2.06 \pm 0.02 ^b
谷氨酸 Glu	8.02 \pm 0.06 ^a	7.73 \pm 0.02 ^{bcd}	7.82 \pm 0.01 ^b	7.78 \pm 0.01 ^{bc}	7.47 \pm 0.01 ^e	7.64 \pm 0.11 ^{cd}	7.61 \pm 0.05 ^{de}
甘氨酸 Gly	3.47 \pm 0.01 ^a	3.21 \pm 0.02 ^{de}	3.32 \pm 0.03 ^b	3.24 \pm 0.01 ^{cd}	3.17 \pm 0.01 ^e	3.30 \pm 0.01 ^{bc}	3.26 \pm 0.03 ^{bcd}
丙氨酸 Ala	3.56 \pm 0.00 ^a	3.50 \pm 0.05 ^a	3.44 \pm 0.02 ^b	3.38 \pm 0.00 ^{bc}	3.25 \pm 0.03 ^d	3.32 \pm 0.01 ^{cd}	3.29 \pm 0.04 ^d
半胱氨酸 Gys	0.63 \pm 0.00 ^e	0.68 \pm 0.00 ^a	0.68 \pm 0.01 ^a	0.68 \pm 0.01 ^a	0.66 \pm 0.00 ^a	0.66 \pm 0.00 ^{ab}	0.64 \pm 0.01 ^{bc}
缬氨酸 * Val	2.78 \pm 0.01 ^a	2.70 \pm 0.02 ^{bc}	2.73 \pm 0.00 ^{ab}	2.68 \pm 0.00 ^{bcd}	2.64 \pm 0.01 ^d	2.67 \pm 0.02 ^{cd}	2.65 \pm 0.03 ^{cd}
蛋氨酸 * Met	1.36 \pm 0.01 ^a	1.35 \pm 0.01 ^a	1.35 \pm 0.01 ^a	1.34 \pm 0.01 ^a	1.29 \pm 0.01 ^b	1.27 \pm 0.01 ^b	1.28 \pm 0.04 ^b

续表 5

氨基酸组成 composition of amino acids	氨基酸含量(干重) contents of amino acids(dry weight)						
	D0	D1	D3	D5	D7	D9	D11
异亮氨酸 * Ile	2.57 ± 0.01 ^a	2.47 ± 0.01 ^b	2.55 ± 0.00 ^a	2.46 ± 0.02 ^{bc}	2.43 ± 0.00 ^{bc}	2.40 ± 0.02 ^c	2.40 ± 0.05 ^c
亮氨酸 * Leu	4.86 ± 0.01 ^a	4.58 ± 0.00 ^c	4.73 ± 0.01 ^b	4.61 ± 0.02 ^c	4.46 ± 0.01 ^{de}	4.54 ± 0.00 ^{cd}	4.45 ± 0.06 ^e
酪氨酸 Tyr	1.79 ± 0.02 ^a	1.78 ± 0.02 ^a	1.81 ± 0.00 ^a	1.77 ± 0.04 ^a	1.73 ± 0.00 ^{ab}	1.73 ± 0.03 ^{ab}	1.68 ± 0.03 ^{ab}
苯丙氨酸 * Phe	2.54 ± 0.02 ^a	2.49 ± 0.04 ^{ab}	2.54 ± 0.01 ^a	2.45 ± 0.02 ^{bc}	2.38 ± 0.02 ^c	2.46 ± 0.04 ^{abc}	2.41 ± 0.05 ^{bc}
赖氨酸 * Lys	2.87 ± 0.04 ^a	2.79 ± 0.02 ^b	2.77 ± 0.00 ^{bc}	2.74 ± 0.01 ^{bcd}	2.68 ± 0.02 ^d	2.73 ± 0.02 ^{bcd}	2.72 ± 0.02 ^{cd}
组氨酸 * His	1.79 ± 0.03 ^a	1.75 ± 0.00 ^a	1.61 ± 0.04 ^b	1.42 ± 0.03 ^d	1.59 ± 0.02 ^b	1.52 ± 0.02 ^c	1.53 ± 0.02 ^c
精氨酸 * Arg	3.81 ± 0.00 ^a	3.65 ± 0.02 ^{cd}	3.79 ± 0.02 ^{ab}	3.72 ± 0.05 ^{bc}	3.58 ± 0.04 ^d	3.72 ± 0.03 ^{bc}	3.67 ± 0.01 ^c
脯氨酸 Pro	1.56 ± 0.01 ^a	1.50 ± 0.01 ^b	1.47 ± 0.01 ^{bc}	1.44 ± 0.03 ^c	1.37 ± 0.01 ^d	1.33 ± 0.00 ^d	1.34 ± 0.02 ^d
∑ AA	51.11 ± 0.10 ^a	49.57 ± 0.13 ^{bc}	49.89 ± 0.01 ^b	49.10 ± 0.08 ^{cd}	47.53 ± 0.06 ^f	48.52 ± 0.33 ^{de}	47.97 ± 0.42 ^{ef}
∑ EAA	24.99 ± 0.07 ^a	24.19 ± 0.10 ^{bc}	24.45 ± 0.03 ^b	23.82 ± 0.06 ^{cd}	23.32 ± 0.02 ^e	23.64 ± 0.17 ^{de}	23.44 ± 0.24 ^e
∑ NEAA	26.13 ± 0.03 ^a	25.37 ± 0.05 ^b	25.44 ± 0.02 ^b	25.28 ± 0.04 ^b	24.21 ± 0.04 ^e	24.88 ± 0.16 ^c	24.54 ± 0.19 ^d
∑ EAA/∑ AA (%)	0.49 ± 0.01	0.49 ± 0.02	0.49 ± 0.00	0.49 ± 0.03	0.49 ± 0.04	0.49 ± 0.01	0.49 ± 0.01
∑ EAA/∑ NEAA (%)	0.96 ± 0.02 ^{abc}	0.95 ± 0.04 ^{bc}	0.96 ± 0.01 ^{ab}	0.94 ± 0.05 ^d	0.96 ± 0.05 ^a	0.95 ± 0.00 ^{cd}	0.96 ± 0.03 ^{abc}

表 6 延迟首次投喂后(29日龄)胭脂鱼仔鱼氨基酸组成和含量的变化(平均值 ± 标准误)

Tab.6 The change of amino acids composition and content of *M. asiaticus* larvae with different delayed first feeding time(19 days old) (mean ± SE)

氨基酸组成 composition of amino acids	氨基酸含量(干重) contents of amino acids(dry weight)						
	D0	D1	D3	D5	D7	D9	D11
天门冬氨酸 Asp	5.38 ± 0.01 ^a	5.25 ± 0.01 ^b	5.13 ± 0.01 ^c	4.99 ± 0.03 ^d	5.07 ± 0.02 ^c	4.85 ± 0.03 ^e	4.89 ± 0.01 ^e
苏氨酸 * Thr	2.53 ± 0.01 ^a	2.45 ± 0.02 ^b	2.52 ± 0.03 ^a	2.43 ± 0.02 ^{bc}	2.39 ± 0.01 ^{cd}	2.34 ± 0.02 ^d	2.37 ± 0.01 ^d
丝氨酸 Ser	2.39 ± 0.02 ^{ab}	2.39 ± 0.08 ^{ab}	2.44 ± 0.05 ^a	2.42 ± 0.00 ^a	2.20 ± 0.02 ^c	2.19 ± 0.05 ^c	2.27 ± 0.01 ^{bc}
谷氨酸 Glu	8.38 ± 0.05 ^a	8.20 ± 0.04 ^b	8.13 ± 0.04 ^{bc}	7.79 ± 0.03 ^d	8.02 ± 0.05 ^c	7.69 ± 0.03 ^d	7.78 ± 0.01 ^d
甘氨酸 Gly	3.48 ± 0.03 ^a	3.39 ± 0.03 ^b	3.34 ± 0.01 ^b	3.21 ± 0.02 ^c	3.41 ± 0.01 ^c	3.24 ± 0.04 ^c	3.40 ± 0.02 ^{ab}
丙氨酸 Ala	3.88 ± 0.02 ^a	3.70 ± 0.02 ^b	3.67 ± 0.01 ^b	3.38 ± 0.04 ^d	3.58 ± 0.02 ^c	3.36 ± 0.01 ^d	3.35 ± 0.02 ^d
半胱氨酸 Gys	0.79 ± 0.03	0.82 ± 0.01	0.82 ± 0.01	0.81 ± 0.01	0.82 ± 0.01	0.78 ± 0.01	0.81 ± 0.01
缬氨酸 * Val	3.18 ± 0.03 ^a	3.07 ± 0.02 ^b	3.04 ± 0.02 ^b	2.88 ± 0.06 ^c	3.01 ± 0.03 ^b	2.85 ± 0.03 ^c	2.83 ± 0.02 ^c
蛋氨酸 * Met	1.65 ± 0.01 ^a	1.54 ± 0.01 ^b	1.54 ± 0.00 ^b	1.44 ± 0.02 ^c	1.52 ± 0.00 ^b	1.37 ± 0.01 ^d	1.38 ± 0.02 ^d
异亮氨酸 * Ile	2.88 ± 0.01 ^a	2.73 ± 0.02 ^b	2.70 ± 0.01 ^b	2.56 ± 0.03 ^d	2.64 ± 0.02 ^c	2.46 ± 0.03 ^e	2.49 ± 0.02 ^e
亮氨酸 * Leu	5.11 ± 0.01 ^a	4.93 ± 0.01 ^b	4.90 ± 0.03 ^b	4.68 ± 0.03 ^d	4.80 ± 0.01 ^c	4.54 ± 0.02 ^e	4.48 ± 0.04 ^e
酪氨酸 Tyr	2.00 ± 0.05 ^a	1.94 ± 0.02 ^{ab}	1.98 ± 0.02 ^{ab}	1.91 ± 0.01 ^{bc}	2.02 ± 0.03 ^a	1.84 ± 0.03 ^c	1.90 ± 0.01 ^{bc}
苯丙氨酸 * Phe	2.59 ± 0.03 ^a	2.55 ± 0.00 ^{ab}	2.51 ± 0.02 ^b	2.42 ± 0.03 ^c	2.54 ± 0.00 ^{ab}	2.41 ± 0.02 ^c	2.40 ± 0.02 ^c
赖氨酸 * Lys	3.77 ± 0.03 ^a	3.69 ± 0.02 ^a	3.69 ± 0.01 ^a	3.51 ± 0.02 ^{bc}	3.58 ± 0.03 ^b	3.42 ± 0.04 ^d	3.44 ± 0.04 ^{cd}
组氨酸 * His	1.72 ± 0.02 ^a	1.64 ± 0.05 ^{bc}	1.64 ± 0.02 ^{bc}	1.62 ± 0.01 ^{bc}	1.66 ± 0.01 ^{ab}	1.62 ± 0.01 ^{bc}	1.56 ± 0.03 ^c
精氨酸 * Arg	4.00 ± 0.00 ^{ab}	3.92 ± 0.02 ^{abc}	3.90 ± 0.03 ^{bcd}	3.86 ± 0.05 ^{cd}	4.02 ± 0.05 ^a	3.81 ± 0.05 ^d	3.96 ± 0.02 ^{abc}
脯氨酸 Pro	2.28 ± 0.01 ^b	2.26 ± 0.03 ^b	2.22 ± 0.00 ^b	2.27 ± 0.02 ^b	2.41 ± 0.04 ^a	2.38 ± 0.04 ^a	2.37 ± 0.02 ^a
∑ AA	56.03 ± 0.25 ^a	54.47 ± 0.17 ^b	54.15 ± 0.20 ^{bc}	52.18 ± 0.30 ^d	53.69 ± 0.23 ^c	51.14 ± 0.28 ^e	51.69 ± 0.11 ^d
∑ EAA	27.44 ± 0.12 ^a	26.52 ± 0.06 ^b	26.43 ± 0.11 ^b	25.40 ± 0.19 ^c	26.16 ± 0.07 ^b	24.81 ± 0.15 ^d	24.91 ± 0.13 ^d
∑ NEAA	28.58 ± 0.14 ^a	27.96 ± 0.11 ^b	27.72 ± 0.10 ^{bc}	26.78 ± 0.10 ^d	27.53 ± 0.16 ^c	26.32 ± 0.14 ^c	26.78 ± 0.06 ^d
∑ EAA/∑ AA (%)	0.49 ± 0.02 ^a	0.49 ± 0.02 ^b	0.49 ± 0.00 ^{ab}	0.49 ± 0.03 ^b	0.49 ± 0.04 ^{ab}	0.49 ± 0.01 ^b	0.48 ± 0.01 ^c
∑ EAA/∑ NEAA (%)	0.96 ± 0.01 ^a	0.95 ± 0.02 ^{bc}	0.95 ± 0.00 ^{ab}	0.95 ± 0.03 ^{bc}	0.95 ± 0.01 ^{bc}	0.94 ± 0.00 ^c	0.93 ± 0.01 ^d

3 讨论

3.1 延迟首次投喂对胭脂鱼仔鱼脂类含量的影响

脂肪作为动物体内良好的储能物质和生物活性物质(如固醇),对于调节生命活动有着不可替代的作用^[12-13]。鱼类在饥饿期间会循序利用身体的储能物质以维持基本生命活动的正常进行。目前,关于鱼类在饥饿状态下机体营养物质的代谢次序尚无定论。一般认为,鱼类在早期饥饿期间以消耗脂肪为主,随着饥饿时间的持续,脂肪含量趋于阈值时,蛋白质的动员利用加强。但也有研究显示,鱼类在饥饿期间主要以消耗蛋白质为主^[13]。这些差异的原因可能是由于鱼的种类、发育状况以及饥饿时间的不同造成的。本研究发现,胭脂鱼仔鱼的脂肪含量随延迟投喂时间的增加显著降低;恢复 1 期(19 日龄时)除 D1 组仔鱼含脂量与对照组无显著差异外,其余各处理组均显著低于对照组水平;恢复 2 期(29 日龄时),各处理组仔鱼的脂肪含量均与对照组无显著性差异,表现出完全补偿效应(图 1)。由此表明,胭脂鱼仔鱼的含脂量存在饥饿效应,随饥饿时间的延长,脂类物质被不断消耗。但在经历较长恢复期后,各处理组仔鱼的脂类含量均表现出完全补偿效应,暗示胭脂鱼仔鱼在长期进化过程中对饥饿胁迫可能具有良好的适应性。

3.2 延迟首次投喂对胭脂鱼仔鱼脂肪酸组成和含量的影响

脂肪酸在鱼类早期发育阶段起着极为重要的作用,特别是 n-3 系列高不饱和脂肪酸(如 DHA 和 EPA 等)为仔、稚鱼的必需脂肪酸,是生物膜、视觉和神经系统等结构的主要组成成分^[14-15]。研究表明,饥饿会导致鱼体中饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸的含量显著下降^[15-16]。Abi-Ayad 等^[16]对欧亚鲈(*Perca fluviatilis*)的研究显示,其在饥饿期间动用 n-6 系列脂肪酸而不是饱和脂肪酸提供能量。本实验结果显示,随延迟投喂时间的延长,胭脂鱼仔鱼体内的 Σ MUFA 和 Σ n-6 PUFA 的百分含量显著下降, Σ SFA、 Σ n-3 PUFA 和 n-3/n-6 显著增加,而 Σ PUFA 的百分含量呈先上升后维持稳定的趋势(表 1)。其原因可能是饥饿胁迫降低了单不饱和脂肪酸的含量,且

由于单不饱和脂肪酸的大量消耗导致了饱和脂肪酸比例上升。同时,本实验结果也显示,随着延迟首次投喂时间的增加,多不饱和脂肪酸中 DHA 与 EPA 的比值显著上升(表 1),这与众多研究结果相似^[15-17]。暗示胭脂鱼仔鱼也存在 DHA 和 EPA 之间的选择性代谢现象,DHA 与 EPA 相比在生命系统中扮演更为重要的角色^[17-18]。

大量研究显示,鱼类在面临饥饿胁迫时,体内不同种类的脂肪酸利用顺序具有一定规律,即首先动用饱和脂肪酸,然后动用单不饱和脂肪酸,最后利用多不饱和脂肪酸^[17-19]。本研究中,胭脂鱼仔鱼随延迟投喂时间的延长,脂肪酸的损失速率的排列顺序为 n-6 > n-9 > n-3。这与 Koven 等^[20]对金头鲷(*Sparus aurata*)饥饿仔鱼的研究结果相似,但与鳊鱼(*Miichthys miuiy*)不同,由此表明,不同的鱼类在面临饥饿胁迫时,其脂肪酸的代谢存在一定差异^[21]。同时,本研究中胭脂鱼仔鱼鱼体中的必需脂肪酸 DHA 和 ARA 与仔鱼体质量和含水率均存在显著的线性相关关系,说明鱼体在饥饿胁迫过程中一些重要的脂肪酸随体质量或含水率的变化而变化,暗示在生产实践中可根据鱼体的常规体成分来推测鱼体的重要脂肪酸代谢状况。

3.3 恢复投喂阶段胭脂鱼仔鱼的脂肪酸组成和含量变化

鱼类经历一段时间饥饿后再进行投喂,由于鱼体内物质(糖类、脂肪和蛋白质等)快速建构,通常会出现代谢加快及补偿生长效应^[22-23]。本研究发现,在恢复 1 期(19 日龄时),随饥饿胁迫时间的增加,C18:1n-9、C18:3n-3 和 C21:0 急剧上升(表 2),其中 C18:1n-9 和 C18:3n-3 作为脂肪酸合成代谢中两种重要的中间产物,其百分含量的增加,反映出胭脂鱼仔鱼在获得食物后调高脂类代谢水平以积极恢复的过程^[23]。然而,D7、D9 和 D11 组仔鱼鱼体中的一些重要的脂肪酸(DHA、EPA 和 ARA)的百分含量与对照组和其他处理组均存在显著性差异(表 2)。由此表明,胭脂鱼仔鱼的脂肪酸种类和含量的恢复状况随饥饿胁迫时间的不同而存在差异,饥饿时间越长,饥饿效应越明显,脂肪酸种类和含量的恢复越慢,这也与众多学者的研究结果类似^[18]。在恢复 2 期(29 日龄时),胭脂鱼仔鱼体内 Σ SFA 的百分含量随延迟处理时间的延长逐渐上升,而 Σ PUFA

的百分含量维持相对稳定,这暗示,胭脂鱼仔鱼在获得饵料后,各脂肪酸的蓄积速率并不一致,其具体顺序为 PUFA > SFA > MUFA,这也可能是胭脂鱼仔鱼在长期进化过程中对饵料缺失的一种适应策略^[24-25]。

3.4 延迟首次投喂对胭脂鱼仔鱼氨基酸组成和含量的影响

在鱼类代谢中,氨基酸具有十分重要的作用。一方面,氨基酸可作为信号分子参与机体多种生理调控;另一方面,在饥饿或营养不良时,氨基酸也可通过糖原异生作用氧化供能^[26-27]。目前,关于鱼类在饥饿胁迫下的氨基酸的变化特征报道较少^[6,27]。在经历两个月饥饿胁迫后,遮目鱼(*Chanos chanos*)的组氨酸、脯氨酸和鸟氨酸显著下降;甘氨酸、苏氨酸和异亮氨酸含量显著升高;氨基酸总含量则随饥饿时间的持续一直下降^[28]。本实验结果显示,胭脂鱼仔鱼必需氨基酸总含量和非必需氨基酸总含量在延迟投喂 1~7 d 时,均随延迟时间的增加而增加(表 4),而与此同时,胭脂鱼仔鱼鱼体中的总脂含量和多数脂肪酸含量显著降低(图 1,表 1)。由此表明,胭脂鱼仔鱼在面临短期饥饿胁迫时对氨基酸的利用较少,以消耗脂肪酸为主^[29-30];但是胭脂鱼仔鱼在延迟首次投喂 9~11 d 时,必需氨基酸总含量显著降低,脂肪酸含量变化较小(图 1,表 1 和表 4),暗示胭脂鱼仔鱼此时脂类物质的动员利用趋于阈值,为最大限度维持生命,氨基酸开始被大量消耗。

3.5 恢复投喂阶段胭脂鱼仔鱼氨基酸组成和含量变化

目前,有关鱼类在经历饥饿或营养不良后恢复摄食阶段的氨基酸组成和含量的研究较少^[2,31]。点带石斑鱼(*Epinephelus malabaricus*)幼鱼饥饿后恢复摄食,鱼体中氨基酸总含量和必需氨基酸总含量均呈显著上升趋势,研究者认为这是饥饿后再投喂过程中点带石斑鱼幼鱼的一种补偿效应^[32-33]。本实验结果显示,在恢复 1 期和 2 期(19 日龄和 29 日龄时),多数氨基酸、必需氨基酸总含量、非必需氨基酸总含量和氨基酸总含量均随延迟投喂时间的增加呈现显著下降趋势(表 5,表 6),而与此同时,体内多数脂肪酸均与对照组无显著性差异,这暗示胭脂鱼仔鱼在饥饿后获得饵料时,鱼体氨基酸的恢复比脂肪酸更慢^[32-34],其原因有待进一步研究。

4 结论

结合延迟首次投喂对胭脂鱼生长、摄食和消化酶活性的结果^[35],本研究认为,胭脂鱼仔鱼在饥饿胁迫下可能主要通过调节自身各种酶活性,使代谢发生适应性改变,以加强对氨基酸和脂肪酸的代谢利用,满足生命活动基本的能量需求。胭脂鱼饥饿仔鱼在获得食物后,具有补偿生长效应。从摄食强度、消化酶活性以及氨基酸和脂肪酸的组成和含量可以推测,其完全补偿生长或部分补偿生长,可能主要是通过提高摄食强度、调高消化酶活性以快速获得急需的氨基酸和脂肪酸来构建机体,不过,鱼类氨基酸的恢复比脂肪酸更慢。

参考文献:

- [1] Fouz B, Toranzo A E, Marco-Noales E, et al. Survival of fish-virulent strains of *Photobacterium damsela* subsp. *damsela* in seawater under starvation conditions [J]. FEMS Microbiology Letters, 1998, 168(2): 181-186.
- [2] Johnston I A. Expression of Heat Shock Protein (Hsp90) Paralogues Is Regulated by Amino Acids in Skeletal Muscle of Atlantic Salmon [J]. PloS One, 2013, 8(9): 1-14.
- [3] Ritar A J, Dunstan G A, Crear B J, et al. Biochemical composition during growth and starvation of early larval stages of cultured spiny lobster (*Jasus edwardsii*) phyllosoma [J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2003, 136(2): 353-370.
- [4] Wan R J, Meng Z N, Li X S. Feeding ability and nutrient metabolism of the halfbeak (*Hyporhamphus sajori*) larvae [J]. Acta Zoologica Sinica, 2003, 49(4): 466-472. [万瑞景, 蒙子宁, 李显森. 沙氏下触鱼仔鱼的摄食能力和营养代谢. 动物学报, 2003, 49(4): 466-472.]
- [5] Meyer B, Oetl B. Effects of short-term starvation on composition metabolism of larval Antarctic krill, *Euphausia superba* [J]. Marine Ecology-progress Series, 2005, 292: 263-270.
- [6] Tan X Y, Luo Z, Wang W M, et al. Effect of starvation on body weight and body composition of small-sized Channel catfish *Ictalurus punctatus* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2009, 33(1): 39-45.

- [谭肖英,罗智,王为民,等. 饥饿对小规格斑点叉尾鲷体重及鱼体生化组成的影响. 水生生物学报, 2009, 33(1): 39-45.]
- [7] Sun Y H, Wang W, Liu S Y, *et al.* Genetic diversity analysis of Mitochondrial D-loop region of Chinese Sucker (*Myxocyprinus asiaticus*) [J]. *Acta Genetica Sinica*, 2002, 29(9): 787-790. [孙玉华,王伟,刘思阳,等. 中国胭脂鱼线粒体控制区遗传多样性分析. 遗传学报, 2002, 29(9): 787-790.]
- [8] Liu L H, Wu G X, Wang Z L. A effect of the Gezhou Dam key water control project on sexul gland development and natural spawning of Chinese sucker (*Myxocyprinus asiaticus*) in the downstream below the Dam [J]. *Journal of Fisheries of China*, 1992, 16(4): 346-456. [刘乐和,吴国犀,王志玲. 葛洲坝水利工程对胭脂鱼性腺发育及自然繁殖的影响. 水产学报, 1992, 16(4): 346-456.]
- [9] Sun Y H, Liu S Y, Peng Z, *et al.* Genetic structure of Chinese Sucker (*Myxocyprinus asiaticus*) by mtDNA and RAPD markers [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2003, 27(3): 248-252. [孙玉华,刘思阳,彭智,等. 中国胭脂鱼种群的遗传分析. 水生生物学报, 2003, 27(3): 248-252.]
- [10] Bligh E G, Dyer W J. A rapid method of total lipid extraction and purification [J]. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 1959, 37(8): 911-917.
- [11] Metcalfe L D, Schmitz A A, Pelka J R. Rapid preparation of fatty acid esters from lipids for gas chromatographic analysis [J]. *Analytical Chemistry*, 1966, 38(3): 514-515.
- [12] Liu J S, Zhou L, Lei J L. Lipid nutrition in marine fish larvae: a review [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(4): 446-452. [刘镜属,周利,雷霖. 海水仔稚鱼脂类营养研究进展. 海洋与湖沼, 2002, 33(4): 446-452.]
- [13] Cheng H L, Xia D Q, Wu T T. Fatty liver and regulation of lipids metabolism in fish [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2006, 18(4): 294-298. [程汉良,夏德全,吴婷婷. 鱼类脂类代谢调控与脂肪肝. 动物营养学报, 2006, 18(4): 294-298.]
- [14] Sargent J R, Bell J G, Bell M V, *et al.* Requirement criteria for essential fatty acids [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 1995, 11(3-4): 183-198.
- [15] Gao C R, Lei J L. A review on nutritional requirement of high unsaturated fatty acid marine fish [J]. *Marine Fisheries Research*, 2000, 21(3): 72-76. [高淳仁,雷霖. 海水鱼类高度不饱和脂肪酸营养研究概况. 海洋水产研究, 2000, 21(3): 72-76.]
- [16] Abi-Ayad S M E A, Boutiba Z, Mélard C, *et al.* Dynamics of total body fatty acids during early ontogeny of pikeperch (*Sander lucioperca*) larvae [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2004, 30(2): 129-136.
- [17] Chen B, Feng J, Wu B, *et al.* The effect of starvation on fat and fatty acids composition in Pacific Salmon (*Oncorhynchus* spp.) [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(6): 1247-1253. [陈斌,冯健,吴彬,等. 饥饿对太平洋鲑 (*Oncorhynchus* spp.) 鱼体脂肪与脂肪酸的影响. 海洋与湖沼, 2012, 43(6): 1247-1253.]
- [18] McKenzie D J, Higgs D A, Dosanjh B S, *et al.* Dietary fatty acid composition influences swimming performance in Atlantic salmon (*Salmo salar*) in seawater [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 1998, 19(2): 111-122.
- [19] Maddock D M, Burton M P M. Some effects of starvation on the lipid and skeletal muscle layers of the winter flounder, *Pleuronectes americanus* [J]. *Canadian Journal of Zoology*, 1994, 72(9): 1672-1679.
- [20] Koven W M, Kissil G W, Tandler A. Lipid and n-3 requirement of *Sparus aurata* larvae during starvation and feeding [J]. *Aquaculture*, 1989, 79(1-4): 185-191.
- [21] Liu M H, Luo H Z, Fu R B, *et al.* Biochemical composition, amino acid and fatty acid composition in Juvenile of *Miichthys miuuy* under short-time starvation [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, 33(2): 230-235. [柳敏海,罗海忠,傅荣兵,等. 短期饥饿胁迫对鳊鱼生化组成,脂肪酸和氨基酸组成的影响. 水生生物学报, 2009, 33(2): 230-235.]
- [22] Xie Z G, Niu C J. Effect of partial and complete food deprivation on compensatory growth of Juvenile soft-shelled turtle (*Pelodiscus sinensis*): Temporal patterns in growth rate and changes in body composition [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, 31(2): 214-219. [颀志刚,牛翠娟. 完全或部分的食物剥夺对中华鳖 (*Pelodiscus sinensis*) 幼体补偿生长反应的影响: 生长率的时间变化模式与体组成的变化. 水生生物学报, 2007, 31(2): 214-219.]
- [23] Giller K, Huebbe P, Hennig S, *et al.* Beneficial effects of a 6-month dietary restriction are time-

- dependently abolished within 2 weeks or 6 months of refeeding-genome-wide transcriptome analysis in mouse liver[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2013, 61:170 - 178.
- [24] Izquierdo M S. Essential fatty acid requirements of cultured marine fish larvae [J]. *Aquaculture Nutrition*, 1996, 2(4) :183 - 191.
- [25] Jiang Z Q, Jia Z M. The compensatory growth and its mechanism of red drum, *Sciaenops ocellatus*, after food deprivation[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2002, 26(1) :67 - 72. [姜志强, 贾泽梅. 美国红鱼继饥饿后的补偿生长及其机制. 水产学报, 2002, 26(1) :67 - 72.]
- [26] Rønnestad I, Thorsen A, Finn R N. Fish larval nutrition; A review of recent advances in the roles of amino acids[J]. *Aquaculture*, 1999, 177:201 - 216.
- [27] Aragão C, Conceição L E C, Dinis M T, et al. Amino acid pools of rotifers and *Artemia* under different feeding conditions; Nutritional implications for fish larvae [J]. *Aquaculture*, 2004, 234 (1 - 4) : 429 - 445.
- [28] Shiau C Y, Pong Y J, Chiou T K, et al. Effect of starvation on free histidine and amino acids in white muscle of milkfish (*Chanos chanos*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2001, 128(3) : 501 - 506.
- [29] Van Waarde A. Biochemistry of non-protein nitrogenous compounds in fish including the use of amino acids for anaerobic energy production [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Comparative Biochemistry*, 1988, 91(2) :207 - 228.
- [30] Seiliez I, Gabillard J C, Riffle M, et al. Amino acids downregulate the expression of several autophagy-related genes in rainbow trout myoblasts [J]. *Autophagy*, 2012, 8(3) :364 - 375.
- [31] Blasco J, Fernández J, Gutiérrez J. The effects of starvation and refeeding on plasma amino acid levels in carp, *Cyprinus carpio* L., 1758 [J]. *Journal of Fish Biology*, 1991, 38(4) :587 - 598.
- [32] Costas B, Aragão C, Ruiz-Jarabo I, et al. Feed deprivation in Senegalese sole (*Solea senegalensis* Kaup, 1858) juveniles; Effects on blood plasma metabolites and free amino acid levels [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2010, 37 (3) : 495 - 504.
- [33] Chen B, Liu M H, Shi Z H, et al. The effects of starvation and re-feeding on fatty acid and amino acid composition in juvenile of *Epinephelus malabaricus* Bloch & Schneide [J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2008, 17 (6) : 674 - 679. [陈波, 柳敏海, 施兆鸿, 等. 饥饿和再投饲对点带石斑鱼幼鱼脂肪酸和氨基酸组成的影响. 上海水产大学学报, 2008, 17(6) :674 - 679.]
- [34] Shaji S A, Kannan H C. Chemical composition and amino acid profile of *Sardinella longiceps* collected from Western coastal areas of Kerala, India [J]. *Journal of Biology and Earth Sciences*, 2013, 3(1) : 129 - 134.
- [35] Wang C, Jin L, Liu X L, et al. Effect delayed first feeding on the growth, feeding and activities of digestive enzyme of the *Myxocyprinus asiaticus* larvae [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37 (11) :1706 - 1715. [王川, 金丽, 刘晓蕾, 等. 延迟首次投喂对胭脂鱼仔鱼生长、摄食及消化酶活性的影响. 水产学报, 2013, 37(11) :1706 - 1715.]

Effects of different delayed first feeding time on fatty acid and amino acids of *Myxocyprinus asiaticus* larvae

WANG Chuan¹, GUO Haiyan^{1,2}, LI Xiuming^{1,3}, YUAN Jianming¹, PU Deyong¹,
JIN Li¹, WANG Zhijian¹, ZHANG Yaoguang^{1*}

(1. Key Laboratory of Freshwater Fish Reproduction and Development (Ministry of Education),

College of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Aquatic Science Institute of Chongqing, Chongqing 400020, China;

3. Laboratory of Evolutionary Physiology and Behavior, Chongqing Key Laboratory of Animal Biology,
Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

Abstract: To investigate the effect of different delayed first feeding time on the amino acids and fatty acids of *Myxocyprinus asiaticus* larvae under the condition of water temperature (19 ± 0.5) °C, we divided the larvae into 7 different initial delayed feeding time groups, 1, 3, 5, 7, 9 and 11 delayed days denoted as group D0, D1, D3, D5, D7, D9 and D11 respectively, and subsequently fed at corresponding time, then detected the composition and content of the amino acids and fatty acid at different intervals, with total experimental period lasting 29 days. Results showed that, (1) The larvae body lipid content showed a significant downward trend when prolonging the starvation time. However, at the end of the experiment (29 days old), all of the other groups were not significantly different from the control group on lipid content, indicating a complete compensation effect. (2) During starvation, the monounsaturated fatty acids (MUFA) were utilized as energy substrates by *M. asiaticus* larvae, with the order of n-6 > n-9 > n-3 and C22:6n-3 (DHA) being preserved prior to C20:5n-3 (EPA). In addition, the contents (percentage) of DHA and ARA were significant different from the body weight and moisture content. (3) With increasing time of starvation, the alanine, isoleucine, leucine and histidine decreased significantly, while the aspartic acid and glutamic acid increased significantly, however, the glycine, lysine and arginine first increased and then decreased in *M. asiaticus* larvae. To sum up, first, *M. asiaticus* larvae have strong adaptability for starvation, and mainly consume lipids in the early starvation period, and then amino acids begin to be consumed when the lipids come near to the threshold. Then, it suggested a slower restoration of the amino acid than the fatty acids for *M. asiaticus* larvae after resuming feeding.

Key words: *Myxocyprinus asiaticus*; larvae; delayed first feeding; amino acids; fatty acids

Corresponding author: ZHANG Yaoguang. E-mail: zhangyg@swu.edu.cn