

中华绒螯蟹幼蟹蜕皮周期中肝胰腺和肌肉脂类的动态变化

马明君¹, 王春^{1,2}, 吴旭干¹, 何杰¹, 龙晓文¹,
李国祥², 汤北伟², 成永旭^{1*}

(1. 上海海洋大学农业部淡水水产种质资源重点实验室, 上海 201306;

2. 江苏省泗洪金水集团, 江苏 泗洪 223900)

摘要: 以越冬后即将进入蜕皮的中华绒螯蟹幼蟹为实验对象, 采用生化分析方法, 研究其蜕皮周期肝胰腺及肌肉脂类的动态变化。本实验将其幼蟹蜕皮周期分为蜕皮前期(D期)、蜕皮期(E期)、蜕皮后期(AB期)和蜕皮间期(C1期和C2期)。结果发现, (1) 蜕皮各期肝胰腺总脂含量变化显著, 呈现为“高-低-高”的趋势, 其中D期最高, AB期最低, C1、C2期开始回升; 而肌肉总脂含量变化趋势与肝胰腺相反, 为先上升后再下降趋势, 在D期最低, AB期含量最高。(2) 肝胰腺脂类中以甘油三酯(TG)为主, 其次是磷脂(PL); 而肌肉脂类主要是PL, 其次是TG和胆固醇(CHO)。肝胰腺中TG含量为先下降后上升趋势, 其中C1期含量最低, 肝胰腺中的PL含量变化趋势与TC相反, AB期含量最高; 肌肉中TG含量在E期最高, 而此期的PL含量最低。(3) 肝胰腺和肌肉的主要脂肪酸为C16:0、C18:1n9、C18:1n7、C18:2n6(LOA)、C20:5n3(EPA)和C22:6n3(DHA)(相对含量>4%)。蜕皮周期内, 肝胰腺中的饱和脂肪酸(SFA)、单不饱和脂肪酸(MUFA)和高度不饱和脂肪酸(HUFA)均表现为下降趋势, 其中D期肝胰腺中的DHA和EPA含量最高; 肌肉中的SFA和MUFA呈现为先上升后下降趋势, 而肌肉中的PUFA和HUFA表现为先下降后上升趋势。研究表明, 中华绒螯蟹幼蟹蜕皮周期中, 肝胰腺和肌肉中的脂类成分发生了显著变化, 肝胰腺中脂类可能是其蜕皮期间的主要能量来源物质之一。

关键词: 中华绒螯蟹幼蟹; 蜕皮周期; 脂类变化; 肝胰腺; 肌肉

中图分类号: Q 493.5; S 968.25

文献标志码: A

中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*) 又称毛蟹, 属甲壳纲(Crustacea)、十足目(Decapoda)、方蟹科(Grapsidae)、绒螯蟹属, 自然分布于中国东部的河流和湖泊中, 具有很高的经济价值, 是中国主要的养殖蟹类。中华绒螯蟹幼蟹一生伴随着 18 ~ 20 次蜕皮, 蜕皮与生长、生理变化紧密相关^[1]。蜕皮过程不仅受体内蜕皮激素的调控, 还受到盐度、光照、温度、营养水平等环境因子影响。其中, 体内脂类组成与水平和蜕皮、生长、存活率、性腺发育等关系更为密切^[2]。首先, 脂类是中华绒螯

蟹幼蟹体内最重要的能量储备和生物膜结构物质, 饱和脂肪酸(SFA)和单不饱和脂肪酸(MUFA)主要供能, 二十碳四烯酸(ARA)、二十碳五烯酸(EPA)、二十二碳六烯酸(DHA)等高度不饱和脂肪酸(HUFA)不仅是胞膜结构中磷脂的主要构件^[3], 而且对中枢神经系统发育起着重要作用; 其次, 类脂胆固醇是蜕皮激素的前体, 其水平直接影响到中华绒螯蟹幼蟹的蜕皮^[4]。Lovrich等^[5]研究表明, 虾蟹类幼体发育阶段生长快速, 在较短期内经历数次蜕皮, 伴随体质量和体积的

收稿日期: 2014-05-05 修回日期: 2014-10-01

资助项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2012AA10A409-5); 上海市科委科研计划(13340721500, 13320502100); 国家农业科技成果转化项目(2012GB2C000147); 上海市科委优秀学术带头人项目(12XD1402700); 2011年江苏省高层次创新创业人才引进计划; 公益性行业(农业)科研专项(201203081-1)

通信作者: 成永旭, E-mail: yxcheng@shou.edu.cn

急剧增大,充足的脂质储存是幼体蜕皮到下一阶段的前提条件。

随着中华绒螯蟹养殖业的进一步发展,有关其蜕皮规律的研究日益增多,主要包括蜕皮过程中维甲类 X 受体在蜕皮过程中的 mRNA 的表达模式^[6]、肝胰腺消化酶活力变化^[7]及肝胰腺细胞组成变化^[8]等等。有关中华绒螯蟹蜕皮周期内生化成分变化的研究较少,仅张文军等^[1]初步报道了中华绒螯蟹幼蟹蜕皮前后脂肪酸组成的变化,但有关其完整蜕皮周期内脂类物质的变化规律却不清楚,这不仅不利于对中华绒螯蟹生长蜕皮机制的深入研究,也不利于中华绒螯蟹幼蟹养殖过程中的蜕皮调控。中华绒螯蟹养殖生产上经常发现因蜕壳不遂而死亡的个体,或者蜕壳后个体由于新壳不能及时硬化而死亡的现象,这种现象被称之为蜕皮综合症(MDS),MDS 形成可能与甲壳动物蜕壳前体内的营养物质积累不足或不平衡有关,特别是脂类^[9-10],这种现象在幼蟹和成蟹养殖早期尤为突出,并给经济蟹类养殖生产造成了巨大的经济损失^[11]。因此,探明中华绒螯蟹幼蟹蜕皮过程中的脂类营养成分变化,对于认识中华绒螯蟹的蜕皮规律及解释 MDS 的形成原因具有一定的理论意义。鉴于此,本实验根据中华绒螯蟹蜕皮周期中外部形态的变化对其进行分期,研究了不同蜕皮期幼蟹肝胰腺和肌肉中总脂含量、脂类和脂肪酸组分的变化规律,以期中华绒螯蟹幼蟹蜕皮的营养调控提供实践依据,从而有效提高中华绒螯蟹幼蟹蜕皮的成功率和蜕皮后的成活率。

1 材料与方法

1.1 实验材料

2013年3月23日从上海海洋大学崇明扣蟹供台基地随机挑选600只中华绒螯蟹幼蟹,幼蟹体质量(1.8 ± 0.3)g,集中饲养于玻璃箱(2.0 m × 1.0 m × 0.5 m)自动充氧循环水养殖系统中。箱中水深25 cm,水温16.0 °C,暂养3 d后,加热棒(200 W)自动控制逐渐加温,升温速率1.0 °C/3 h,至水温保持在(22.0 ± 1.0) °C,1 d后开始实验。实验期间每天17:00点左右投食一次,饲料为本实验室研制的幼蟹饲料^[12],投食率为蟹体质量的2%。每天小心清理残饵和粪便,更换等温新水,换水量为原水量的1/4。实验期

间NH₃-N为0.35~0.49 mg/L,NO₂-N为0.02~0.03 mg/L,pH 7.80~8.10。白炽灯12 h昼夜循环照明,光:暗=12 h:12 h。

饲养10 d后,随机抽取幼蟹检查其蜕皮分期,即用解剖剪剪取中华绒螯蟹第三颚足外肢末端,腹面朝下置于加有清水的载玻片上,用Olympus-2光学显微镜观察(放大倍数100×),按表1所示确定样品所处的分期,其中由于C期持续时间长,本实验分C1、C2两个时期。根据显微观察结果,按不同的分期取样20只,测定其总脂、脂类组成和脂肪酸组分,每个样本3个平行。

表1 中华绒螯蟹蜕皮分期及对应的形态学特征

Tab. 1 Morphological characteristics of *E. sinensis* during its molting cycle

蜕皮分期 stage of ecdysis	第三颚足形态学特征 main morphological characteristics of the third maxilliped	是否摄食 feeding or not
D	上皮与表皮分离,形成透明空白区	是
E	蜕皮缝线开裂	否
AB	刚蜕皮,柔软期,无刚毛圆锥	否
C1	硬化期,刚毛圆锥形成	是
C2	刚毛圆锥形成,膜质层出现	是

1.2 实验方法

按Folch等^[13]法测定总脂含量;脂类组成采用IATROSCANTM MK-6s棒状薄层色谱扫描仪;根据吴旭干等^[14]方法进行脂类组成和脂肪酸分析,采用14%的三氟化硼-甲醇对总脂进行甲脂化处理,脂肪酸分析采用美国Agilent公司生产的高效气相色谱仪6890A(G1530A)。

1.3 数据分析

所有实验数据均为相对含量,结果均以mean ± SD表示,采用SPSS 16.0进行One-Way ANOVA单因素方差分析,当差异显著时($P < 0.05$)再进行Duncan多重比较。

2 结果

2.1 蜕皮周期内肝胰腺和肌肉总脂及脂类组成的动态变化

从D期到C2期,肝胰腺总脂含量呈先下降再上升趋势,即在D期最高,AB期最低,C1期开始上升;肌肉总脂含量却呈现相反的变化趋势,在D期最低,而AB期最高,C1期开始下降(表2)。中华绒螯蟹幼蟹肝胰腺脂类组成主要为甘油三酰

(TG),其次为磷脂(PL),TG含量在D期最高,逐步下降至C1期最低,C2期含量开始上升。PL含量从D期开始上升,AB期达到最高值,C1期又开始下降。游离脂肪酸(FFA)和胆固醇(CHO)相对含量变化趋势基本一致,即D、E、AB期显著低于C1和C2期($P < 0.05$),从D期到C1期逐渐上升,在C1期达到最高值,C2期又开始下降。甘油一酰(MG)在C1、C2期可检测出少量含量,其他3期未检测到。

中华绒螯蟹幼蟹肌肉脂类组分主要有PL、TG和CHO。PL含量在E期最低,其他各期则无显著差异,但均高于E期($P < 0.05$)。TG含量在E期最高,其次为D和AB期,C1和C2期较低。FFA含量在E期最高,其他各期无显著性差异($P > 0.05$)。CHO从D期到AB期逐渐升高,在AB期达到最大值,在C1和C2降低。MG含量在E、AB、C1期无显著差异,D期和C2期则显著低于其他各期($P < 0.05$)。

表2 不同蜕皮时期肝胰腺、肌肉总脂及脂类组成(总脂)

Tab.2 The changes of total lipid and composition of lipid during different molting periods %

	D	E	AB	C1	C2
肝胰腺 hepatopancreas					
total lipid	48.92 ± 1.73 ^a	46.43 ± 0.27 ^b	37.09 ± 1.30 ^d	42.47 ± 1.34 ^c	44.99 ± 0.92 ^b
TG	92.69 ± 2.52 ^a	88.99 ± 1.28 ^b	77.05 ± 3.94 ^c	71.01 ± 3.59 ^d	78.78 ± 2.36 ^c
FFA	1.30 ± 0.33 ^d	1.86 ± 0.56 ^c	1.90 ± 0.20 ^c	5.20 ± 0.68 ^a	4.71 ± 0.26 ^b
CHO	1.50 ± 0.42 ^c	1.72 ± 0.51 ^c	1.95 ± 0.45 ^c	7.49 ± 0.38 ^a	6.60 ± 0.74 ^b
MG	—	—	—	0.52 ± 0.28 ^a	0.37 ± 0.10 ^b
PL	4.51 ± 2.00 ^d	7.44 ± 0.65 ^c	19.10 ± 4.46 ^a	15.79 ± 4.48 ^b	9.55 ± 2.55 ^c
肌肉 muscle					
total lipid	3.60 ± 0.17 ^e	4.18 ± 0.11 ^d	6.08 ± 0.04 ^a	5.44 ± 0.05 ^b	4.37 ± 0.08 ^c
TG	5.89 ± 0.80 ^b	19.38 ± 3.29 ^a	5.32 ± 1.19 ^b	2.12 ± 0.85 ^c	2.82 ± 1.40 ^c
FFA	1.17 ± 0.37 ^b	3.41 ± 1.18 ^a	0.71 ± 0.13 ^b	0.90 ± 0.50 ^b	0.70 ± 0.43 ^b
CHO	4.56 ± 0.63 ^c	5.14 ± 0.79 ^{bc}	6.72 ± 0.86 ^a	6.59 ± 1.97 ^a	5.90 ± 1.04 ^b
MG	0.03 ± 0.05 ^b	0.16 ± 0.07 ^a	0.12 ± 0.07 ^a	0.13 ± 0.15 ^a	0.04 ± 0.06 ^b
PL	88.34 ± 1.73 ^a	71.92 ± 4.97 ^b	87.37 ± 1.27 ^a	90.23 ± 3.33 ^a	90.53 ± 2.83 ^a

注:同一行不同上标表示差异显著($P < 0.05$)。TG:甘油三酰;FFA:游离脂肪酸;CHO:胆固醇;MG:甘油一酰;PL:磷脂

Notes: Values in the same row with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$). TG: triglyceride; FFA: free fatty acids; CHO: cholesterol; MG: monoglyceride; PL: phospholipids

2.2 蜕皮周期内肝胰腺脂肪酸主要组分的动态变化

中华绒螯蟹幼蟹肝胰腺脂肪酸各组分中主要必需脂肪酸为C18:2n6(LA)、C18:3n3(LNA)、C20:4n6(ARA)、C20:5n3(EPA)、C22:6n3(DHA),以及主要脂肪酸(相对含量大于4%)为C16:0、C16:1n7、C18:1n9、18:1n7(表3)。

在蜕皮周期中,从D期到C2期上述肝胰腺必需及主要脂肪酸含量呈现6种变化趋势:一是在D期含量最高,E-C2期含量下降并保持不变,如C18:1n9、DHA;二是D-E期含量较高,AB-C1期、C2期或AB期、C1-C2期含量渐次下降,如EPA、LNA;三是D-E期含量较高,AB-C1期含量

下降,C2期含量上升,如C16:1n7;四是D-C1期含量基本不变,C2期含量下降,如C18:1n7、ARA;五是D-E期含量逐次降低,AB-C1期、C2期逐次上升,如LA;六是D-E期含量逐次上升,AB期下降后在C1-C2期逐次上升,如C16:0。

由此可见,在蜕皮过程中肝胰腺必需和主要脂肪酸含量的变化呈现出多态性和复杂性。但换个角度分析,蜕皮各期的SFA含量几无变化,表明SFA各脂肪酸可能按等比例被消耗;MUFA含量在E期显著减少,在蜕皮中是主要的供能物质;HUFA含量在AB-C1期减少,表明HUFA可能被转移出肝胰腺,且在新膜构建中被消耗。C2-D期含量逐次增加,表明其补充主要来自摄食。

表 3 不同蜕皮时期中华绒螯蟹幼蟹肝胰腺脂肪酸组成(% 总脂)
Tab.3 The changes of fatty acid of hepatopancreas in different molting periods

脂肪酸 fatty acid	D	E	AB	C1	C2
C14:0	1.13 ± 0.40	1.23 ± 0.59	0.99 ± 0.09	1.04 ± 0.32	1.29 ± 0.26
C15:0	0.44 ± 0.09	0.51 ± 0.16	0.40 ± 0.03	0.41 ± 0.09	0.49 ± 0.06
C16:0	14.14 ± 1.31 ^c	15.253 ± 2.50 ^b	14.55 ± 0.86 ^c	15.71 ± 2.05 ^b	16.90 ± 0.92 ^a
C18:0	2.67 ± 0.33 ^c	2.96 ± 0.32 ^c	3.56 ± 0.05 ^a	3.31 ± 0.09 ^b	2.99 ± 0.10 ^c
C24:0	0.71 ± 0.04	1.05 ± 0.19	0.80 ± 0.34	0.83 ± 0.11	0.71 ± 0.05
SFA	19.58 ± 1.38	21.84 ± 3.08	21.78 ± 0.73	21.74 ± 2.20	22.74 ± 1.18
C16:1n7	7.82 ± 0.94 ^a	7.92 ± 1.42 ^a	6.51 ± 0.39 ^b	6.31 ± 1.04 ^b	7.33 ± 0.36 ^a
C16:1n5	0.52 ± 0.07 ^{ab}	0.62 ± 0.06 ^a	0.51 ± 0.01 ^{ab}	0.52 ± 0.10 ^{ab}	0.46 ± 0.01 ^c
C18:1n9	26.96 ± 0.13 ^a	25.03 ± 0.88 ^b	25.75 ± 0.06 ^b	25.83 ± 0.55 ^b	25.83 ± 0.50 ^b
C18:1n7	4.55 ± 0.50 ^a	4.87 ± 0.33 ^a	4.64 ± 0.26 ^a	4.45 ± 0.23 ^a	4.02 ± 0.02 ^b
C20:1nx	1.96 ± 0.17	1.97 ± 0.31	2.21 ± 0.13	2.10 ± 0.24	1.82 ± 0.09
C22:1	1.50 ± 0.31 ^{ab}	1.19 ± 0.43 ^c	2.03 ± 0.24 ^a	1.66 ± 0.25 ^{ab}	1.47 ± 0.03 ^c
MUFA	43.41 ± 1.06 ^a	41.71 ± 0.83 ^b	41.77 ± 0.23 ^b	41.30 ± 1.14 ^b	41.05 ± 0.76 ^b
C16:2n4	0.91 ± 0.11 ^{cd}	1.12 ± 0.05 ^{ab}	1.28 ± 0.17 ^a	0.99 ± 0.07 ^{bc}	0.80 ± 0.02 ^d
C16:3n4	0.43 ± 0.07 ^b	0.50 ± 0.07 ^{ab}	0.55 ± 0.08 ^a	0.49 ± 0.01 ^{ab}	0.47 ± 0.01 ^{ab}
C18:2n6	16.37 ± 0.30 ^b	14.37 ± 0.60 ^c	16.92 ± 0.08 ^b	16.90 ± 0.24 ^b	18.47 ± 0.15 ^a
C18:3n3	3.21 ± 0.18 ^a	3.33 ± 0.27 ^a	2.96 ± 0.06 ^b	2.46 ± 0.04 ^c	2.60 ± 0.02 ^c
C18:3n4	0.49 ± 0.02 ^a	0.52 ± 0.04 ^a	0.44 ± 0.02 ^b	0.35 ± 0.01 ^c	0.33 ± 0.02 ^c
C20:2n6	0.86 ± 0.09	1.11 ± 0.70	1.03 ± 0.10	0.93 ± 0.17	0.82 ± 0.02
C20:3n6	1.60 ± 0.13 ^a	1.58 ± 0.20 ^a	1.50 ± 0.10 ^a	1.66 ± 0.19 ^a	1.11 ± 0.06 ^b
C20:4n6	2.04 ± 0.16 ^a	2.25 ± 0.29 ^a	1.95 ± 0.13 ^a	1.96 ± 0.20 ^a	1.54 ± 0.10 ^b
C20:3n3	0.75 ± 0.07 ^a	0.79 ± 0.10 ^a	0.67 ± 0.07 ^{ab}	0.59 ± 0.08 ^{bc}	0.48 ± 0.02 ^c
C20:4n3	0.43 ± 0.04 ^a	0.42 ± 0.07 ^a	0.35 ± 0.03 ^{ab}	0.33 ± 0.04 ^b	0.29 ± 0.03 ^b
C20:5n3	5.13 ± 0.39 ^a	5.12 ± 0.70 ^a	4.26 ± 0.36 ^b	4.60 ± 0.48 ^b	3.72 ± 0.19 ^c
C22:5n3	0.56 ± 0.09 ^a	0.59 ± 0.09 ^a	0.48 ± 0.06 ^{ab}	0.46 ± 0.08 ^{ab}	0.38 ± 0.02 ^b
C22:6n3	4.49 ± 0.58 ^a	4.04 ± 0.67 ^b	3.89 ± 0.54 ^b	4.08 ± 0.55 ^b	3.72 ± 0.07 ^b
Σ PUFA	37.69 ± 1.34	36.12 ± 2.88	36.71 ± 1.00	36.56 ± 1.99	35.26 ± 0.58
Σ HUFA	15.01 ± 1.41 ^a	14.78 ± 2.02 ^a	13.09 ± 1.28 ^{ab}	13.69 ± 1.54 ^{ab}	11.25 ± 0.37 ^b
n-3PUFA	14.81 ± 0.99 ^a	14.48 ± 1.89 ^a	12.88 ± 0.98 ^{ab}	12.81 ± 1.29 ^{ab}	11.42 ± 0.31 ^b
n-6PUFA	21.05 ± 0.46 ^a	19.51 ± 1.02 ^b	21.55 ± 0.28 ^a	21.71 ± 0.74 ^a	22.24 ± 0.23 ^a
n-3/n-6	0.70 ± 0.04 ^a	0.74 ± 0.07 ^a	0.60 ± 0.04 ^b	0.59 ± 0.04 ^{bc}	0.51 ± 0.01 ^c
DHA/EPA	0.87 ± 0.06 ^b	0.79 ± 0.02 ^c	0.91 ± 0.05 ^b	0.89 ± 0.03 ^b	1.00 ± 0.03 ^a
ARA/EPA	0.40 ± 0.00 ^d	0.44 ± 0.01 ^b	0.46 ± 0.01 ^a	0.43 ± 0.01 ^{bc}	0.42 ± 0.01 ^c

注:同一行不同上标表示差异显著($P < 0.05$),表中仅列出含量大于 0.3% 的数据

Notes: Values in the same row with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$), the fatty acid with more than 0.3% of total fatty acids is shown in the table

2.3 蜕皮周期内肌肉脂肪酸主要组分的动态变化

中华绒螯蟹幼蟹肌肉脂肪酸各组分中主要必需脂肪酸为 LA、LNA、ARA、EPA、DHA, 以及主要脂肪酸(相对含量大于 4%) 为 C16:0、C18:0、C18:1n9、18:1n7(表 4)。与肝胰腺脂肪酸主要组分比较,肌肉中含量较高的主要脂肪酸中出现了

C18:0, 相对含量 6.0% 以上, 而 C16:1n7 含量低至 1.53%, 只是在 E 期上升至 4.22%, AB-C1-C2 期又逐次下降。

在蜕皮周期中,从 D 期到 C2 期上述肌肉必需及主要脂肪酸含量呈现 5 种变化趋势:一是 E-AB 期含量相对 D 期上升,C1-C2 期、D 期则逐次下降,如 C16:0;二是 E 期含量相对降低,其他各

期含量基本不变,如 C18:0;三是 E、AB 期含量相对较低,其他各期较高且基本保持不变,如 EPA、DHA;四是 E 期含量相对较高,其他各期含量基本保持不变,如 C18:1n9、ARA。或其他各期逐次下降,如 LA、LNA;五是 D 期含量较高,E-AB 期

下降,C1 期略增加,C2-D 期则逐渐上升,如 C18:1n7。从另一个角度看,肌肉 SFA、MUFA 含量在 E-AB 期反而有增加的趋势,PUFA 和 HUFA 含量在 E-AB 期降低。

表 4 不同蜕壳时期中华绒螯蟹幼蟹肌肉脂肪酸组成(%总脂)
Tab. 4 The changes of fatty acid of muscle in different molting periods

脂肪酸 fatty acid	D	E	AB	C1	C2
C14:0	0.40 ± 0.04 ^b	0.70 ± 0.11 ^a	0.58 ± 0.14 ^a	0.37 ± 0.09 ^b	0.34 ± 0.08 ^b
C15:0	0.18 ± 0.01 ^b	0.31 ± 0.03 ^a	0.32 ± 0.07 ^a	0.19 ± 0.05 ^b	0.18 ± 0.04 ^b
C16:0	9.28 ± 0.57 ^c	12.26 ± 0.34 ^a	11.94 ± 2.02 ^a	10.09 ± 0.33 ^b	10.09 ± 0.97 ^b
C18:0	6.61 ± 0.14 ^a	6.09 ± 0.15 ^b	6.86 ± 0.16 ^a	6.54 ± 0.10 ^a	6.50 ± 0.41 ^a
C22:0	1.08 ± 0.09 ^a	0.61 ± 0.02 ^c	0.78 ± 0.21 ^{bc}	0.85 ± 0.13 ^{ab}	0.95 ± 0.09 ^{ab}
C23:0	0.24 ± 0.14 ^{ab}	0.17 ± 0.05 ^b	0.29 ± 0.04 ^{ab}	0.34 ± 0.04 ^{ab}	0.53 ± 0.32 ^a
C24:0	1.86 ± 0.34 ^a	0.84 ± 0.11 ^b	1.62 ± 0.51 ^a	1.51 ± 0.10 ^{ab}	1.70 ± 0.63 ^a
SFA	19.61 ± 0.47 ^b	20.98 ± 0.33 ^{ab}	22.39 ± 1.74 ^a	19.89 ± 0.36 ^b	20.29 ± 1.38 ^{ab}
C16:1n7	1.93 ± 0.14 ^c	4.22 ± 0.25 ^a	2.79 ± 0.67 ^b	1.85 ± 0.31 ^c	1.53 ± 0.42 ^c
C16:1n5	0.28 ± 0.05 ^b	0.49 ± 0.00 ^a	0.39 ± 0.10 ^{ab}	0.29 ± 0.03 ^b	0.32 ± 0.09 ^b
C18:1n9	15.12 ± 0.55 ^b	18.25 ± 0.73 ^a	15.55 ± 1.34 ^b	15.26 ± 0.65 ^b	14.01 ± 0.33 ^b
C18:1n7	4.95 ± 0.08 ^a	4.87 ± 0.25 ^{ab}	4.38 ± 0.15 ^c	4.77 ± 0.21 ^{ab}	4.60 ± 0.05 ^{bc}
C20:1nx	0.91 ± 0.01 ^{bc}	1.40 ± 0.07 ^a	1.06 ± 0.08 ^b	0.88 ± 0.12 ^c	0.94 ± 0.12 ^{bc}
C22:1	0.55 ± 0.07 ^a	0.36 ± 0.04 ^b	0.35 ± 0.10 ^b	0.39 ± 0.01 ^{ab}	0.55 ± 0.16 ^a
MUFA	23.81 ± 0.70 ^{bc}	29.74 ± 0.37 ^a	24.65 ± 1.74 ^b	23.53 ± 0.97 ^{bc}	22.02 ± 0.28 ^c
C16:2n4	0.19 ± 0.07 ^c	0.65 ± 0.00 ^a	0.47 ± 0.04 ^b	0.20 ± 0.12 ^c	0.25 ± 0.14 ^c
C16:3n4	0.40 ± 0.05 ^b	0.75 ± 0.05 ^a	0.84 ± 0.17 ^a	0.45 ± 0.03 ^b	0.46 ± 0.05 ^b
C18:2n6	8.17 ± 0.21 ^b	9.29 ± 0.08 ^a	9.08 ± 0.67 ^a	8.74 ± 0.26 ^{ab}	8.41 ± 0.03 ^b
C18:3n3	1.33 ± 0.05 ^c	2.28 ± 0.09 ^a	2.05 ± 0.13 ^a	1.58 ± 0.11 ^b	1.30 ± 0.01 ^c
C18:4n3	0.86 ± 0.02 ^{ab}	0.55 ± 0.01 ^c	0.75 ± 0.11 ^b	0.78 ± 0.05 ^b	0.95 ± 0.11 ^a
C20:2n6	0.21 ± 0.15	0.39 ± 0.14	0.25 ± 0.03	0.14 ± 0.04	0.36 ± 0.22
C20:3n6	2.42 ± 0.03 ^{ab}	2.11 ± 0.00 ^b	2.32 ± 0.24 ^{ab}	2.58 ± 0.15 ^a	2.36 ± 0.21 ^{ab}
C20:4n6	5.23 ± 0.02 ^a	4.71 ± 0.01 ^b	5.35 ± 0.46 ^a	5.22 ± 0.19 ^a	5.20 ± 0.43 ^a
C20:3n3	0.88 ± 0.03 ^{ab}	0.95 ± 0.01 ^a	0.87 ± 0.09 ^{ab}	0.78 ± 0.04 ^b	0.76 ± 0.09 ^b
C20:4n3	0.29 ± 0.07	0.29 ± 0.02	0.25 ± 0.02	0.31 ± 0.03	0.44 ± 0.20
C20:5n3	19.81 ± 0.15 ^a	15.93 ± 0.13 ^b	17.49 ± 0.51 ^b	19.51 ± 0.60 ^a	19.57 ± 1.60 ^a
C22:2n6	0.56 ± 0.16 ^a	0.38 ± 0.01 ^{ab}	0.30 ± 0.15 ^b	0.40 ± 0.01 ^{ab}	0.55 ± 0.09 ^a
C22:5n3	0.79 ± 0.02	0.75 ± 0.02	0.71 ± 0.12	0.73 ± 0.07	0.79 ± 0.08
C22:6n3	15.14 ± 0.87 ^a	9.87 ± 0.35 ^b	11.76 ± 2.11 ^b	14.88 ± 1.07 ^a	15.38 ± 0.58 ^a
∑ PUFA	56.58 ± 1.02 ^{ab}	49.33 ± 0.36 ^c	52.90 ± 3.45 ^{bc}	56.58 ± 1.72 ^{ab}	57.25 ± 1.90 ^a
∑ HUFA	44.56 ± 0.93 ^a	34.61 ± 0.37 ^c	38.76 ± 4.38 ^b	44.02 ± 1.98 ^a	44.49 ± 2.71 ^a
n-3PUFA	39.09 ± 0.87 ^a	30.63 ± 0.37 ^b	33.89 ± 3.73 ^b	38.58 ± 1.82 ^a	39.19 ± 1.99 ^a
n-6PUFA	16.67 ± 0.12 ^c	16.96 ± 0.17 ^{bc}	17.55 ± 0.18 ^a	17.23 ± 0.10 ^{ab}	17.05 ± 0.32 ^b
n-3/n-6	2.34 ± 0.04 ^a	1.81 ± 0.03 ^b	1.93 ± 0.22 ^b	2.24 ± 0.10 ^a	2.30 ± 0.08 ^a
DHA/EPA	0.76 ± 0.05 ^a	0.62 ± 0.02 ^b	0.67 ± 0.07 ^b	0.76 ± 0.04 ^a	0.79 ± 0.04 ^a
ARA/EPA	0.26 ± 0.00 ^b	0.30 ± 0.00 ^a	0.31 ± 0.00 ^a	0.27 ± 0.00 ^b	0.27 ± 0.00 ^b

注:同一行不同上标表示差异显著($P < 0.05$),表中仅列出含量大于 0.3% 的数据

Notes: Values in the same row with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$), the fatty acid with more than 0.3% of total fatty acids is shown in the table

3 讨论

3.1 蜕皮周期内肝胰腺和肌肉总脂及脂类组成的动态变化

肝胰腺是甲壳动物脂类物质的主要储存器官和代谢中心^[15]。甲壳动物在蜕皮前后需要停止摄食完成蜕皮过程,肝胰腺中储存的脂类是其蜕皮过程中主要能量来源物质之一,因此在蜕皮前期会储存有关的脂质以备后续新的外骨骼形成及停食期间新陈代谢所需^[16]。本研究结果表明,中华绒螯蟹幼蟹蜕皮前(D期)肝胰腺脂肪含量最高,蜕皮期(AB期)最低,这是由于E期中华绒螯蟹幼蟹蜕皮需要消耗较多能量,而在AB期要进行内表皮重新构建等生理活动,因此,在E期和AB期具有较大的脂类消耗导致总脂含量下降,这也说明幼蟹蜕皮过程中消耗了大量肝胰腺中储存的脂类物质(甘油三酯);此外,蜕皮后的肝胰腺的总脂含量显著下降也可以与蜕皮后肌肉组织生长有关,肌肉等组织的生长需要磷脂来构建其膜结构^[17]。此后,随着幼蟹的正常摄食,肝胰腺中的总脂含量、甘油三酯的相对含量均有所上升,这暗示幼蟹已经开始积累肝胰腺脂类物质为下一次蜕皮做准备。

相对而言,肌肉中总脂在D期到C2期与肝胰腺总脂变化趋势是相反的,而且肌肉中总脂含量相对稳定,占干重的3.60%~6.08%。从D期开始逐渐上升至AB期最高,表明肌肉中并未储存较多的脂质,当肌肉中储存的脂类不足以提供蜕皮的能量消耗时,则从肝胰腺中进行转移,这一点也可以从E期肌肉中TG和FFA含量上升推测出来。另外,蜕皮过程中机体对矿物质的转运与重吸收和水分含量也会对肌肉总脂产生一定的影响^[17]。中华绒螯蟹血淋巴中总糖、总脂和蛋白在D期都达到最高,蜕壳后各期总脂、总糖开始下降^[18],表明中华绒螯蟹蜕皮过程中肝胰腺和肌肉之间发生了物质转移,这与本实验结果是一致的。肌肉C1期、C2期总脂下降向D期水平靠近,表明中华绒螯蟹摄食对肌肉组织中脂质组分影响较小。吴旭干等^[19]研究认为,脂类被肝胰腺吸收后可被选择性地转运到肌肉等组织中,所以肝胰腺中的脂类组分更容易受到影响,而肌肉中的则保守性较强。

TG是肝胰腺中脂质的主要成分和主要的能

量储存形式,并且TG含量易受到机体营养状况的影响^[20]。本实验条件下肝胰腺TG占总脂含量的71.01%~92.69%,在D期最高,C1期最低,同时游离脂肪酸在E期、AB期显著高于D期,表明肝胰腺中TG是中华绒螯蟹幼蟹蜕皮期和蜕皮后期能量消耗的主要来源。TG在C1、C2上升,表明摄食对肝胰腺TG的恢复性积累发挥着重要的作用。C1期的游离脂肪酸高于C2期,表明中华绒螯蟹蜕皮后再摄食期间脂质代谢较旺盛。另外,从D期到C2期,肝胰腺TG含量与肝胰腺总脂含量变化一致,表明肝胰腺总脂变化与TG代谢有关。肌肉和肝胰腺中的脂类组成也有很大的不同,肌肉中TG含量很低,超过90%的脂质是PL,这可能与中华绒螯蟹肌肉中脂类是肌纤维及相关膜结构的主要组分有关^[21]。肌肉中TG从D期开始上升到E期最高,相对D期上升14%,几乎是D期的四倍,蜕皮后,TG在AB期下降14%,达到D期水平,表明E期中华绒螯蟹剧烈的蜕皮活动需要消耗肌肉大量能量,而肌肉并不能长期储存大量的脂类物质,故作为主要能量物质的TG在E期被肝胰腺分解转移到肌肉中,从而导致肌肉TG水平上升。肌肉中游离脂肪酸含量在E期上升也可以证明这一点。另外,TG在D期显著高于C1和C2期,表明虽然肌肉不能长期大量储存TG,但蜕壳前肝胰腺中还是有一部分TG被分解后转移至肌肉重新合成中,以备蜕皮过程能量之需。

无论在肝胰腺还是在肌肉组织中,PL含量的变化与TG有相反的趋势,肝胰腺中PL从D期到AB期先上升至最高,可能有两方面的原因:一是中华绒螯蟹幼蟹不具备磷脂合成能力或者合成能力较低^[22],在此阶段中华绒螯蟹不摄食,无外源PL补充,那么PL含量的变化主要由自身消耗或其他物质的代谢引起。甲壳动物在饥饿条件下会优先对中性脂肪TG进行分解代谢^[23],肝胰腺PL含量升高可能是因为TG被分解转移进入肌肉后相对量减少而引起的;二是在蜕皮过程中,蟹壳上表皮和外表皮降解,其中相关的磷酸与脂肪酸可能暂时转移到肝胰腺中储存起来,使得其PL含量升高。另外,蟹壳内表皮和膜层在AB期开始形成,极性脂(PL和CHO)通常为细胞膜的结构物质^[23],被转移进肝胰腺中的磷酸与脂肪酸可以为新膜的构建提供原料。田志环等^[17]研究

也认为,中华绒螯蟹外表层和上表层在蜕皮前合成,而内表层和膜层则在蜕皮后合成,表明蜕皮后中华绒螯蟹膜结构的形成需要大量的 PL。肝胰腺 PL 含量在 C1 期下降可能是由于中华绒螯蟹摄食, TG 在肝胰腺中恢复性补充,其含量上升而导致 PL 相对减少。肌肉 PL 含量较稳定,仅 E 期显著低于其他各期。FFA 在 E 期显著高于其他各期,而 FFA 是 TG 分解的中间产物,其含量的升高,表明 E 期 PL 含量下降可能并非主要由 PL 消耗引起,而是肝胰腺中 TG,降后经血淋巴转移进肌肉中重新合成 TG,增加了 TG 的相对量而造成的,这也可以从 E 期 TG 含量几乎是 D 期和 AB 期的 4 倍得到间接证明。另外,肌肉在 AB 期 PL 含量较低,而其 FFA 和 TG 含量也低,表明 AB 期 PL 含量低的原因并非因为 TG 的变化引起,而是 PL 参与膜的重构而消耗了。FFA、MG 为 TG 分解的中间产物,FFA 通过血淋巴被运输到机体各个部位,并为机体代谢提供能量或组织重构提供原料。肝胰腺中 FFA 和 MG 变化趋势一样,在 C1 期最高,其次为 C2 期,表明摄食后,机体快速积累脂质,而 C1 期积累营养的强度显著高于 C2 期,可能是因为中华绒螯蟹摄食,食物中的 TG 分解为 MG 和 FFA 较多所致。D 期、E 期、AB 期主要是 TG 分解释放 FFA、MG,中华绒螯蟹蜕皮耗能或合成内皮层等结构消耗较多,故 D 期、E 期、AB 期肝胰腺 FFA、MG 含量显著低于 C1 和 C2 期。本实验肌肉中 FFA、MG 含量在 E 期最高,是因为肝胰腺中 TG 分解为 FFA、MG 被转移到肌肉中所致,这与肌肉中总脂、TG 含量升高是相对应的。

甲壳动物自身不能合成胆固醇,胆固醇是固醇类激素,如蜕皮激素前体^[3],肝胰腺中胆固醇在 D 期、E 期、AB 期显著低于 C1、C2 期,表明在前三期可能因合成蜕皮激素消耗了较多的胆固醇。C1 和 C2 期由于处于蜕皮间期,胆固醇消耗较少,而且食物中外源胆固醇也可补充蜕皮时的消耗,故其含量升高。与肝胰腺同期相比,肌肉胆固醇各期含量均显著高于肝胰腺,这可能是因为肌肉中 90% 的脂类是磷脂,同时较高含量的胆固醇和磷脂有利于提高甲壳动物的生长率与成活率^[24]。

3.2 蜕皮周期内肝胰腺和肌肉脂肪酸主要组分的动态变化

SFA 和 MUFA 主要参与 TG 的合成和积累,

而 TG 是生物体重要的能源^[25]。肝胰腺中几乎 90% 的脂类为 TG,在本研究中中华绒螯蟹蜕皮从 E 期到 AB 期不摄食,机体总体上处于物质消耗状态,因此 SFA 和 MUFA 均被消耗了一部分。但从 D 期 MUFA 含量显著高于蜕皮过程的其他各期,而 SFA 含量在各期无显著性变化来看, MUFA 相对被消耗得更多,至少说明 SFA 和 MUFA 作为能源在蜕皮代谢过程中供能的贡献是不成比例的。就 MUFA 组分中各脂肪酸比例的权重而言, C18:1 系列(尤其是 C18:1n9)贡献最大(表 3)。成永旭等^[3]研究表明,中华绒螯蟹在不同生长阶段, MUFA 都是中华绒螯蟹最主要的脂肪酸,在未成熟阶段其含量可占肝胰腺总脂的 24%~26%;张文军等^[1]认为,中华绒螯蟹蜕皮过程中主要消耗脂质中的 C18:1n9,本研究也得出类似的结论,但本实验中同时也表明蜕皮后期 C16:1n7 消耗较多。

正常情况下, PUFA 和 HUFA 不作为供能脂肪酸,而是生物膜的重要构件^[23]。肝胰腺在 D、E 期含量显著高于其他各期,表明肝胰腺在蜕皮前积累了较多的 HUFA。蜕皮过程中肝胰腺 PUFA 和 HUFA 含量总体上的减少,以及 HUFA 在 E、AB-C1 期相对含量的显著减少,应该是被转移且在新膜构建中被消耗了。另外,从 C2-D 期 HUFA 含量逐步增加情况看,表明其补充需要从食物中获得。较高含量的 HUFA 可以提高水生动物幼体成活率和增重率^[26],其中 DHA、EPA 和 ARA 是甲壳动物生长发育的重要 HUFA,因此对中华绒螯蟹新陈代谢起着重要的作用^[5]。DHA、EPA 和 ARA 一旦被消耗后需要及时得到补充,才能维持机体正常的生长和新陈代谢过程。肝胰腺中 DHA、EPA 和 ARA 从 D 到 C2 一直呈下降趋势,这是因为中华绒螯蟹不能通过自身的脂类代谢合成这些脂肪酸,只能从食物中获取。中华绒螯蟹虽然在 C1 期即恢复摄食,但肝胰腺中的这些脂肪酸含量却在 C2 后才开始上升。

与肝胰腺相比,肌肉 SFA、MUFA 含量在 E-AB 期反而有增加的趋势,同时,肝胰腺 MUFA 在 E 期和 AB 期含量降低,表明蜕皮过程中的主要能源可能不是来自肌肉中 SFA 和 MUFA,而是来自肝胰腺。肌肉 MUFA 仅在 E 期含量显著高于其他各期也可以支持这个结论,而且 C18:1n9 含量变化与 MUFA 一致,表明肌肉中 C18:1n9 对

MUFA 的增加贡献最大,同时肝胰腺中 MUFA 含量降低也可以解释这一点。肌肉 PUFA 和 HUFA 含量在 E-AB 期相对降低,表明其在新膜构建中更多地被消耗。肌肉中的 DHA、EPA 和 ARA 3 种脂肪酸水平与肝胰腺中变化一致,均在 E 期和 AB 期有所降低,可能是这两个时期的生物膜用于构建而消耗较多^[23]。在 C1、C2 期即回升到 D 期,表明食物中 DHA、EPA 和 ARA 可能被消化吸收后优先满足肌肉之需,保持肌肉脂质含量的稳定性,而肝胰腺中对应脂肪酸的补充或储存明显存在滞后现象。

4 小结

蜕皮是中华绒螯蟹生长发育过程中重要的生理过程,蜕皮间期至蜕皮前期肝胰腺中存在明显的脂质积累,在 D 期达到最大值,以备蜕皮过程的能量消耗及蜕皮后停食期间生命代谢之需。肌肉中的总脂及其组分和含量具有一定的保守性,在蜕皮过程中并不呈现与肝胰腺同样的变化趋势,仅在 E 期或 AB 期两个时期出现显著差异,其主要能源脂肪酸可能来自肝胰腺。因此,可以在中华绒螯蟹幼蟹蜕皮前进行脂类营养强化提高肝胰腺总脂含量,以及针对性地进行 C16:1n7、C18:0、C18:1n9、C18:1n7、LA、LNA、ARA、EPA、DHA 等脂肪酸及 PL 营养强化,将有助于提高蜕皮成功率和蜕皮后的成活率。

参考文献:

- [1] Zhang W J, He S S, Cheng Y X, *et al.* The change of fatty acids composition in hepatopancreas of juvenile Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) before and after molt [C] // Shanghai: Shanghai Animal Association. Zoology Album-Shanghai Zoological Society Proceedings of Conference. The Shanghai Institute of Zoology, 2002: 24 - 27. [张文军, 贺诗水, 成永旭, 等. 蜕壳前后中华绒螯蟹幼蟹肝胰腺脂肪酸组成变化. 上海: 上海市动物协会. 动物学专辑 - 上海市动物学会 2002 年年会论文集. 2002: 24 - 27.]
- [2] Shen Y C, Chen Z A, Liu L, *et al.* The effects of salinity and nutrition on molt and growth of *Litopenaeus vannamei* [J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(2): 291 - 299. [申玉春, 陈作洲, 刘丽, 等. 盐度和营养对凡纳滨对虾蜕皮和生长的影响. 水产学报, 2012, 36(2): 291 - 299.]
- [3] Cheng Y X, Du N S, Lai W. Lipid composition in hepatopancreas of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* at different stages [J]. Acta Zoologica Sinica, 1998, 44(4): 420 - 429. [成永旭, 堵南山, 赖伟. 不同阶段中华绒螯蟹肝胰腺的脂类及脂肪酸组成. 动物学报, 1998, 44(4): 420 - 429.]
- [4] Innis S M. The role of dietary n-6 and n-3 fatty acids in the developing brain [J]. Developmental Neurosciences, 2000, 22(5): 474 - 480.
- [5] Lovrich G A, Ouellet P. Patterns of growth and triacylglycerol content in snow crab *Chionoecetes opilio* (Brachyura: Majidae) zoeal stages reared in the laboratory [J]. Marine Biology, 1994, 120: 585 - 591.
- [6] Wang Y, Yang Z G, Guo Z H, *et al.* The full length cDNA cloning and expression analysis of RXA from the Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(12): 1761 - 1769. [王瑶, 杨志刚, 郭子好, 等. 中华绒螯蟹 RXR 基因全长 cDNA 克隆及表达分析. 水产学报, 2013, 37(12): 1761 - 1769.]
- [7] Kang X J, Tian Z H, Wu J L, *et al.* Molt stages and changes in digestive enzyme activity in hepatopancreas during molt cycle of Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* [J], Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(5): 806 - 812. [康现江, 田志环, 吴江立, 等. 中华绒螯蟹蜕皮周期及蜕皮过程中肝胰腺消化酶活性的变化. 中国水产科学, 2012, 19(5): 806 - 812.]
- [8] Tian Z H, Kang X J, Jiao C Z. Changes in cell type composition in the hepatopancreas of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* during the molting cycle [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(6): 1175 - 1181. [田志环, 康现江, 焦传珍. 中华绒螯蟹蜕皮周期中肝胰腺细胞组成的变化. 中国水产科学, 2013, 20(6): 1175 - 1181.]
- [9] Takeuchi T, Nakamoto Y, Hamasaki K, *et al.* Requirement of n-3 highly unsaturated fatty acids for larval swimming crab *Portunus trituberculatus* [J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1999, 65(5): 797 - 803.
- [10] Takeuchi T, Satoh N, Sekiya S, *et al.* The effect of dietary EPA and DHA on the molting rate of larval swimming crab *Portunus trituberculatus* [J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1999, 65(6): 998 - 1004.
- [11] Suprayudi M A, Takeuchi T, Hamasaki K. Essential fatty acids for larval mud crab *Scylla serrata*: Implications of lack of the ability to bioconvert C18 unsaturated fatty acids to highly unsaturated fatty

- acids[J]. *Aquaculture*,2004,231(1):403-416.
- [12] Shao L C, Wang C, He J, *et al.* Meat quality of Chinese mitten crabs fattened with natural and formulated diets[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*,2014,23(1):59-72.
- [13] Folch J, Lees M, Sloane-Stanley G H. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues[J]. *Journal of Biological Chemistry*,1957,226(1):497-509.
- [14] Wu X G, Zhou B, Cheng Y X, *et al.* Comparison of gender differences in biochemical composition and nutritional value of various edible parts of the blue swimmer crab[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*,2010,23(2):154-159.
- [15] Wu X G, Zhou B, Cheng Y X, *et al.* Comparison of gender differences in biochemical composition and nutritional value of various edible parts of the blue swimmer crab[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*,2010,23(2):154-159.
- [16] Wu X G, Yu Z Y, Cheng Y X, *et al.* Effect of four groups of live feeds on larval development, growth (from Z4 to Megalopa) and fatty acid composition of *Eriocheir sinensis*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*,2007,14(6):911-918. [吴旭干,于志勇,成永旭. 4组生物饵料对中华绒螯蟹Z4到大眼幼体生长发育和脂肪酸组成的影响. *中国水产科学*,2007,14(6):911-918.]
- [17] Tian Z H, Kang X J, Wu J L. Biochemical changes in haemolymph during the molt cycle of Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* [J]. *Guangdong Agricultural Science*,2012(12):142-144. [田志环,康现江,吴旭干,等. 中华绒螯蟹蜕皮过程中血淋巴主要生化成分的变化. *广东农业科学*,2012(12):142-144.]
- [18] Wu X G, Cheng Y X, Chang G L, *et al.* Effect of enriching broodstock on reproductive performance and Z1 quality of *Eriocheir sinensis*[J]. *Journal of Fisheries of China*,2007,31(6):757-764. [吴旭干,成永旭,常国亮. 亲本强化培育对中华绒螯蟹雌体生殖性能和Z1幼体质量的影响. *水产学报*,2007,31(6):757-764.]
- [19] Chandumpai A, Dall W, Smith D M. Lipid-class composition of organs and tissues of the tiger prawn *Penaeus esculentus* during the moulting cycle and during starvation [J]. *Marine Biology*, 1991, 108(2):235-245.
- [20] Barclay M C, Dall W, Smith D M. Changes in lipid and protein during starvation and the moulting cycle in the tiger prawn, *Penaeus esculentus*[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*,1983,68(3):229-244.
- [21] Cheng Y X, Yan S L, Wang W, *et al.* Effect of dietary polyunsaturated fatty acids phospholipids on the survival and growth of *Eriocheir sinensis* from the megalopa to the juvenile[J]. *Journal of Fisheries of China*,1998,22(1):9-15. [成永旭,严生良,王武. 饲料中磷脂和多不饱和脂肪酸对中华绒螯蟹大眼幼体育成仔蟹的成活率和生长的影响. *水产学报*,1998,22(1):9-15.]
- [22] Stuck K C, Watts S A, Wang S Y. Biochemical responses during starvation and subsequent recovery in postlarval Pacific white shrimp, *Penaeus vannamei* [J]. *Marine Biology*,1996,125(1):33-45.
- [23] Tian Z H, Kang X J, Jiao C Z. Structural and constituent changes in integument during the molt cycle of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*,2013,37(5):899-904. [田志环,康现江,焦传珍. 中华绒螯蟹蜕皮过程中体壁结构和主要成分的变化. *水生生物学报*,2013,37(5):899-904.]
- [24] Sui L Y, Mathieu W, Cheng Y X, *et al.* The effect of dietary n-3 HUFA levels and DHA/EPA ratios on growth, survival and osmotic stress tolerance of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* larva [J]. *Aquaculture*,2007,273(1):139-150.
- [25] Xu S L, Zhang W, Yan X J, *et al.* Analysis and comparison of nutritional quality between wild and cultured *Portunus trituberculatus*[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*,2009,21(5):695-702. [徐善良,张薇,严小军,等. 野生与养殖三疣梭子蟹营养品质分析及比较. *动物营养学报*,2009,21(5):695-702.]
- [26] Chang G L, Wu X G, Cheng Y X, *et al.* Effects of phospholipid and highly unsaturated fatty acid on survival, weight gain, molting and biochemical composition of juvenile Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*,2011,18(2):329-337. [常国亮,吴旭干,成永旭,等. 磷脂和HUFA对中华绒螯蟹幼蟹存活、生长、蜕壳及生化组成的影响. *中国水产科学*,2011,18(2):329-337.]

Dynamic changes of lipids in hepatopancreas and muscle during the molting cycle of young Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)

MA Mingjun¹, WANG Chun^{1,2}, WU Xugan¹, HE Jie¹, LONG Xiaowen¹,
LI Guoxiang², TANG Beiwei², CHENG Yongxu^{1*}

(1. Key Laboratory of Freshwater Aquatic Genetic Resources, Ministry of Agriculture,
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Sihong Jinshui Co. Ltd, Sihong 223900, China)

Abstract: The Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* is an important freshwater aquaculture species in China. Molting death syndrome (MDS) is a common phenomena during the culture of *E. sinensis*, which maybe related to the deficiency and unbalance of lipid deposition in the body of *E. sinensis*. Therefore, this study was designed to investigate the dynamic changes of lipids in the hepatopancreas and muscle during the molting cycle of young *E. sinensis* by the biochemical analysis. Based on the changes of external morphology, the molting cycle of the crab was divided into four stages, premolt (D), molt (E), postmolt (AB), intermolt (C1 and C2). The results showed that there was significant difference on the total lipids of hepatopancreas among the different molting stages ($P < 0.05$) and the trend of “high-low-high” was found for the total lipids in the hepatopancreas of *E. sinensis*. The opposite trend was found on the total lipids of muscle, and the trend was “low-high-low” with the highest total lipids in AB stage. The hepatopancreas had the high triacylglycerol (TG) levels while the muscle contained the high phospholipid (PL) percentages (% total lipids). The hepatopancreas TG decreased significantly from D to C1 stage, then increased significantly after that stage while the lowest TG level was found in the E stage of muscle. As for the fatty acid composition, the dominated fatty acids ($\geq 4\%$ total fatty acids) were C16:0, C18:1n9, C18:1n7, C18:2n6 (LOA), C20:5n3 (EPA) and C22:6n3 (DHA) for both hepatopancreas and muscle. During the molting cycle, the saturated fatty acid (SFA) and polyunsaturated fatty acid (PUFA) remained relatively stable while the decreasing trends were found on monosaturated fatty acid (MUFA) and highly unsaturated fatty acids (HUFA) in hepatopancreas, and the highest DHA and EPA levels were found in D stage of hepatopancreas. For the muscle, the trend of “low-high-low” were found on SFA and MUFA while PUFA and HUFA had the opposite trends during the molting cycle of *E. sinensis*. In conclusion, the significant changes were found on the lipid classes and fatty acid composition for the hepatopancreas and muscle during the molting cycle, the hepatopancreas lipids may be one of the major energy source during the molting process of young *E. sinensis*.

Key words: *Eriocheir sinensis*; molting cycle; lipids; hepatopancreas; muscle

Corresponding author: CHENG Yongxu. E-mail: yxcheng@shou.edu.cn