

饲料中添加雨生红球藻粉对中华绒螯蟹成体雄蟹生化组成的影响

龙晓文^① 赵磊^① 麻楠^① 刘建国^② 吴旭干^{①③④*} 成永旭^{①③④}

① 上海海洋大学 农业部鱼类营养和环境生态研究中心 上海 201306; ② 中国科学院海洋研究所海洋生物中心 青岛 266071; ③ 上海海洋大学 上海水产养殖工程技术研究中心 上海 201306; ④ 上海海洋大学 水产科学国家级实验教学示范中心 上海 201306

摘要: 为研究饲料中添加雨生红球藻 (*Haematococcus pluvialis*) 粉对中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*) 成体雄蟹成活、增重和生化组成的影响, 分别在饲料中添加 0、0.2%、0.4% 和 0.6% 的雨生红球藻粉, 配制 4 种等氮等脂的育肥饲料, 投喂生殖蜕壳后雄蟹 60 d, 计算各组成活率、增重率、特定生长率和肥满度, 同时测定了组织中的常规营养成分、脂肪酸组成和类胡萝卜素含量, 并对实验数据进行方差分析。结果显示: (1) 饲料中添加雨生红球藻粉对成体雄蟹的成活率、增重率、特定生长率和肥满度均无显著影响。(2) 雄蟹性腺中的粗蛋白及肝胰腺总脂含量均以雨生红球藻粉 0.4% 组最高, 而肌肉水分含量随饲料中雨生红球藻粉含量的升高整体呈上升趋势 ($P < 0.05$)。(3) 性腺中的脂肪酸 C20:0 含量随饲料雨生红球藻粉添加水平的升高而显著上升, 而 C16:1n7、C18:2n6 和 C18:3n3 含量分别在雨生红球藻粉 0.6% 组、0.4% 组和 0 组最高 ($P < 0.05$)。(4) 肝胰腺中的脂肪酸 C14:0、C18:0 和 C18:1n7 含量均以雨生红球藻粉 0.2% 组最高, 而 C18:1n9 和总单不饱和脂肪酸 (Σ MUFA) 含量均以雨生红球藻粉 0.6% 组最高 ($P < 0.05$)。(5) 肌肉中的脂肪酸 C14:1n5 和 C20:2n6 含量在雨生红球藻粉 0.2% 组最高 ($P < 0.05$), C16:0 含量及二十二碳六烯酸/二十碳五烯酸 (DHA/EPA) 比例以雨生红球藻粉 0.4% 组最高, 而 C22:6n3、总多不饱和脂肪酸 (Σ PUFA)、 Σ n-3 PUFA 和总高度不饱和脂肪酸 (Σ HUFA) 含量均以雨生红球藻粉 0.6% 组最高 ($P < 0.05$)。(6) 肝胰腺中的虾青素、 β -胡萝卜素和头胸甲中的虾青素、叶黄素、玉米黄素含量随饲料中雨生红球藻粉含量的升高而显著上升 ($P < 0.05$)。综上, 饲料中添加雨生红球藻粉对成体雄蟹成活率、增重率和肥满度无显著影响, 但可提高性腺粗蛋白、肌肉总多不饱和脂肪酸、肝胰腺和头胸甲中的类胡萝卜素含量, 雄蟹育肥饲料中适宜的雨生红球藻粉添加量建议为 0.4% 左右。

关键词: 雨生红球藻粉; 中华绒螯蟹雄体; 常规成分; 脂肪酸组成; 类胡萝卜素组成

中图分类号: Q955 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2018) 02-278-14

Effects of Dietary Supplementation Powder of *Haematococcus pluvialis*

基金项目 上海市科学技术委员会科研项目 (No. 13320502100), 科技部港澳台科技合作专项项目 (No. 2014DFT30270), 上海高校水产学一流学科建设项目 (No. 2012-62-0908), 深圳澳华农牧科技有限公司委托项目 (No. D-8006-15-0054), 农业部现代农业产业技术体系专项资金项目岗位科学家项目 (No. CARS-46);

* 通讯作者, E-mail: xgwu@shou.edu.cn;

第一作者介绍 龙晓文, 男, 博士研究生; 研究方向: 水产动物营养与生理; E-mail: longxiaowen123@sina.com。

收稿日期: 2017-06-22, 修回日期: 2017-11-02 DOI: 10.13859/j.cjz.201802014

on the Body Biochemical Composition of Adult Male Chinese Mitten Crab (*Eriocheir sinensis*)

LONG Xiao-Wen^① ZHAO Lei^① MA Nan^① LIU Jian-Guo^②
WU Xu-Gan^{①③④*} CHENG Yong-Xu^{①③④}

① Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrition of Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306;

② Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071; ③ Shanghai Engineering Research Center of Aquaculture,

Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; ④ National Demonstration Centre for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai

Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: This study was conducted to investigate the effects of dietary supplementation of *Haematococcus pluvialis* powder on survival, weight gain and biochemical composition of adult male Chinese Mitten Crab (*Eriocheir sinensis*). Four isonitrogenous and isolipidic fattening diets were formulated by adding powder of *H. pluvialis* in 0, 0.2%, 0.4% and 0.6% in weight to feed the adult male *E. sinensis* for 60 days (defined as D1 - D4) (Table 1). The survival rate, weight gain rate, specific growth rate and condition factor were measured and the proximate composition, fatty acid profile and carotenoid content in the tissues of male *E. sinensis* were detected. The experimental data was statistically analyzed with variance analysis. The results showed as the followings: (1) dietary supplementation powder of *H. pluvialis* had no significant effects on the survival rate, weight gain rate, specific growth rate and condition factor of adult male *E. sinensis* ($P > 0.05$) (Table 2). (2) The highest contents of protein was detected in the gonad and hepatopancreas lipid in the treatment D3, while the content of moisture in the muscle showed an increasing trend with the increasing of the powder of *H. pluvialis* in the diet ($P < 0.05$) (Table 3). (3) An increasing trend was found for the fatty acid C22:0 in the gonad with increasing powder of *H. pluvialis* powder in the diet, while the highest contents of C16:1n7, C18:2n6 and C18:3n3 were detected in the treatment of D4, D3 and D1, respectively ($P < 0.05$) (Table 4). (4) Individuals in treatment D2 had the highest contents of C14:0, C18:0 and C18:1n7 in the hepatopancreas, while the highest contents of C18:1n9 and total monounsaturated fatty acids (\sum MUFA) were detected in treatment D4 ($P < 0.05$) (Table 5). (5) The highest C14:0 was found in the muscle for individuals in treatment D1, while individuals in treatment D2 showed the highest C14:1n5 and C20:2n6 ($P < 0.05$), the crabs in treatment D3 had the highest percentage of C16:0 and DHA/EPA ratio in their muscle, while the highest contents of C22:6n3, total polyunsaturated fatty acids (\sum PUFA), as well as \sum n-3 PUFA and total highly unsaturated fatty acids (\sum HUFA) were detected in D4 treatment ($P < 0.05$) (Table 6). (6) The contents of astaxanthin and β -carotene in the hepatopancreas as well as astaxanthin, lutein and zeaxanthin in the carapace increased significantly with increase of *H. pluvialis* powder in the diet ($P < 0.05$) (Table 7). In conclusion, dietary supplementation of powder *H. p luvialis* had no significant effects on the survival rate, weight gain rate and condition factor for adult male *E. sinensis*, while increased the contents of gonadal protein and muscle total polyunsaturated fatty acids as well as the carotenoid contents in the hepatopancreas and carapace. These results suggested that the optimal diet was with powder of *H. pluvialis* at approximately 0.4 %.

Key words: *Haematococcus pluvialis* powder; Male *Eriocheir sinensis*; Proximate composition; Fatty acid composition; Carotenoid composition

中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*) 俗称河蟹, 是我国重要的经济养殖蟹类之一, 因其营养价值高和风味独特而深受广大消费者的喜爱 (Wu et al. 2007a, Wang et al. 2016), 据统计 2016 年全国河蟹总产量高达 78.2 万吨左右, 且主要来源于池塘养殖 (农业部渔业渔政管理局 2017)。尽管我国河蟹产量巨大, 但池塘养殖河蟹煮熟后的颜色普遍偏淡, 而湖泊增殖或野生种类颜色通常偏红, 因此颜色偏淡已成为制约池塘养殖河蟹品质提升的重要因素之一 (Kong et al. 2012)。研究表明, 甲壳动物色泽与其体内类胡萝卜素 (尤其是虾青素) 的组成和含量密切相关 (Wade et al. 2015a, Long et al. 2017), 但其自身无法从代谢途径上游合成虾青素等类胡萝卜素, 主要依赖于饵料中的外源类胡萝卜素 (Yamada et al. 1990, Dall et al. 1995), 因此池塘养殖虾蟹类颜色偏淡可能与其饵料中的类胡萝卜素含量较低有关 (Kong et al. 2012, Wade et al. 2015a)。

近年来, 已有学者通过在饲料中添加不同类胡萝卜素来改善虾蟹色泽、抗氧化能力和免疫性能的研究报道, 通常虾青素的效果要优于其他类胡萝卜素 (Supamattaya et al. 2005, Wade et al. 2015b)。雨生红球藻 (*Haematococcus pluvialis*) 作为天然虾青素的主要合成者之一, 通常含 1.5%~6.0% 的虾青素, 大多以酯化形式存在, 且主要为全反式结构, 其稳定性和生物学效价较高 (Chien et al. 1992, Yuan et al. 2000), 因此被认为是一种具有较大潜力的饲料添加剂, 目前在河蟹饲料中已有一定应用 (龚志等 2014, Long et al. 2017)。研究表明, 饲料中添加雨生红球藻粉可改善河蟹的生长、色泽、抗氧化能力和免疫性能, 但有关其对河蟹营养价值的影响所知甚少 (郭春雨 2007, 龚志等 2014), 仅 Long 等 (2017) 报道了饲料中添加雨生红球藻粉对河蟹雌体常规营养成分和类胡萝卜素组成的影响。

众所周知, 性腺、肝胰腺和肌肉是河蟹的三大可食部位, 其生化组成及类胡萝卜素含量

对河蟹的营养价值和感官评价具有重要影响 (Wu et al. 2007a, Long et al. 2017), 因此在河蟹养殖过程中, 通常给生殖蜕壳后河蟹投喂含有类胡萝卜素 (尤其是虾青素) 的优质育肥饲料 (性腺发育期的饲料) 来提高其营养价值和品质 (Wu et al. 2017, 麻楠等 2017)。由于河蟹雌雄个体间的生殖蜕壳时间和性腺发育规律差异较大 (滕炜鸣等 2008), 因此两者在育肥过程中对虾青素的需求及其可食部位的生化组成可能有所不同 (Wu et al. 2007a, 2017, Long et al. 2017), 从而有必要将雌雄河蟹分开进行单独研究。鉴于此, 本文研究了育肥饲料中不同雨生红球藻粉添加水平对河蟹雄体成活、增重、常规营养成分、脂肪酸组成和类胡萝卜素含量的影响, 以期为河蟹育肥饲料配制及品质调控提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

实验饲料以豆粕、菜籽粕和鱼粉作为主要蛋白源, 以鱼油、猪油、大豆油和菜籽油作为脂肪源, 配制 4 种不同雨生红球藻粉添加水平 (0、0.2%、0.4% 和 0.6%) 的等氮等脂实验饲料 (表 1), 分别记为雨生红球藻粉 0 组, 雨生红球藻粉 0.2% 组, 雨生红球藻粉 0.4% 组和雨生红球藻粉 0.6% 组。配制饲料前, 所有饲料原料均粉碎后过 60 目筛, 然后按照饲料配方将原料手工充分混合, 加 30% 蒸馏水混合后, 用饲料膨化机制成沉性膨化饲料, 粒径 4.5~5.0 mm, 长度 10 mm 左右, 所有饲料在实验室风干后用黑色密封袋包装并于 -20 °C 冰箱中保存备用。

1.2 实验用蟹及实验管理

实验用蟹取自上海海洋大学崇明基地, 均为生殖蜕壳后的雄蟹, 体重 100~120 g, 从中挑选 300 只附肢健全、体无外伤、活力较好的个体用于实验。为了使研究结果更加接近于实际生产, 育肥养殖实验在室外小型实验土池 (长 × 宽 × 深 = 7.8 m × 7.8 m × 0.7 m) 中进行, 土池四周设置双层防逃塑料板, 实验前用漂白

表 1 实验饲料配方及营养成分

Table 1 Formulation and proximate composition of experimental diets

项目 Items	雨生红球藻粉添加量 Addition of <i>Haematococcus pluvialis</i> powder (%)			
	0	0.2	0.4	0.6
饲料原料 Ingredients (%)				
豆粕 Soybean meal	20.00	20.00	20.00	20.00
菜籽粕 Rapeseed meal	11.15	11.15	11.15	11.15
谷朊粉 Wheat gluten	2.00	2.00	2.00	2.00
鱼粉 Fish meal	18.00	18.00	18.00	18.00
鸡肉粉 Chicken meal	6.00	6.00	6.00	6.00
面粉 Wheat flour	14.00	13.80	13.60	13.40
啤酒酵母粉 Brewer's yeast	4.00	4.00	4.00	4.00
乌贼粉 Squid meal	8.00	8.00	8.00	8.00
维生素预混料 Vitamin premix ¹	0.60	0.60	0.60	0.60
矿物质预混料 Mineral premix ²	1.20	1.20	1.20	1.20
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	2.00	2.00	2.00	2.00
氯化胆碱 Choline chloride (50%)	0.40	0.40	0.40	0.40
肌醇 Inositol	0.30	0.30	0.30	0.30
维生素C Vitamin C (35%)	0.15	0.15	0.15	0.15
大豆磷脂 Soy lecithin	2.00	2.00	2.00	2.00
猪油 Pork lard	2.00	2.00	2.00	2.00
食盐 Salt	0.20	0.20	0.20	0.20
鱼油 Fish oil	4.00	4.00	4.00	4.00
大豆油 Soybean oil	2.00	2.00	2.00	2.00
菜籽油 Rapeseed oil	2.00	2.00	2.00	2.00
雨生红球藻粉 <i>Haematococcus pluvialis</i> powder	0	0.20	0.40	0.60
营养成分 (风干基础) Nutrient composition (air dry basis)				
水分 Moisture (g/kg)	100.00	115.42	112.95	100.18
粗蛋白 Crude protein (g/kg)	422.85	424.83	424.66	425.55
粗脂肪 Crude lipid (g/kg)	164.01	163.47	161.75	161.63
灰分 Ash (g/kg)	100.72	100.00	99.62	100.31
总类胡萝卜素 Carotenoid (mg/kg)	16.92	45.89	68.72	106.11
虾青素 Astaxanthin (mg/kg)	1.02	28.50	43.86	82.62
叶黄素 Lutein (mg/kg)	0.00	0.34	0.58	1.19
角黄素 Canthaxanthin (mg/kg)	0.00	1.03	1.64	3.55
β-胡萝卜素 β-carotene (mg/kg)	0.03	0.24	0.41	0.82

1. 维生素预混料: 1 kg 饲料中含维生素 A 62 500 IU、维生素 D₃ 15 000 IU、维生素 E 1.75 g、维生素 K₃ 35.4 mg、维生素 B₁ 100 mg、维生素 B₂ 150 mg、维生素 B₆ 150 mg、维生素 B₁₂ 0.2 mg、生物素 4 mg、D-泛酸钙 250 mg、叶酸 25 mg、烟酰胺 300 mg、维生素 C 700 mg;

2. 矿物质预混料: 1 kg 饲料含 FeSO₄·H₂O 200 mg、CuSO₄·5H₂O 96 mg、ZnSO₄·H₂O 360 mg、MnSO₄·H₂O 120 mg、MgSO₄·H₂O 240 mg、KH₂PO₄ 4.2 g、NaH₂PO₄ 0.5 g、KI 5.4 mg、CoCl₂·6H₂O 2.1 mg、Na₂SeO₃ 3 mg。

1. Vitamin premix (per kg diet): vitamin A 62 500 IU, vitamin D₃ 15 000 IU, vitamin E 1.75 g, vitamin K₃ 35.4 mg, vitamin B₁ 100 mg, vitamin B₂ 150 mg, vitamin B₆ 150 mg, vitamin B₁₂ 0.2 mg, biotin 4 mg, D-calcium pantothenate 250 mg, folic acid 25 mg, nicotinamide 300 mg, vitamin C 700 mg; 2. Mineral premix (per kg diet): FeSO₄·H₂O 200 mg, CuSO₄·5H₂O 96 mg, ZnSO₄·H₂O 360 mg, MnSO₄·H₂O 120 mg, MgSO₄·H₂O 240 mg, KH₂PO₄ 4.2 g, NaH₂PO₄ 0.5 g, KI 5.4 mg, CoCl₂·6H₂O 2.1 mg, Na₂SeO₃ 3 mg.

粉对实验土池进行消毒。实验期间水深 70 cm 左右, 四周种植部分水稻 (*Oryza sativa*) 和适量水花生 (*Alternanthera philoxeroides*), 以净化水质和供河蟹隐蔽。本研究中共设 4 个饲料组, 每个饲料组设 3 个重复 (池塘), 每个池塘随机放入 25 只雄蟹, 在实验池塘中暂养 3~5 d, 暂养期间投喂雨生红球藻粉添加量为 0 的饲料, 于 2015 年 9 月 6 日开始正式实验。

正式实验期间 (60 d), 每日 18:00 时左右分别采用 4 种饲料投喂实验雄蟹 (雨生红球藻粉 0 组为对照组), 平均水温高于 20 °C 时, 按总体重的 2%~3% 投喂, 当水温为 15~20 °C, 则按照总体重的 1.5% 左右投喂, 根据水温和摄食等情况进行灵活调整, 实验过程中所有实验组河蟹饲料投喂量一致。投喂方式为全池均匀泼洒, 通过食台检查残饵情况, 各组投喂后 2~3 h 检查残饵情况, 并于次日上午 9:00 时左右检查残饵和死亡情况, 做好相关记录。养殖过程中, 每隔 3 d 测定 1 次水质指标, 根据水质指标每 2 周左右适当换水或加水, 养殖期间水质指标要求为: pH 7.0~9.0, 平均溶氧高于 4 mg/L, 氨氮低于 0.5 mg/L, 亚硝酸盐低于 0.15 mg/L。

1.3 样品采集

正式实验 60 d 后停食 1 d, 从每个池塘中随机采样 3 只雄蟹, 每个饲料组 9 只。用吸水纸擦干体表水分后用蒲春 JE1002 电子天平 (上海浦春计量仪器有限公司, 量程 0.01~1 000 g, 精确度 0.01 g) 称重, 用美耐特 150T 游标卡尺 (上海美耐特实业有限公司, 量程 0~200 mm, 精确度 0.02 mm) 测量壳长、壳宽。活体解剖, 用镊子取出肝胰腺和性腺并准确称重。性腺、肝胰腺、肌肉和头胸甲装入自封袋中于 -40 °C 冰箱中保存备用。计算各组雄蟹的成活率 (survival rate, S_R)、增重率 (weight gain rate, W_{GR})、特定生长率 (specific growth rate, S_{GR}) 和肥满度 (condition factor, C_F)。 S_R (%) = $(N_t/N_0) \cdot 100\%$, W_{GR} (%) = $[(M_t - M_0)/M_0] \cdot 100\%$, S_{GR} (%/d) = $[(\ln M_t - \ln M_0)/t] \cdot 100\%$, C_F (g/cm³) = W/L^3 , 式中, N_t 指实验终末存活河蟹数量,

N_0 指实验初始投放河蟹数量, M_t 指实验终末河蟹体重, M_0 指实验初始河蟹体重, t 指实验天数, W 指河蟹体重, L 指河蟹甲壳长。

1.4 常规营养成分及脂肪酸组成分析

实验饲料及河蟹样品中的水分、粗蛋白和粗灰分含量分别采用 105 °C 烘干恒重法、凯氏定氮法和 550 °C 灼烧法进行测定 (AOAC 1995)。参考 Folch (1957) 的方法, 采用氯仿与甲醇体积比为 2:1 的溶液提取样品中的总脂并测定其含量。脂肪酸组成分析前, 采用 14% 的三氟化硼-甲醇溶液对总脂进行甲脂化 (Morrison et al. 1964), 然后使用 Agilent 7890B-5977A 气相色谱-质谱联用仪进行分析。色谱柱为 Agilent SP-2560 毛细管柱 (柱长 100 m, 内径 0.25 mm; 固定相涂层液膜厚度 0.2 μm)。升温程序: 由 40 °C 以 10 °C/min 的速率升至 170 °C, 再以 2 °C/min 速率升到 220 °C, 保持 1 min, 最后以 2 °C/min 速率升至 230 °C, 保持 3 min 直至所有脂肪酸出峰, 然后采用峰面积归一化法对脂肪酸进行定量 (陈再忠等 2003)。

1.5 类胡萝卜素组成分析

肝胰腺和头胸甲样品经冷冻干燥后, 参考 Johnston 等 (2000) 的方法, 采用丙酮提取样品中的类胡萝卜素, 用分光光度计 (型号: T6 新世纪, 北京普析通用仪器有限责任公司) 在波长 470 nm 处测定其吸光度值, 并根据虾青素标准曲线计算样品中总类胡萝卜素含量。采用胆固醇酯酶对样品的总类胡萝卜素进行水解, 然后采用 YMC C30 类胡萝卜素分析专用色谱柱 (柱长 100 mm, 内径 4.6 mm, 填料粒径 3 μm) 和 Agilent 1260 高效液相色谱仪测定其虾青素、叶黄素、玉米黄素、角黄素和 β-胡萝卜素含量。具体详细步骤见 Long 等 (2017) 的报道。

1.6 数据分析及统计

采用 SPSS 16.0 软件对实验数据进行统计分析, 所有数据均以平均值 ± 标准误表示。采用 Levene 法对所有数据进行方差齐性检验, 当不满足齐性方差时对百分比数据进行反正弦或

平方根处理。采用 One-Way ANOVA 进行方差分析, 差异显著时 ($P < 0.05$) 再进行 Duncan's 多重比较。

2 结果与分析

2.1 饲料中添加雨生红球藻粉对成体雄蟹成活和生长的影响

本研究中, 各组雄蟹成活率较为接近, 在 90.33%~94.67% 之间, 且无显著差异; 此外, 各组雄蟹的终末体重、增重率、特定生长率和肥满度均无显著差异 (表 2)。

2.2 饲料中添加雨生红球藻粉对成体雄蟹常规营养成分的影响

饲料中添加雨生红球藻粉对成体雄蟹性腺中的水分、粗脂肪和粗灰分含量均无显著影响 ($P > 0.05$), 雨生红球藻粉 0.4% 组的粗蛋白含量显著高于雨生红球藻粉 0 组 ($P < 0.05$), 但与其他两组差异不显著 ($P > 0.05$) (表 3)。各组肝胰腺水分和粗蛋白含量无显著差异, 而粗脂肪含量存在显著性差异, 以雨生红球藻粉 0.4% 组最高, 雨生红球藻粉 0.2% 组最低 ($P < 0.05$)。肌肉水分含量随饲料中雨生红球藻添加水平的升高整体呈上升趋势 ($P < 0.05$), 各组肌肉中其余指标均无显著差异 ($P > 0.05$) (表 3)。

2.2 饲料中添加雨生红球藻粉对成体雄蟹脂肪酸组成的影响

对雄蟹性腺的饱和脂肪酸 (saturated fatty acid, SFA) 而言, 除 C20:0 含量随饲料雨生红球藻粉含量升高而显著上升外 ($P < 0.05$), 各组间其余饱和脂肪酸及总饱和脂肪酸 (total saturated fatty acids, \sum SFA) 含量均无显著差异 ($P > 0.05$) (表 4)。在单不饱和脂肪酸中, 雨生红球藻粉 0.6% 组的 C16:1n7 含量显著高于其他组 ($P < 0.05$), 各组其余单不饱和脂肪酸及总单不饱和脂肪酸 (total monounsaturated fatty acids, \sum MUFA) 含量均无显著差异 (表 4)。就多不饱和脂肪酸而言, 雨生红球藻粉 0.4% 组和雨生红球藻粉 0.6% 组的 C18:2n6 含量显著高于雨生红球藻粉 0.2% 组 ($P < 0.05$), 但与雨生红球藻粉 0 组差异不显著 ($P > 0.05$); 雨生红球藻粉 0%、0.4% 和 0.6% 组的 C18:3n3 含量显著高于雨生红球藻粉 0.2% 组 ($P < 0.05$), 各组其余多不饱和脂肪酸、总多不饱和脂肪酸 (total polyunsaturated fatty acids, \sum PUFA) 和总高度不饱和脂肪酸 (total highly unsaturated fatty acids, \sum HUFA) 含量均无显著差异 ($P > 0.05$) (表 4)。

肝胰腺中的 C14:0 和 C18:0 含量均为雨生红球藻粉 0.2% 组最高 ($P < 0.05$), 各组其余饱和脂肪酸 (SFA) 和总饱和脂肪酸 (\sum SFA) 含量均无显著差异 ($P > 0.05$)。在单不饱和脂肪酸 (monounsaturated fatty acid, MUFA) 中,

表 2 饲料中添加雨生红球藻粉对成体雄蟹成活和生长的影响

Table 2 Effects of dietary supplementation of *Haematococcus pluvialis* powder on survival and growth of adult male Chinese Mitten Crab

项目 Items	雨生红球藻粉添加量 Addition of <i>Haematococcus pluvialis</i> powder (%)			
	0	0.2	0.4	0.6
成活率 Survival rate (%)	90.33 ± 2.20	92.00 ± 1.55	90.67 ± 2.01	94.67 ± 2.18
初始体重 Initial body weight (g)	112.58 ± 1.67	111.80 ± 1.28	112.30 ± 1.50	112.86 ± 2.20
终末体重 Final body weight (g)	123.99 ± 2.81	124.98 ± 3.27	123.19 ± 2.77	123.39 ± 2.55
增重率 Weight gain rate (%)	10.20 ± 1.05	11.75 ± 1.11	9.70 ± 1.25	9.35 ± 1.20
特定生长率 Specific growth rate (%/d)	0.16 ± 0.04	0.18 ± 0.04	0.15 ± 0.04	0.15 ± 0.03
肥满度 Condition factor (g/cm ³)	0.64 ± 0.01	0.65 ± 0.01	0.64 ± 0.01	0.64 ± 0.01

表 3 饲料中添加雨生红球藻粉对成体雄蟹常规生化组成的影响 (g/kg 湿重)

Table 3 Effects of dietary supplementation of *Haematococcus pluvialis* powder on proximate composition in the tissue of adult male Chinese Mitten Crab (g/kg wet weight)

项目 Items	雨生红球藻粉添加量 Addition of <i>Haematococcus pluvialis</i> powder (%)			
	0	0.2	0.4	0.6
性腺 Gonad				
水分 Moisture	721.68 ± 7.82	733.50 ± 8.30	722.33 ± 8.81	725.64 ± 3.12
粗脂肪 Crude lipid	8.72 ± 0.31	8.34 ± 0.42	8.69 ± 0.31	8.22 ± 0.32
粗蛋白 Crude protein	166.80 ± 2.54 ^b	180.12 ± 7.63 ^{ab}	192.81 ± 7.11 ^a	178.44 ± 7.91 ^{ab}
粗灰分 Ash	16.50 ± 0.41	15.93 ± 0.82	16.92 ± 0.61	16.50 ± 0.54
肝胰腺 Hepatopancreas				
水分 Moisture	528.64 ± 5.71	548.70 ± 12.30	521.61 ± 6.42	535.91 ± 14.50
粗脂肪 Crude lipid	340.00 ± 4.02 ^{ab}	307.92 ± 4.42 ^c	347.04 ± 6.63 ^a	327.32 ± 4.12 ^b
粗蛋白 Crude protein	72.40 ± 6.64	71.03 ± 8.41	67.80 ± 5.23	63.52 ± 2.73
粗灰分 Ash	6.05 ± 1.22	5.22 ± 1.10	5.14 ± 0.93	5.33 ± 0.62
肌肉 Muscle				
水分 Moisture	782.62 ± 1.83 ^b	789.54 ± 5.32 ^{ab}	785.22 ± 0.34 ^{ab}	793.61 ± 2.73 ^a
粗脂肪 Crude lipid	8.90 ± 0.22	8.62 ± 0.11	8.61 ± 0.22	8.50 ± 0.23
粗蛋白 Crude protein	168.09 ± 9.05	171.21 ± 7.42	183.22 ± 6.50	192.73 ± 6.56
粗灰分 Ash	14.25 ± 2.01	14.11 ± 1.09	14.11 ± 0.90	14.38 ± 0.74

同行数据标注完全不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Values in the same row with different letter mean significant difference ($P < 0.05$); Values in the same row without letters or with same letters indicate no significant difference ($P > 0.05$).

C18:1n9 和 \sum MUFA 含量均以雨生红球藻粉 0.6%组最高, 而 C18:1n7 含量以雨生红球藻粉 0.2%组最高 ($P < 0.05$), 各组其余单不饱和脂肪酸含量均无显著差异 ($P > 0.05$) (表 5)。就多不饱和脂肪酸 (PUFA) 而言, 各组多不饱和脂肪酸、总 n-3 不饱和脂肪酸 (\sum n-3PUFA)、总 n-6 不饱和脂肪酸 (\sum n-6 PUFA) 和 \sum PUFA 含量均无显著差异 ($P > 0.05$) (表 5)。

雨生红球藻粉 0 组肌肉中的 14:0 含量显著高于雨生红球藻粉 0.2%组 ($P < 0.05$), 与其余两组差异不显著 ($P > 0.05$); C16:0 含量以雨生红球藻粉 0.4%组最高, 以雨生红球藻粉 0.2%组最低 ($P < 0.05$), 而各组其余饱和脂肪酸和总饱和脂肪酸 (\sum SFA) 含量均无显著差异 ($P > 0.05$) (表 6)。就单不饱和脂肪酸 (MUFA) 而言, 除雨生红球藻粉 0.2%组的 C14:1n5 含量显著高于雨生红球藻粉 0.6%组外 ($P < 0.05$), 各

组其余单不饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸总量 (\sum MUFA) 均无显著差异 ($P > 0.05$)。就多不饱和脂肪酸而言, 雄蟹肌肉中的 C22:6n3、总多不饱和脂肪酸 (\sum PUFA)、总 n-3 多不饱和脂肪酸 (\sum n-3PUFA) 和总高不饱和脂肪酸 (\sum HUFA) 含量随饲料雨生红球藻粉含量的升高而显著上升 ($P < 0.05$), 而各组其余多不饱和脂肪酸和总 n-6 多不饱和脂肪酸 (\sum n-6 PUFA) 含量及 n-3/n-6 比例均无显著差异 ($P > 0.05$) (表 6)。

2.3 饲料中添加雨生红球藻粉对成体雄蟹类胡萝卜素组成的影响

雄蟹肝胰腺中主要含虾青素和 β -胡萝卜素, 以 β -胡萝卜素较高, 两种类胡萝卜素的含量随饲料雨生红球藻粉含量的升高而显著上升 ($P < 0.05$) (表 7)。头胸甲中类胡萝卜素为虾青素、叶黄素和玉米黄素, 以虾青素含量最高;

表 4 添加雨生红球藻粉对成体雄蟹性腺中脂肪酸组成的影响 (占总脂肪酸比例, %)

Table 4 Effects of dietary supplementation of *Haematococcus pluvialis* powder on fatty acid profile in the gonad of adult male Chinese Mitten Crab (The percentage of total fatty acids, %)

脂肪酸 Fatty acids	雨生红球藻粉添加量 Addition of <i>Haematococcus pluvialis</i> powder (%)			
	0	0.2	0.4	0.6
C16:0	9.81 ± 0.53	9.25 ± 0.39	9.09 ± 0.29	9.85 ± 0.42
C17:0	0.61 ± 0.24	0.63 ± 0.06	0.54 ± 0.04	0.54 ± 0.02
C18:0	8.21 ± 0.23	8.38 ± 0.35	7.33 ± 0.41	7.57 ± 0.17
C20:0	0.19 ± 0.01 ^c	0.22 ± 0.02 ^c	0.35 ± 0.02 ^b	0.49 ± 0.05 ^a
C22:0	1.16 ± 0.09	1.14 ± 0.10	1.23 ± 0.08	1.18 ± 0.06
∑ SFA	19.97 ± 0.58	19.63 ± 0.72	18.55 ± 0.49	19.63 ± 0.33
C16:1n7	1.51 ± 0.06 ^b	1.26 ± 0.08 ^c	1.37 ± 0.04 ^{bc}	1.87 ± 0.10 ^a
C18:1n9	19.49 ± 0.81	20.24 ± 1.33	18.92 ± 0.65	19.79 ± 0.76
C18:1n7	3.39 ± 0.16	3.38 ± 0.19	2.96 ± 0.02	3.01 ± 0.11
C20:1n7	1.22 ± 0.13	1.14 ± 0.03	1.19 ± 0.04	1.15 ± 0.04
C22:1n9	0.57 ± 0.06	0.61 ± 0.03	0.60 ± 0.06	0.55 ± 0.02
∑ MUFA	26.17 ± 1.05	26.64 ± 1.55	25.04 ± 0.66	26.36 ± 1.01
C18:2n6	9.91 ± 0.48 ^{ab}	8.57 ± 0.19 ^b	10.83 ± 0.88 ^a	10.66 ± 0.39 ^a
C18:3n3	1.29 ± 0.33 ^a	0.88 ± 0.02 ^b	1.11 ± 0.11 ^a	1.21 ± 0.01 ^a
C20:2n6	2.77 ± 0.08	2.65 ± 0.20	2.83 ± 0.20	2.62 ± 0.08
C20:4n6	13.77 ± 1.26	14.57 ± 1.06	13.59 ± 0.85	13.72 ± 1.37
C20:5n3	16.09 ± 0.56	16.13 ± 0.79	16.34 ± 0.36	14.70 ± 0.81
C22:6n3	9.28 ± 0.49	9.21 ± 0.46	9.39 ± 0.21	8.64 ± 0.37
∑ PUFA	53.12 ± 1.17	51.99 ± 2.12	54.09 ± 0.67	51.55 ± 1.05
∑ n-3PUFA	26.68 ± 0.48	26.21 ± 1.13	26.84 ± 0.42	24.55 ± 1.12
∑ n-6PUFA	26.45 ± 0.94	25.78 ± 1.16	27.25 ± 0.30	27.00 ± 1.30
∑ HUFA	39.15 ± 1.62	39.89 ± 1.98	39.32 ± 1.35	37.06 ± 1.36
DHA/EPA	0.58 ± 0.05	0.57 ± 0.03	0.58 ± 0.01	0.59 ± 0.02
n-3/n-6	1.01 ± 0.03	1.02 ± 0.03	0.99 ± 0.01	0.91 ± 0.07

同行数据标注完全不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。∑ SFA. 总饱和脂肪酸; ∑ MUFA. 总单不饱和脂肪酸; ∑ PUFA. 总多不饱和脂肪酸; ∑ n-3PUFA. 总 n-3 多不饱和脂肪酸; ∑ n-6PUFA. 总 n-6 多不饱和脂肪酸; ∑ HUFA. 总高不饱和脂肪酸。

Values in the same row with different letter mean significant difference ($P < 0.05$); Values in the same row without letters or with same letters indicate no significant difference ($P > 0.05$). ∑ SFA. Total saturated fatty acids; ∑ MUFA. Total mono unsaturated fatty acids; ∑ PUFA. Total polyunsaturated fatty acids; ∑ n-3PUFA. Total n-3 polyunsaturated fatty acids; ∑ n-6PUFA. Total n-6 polyunsaturated fatty acids; ∑ HUFA. Total high unsaturated fatty acids.

虾青素和叶黄素含量随饲料雨生红球藻粉含量的升高而显著上升 ($P < 0.05$) (表 7)。

3 讨论

3.1 饲料中添加雨生红球藻粉对成体雄蟹成活、生长和肥满度的影响

众所周知, 甲壳动物的生长依赖于蜕壳 (Petit et al. 1997, Pan et al. 2001)。本研究发现, 经过 60 d 的育肥养殖实验各组雄蟹成活率、增重率和生长率均无显著差异, 这与先前饲料中添加雨生红球藻粉提取物可显著提高河蟹幼蟹增重率、蜕壳频率和成活率的结果不同 (郭

表 5 饲料中添加雨生红球藻粉对成体雄蟹肝胰腺中脂肪酸组成的影响 (占总脂肪酸比例, %)
Table 5 Effects of dietary supplementation of *Haematococcus pluvialis* powder on fatty acid profile in the hepatopancreas of adult male Chinese Mitten Crab (The percentage of total fatty acids, %)

脂肪酸 Fatty acids	雨生红球藻粉添加量 Addition of <i>Haematococcus pluvialis</i> powder (%)			
	0	0.2	0.4	0.6
C14:0	1.43 ± 0.07 ^{ab}	1.54 ± 0.02 ^a	1.36 ± 0.03 ^b	1.41 ± 0.06 ^{ab}
C15:0	0.39 ± 0.01	0.40 ± 0.01	0.38 ± 0.01	0.38 ± 0.01
C16:0	15.71 ± 0.33	15.61 ± 0.19	15.62 ± 0.12	15.37 ± 0.30
C17:0	0.36 ± 0.05	0.34 ± 0.03	0.37 ± 0.03	0.27 ± 0.05
C18:0	2.63 ± 0.11 ^{ab}	2.93 ± 0.09 ^a	2.71 ± 0.08 ^{ab}	2.59 ± 0.06 ^b
C20:0	0.31 ± 0.03	0.38 ± 0.03	0.36 ± 0.02	0.35 ± 0.04
∑ SFA	20.81 ± 0.66	21.19 ± 0.31	20.80 ± 0.22	20.36 ± 0.25
C16:1n7	3.99 ± 0.17	4.09 ± 0.10	3.81 ± 0.06	4.02 ± 0.10
C17:1n7	0.55 ± 0.05	0.51 ± 0.04	0.51 ± 0.04	0.59 ± 0.04
C18:1n9	31.78 ± 0.55 ^a	29.93 ± 0.32 ^b	31.10 ± 0.38 ^{ab}	31.92 ± 0.22 ^a
C18:1n7	2.66 ± 0.01 ^b	2.72 ± 0.06 ^{ab}	2.59 ± 0.01 ^b	2.65 ± 0.03 ^b
C20:1n7	1.10 ± 0.08	1.05 ± 0.01	1.07 ± 0.02	1.08 ± 0.02
C22:1n9	0.41 ± 0.04	0.39 ± 0.02	0.38 ± 0.01	0.39 ± 0.02
∑ MUFA	40.50 ± 0.63 ^a	38.68 ± 0.26 ^b	39.45 ± 0.38 ^{ab}	40.64 ± 0.11 ^a
C18:2n6	20.83 ± 0.64	21.02 ± 0.61	21.85 ± 0.32	20.81 ± 0.20
C18:3n3	2.76 ± 0.11	3.14 ± 0.14	2.74 ± 0.08	2.72 ± 0.17
C20:2n6	1.05 ± 0.12	1.09 ± 0.11	1.05 ± 0.05	0.99 ± 0.08
C20:4n6	1.06 ± 0.09	1.08 ± 0.09	1.02 ± 0.01	1.04 ± 0.04
C20:5n3	2.62 ± 0.09	2.79 ± 0.06	2.70 ± 0.10	2.79 ± 0.17
C22:6n3	6.72 ± 0.14	6.63 ± 0.20	6.75 ± 0.26	7.14 ± 0.13
∑ PUFA	35.03 ± 0.75	35.74 ± 0.49	36.10 ± 0.15	35.49 ± 0.25
∑ n-3PUFA	12.09 ± 0.32	12.56 ± 0.21	12.18 ± 0.41	12.65 ± 0.34
∑ n-6PUFA	22.94 ± 0.47	23.18 ± 0.69	23.92 ± 0.36	22.84 ± 0.13
∑ HUFA	10.40 ± 0.16	10.49 ± 0.18	10.47 ± 0.35	10.97 ± 0.27
DHA/EPA	2.57 ± 0.06	2.38 ± 0.07	2.50 ± 0.04	2.59 ± 0.15
n-3/n-6	0.53 ± 0.01	0.54 ± 0.03	0.51 ± 0.02	0.56 ± 0.02

同行数据标注完全不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。∑ SFA. 总饱和脂肪酸; ∑ MUFA. 总单不饱和脂肪酸; ∑ PUFA. 总多不饱和脂肪酸; ∑ n-3PUFA. 总 n-3 多不饱和脂肪酸; ∑ n-6PUFA. 总 n-6 多不饱和脂肪酸; ∑ HUFA. 总高不饱和脂肪酸。

Values in the same row with different letter mean significant difference ($P < 0.05$); Values in the same row without letters or with same letters indicate no significant difference ($P > 0.05$). ∑ SFA. Total saturated fatty acids; ∑ MUFA. Total monounsaturated fatty acids; ∑ PUFA. Total polyunsaturated fatty acids; ∑ n-3 PUFA. Total n-3 polyunsaturated fatty acids; ∑ n-6PUFA. Total n-6 polyunsaturated fatty acids; ∑ HUFA. Total high unsaturated fatty acids.

春雨 2007)。分析可能的原因为,郭春雨(2007)报道中的研究对象为未完成生殖蜕壳的 1 龄幼蟹,初始平均体重为 27 g,饲料中添加虾青素促进其蜕壳速度,从而提高生长率和增重率,

而本研究中实验对象为完成生殖蜕壳后的 1 龄雄体成蟹,初始平均体重为 112 g 左右,实验过程不需要再进行蜕壳,因此实验过程中各组雄蟹生长率并无显著差异。肥满度是衡量河蟹

表 6 饲料中添加雨生红球藻粉对成体雄蟹肌肉中脂肪酸组成的影响 (占总脂肪酸比例, %)

Table 6 Effects of dietary supplementation of *Haematococcus pluvialis* powder on fatty acid profile in the muscle of adult male Chinese Mitten Crab (The percentage of total fatty acids, %)

脂肪酸 Fatty acids	雨生红球藻粉添加量 Addition of <i>Haematococcus pluvialis</i> powder (%)			
	0	0.2	0.4	0.6
C14:0	0.20 ± 0.02 ^a	0.16 ± 0.02 ^b	0.17 ± 0.01 ^{ab}	0.17 ± 0.01 ^{ab}
C15:0	0.15 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.15 ± 0.01
C16:0	9.54 ± 0.04 ^{ab}	9.35 ± 0.11 ^b	9.83 ± 0.17 ^a	9.51 ± 0.16 ^{ab}
C17:0	0.59 ± 0.04	0.55 ± 0.02	0.57 ± 0.02	0.57 ± 0.01
C18:0	6.83 ± 0.13	6.73 ± 0.13	6.73 ± 0.08	6.96 ± 0.13
C20:0	2.68 ± 0.21	2.78 ± 0.19	2.21 ± 0.21	2.12 ± 0.55
∑ SFA	19.91 ± 0.16	19.72 ± 0.15	19.66 ± 0.14	19.47 ± 0.54
C14:1n5	0.23 ± 0.02 ^{ab}	0.26 ± 0.01 ^a	0.23 ± 0.01 ^{ab}	0.20 ± 0.01 ^b
C16:1n7	1.19 ± 0.06	1.06 ± 0.07	1.09 ± 0.01	1.06 ± 0.09
C18:1n9	17.82 ± 0.58	17.83 ± 0.28	18.08 ± 0.44	17.69 ± 0.15
C18:1n7	2.59 ± 0.03	2.42 ± 0.07	2.51 ± 0.05	2.55 ± 0.04
C20:1n7	0.62 ± 0.03	0.67 ± 0.01	0.57 ± 0.05	0.60 ± 0.03
C22:1n9	0.36 ± 0.01	0.35 ± 0.02	0.34 ± 0.02	0.36 ± 0.01
∑ MUFA	22.75 ± 0.65	22.60 ± 0.24	22.81 ± 0.50	22.46 ± 0.14
C18:2n6	11.57 ± 0.35	11.59 ± 0.16	12.05 ± 0.41	11.25 ± 0.13
C18:3n3	1.25 ± 0.07	1.16 ± 0.06	1.22 ± 0.05	1.11 ± 0.06
C20:2n6	1.47 ± 0.05 ^b	1.69 ± 0.09 ^a	1.45 ± 0.07 ^b	1.60 ± 0.07 ^{ab}
C20:4n6	3.93 ± 0.21	3.86 ± 0.31	3.53 ± 0.24	3.61 ± 0.24
C20:5n3	17.38 ± 0.41	18.05 ± 0.31	17.28 ± 0.17	18.32 ± 0.49
C22:6n3	15.23 ± 0.38 ^b	14.84 ± 0.24 ^b	15.85 ± 0.26 ^{ab}	16.45 ± 0.65 ^a
∑ PUFA	50.82 ± 0.44 ^b	51.18 ± 0.35 ^{ab}	51.37 ± 0.39 ^{ab}	52.34 ± 0.36 ^a
∑ n-3PUFA	33.85 ± 0.71 ^b	34.05 ± 0.47 ^b	34.34 ± 0.11 ^{ab}	35.88 ± 0.74 ^a
∑ n-6PUFA	16.97 ± 0.32	17.13 ± 0.29	17.03 ± 0.40	16.46 ± 0.41
∑ HUFA	36.53 ± 0.81 ^b	36.74 ± 0.21 ^b	36.66 ± 0.36 ^b	38.38 ± 0.56 ^a
DHA/EPA	0.88 ± 0.01 ^{ac}	0.83 ± 0.01 ^c	0.92 ± 0.02 ^a	0.90 ± 0.04 ^{ab}
n-3/n-6	2.00 ± 0.08	1.99 ± 0.06	2.02 ± 0.05	1.64 ± 0.55

同行数据标注完全不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。∑ SFA. 总饱和脂肪酸; ∑ MUFA. 总单不饱和脂肪酸; ∑ PUFA. 总多不饱和脂肪酸; ∑ n-3PUFA. 总 n-3 多不饱和脂肪酸; ∑ n-6PUFA. 总 n-6 多不饱和脂肪; ∑ HUFA. 总高不饱和脂肪酸。

Values in the same row with different letter mean significant difference ($P < 0.05$); Values in the same row without letters or with same letters indicate no significant difference ($P > 0.05$). ∑ SFA. Total saturated fatty acids; ∑ MUFA. Total monounsaturated fatty acids; ∑ PUFA. Total polyunsaturated fatty acids; ∑ n-3PUFA. Total n-3 polyunsaturated fatty acids; ∑ n-6PUFA. Total n-6 poly unsaturated fatty acids; ∑ HUFA. Total high unsaturated fatty acids.

育肥性能的重要指标之一 (何杰等 2016)。本研究中各组雄蟹的平均肥满度在 0.64 g/cm^3 左右, 均无显著差异, 分析其可能的原因是由于饲料中添加雨生红球藻粉主要提高了雄蟹机体

内的总类胡萝卜素 (尤其是虾青素) 含量, 而虾青素作为一种超氧化活性物质, 在河蟹成体中主要起到抗氧化作用, 对其育肥性能指标并无显著影响 (Long et al. 2017, Wu et al. 2017)。

表 7 饲料中添加雨生红球藻粉对成体雄蟹类胡萝卜素组成的影响 (mg/kg, 干重)

Table 7 Effects of dietary supplementation of *Haematococcus pluvialis* powder on carotenoid composition of adult male Chinese Mitten Crab (mg/kg, dry matter)

项目 Items	雨生红球藻粉添加量 Addition of <i>Haematococcus pluvialis</i> powder (%)			
	0	0.2	0.4	0.6
肝胰腺 Hepatopancreas				
虾青素 Astaxanthin	1.09 ± 0.01 ^c	3.49 ± 0.07 ^b	5.07 ± 0.42 ^a	5.81 ± 0.51 ^a
β-胡萝卜素 β-carotene	28.93 ± 1.82 ^c	89.04 ± 5.32 ^b	170.94 ± 16.56 ^a	199.54 ± 9.72 ^a
头胸甲 Carapace				
虾青素 Astaxanthin	8.38 ± 0.66 ^b	11.75 ± 1.12 ^{ab}	14.55 ± 1.49 ^a	16.58 ± 2.14 ^a
叶黄素 Lutein	1.38 ± 0.14 ^c	2.55 ± 0.21 ^b	2.72 ± 0.24 ^b	4.02 ± 0.49 ^a
玉米黄素 Zeaxanthin	1.99 ± 0.17	2.12 ± 0.02	2.13 ± 0.03	2.21 ± 0.05

同行数据标注完全不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Values in the same row with different letter mean significant difference ($P < 0.05$); Values in the same row without letters or with same letters indicate no significant difference ($P > 0.05$).

3.2 饲料中添加雨生红球藻粉对成体雄蟹常规营养成分的影响

先前河蟹饲料中添加雨生红球藻粉的研究主要关注其对成活、生长、着色、抗氧化能力和免疫力的影响(郭春雨 2007, 龚志等 2014, Wu et al. 2017), 而对其营养组成影响的研究较少, 仅限于成体雌蟹常规成分和类胡萝卜素组成的研究(Long et al. 2017), 尚未见有关雄蟹的相关报道。性腺、肝胰腺和肌肉作为河蟹主要的三大可食部位, 其生化组成是评价河蟹营养价值和食用价值的重要指标(Wu et al. 2007a, Shao et al. 2013)。本研究发现, 饲料中添加雨生红球藻粉对雄蟹性腺水分、粗脂肪和粗灰分含量无显著影响, 但可提高性腺中的粗蛋白含量, 这与先前的研究结果相一致(Niu et al. 2014, Long et al. 2017)。这可能是由于河蟹摄食雨生红球藻粉饲料提高了体内维生素 A 原的含量, 促进了体内维生素 A 的合成(Christiansen et al. 1996, Long et al. 2017), 从而有利于机体中蛋白的沉积(杨奇慧等 2007)。此外, 甲壳动物摄食富含虾青素等类胡萝卜素的饲料后可降低其体内的氧化应激水平(Niu et al. 2014, Long et al. 2017), 从而降低了能量消耗, 因此有利于组织中蛋白的沉积。

肝胰腺是甲壳动物脂类吸收和储存的重要器官(Wu et al. 2007b), 其脂类成分通常受到饵料的影响(Wu et al. 2007a)。本研究中, 添加 0.4% 雨生红球藻粉饲料组肝胰腺中的总脂含量显著高于添加 0.2% 和 0.6% 饲料组, 说明饲料中添加适量的雨生红球藻粉有利于雄蟹肝胰腺中脂肪的沉积, 这与对斑节对虾(*Penaeus monodon*)的研究结果相类似(Shiau et al. 2000, Niu et al. 2014)。可能的原因是, 饲料中添加类胡萝卜素(尤其是虾青素)促进了机体维生素 A 的合成(Ong et al. 1975, Britton, 2008), 从而改善了机体的脂质代谢(Shiau et al. 2000)。

本研究发现, 雄蟹肌肉水分和粗蛋白含量随饲料雨生红球藻粉含量的升高整体呈上升趋势, 这与先前报道的饲料中添加类胡萝卜素可提高斑节对虾躯体粗蛋白含量的结果一致(Niu et al. 2014), 其可能的原因同以上对饲料中添加雨生红球藻粉可提高河蟹雄性腺蛋白含量的解释。肌肉中总脂含量的变化趋势与水分、粗蛋白相反, 可能是由于水分和蛋白相对百分含量的升高, 从而导致了总脂相对含量的降低。

综上, 饲料中添加 0.4% 雨生红球藻粉可提高性腺中的蛋白及肝胰腺中的总脂含量, 但目前关于饲料中添加类胡萝卜素促进甲壳动物组

织蛋白或脂肪积累的潜在机制尚不清楚，有待进一步研究。

3.3 饲料中添加雨生红球藻粉对成体雄蟹脂肪酸组成的影响

河蟹组织中的脂肪酸组成是评价其营养价值的重要指标之一 (Wu et al. 2007a, Shao et al. 2013)。本研究发现，饲料中添加雨生红球藻粉对雄蟹性腺和肝胰腺中的大部分脂肪酸、总饱和脂肪酸 (\sum SFA)、总单不饱和脂肪酸 (\sum MUFA)、总多不饱和脂肪酸 (\sum PUFA) 和总高度不饱和脂肪酸 (\sum HUFA) 含量均无显著影响，这与先前对南美白对虾 (*Penaeus vannamei*) 的研究结果类似 (Ju et al. 2009)，这可能是由于本研究饲料中添加的雨生红球藻粉相对较少 (0~0.6%)，不足以改变其脂肪酸组成，因此对雄蟹性腺和肝胰腺的脂肪酸组成影响较小。与性腺和肝胰腺不同的是，雄蟹肌肉中的脂肪酸组成受饲料雨生红球藻粉的影响相对较大，肌肉中的 C22:6n3、总 n-3 多不饱和脂肪酸 (\sum n-3 PUFA) 和总高度不饱和脂肪酸 (\sum HUFA) 含量随饲料中雨生红球藻粉含量的升高而明显上升。Paibulkichakul 等 (2008) 在饲料中添加虾青素投喂斑节对虾的研究也得到类似的结果，作者认为可能的原因是由于饲料中添加虾青素促进对虾肌肉中虾青素的积累，而虾青素的沉积通常需与长链脂肪酸 (尤其是 C22:6n3) 进行酯化结合，因此对虾肌肉中的 C22:6n3、 \sum n-3 PUFA 和 \sum HUFA 含量也随其虾青素含量升高而上升。但就河蟹而言，类胡萝卜素主要积累于头胸甲、肝胰腺和卵巢，肌肉中通常较低 (龚志等 2014, Long et al. 2017)，因此饲料中补充雨生红球藻粉促进雄蟹肌肉多不饱和脂肪酸积累的机制有待进一步研究。根据 FAO/WHO (1994) 建议，饮食中 n-3/n-6 的比例至少为 0.1~0.2，比值越高对人类健康越有利。本研究中，雄蟹性腺、肝胰腺和肌肉中的 n-3/n-6 值均高于 0.2，饲料中添加雨生红球藻粉对雄蟹可食组织的 n-3/n-6 比例无显著影响。因此，本研究表明，育肥饲料中添加雨

生红球藻粉对雄蟹性腺和肝胰腺的脂肪酸组成无不良影响，但有助于肌肉中多不饱和脂肪酸 (尤其是 C22:6n3) 的积累。

3.4 饲料中添加雨生红球藻粉对成体雄蟹类胡萝卜素组成的影响

研究表明，类胡萝卜素在人类抗氧化、抗衰老和提高免疫力等多方面发挥着重要作用 (Hughes 2001, Kidd 2011, Fiedor et al. 2014, Cenariu et al. 2015)，因此河蟹组织中积累适量的类胡萝卜素有望提高其营养品质。本研究发现，雄蟹肝胰腺中的类胡萝卜素为虾青素和 β -胡萝卜素，以 β -胡萝卜素为主，这两种类胡萝卜素的含量随饲料中雨生红球藻粉添加水平的升高而显著上升；头胸甲中的类胡萝卜素主要为虾青素、叶黄素和玉米黄素，以虾青素含量最高，这三种类胡萝卜素的含量亦随饲料中雨生红球藻粉含量的升高而上升。这与我们对雌蟹的研究结果相类似 (Long et al. 2017)，说明雄蟹可有效利用雨生红球藻粉中的类胡萝卜素并沉积于体内。此外，肝胰腺与头胸甲中优先沉积的类胡萝卜素种类和含量存在差异，肝胰腺中主要积累 β -胡萝卜素，而头胸甲主要积累虾青素，这可能与不同组织的功能差异有关。肝胰腺是甲壳动物营养物质的储存和代谢中心，优先积累 β -胡萝卜素可能是备用于补偿虾青素缺乏带来的负面影响 (Castillo et al. 1982, Britton 2008)。对甲壳动物而言，外壳颜色的改变在其隐蔽和躲避敌害等过程中具有重要的作用，而颜色的改变通常是通过虾青素与甲壳蓝蛋白 (crustacyanin, CRCN) 的不同结合方式来实现 (Wade et al. 2009, 2015a)，因此雄蟹摄入的虾青素优先积累于头胸甲。

综上所述，饲料中添加雨生红球藻粉对中华绒螯蟹成体雄蟹的成活率、增重率和肥满度均无显著影响，但可提高性腺粗蛋白、肌肉总多不饱和脂肪酸、肝胰腺和头胸甲中的类胡萝卜素含量，综合考虑认为雄蟹育肥饲料中雨生红球藻粉的适宜添加量为 0.4% 左右。

致谢 云南爱尔发生物技术股份有限公司为本

研究提供了雨生红球藻粉, 上海海洋大学甲壳动物营养繁殖研究室吴仁福同学协助进行类胡萝卜素测定, 刘泽华同学参与部分采样工作, 中国科学院海洋研究所苏芳同学帮助进行虾青素测定, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- AOAC. 1995. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 16th ed. Arlington: Association of Analytical Communities International.
- Britton G. 2008. Functions of intact carotenoids//Britton G, Liaaen-Jensen S, Pfander H. Carotenoids. Volume 4: Natural Functions. Basel: Birkhauser Verlag AG, 189–212.
- Castillo R, Negre-Sadargues G, Lenel R. 1982. General survey of the carotenoids in Crustacea//Britton G, Goodwin T. Carotenoid Chemistry and Biochemistry. Oxford: Pergamon Press, 211–224.
- Cenariu D, Fischerfodor E, Virag P, et al. 2015. *In vitro* antitumour activity of tomato-extracted carotenoids on human colorectal carcinoma. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 43(2): 293–301.
- Chien Y H, Jeng S C. 1992. Pigmentation of kuruma prawn, *Penaeus japonicus* Bate, by various pigment sources and levels and feeding regimes. *Aquaculture*, 102(4): 333–346.
- Christiansen R, Torrissen O J. 1996. Growth and survival of Atlantic salmon, *Salmo salar* L. fed different dietary levels of astaxanthin juveniles. *Aquaculture Nutrition*, 2(1): 55–62.
- Dall W, Smith D M, Moore L E. 1995. Carotenoids in the tiger prawn *Penaeus esculentus* during ovarian maturation. *Marine Biology*, 123(3): 435–411.
- FAO/WHO. 1994. Fats and Oils in Human Nutrition: Report of a Joint Expert Consultation, Organized by the Food and Agricultural Organization of the United Nations and the World Health Organization Rome, 19 - 26 October 1993. World Health Organization.
- Fiedor J, Burda K. 2014. Potential role of carotenoids as antioxidants in human health and disease. *Nutrients*, 6(2): 466–488.
- Folch J, Lees M, Sloane-Stanley G H. 1957. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *Journal of Biological Chemistry*, 226(1): 497–509.
- Hughes D A. 2001. Dietary carotenoids and human immune function. *Nutrition*, 17(10): 823–827.
- Johnston I A, Alderson R, Sandham C, et al. 2000. Muscle fibre density in relation to the colour and texture of smoked Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Aquaculture*, 189(3/4): 335–349.
- Ju Z Y, Forster I P, Dominy W G. 2009. Effects of supplementing two species of marine algae or their fractions to a formulated diet on growth, survival and composition of shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture*, 292(3/4): 237–243.
- Kidd P. 2011. Astaxanthin, cell membrane nutrient with diverse clinical benefits and anti-aging potential. *Alternative Medicine Review A Journal of Clinical Therapeutic*, 16(4): 355–364.
- Kong L, Cai C F, Ye Y T, et al. 2012. Comparison of nonvolatile compounds and sensory characteristics of Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*) reared in lakes and ponds: potential environmental factors. *Aquaculture*, 364: 96–102.
- Long W X, Wu X G, Zhao L, et al. 2017. Effects of dietary supplementation with *Haematococcus pluvialis* cell powder on coloration, ovarian development and antioxidation capacity of adult female Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*. *Aquaculture*, 473: 545–553.
- Morrison W R, Smith L M. 1964. Preparation of fatty acid methyl esters and dimethyl acetals from lipids with boron trifluoride-methanol. *Journal of Lipid Research*, 5(4): 600–608.
- Niu J, Wen H, Li C H, et al. 2014. Comparison effect of dietary astaxanthin and β -carotene in the presence and absence of cholesterol supplementation on growth performance, antioxidant capacity and gene expression of *Penaeus monodon* under normoxia and hypoxia condition. *Aquaculture*, 422: 8–17.
- Ong D E, Chytil F. 1975. Retinoic acid-binding protein in rat tissue. Partial purification and comparison to rat tissue retinol-binding protein. *Journal of Biological Chemistry*, 250(15): 6113–6117.
- Pan C H, Chien Y H, Cheng J H. 2001. Effects of light regime, algae in water, and dietary astaxanthin on pigmentation, growth, and survival of black tiger prawn *Penaeus monodon* post-larvae. *Zoological Studies*, 40(4): 371–382.
- Paibulkichakul C, Piyatiratitivorakul S, Sorgeloos P, et al. 2008. Improved maturation of pond-reared, black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) using fish oil and astaxanthin feed

- supplements. *Aquaculture*, 282(1/4): 83–89.
- Petit H, Nègre-Sadargues G, Castillo R, et al. 1997. The effects of dietary astaxanthin on growth and moulting cycle of postlarval stages of the prawn, *Penaeus japonicus* (Crustacea, Decapoda). *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 117(4): 539–544.
- Shao L C, Wang C, He J, et al. 2013. Hepatopancreas and gonad quality of Chinese mitten crab fattened with natural and formulated diets. *Journal of Food Quality*, 36(3): 217–227.
- Shiau S Y, Chen Y. 2000. Estimation of the dietary vitamin A requirement of juvenile grass shrimp, *Penaeus monodon*. *Journal of Nutrition*, 130(1): 90–94.
- Supamattaya K, Kiriratnikom S, Boonyaratpalin M, et al. 2005. Effect of a *Dunaliella* extract on growth performance, health condition, immune response and disease resistance in black tiger shrimp (*Penaeus monodon*). *Aquaculture*, 248(1): 207–216.
- Wade N M, Budd A, Irvin S, et al. 2015a. The combined effects of diet, environment and genetics on pigmentation in the Giant Tiger Prawn, *Penaeus monodon*. *Aquaculture*, 449: 78–86.
- Wade N M, Gabaudan J, Glencross B D. 2015b. A review of carotenoid utilisation and function in crustacean aquaculture. *Aquaculture*, 9(2): 141–156.
- Wade N M, Tollenaere A, Hall M R, et al. 2009. Evolution of a novel carotenoid-binding protein responsible for crustacean shell color. *Molecular Biology & Evolution*, 26(8): 1851–1864.
- Wang S, He Y, Wang Y, et al. 2016. Comparison of flavour qualities of three sourced *Eriocheir sinensis*. *Food Chemistry*, 200: 24–31.
- Wu X G, Cheng Y X, Nan T Z, et al. 2007b. Effect of dietary supplementation of phospholipid and highly unsaturated fatty acids on reproductive performance and offspring quality of the Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) broodstock. *Aquaculture*, 273(4): 602–613.
- Wu X G, Cheng Y X, Sui L Y, et al. 2007a. Biochemical composition from pond-reared and lake-stocked adult *Eriocheir sinensis*. *Aquaculture Research*, 38(14): 1459–1467.
- Wu X G, Zhao L, Long X W, et al. 2017. Effects of dietary supplementation of *Haematococcus pluvialis* powder on gonadal development, coloration and antioxidant capacity of adult male Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*). *Aquaculture Research*, 48(10): 5214–5223.
- Yamada S, Tanaka Y, Sameshima M, et al. 1990. Pigmentation of prawn (*Penaeus japonicus*) with carotenoids I. Effect of dietary astaxanthin, β -carotene and canthaxanthin on pigmentation. *Aquaculture*, 87(3/4): 323–330.
- Yuan J P, Chen F. 2000. Purification of trans-astaxanthin from a high-yielding astaxanthin ester-producing strain of the microalga *Haematococcus pluvialis*. *Food Chemistry*, 68(4): 443–448.
- 陈再忠, 成永旭, 王武. 2003. 早熟期间中华绒螯蟹肝胰腺指数、肝脂含量及脂肪酸组成的变化. *水产学报*, 27(1): 57–61.
- 龚志, 伊淑平, 孔丽, 等. 2014. 3 种类胡萝卜素对中华绒螯蟹体色改善效果的比较研究. *动物营养学报*, 26(8): 2408–2413.
- 郭春雨. 2007. 虾青素对中华绒螯蟹的影响及作用机理. 保定: 河北大学硕士学位论文, 19–38.
- 何杰, 吴旭干, 龙晓文, 等. 2016. 中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*) 野生和养殖蟹种对池塘养殖成蟹可食率和营养品质的影响研究. *海洋与湖沼*, 47(1): 140–150.
- 麻楠, 龙晓文, 赵磊, 等. 2017. 饲料中添加合成虾青素对中华绒螯蟹成体雌蟹性腺发育、色泽和抗氧化能力的影响. *水生生物学报*, 41(4): 755–765.
- 农业部渔业渔政管理局. 2017. 2017 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社.
- 滕炜鸣, 成永旭, 吴旭干, 等. 2008. 莱茵种群和长江种群子一代中华绒螯蟹性腺发育及相关生物学指数变化的比较. *上海海洋大学学报*, 17(1): 65–71.
- 杨奇慧, 周歧存, 迟淑艳, 等. 2007. 饲料中维生素 A 水平对凡纳滨对虾生长、饲料利用、体组成成分及非特异性免疫反应的影响. *动物营养学报*, 19(6): 698–705.