

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20231220002

http://www.yykxjz.cn/

钟声平, 蔡小辉, 宋建达, 刘旭佳, 彭银辉, 黄亮华, 葛长字, 黄国强. 拟穴青蟹对不同饵料稳定同位素的周转和分馏. 渔业科学进展, 2025, 46(1): 30-45

ZHONG S P, CAI X H, SONG J D, LIU X J, PENG Y H, HUANG L H, GE C Z, HUANG G Q. Stable isotope turnover and fractionation of different feed in the juvenile *Scylla paramamosain*. Progress in Fishery Sciences, 2025, 46(1): 30-45

## 拟穴青蟹对不同饵料稳定同位素的周转和分馏\*

钟声平<sup>1</sup> 蔡小辉<sup>2</sup> 宋建达<sup>3</sup> 刘旭佳<sup>4</sup> 彭银辉<sup>2</sup>  
黄亮华<sup>1</sup> 葛长字<sup>3</sup> 黄国强<sup>1①</sup>

(1. 广西中医药大学海洋药物研究院 广西海洋药物重点实验室 广西 南宁 530200; 2. 北部湾大学海洋学院 广西海洋生物多样性养护重点实验室 广西 钦州 535011; 3. 山东大学(威海)海洋学院 山东 威海 264209; 4. 广西海洋科学研究院 广西 南宁 530007)

**摘要** 为研究不同饵料对拟穴青蟹(*Scylla paramamosain*)幼蟹碳和氮稳定同位素周转和分馏系数的影响,本研究采用200个50 cm×40 cm×40 cm的水族箱,采用鱼(李氏鲮*Callionymus richardsoni*)、虾(宽沟对虾*Penaeus latisulcatus*)、贝(杂色蛤*Ruditapes philippinarum*)、沙蚕(双齿围沙蚕*Perinereis aibuhitensis*)为饵料投喂初始体质量为1.5 g左右的拟穴青蟹幼蟹,并在第0、30、60、90、135、180天取样测定幼蟹的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ ,计算周转参数和分馏系数。结果显示,实验期间幼蟹 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 随养殖时间的变动可用 $\delta^{13}\text{C}=a\times\ln t+b$ 和 $\delta^{15}\text{N}=a\times\ln t+b$ 描述,摄食不同饵料时 $a$ 值变动较大。生长是驱动幼蟹体内碳和氮稳定同位素周转的主要因素,投喂4种饵料的幼蟹生长对 $^{13}\text{C}$ 周转的贡献百分比分别为79.83%、83.65%、84.88%和63.80%,生长对 $^{15}\text{N}$ 周转的贡献百分比分别81.97%、82.88%、75.27%和59.80%。投喂4种饵料的幼蟹 $^{13}\text{C}$ 完成50%周转时间( $t_{50}$ )分别为36.30、24.56、27.96和21.17 d,完成95%周转的时间( $t_{95}$ )分别为156.86、106.16、120.83和91.64 d, $^{15}\text{N}$ 完成50%周转时间( $t_{50}$ )分别为37.60、24.34、24.77和20.17 d,完成95%周转的时间( $t_{95}$ )分别为162.49、105.22、107.05和86.99 d。投喂4种饵料的幼蟹180 d时对饵料的 $\delta^{13}\text{C}$ 的分馏系数 $\Delta^{13}\text{C}_{180\text{d}}$ 为0.71‰~1.64‰,对饵料的 $\delta^{15}\text{N}$ 的分馏系数 $\Delta^{15}\text{N}_{180\text{d}}$ 为2.15‰~2.66‰。 $\Delta^{13}\text{C}$ 与增重率(MGR, %)的关系符合公式 $\Delta^{13}\text{C}=a\times\ln(\text{MGR})+b$ , $\Delta^{15}\text{N}$ 与增重率(MGR, %)的关系符合公式 $\Delta^{15}\text{N}=a\times\ln(\text{MGR})+b$ ,摄食不同饵料时, $a$ 和 $b$ 值均出现较大差异。 $\Delta^{13}\text{C}$ 与饵料的 $\delta^{13}\text{C}$ 成负线性相关,与初始幼蟹与饵料的 $\delta^{13}\text{C}$ 相差数值( $\delta^{13}\text{C}_{\text{IC}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{D}}$ )成正线性相关; $\Delta^{15}\text{N}$ 与饵料的 $\delta^{15}\text{N}$ 成负线性相关,与初始幼蟹与饵料的 $\delta^{15}\text{N}$ 相差数值( $\delta^{15}\text{N}_{\text{IC}}-\delta^{15}\text{N}_{\text{D}}$ )成正线性相关。本研究表明,生长是驱动拟穴青蟹幼蟹稳定同位素周转的主要因素,饵料稳定同位素丰度是影响分馏系数的重要因子。实验结果为拟穴青蟹营养生态学研究提供了参考数据。

**关键词** 拟穴青蟹; 稳定同位素; 周转速率; 分馏系数; 饵料; 生长

中图分类号 Q178.1 文献标识码 A 文章编号 2095-9869(2025)01-0030-16

\* 广西自然科学基金(2017GXNSFAA198022)、广西重点研发计划(桂科 AB16380105)、广西海洋生物多样性养护重点实验室开放课题(2023KA01)和广西中医药大学博士启动经费项目(2018BS034)共同资助。钟声平, Email: shpzhong@foxmail.com

① 通信作者: 黄国强, 研究员, Email: hugh7531@163.com

收稿日期: 2023-12-20, 收修改稿日期: 2024-03-07

稳定同位素技术广泛应用于水生生物的饵料组成和营养来源研究(宁加佳等, 2016; Divine *et al.*, 2017; Kristensen *et al.*, 2017; 崔莹等, 2019; Hemmati *et al.*, 2021; 彭彪彪等, 2022; 赵永松等, 2022、2024; Acar *et al.*, 2022; Sandoval *et al.*, 2022)、海洋和淡水生态系统的食物网构建和营养级分析(万祎等, 2005; Burress *et al.*, 2013; 王洁等, 2016; 张硕等, 2016; 谢斌等, 2017; 郭承秧等, 2018; 俞雅文等, 2019; 张博伦等, 2019; 朱文涛等, 2020; 陆亚楠等, 2022; 王开立等, 2022; 赵永松等, 2022、2024; Smith *et al.*, 2023)、水产养殖系统中养殖生物的饵料组成和营养来源分析(李学梅等, 2017; 李聪等, 2018; 张凯等, 2020; Lu *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2022; 苗静等, 2022; 赵永松等, 2024), 以及产地鉴别和溯源(郭婕敏等, 2014; 骆仁军等, 2020; 彭凯秀等, 2021; 白淑艳等, 2022; 梅光明等, 2022; 薛竣仁等, 2022)。可靠的消费者-饵料稳定同位素关系是应用稳定同位素技术的基础, 而稳定同位素周转速率和分馏系数是影响消费者-饵料稳定同位素关系的主要参数(O'reilly *et al.*, 2002; McCutchan *et al.*, 2003; Michener *et al.*, 2007; Vander Zanden *et al.*, 2015)。尽管 Boecklen 等(2011)指出, 不到 2% 的研究论文对消费者-饵料稳定同位素的分馏系数进行了实验测定, 需要更多的实验研究来改进稳定同位素混合模型的参数和假设。但迄今为止, 仍有大量的研究论文直接采用了已发表的分馏系数经验值, 如  $\delta^{15}\text{N}$  馏系数( $\Delta^{15}\text{N}$ )取值 3.4‰ (McCutchan *et al.*, 2003),  $\delta^{13}\text{C}$  分馏系数( $\Delta^{13}\text{C}$ )取值(1.3‰ $\pm$ 0.3‰) (Post, 2002)。而近岸和河口生态系统的相关研究表明, 消费者对饵料中稳定同位素的分馏系数变动范围巨大(Yokoyama *et al.*, 2005; Mazumder *et al.*, 2010; Herbon *et al.*, 2013), 因此, 在应用稳定同位素技术时获得准确的分馏系数和周转率参数至关重要, 开展更多的养殖实验测定近岸海洋生物对稳定同位素的分馏和周转参数成为应用稳定同位素技术研究相应生态系统营养生态学的基础。

拟穴青蟹(*Scylla paramamosain*)是我国东南沿海重要的野生和养殖蟹类(林琪等, 2007; 王桂忠等, 2016), 主要分布在有红树林的近岸和河口海域。红树林区域野生青蟹的饵料主要由海洋来源的碎屑、贝类、甲壳类、鱼类组成, 不同组分的占比在不同地点有明显差异(Shelley *et al.*, 2011; Viswanathan *et al.*, 2015)。国内对拟穴青蟹天然饵料来源的报道较少, 主要原因可能是传统的胃含物分析方法繁琐且难以对碎屑食物鉴别和定量, 而稳定同位素技术在拟穴青蟹的营养生态学研究尚未广泛应用。Wang 等(2015)

通过分析红树叶和青蟹体内的  $\delta^{13}\text{C}$ , 发现海南岛的红树林为拟穴青蟹提供了重要的营养来源, 但文中拟穴青蟹对饵料稳定同位素的分馏系数也是直接引用了 Post (2002) 的数据, 而 Herbon 等(2013)认为, 这些分馏系数不适合草食性或杂食性的甲壳动物。因此, 开展拟穴青蟹对不同饵料中的稳定同位素的分馏和周转参数研究, 能够为更准确地估算不同饵料的贡献提供可靠数据支撑。黄国强等(2021)通过 66 d 的实验发现, 拟穴青蟹对不同饵料  $^{13}\text{C}$  和  $^{15}\text{N}$  分馏系数差别较大, 并与以往文献引用的数据有较大差异, 因此, 需要进一步的实验研究, 为应用稳定同位素技术开展拟穴青蟹的摄食生态学研究提供可靠参数。本研究采用 4 种饵料, 测定拟穴青蟹幼蟹  $^{13}\text{C}$  和  $^{15}\text{N}$  周转相关参数和分馏系数, 并分析其体内  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  和分馏系数与养殖时间、生长、饵料稳定同位素丰度等的关系, 为开展拟穴青蟹营养生态学研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验设施

使用 200 个 50 cm $\times$ 40 cm $\times$ 40 cm 的塑料箱作为实验容器。使用前用高锰酸钾浸泡消毒, 然后用淡水冲洗干净, 再加入 20 cm 深的砂滤海水, 持续微量充气待用。

### 1.2 海水

海水经三级砂滤后, 再用紫外灯照射杀菌。海水盐度为 26~30, pH 为 7.9~8.3, 通过持续充气维持溶解氧含量大于 5.0 mg/L。

### 1.3 幼蟹来源

拟穴青蟹幼蟹从广西海洋研究有限公司获得。挑选 1 000 只五期仔蟹(C5) (俗称豆蟹, 体型大小和黄豆相当)放到 1 000 个圆形塑料桶中(每个桶底部铺沙 2 cm, 加水 2 L), 进行 30 d 的标粗。标粗期间, 每天下午 16:00 投喂对虾饲料 1 次, 每天早上 08:00—8:30 全量换水并检查饵料剩余情况, 根据饵料剩余情况调整投饵量。幼蟹长到体质量为 1.5 g 左右, 挑选健康均匀的个体作为实验材料。

### 1.4 实验饵料

近年来, 青蟹养殖的主要饵料为当地产量大的低值鱼、虾、贝以及沙蚕等。本实验选择李氏鲮(*Callionymus richardsoni*)、宽沟对虾(*Penaeus latisulcatus*)、杂色蛤(*Ruditapes philippinarum*)、双齿

围沙蚕(*Perinereis aibuhitensis*)作为代表饵料。在实验开始前,李氏鳮、宽沟对虾、杂色蛤和沙蚕在砂滤海水中暂养 24 h 后,进行消化道排空处理,李氏鳮除去鱼头、鱼骨、鳞片和内脏,杂色蛤除去贝壳,宽沟对虾剥除虾壳、除去虾头,沙蚕捞出沥水至不再滴水。然后,将每种饵料根据每天投喂需要量用封口袋分装,放入 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存。投喂前,从冰箱取出当天投喂饵料,解冻后,根据需要投喂量用剪刀剪成适宜大小后投喂。

### 1.5 实验设计

为监测幼蟹体内稳定同位素含量  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  的变化,使用 200 个养殖箱来养殖作为稳定同位素样品的幼蟹。初始幼蟹为 1 000 只标粗幼蟹,随机挑选 200 只健康幼蟹,按每个整理箱 1 只蟹苗随机放入 200 个养殖箱,记录初始体质量、饵料种类、养殖箱编号等数据。实验幼蟹的平均初始体质量为  $(1.45\pm 0.09)\text{ g}$ 。200 个养殖箱采用完全随机化方法分配到 4 种饵料处理。实验持续 180 d,分别在第 30、60、90、135、180 天,从每种饵料投喂的幼蟹中随机抽取 10 只,称重后,每只幼蟹作为 1 个样品保存。

### 1.6 养殖管理

每天下午 15:00 将每个水族箱的海水全部虹吸排放,清除剩饵和粪便,然后再加注 20 cm 深的砂滤海水。幼蟹每天下午 16:00 投饵 1 次,投饵量以第 2 天投饵前略有剩余为准。

### 1.7 样品采集与预处理

在实验用饵料准备好后,每种饵料分别用密封袋装 6 份 500 g 的样品,放入 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存。初始幼蟹的样品从标粗的蟹苗采集,共采集 6 份,每份样品 15 只幼蟹。初始青蟹经 24 h 禁食排空消化道后,从标粗桶中捞出,吸干表面水分后称重。用于稳定同位素检测的幼蟹样品分别在第 30、60、90、135 和 180 天采集,每种饵料分别采集 10 只幼蟹作为样品,经 24 h 禁食排空消化道后,吸干表面水分称重,每只幼蟹作为 1 个样品,放入密封袋中,在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存。投喂 4 种饵料的青蟹在前 60 d 均死亡 1 只,后面养殖阶段未出现死亡,除第 180 天的样品每种饵料均为 9 个样品外,其余时间批次均为每种饵料 10 个样品。

在养殖结束后,所有样品称量质量后放入玻璃烧杯,在  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  的烘箱内烘干至恒重,然后称量和记录干质量。用粉碎机将样品粉碎,过 80 目筛,然后将样品分为 2 份,1 份用于测定  $\delta^{13}\text{C}$ ,1 份用于测定  $\delta^{15}\text{N}$ 。

用于测定  $\delta^{13}\text{C}$  的样品在培养皿内铺成不超过 1 mm 的薄层,放置于整理箱内,放入用 500 mL 烧杯装的 250 mL 浓盐酸,加盖密封,静置 48 h 后,取少量样品加入盛有 1 mol/L 盐酸的小烧杯内,如不产生气泡后,放入  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  的烘箱内烘干至恒重;如还有气泡产生,继续用浓盐酸熏蒸至不产生气泡,放入  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  的烘箱内烘干至恒重。所有经预处理后的样品均保存在干燥器中备用。

### 1.8 稳定同位素分析

处理好的样品送至中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所测定。采用高温燃烧法,将获得的气体使用 Isoprime-100 同位素质谱仪测定碳和氮稳定同位素含量( $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$ )。 $^{13}\text{C}$  值以国际通用的标准物质美洲拟箭石(PDB)作为参考标准,氮稳定同位素  $^{15}\text{N}$  测定以空气为标准,测定精度为 0.05‰。每个样品重复测定 2 次,每 9 个样品后穿插 1 个标准物质样品进行校正。样品  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  的计算方法如下:

$$\delta^{13}\text{C}=(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}-1)\times 1\ 000 \quad (1)$$

$$\delta^{15}\text{N}=(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}-1)\times 1\ 000 \quad (2)$$

式中,  $R_{\text{sample}}$  和  $R_{\text{standard}}$  分别为样品和标准物中稳定同位素比值  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  或  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  (Herbon *et al.*, 2013)。

### 1.9 数据计算

**1.9.1 生长参数** 青蟹体质量增长率(mass gain rate, MGR, %)、特定生长率(specific growth rate,  $k$ , %/d)计算公式分别为:

$$\text{MGR}=100\times(M_t-M_i)/M_i \quad (3)$$

$$k=\ln(M_t/M_i)/t \quad (4)$$

式中,  $N_i$ 、 $M_i$ 、 $N_t$ 、 $M_t$  分别为实验开始时青蟹的数量(ind.)、实验开始时青蟹体质量(g)、时间为  $t$  (d)时青蟹的数量(ind.)、时间为  $t$  时青蟹体质量(g)。

**1.9.2 同位素周转参数** 当饵料发生转化后,动物体内稳定同位素组成的变化可能是由于组织生长或组织代谢造成的,为了预测本研究所观察到的同位素变化规律,选择 Hesslein 等(1993)建立的指数模型对稳定同位素变化进行预测。该模型将更换饵料后动物体稳定同位素组成随喂养时间的变化归结于组织生长和代谢的作用,已被运用到水生动物饵料转换后肌肉的稳定同位素周转研究:

$$\delta_t=\delta_f+(\delta_i-\delta_f)e^{-(k+m)t} \quad (5)$$

式中,  $\delta_t$  为实验第  $t$  天时青蟹的  $\delta^{13}\text{C}$  值或  $\delta^{15}\text{N}$  值;  $\delta_f$  为青蟹与新食物达到平衡时的  $\delta^{13}\text{C}$  值或  $\delta^{15}\text{N}$  值;  $\delta_i$  为青蟹与原食物达到平衡时的  $\delta^{13}\text{C}$  值或  $\delta^{15}\text{N}$  值;  $m$  为青蟹的代谢周转常数;  $k$  为青蟹在实验期间的生长率常数(特定生长率)。在本实验中,  $\delta_f$  和  $m$  可以通

过将青蟹的  $\delta^{13}\text{C}$  值或  $\delta^{15}\text{N}$  值随养殖时间而变化的实测数据代入公式(5), 然后利用迭代非线性回归推算得出。

青蟹碳、氮同位素完成 50% 周转时间( $t_{50}$ )和完成 95% 周转的时间( $t_{95}$ )分别用下面的公式计算(周晖等, 2023; 鹿珍珍等, 2023):

$$t_{50} = -\ln(1-0.5)/(k+m) \quad (6)$$

$$t_{95} = -\ln(1-0.95)/(k+m) \quad (7)$$

**1.9.3 稳定同位素富集参数** 青蟹对不同饵料中稳定碳和氮同位素的富集效应计算公式为:

$$\Delta^{13}\text{C} = \delta^{13}\text{C}_{\text{青蟹}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{饵料}} \quad (8)$$

$$\Delta^{15}\text{N} = \delta^{15}\text{N}_{\text{青蟹}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{饵料}} \quad (9)$$

式中,  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  为样品中稳定碳和氮同位素的比值(‰)。

### 1.10 统计分析

数据采用 SPSS 13.0 软件进行统计分析。因本研究计算的成活率、体质量增长率和特定生长率均为百分数且变动范围较大, 因此, 进行反正弦( $\sin^{-1}\sqrt{x}$ )转换后再进行方差分析。在数据服从正态分布及各组间方差平齐的情况下, 用单因素方差分析,  $P < 0.05$  作为差异显著标准。若数据方差不齐, 采用 Kruskal-Wallis 检验进行非参数统计分析,  $P < 0.05$  作为差异显著标准。回归分析采用 SPSS 软件中的曲线拟合。

## 2 结果

### 2.1 青蟹稳定 $^{13}\text{C}$ 含量( $\delta^{13}\text{C}$ , ‰)和 $^{15}\text{N}$ 含量( $\delta^{15}\text{N}$ , ‰)的变化

养殖期间幼蟹和饵料的  $\delta^{13}\text{C}$  值见表 1。不同饵料的  $\delta^{13}\text{C}$  值范围为  $-12.02\text{‰} \sim -22.31\text{‰}$ 。随养殖时间延长, 投喂鱼和虾的幼蟹  $\delta^{13}\text{C}$  由初始值  $-20.14\text{‰}$  逐渐升高, 在 180 d 时分别比饵料高  $1.50\text{‰}$  和  $0.71\text{‰}$ ; 投喂贝的幼蟹的  $\delta^{13}\text{C}$  值先上升后略下降, 180 d 时比饵料高  $1.35\text{‰}$ ; 投喂沙蚕的幼蟹的  $\delta^{13}\text{C}$  值无明显的上升或下降趋势, 在 180 d 时比饵料高  $1.46\text{‰}$ 。幼蟹养殖 180 d 时, 对饵料的  $\delta^{13}\text{C}$  的分馏系数  $\Delta^{13}\text{C}_{180\text{d}}$  为  $0.71\text{‰} \sim 1.64\text{‰}$ 。

养殖期间幼蟹和饵料的  $\delta^{15}\text{N}$  值见表 2。不同饵料的  $\delta^{15}\text{N}$  值范围为  $6.53\text{‰} \sim 14.57\text{‰}$ 。投喂鱼和虾的幼蟹  $\delta^{15}\text{N}$  值随养殖时间延长逐渐提高, 180 d 时分别比饵料高  $2.21\text{‰}$  和  $2.16\text{‰}$ ; 投喂贝的幼蟹  $\delta^{15}\text{N}$  值随养殖时间延长上升后在  $10\text{‰} \sim 11\text{‰}$  之间小幅波动, 在 180 d 时比饵料高  $2.66\text{‰}$ ; 投喂沙蚕的幼蟹  $\delta^{15}\text{N}$  值无明显的上升或下降趋势, 在 180 d 时比饵料高  $2.15\text{‰}$ 。幼蟹养殖 180 d 时对饵料的  $\delta^{15}\text{N}$  的分馏系数  $\Delta^{15}\text{N}$  为  $2.15\text{‰} \sim 2.66\text{‰}$ 。

幼蟹摄食 4 种饵料的  $\delta^{13}\text{C}$  随养殖时间的变化趋势见图 1。幼蟹摄食 4 种饵料的  $\delta^{13}\text{C}$  与养殖时间的关系都可以用对数公式  $\delta^{13}\text{C} = a \times \ln t + b$  描述, 但摄食沙蚕

表 1 幼蟹和饵料稳定同位素  $^{13}\text{C}$  含量( $\delta^{13}\text{C}$ , ‰) (平均值±标准差)  
Tab.1 Content of isotope  $^{13}\text{C}$  ( $\delta^{13}\text{C}$ , ‰) in crab and diets (Mean±SD)

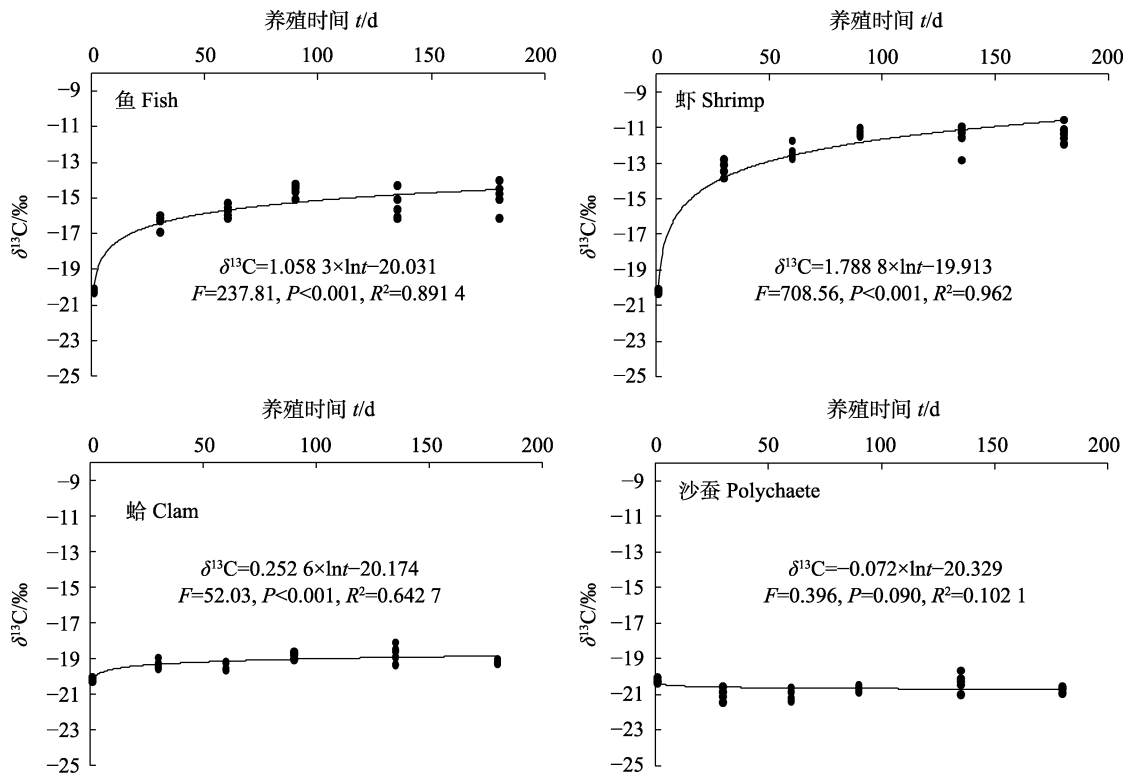
摄食饵料种类 Diet species	初始青蟹 Initial crab	30 d 青蟹 30 d crab	60 d 青蟹 60 d crab	90 d 青蟹 90 d crab	135 d 青蟹 135 d crab	180 d 青蟹 180 d crab	饵料 Diet	$\Delta^{13}\text{C}_{180\text{d}}$
鱼 Fish	$-20.14 \pm 0.10$	$-16.27 \pm 0.36$	$-15.71 \pm 0.34$	$-14.39 \pm 0.17$	$-15.43 \pm 0.77$	$-14.88 \pm 0.80$	$-16.38 \pm 0.13^c$	$1.50 \pm 0.09^b$
虾 Shrimp	$-20.14 \pm 0.10$	$-13.26 \pm 0.40$	$-12.38 \pm 0.38$	$-11.24 \pm 0.14$	$-11.52 \pm 0.78$	$-11.31 \pm 0.51$	$-12.02 \pm 0.09^d$	$0.71 \pm 0.07^a$
贝 Clam	$-20.14 \pm 0.10$	$-19.30 \pm 0.22$	$-19.44 \pm 0.23$	$-18.72 \pm 0.16$	$-18.67 \pm 0.47$	$-19.17 \pm 0.11$	$-20.52 \pm 0.04^b$	$1.35 \pm 0.03^b$
沙蚕 Polychaete	$-20.14 \pm 0.10$	$-20.93 \pm 0.32$	$-20.99 \pm 0.30$	$-20.61 \pm 0.10$	$-20.25 \pm 0.50$	$-20.67 \pm 0.17$	$-22.31 \pm 0.08^a$	$1.64 \pm 0.06^b$

注: 同列不同字母表示差异性显著( $P < 0.05$ )。下同。

Notes: Values with different small letters mean significant differences in the same line ( $P < 0.05$ ). The same below.

表 2 幼蟹和饵料稳定同位素  $^{15}\text{N}$  含量( $\delta^{15}\text{N}$ , ‰) (平均值±标准差)  
Tab.2 Content of isotope  $^{15}\text{N}$  ( $\delta^{15}\text{N}$ , ‰) in crab and diets (Mean±SD)

摄食饵料种类 Diet species	初始青蟹 Initial crab	30 d 青蟹 30 d crab	60 d 青蟹 60 d crab	90 d 青蟹 90 d crab	135 d 青蟹 135 d crab	180 d 青蟹 180 d crab	饵料 Diet	$\Delta^{15}\text{N}_{180\text{d}}$
鱼 Fish	$8.91 \pm 0.14$	$14.77 \pm 0.48$	$15.18 \pm 0.18$	$16.37 \pm 0.18$	$16.49 \pm 0.71$	$16.78 \pm 0.47$	$14.57 \pm 0.52^d$	$2.23 \pm 0.15^a$
虾 Shrimp	$8.91 \pm 0.14$	$13.51 \pm 0.09$	$14.11 \pm 0.19$	$14.59 \pm 0.45$	$14.15 \pm 0.45$	$15.05 \pm 0.18$	$12.89 \pm 0.06^c$	$2.16 \pm 0.09^a$
贝 Clam	$8.91 \pm 0.14$	$10.58 \pm 0.47$	$11.06 \pm 0.47$	$10.96 \pm 0.48$	$10.78 \pm 0.24$	$11.05 \pm 0.09$	$8.39 \pm 0.07^b$	$2.66 \pm 0.07^a$
沙蚕 Polychaete	$8.91 \pm 0.14$	$8.34 \pm 0.38$	$8.73 \pm 0.38$	$8.39 \pm 0.23$	$8.84 \pm 0.67$	$8.68 \pm 0.45$	$6.53 \pm 0.15^a$	$2.15 \pm 0.11^a$

图1 投喂不同饵料幼蟹  $\delta^{13}\text{C}$  的变化Fig.1 The change in  $\delta^{13}\text{C}$  of juvenile *S. paramamosain* with different feed during the experiment

的幼蟹回归关系的显著性和相关系数不高 ( $P=0.090$ ,  $R^2=0.1021$ ), 而且  $a=-0.072$ , 表明  $\delta^{13}\text{C}$  随养殖时间延长有缓慢下降的趋势。摄食鱼、虾、贝的幼蟹回归关系都极显著相关 ( $P<0.001$ ), 相关系数也较高, 表明幼蟹  $\delta^{13}\text{C}$  随养殖时间的延长, 前期上升较快, 后期缓慢上升。

幼蟹摄食4种饵料的  $\delta^{15}\text{N}$  随养殖时间的变化趋势都可以用对数公式  $\delta^{15}\text{N}=a \times \ln t + b$  描述(图2)。摄食沙蚕的幼蟹回归关系的显著性和相关系数不高 ( $P=0.256$ ,  $R^2=0.0474$ ), 而且  $a=-0.055$ , 表明,  $\delta^{15}\text{N}$  随养殖时间延长缓慢下降的趋势。摄食鱼、虾、贝的幼蟹回归关系都极显著相关 ( $P<0.001$ ), 相关系数也较高, 表明幼蟹  $\delta^{15}\text{N}$  随养殖时间的延长, 前期上升较快, 后期缓慢上升。

## 2.2 稳定同位素的周转参数

幼蟹摄食不同饵料后  $^{13}\text{C}$  的周转参数见表3。摄食鱼的幼蟹特定生长率  $k$  明显低于其余3种饵料, 摄食沙蚕的幼蟹  $^{13}\text{C}$  新陈代谢速率  $m$  明显高于其余3种饵料。摄食鱼、虾、贝、沙蚕的幼蟹  $^{13}\text{C}$  完成50%周转时间( $t_{50}$ )分别为36.30、24.56、27.96和21.17 d, 完成95%周转的时间( $t_{95}$ )分别为156.86、106.16、120.83

和91.64 d。摄食鱼、虾、贝、沙蚕的幼蟹生长对  $^{13}\text{C}$  周转的贡献比例分别为79.83%、83.65%、84.88%和63.80%。由实验数据和模型估算, 幼蟹体内  $^{13}\text{C}$  与4种饵料达到平衡时的  $\delta^{13}\text{C}$  值分别为  $-12.94\text{‰}$ 、 $-9.60\text{‰}$ 、 $-18.71\text{‰}$ 和  $-21.08\text{‰}$ , 此时, 幼蟹对  $^{13}\text{C}$  的分馏系数  $\Delta^{13}\text{C}_f$  范围为  $1.23\text{‰}$ ~ $3.448\text{‰}$ 。

幼蟹摄食不同饵料后  $^{15}\text{N}$  的周转参数见表4。摄食沙蚕的幼蟹  $^{15}\text{N}$  新陈代谢速率  $m$  明显高于其余3种饵料。摄食鱼、虾、贝、沙蚕的幼蟹  $^{15}\text{N}$  完成50%周转时间( $t_{50}$ )分别为37.60 d、24.34 d、24.77 d和20.17 d, 完成95%周转的时间( $t_{95}$ )分别为162.49 d、105.22 d、107.05 d和86.99 d。摄食鱼、虾、贝、沙蚕的幼蟹生长对  $^{15}\text{N}$  周转的贡献比例分别为81.97%、82.88%、75.27%和59.80%。由实验数据和模型估算, 幼蟹体内  $^{15}\text{N}$  与4种饵料达到平衡时的  $\delta^{15}\text{N}$  值分别为  $19.19\text{‰}$ 、 $15.85\text{‰}$ 、 $11.66\text{‰}$ 和  $8.34\text{‰}$ , 此时, 幼蟹对  $^{15}\text{N}$  的分馏系数  $\Delta^{15}\text{N}_f$  范围为  $2.81\text{‰}$ ~ $4.62\text{‰}$ 。

幼蟹的稳定同位素周转参数结果表明, 摄食不同饵料的幼蟹生长对  $^{13}\text{C}$  和  $^{15}\text{N}$  周转的贡献率都较高, 明显高于新陈代谢的贡献率。摄食不同饵料的幼蟹  $^{13}\text{C}$  和  $^{15}\text{N}$  周转速率明显不同,  $t_{50}$  和  $t_{95}$  差别较大; 而摄食同种饵料的幼蟹  $^{13}\text{C}$  和  $^{15}\text{N}$  周转速率接近,  $t_{50}$  和  $t_{95}$  差别较小。

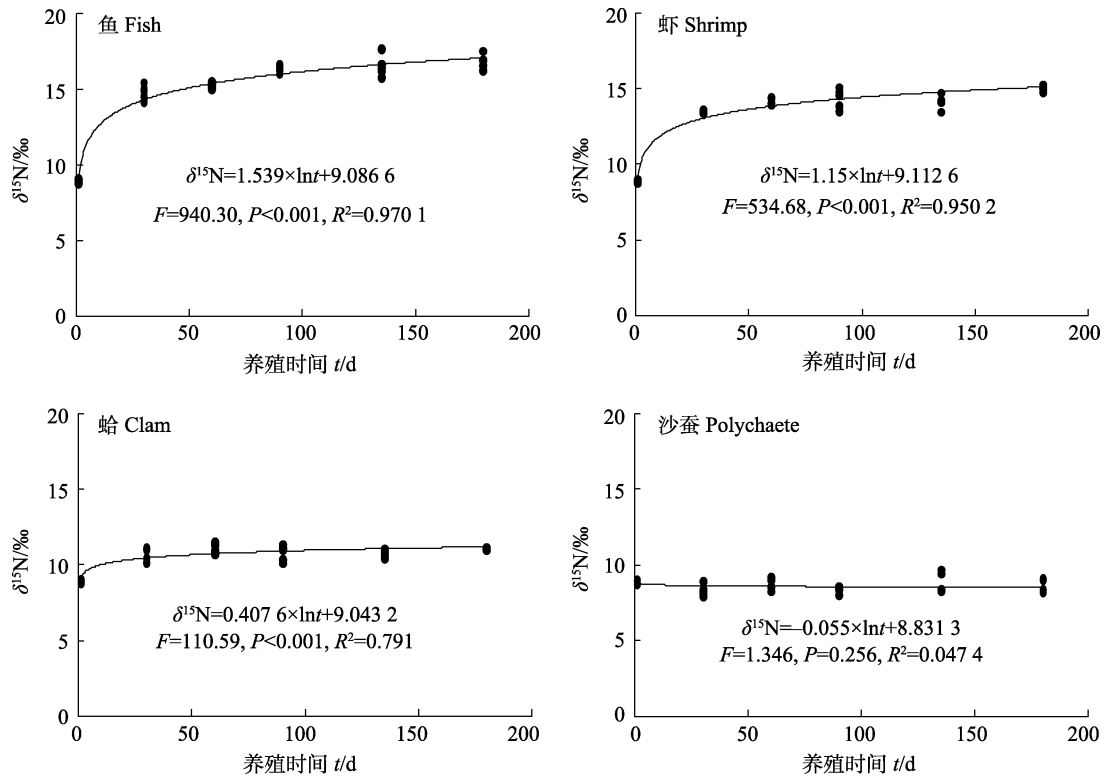


图 2 投喂不同饵料幼蟹  $\delta^{15}\text{N}$  的变化

Fig.2 The change in  $\delta^{15}\text{N}$  of juvenile *S. paramamosain* with different feed during the experiment

表 3 稳定同位素  $^{13}\text{C}$  的周转参数(平均值±标准差)

Tab.3 Parameters of isotope  $^{13}\text{C}$  turnover (Mean±SD)

项目 Item	摄食饵料种类 Diet species			
	鱼 Fish	虾 Shrimp	贝 Clam	沙蚕 Polychaete
初始青蟹 $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{13}\text{C}$ of initial crab	-20.14±0.10	-20.14±0.10	-20.14±0.10	-20.14±0.10
结束青蟹 $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{13}\text{C}$ of final crab	-15.22±0.26 <sup>c</sup>	-11.23±0.04 <sup>d</sup>	-18.70±0.04 <sup>b</sup>	-20.61±0.10 <sup>a</sup>
饵料 $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{13}\text{C}$ of diet	-16.38±0.13 <sup>c</sup>	-12.02±0.09 <sup>d</sup>	-20.52±0.04 <sup>b</sup>	-22.31±0.08 <sup>a</sup>
稳定同位素平衡时青蟹 $\delta^{13}\text{C}_f$ $\delta^{13}\text{C}_f$ of stable isotope equilibrium/‰	-12.94±0.35	-9.60±0.26	-18.71±0.08	-21.08±0.08
特定生长率 Specific growth rate ( $k$ )	0.0177±0.0009 <sup>a</sup>	0.0262±0.0005 <sup>b</sup>	0.0235±0.0007 <sup>b</sup>	0.0235±0.0006 <sup>b</sup>
新陈代谢 Metabolism ( $m$ )	0.0043±0.0008 <sup>a</sup>	0.0049±0.0007 <sup>a</sup>	0.0053±0.0004 <sup>a</sup>	0.0153±0.0008 <sup>b</sup>
同位素周转速率 Turnover rate of isotope ( $k+m$ )	0.0216±0.0004 <sup>a</sup>	0.0311±0.0007 <sup>b</sup>	0.0288±0.0002 <sup>b</sup>	0.0388±0.0002 <sup>c</sup>
生长贡献百分比 Contribution of growth [ $100 \times k / (k+m)$ ]	79.83±3.53 <sup>b</sup>	83.65±2.07 <sup>b</sup>	84.88±2.81 <sup>b</sup>	63.80±2.44 <sup>a</sup>
完成 50% 周转时间 Period of 50% turnover ( $t_{50}$ , d)	36.30±2.01 <sup>c</sup>	24.56±1.12 <sup>b</sup>	27.96±1.61 <sup>bc</sup>	21.17±1.40 <sup>a</sup>
完成 95% 周转时间 Period of 95% turnover ( $t_{95}$ , d)	156.86±8.65 <sup>c</sup>	106.16±4.83 <sup>ab</sup>	120.83±6.96 <sup>b</sup>	91.64±6.01 <sup>a</sup>
稳定同位素平衡时分馏系数 ( $\Delta^{13}\text{C}_f$ , ‰) Fractionation coefficient of stable isotope equilibrium	3.44±0.22 <sup>d</sup>	2.42±0.13 <sup>c</sup>	1.81±0.05 <sup>b</sup>	1.23±0.08 <sup>a</sup>

注: 同行不同字母表示差异性显著 ( $P < 0.05$ )。下同

Notes: Values with different small letters mean significant differences in the same row ( $P < 0.05$ ). The same below.

### 2.3 幼蟹碳、氮稳定同位素的分馏系数

养殖期间幼蟹对  $^{13}\text{C}$  分馏系数  $\Delta^{13}\text{C}$  与养殖时间 ( $t$ ) 的关系符合公式  $\Delta^{13}\text{C} = a \times \ln t + b$  (图 3)。摄食鱼、虾、

贝的幼蟹回归关系都极显著相关 ( $P < 0.001$ ), 相关系数也较高,  $\Delta^{13}\text{C}$  在养殖前期上升较快, 后期缓慢上升。摄食沙蚕的幼蟹  $\Delta^{13}\text{C}$  与养殖时间的相关性较差 ( $P = 0.270$ ,  $R^2 = 0.0485$ ), 并且  $a = -0.058$ , 表明幼蟹  $\Delta^{13}\text{C}$

表4 稳定同位素  $^{15}\text{N}$  的周转参数  
Tab.4 Parameters of isotope  $^{15}\text{N}$  turnover

项目 Item	摄食饵料种类 Diet species			
	鱼 Fish	虾 Shrimp	贝 Clam	沙蚕 Polychaete
初始青蟹 $\delta^{15}\text{N}$ $\delta^{15}\text{N}$ of initial crab	8.91±0.14	8.91±0.14	8.91±0.14	8.91±0.14
结束青蟹 $\delta^{15}\text{N}$ $\delta^{15}\text{N}$ of final crab	15.72±0.23 <sup>d</sup>	14.64±0.11 <sup>c</sup>	11.02±0.11 <sup>b</sup>	8.42±0.05 <sup>a</sup>
饵料 $\delta^{15}\text{N}$ $\delta^{15}\text{N}$ of diet	14.57±0.52 <sup>d</sup>	12.89±0.06 <sup>c</sup>	8.39±0.07 <sup>b</sup>	6.53±0.15 <sup>a</sup>
稳定同位素平衡时青蟹 $\delta^{15}\text{N}_f$ $\delta^{15}\text{N}_f$ of stable isotope equilibrium/‰	19.19±0.44	15.85±0.17	11.66±0.11	8.34±0.08
特定增长率 Specific growth rate( $k$ )	0.017 7±0.000 9 <sup>a</sup>	0.026 2±0.000 5 <sup>b</sup>	0.023 5±0.00 07 <sup>b</sup>	0.023 5±0.000 6 <sup>b</sup>
新陈代谢 Metabolism( $m$ )	0.003 8±0.000 8 <sup>a</sup>	0.005 2±0.000 7 <sup>a</sup>	0.008 6±0.001 3 <sup>a</sup>	0.019 2±0.002 2 <sup>b</sup>
同位素周转速率 Turnover rate of isotope( $k+m$ )	0.021 5±0.001 3 <sup>a</sup>	0.031 4±0.001 7 <sup>b</sup>	0.032 1±0.001 9 <sup>b</sup>	0.042 7±0.003 2 <sup>c</sup>
生长贡献百分比 Contribution of growth [100× $k/(k+m)$ ]	81.97±3.56 <sup>b</sup>	82.88±2.22 <sup>b</sup>	75.27±2.66 <sup>b</sup>	59.80±2.61 <sup>a</sup>
完成 50% 周转时间 Period of 50% turnover ( $t_{50}$ , d)	37.60±2.05 <sup>b</sup>	24.34±1.13 <sup>a</sup>	24.77±1.43 <sup>a</sup>	20.17±1.55 <sup>a</sup>
完成 95% 周转时间 Period of 95% turnover ( $t_{95}$ , d)	162.49±8.86 <sup>b</sup>	105.22±4.90 <sup>a</sup>	107.05±6.17 <sup>a</sup>	86.99±6.72 <sup>a</sup>
稳定同位素平衡时分馏系数( $\Delta^{15}\text{N}_f$ , ‰) Fractionation coefficient of stable isotope equilibrium	4.62±0.31 <sup>b</sup>	2.96±0.11 <sup>a</sup>	3.27±0.09 <sup>a</sup>	2.81±0.11 <sup>a</sup>

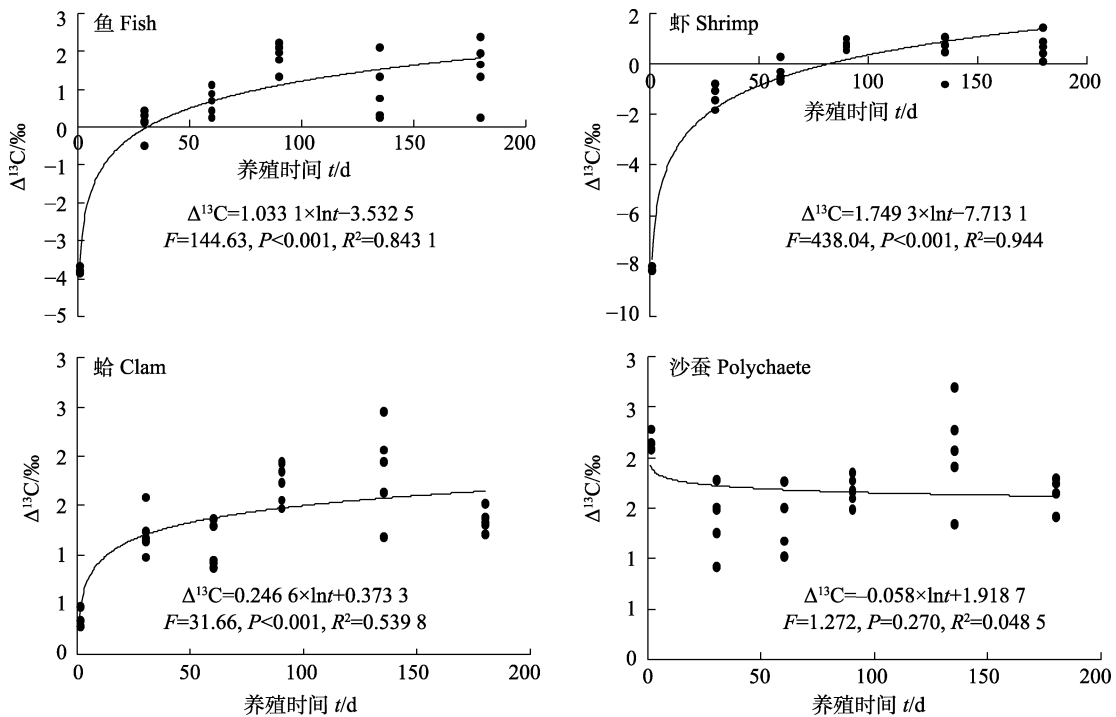


图3 实验期间投喂不同饵料幼蟹  $^{13}\text{C}$  分馏系数  $\Delta^{13}\text{C}$  的变化  
Fig.3 The change in  $\Delta^{13}\text{C}$  of juvenile *S. paramamosain* with different feed during the experiment

随养殖时间延长缓慢下降。

养殖期间幼蟹对  $^{15}\text{N}$  分馏系数  $\Delta^{15}\text{N}$  与养殖时间  $t$  的关系符合公式  $\Delta^{15}\text{N} = a \times \ln t + b$  (图4)。摄食鱼、虾、贝的幼蟹回归关系都极显著相关 ( $P < 0.001$ ), 相关系数也较高,  $\Delta^{15}\text{N}$  在养殖前期上升较快, 后期缓慢上升。摄食沙蚕的幼蟹  $\Delta^{15}\text{N}$  与养殖时间的相关性较差 ( $P = 0.546$ ,  $R^2 = 0.0145$ ), 并且  $a = -0.058$ , 表明幼蟹  $\Delta^{15}\text{N}$  随养殖时间延长缓慢下降。

拟穴青蟹幼蟹摄食鱼、虾、贝后对  $^{13}\text{C}$  和  $^{15}\text{N}$  分馏系数与养殖时间呈现类似的相关关系, 但摄食沙蚕后的稳定同位素分馏系数相关性较差。

幼蟹对  $^{13}\text{C}$  分馏系数  $\Delta^{13}\text{C}$  与增重率 (MGR, %) 的关系符合公式  $\Delta^{13}\text{C} = a \times \ln(\text{MGR}) + b$  (图5)。摄食鱼、虾、贝的幼蟹回归关系都极显著相关 ( $P < 0.001$ ), 相关系数也较高, 曲线显示随增重率提高,  $\Delta^{13}\text{C}$  先迅速上升, 然后转变为缓慢上升趋势。摄食沙蚕的幼蟹对  $^{13}\text{C}$  分

馏系数  $\Delta^{13}\text{C}$  与增重率的相关性较差( $P=0.031$ ,  $R^2=0.1729$ ), 且  $a=-0.042$ , 曲线显示,  $\Delta^{13}\text{C}$  随增重率的提高缓慢下降。

幼蟹对  $^{15}\text{N}$  分馏系数  $\Delta^{15}\text{N}$  与增重率的关系符合公式  $\Delta^{15}\text{N}=a \times \ln(\text{MGR})+b$  (图 6)。与  $\Delta^{13}\text{C}$  与增重率的

关系类似, 摄食鱼、虾、贝的幼蟹回归关系都极显著相关( $P<0.001$ ), 相关系数也较高。摄食沙蚕的幼蟹对  $^{15}\text{N}$  分馏系数  $\Delta^{15}\text{N}$  与增重率的相关性也较差( $P=0.146$ ,  $R^2=0.0822$ ), 且  $a=-0.033$ , 曲线显示,  $\Delta^{13}\text{C}$  随增重率的提高缓慢下降。

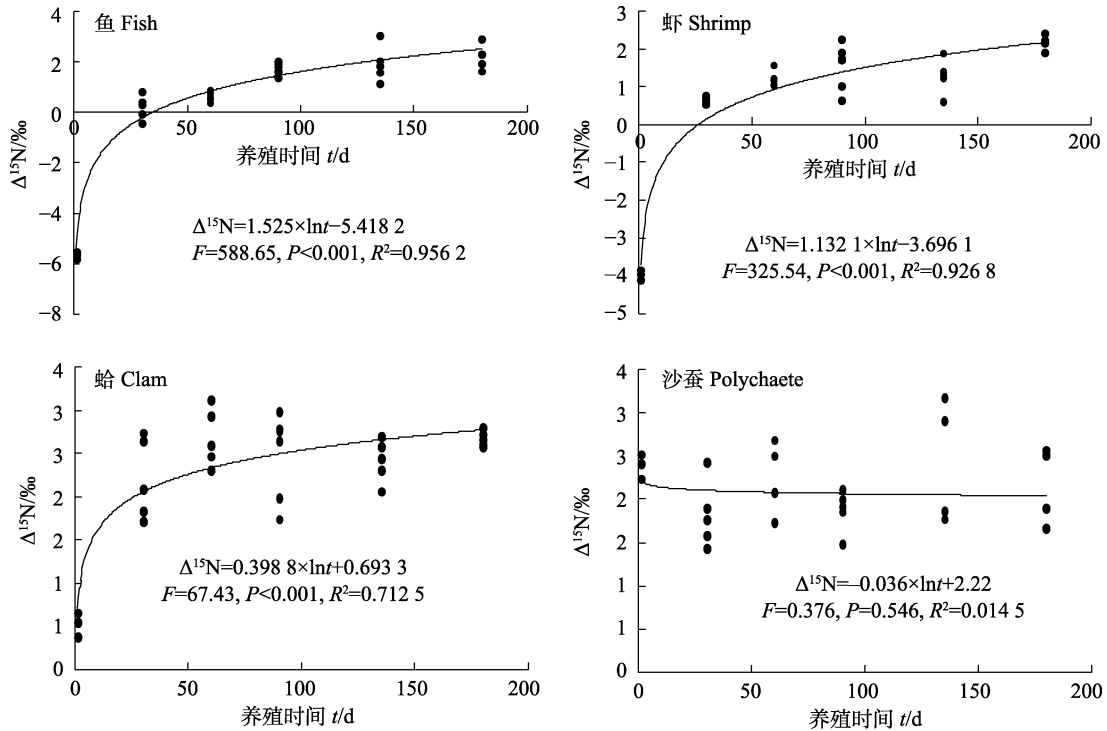


图 4 实验期间投喂不同饵料青蟹对  $^{15}\text{N}$  分馏系数  $\Delta^{15}\text{N}$  的变化  
Fig.4 The change in  $\Delta^{15}\text{N}$  of *S. paramamosain* with different feed during the experiment

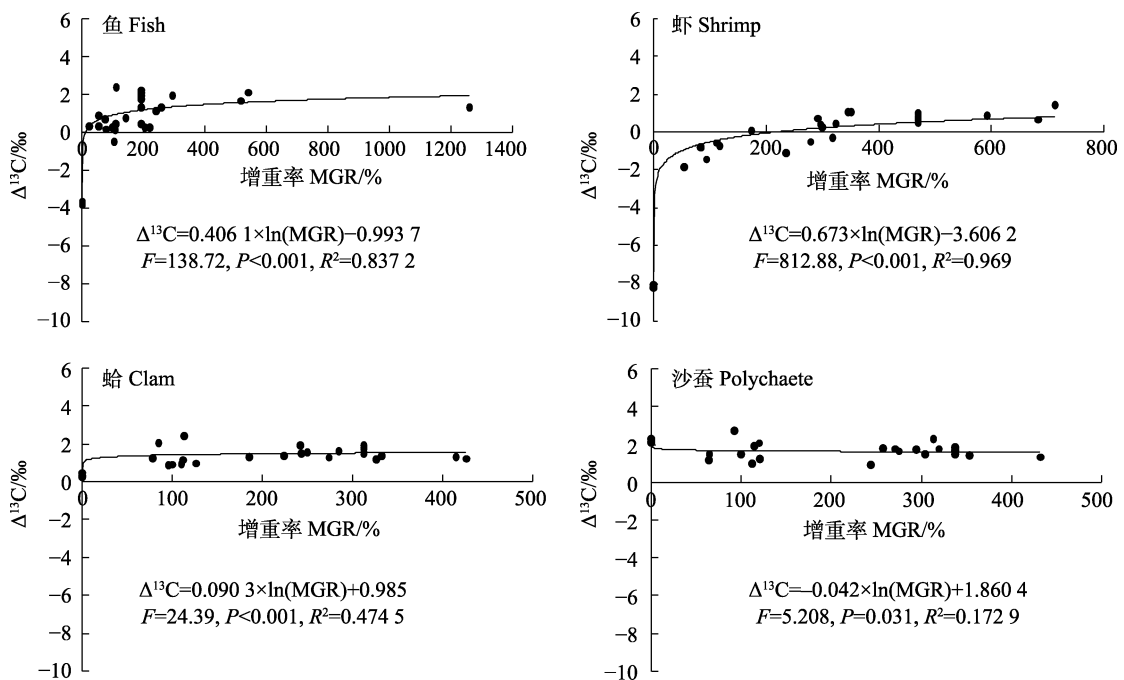


图 5 投喂不同饵料青蟹对  $^{13}\text{C}$  分馏系数  $\Delta^{13}\text{C}$  与增重率(MGR)的关系  
Fig.5 The relationship between  $\Delta^{13}\text{C}$  and the mass growth rate (MGR) of *S. paramamosain* with different feed during the experiment



幼蟹对  $^{13}\text{C}$  分馏系数  $\Delta^{13}\text{C}$  与饵料的  $\delta^{13}\text{C}$  成负线性相关, 幼蟹对  $^{15}\text{N}$  分馏系数  $\Delta^{15}\text{N}$  与饵料的  $\delta^{15}\text{N}$  也成负线性相关(图 7)。幼蟹对  $^{13}\text{C}$  分馏系数  $\Delta^{13}\text{C}$  与初

始幼蟹与饵料的  $\delta^{13}\text{C}$  相差数值( $\delta^{13}\text{C}_{\text{IC}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{D}}$ )成正线性相关, 幼蟹对  $^{15}\text{N}$  分馏系数  $\Delta^{15}\text{N}$  与饵料的 ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{IC}}-\delta^{15}\text{N}_{\text{D}}$ )也成正线性相关(图 8)。

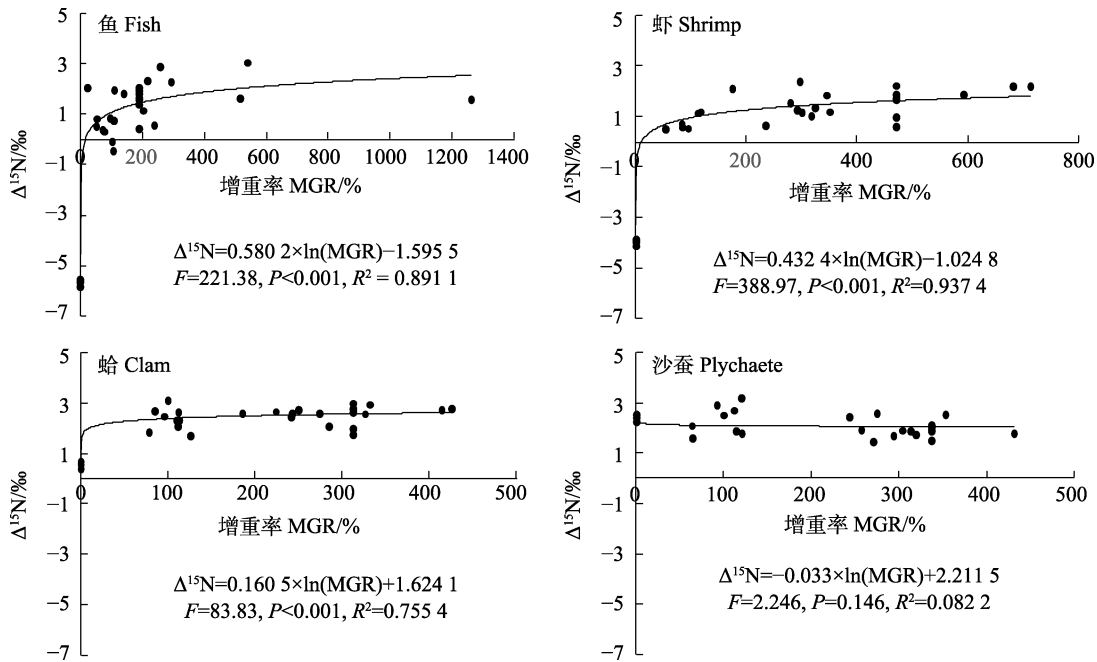


图 6 投喂不同饵料青蟹对  $^{15}\text{N}$  分馏系数  $\Delta^{15}\text{N}$  与增重率(MGR)的关系

Fig.6 The relationship between  $\Delta^{15}\text{N}$  and the mass growth rate (MGR) of *S. paramamosain* with different feed during the experiment

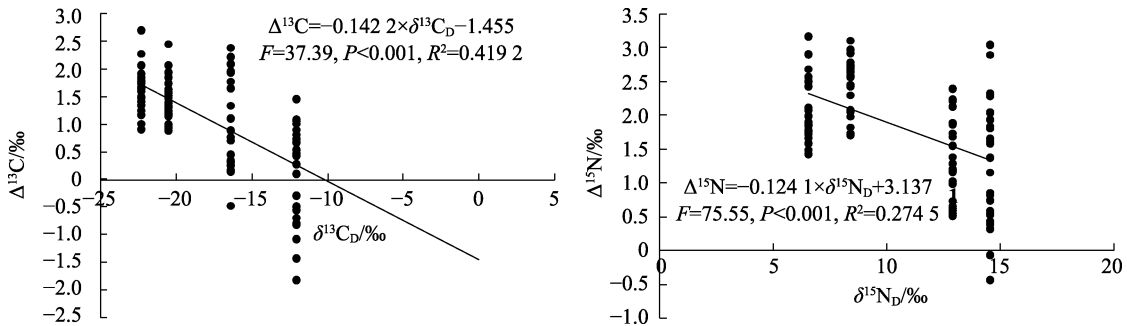


图 7 青蟹对稳定同位素的分馏系数与饵料中稳定同位素含量的关系

Fig.7 The relationship between fractionation coefficient and dietary stable isotope content of *S. paramamosain*

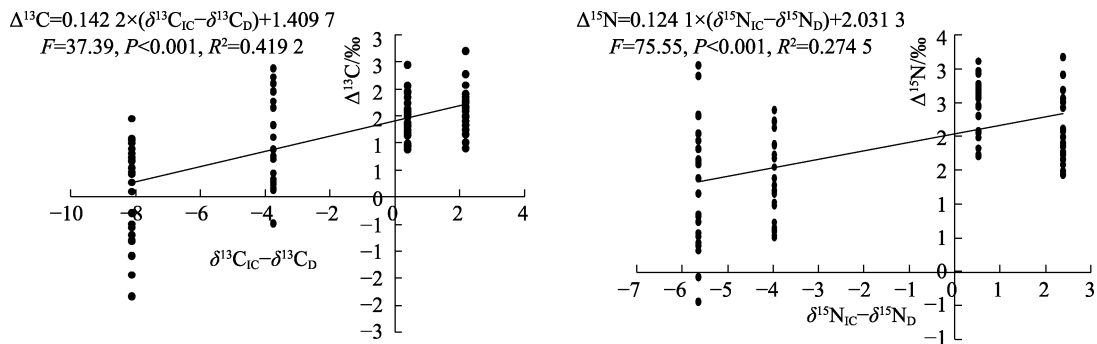


图 8 青蟹对稳定同位素的分馏系数与饵料中与初始青蟹和饵料稳定同位素含量差值的关系

Fig.8 The relationship between fractionation coefficient and gap between stable isotope content of *S. paramamosain* and diet

### 3 讨论

#### 3.1 拟穴青蟹幼蟹稳定同位素含量变化

饵料同位素组成是决定动物体稳定同位素组成的首要决定因素(Fry *et al.*, 1982; Peterson *et al.*, 1987)。水生动物摄食新的饵料后的一段时间内, 体内的碳和氮稳定同位素含量会向新饵料的含量接近并呈现出一定的富集(分馏)(Elsdon *et al.*, 2010; 黄国强等, 2021; 鹿珍珍等, 2023; 周晖等, 2023)。中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)幼蟹不同组织的  $\delta^{13}\text{C}$  随养殖时间的延长逐渐升高, 最终与饵料的  $\delta^{13}\text{C}$  值相比出现不同的差值(鹿珍珍等, 2023), 香港牡蛎(*Crassostrea hongkongensis*)的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  在池塘育肥过程中也逐渐降低和接近所使用的对虾配合饲料中的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  (周晖等, 2023)。拟穴青蟹幼蟹摄食不同饵料 66 d 后, 体内  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  均接近饵料的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$ , 并有一定的差异(黄国强等, 2021)。本研究中, 除了摄食沙蚕的拟穴青蟹幼蟹的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  未表现出明显的上升趋势, 摄食鱼、虾、贝的幼蟹的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  均迅速升高然后再维持缓慢上升的趋势, 并在 180 d 时高于饵料中的稳定同位素丰度。而日本和美虾(*Nihonotrypaea japonica*)和哈氏和美虾(*N. harmandi*)摄食纤细角毛藻(*Chaetoceros gracilis*)后, 由于纤细角毛藻的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  比初始虾低,  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  呈现下降趋势(Yokoyama *et al.*, 2013)。本研究中, 摄食沙蚕的幼蟹的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  之所以未表现出上升趋势, 可能是由于初始幼蟹的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  明显比沙蚕高, 加上分馏效应的影响, 呈现随养殖时间缓慢下降的趋势。幼蟹摄食沙蚕后  $\delta^{13}\text{C}$  的变化趋势与 Herbon 等(2013)对新加坡上相手蟹(*Episesarma singaporense*)和泡粒上相手蟹(*Episesarma versicolor*)摄食红树叶后  $\delta^{13}\text{C}$  的变化趋势相似, 由于实验开始时幼蟹的  $\delta^{13}\text{C}$  明显高于红树叶, 因此, 在实验过程中蟹的  $\delta^{13}\text{C}$  没有表现出明显的上升趋势。但在 Herbon 等(2013)的实验中, 蟹的  $\delta^{15}\text{N}$  表现出明显的上升趋势, 并没有向红树叶  $\delta^{15}\text{N}$  接近的趋势, 可能是由于红树叶的氮含量太低( $<1.0\%$ ),  $\delta^{15}\text{N}$  也较低( $<5\%$ ), 导致蟹获得的氮不足而未能使  $^{15}\text{N}$  充分周转。而本实验使用的均为动物性饵料, 氮含量高, 而且  $\delta^{15}\text{N}$  也较高, 较接近初始蟹的  $\delta^{15}\text{N}$ , 蟹体内的  $^{15}\text{N}$  能够充分周转。

#### 3.2 拟穴青蟹幼蟹稳定同位素的周转速率

稳定同位素周转参数反映了动物摄食新饵料后稳定同位素的更新速率, 更新速率主要由生长速率和新陈代谢速率决定(Hesslein *et al.*, 1993; Macavoy *et al.*,

2005)。Herbon 等(2013)认为, 70 d 的喂养足以使 2 种相手蟹的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  发生显著变化, 日本和美虾和哈氏和美虾的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  在 31 d 的投喂实验中也发生了显著改变(Yokoyama *et al.*, 2005), 拟穴青蟹幼蟹摄食不同饵料 66 d 后也与饵料的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  接近(黄国强等, 2021), 表明这几种海水甲壳动物能够较快地进行体内  $^{13}\text{C}$  和  $^{15}\text{N}$  的周转。但几个实验中动物体内的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  变动趋势尚未稳定, 所以, 可能需要进行更长周期的实验获得稳定同位素值。小规格中华绒螯蟹幼蟹肝胰腺(20.88 d)、鳃(34.14 d)和肌肉(29.37 d)组织的稳定同位素半衰期( $t_{50}$ )均小于大规格幼蟹的对应组织(21.73、66.01 和 35.18 d)(鹿珍珍等, 2023), 表明动物规格对周转速度有明显影响。投喂动物性饵料和欧海神草(*Posidonia oceanica*)的钩虾(*Gammarus aequicauda*)的  $^{13}\text{C}$  的  $t_{50}$  分别为 12.55 d 和 51.62 d, 显示饵料对周转速率的影响巨大(François *et al.*, 2017)。本研究结果表明, 拟穴青蟹幼蟹摄食同种饵料后  $^{13}\text{C}$  和  $^{15}\text{N}$  的  $t_{50}$  都非常接近, 而  $t_{95}$  均超过  $t_{50}$  的 4 倍, 表明稳定同位素的周转速率在实验前期较高, 后期明显下降。摄食不同饵料的幼蟹的  $^{13}\text{C}$  和  $^{15}\text{N}$  的  $t_{50}$  和  $t_{95}$  均存在显著差异, 表明饵料种类对稳定同位素的周转速率有明显影响。François 等(2017)认为, 欧海神草对于钩虾来说是劣质饵料, 会导致同化率和新陈代谢率的下降, 降低稳定同位素的周转速率。本研究中, 摄食鱼的幼蟹的  $t_{50}$  和  $t_{95}$  均比摄食其余 3 种饵料的幼蟹长, 并且生长速率  $k$  也显著低于摄食其余 3 种饵料的幼蟹, 也表明饵料质量会通过改变生长速率来影响稳定同位素的周转速率。

本研究中, 拟穴青蟹幼蟹的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  在 180 d 时与 135 d 相比变动不大, 并且  $t_{95}$  均小于 180 d, 回归曲线也表明实验后期  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  的变化趋于平缓, 因此, 180 d 的实验周期对于测定拟穴青蟹幼蟹的稳定同位素周转和分馏的相关参数是适宜的。

#### 3.3 生长与新陈代谢对拟穴青蟹幼蟹同位素周转的贡献

尽管 Hesslein 等(1993)、Fry 等(1982)、Herzka 等(2000)认为稳定同位素周转主要由生长驱动, 但在不同的研究中发现了生长速率和新陈代谢速率对稳定同位素周转的不同影响。如斑马鱼(*Danio rerio*)新陈代谢作用对肌肉组织碳稳定同位素周转的贡献比例高达 74% (Tarboush *et al.*, 2006), 而新陈代谢是驱动中华绒螯蟹幼蟹体组织碳稳定同位素周转的主要因子, 在不同组织中新陈代谢在碳稳定同位素周转的贡献范围可达到 67%~94.04% (鹿珍珍等, 2023)。本研

究结果表明,青蟹幼蟹的生长对碳和氮稳定同位素周转的贡献率范围为 59.80%~84.88%,显然生长在稳定同位素周转中起到主导作用。不同实验研究得到不同结论,可能主要由实验中生物生长速率和新陈代谢速率的差异导致。如在鹿珍珍等(2023)研究中,小规格和大规格中华绒螯蟹幼蟹的生长速率分别为 0.006 7 和 0.001 9,而本实验中拟穴青蟹幼蟹的生长速率则达到了 0.017 7~0.026 2,2 个研究的实验对象生长速度存在巨大的差距,必然导致碳和氮在身体的同化和沉积速度上的差异,并进而导致生长和新陈代谢对稳定同位素周转贡献比例的差异。

### 3.4 拟穴青蟹稳定同位素的分馏系数

在 180 d 时,摄食鱼、虾、贝、沙蚕的幼蟹对  $^{13}\text{C}$  的分馏系数  $\Delta^{13}\text{C}_{180\text{d}}$  分别为 1.50‰、0.71‰、1.35‰ 和 1.64‰,而根据模型计算幼蟹体内  $^{13}\text{C}$  与饵料达到平衡时的分馏系数  $\Delta^{13}\text{C}_f$  分别为 3.44‰、2.42‰、1.81‰和 1.23‰,二者之间有一定的差距,整体而言,实测值  $\Delta^{13}\text{C}_{180\text{d}}$  与文献引用的 1.3‰±0.3‰ (POST, 2002)较接近。摄食鱼、虾、贝、沙蚕的幼蟹对  $^{15}\text{N}$  的分馏系数  $\Delta^{15}\text{N}_{180\text{d}}$  分别为 2.23‰、2.16‰、2.66‰ 和 2.15‰,而根据模型计算幼蟹体内  $^{15}\text{N}$  与饵料达到平衡时的分馏系数  $\Delta^{15}\text{N}_f$  分别为 4.62‰、2.96‰、3.27‰和 2.81‰,二者之间也有或大或小的差距,根据模型计算的分馏系数整体上更接近文献引用的 3.4‰ (McCutchan *et al.*, 2003)。由于近岸和河口生态系统的消费者对饵料中稳定同位素的分馏系数变动范围巨大(Yokoyama *et al.*, 2005; Mazumder *et al.*, 2010; Herbon *et al.*, 2013),如 Yokoyama 等(2005)对河口大型底栖动物的研究表明,动物-食物的 $\Delta^{13}\text{C}$  介于 2‰~2.2‰,而新加坡上相手蟹和泡粒上相手蟹对 2 种红树叶的  $\Delta^{13}\text{C}$  为 5.1‰和 4.1‰, $\Delta^{15}\text{N}$  为 5.0‰和 5.4‰ (Herbon *et al.*, 2013)。因此,相关生态研究中分馏系数的引用需要谨慎对待,尽量采用实测的数据或引用相似环境条件下获得的同种或同类生物数据。

### 3.5 养殖期间分馏系数的变化及影响因子

本实验发现,除摄食沙蚕的幼蟹外, $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  随养殖时间的延长都是先迅速上升然后维持缓慢上升的趋势,因此, $\Delta^{13}\text{C}$  和  $\Delta^{15}\text{N}$  也显示出相同的变动趋势,这与香港牡蛎育肥期间  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  随育肥时间下降的趋势(周晖等, 2023)不同,与香港牡蛎育肥期间主要营养来源的对虾饲料  $\delta^{13}\text{C}$  (2.71‰)和  $\delta^{15}\text{N}$  (-23.46‰)较低有关,育肥初始,香港牡蛎的各种组织的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  都明显比对虾饲料高。因为在实验

初始时刻,幼蟹体内的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  比沙蚕高,摄食沙蚕的幼蟹的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  变动与香港牡蛎类似,除实验早期有下降外,其余时间维持小幅波动趋势。摄食鱼、虾、杂色蛤的拟穴青蟹幼蟹的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  变动与中华绒螯蟹幼蟹实验期间的  $\delta^{13}\text{C}$  上升模式(鹿珍珍等, 2023)也不一致,可能是由于生物种类、饵料种类以及稳定同位素周转的主要驱动因素不同。由于本研究中稳定同位素的周转主要由生长驱动,因此,摄食鱼、虾、杂色蛤的幼蟹分馏系数与体质量增长率成明显正相关,先快速上升后维持缓慢上升趋势。由于稳定同位素周转速率的差异,要获得稳定的分馏系数显然需要一个适宜的实验周期。本研究中,幼蟹摄食 4 种饵料的最长  $t_{95}$  为 162.49 d,而本实验的周期为 180 d,能够满足获得稳定分馏系数的要求。

对本研究的 4 种饵料的分馏系数与饵料中稳定同位素含量的回归关系表明,分馏系数与饵料中的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  都是负相关的(图 7),因此,分馏系数与初始青蟹和饵料之间的稳定同位素差值( $\delta^{13}\text{C}_{\text{IC}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{D}}$ )和( $\delta^{15}\text{N}_{\text{IC}}-\delta^{15}\text{N}_{\text{D}}$ )的关系则成正相关(图 8)。通过分析拟穴青蟹幼蟹对 6 种饵料的分馏系数和饵料  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  (黄国强等, 2021)发现,分馏系数与饵料中  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  也呈现负相关关系。因此,尽管实验期间幼蟹的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  会向饵料的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  接近,并最终维持高于饵料  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  一定幅度,但分馏系数受到饵料  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  的影响。这与饵料成分对钩虾的稳定同位素周转有重要影响的结论(François *et al.*, 2017)是一致的。

## 4 结论

以拟穴青蟹幼蟹为研究对象,通过 180 d 的实验,研究了其对鱼、虾、贝、沙蚕中稳定同位素  $^{13}\text{C}$  和  $^{15}\text{N}$  的周转和分馏。结果显示,生长对拟穴青蟹幼蟹稳定同位素周转的贡献大于新陈代谢,饵料种类对  $^{13}\text{C}$  和  $^{15}\text{N}$  的周转速率有显著影响。幼蟹鱼、虾、贝、沙蚕中  $^{13}\text{C}$  和  $^{15}\text{N}$  的分馏系数分别为 1.50‰、0.71‰、1.35‰、1.64‰和 2.23‰、2.16‰、2.55‰、2.15‰,饵料中的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  是影响分馏系数的重要因子。

## 参 考 文 献

- ACAR S, ERTÜRK GÜRKAN S, ATEŞ A S, *et al.* A contribution on the diet of the warty crab, *Eriphia verrucosa* (Forskål, 1775) by informative Bayesian stable isotope mixing models. *Russian Journal of Marine Biology*, 2022, 48(6): 495-503

- BAI S Y, WANG Z Q, TANG S Z, *et al.* Application of stable isotope ratio and mineral element analysis technology in traceability of aquatic products. *Chinese Journal of Fisheries*, 2022, 35(6): 105–112 [白淑艳, 王钟强, 汤施展, 等. 稳定同位素比值及矿物元素分析技术在水产品溯源研究中的应用进展. *水产学杂志*, 2022, 35(6): 105–112]
- BOECKLEN W J, YARNES C T, COOK B A, *et al.* On the use of stable isotopes in trophic ecology. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2011, 42: 411–440
- BURRESS D E, GANGLOFF M M, SIEFFERMAN L. Trophic analysis of two subtropical South American freshwater crabs using stable isotope ratios. *Hydrobiologia*, 2013, 702(1): 5–13
- CUI Y, WU X G, ZHAO F, *et al.* Diet sources of juvenile Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) during upstream migration indicated by the carbon and nitrogen stable isotopes. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2019, 50(4): 822–829 [崔莹, 吴旭干, 赵峰, 等. 基于碳、氮稳定同位素分析中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)幼蟹溯河洄游期食物来源变化. *海洋与湖沼*, 2019, 50(4): 822–829]
- DIVINE L M, BLUHM B A, MUETER F J, *et al.* Diet analysis of Alaska Arctic snow crabs (*Chionoecetes opilio*) using stomach contents and  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  stable isotopes. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2017, 135: 124–136
- ELSDON T S, AYVAZIAN S, MCMAHON K W, *et al.* Experimental evaluation of stable isotope fractionation in fish muscle and otoliths. *Marine Ecology Progress Series*, 2010, 408: 195–205
- FRANÇOIS R, FRANÇOIS D, AURÉLIE M, *et al.* Impact of food type on respiration, fractionation and turnover of carbon and nitrogen stable isotopes in the marine amphipod *Gammarus aequicauda* (Martynov, 1931). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2017, 486: 358–367
- FRY B, ARNOLD C. Rapid  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  turnover during growth of brown shrimp (*Penaeus aztecus*). *Oecologia*, 1982, 54: 200–204
- GUO C Y, YANG Z, CHEN J F, *et al.* A preliminary study on the food resources and trophic levels of the benthic community in the Yap Trench based on stable carbon and nitrogen isotope. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(10): 51–60 [郭承秧, 杨志, 陈建芳, 等. 基于碳、氮稳定同位素的雅浦海沟底栖生物食物来源和营养级初探. *海洋学报*, 2018, 40(10): 51–60]
- GUO J M, LIN G H. Stable isotope compositions of wild and farmed *S. paramamosain* and its implication for tracedbility. *Journal of Isotopes*, 2014, 27(1): 1–7 [郭婕敏, 林光辉. 不同生境红树林青蟹的稳定同位素组成及其产地溯源意义. *同位素*, 2014, 27(1): 1–7]
- HEMMATI M R, SHOJAEI M G, TAHERI M A, *et al.* Food sources for camptandriid crabs in an arid mangrove ecosystem of the Persian Gulf: A stable isotope approach. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2021, 57(5): 457–469
- HERBON C M, NORDHAUS I. Experimental determination of stable carbon and nitrogen isotope fractionation between mangrove leaves and crabs. *Marine Ecology Progress Series*, 2013, 490: 91–105
- HERZKA S Z, HOLT G J. Changes in isotopic composition of red drum (*Sciaenops ocellatus*) larvae in response to dietary shifts: Potential applications to settlement studies. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, 57(1): 137–147
- HESSELEIN R H, HALLARD K A, RAMLAL P. Replacement of sulfur, carbon, and nitrogen in tissue of growing broad whitefish (*Coregonus nasus*) in response to a change in diet traced by  $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ , and  $\delta^{15}\text{N}$ . *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1993, 50(10): 2071–2076
- HUANG G Q, CAO S H, LIU X J, *et al.* A preliminary study on enrichment of stable isotope from diets by mud crab (*Scylla paramamosain*). *South China Fisheries Sciences*, 2021, 17(3): 19–26 [黄国强, 曹素会, 刘旭佳, 等. 拟穴青蟹对饵料中稳定同位素富集效应的初步研究. *南方水产科学*, 2021, 17(3): 19–26]
- MCCUTCHAN JR J H, LEWIS JR W M, KENDALL C, *et al.* Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur. *Oikos*, 2003, 102: 378–390
- KRISTENSEN E, LEE S Y, MANGION P, *et al.* Trophic discrimination of stable isotopes and potential food source partitioning by leaf-eating crabs in mangrove environments. *Limnology and Oceanography*, 2017, 62(5): 2097–2112
- LI C, CHENG Y X, GUAN Q Z, *et al.* Using stable isotopes to estimate the effects of different carbon/nitrogen feeds on feeding habit of *Procambarus clarkii* in the rice-crayfish co-culture system. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(11): 1778–1786 [李聪, 成永旭, 管勤壮, 等. 用稳定性同位素技术分析稻—虾系统中不同“碳/氮”投喂方式对克氏原螯虾食性的影响. *水产学报*, 2018, 42(11): 1778–1786]
- LI X M, ZHU Y J, WANG X G, *et al.* Using a stable isotope ratio to evaluate the contribution of food to bighead carp (*Aristichthys nobilis*) subjected to different breeding methods. *Journal of Fisheries Sciences of China*, 2017, 24(2): 278–283 [李学梅, 朱永久, 王旭歌, 等. 稳定同位素技术分析不同养殖方式下鳊饵料的贡献率. *中国水产科学*, 2017, 24(2): 278–283]
- LIN Q, LI S J, LI Z B, *et al.* Species composition in genus *Scylla* from the coast of southeast China. *Journal of Fisheries of China*, 2007, 31(2): 211–219 [林琪, 李少菁, 黎中宝, 等. 中国东南沿海青蟹属(*Scylla*)的种类组成. *水产学报*, 2007, 31(2): 211–219]
- LU Y N, ZHANG R, ZHANG H, *et al.* Seasonal variation in the trophic structure of food webs in coastal waters of Jiangsu Province based on stable isotope techniques. *Haiyang*

- Xuebao, 2022, 44(2): 1–10 [陆亚楠, 张瑞, 张虎, 等. 应用稳定同位素技术研究江苏近海食物网营养结构的季节性变化. 海洋学报, 2022, 44(2): 1–10]
- LU Z Z, SUN Y F, XIAO C L, *et al.* Dietary analysis based on 18S rDNA, and stable carbon and nitrogen isotopes in juvenile *Eriocheir sinensis* crabs reared under three feeding modes. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 741780
- LU Z Z, XU G W, SUN Y F, *et al.* Determination of carbon stable isotope turnover rate and carbon and nitrogen fractionation factor in juvenile *Eriocheir sinensis*. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(10): 126–133 [鹿珍珍, 徐广伟, 孙云飞, 等. 中华绒螯蟹幼蟹碳稳定同位素周转速率与碳、氮分馏系数的测定. 水产学报, 2023, 47(10): 126–133]
- LUO R J, JIANG T, CHEN X B, *et al.* Potential assessment of stable isotopes and mineral elements for geographic origin identification of *Eriocheir sinensis*. *Food Science*, 2020, 41(2): 298–305 [骆仁军, 姜涛, 陈修报, 等. 基于稳定同位素和矿质元素的中华绒螯蟹产地鉴别潜力评价. 食品科学, 2020, 41(2): 298–305]
- MACAVOY S E, MACKO S A, ARNESON L S. Growth versus metabolic tissue replacement in mouse tissues determined by stable carbon and nitrogen isotope analysis. *Canadian Journal of Zoology*, 2005, 83(5): 631–641
- MAZUMDER D, SAINTILAN N. Mangrove leaves are not an important source of dietary carbon and nitrogen for crabs in temperate Australian mangroves. *Wetlands*, 2010, 30(2): 375–380
- MEI G M, YANG Y Y, ZHANG Y R, *et al.* Geographical identification of *Larimichthys crocea* based on analysis of elements and stable isotope ratios. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2022, 49(6): 715–725, 752 [梅光明, 杨盈悦, 张玉汝, 等. 基于元素及稳定同位素分析的大黄鱼产地区分技术. 浙江大学学报(理学版), 2022, 49(6): 715–725, 752]
- MIAO J, LIU F, YAN F J, *et al.* Analysis of food sources of *Eriocheir sinensis* in rice-crab integrated ecosystem based on stable isotopes in saline-alkali land of the Yellow River Delta. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(6): 1489–1496 [苗静, 刘峰, 闫法军, 等. 基于稳定同位素的黄河三角洲盐碱地稻蟹种养系统中华绒螯蟹食物源分析. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1489–1496]
- MICHENER R H, KAUFMAN L. Stable isotope ratios as tracers in marine food webs: An update. MICHENER R H, LAJTHA K. *Stable isotopes in ecology and environmental science* (2nd ed). Malden: Blackwell Publishing Ltd., 2007, 238–282
- NING J J, DU F Y, WANG X H, *et al.* Feeding habits of mantis shrimp based on stable isotope analysis. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(6): 903–910 [宁加佳, 杜飞雁, 王雪辉, 等. 基于稳定同位素的口虾蛄食性分析. 水产学报, 2016, 40(6): 903–910]
- O'REILLY C M, HECKY R E, COHEN A S, *et al.* Interpreting stable isotopes in food webs: Recognizing the role of time averaging at different trophic levels. *Limnology and Oceanography*, 2002, 47(1): 306–309
- PENG B B, WANG S K, ZHAO F, *et al.* Carbon and nitrogen isotopic characteristics and food source differences of *Lateolabrax maculatus* in three sub habitats of salt marsh wetland in the Yangtze River Estuary. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, 29(2): 295–303 [彭彪彪, 王思凯, 赵峰, 等. 长江口盐沼湿地 3 种亚生境中国花鲈的碳、氮稳定同位素特征及基础食源差异. 中国水产科学, 2022, 29(2): 295–303]
- PENG K X, CUI Y M, JIANG F, *et al.* Stable isotope ratio characteristics and origin tracing of *Portunus trituberculatus*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(6): 2021–2027 [彭凯秀, 崔艳梅, 姜芳, 等. 不同产地三疣梭子蟹的稳定同位素比值特征及原产地溯源. 应用生态学报, 2021, 32(6): 2021–2027]
- PETERSON B J, FRY B. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1987, 18: 293–320
- POST D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: Models, methods, and assumptions. *Ecology*, 2002, 83(3): 703–718
- SANDOVAL L A, MANCERA-PINEDA J E, DELGADO-HUERTAS A, *et al.* Leaf consumption and experimental discrimination of stable isotopes between mangrove leaves and the tree-climbing crab (Brachyura: Sesarmidae: *Aratus pisonii*). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2022, 274(104): 107906
- SHELLEY C, LOVATELLI A. *Mud crab aquaculture: A practical manual*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011, 7–8
- SMITH J E, DIETZ C, KEANE J, *et al.* Trophic discrimination factors and stable isotope variability in a captive feeding trial of the southern rock lobster *Jasus edwardsii* (Hutton, 1875) (Decapoda: Palinuridae) in Tasmania, Australia. *Journal of Crustacean Biology*, 2023, 43: 1–9
- TARBOUSH R A, MACAVOY S E, MACKO S A, *et al.* Contribution of catabolic tissue replacement to the turnover of stable isotopes in *Danio rerio*. *Canadian Journal of Zoology*, 2006, 84: 1453–1460
- VANDER ZANDEN M J, CLAYTON M K, MOODY E K, *et al.* Stable isotope turnover and half-life in animal tissues: A literature synthesis. *PLoS One*, 2015, 10(1): e0116182
- VISWANATHAN C, RAFFI S M. The natural diet of the mud crab *Scylla olivacea* (Herbst, 1896) in Pichavaram mangroves, India. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2015, 22: 698–705
- WAN Y, HU J Y, AN L H, *et al.* Using stable carbon and nitrogen isotope analysis to determine the trophic levels of major species in food web of Bohai Bay. *Chinese Sciences*

- Bulletin, 2005, 50(7): 708–712 [万祎, 胡建英, 安立会, 等. 利用稳定氮和碳同位素分析渤海湾食物网主要生物种的营养层次. 科学通报, 2005, 50(7): 708–712].
- WANG G Z, LI S J, CHEN Z G. Status of mud crabs (*Scylla* spp.) farming and studies on the population biology of *S. paramamosain*. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2016, 55(5): 617–623 [王桂忠, 李少菁, 陈志刚. 青蟹(*Scylla* spp.)养殖现状及拟穴青蟹(*S. paramamosain*)种群生物学研究. 厦门大学学报(自然科学版), 2016, 55(5): 617–623]
- WANG J, ZHU J F, DAI X J, *et al.* Trophic position for *Prionace glauca* in the eastern Pacific Ocean based on stable isotope. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2016, 47(2): 369–373 [王洁, 朱江峰, 戴小杰, 等. 基于稳定同位素的东太平洋大青鲨(*Prionace glauca*)营养级研究. 海洋与湖沼, 2016, 47(2): 369–373]
- WANG K L, GONG Y Y, CHEN Z Z, *et al.* Trophic niche of *Decapterus maruadsi* in the northern south China sea as revealed by stable isotope techniques. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(4): 724–731 [王开立, 龚玉艳, 陈作志, 等. 基于稳定同位素技术的南海北部蓝圆鲹的营养生态位. 生态学杂志, 2022, 41(4): 724–731]
- WANG M, NUAMAH L A, ZHANG Y, *et al.* Variability in  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  stable isotope signatures in mangrove ecosystem of Hainan, China. Advance in Materials Research, 2015, 1073/1074/1075/1076: 535–540
- XIE B, LI Y K, ZHANG H, *et al.* Food web foundation and seasonal variation of trophic structure based on the stable isotopic technique in the marine ranching of Haizhou Bay, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(7): 2292–2298 [谢斌, 李云凯, 张虎, 等. 基于稳定同位素技术的海州湾海洋牧场食物网基础及营养结构的季节性变化. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2292–2298]
- XU X, DONG S P, ZHANG D X, *et al.* Filter-feeding bivalve weakens food competition between crustaceans (*Portunus trituberculatus*, *Marsupenaeus japonicus*) in integrated culture ponds: Evidence from 18S rDNA barcoding and stable isotope analysis. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 884968
- XUE J R, LIU H B, JIANG T, *et al.* Progress in multi-element and stable isotope analysis for geographical origin traceability of aquatic products. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(1): 15–23 [薛峻仁, 刘洪波, 姜涛, 等. 元素与稳定同位素微化学分析在水产品产地溯源中的应用. 渔业科学进展, 2022, 43(1): 15–23]
- YOKOYAMA H A, TAMAKI A, HARADA K, *et al.* Variability of diet-tissue isotopic fractionation in estuarine macrobenthos. Marine Ecology Progress Series, 2005, 296: 115–128
- YU Y W, XU D P. Trophic niche on *Eriocheir sinensis* and *Chironantes dehaani* through stable-isotope analysis. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(9): 2092–2099 [俞雅文, 徐东坡. 运用碳氮稳定同位素技术探究中华绒螯蟹与无齿螯臂相手蟹的营养生态位特征. 长江流域资源与环境, 2019, 28(9): 2092–2099]
- ZHANG B L, GUO B, YU Y, *et al.* Study of the food-web structure in the Dashentang artificial reef area in Tianjin using a stable isotope technique. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(6): 25–35 [张博伦, 郭彪, 于莹, 等. 基于稳定同位素技术的天津大神堂海域人工鱼礁区食物网结构研究. 渔业科学进展, 2019, 40(6): 25–35]
- ZHANG K, XIE J, YU D, *et al.* Study on food web of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) push-water aquaculture ecosystem by stable isotope analysis. South China Fisheries Science, 2020, 16(3): 61–69 [张凯, 谢骏, 余德光, 等. 基于稳定同位素的草鱼推水养殖系统食物网的研究. 南方水产科学, 2020, 16(3): 61–69]
- ZHANG S, XIE B, FU X M, *et al.* Trophic level estimation of organisms in landings from Haizhou Bay using stable carbon and nitrogen isotope analysis. Marine Environmental Science, 2016, 35(4): 507–511 [张硕, 谢斌, 符小明, 等. 应用稳定同位素技术对海州湾拖网渔获物营养级的研究. 海洋环境科学, 2016, 35(4): 507–511]
- ZHAO Y S, SHAN X J, YANG T, *et al.* Research progress of stable isotope models in aquatic ecosystem food webs. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(1): 1–13 [赵永松, 单秀娟, 杨涛, 等. 稳定同位素模型在水生生态系统食物网中的研究进展. 渔业科学进展, 2024, 45(1): 1–13]
- ZHAO Y S, SHAN X J, YANG T, *et al.* Contributions of carbon sources to food webs adjacent to the Miaodao Archipelago and their implications for carbon sink fisheries. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(5): 132–141 [赵永松, 单秀娟, 杨涛, 等. 庙岛群岛毗邻海域秋季底栖食物网潜在碳来源贡献及对碳汇渔业的思考. 渔业科学进展, 2022, 43(5): 132–141]
- ZHOU H, TANG B G, WU X M, *et al.* Stable carbon and nitrogen isotope turnover in different tissues of Hongkong oyster in the fattening stage in a polyculture pond. Journal of Tropical Oceanography, 2023, 42(4): 125–132 [周晖, 汤保贵, 伍翔民, 等. 香港牡蛎在综合养殖池塘育肥期间不同组织的碳、氮稳定同位素周转. 热带海洋学报, 2023, 42(4): 125–132]
- ZHU W T, QIN C X, MA H M, *et al.* Stable isotope analysis of simple food web in coral reef ecosystem of Daya Bay. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(7): 1112–1123 [朱文涛, 秦传新, 马鸿梅, 等. 大亚湾珊瑚礁生态系统简化食物网的稳定同位素. 水产学报, 2020, 44(7): 1112–1123]

## Stable Isotope Turnover and Fractionation of Different Feed in the Juvenile *Scylla paramamosain*

ZHONG Shengping<sup>1</sup>, CAI Xiaohui<sup>2</sup>, SONG Jianda<sup>3</sup>, LIU Xujia<sup>4</sup>, PENG Yinhui<sup>2</sup>,  
HUANG Lianghua<sup>1</sup>, GE Changzi<sup>3</sup>, HUANG Guoqiang<sup>1①</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Marine Medicine, Institute of Marine Drug, Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning 530200, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Marine Biodiversity Conservation, Oceanography Institute, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China; 3. Marine College, Shandong University at Weihai, Weihai 264209, China; 4. Guangxi Academy of Sciences, Nanning 530007, China)

**Abstract** Investigating the effects of different diets on carbon and nitrogen stable isotope turnover and fractionation coefficients in juvenile green crabs (*Scylla paramamosain*), we used 200 tanks measuring 50 × 40 × 40 cm. Fish (*Callionymus richardsoni*), shrimp (*Penaeus latissulcatus*), clam (*Ruditapes philippinarum*), and polychaeta worms (*Perinereis aibuhitensis*) were fed to the juvenile crabs whose initial weight is 1.5 g. Samples were collected at 0, 30, 60, 90, 135, and 180 d to determine the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  and calculate turnover parameters as well as fractionation coefficients. Our findings described that the differences in the juvenile crabs'  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  during the experimental period were demonstrated by  $\delta^{13}\text{C} = a \times \ln t + b$  and  $\delta^{15}\text{N} = a \times \ln t + b$ , where the value of "a" varied significantly with the different diets. Growth is the main factor driving carbon and nitrogen-stable isotopic turnover in juvenile crabs. The contributions of the four diets (fish, shrimp, clam, and crab) to the  $^{13}\text{C}$  turnover of the crabs were 79.83%, 83.65%, 84.88%, and 63.80%, respectively, whereas their contributions to the  $^{15}\text{N}$  turnover were 81.97%, 82.88%, 75.27%, and 59.80%, respectively. Our findings indicated a clear difference in the stable isotope turnover of juvenile green crabs, which was primarily metabolism-induced. The significant difference in growth rates between the two studies inevitably led to differences in the assimilation and deposition rates of carbon and nitrogen in their body, causing differences in the contributions of growth and metabolism to the turnover of stable isotopes. The time to complete 50% turnover ( $t_{50}$ ) of  $^{13}\text{C}$  and the time to complete 95% turnover ( $t_{95}$ ) for crabs fed the four diets were 36.30, 24.56, 27.96, 21.17 d and 156.86, 106.16, 120.83, 91.64 d, respectively. The  $t_{50}$  of  $^{15}\text{N}$  and  $t_{95}$  for crabs fed the four diets were 37.60, 24.34, 24.77, 20.17 d and 162.49, 105.22, 107.05, 86.99 d, respectively. The results of this experiment indicate that the  $t_{50}$  values of  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  in juvenile fiddler crabs fed the same diet were similar, and the  $t_{95}$  values were more than four times higher than the  $t_{50}$  values, indicating that the turnover rates of stable isotopes were high in the early stages of the experiment and decreased significantly in the later stages. The fractionation coefficients  $\Delta^{13}\text{C}_{180\text{d}}$  for crabs fed the four diets at 180 d ranged from 0.71‰ to 1.64‰, and the  $\Delta^{15}\text{N}_{180\text{d}}$  ranged from 2.15‰ to 2.66‰. Overall, the measured value of  $\Delta^{13}\text{C}_{180\text{d}}$  is closer to the literature-cited value of 1.3‰, while the measured value of  $\Delta^{15}\text{N}_{180\text{d}}$  was incongruent with the literature-cited value of 3.4‰. Since the large range of fractionation factors for stable isotopes in bait materials among consumers in nearshore and estuarine ecosystems, caution should be exercised when citing fractionation factors in related ecological studies, and actual measurements or data from identical or similar species under similar environmental conditions should be used whenever possible. The relationship between  $\Delta^{13}\text{C}$  and mass growth rate (MGR, %) followed the formula  $\Delta^{13}\text{C} = a \times \ln(\text{MGR}) + b$ , and the relationship between  $\Delta^{15}\text{N}$  and MGR followed the formula  $\Delta^{15}\text{N} = a \times \ln(\text{MGR}) + b$ ,

① Corresponding author: HUANG Guoqiang, Email: hugh7531@163.com

with significant variations in the values of "a" and "b" when consuming different diets.  $\Delta^{13}\text{C}$  showed a negative linear correlation with the  $\delta^{13}\text{C}$  of the diets, and a positive linear correlation with the difference in  $\delta^{13}\text{C}$  values between the initial juvenile crabs and diets ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{IC}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{D}}$ ).  $\Delta^{15}\text{N}$  demonstrated a negative linear correlation with the  $\delta^{15}\text{N}$  of the diets, and a positive linear correlation with the difference in  $\delta^{15}\text{N}$  values between the initial juvenile crabs and diets ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{IC}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{D}}$ ). The diet quality and stable isotope content were the main factors affecting fractionation. Although the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  of the crabs during the experiment approach and ultimately maintain a level higher than that of the diet, the fractionation factor remains influenced by the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  of the diet. We concluded that growth was the main driving factor for stable isotope turnover in juvenile green crabs and that the stable isotope abundance of the diets was an important factor affecting the fractionation coefficients. The findings of this study provide reference data for nutritional ecology research on green crabs.

**Key words** *Scylla paramamosain*; Stable isotope; Turnover rate; Fractionation coefficient; Diet; Growth