

## 凡纳滨对虾不同生长阶段食物组成结构的研究

申玉春, 齐明, 朱春华, 吴灶和, 黄翔鹄

(广东省南海水产经济动物增殖重点实验室, 广东海洋大学, 广东 湛江 524025)

**摘要:** 利用稳定同位素碳比率 $\delta^{13}\text{C}$ 作为天然示踪物, 对高位养殖池生态系统中人工饲料和天然饵料提供的能源物质对养殖凡纳滨对虾生长的贡献比率进行研究。结果表明: 虾体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值受食物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响, 由于其摄食饵料的 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐减小, 虾体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也逐渐降低, 逐渐接近于最后人工饲料的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 试验虾体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值由养殖开始时的 $-19.52\text{‰} \pm 0.09\text{‰}$ 变为实验结束时的 $-21.74\text{‰} \pm 0.17\text{‰}$ ; 对虾的食性在10 d左右时发生转变, 34 d左右时人工饲料和浮游动物对虾体的能量贡献基本相同, 养殖结束时对虾生长能量的 $97.29\% \pm 0.98\%$ 来源于人工饲料。

**关键词:** 凡纳滨对虾; 食物组成; 稳定同位素

中图分类号: S968.22; S963.16

文献标志码: A

文章编号: 1673-9159(2010)01-0044-06

## Investigation on the *Litopenaeus vannamei* Diet Composition During Different Growth Phases

SHEN Yu-chun, QI Ming, ZHU Chun-hua, WU Zao-he, HUANG Xiang-hu

(Key Laboratory of Aquaculture in South China Sea for Aquatic Economic Animal,  
Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524025, China)

**Abstract:** Stable carbon isotope ratios ( $\delta^{13}\text{C}$ ) were used to estimate the relative contributions of natural food and formulated diet to growth of *Litopenaeus vannamei* cultured in higher-altitude ponds. The results show that the  $\delta^{13}\text{C}$  values of shrimp are affected by food with different  $\delta^{13}\text{C}$  values, it reduced slowly and gradually became similar to the  $\delta^{13}\text{C}$  value of formulated diet, from the beginning the  $\delta^{13}\text{C}$  values of shrimp was  $-19.52\text{‰} \pm 0.09\text{‰}$  and to the end it became  $-21.74\text{‰} \pm 0.17\text{‰}$ ; after they were cultured about 10 d, the diet of shrimp was changed and when it was cultured about 34 d, the formulated diet and zooplankton provide almost equal growth energy. At the end of the culture, about  $97.29 \pm 0.98\%$  of the growth energy of shrimp came from the formulated diet.

**Key words:** *Litopenaeus vannamei*; diet composition; carbon stable isotope

人工饲料是集约化池塘养殖中对虾生长的主要能量来源, 但天然饵料在对虾生长中也起到重要的作用<sup>[1]</sup>, 因此, 研究不同生长阶段人工饲料和天然饵料对对虾生长能量的贡献有重要的意义。传统方法一般依据分析消化道中的食物残渣以及粪便等组成而直接推断动物的食谱, 这种分析方法不仅繁杂且易受动物摄食器官、消化和吸收等因素的影响, 对动物的食谱难以准确做出定性定

量的分析。随后放射性同位素示踪法被许多研究者所采用, 该法可精确示踪饵料被动物吸收利用的比例, 但由于放射性同位素 $^{14}\text{C}$ 和 $^{32}\text{P}$ 等自身的不稳定性以及放射性危害使其应用受到了限制。目前, 同位素质谱分析(稳定性同位素碳比率分析) $\delta^{13}\text{C}$ ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ )的方法在动物食物组成研究中得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>。采用这一方法分析的基本前提是动物与其食物之间具有一种固定的同位素关系<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2009-12-12

基金项目: 广东省科技计划项目(2007A032600004); 广东省重大科技兴海项目(B200608A03); 科技部农业科技成果转化项目(2006GB2E000224)

第一作者: 申玉春(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向水域生态与健康养殖。Tel: 0759-2396187; E-mail: shenyuchun@163.com

一般而言, 水产动物对碳的同位素 $^{13}\text{C}$ 的富集能力通常高于其食物, 而且沿着食物链这种 $^{13}\text{C}$ 富集逐步积累。这为采取养殖摄食积累的方式研究不同饵料对对虾生长能量的贡献比率提供可靠依据。

稳定性同位素法从能量流动和守恒角度为研究能量营养关系提供了一个定量指标。稳定性同位素碳比率 $\delta^{13}\text{C}$  ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) 作为一类精确的示踪物, 通过监测其在水域生态系统食物网内不同营养级间碳转移和流动过程, 可进一步阐明能量转移和流动的方向、比率, 因此被广泛应用于能量贡献研究。在水生动物能量贡献方面, 郭贤桢等<sup>[4]</sup>利用 $\delta^{13}\text{C}$ 值对淡水施肥养鱼池塘中鱼类的生长能源进行初步分析, 对池塘养殖海鲂 (*Notemigonus crysoleucas*) 的能量贡献研究表明, 在投喂人工饲料的情况下, 天然饵料对其生长的贡献仍可达到40%~83%<sup>[5]</sup>。Schroeder<sup>[6,7]</sup>利用 $\delta^{13}\text{C}$ 研究了人工饲料和肥料中的碳对罗非鱼和罗氏沼虾混养池塘主要养殖生物生长能量的贡献比率, Anderson P K等<sup>[8]</sup>测定了凡纳滨对虾对人工饲料的利用情况, Nunes等<sup>[9]</sup>分析了半精养海水池塘中人工配合饲料和天然饵料对小褐对虾 (*Penaeus subtilis*) 生长能量的贡献比率, 张硕等<sup>[10]</sup>研究了配合饲料与天然饵料对中国对虾生长能量的贡献比率。围绕对虾的食物网是对虾养殖生态系统中能量流动和转移的主导路径, 因此追溯食物链中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的流向, 从而可追踪碳元素的流向。而利用同位素质谱分析 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 方法对凡纳滨对虾高位池中对虾生长中不同能量来源的贡献情况研究未见报道, 因而研究人工饲料和天然饵料在凡纳滨对虾高位池养殖模式中生长能量贡献有积极意义, 不仅可从生长角度判断饵料种类对生长的贡献率, 从而优化投饵策略, 节约饲料, 降低养殖水体自身污染, 指导生产实际, 而且可为凡纳滨对虾高位池养殖中食物网连续营养谱的建立、食物来源研究提供一条新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验虾池

实验于2007年8~11月在湛江市东海岛对虾良种场进行, 混凝土结构高位养虾池3口(2号池、3号池和4号池), 面积均为 $1.3 \times 10^3 \text{ m}^2$ 。

### 1.2 虾池管理

虾池于2007年8月3日分别放养规格为1.0

cm左右的凡纳滨对虾苗, 平均放养密度120尾/ $\text{m}^2$ 。放苗前将对虾池冲洗2次, 暴晒3d后, 注入30cm海水, 按 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的剂量全池泼洒稳定性二氧化氯消毒, 随后一次性从蓄水池注入砂滤海水, 2号池水深为1.3m, 3号池和4号池水深为1.5m。养殖过程中不再补充海水, 以地下淡水作为补充水源, 前期加注淡水保持水位稳定, 中后期视水质状况适量换水, 每次换水量控制在10~15cm。养殖过程中投喂全价对虾配合饲料。日投喂4次, 分别是07:00、11:00、17:00和23:00, 日投喂量为对虾体重的5%~8%, 当天的投喂量根据前一天的摄食情况适当增减。在养殖前期4周内, 投喂0<sup>#</sup>料; 养殖5~8周内, 投喂1<sup>#</sup>料; 养殖9~10周内, 投喂2<sup>#</sup>料; 在养殖的11~12周内, 投喂3<sup>#</sup>料。在3口虾池边缘均设置摄食观察网2个, 用于观察养殖对虾摄食及生长情况。实验期间记录各虾池的日常管理情况, 包括投饵量、施肥量、换水量等。每口虾池配置3台水车式增氧机, 增氧机的开启次数和时间根据池水溶氧状况来确定, 保证虾池溶氧量大于 $6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

### 1.3 样品采集与处理

每15d采集一次样品, 包括浮游动物、养殖对虾, 分析其碳稳定同位素比值。浮游动物采用标准的25号浮游生物网( $64 \mu\text{m}$ )<sup>[11]</sup>从水底层至水表层垂直拖网采集, 过滤浓缩后置于过滤的海水中, 于4℃冰箱进行24h的胃排空, 然后进行第二次浓缩, 于-20℃冰箱保存备测。每口虾池随机抛网获取养殖对虾50尾, 现场随机抽取9尾对虾(3平行组)测定其体长体重, 体长精确至0.1cm、体重精确至0.01g, 用于分析虾体规格对 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响。实验对虾用过滤海水清养1.0h进行胃排空, 再测量其体长、体重值, 称重时用滤纸吸去实验虾体表水分。并对实验投喂的4种全价对虾配合饲料分别取样100g, 磨碎后均匀混合取10g用于测定饲料的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。所有实验对虾及饲料样品分装后于-20℃冰箱保存备测。样品先用蒸馏水洗涤, 用0.1g/mL的盐酸浸泡24h进行酸化, 再用蒸馏水洗涤至中性, 然后置于烘箱中70℃下烘干, 最后用石英研钵研磨成粉末, 分装后置于-20℃冰箱保存待测。所有样品均在洗涤、酸化、洗涤至中性、烘干后再磨碎。

### 1.4 碳稳定同位素比值的测定与计算

使用英国GV公司生产的SerCon20-20H 稳定

同位素质谱仪测定样品中碳稳定同位素比值。该仪器对  $\delta^{13}\text{C}$  值检测的精密度为  $\pm 0.1\%$ ，最小检测样品量为  $500\text{ }\mu\text{g}$ 。为了保证测试结果的准确性，每测试 5 个样品后加测 1 个标准样，每样品平行测定 3 次。碳稳定同位素比值以相对于国际标准的 PDB 的  $\delta$  值表示<sup>[12]</sup>。

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}},$$

其中,  $R = {}^{13}\text{C} / {}^{12}\text{C}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  值越小表示样品中同位素碳 ( ${}^{13}\text{C}$ ) 含量越低,  $\delta^{13}\text{C}$  值越大表示样品中同位素碳 ( ${}^{13}\text{C}$ ) 含量越高。

根据质量守恒模型来计算摄食两种不同  $\delta^{13}\text{C}$  值食物对生物的贡献比率<sup>[13]</sup>:

$$K_{\text{carbon}} = 1 - \frac{\delta^{13}\text{C}_A - \delta^{13}\text{C}_{\text{consumer}} + \Delta\delta^{13}\text{C}}{\delta^{13}\text{C}_A - \delta^{13}\text{C}_B},$$

式中,  $K_{\text{carbon}}$  为食物 A 对消费者的贡献比例,  $\delta^{13}\text{C}_A$  和  $\delta^{13}\text{C}_B$  分别为食物 A 和 B 碳同位素比值,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{consumer}}$  为消费者的碳同位素比值,  $\Delta\delta^{13}\text{C}$  为一个营养级的碳

稳定同位素富集度, 本文取其数值为  $1.6\%$ <sup>[14]</sup>。

## 1.5 数据统计分析

采用 SPSS11.5 对数据进行 Duncan 多重比较单因素方差分析和, 以  $\alpha=0.05$  作为差异显著水平, 描述性统计值采用平均值  $\pm$  标准误 (Mean  $\pm$  S.E.) 表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游动物与饲料的 $\delta^{13}\text{C}$ 值

对虾饵料 (浮游动物、饲料) 的  $\delta^{13}\text{C}$  值详见表 1。养殖期间虾池浮游动物同位素比值变化在  $-20.84 \sim -20.95$  之间, 平均  $-20.91$ ; 投喂饲料同位素比值变化在  $-23.16 \sim -23.41$  之间, 平均  $-23.36$  (表 1)。两种饵料的同位素比值之差变化在  $2.23\%$  ~  $2.54\%$  之间, 一般认为不同来源的食物中同位素比值明显不同时 ( $>1.5\%$ ), 稳定同位素技术可应用于动物的食性分析研究<sup>[15]</sup>。

表 1 对虾饵料的  $\delta^{13}\text{C}$  值  
Tab.1 The stable isotopic carbon ratio of the shrimp diets

食物种类	浮游动物					
	15 d	30 d	45 d	60 d	75 d	90 d
$\delta^{13}\text{C}$ 值	$-20.93 \pm 0.26^B$	$-20.90 \pm 0.04^B$	$-20.94 \pm 0.08^B$	$-20.89 \pm 0.14^B$	$-20.84 \pm 0.06^B$	$-20.95 \pm 0.05^B$
食物种类	对虾 0#料		对虾 1#料		对虾 2#料	
$\delta^{13}\text{C}$ 值	$-23.16 \pm 0.21^A$		$-23.47 \pm 0.37^A$		$-23.39 \pm 0.34^A$	

注: 表中数据为 3 个平行组的平均值  $\pm$  标准误。数据右上角标有不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

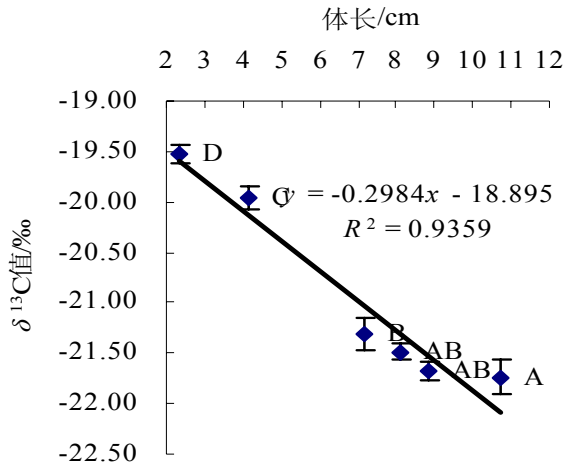
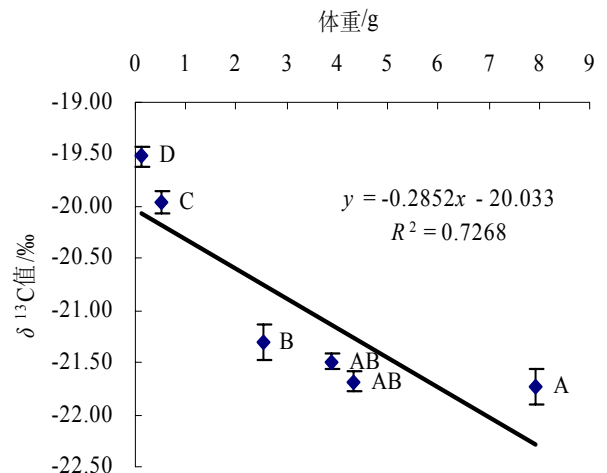
### 2.2 虾体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与体长、体重的关系

由表 2 可知, 3 口实验池不同养殖时期对虾体长、体重变化差异显著, 而其虾体  $\delta^{13}\text{C}$  值的变化在 15 d 和 30 d 差异不显著, 在 45 ~ 90 d 的取样点内差异亦不显著, 而在 15 ~ 30 d 和 45 ~ 90 d 的取样点间差异显著。对实验对虾不同取样时段下体长、体重

均值变化对应于同时期虾体内  $\delta^{13}\text{C}$  值作图表明 (图 1、图 2), 对虾体内  $\delta^{13}\text{C}$  值与其体长、体重呈明显的负相关性,  $R^2_{\text{体长}} = 0.94$ ,  $R^2_{\text{体重}} = 0.73$  ( $n = 6$ )。随着实验对虾体长、体重逐渐增加, 虾体内  $\delta^{13}\text{C}$  值逐渐减少, 并逐渐趋近于饲料中同位素  $\delta^{13}\text{C}$  值的含量, 由原来相差  $3.64\%$  减少到最后相差  $1.67\%$ 。

表 2 实验池凡纳滨对虾体同位素比值与体长、体重的关系  
Tab.2 The relationship between stable isotopic carbon ratio and body length、body weight

养殖	2 号池			3 号池			4 号池		
时间	体长/cm	体重/g	$\delta^{13}\text{C}/\%$	体长/cm	体重/g	$\delta^{13}\text{C}/\%$	体长/cm	体重/g	$\delta^{13}\text{C}/\%$
15	$2.30 \pm 0.1^A$	$0.07 \pm 0.02^A$	$-19.52 \pm 0.15^B$	$2.40 \pm 0.3^A$	$0.18 \pm 0.07^A$	$-19.47 \pm 0.19^B$	$2.30 \pm 0.3^A$	$0.11 \pm 0.08^A$	$-19.58 \pm 0.18^B$
30	$4.50 \pm 0.2^B$	$0.83 \pm 0.06^A$	$-19.97 \pm 0.12^B$	$3.80 \pm 0.3^B$	$0.29 \pm 0.13^A$	$-19.91 \pm 0.32^B$	$4.20 \pm 0.1^B$	$0.45 \pm 0.23^A$	$-20.01 \pm 0.13^B$
45	$6.90 \pm 0.2^C$	$2.36 \pm 0.19^B$	$-21.33 \pm 0.21^A$	$7.20 \pm 0.1^C$	$2.57 \pm 0.51^B$	$-21.16 \pm 0.17^A$	$7.40 \pm 0.4^{CD}$	$2.62 \pm 0.23^B$	$-21.45 \pm 0.51^A$
60	$7.80 \pm 0.8^{CD}$	$3.63 \pm 0.35^{BC}$	$-21.54 \pm 0.21^A$	$8.10 \pm 0.4^{CD}$	$3.82 \pm 0.46^{BC}$	$-21.35 \pm 0.13^A$	$8.40 \pm 0.2^{CD}$	$4.22 \pm 0.23^C$	$-21.59 \pm 0.08^A$
75	$8.70 \pm 0.6^D$	$3.68 \pm 0.69^{BC}$	$-21.69 \pm 0.17^A$	$8.90 \pm 0.3^D$	$4.35 \pm 0.16^C$	$-21.71 \pm 0.17^A$	$8.90 \pm 0.5^{FD}$	$4.92 \pm 0.27^C$	$-21.63 \pm 0.20^A$
90	$10.50 \pm 1.1^E$	$7.71 \pm 1.25^D$	$-21.73 \pm 0.27^A$	$10.80 \pm 0.9^E$	$7.95 \pm 0.60^D$	$-21.79 \pm 0.47^A$	$11.00 \pm 0.4^E$	$8.11 \pm 0.71^D$	$-21.71 \pm 0.24^A$

图 1 凡纳滨对虾不同取样时段下体长均值与  $\delta^{13}\text{C}$  值的关系Fig.1 The relationship between body length and  $\delta^{13}\text{C}$  ratio图 2 凡纳滨对虾不同取样时段下体重均值与  $\delta^{13}\text{C}$  值的关系Fig.2 The relationship between body weight and  $\delta^{13}\text{C}$  ratio

### 2.3 不同食物在对虾生长中的贡献率

依据对数拟合回归曲线  $y_{\text{浮游动物}} = -54.753 \ln x + 242.6$ ,  $R^2 = 0.94$ ,  $y_{\text{人工饲料}} = 54.753 \ln x - 142.6$ ,  $R^2 = 0.94$ , 分析得知, 实验对虾在养殖到 14 d 时开始摄食人工饲料, 当养殖到 34 d 时浮游动物和人工饲料在对虾食物中的贡献率基本达到了平衡,

随着养殖时间的延长, 人工饲料的贡献率快速增加, 45 d 时达到了  $78.00\% \pm 3.32\%$ , 养殖 12 周后, 人工饲料的贡献率达  $97.29\% \pm 0.98\%$ , 而浮游动物在对虾食物中的贡献比率则降到  $2.71\% \pm 0.98\%$  (表 3)。

表 3 不同碳源饵料对凡纳滨对虾生长的贡献率

Tab.3 The contribution rate of different carbon resources to the growth of <i>Litopenaeus vannamei</i> %							
不同碳源	池塘	15 d	30 d	45 d	60 d	75 d	90d
浮游动物	2 号池	91.48	71.35	21.34	12.79	3.92	3.25
	3 号池	93.72	73.01	28.06	20.16	3.14	0.81
	4 号池	88.79	68.58	16.60	10.85	6.27	4.07
	平均	$91.33 \pm 1.43^E$	$70.65 \pm 1.29^D$	$22.00 \pm 3.32^C$	$14.60 \pm 2.84^B$	$4.44 \pm 0.94^A$	$2.71 \pm 0.98^A$
人工饲料	2 号池	8.52	29.65	78.66	87.21	96.08	96.75
	3 号池	6.28	26.99	71.94	79.84	96.86	99.19
	4 号池	11.21	31.42	83.40	89.15	93.73	95.93
	平均	$8.67 \pm 1.43^A$	$29.35 \pm 1.29^B$	$78.00 \pm 3.32^C$	$85.40 \pm 2.84^D$	$95.56 \pm 0.94^E$	$97.29 \pm 0.98^E$

## 3 讨论

### 3.1 对虾不同阶段的食物组成与健康养殖

由于动物在摄食后对食物的同化作用要经过一段时间才能使组织的同位素比值发生变化, 所以动物体内的稳定同位素含量的变化, 反映的是动物所摄取的食物经过一段时期的新陈代谢消化吸收累积的结果<sup>[16, 17]</sup>。根据研究, 一般水产动物在连续摄食两种稳定同位素含量差值显著的饵料 10 d 以后才能检测到其稳定同位素含量的变化, 进一步推

知其食性发生了转变, 这与本实验设置的初始取样初始时间点 15 d 相符合。本实验研究结果表明, 凡纳滨对虾高位池养殖过程中对虾体内的  $\delta^{13}\text{C}$  值呈逐渐降低的趋势, 这主要是由于随着体长、体重的增加, 对虾需要摄食更多的能量来维持其标准代谢和生长代谢等代谢耗能, 而实验池中的天然饵料已经不能完全满足其需求, 充足的人工饲料则成为其主要的食物来源, 随着养殖时间的延长, 对虾体内的  $\delta^{13}\text{C}$  值由原来的接近于浮游动物的  $\delta^{13}\text{C}$  值逐渐过渡为趋向于人工饲料中的  $\delta^{13}\text{C}$  值。根据本实验结果, 前期实验池天然饵料提供的食物来源占到凡纳

滨对虾食物来源的 90%以上,随着实验对虾的生长,人工饲料在其生长中的贡献比率逐渐增大,收获时对虾大约有  $97.29\% \pm 0.98$  的生长能量来源于投喂的人工饲料,由此推知,天然饵料在对虾池塘养殖的前期发挥了重要的作用,而到了养殖的后期作用则相对较小。张硕等<sup>[10]</sup>对池塘围隔养殖中国对虾的生长贡献情况进行了研究,发现收获时约有 61.6% 的能量来源于人工投喂的配合饲料,这与本实验研究结果一致。池塘围隔和单池养殖对虾的能量来源主要由人工投喂的饵料和池塘水域提供的天然饵料组成,二者的生长能量贡献在不同的养殖方式下存在差异<sup>[10]</sup>。Anderson P K 等<sup>[8]</sup>对池塘粗放式养殖的凡纳滨对虾进行了  $\delta^{13}\text{C}$  研究,发现约有 77% 的生长碳来源于天然食物; Nunes<sup>[9]</sup>报道在半精养池塘中,小褐对虾生长物质的 24.91% 来源于投喂的人工饲料,而池塘中天然食物的贡献比率可达 75.09%。这些研究均表明天然饵料在集约化池塘养殖中随养殖时间的延长其作用逐渐削弱,而人工饲料对虾体生长能量的贡献逐渐加强,而在粗放式养殖池塘和半精养池塘其贡献比率变化规律则恰好相反。

本实验研究表明,在养殖前期的 14 d 左右虾苗基本不摄食人工饲料,而是以水体中的天然饵料为食,随着不断的生长,人工饲料在其摄食总量中所占的比例逐渐增加。因此,在养殖生产中,这段时间内应尽量少投饵或不投饵,防止残饵形成,注意培养浮游生物,使其充分利用水体中的天然饵料,这样既可保持良好的水质环境,降低养殖自身污染,提高对虾的抗病抗应激能力,还可节约饲料,减少养殖管理,有效的降低养殖成本。随着水体中浮游动物的量无法满足对虾生长的需要,人工饲料在其能量来源中的比例逐渐增大,应根据观察网所反映的对虾摄食情况供给对虾充足的饲料。到养殖后期,对虾的能量来源以人工投喂的饲料为主,而残饵、粪便的增多会导致水质恶化,此时,应加大换水量,改善水质,使实验对虾在一个相对健康的环境中生存、生长。

### 3.2 虾体规格对 $\delta^{13}\text{C}$ 值以及生长能量贡献的影响

对 6 个取样时间点下的 6 个规格实验对虾生长的分析结果可知,养殖前期虾体的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $(-19.52 \pm 0.09)\%$ ,随实验对虾体长、体重的增加其虾体  $\delta^{13}\text{C}$  值逐渐降低,到取样终点虾体  $\delta^{13}\text{C}$  值下降到  $(-21.74 \pm 0.17)\%$ 。这主要是源于高位池养殖的对虾随着养殖时间的延长,投喂的人工饲料在

其生长中的贡献比例逐渐增大,生物体内的稳定同位素含量与其摄食的食物所含有的稳定同位素含量有极大的联系,在摄食一段时间后会逐渐与其接近,因此,对虾体内  $\delta^{13}\text{C}$  的比值亦随着饲料中  $\delta^{13}\text{C}$  值的减小而逐渐降低。

对虾体规格和生长能量贡献关系分析(表 3)可知,养殖前期池塘天然饵料浮游动物提供的生产量  $(91.33\% \pm 1.43\%)$  % 显著高于投喂的人工配合饲料  $(8.67\% \pm 1.43\%)$ ,随着实验对虾体长、体重的增加,由浮游动物提供的生产量显著降低,由人工饲料提供的生产量则显著上升。这主要是由于集约化池塘在养殖放养前施肥培育了丰富的天然饵料生物,养殖初期对虾能够获得相对较多的天然饵料,随着对虾的生长,其摄食能力逐渐加强,而池塘中可利用的大型天然饵料生物不断减少,且没有外源大型饵料生物的补充,所以对投喂的人工配合饲料的利用率逐渐增大。

### 3.3 水质环境因素对实验结果的影响

稳定同位素分析对虾的食物组成在一定程度上受水质环境的影响。在养殖水体中,除了浮游动物和投喂的人工饲料这两种主要的碳源外,水体中的颗粒有机碳、溶解在水体中的无机碳及浮游植物均能对食性分析产生影响。Vizzini S 等<sup>[18]</sup>在对地中海环礁湖中的主要捕食者和消费者的碳氮同位素进行了调查,发现颗粒有机碳、藻类物质分别组成了浮游动物和底栖无脊椎动物的主要食物来源。通过对许多浮游植物碳同位素的测定发现其碳同位素值变化范围为  $-24\% \sim -18\%$ <sup>[19]</sup>,温度的变化也能引起浮游植物光合作用变化进而导致浮游植物碳同位素值变化<sup>[20]</sup>,浮游植物碳同位素的组成和变化直接影响着以其为食的浮游动物的碳同位素组成。根据分析,本实验虾池中的颗粒有机碳主要来源于饲料残饵,所以对虾体的稳定同位素含量不会产生大的影响。主要影响因素是水体中的浮游植物。测定发现本实验池塘中浮游植物优势种主要为波吉卵囊藻、桥弯藻和角毛藻,优势种比较明显,缩小了实验虾池中浮游植物  $\delta^{13}\text{C}$  值的研究范围,进而缩小了对虾池中浮游动物  $\delta^{13}\text{C}$  值影响的测定范围。水体的盐度、温度、pH 值的变化均会在一定程度上影响浮游植物的生长繁殖,进而影响浮游动物的生长繁殖以及摄食,进而对浮游动物的同位素值产生影响<sup>[21]</sup>,从而影响到虾体的  $\delta^{13}\text{C}$  值以及生长能量贡献比率。因此,在养殖过程中保持虾池水体理化环境的稳定性尤为重要。

## 参 考 文 献

- [1] 周一兵, 谢祚浑. 虾池中日本刺沙蚕的次级生产力的研究[J]. 水产学报, 1995, 19(2): 140-150.
- [2] 陈锦石, 陈文正. 碳同位素地质学概论[M]. 北京: 地质出版社, 1983: 54-64.
- [3] Fry B, Anderson R K, Entzeroh L, et al.  $^{13}\text{C}$  enrichment and oceanic food web structure in the northwestern Gulf of Mexico. Contrib Mar Sci, 1984, 27:49-63.
- [4] 郭贤桢, 方映雪, 王继坤. 以 $\delta\text{C}$ 分析有机粪肥养鱼池中鱼类生长能源的初步研究[J]. 水产学报, 1987, 11(1): 53-59.
- [5] Lochmann R, Phillips H. Stable isotopic evaluation of the relative assimilation of natural and artificial foods by golden shiners *Notemigonus crysoleucas* in ponds [J]. J World Aqua Soc, 1996, 27(2): 168-177.
- [6] Schroeder Gerald L. Stable isotope ratios as naturally occurring tracers in the aquaculture food web [J]. Aquaculture, 1983, 30: 203-210.
- [7] Schroeder Gerald L. Sources of fish and prawn growth in poly culture ponds as indicated by C analysis [J]. Aquaculture, 1983, 35: 29-34.
- [8] Anderson P K, Parker P L, Lawrence A. A  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  tracer study of the utilization of presented feed by a commercially important shrimp *Penaeus vannamei* in a pond growout system [J]. J World Aquacult Soc, 1987, 18(2): 148-155.
- [9] Nunes A J P, Gesteira T C V, Goddard S. Food ingestion and assimilation by the southern brown shrimp *Penaeus subtilis* under semi-intensive culture in NE Brazil [J]. Aquaculture, 1997, 149: 121-136.
- [10] 张硕, 董双林, 王芳. 人工饲料与天然饵料对中国对虾生长贡献的研究[J]. 中国水产科学, 2001, 8(3): 54-58.
- [11] 黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭, 等. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 86.
- [12] Craig H. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass spectrometric analysis of carbon dioxide [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1957, 12: 133-149.
- [13] Fry B, Sherr E B.  $\delta^{13}\text{C}$  measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems[J]. Contrib Mar Sci, 1984, 27(1):15-47.
- [14] 蔡德陵, 孟凡, 韩贻兵, 等.  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值作为海洋生态系统食物网示踪剂的研究——崂山湾水体生物食物网的营养关系[J]. 海洋与湖沼, 1999, 30 ( 6 ): 671-678.
- [15] Furuya V, Hayashi C, Furuya W, et al. Carbon stable isotope( $^{13}\text{C}$ ) natural abundance of some foods and its contribution to the pintado juvenile growth, *Pseudoplatystoma corruscans* [J]. Maringa, 2002, 24(2): 493-498.
- [16] Cerling T E, Harirs J M, Leakey M G. Browsing and grazing in elephants: the isotope record of modern and fossil proboscideans [J]. Oecologia, 1999, 120: 364-374.
- [17] Hill A M, Sinars D M, Lodge D M. Invasion of an occupied niche by the crayfish *Orconectes rusticus*: Potential importance of growth and mortality[J]. Oecologia, 1993, 94: 303-306.
- [18] Vizzini S, Mazzoal A. Seasonal variation in the stable carbon and nitrogen isotope ratios of primary production and consumers in a western Mediterranean coastal lagoon[J]. Marina Biology, 2003, 142(5): 1009-1018.
- [19] Fry B. Food web structure on Georges Bank from stable C, N, and S isotopic compositions[J]. Limnol Oceanogr, 1998, 33: 1182-1190.
- [20] Ben M, David R, Flynn W, et al. Annual and seasonal changes in diets of martens: evidence from stable isotope analysis[J]. Oecologia, 1997, 111: 280-291.
- [21] Cabana G, Rasmussen J B. Modelling Food Chain Structure and Contaminant Bioaccumulation Using Stable Nitrogen Isotopes[J]. Nature, 1994, 372: 255-257.