

网络优先数字出版时间: 2016-08-26

【DOI】10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20160826.009

网络优先数字出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/45.1075.N.20160826.1049.018.html>

# 饲料铜水平对方格星虫稚虫生长及体组成的影响\*

## Effect of Dietary Copper Level on Growth Performance and Body Composition of Juvenile Peanut Worm, *Sipunculus nudus* Linnaeus

许明珠\*\*, 张琴\*\*, 童潼, 董兰芳, 杨家林, 蒋艳, 黄国强

XU Mingzhu, ZHANG Qin, TONG Tong, DONG Lanfang, YANG Jialin, JIANG Yan, HUANG Guoqiang

(广西壮族自治区海洋研究所, 广西海洋生物技术重点实验室, 广西北海 536000)

(Key Laboratory of Marine Biotechnology of Guangxi, Guangxi Institute of Oceanology, Beihai, Guangxi, 536000, China)

**摘要:**【目的】了解饲料中微量元素铜水平对方格星虫(*Sipunculus nudus* Linnaeus)稚虫生长及体组成的影响,探索饲料中铜元素的最佳含量。【方法】通过给对方格星虫稚虫投喂不同铜水平(2.7 mg/kg, 7.5 mg/kg, 11.2 mg/kg, 19.8 mg/kg, 30.4 mg/kg, 52.1 mg/kg)的饲料56 d,研究微量元素铜对方格星虫的成活率、增重率(Weight gain rate, WGR)、特定生长率(Specific gain rate, SGR)、体组成成分的影响。【结果】饲料中的微量元素铜水平对方格星虫稚虫的增重率、特定生长率有显著影响( $P < 0.05$ )。随着饲料中铜含量的提高,方格星虫稚虫的SGR和WGR都呈先上升后下降,之后再上升的趋势,当饲料铜含量为11.2 mg/kg时,方格星虫稚虫增重率和特定生长率均达到最大值。饲料铜水平对方格星虫稚虫的成活率、体组成成分没有显著影响( $P > 0.05$ )。【结论】基础饲料中铜的适宜添加量为7.5~11.2 mg/kg。

**关键词:**方格星虫 铜水平 生长性能 成活率 体组成

**中图分类号:**S963 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-7378(2016)03-0209-06

**Abstract:**【Objective】This trial was conducted to investigate the effects of dietary copper levels on growth performance and body composition of juvenile peanut worm, *Sipunculus nudus* Linnaeus.【Methods】*S. nudus* juveniles with average body weight of (18.45 ± 0.11) mg were fed diets with six copper levels (2.7 mg/kg, 7.5 mg/kg, 11.2 mg/kg, 19.8 mg/kg, 30.4 mg/kg, 52.1 mg/kg diet) for 56 d.【Results】The results showed that the dietary copper levels had significant effects on weight gain rate (WGR), specific gain rate (SGR) ( $P < 0.05$ ). With the increasing of dietary copper levels, WGR and SGR were increased, then decreased in generally, and increased again, and reached the maximum at 11.2 mg/kg. No significant differences were observed in survival ratio (SR), body moisture, body protein content, body lipid content and body ash content of *S. nudus* among dietary treatments with graded levels of copper ( $P > 0.05$ ).【Conclusion】The dietary copper levels range which could acquire high WGR were from 7.5 mg/kg to 11.2 mg/kg.

increased again, and reached the maximum at 11.2 mg/kg. No significant differences were observed in survival ratio (SR), body moisture, body protein content, body lipid content and body ash content of *S. nudus* among dietary treatments with graded levels of copper ( $P > 0.05$ ).【Conclusion】The dietary copper levels range which could acquire high WGR were from 7.5 mg/kg to 11.2 mg/kg.

**Key words:** *Sipunculus nudus*, copper level, growth performance, survival ratio, body composition

收稿日期: 2016-04-10

作者简介: 许明珠(1988—), 女, 硕士, 主要从事水产动物营养与饲料的研究, E-mail: xumingzhulian@163.com。

\* 国家自然科学基金项目(31402304), 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科转 13129024, 桂科合 1346011-12, 桂科合 14125008 - 2 - 20), 广西自然科学基金项目(2015GXNSFBF139005)和广西科学院基本科研业务费项目(15YJ22HYS15)资助。

\*\* 通讯作者: 张琴(1982—), 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事水产动物营养与饲料的研究, E-mail: zhanqin821220@163.com。

## 0 引言

**【研究意义】**方格星虫(*Sipunculus nudus* Linnaeus)是北部湾优良的绿色经济海产品之一,生活在沿海滩涂一带沙泥底质的海域,其适应范围广、抗逆性强、生长快,喜摄食底栖藻类及有机碎屑<sup>[1]</sup>。由于目前方格星虫的养殖模式主要为粗放型,产量小,生长周期长,逐渐跟不上市场的需求量,因此加快方格星虫向集约型养殖模式转变很有必要,其中关键的一点就是解决方格星虫人工配合饲料的开发研究<sup>[2]</sup>。将动物配合饲料制成优质的全价日粮,不仅需要考虑脂肪、蛋白和糖三大营养物质的配比,微量元素的添加亦不可忽视<sup>[3]</sup>。**【前人研究进展】**铜元素是满足水产动物生长发育、繁殖的必需微量元素之一,它广泛存在于水产动物的组织中,是许多重要酶类的组成部分,同时还影响动物的免疫功能<sup>[4-5]</sup>。虞泽鹏等<sup>[6]</sup>发现,在饲料中添加高水平的铜对肉仔鸡(broiler)具有明显的促生长作用;Roof等<sup>[7]</sup>指出饲料中添加高水平的铜可以提高仔猪的日增重率。添加不同水平铜对鱼类生长性能影响的报道也很多,如蒋蓉等<sup>[8]</sup>研究发现,饲料中的铜补充量从3.5 mg/kg增加到9.2 mg/kg的过程中,黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)的增重率也在不断提高;李云峰等<sup>[9]</sup>研究发现,日粮中添加适量谷氨酸铜可有效降低饵料系数,同时提高罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)和草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)的生长性能,但是各试验组间的两种鱼的体组成均无显著差别( $P > 0.05$ );郭志勋等<sup>[10]</sup>研究表明,添加30 mg/kg的铜对凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)的生长最有利;叶超霞等<sup>[11]</sup>报道,饲料中高水平的铜对斜带石斑鱼(*Epinephelus coioides*)的存活率和鱼体组成没有显著性影响( $P > 0.05$ ),Lee等<sup>[12]</sup>以氯化铜为铜源,发现饲料铜超过80 mg/kg会显著降低斑节对虾(*Penaeus monodon*)的成活率( $P < 0.5$ );刘伟等<sup>[13]</sup>也发现饲料中铜含量过高会影响凡纳滨对虾的成活率;陈四清等<sup>[14]</sup>认为在饵料中添加少量锌(6.8~20.5 mg/kg)有助于黑鲷(*Sparus macrocephalus*)幼鱼生长,而铜对其增重作用不大,添加量以 $< 1.2$  mg/kg为宜;赵宇江<sup>[15]</sup>研究表明,饲料铜含量对草鱼、鲤鱼和黄颡鱼的鱼体水分、粗脂肪和粗灰分无显著影响( $P > 0.05$ )。**【本研究切入**

**点】**在方格星虫人工配合饲料的研究中,目前已有关于三大营养物质及微量元素硒、铁、锰等的相关报道<sup>[16-23]</sup>,但对于铜元素的相关数据较少,不利于全面了解方格星虫稚虫人工配合饲料中微量元素的最适含量。**【拟解决的关键问题】**研究微量元素铜对方格星虫的成活率、增重率、特定生长率、体成分的影响,为方格星虫的人工配合饲料配方中铜营养的添加提供理论基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

研究场地选取在北海市广西海洋研究所海水增殖试验基地,选取同一批受精卵孵化的、规格相同、外观正常、体质健壮的人工方格星虫苗种,其平均体重为(18.45±0.11) mg/条,平均体长为(1.50±0.16) cm/条,共7 200条,分为6组,每组3个重复。试验时间为2013年8月初至9月底,为期8周。

维生素混合物(1 kg 饲料含量):维生素D<sub>2</sub> 400 IU,维生素E 100 mg,维生素K 1 mg,维生素C 70 mg,维生素B<sub>1</sub> 0.5 mg,维生素B<sub>2</sub> 7 mg,维生素B<sub>6</sub> 6 mg,维生素B<sub>12</sub> 1 mg,D-泛酸 32.6 mg,烟酸 28 mg,生物素 1 mg,叶酸 7.5 mg,肌醇 440 mg。

复合矿物盐(1 kg 饲料含量):碳酸钙 3 000 mg,七水硫酸锌 300 mg,磷酸氢钙 4 125 mg,一水硫酸锰 270 mg,氯化钠 1 200 mg,一水亚硒酸钠 0.75 mg,氯化钾 750 mg,七水硫酸镁 1 525.5 mg,七水硫酸亚铁 750 mg,六水硫酸铝 6 mg,六水氯化钴 45 mg,碘化钾 6 mg,沸石粉 3 021.75 mg。

### 1.2 方 法

#### 1.2.1 试验饲料加工

以酪蛋白和明胶为蛋白源,鱼油为脂肪源,蛋氨酸铜为铜源,各组饲料铜含量设定为0 mg/kg、4 mg/kg、8 mg/kg、16 mg/kg、32 mg/kg、64 mg/kg,共6个浓度梯度,饲料铜实际测定值为2.7 mg/kg、7.5 mg/kg、11.2 mg/kg、19.8 mg/kg、30.4 mg/kg和52.1 mg/kg的等氮、等能饲料,所有原料进行水分、粗蛋白质(CP)、粗脂肪(EE)、灰分(Ash)测定后,粉碎过筛,微颗粒饲料加工参照Blair等<sup>[24]</sup>介绍的方法,按照配方逐级混合均匀,再与鱼油和水充分混匀,制成过150目筛的颗粒(表1)。制作好的饲料置于4℃冰箱内保存,以防变质。

表 1 试验饲料配方及营养成分分析(干物质)

Table 1 Ingredient composition and nutrient level of experimental diets (dry matter)

Cu 实际含量 Cu content(mg/kg)	原料 Ingredients(%)			成分分析 Proximate analysis			
	复合矿物质 Mineral premix	蛋氨酸铜 Copper methionine	合计 Total *	CP(%)	EE(%)	Ash(%)	能量** GE(MJ/kg)
2.70	1.500 0	0.000 0	100.00	44.25	9.23	9.64	19.45
7.50	1.499 8	0.000 2	100.00	44.24	9.05	9.32	19.72
11.20	1.499 5	0.000 5	100.00	44.32	9.17	9.19	19.36
19.80	1.499 1	0.000 9	100.00	44.89	9.17	9.24	19.89
30.40	1.498 0	0.002 0	100.00	44.78	9.09	9.84	19.92
52.10	1.496 0	0.004 0	100.00	44.21	9.15	9.25	19.73

注: \* 原料中其他组分含量分别为酪蛋白 40.00%, 明胶 10.00%, 鱼油 8.00%, 糊精 20.00%, 微晶纤维 14.00%, 褐藻酸钠 3.00%, 卵磷脂 2.00%, 维生素混合物 1.50%; \*\* 使用 PARR 6400 氧弹式热量计所测的实测值

Note: \* The other component content of ingredients is casein 40.00%, gelatin 10.00%, fish oil 8.00%, dextrin 20.00%, microlite cellulose 14.00%, sodium alginate 3.00%, lecithin 2.00%, vitamin premix 1.50%; \*\* Values of gross energy in the diets were measured by oxygen bomb calorimeter (PARR 6400)

### 1.2.2 对生长性能的影响

采用自然光照, 自然水温(维持在 26~30℃), 二级过滤海水(盐度 18‰~22‰), 24 h 连续微充氧(溶解氧大于 5.0 mg/L), 每天换水两次(9:00, 17:00), 换水后过量投喂, 保证沙子表面有少量未完全食用的饵料。养殖过程中每天巡视两次, 及时记录和清除死亡的个体。养殖结束后, 将停食吐沙 2 d 的各组方格星虫收集, 记录成活条数并称重, 保存于 -80℃ 超低温冰箱中<sup>[5]</sup>。

成活率、增重率、特定生长率的计算公式如下:

成活率(Survival rate, SR, %) =  $100 \times N_t / N_0$ ,

增重率(Weight gain rate, WGR, %) =  $100 \times (W_t - W_0) / W_0$ ,

特定生长率(Specific gain rate, SGR, %/d) =  $100 \times (\ln W_t - \ln W_0) / t$ 。

式中:  $N_0$  为初始稚虫条数,  $N_t$  为终末稚虫条数,  $W_0$  为初始稚虫体重,  $W_t$  为终末稚虫体重,  $t$  为试验天数。

### 1.2.3 对体组成成分的影响

方格星虫稚虫的体成分测定和饲料常规成分均采用 AOAC (1995) 官方分析方法分析。水分测定方法为采用 105℃ 烘箱中烘干至恒重, 计算公式: 水分含量 =  $[(\text{鲜重} - \text{干重}) / \text{鲜重}] \times 100\%$ ; 粗蛋白测定采用凯氏定氮法(Kjeltec 8400, Sweden); 粗脂肪测定采用索氏抽提法(Soxtec 2050, Switzerland);

灰分测定采用在 550℃ 马福炉中灼烧 12 h, 计算公式: 灰分含量 =  $(\text{灰分} / \text{料重}) \times 100\%$ 。采用 SPSS 19.0 for Windows 对所得数据进行方差分析, 若差异达到显著, 则进行 Tukey's 多重比较, 显著性水平为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 对生长性能的影响

由表 2 可知, 养殖周期结束后, 饲料铜含量对方格星虫稚虫的增重率和特定生长率有显著影响 ( $P < 0.05$ )。随着饲料中铜含量的提高, 稚虫的增重率和特定生长率呈先增后降再上升的趋势, 在铜含量为 11.2 mg/kg 时达到最高, 与铜含量为 7.5 mg/kg 和 52.1 mg/kg 两个试验组没有显著差异, 但显著高于铜含量为 2.7 mg/kg、19.8 mg/kg 和 30.4 mg/kg 铜含量组 ( $P < 0.05$ )。低铜含量(2.7 mg/kg)组稚虫的增重率和特定生长率均最低, 且显著低于其他各铜含量组 ( $P < 0.05$ )。各处理组稚虫成活率为 76.83%~82.25%, 铜含量对成活率的影响不显著 ( $P > 0.05$ )。

### 2.2 对体组成成分的影响

如表 3 所示, 对方格星虫稚虫体组成成分的分析表明, 饲料铜含量对方格星虫稚虫体组成中水分、粗蛋白、粗脂肪和粗灰分含量均没有显著影响 ( $P > 0.05$ )。

表2 饲料铜水平对方格星虫稚虫生长性能的影响(平均值±标准误)

Table 2 Effects of dietary copper level on growth performance of juvenile peanut worm, *S. nudus* (Mean±S. E.)

Cu 实际含量 Cu content (mg/kg)	$W_0$ (mg)	$W_t$ (mg)	WGR(%)	SGR(%/d)	SR(%)
2.7	18.55±0.09	37.65±1.65 <sup>a</sup>	102.94±7.83 <sup>a</sup>	1.26±0.07 <sup>a</sup>	76.83±2.51
7.5	18.03±0.11	49.31±1.72 <sup>bc</sup>	173.51±8.41 <sup>bc</sup>	1.80±0.05 <sup>bc</sup>	82.25±1.04
11.2	18.76±0.21	56.73±1.32 <sup>c</sup>	202.39±7.24 <sup>c</sup>	1.97±0.04 <sup>c</sup>	81.50±1.01
19.8	18.60±0.14	48.34±1.52 <sup>b</sup>	159.87±6.62 <sup>b</sup>	1.70±0.04 <sup>b</sup>	80.58±1.48
30.4	18.56±0.38	48.60±2.20 <sup>b</sup>	161.66±6.90 <sup>b</sup>	1.72±0.05 <sup>b</sup>	80.17±1.02
52.1	18.24±0.41	49.48±0.53 <sup>bc</sup>	171.40±3.76 <sup>bc</sup>	1.78±0.02 <sup>bc</sup>	81.58±1.08
P 值 P value	0.406	0.000	0.000	0.000	0.196

注:同列数据肩标无字母或相同字母表示差异不显著( $P>0.05$ ),不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )

Note: In the same column, values with no letter or the same letter superscripts mean no significant difference ( $P>0.05$ ), while with different small letter superscripts mean significant difference ( $P<0.05$ )

表3 饲料铜水平对方格星虫稚虫体成分的影响(平均值±标准误)

Table 3 Effects of dietary copper level on body composition of juvenile peanut worm, *S. nudus* (Mean±S. E.)

Cu 实际含量 Cu content (mg/kg)	水分 Moisture(%)	粗蛋白 Crude protein (%)	粗脂肪 Crude lipid	粗灰分 Ash(%)
2.7	80.56±0.60	61.02±0.76	2.36±0.14	19.64±1.53
7.5	80.44±0.29	59.88±0.48	2.56±0.12	19.32±1.66
11.2	81.74±0.19	63.27±4.09	2.41±0.14	20.19±1.19
19.8	80.52±0.60	62.15±3.64	2.69±0.10	20.60±1.53
30.4	80.57±0.87	61.46±3.63	2.90±0.18	19.08±1.13
52.1	80.46±0.32	61.56±1.72	2.36±0.07	20.23±1.01
P 值 P value	0.513	0.971	0.701	0.961

注:1)此表中的粗蛋白质、粗脂肪、粗灰分含量为方格星虫的干重含量;2)同列数据肩标无字母或相同字母表示差异不显著( $P>0.05$ )

Note: 1) Crude protein, crude lipid and ash content were dry weight content of juvenile peanut worm, *S. nudus*; 2) In the same column, values with no letter or the same letter superscripts mean no significant difference ( $P>0.05$ )

### 3 讨论

#### 3.1 饲料铜水平对方格星虫稚虫生长性能的影响

本研究饲料中添加的微量元素铜为氨基酸螯合物,具有结构稳定、分子量低、生物学效价高等特点,比无机形式的铜更易吸收利用,并且饲料中的铜元素只能在一定范围内对试验动物产生促进作用<sup>[15]</sup>。试验结果表明,随着饲料铜含量的增加,方格星虫稚虫的增重率和特定生长率显著升高,当铜含量为11.2 mg/kg时两者均达到最大值后下降,这可能是因为11.2 mg/kg的铜含量对方格星虫稚虫生长性能的促进作用已趋于饱和,饲料中多余的铜则沉积于方格星虫稚虫的体壁和体腔液中;也可能是高于11.2 mg/kg的铜含量在一定程度上抑制了方格星虫稚虫的生长,之后的升高趋势则可能是因为方格星虫对铜产生了耐受性,铜含量的增加不再抑制方格星虫的生长,但铜的促生长作用也不明显。也有研究报道表明,尼罗罗非鱼饲料中铜含量达到200 mg/kg时会使鱼体的生长性能下降<sup>[25]</sup>。

#### 3.2 饲料铜水平对方格星虫稚虫体成分的影响

方格星虫粗灰分测定方法是将一定样品置于

550℃高温炉中,使得所有有机物质全部氧化,剩余的残渣质量与初始样品质量的比值即为粗灰分值。由于各组饲料的基础营养成分并无差别,添加的铜为微量元素,因此在宏观上并没有表现出其对虫体的影响,这可能是本次试验中的粗灰分含量没有产生明显变化的原因。各试验组体水分、粗蛋白和粗脂肪没有显著差异也可能跟上述原因有关;另一方面,动物体内各成分含量之间是相互影响牵制的<sup>[26]</sup>,这可能也是导致方格星虫各成分含量无显著差异的原因之一。但由于本研究并未做方格星虫的代谢研究,因此方格星虫的体成分没有显著变化的原因还有待进一步研究。

### 4 结论

本研究通过给方格星虫稚虫投喂不同铜水平的饲料,研究微量元素铜对方格星虫稚虫生长、成活率及体组成的影响。试验结果表明:饲料中添加适量的铜元素对方格星虫的增重率与特定生长率均有显著影响,但是饲料中铜水平过高或过低均对方格星虫的生长性能促进作用不大。从方格星虫稚虫的增重率和成活率来看,铜含量为7.5 mg/kg、11.2

mg/kg、52.1 mg/kg 3 个试验组无显著差异,但是从饲料成本来看,选择 7.5~11.2 mg/kg 的铜水平较为适合。

#### 参考文献:

- [1] 李凤鲁,孔庆兰,史贵田,等. 中国沿海方格星虫属(星虫动物门)的研究[J]. 青岛海洋大学学报,1990,20(1):93-99.  
LI F L, KONG Q L, SHI G T, et al. Study on the genus *Sipunculus* (Sipuncula) of the China coasts[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1990, 20(1): 93-99.
- [2] 彭银辉,黄国强,刘旭佳,等. 方格星虫种质资源及人工增殖研究进展[J]. 广西科学院学报,2015,31(1):9-15.  
PENG Y H, HUAGN G Q, LIU X J, et al. Advances in germplasm research and artificial culture of *Sipunculus nudus* [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2015, 31(1): 9-15.
- [3] 杨凤. 动物营养学[M]. 2 版. 北京:中国农业出版社,2009.  
YANG F. Animal Nutrition[M]. 2ed Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2009.
- [4] 任雪萍,盛晓红. 人体中铜的生物学功能[J]. 周口师专学报,1997,14(2):49-50,53.  
REN X P, SHENG X H. The biological engineering of copper in human body[J]. Journal of Zhoukou Teachers College, 1997, 14(2): 49-50, 53.
- [5] 李慎涛,孙庆瑞. 铜的生物学效应[J]. 中国兽医科技,1990(2):34-35.  
LI S T, SUN Q R. The biological effect of copper[J]. China Veterinary Science and Technology, 1990(2): 34-35.
- [6] 虞泽鹏,谢启轮,张弘. 微量元素铜对肉仔鸡的营养作用研究进展[J]. 兽药与饲料添加剂,2003,8:16-18.  
YU Z P, XIE Q L, ZHANG H. Research progress of nutritional effects on broiler trace element copper[J]. Veterinary Pharmaceuticals & Feed Additives, 2003, 8: 16-18.
- [7] ROOF M D, MAHAN D C. Effect of carbadox and various dietary copper levels for weanling swine[J]. Journal of Animal Science, 1982, 55: 1109-1117.
- [8] 蒋蓉. 铜、铁、锰、锌对黄颡鱼生长和生理机能的影响[D]. 苏州:苏州大学,2006.  
JIANG R. Effects of Cu, Fe, Mn and Zn on Growth and Physiological Function of *Pelteobagrus fulvidraco* [D]. Suzhou: Suzhou University, 2006.
- [9] 李云峰,覃宗华,彭险峰,等. 谷氨酸铜对罗非鱼和草鱼生长性能血清生化指标和体组成的影响[J]. 中国饲料,2013(18):31-33.  
LI Y F, QIN Z H, PENG X F, et al. Effects of cupric glutamate on growth performance in tilapia and grass carp[J]. China Feed, 2013(18): 31-33.
- [10] 郭志勋,陈毕生,徐力文,等. 蛋氨酸铜和硫酸铜在凡纳对虾饲料中的应用效果比较[J]. 南方水产,2005,1(2):56-60.  
GUO Z X, CHEN B S, XU L W, et al. Comparison of Met - Cu and copper sulfate use in *Litopenaeus vannamei* feed [J]. South China Fisheries Science, 2005, 1(2): 56-60.
- [11] 叶超霞,刘永坚,田丽霞,等. 饲料中高水平铜对斜带石斑鱼 (*Epinephelus coioides*) 生长和铜、铁、锰、锌含量的影响[J]. 海洋与湖沼,2013,44(3):606-610.  
YE C X, LIU Y J, TIAN L X, et al. Effects of elevated dietary copper levels on growth and Cu, Fe, Mn, Zn content of juvenile grouper *Epinephelus coioides* [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(3): 606-610.
- [12] LEE M H, SHIAU S Y. Dietary copper requirement of juvenile grass shrimp, *Penaeus monodon*, and effects on non - specific immune responses [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2002, 13: 259-270.
- [13] 刘伟,文华,吴建开,等. 高铜饲料对凡纳滨对虾生长、肌肉和肝胰脏铜积累的影响[J]. 淡水渔业,2008,38(2):12-16.  
LIU W, WEN H, WU J K, et al. Effects of high-level dietary copper on growth, muscle and hepatopancreas copper accumulation of *Litopenaeus vannamei* [J]. Freshwater Fisheries, 2008, 38(2): 12-16.
- [14] 陈四清,李文娟,潘生弟. 黑鲷幼鱼对 Zn、Cu 的营养需要[J]. 中国水产科学,1998,5(2):52-56.  
CHEN S Q, JI W J, PAN S D. Study on the nutritional requirements of Zn and Cu for black sea bream larvae[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1998, 5(2): 52-56.
- [15] 赵宇江. 饲料高水平铜对草鱼、鲤和黄颡鱼生长和体内铜铁锌影响[D]. 武汉:华中农业大学,2008.  
ZHAO Y J. Effects of Elevated Dietary Copper Levels on Growth Performance and Copper, Iron, Zinc Concentration *in vivo* of Grass Carp, Common Carp and Yellow Catfish [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [16] 张琴,童童,许明珠,等. 酶法提取方格星虫多糖的条件及优化[J]. 广西科学,2014,21(2):158-163.  
ZHANG Q, TONG T, XU M Z, et al. Optimum condition for enzyme extraction of polysaccharide from *Sipunculus nudus* Linnaeus [J]. Guangxi Sciences,

- 2014,21(2):158-163.
- [17] 许明珠,张琴,童潼,等.方格星虫多糖碱法提取工艺研究[J].广西科学,2014,21(2):164-168.  
XU M Z,ZHANG Q,TONG T,et al. Optimization of alkaline extraction for polysaccharide from *Sipunculus nudus* Linnaeus [J]. Guangxi Sciences, 2014,21(2):164-168.
- [18] 张琴,童万平,董兰芳,等.饲料中脂肪水平对方格星虫稚虫生长性能、体组成及消化酶活性的影响[J].渔业科学进展,2011,32(6):99-106.  
ZHANG Q,TONG W P,DONG L F,et al. Effects of dietary lipid levels on growth performance, body composition and digestive enzyme activities of juvenile peanut worm, *Sipunculus nudus* Linnaeus [J]. Progress in Fishery Sciences, 2011,32(6):99-106.
- [19] 张琴,童万平,董兰芳,等.饲料蛋白水平对方格星虫稚虫生长和体组成的影响[J].渔业科学进展,2012,33(1):86-92.  
ZHANG Q,TONG W P,DONG L F,et al. Effects of dietary protein level on growth performance and body composition of juvenile peanut worm, *Sipunculus nudus* Linnaeus [J]. Progress in Fishery Sciences, 2012,33(1):86-92.
- [20] 许明珠,张琴,童万平,等.饲料糖水平对方格星虫稚虫生长、体组成和消化酶活性的影响[J].动物营养学报,2013,25(3):534-542.  
XU M Z,ZHANG Q,TONG W P,et al. Effects of dietary carbohydrate level on growth, body composition and digestive enzyme activities of juvenile peanut worm, *Sipunculus nudus* [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2013,25(3):534-542.
- [21] 许明珠,张琴,童潼,等.饲料中硒含量对方格星虫稚虫生长、体成分、组织硒含量及相关酶活性的影响[J].动物营养学报,2015,27(6):1733-1739.  
XU M Z,ZHANG Q,TONG T,et al. Effects of dietary selenium content on growth, body composition, tissue selenium content and related enzyme activities of juvenile peanut worm, *Sipunculus nudus* Linnaeus [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2015, 27 (6):1733-1739.
- [22] 许明珠,张琴,童潼,等.饲料铁水平对方格星虫稚虫生长性能、体成分、酶活性及组织铁含量的影响[J].动物营养学报,2014,26(11):3325-3331.  
XU M Z,ZHANG Q,TONG T,et al. Effects of dietary iron level on growth performance, body composition, enzyme activity and tissue iron content of juvenile peanut worm, *Sipunculus nudus* Linnaeus [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2014, 26 (11): 3325-3331.
- [23] 许明珠,张琴,童潼,等.饲料中锰含量对方格星虫稚虫生长性能、体成分、体腔液中锰超氧化物歧化酶活性及组织锰含量的影响[J].动物营养学报,2015,27(10):3077-3083.  
XU M Z,ZHANG Q,TONG T,et al. Effects of dietary manganese content on growth performance, body composition, coelomic fluid manganese-superoxide dismutase activity and tissue manganese content of juvenile peanut worm, *Sipunculus nudus* Linnaeus [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2015, 27 (10): 3077-3083.
- [24] BLAIR T, CASTELL J, NEIL S, et al. Evaluation of microdiets versus live feeds on growth, survival and fatty acid composition of larval haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) [J]. Aquaculture, 2003,225(1/2/3/4):451-461.
- [25] SHAW B J, HANDY R D. Dietary copper exposure and recovery in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* [J]. Aquatic Toxicology, 2006,76:111-121.
- [26] HEMRE G I, SANDNES K, LIE Ø, et al. Carbohydrate nutrition in Atlantic salmon, *Salmo salar* L.: Growth and feed utilization [J]. Aquaculture Research, 1995,26:149-154.

(责任编辑:陆雁)