

题名长度控制
在20字以内

凡纳滨对虾对饲料中钙、磷的营养需求

作者单位编号以上标形式添加，二字姓名间空一字距离

安文强^{1,2}, 黎文伟¹, 谭北平^{1,2}, 杨奇慧^{1,2}, 迟淑艳^{1,2}, 董晓慧^{1,2},
刘泓宇^{1,2}, 章 双^{1,2}, 杨原志¹, 张海涛²

(1. 广东海洋大学 水产学院, 水产动物营养与饲料实验室, 广东 湛江 524088;

2. 农业部华南水产与畜禽饲料重点实验室, 广东 湛江 524000)

单位后注明省、市、邮编, 不同单位间用“;”隔开

摘要中应包含
试验材料、试
验方法、试验
结果和简要结
论, 400字左
右为宜。
综述类文章不
需要添加中英
文摘要。

摘 要: 水温 28~31 ℃, 盐度 21~24, 养殖凡纳滨对虾幼虾, 投喂以乳酸钙为钙源、磷酸二氢钠为磷源, 在钙添加水平为 0%、0.5%、1.0% 的条件下, 分别添加 0%、0.4%、0.8%、1.2%、1.6% 的磷配制的 15 种饲料, 探讨凡纳滨对虾饲料中钙、磷的适宜添加量。8 周的养殖试验结果显示, 饲料钙、磷水平及钙、磷水平的交互作用极显著影响对虾质量增加率、特定生长率、蛋白质效率、饲料系数和存活率 ($P < 0.01$)。饲料钙、磷水平极显著影响对虾肌肉粗蛋白、粗脂肪和全虾粗蛋白的含量 ($P < 0.01$)。饲料钙、磷水平的交互作用极显著影响全虾粗蛋白和肌肉粗蛋白、粗脂肪的含量 ($P < 0.01$)。饲料钙水平极显著影响全虾和虾壳的钙、磷含量及肌肉磷含量 ($P < 0.01$), 显著影响对虾肌肉钙含量 ($P < 0.05$)。饲料磷水平及钙、磷水平的交互作用极显著影响全虾、肌肉、虾壳的钙、磷含量 ($P < 0.01$)。饲料钙、磷水平及钙、磷水平的交互作用均不显著影响血清钙离子含量 ($P > 0.05$)。在本试验条件下, 以特定生长率为判断依据, 通过折线模型分析得出, 饲料中添加 0.5% 的钙和 0.88% 的磷时凡纳滨对虾的特定生长率最高。

体重请用体质量表示, 增重率请用质量增加率表示。

显著性概率P应为斜体

关键词: 凡纳滨对虾; 钙; 磷; 生长性能; 体成分; 组织钙、磷含量; 血清生化指标

使用最新中文学名, 南美白对虾应为凡纳滨对虾。

中图分类号: S968.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-1111(2020)01-0001-11

《中国图书馆分类法》中

研究类论文为A, 综述类为C

查询, 水产类一般归为S9

正文中第一次出现的生物学中文名称后应给出其拉丁文名称(以后再出现不必标出)注意用斜体属名称相同时, 再次出现用开头大写字母加实心句点表示

凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 又称南美白对虾, 是世界三大主要养殖虾类之一, 生长迅速, 肉质鲜美, 对环境变化耐受力强, 在世界各地广泛养殖^[1]。钙是甲壳动物的重要组成成分, 除了构成体壳, 还参与肌肉收缩、血液凝固、神经传递、调节渗透压、激活酚氧化酶原系统以及维持细胞膜的完整性和通透性^[2-3]。磷是动物细胞核酸及细胞膜的重要成分, 同时又直接影响所有细胞的能量反应, 对动物的生长、骨骼的矿化有极大的作用, 缺乏磷会抑制对虾的生长^[4]。而饲料中钙、磷的水平过高会导致对虾向周围水环境的矿物排泄量增加, 污染水体。有研究建议, 将饲料中钙、磷比值当成一个独立的矿物质水平的指标^[5], 在满足对虾的生长需求时应注意严格控制钙、磷的添加量。

2% 的磷即可满足日本囊对虾 (*Marsupenaeus japonicus*) 的生长需求; 而 Kanazawa 等^[7]却发现, 满足日本囊对虾生长的饲料磷添加量应为 1%。中国明对虾 (*Fenneropenaeus chinensis*) 摄食含磷 0.91%、钙 2.2% 的饲料时生长最佳^[8]。海水养殖的凡纳滨对虾的基础饲料中不添加钙只添加 0.35% 磷即可维持生长和存活; 若添加 1% 和 2% 的钙, 则需分别添加 0.5%~1% 和 1%~2% 的磷才能维持对虾的正常生长^[9]。低盐水体养殖的凡纳滨对虾摄食添加 2% 钙的饲料时, 生长受抑制^[10]。斑节对虾 (*Penaeus monodon*) 饲料中钙含量为 1.25% 时, 添加 1%~1.5% 的磷生长最佳^[11]。饲料中钙含量为 1.25%、磷含量为 1.32% 时印度明对虾 (*F. indicus*) 生长最佳^[12]。但同时探查凡纳滨对虾商品饲料中钙、磷适宜添加量的研究尚未见报道。笔者研究在商品饲料中添加不同水平钙、磷对凡纳滨对虾生长性能、体成分、组织钙及磷的含量、血清生化指

引用两个及以上连续参考文献, 之间用“-”连接。

引用参考文献, 作者为两人及以上, 应在文中列出第一作者并后加“等”。

目前有关对虾钙、磷需求量已有研究。Deshi-

maru 等^[6]发现, 在饲料中无需添加钙, 仅需添加

基金项目顺序按照国家级、省部级、地市级顺序依次列出。有项目编号应用括号注明。

收稿日期: 2019-01-10; 修回日期: 2019-06-25。

基金项目: 现代农业产业技术体系专项资金资助项目(CARS-47); 广东省科技计划项目(2015A020209170); 广东省渔港建设和渔业产业发展专项(A201608C06); 湛江市财政资金科技专项竞争性分配项目(2016A3022)。

作者简介: 安文强(1993—), 男, 硕士研究生; 研究方向: 水产动物营养与饲料。E-mail: anwenqiang0314@163.com。通讯作者: 董晓慧(1970—), 女, 教授; 研究方向: 水产动物营养与饲料。E-mail: dongxiaohui2003@163.com。

作者及通讯作者基本信息: 姓名、出生年、性别、职称(学历)、研究方向及E-mail, 标点符号严格参照例文中。来稿中请附加详细通讯地址、邮编、收件人、电话等信息。

标及免疫酶活性等指标的影响,以确定凡纳滨对虾饲料中适宜的钙、磷含量,为生产凡纳滨对虾高效配合饲料提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

养殖试验在广东省湛江市东海岛广东海洋大学海洋生物研究基地室内海水养殖系统中进行。凡纳滨对虾购于湛江市东海岛中联虾苗厂。

试验饲料以红鱼粉、虾壳粉、豆粕、花生粕和玉米蛋白粉为蛋白源,鱼油、豆油和大豆卵磷脂为脂

肪源,面粉为糖源,基础饲料配方见表 1。

分别以乳酸钙、磷酸二氢钠(国药集团化学试剂有限公司)为钙源和磷源,在钙添加水平为 0、0.5%、1.0% 条件下,分别添加 0、0.4%、0.8%、1.2%、1.6% 的磷,配制 15 种试验饲料。饲料原料粉碎过 80 目筛,按配方准确称取,逐级扩大法混合,第一次混合 15 min 后,加油和卵磷脂,然后混合,过 80 目筛,加入蒸馏水(30%,V/m),再混合均匀,压制成直径分别为 1.0 mm 和 1.5 mm 的颗粒饲料,60 °C 熟化 30 min,风干后编号分装,-20 °C 冰箱中保存备用。

共用单位标于右上角

图表的题头、表头、内容、注释均需要英文对照

表 1 基础饲料组成及营养水平(风干基础)

%

Tab. 1 Ingredients and nutrient levels of the basal diet (air-dry basis)

原料 Ingredient	含量 Content	原料 Ingredient	含量 Content
红鱼粉 Brown fish meal	20.00	乙氧基喹啉 Ethoxyquin	0.03
去皮豆粕 Peeled soybean meal	20.00	维生素 C Vitamin C(35%)	0.05
花生粕 Peanut meal	10.00	羧甲基纤维素钠 Sodium carboxymethyl cellulose	1.00
虾壳粉 Shrimp shell meal	4.00	微晶纤维素 Microcrystalline cellulose ³	14.00
玉米蛋白粉 Corn protein powder	6.00	合计 Total	100.00
面粉 Wheat flour	20.82	营养水平 Nutrient level	
鱼油 Fish oil	1.20	粗蛋白质 Crude protein	41.65
大豆油 Soybean oil	1.20	粗脂肪 Crude lipid	7.04
大豆卵磷脂 Soybean lecithin	1.00	粗灰分 Crude ash	7.43
维生素预混物 Vitamin premix ¹	0.10	钙 Ca	1.69
矿物元素预混物 Mineral premix ²	0.10	磷 P	1.41
氯化胆碱 Choline chloride	0.50		

注:1. 每千克维生素预混料含有 Vitamin premix contains the following per kg: 维生素 A 醋酸酯 retinyl acetate 10.00 g, 维生素 D₃ VD₃ 50.00 g, 维生素 E VE 99.00 g, 维生素 K VK 5.00 g, 维生素 B₁ VB₁ 25.50 g, 维生素 B₂ VB₂ 25.00 g, 维生素 B₆ VB₆ 50.00 g, 维生素 B₁₂ VB₁₂ 0.10 g, 泛酸钙 calcium pantothenate 61.00 g, 烟酸 nicotinic acid 101.00 g, 生物素 biotin 25.00 g, 肌醇 inositol 153.06 g, 叶酸 folic acid 6.25 g, 纤维素 cellulose 389.09 g; 2. 每千克矿物质预混料含有 Mineral premix contains the following per kg: 磷酸钾 KIO₃ 40.03 g, 氯化钴 CoCl₂ 4.07 g, 硫酸铜 CuSO₄ 19.84 g, 柠檬酸铁 FeC₆H₅O₇ 13.71 g, 硫酸锌 ZnSO₄ 28.28 g, 硫酸镁 MgSO₄ 0.12 g, 硫酸锰 MnSO₄ 12.43 g, 氯化钾 KCl 15.33 g, 亚硒酸钠 Na₂SeO₃ 2.00 g, 沸石粉 zeolite power 864.19 g; 3. 钙磷添加组用乳酸钙和磷酸二氢钠替代基础饲料组中的微晶纤维素。In the calcium and phosphorus addition group, microcrystalline cellulose in basic diet group is replaced with calcium lactate and sodium dihydrogen phosphate.

1.2 方法

试验开始前,给试验虾投喂基础饲料一周,使对虾适应饲料。试验共设 15 个处理,每个处理 3 个平行,每平行为 1 个 0.30 m³ 的玻璃钢桶。对虾禁食 24 h 后,挑选规格均匀、健壮、活力强、初体质量(4.2±0.15) g 的对虾,随机分配于玻璃钢桶中,每桶 40 尾,养殖 8 周。日投喂 4 次(7:00、11:00、17:00、21:00),饱食投喂,投喂 1 h 后查料,根据对虾摄食及天气情况调整投喂量。养殖期间 24 h 连续充气。对虾养殖前两周每 2 d 换水 1 次,后期日

换水 1 次。试验期间水温 28~31 °C,盐度 21~24, pH 7.8~8.2,溶解氧≥5 mg/L,氨氮<0.2 mg/L,亚硝酸盐<0.05 mg/L。

试验结束时禁食 24 h 后称量质量,计数,计算生长指标。然后每桶随机取 15 尾虾,逐尾用 1 mL 注射器自第 5 步足基部血窦取血,合并置于 Eppendor 管中,4 °C 冰箱保存过夜,以 3000 r/min 离心 10 min 后收集血清,-80 °C 冰箱保存备测血清指标。另每桶取 10 尾虾,沥干水后装于封口袋中,剩余的对虾剥离虾壳和肌肉,-20 °C 冰箱保存,用于测定

数量与单位间添加空格,数量区间用“~”连接

表注和图注为6号字

常规成分和钙、磷含量。

饲料、全虾及肌肉样品的水分测定采用 105℃ 烘干恒定质量法，粗蛋白采用凯氏定氮法（Kjeltec™ 8400，瑞典）；粗脂肪采用索式抽提法（抽提剂为石油醚）；粗灰分采用马福炉 550℃ 灼烧法测定。

饲料、全虾、肌肉和虾壳的钙、磷含量的测定方法：样品烘干粉碎后，置于具塞试管中，加入 5 mL 默克硝酸，70℃ 水浴消化 2 h，然后在消化炉上赶酸 5 h，加入 1 mL 双氧水，赶酸至余下 1 mL 稀释。最后用电感耦合等离子体发射光谱仪（ICP）测定钙、磷含量。

此类说法时，文献编号无需上标

血清指标测定方法：碱性磷酸酶活性采用南京建成试剂盒方法测定；酚氧化酶活性参照文献[13]的方法测定；总胆固醇、甘油三酯、钙离子和无机磷含量用全自动生化分析仪（日立 7020 HITACHI，日本）检测。

各项生长指标按下式计算：

$$\text{质量增加率}/\% = (m_t - m_0) / m_0 \times 100\%$$

$$\text{特定生长率}/\% \cdot d^{-1} = (\ln m_t - \ln m_0) / t \times 100\%$$

$$\text{饲料系数} = m_f / (m_t - m_0)$$

$$\text{蛋白质效率} = (m_t - m_0) / (m_f \times P)$$

$$\text{存活率}/\% = n_t / n_0 \times 100\%$$

式中， m_t 、 m_0 分别为终末均质量、初始均质量， m_f 为饲料摄入量， P 为饲料蛋白质含量， n_t 、 n_0 分别为终末尾数、初始尾数。

1.3 数据处理

试验结果用平均值 ± 标准差表示，用 SPSS 17.0 进行双因素方差分析，若存在显著性差异，再进行 Duncan's 多重比较，以检验组间的差异显著性； $P < 0.05$ 表示差异显著， $P < 0.01$ 表示差异极显著。

2 结果

2.1 饲料钙、磷添加水平对凡纳滨对虾生长性能的影响

本试验中，饲料钙水平、磷水平及钙和磷水平的交互作用均极显著影响对虾的质量增加率、特定生长率、蛋白质效率、饲料效率和存活率（ $P < 0.01$ ）（表 2）。0.5% 钙水平和 0.8% 磷水平与不添加钙水平、磷水平组相比，极显著提高了对虾的质量增加率、特定生长率、蛋白质效率，并降低了饲料效率（ $P < 0.01$ ），钙水平、磷水平极显著提高了对虾的质量增加率、特定生长率和蛋白质效率，降低了饲料效率（ $P < 0.01$ ），0.5% 钙水平与不添加钙水平组相比显著提高了存活率（ $P < 0.05$ ）。质量增加率和特定

生长率随着磷水平的提高均呈先升后降的趋势，0.8% 磷水平和 1.2% 磷水平的质量增加率和特定生长率差异不显著（ $P > 0.05$ ），但显著高于其他水平组（ $P < 0.05$ ）。0.8%~1.6% 组的饲料效率差异不显著（ $P > 0.05$ ），但显著低于其他各组（ $P < 0.05$ ）。1.6% 磷水平与不添加磷水平组相比显著降低了存活率（ $P < 0.05$ ）。

以特定生长率为判断依据，通过二次回归曲线分析得出：饲料中不添加钙时，饲料中可添加 1.12% 的磷；添加 0.5% 的钙时，饲料中可添加 0.88% 的磷；添加 1% 的钙时，饲料中可添加 0.78% 的磷。对虾在添加 0.5% 的钙和 0.88% 的磷时有最大特定生长率（图 1）。

2.2 饲料中钙、磷添加水平对凡纳滨对虾全虾及肌肉常规成分含量的影响

饲料钙水平极显著影响对虾的肌肉粗蛋白、粗脂肪、粗灰分含量，全虾粗蛋白、粗脂肪的含量（ $P < 0.01$ ）（表 3）。饲料磷水平极显著影响对虾的肌肉粗蛋白、粗脂肪和全虾粗蛋白的含量（ $P < 0.01$ ）。饲料钙、磷水平的交互作用极显著影响对虾的全虾粗蛋白和肌肉粗蛋白、粗脂肪的含量（ $P < 0.01$ ），显著影响对虾的全虾粗脂肪的含量，对全虾和肌肉粗灰分差异不显著（ $P < 0.05$ ）。钙水平极显著提高了全虾和肌肉粗蛋白的含量，降低了肌肉粗脂肪、粗灰分及全虾粗脂肪的含量，0.5%~1.0% 钙水平极显著降低了肌肉粗脂肪、粗灰分的含量（ $P < 0.01$ ）。随磷水平的升高，全虾粗蛋白的含量呈先升后降的趋势，1.2% 组全虾粗蛋白含量极显著高于其他处理（ $P < 0.01$ ）。1.6% 磷水平提高了全虾粗灰分的含量，但与 1.2% 磷水平之间无显著性差异（ $P > 0.05$ ）。对虾肌肉粗灰分含量随磷水平的升高呈上升趋势，但各组之间差异不显著（ $P > 0.05$ ）。

2.3 饲料中钙、磷水平对凡纳滨对虾组织钙、磷含量的影响

饲料钙水平极显著地影响全虾和虾壳的钙、磷含量和肌肉的磷含量（ $P < 0.01$ ），显著影响肌肉的钙含量（ $P < 0.05$ ）（表 4）。磷水平及钙磷水平的交互作用均极显著地影响全虾、肌肉和虾壳的钙、磷含量（ $P < 0.01$ ）。钙水平极显著提高了全虾的钙、磷含量、虾壳的磷含量（ $P < 0.01$ ）。随着钙水平的提高肌肉磷含量呈先升后降的趋势，0.5% 钙水平组肌肉磷含量显著高于其他水平（ $P < 0.05$ ）。全虾、肌肉和虾壳的钙、磷含量随着饲料磷水平的提高均呈先增后减的趋势，1.2% 磷水平全虾的钙、磷含量及虾壳的钙含量显著高于其他水平（ $P < 0.05$ ）。

表 2 饲料钙、磷添加水平对凡纳滨对虾生长性能的影响

Tab. 2 Effects of dietary Ca and P supplemental levels on growth performance of Pacific white shrimp *L. vannamei*

钙(总钙) Ca (TCa)	磷(总磷) P (TP)	质量增加率/% WGR	特定增长率/ $\% \cdot d^{-1}$ SGR	蛋白质效率 PER	饲料系数 FCR	成活率/% SR
0(1.69)	0(1.41)	197.80±18.37 ^a	1.23±0.10 ^a	45.97±1.21 ^a	5.35±0.14 ^f	84.44±1.92 ^a
0(1.64)	0.4(1.86)	222.66±26.13 ^a	1.40±0.17 ^{ab}	64.29±2.09 ^{abc}	4.68±1.03 ^{ef}	83.33±0.00 ^a
0(1.65)	0.8(2.32)	313.42±26.99 ^{bcd}	1.82±0.13 ^{cde}	73.17±4.30 ^{bcd}	3.53±0.43 ^{cd}	86.67±0.00 ^{ab}
0(1.68)	1.2(2.71)	322.68±9.47 ^{cde}	1.85±0.06 ^{cde}	78.66±4.26 ^{cde}	3.05±0.17 ^{abc}	95.56±3.85 ^{de}
0(1.62)	1.6(3.15)	288.49±19.42 ^{bc}	1.65±0.08 ^c	72.53±5.48 ^{bcd}	3.30±0.25 ^{bc}	83.33±0.00 ^a
0.5(2.14)	0(1.42)	220.90±30.13 ^a	1.35±0.16 ^a	56.94±7.59 ^{ab}	4.28±0.54 ^{de}	97.78±1.92 ^e
0.5(2.15)	0.4(1.89)	363.91±32.10 ^{ef}	2.05±0.14 ^{ef}	90.51±9.03 ^{de}	2.68±0.27 ^{ab}	93.33±3.33 ^{cde}
0.5(2.13)	0.8(2.30)	444.81±4.16 ^g	2.46±0.15 ^g	98.22±7.16 ^e	2.43±0.17 ^a	91.11±1.92 ^{bcd}
0.5(2.17)	1.2(2.74)	384.85±12.90 ^f	2.14±0.06 ^f	88.62±10.72 ^{de}	2.71±0.34 ^{ab}	95.00±2.36 ^{cde}
0.5(2.18)	1.6(3.11)	309.25±21.55 ^{bcd}	1.75±0.09 ^{cd}	85.31±7.42 ^{de}	2.88±0.26 ^{abc}	83.33±0.00 ^a
1.0(2.69)	0(1.38)	283.22±15.37 ^{bc}	1.68±0.07 ^c	58.99±3.54 ^{ab}	4.10±0.25 ^{de}	93.33±0.00 ^{cde}
1.0(2.68)	0.4(1.83)	346.58±32.09 ^{def}	1.97±0.15 ^{def}	73.21±7.76 ^{bcd}	3.31±0.37 ^{bc}	95.56±3.85 ^{de}
1.0(2.68)	0.8(2.31)	363.39±21.15 ^{ef}	2.07±0.12 ^{ef}	94.70±2.17 ^e	2.53±0.06 ^{ab}	86.67±5.77 ^{ab}
1.0(2.63)	1.2(2.70)	356.16±6.84 ^{ef}	2.01±0.04 ^{ef}	94.01±11.89 ^e	2.52±0.32 ^{ab}	83.33±0.00 ^a
1.0(2.70)	1.6(3.16)	274.88±30.66 ^b	1.61±0.20 ^{bc}	85.14±12.87 ^{de}	2.82±0.43 ^{abc}	88.89±5.09 ^{abc}
钙水平/% Ca level	0	269.01±54.63 ^a	1.58±0.28 ^a	64.96±15.57 ^a	4.06±1.02 ^b	87.22±5.47 ^a
	0.5	344.75±80.59 ^c	1.97±0.41 ^c	83.92±16.30 ^b	3.01±0.76 ^a	92.56±5.12 ^b
	1.0	324.85±43.84 ^b	1.86±0.22 ^b	78.69±15.89 ^b	3.17±0.69 ^a	89.29±5.73 ^a
磷水平/% P level	0	233.97±42.83 ^a	1.42±0.22 ^a	53.97±7.39 ^a	4.58±0.66 ^c	91.67±6.42 ^b
	0.4	311.05±71.67 ^b	1.86±0.31 ^c	76.00±16.73 ^b	3.41±0.95 ^b	91.67±5.91 ^b
	0.8	373.88±59.97 ^c	2.12±0.32 ^d	90.06±12.51 ^c	2.87±0.60 ^a	88.33±3.98 ^{ab}
	1.2	354.56±28.32 ^c	2.02±0.14 ^d	87.31±10.28 ^c	2.76±0.33 ^a	90.83±6.61 ^b
	1.6	290.88±25.89 ^b	1.67±0.13 ^b	81.61±9.46 ^{bc}	3.00±0.34 ^a	85.71±4.18 ^a
双因素方差分析 P 值 P-value of two-factor ANOVA						
钙水平 Ca level		0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
磷水平 P level		0.000	0.000	0.000	0.000	0.002
钙水平×磷水平 Ca level×P level		0.000	0.001	0.001	0.001	0.000

注：同一列中上标不同字母的平均值间差异显著 ($P < 0.05$)，各组上标中有相同字母表示组间差异不显著 ($P > 0.05$)，下同。

Note: the means with different superscripts in the same column are significantly different ($P < 0.05$); the means with same superscripts indicate no significant difference among groups ($P > 0.05$); et sequentia.

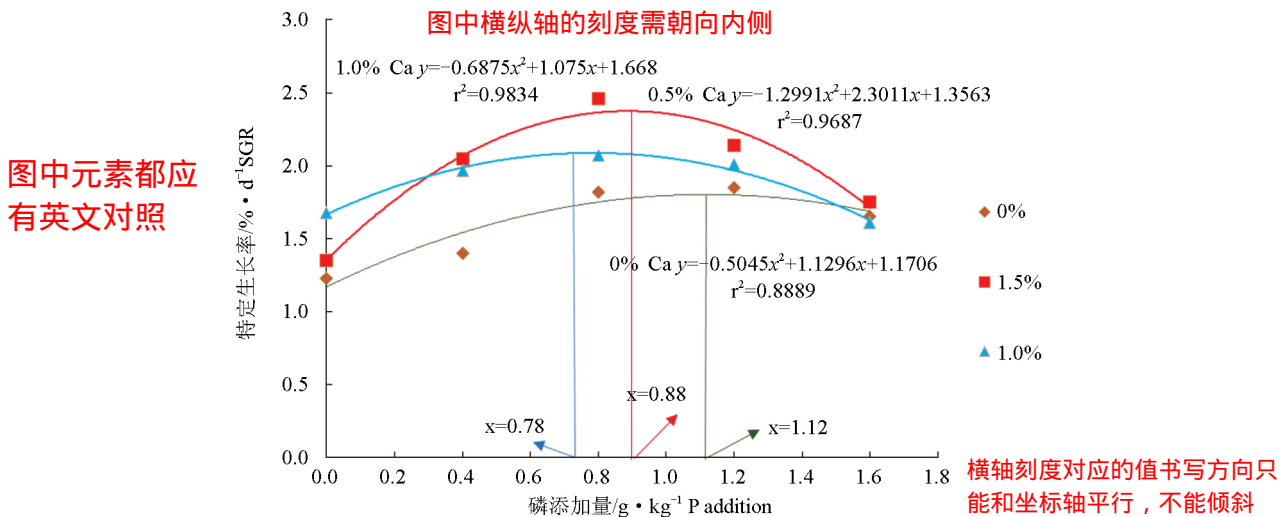


图 1 3 个不同钙添加水平下凡纳滨对虾饲料中磷的最适添加量

Fig. 1 The optimum supplemental level of P in diet for Pacific white shrimp *L. vannamei* under three Ca supplemental levels

表 3 饲料钙磷添加水平对凡纳滨对虾全虾及肌肉常规成分的影响(干物质基础) %
 Tab. 3 Effects of dietary Ca and P supplemental levels on approximate composition of whole body and muscle of Pacific white shrimp *L. vannamei*(DM basis)

添加量 Supplemental amount		全虾 Whole body			肌肉 Muscle		
钙(总钙) Ca (TCa)	磷(总磷) P (TP)	粗蛋白 Crude Protein	粗脂肪 Crude lipid	粗灰分 Crude ash	粗蛋白 Crude Protein	粗脂肪 Crude Lipid	粗灰分 Crude ash
0(1.69)	0(1.41)	72.60±0.81 ^a	8.45±0.20 ^c	13.31±0.43 ^a	84.23±0.89 ^a	8.58±0.76 ^d	7.30±0.13 ^{ab}
0(1.64)	0.4(1.86)	72.95±1.13 ^a	10.23±0.69 ^d	14.78±0.39 ^{ab}	89.16±0.69 ^b	8.05±0.95 ^{cd}	7.30±0.04 ^{ab}
0(1.65)	0.8(2.32)	75.04±0.61 ^{bcd}	8.42±0.23 ^c	13.68±0.75 ^a	90.85±0.91 ^d	7.02±0.31 ^{abc}	7.32±0.40 ^{ab}
0(1.68)	1.2(2.71)	75.86±0.40 ^{cde}	7.48±0.22 ^{abc}	14.94±0.12 ^{ab}	90.34±0.73 ^{bcd}	9.92±0.27 ^{ab}	7.55±0.00 ^b
0(1.62)	1.6(3.15)	74.71±0.12 ^{bc}	7.62±0.12 ^{abc}	14.28±0.94 ^{ab}	89.13±0.47 ^b	5.84±0.67 ^a	7.42±0.40 ^b
0.5(2.14)	0(1.42)	74.34±0.44 ^b	7.45±0.55 ^{abc}	14.06±0.46 ^a	89.10±0.33 ^b	6.97±0.51 ^{bc}	6.55±0.42 ^a
0.5(2.15)	0.4(1.89)	75.28±0.45 ^{bcd}	7.56±0.42 ^{abc}	13.57±0.20 ^a	89.76±0.51 ^{bcd}	7.40±0.64 ^{bc}	6.88±0.08 ^{ab}
0.5(2.13)	0.8(2.30)	76.19±0.39 ^{de}	6.79±0.05 ^{ab}	14.51±0.23 ^{ab}	89.26±1.07 ^{bc}	6.99±0.15 ^{abc}	6.98±0.18 ^{ab}
0.5(2.17)	1.2(2.74)	76.91±0.52 ^e	7.40±1.60 ^{abc}	14.84±0.02 ^{ab}	90.40±0.59 ^{bcd}	6.87±0.50 ^{ab}	7.13±0.33 ^{ab}
0.5(2.18)	1.6(3.11)	75.65±1.09 ^{cd}	7.48±0.27 ^{abc}	14.42±0.64 ^{ab}	90.56±0.84 ^{cd}	6.96±0.34 ^{ab}	7.22±0.17 ^{ab}
1.0(2.69)	0(1.38)	74.99±0.35 ^{bcd}	6.58±0.17 ^a	14.79±0.47 ^{ab}	89.93±0.96 ^{bcd}	6.82±0.02 ^{abc}	6.79±0.42 ^{ab}
1.0(2.68)	0.4(1.83)	75.49±0.46 ^{bcd}	7.46±0.11 ^{abc}	14.26±0.58 ^{ab}	90.29±0.74 ^{bcd}	6.98±0.76 ^{abc}	6.94±0.25 ^{ab}
1.0(2.68)	0.8(2.31)	75.03±0.43 ^{bcd}	7.93±0.31 ^{abc}	16.58±1.86 ^b	91.05±0.19 ^d	6.40±0.60 ^{ab}	7.08±0.67 ^{ab}
1.0(2.63)	1.2(2.70)	75.74±0.02 ^{cd}	6.52±1.54 ^a	15.04±1.33 ^{ab}	90.59±0.15 ^{cd}	7.14±0.50 ^{bc}	6.80±0.71 ^{ab}
1.0(2.70)	1.6(3.16)	74.99±0.63 ^{bcd}	8.24±0.15 ^{bc}	15.16±0.68 ^{ab}	89.44±0.50 ^{bc}	6.56±0.16 ^{ab}	6.93±0.61 ^{ab}
钙水平/% Ca level	0	74.28±1.36 ^a	8.44±1.07 ^b	15.04±0.90 ^b	88.74±2.52 ^a	7.88±1.42 ^b	7.37±0.24 ^b
	0.5	75.67±1.04 ^b	7.34±0.73 ^a	14.26±0.91 ^a	89.82±0.86 ^b	7.01±0.40 ^a	6.95±0.35 ^a
	1.0	75.21±0.48 ^b	7.36±0.86 ^a	14.88±0.71 ^{ab}	90.24±0.78 ^b	6.74±0.49 ^a	6.90±0.42 ^a
磷水平/% P level	0	74.15±1.09 ^a	7.49±0.83 ^{ab}	14.35±0.58 ^a	87.75±2.75 ^a	7.54±1.00 ^b	6.83±0.45
	0.4	74.77±1.26 ^b	8.19±1.31 ^b	14.03±0.74 ^a	89.74±0.75 ^b	7.56±0.84 ^b	7.06±0.24
	0.8	75.47±0.71 ^c	7.58±0.78 ^{ab}	14.54±0.67 ^a	90.38±1.11 ^b	6.80±0.46 ^a	7.15±0.40
	1.2	76.27±0.69 ^d	7.17±1.21 ^a	14.91±0.82 ^{ab}	90.42±0.52 ^b	7.82±1.48 ^b	7.15±0.46
	1.6	75.12±0.76 ^{bc}	7.74±0.39 ^{ab}	15.50±1.04 ^b	89.71±0.85 ^b	6.52±0.61 ^a	7.20±0.37
双因素方差分析 P 值 P-value of two-factor ANOVA							
钙水平 Ca level		0.000	0.001	0.042	0.000	0.000	0.009
磷水平 P level		0.000	0.022	0.037	0.000	0.000	0.501
钙水平×磷水平 Ca level×P level		0.008	0.019	0.979	0.000	0.001	0.891

表 4 饲料钙磷添加水平对凡纳滨对虾机体钙磷含量的影响
 Tab. 4 Effects of dietary Ca and P supplemental levels on Ca and P levels in tissues of Pacific white shrimp *L. vannamei*

添加量 Supplemental amount		全虾 Whole body		肌肉 Muscle		虾壳 Exoskeleton	
钙(总钙) Ca (TCa)	磷(总磷) P (TP)	钙含量 Ca content	磷含量 P content	钙含量 Ca content	磷含量 P content	钙含量 Ca content	磷含量 P content
0(1.69)	0(1.41)	28.27±0.86 ^a	13.12±0.65 ^a	6.34±0.31 ^{bcd}	9.06±0.09 ^a	136.90±1.34 ^a	8.04±0.25 ^a
0(1.64)	0.4(1.86)	31.00±0.78 ^b	13.53±0.46 ^a	7.23±0.11 ^f	14.22±0.52 ^c	141.47±1.29 ^b	12.95±0.08 ^c
0(1.65)	0.8(2.32)	34.88±1.26 ^{cd}	15.31±0.56 ^{bc}	6.59±0.41 ^{de}	16.06±0.13 ^f	146.34±0.67 ^{de}	15.61±0.40 ^g
0(1.68)	1.2(2.71)	39.10±0.78 ^{gh}	18.79±0.19 ^e	6.53±0.11 ^{ede}	15.14±0.55 ^{de}	151.70±1.53 ^b	15.57±0.62 ^g
0(1.62)	1.6(3.15)	36.19±0.93 ^{def}	16.82±0.40 ^d	5.75±0.13 ^a	14.49±0.52 ^{cd}	147.31±1.29 ^{def}	14.29±0.09 ^{ef}
0.5(2.14)	0(1.42)	30.69±0.80 ^b	14.21±0.83 ^{ab}	6.10±0.16 ^{abc}	12.09±0.15 ^b	138.40±1.20 ^a	8.27±0.36 ^{ab}
0.5(2.15)	0.4(1.89)	35.21±1.00 ^d	15.97±0.33 ^{cd}	6.91±0.15 ^{ef}	14.55±0.47 ^{cd}	143.12±0.81 ^{bc}	13.55±0.48 ^{cd}
0.5(2.13)	0.8(2.30)	38.22±0.40 ^{fg}	18.21±0.48 ^c	6.53±0.18 ^{ede}	16.07±0.26 ^f	148.18±0.74 ^{ef}	16.21±0.31 ^{gh}

(续表 4)

添加量 Supplemental amount		全虾 Whole body		肌肉 Muscle		虾壳 Exoskeleton	
钙(总钙) Ca (TCa)	磷(总磷) P (TP)	钙含量 Ca content	磷含量 P content	钙含量 Ca content	磷含量 P content	钙含量 Ca content	磷含量 P content
0.5(2.17)	1.2(2.74)	40.90±0.86 ^h	20.20±0.43 ^{fg}	6.13±0.18 ^{abc}	14.73±0.68 ^{cd}	156.85±1.96 ⁱ	16.30±0.07 ^{gh}
0.5(2.18)	1.6(3.11)	37.69±1.72 ^{efg}	19.38±0.62 ^{ef}	5.81±0.10 ^a	14.44±0.11 ^{cd}	150.82±0.59 ^{gh}	14.82±0.27 ^f
1.0(2.69)	0(1.38)	33.08±0.82 ^c	15.03±0.72 ^{bc}	5.86±0.21 ^a	11.61±0.12 ^b	138.08±1.15 ^a	8.95±0.09 ^b
1.0(2.68)	0.4(1.83)	35.92±0.40 ^{de}	16.68±0.32 ^d	6.78±0.15 ^{de}	14.21±0.45 ^c	144.89±0.47 ^{cd}	13.70±0.37 ^{de}
1.0(2.68)	0.8(2.31)	38.96±1.05 ^{gh}	18.76±0.29 ^e	6.53±0.04 ^{de}	15.71±0.22 ^{ef}	148.88±0.49 ^{fg}	16.50±0.40 ^h
1.0(2.63)	1.2(2.70)	44.10±0.78 ⁱ	21.21±0.83 ^g	6.47±0.01 ^{bcd}	14.46±0.24 ^{cd}	157.06±1.17 ⁱ	16.69±0.19 ^h
1.0(2.70)	1.6(3.16)	39.15±0.81 ^{gh}	20.20±0.46 ^{fg}	6.07±0.07 ^{ab}	14.05±0.10 ^c	152.82±0.55 ^h	15.66±0.33 ^g
钙水平/% Ca level	0	33.89±4.10 ^a	15.51±2.25 ^a	6.49±0.53 ^b	13.79±2.60 ^a	144.74±5.45 ^a	13.29±2.97 ^a
	0.5	36.54±3.71 ^b	17.59±2.37 ^b	6.29±0.42 ^a	14.37±1.39 ^b	147.47±6.74 ^b	13.83±3.13 ^b
	1.0	38.24±3.92 ^c	18.37±2.42 ^c	6.34±0.36 ^{ab}	14.01±1.42 ^a	148.34±6.92 ^b	14.30±3.04 ^c
磷水平/% P level	0	30.68±2.24 ^a	14.12±1.03 ^a	6.10±0.28 ^a	10.92±1.46 ^a	137.79±1.19 ^a	8.42±0.47 ^a
	0.4	34.04±2.45 ^b	15.39±1.51 ^b	6.97±0.23 ^c	14.32±0.41 ^b	143.16±1.69 ^b	13.40±0.45 ^b
	0.8	37.35±2.08 ^c	17.42±1.70 ^c	6.55±0.20 ^b	15.94±0.25 ^c	147.80±1.28 ^c	16.11±0.50 ^d
	1.2	41.36±2.35 ^d	20.06±1.17 ^c	6.37±0.21 ^b	14.78±0.51 ^b	155.20±2.98 ^c	16.19±0.59 ^d
	1.6	37.67±1.63 ^c	18.80±1.62 ^d	5.88±0.17 ^a	14.33±0.33 ^b	150.31±2.59 ^d	14.92±0.65 ^c
双因素方差分析 P 值 P-value of two-factor ANOVA							
钙水平 Ca level		0.000	0.000	0.041	0.009	0.000	0.000
磷水平 P level		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
钙水平×磷水平 Ca level×P level		0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000

2.4 饲料中钙、磷的添加水平对凡纳滨对虾血清指标的影响

饲料中钙、磷的水平均极显著影响血清碱性磷酸酶、酚氧化酶的活性和总胆固醇、甘油三酯的含量($P<0.01$) (表 5)。钙、磷水平的交互作用极显著影响血清碱性磷酸酶的活性和钙离子、无机磷的含量($P<0.01$)。饲料钙、磷水平及钙、磷水平的交互作用对虾血清钙离子的含量影响不显著($P>0.05$)。钙水平显著提高了血清碱性磷酸酶、酚氧化酶的活性及总胆固醇的含量($P<0.05$)。1%钙

水平组对虾血清酚氧化酶的活性极显著高于其他水平组($P<0.01$)。随着钙水平的提高对虾血清甘油三酯的含量呈先升后降的趋势,0.5%钙水平组显著高于其他水平组($P<0.05$)。磷水平显著降低了血清碱性磷酸酶的活性和甘油三酯的含量,1.2%~1.6%磷水平也显著降低了总胆固醇的含量($P<0.05$)。酚氧化酶的活性和无机磷的含量均随着磷水平的提高呈先升后降的趋势,0.8%磷水平组的酚氧化酶活性显著高于其他水平组($P<0.05$)。

表 5 饲料中钙、磷添加水平对凡纳滨对虾血清指标的影响

Tab. 5 Effects of dietary Ca and P supplemental levels on serum indices of Pacific white shrimp *L. vannamei*

添加量 Supplemental amount		碱性磷酸酶	酚氧化酶	总胆固醇	甘油三酯	钙离子	无机磷
钙(总钙)/% Ca(TCa)	磷(总磷)/% P(TP)	U/L ALP	U/mL PO	mmol/L CHOL	mmol/L TG	mmol/L Ca ²⁺	mmol/L IP
0(1.69)	40.63±0.76 ^h	40.63±0.76 ^h	572.22±9.62 ^a	0.29±0.02 ^{cd}	0.39±0.02 ^b	13.60±0.87 ^{abc}	5.50±0.87 ^{def}
0(1.64)	20.42±0.40 ^e	20.42±0.40 ^e	1144.44±45.90 ^d	0.35±0.01 ^{efg}	0.31±0.06 ^{defg}	12.57±1.37 ^a	4.75±0.35 ^{bcd}
0(1.65)	14.35±0.11 ^{cd}	14.35±0.11 ^{cd}	1461.11±17.35 ^e	0.27±0.03 ^c	0.30±0.05 ^{cdef}	14.20±1.35 ^{bc}	7.25±0.35 ^g
0(1.68)	6.93±0.18 ^a	6.93±0.18 ^a	919.44±33.68 ^c	0.23±0.03 ^b	0.20±0.02 ^{ab}	13.17±0.38 ^{abc}	4.25±1.06 ^{abcd}
0(1.62)	10.71±0.07 ^{bc}	10.71±0.07 ^{bc}	972.22±39.38 ^c	0.19±0.01 ^a	0.15±0.04 ^a	13.30±0.46 ^{abc}	3.67±0.76 ^a
0.5(2.14)	42.63±0.27 ^h	42.63±0.27 ^h	991.67±8.33 ^c	0.32±0.02 ^{de}	0.38±0.02 ^{gh}	13.50±0.44 ^{abc}	5.17±0.58 ^{cde}

(续表 5)

添加量 Supplemental amount		碱性磷酸酶	酚氧化酶	总胆固醇	甘油三酯	钙离子	无机磷
钙(总钙)/%	磷(总磷)/%	U/L	U/mL	mmol/L	mmol/L	mmol/L	mmol/L
Ca(TCa)	P(TP)	ALP	PO	CHOL	TG	Ca ²⁺	IP
0.5(2.15)	24.35±0.18 ^f	24.35±0.18 ^f	1141.67±33.33 ^d	0.29±0.01 ^{cd}	0.35±0.02 ^{fgh}	13.97±0.29 ^{bc}	5.50±0.87 ^{def}
0.5(2.13)	15.14±0.38 ^d	15.14±0.38 ^d	955.56±76.98 ^f	0.36±0.01 ^{fg}	0.32±0.02 ^{efgh}	13.83±0.40 ^{abc}	6.17±0.29 ^{efg}
0.5(2.17)	14.42±0.04 ^{cd}	14.42±0.04 ^{cd}	1402.78±29.27 ^e	0.32±0.02 ^{de}	0.25±0.01 ^{bede}	13.03±0.46 ^{ab}	4.00±0.87 ^{abc}
0.5(2.18)	13.07±0.23 ^{bcd}	13.07±0.23 ^{bcd}	2102.78±50.92 ^e	0.27±0.02 ^c	0.23±0.04 ^{bc}	13.83±0.60 ^{abc}	3.83±0.29 ^{ab}
1.0(2.69)	30.35±0.23 ^g	30.35±0.23 ^g	777.78±60.28 ^b	0.37±0.02 ^g	0.36±0.08 ^{fgh}	13.40±0.10 ^{abc}	4.33±0.58 ^{bcd}
1.0(2.68)	32.20±0.20 ^g	32.20±0.20 ^g	958.33±65.09 ^c	0.34±0.01 ^{efg}	0.33±0.01 ^{fgh}	14.43±0.55 ^c	6.67±0.29 ^{fg}
1.0(2.68)	15.71±0.24 ^d	15.71±0.24 ^d	2225.00±58.33 ^g	0.33±0.04 ^{def}	0.24±0.03 ^{bcd}	13.63±0.29 ^{abc}	4.33±0.76 ^{bcd}
1.0(2.63)	15.35±0.27 ^d	15.35±0.27 ^d	2133.33±38.19 ^f	0.32±0.03 ^{de}	0.23±0.06 ^{bc}	13.67±0.50 ^{abc}	4.00±0.50 ^{abc}
1.0(2.70)	9.71±0.09 ^{ab}	9.71±0.09 ^{ab}	1463.89±48.83 ^e	0.21±0.02 ^{ab}	0.14±0.03 ^a	13.30±0.10 ^{abc}	3.00±0.50 ^a
钙水平/% Ca level	18.56±1.75 ^a	18.56±1.75 ^a	1013.89±302.22 ^a	0.27±0.06 ^a	0.27±0.09 ^a	13.37±1.00	5.00±1.40 ^b
	21.92±1.62 ^b	21.92±1.62 ^b	1318.89±438.92 ^b	0.31±0.03 ^b	0.31±0.06 ^b	13.63±0.52	4.93±1.07 ^{ab}
	20.63±1.31 ^b	20.63±1.31 ^b	1511.67±612.80 ^c	0.32±0.05 ^b	0.26±0.09 ^a	13.69±0.51	4.47±1.33 ^a
磷水平/% P level	37.91±0.90 ^d	37.91±0.90 ^d	780.56±184.23 ^a	0.32±0.04 ^c	0.38±0.04 ^e	13.50±0.50	5.00±0.79 ^b
	25.63±0.77 ^c	25.63±0.77 ^c	1081.48±101.96 ^b	0.33±0.03 ^c	0.33±0.03 ^d	13.66±1.13	5.75±0.96 ^c
	15.07±0.25 ^b	15.07±0.25 ^b	1929.63±357.56 ^e	0.32±0.05 ^c	0.28±0.05 ^c	13.89±0.76	5.75±1.34 ^c
	12.21±0.58 ^a	12.21±0.58 ^a	1485.19±530.06 ^d	0.29±0.05 ^b	0.22±0.04 ^b	13.29±0.49	4.06±0.68 ^a
	11.14±0.25 ^a	11.14±0.25 ^a	1130.56±254.99 ^c	0.22±0.04 ^a	0.17±0.05 ^a	13.48±0.47	3.50±0.61 ^a
双因素方差分析 P 值 P-value of two-factor ANOVA							
钙水平 Ca level		0.001	0.000	0.000	0.009	0.371	0.045
磷水平 P level		0.000	0.000	0.000	0.000	0.398	0.000
钙水平×磷水平 Ca level×P level		0.000	0.000	0.000	0.358	0.096	0.001

讨论部分请针对试验结果,结合他人研究成果,合理引用参考文献进行分层次、分小标题的深入讨论。

3 讨 论

3.1 饲料钙、磷水平对凡纳滨对虾生长性能的影响

Ambasankar 等^[11]研究发现,0~2.5%磷水平显著提高了斑节对虾的质量增加率。0.71%~1.59%磷水平显著提高了黑鲷 (*Acanthopagrus schiegellii*) 幼鱼的质量增加率、特定生长率和蛋白质效率^[14]。本试验结果与上述研究结果一致,也与凡纳滨对虾^[15]、中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*)^[16] 的研究结果一致。斑节对虾的质量增加率在 1.5%磷水平达到最大值,而 2%磷水平组的质量增加率显著降低^[11]。本试验结果也表明,随着磷水平的升高,凡纳滨对虾的质量增加率、特定生长率和蛋白质效率呈先升后降的趋势,在 1.6%磷水平时质量增加率、特定生长率显著下降。印度明对虾的饲料效率随饲料磷水平的升高呈先降后升的趋势(饲料钙水平为 1.25%)^[12]。黑线鳉 (*Melanogrammus aeglefinus*)^[17]、黑鲷幼鱼^[18]、军曹鱼 (*Rachycen-*

tron canadum)^[19]、草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*)^[20] 的研究中也有类似结论。这说明饲料中高水平的磷会抑制对虾对其他矿物元素的吸收,从而抑制其生长,磷的添加量必须控制在适宜的范围内。饲料中磷含量过高会导致草鱼生长缓慢,甚至死亡^[20-21]。Pan 等^[15]发现,0.91%~1.63%的磷水平不影响体质量 0.16 g 的凡纳滨对虾的生长,这可能与幼虾阶段生长速度快,蜕壳次数多,需要较多的磷有关。Niu 等^[22]也发现,早期对虾对磷的需要量更高。

Davis 等^[9]研究发现,若未添加钙,基础饲料中含 0.35%的磷就可以维持对虾的生长和存活;若添加 1%钙,则添加 2%的磷时对虾质量增加率和存活率最大。Cheng 等^[10]报道,盐度为 2 的水体中养殖的对虾在投喂无钙饲料时,添加 0.77%的有效磷(0.93%总磷)就能满足其生长;当添加 1%的钙时,饲料中需添加 1.22%的有效磷(2%的总磷),对虾才具有较好的生长性能。黄凯等^[23]以磷酸二氢钙作为凡纳滨对虾饲料的钙源和磷源,在盐度为 2 的

区间中的百分号不可以省略为一个

水体中,发现磷酸二氢钙添加量为1%时,对虾的生长速度最快;当添加量为3%时,对虾的生长性能最佳。而Pan等^[15]同样也是用磷酸二氢钙作为饲料的钙源和磷源,在盐度17~20的海水中养殖,发现当磷酸二氢钙添加量为1.7%(总钙为1.83%,总磷为1.33%)时,凡纳滨对虾生长和饲料转化率最佳。本试验中二次回归曲线拟合得出,随饲料钙水平的升高,获得最佳生长性能的磷需要量却是逐渐下降的,不同于已有的研究结果;主因素分析表明,适量的钙水平(0.5%)可显著提高对虾的生长性能指标和成活率,显著降低饲料系数。本试验中对虾的初始质量为(4.2±0.15)g,远远高于上述研究中的幼虾体质量,同时养殖水体盐度为21~24。由此可见,即使同种虾钙、磷需求量也不尽相同,这可能与养殖对象的生长阶段、养殖水体盐度、饲料配方、磷源与钙源等因素有关。钙、磷间有显著的交互作用,但二者的相互作用还有待进一步研究。

3.2 饲料中钙、磷水平对凡纳滨对虾全虾及肌肉常规成分的影响

Niu等^[22]研究发现,凡纳滨对虾全虾粗蛋白含量随饲料磷水平的上升而显著升高。随饲料磷水平(0.72%~1.74%)的升高,红螯螯虾(*Cherax quadricarinatus*)^[3]肌肉粗蛋白含量上升。本试验结果表明,磷水平提高了凡纳滨对虾的全虾和肌肉中粗蛋白的含量。类似的还有黑线鳉^[17]、日本花鲈(*Lateolabrax japonicus*)^[24]、斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)^[25]和黑鲷幼鱼^[14]。本试验中,随着磷水平的升高,凡纳滨对虾全虾粗脂肪的含量呈下降趋势,肌肉粗脂肪的含量在1.6%磷水平显著下降。这与红螯螯虾^[3]、凡纳滨对虾^[22]、草鱼^[21]和虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[26]等研究结果一致。Roy等^[17]认为,这可能是由于磷缺乏抑制了动物体内脂肪酸的 β -氧化,脂肪的利用率降低,转而利用蛋白质供能,导致机体脂肪累积和蛋白含量减少;而随着饲料中磷含量的逐渐升高,增强了动物体内脂肪酸的 β -氧化,从而增强机体利用脂肪供能的能力,增加糖原的生成,促使蛋白质沉积,所以机体的蛋白含量会增加而脂肪含量减少。灰分和磷含量是水产动物磷营养研究中的常用指标^[26],本试验中,随着饲料磷水平的升高,对虾的全虾和肌肉粗灰分的含量呈上升趋势。中华绒螯蟹^[27]、红螯螯虾^[3]、克原氏螯虾(*Procambarus clarkii*)^[28]和中国明对虾^[29]的研究也得到了类似的结果。罗文佳等^[5]认为,这可能是磷含量的增加和离子之间的协同作用

增加了矿物质在机体中的沉积。

3.3 饲料中钙、磷水平对凡纳滨对虾组织钙、磷含量的影响

鱼虾机体的钙、磷含量,常常作为研究鱼虾饲料钙、磷适宜添加量的参考指标^[30-31]。Pan等^[15]研究发现,随着饲料磷水平(0.91%~1.63%)的升高,凡纳滨对虾全虾和虾壳的钙、磷含量呈上升趋势。同一钙水平下,对虾的肌肉钙、磷含量随饲料磷水平的升高而增加^[10]。本试验中,对虾的全虾、肌肉、虾壳的钙和磷含量随饲料磷水平的升高而升高,与上述结果,也与红螯螯虾^[3]、克原氏螯虾^[28]、中华绒螯蟹^[27]等报道相一致。任泽林等^[29]发现,中国明对虾饲料钙水平与虾壳钙含量之间,饲料磷水平与虾壳磷含量及肌肉磷含量之间呈线性关系。凡纳滨对虾全虾及虾壳的钙、磷含量与饲料中钙、磷的水平呈正相关联系^[5]。大麻哈鱼(*Oncorhynchus keta*)^[32-33]、虹鳟^[34-36]的研究也证实了鱼体钙、磷含量与饲料磷水平之间存在正相关的关系。但有研究表明,印度明对虾体内磷含量与饲料磷添加量无关^[37];Davis等^[38]的研究也表明,饲料中钙、磷含量与对虾组织矿物元素含量没有直接相关性;其他凡纳滨对虾^[39]研究及美洲龙虾(*Homarus americanus*)^[40]等研究中也类似的研究结论。这可能与虾在不同生长阶段的蜕皮循环有关,因为甲壳动物蜕皮前后甲壳和肌肉中钙、磷含量会变化,在蜕壳过程中矿物元素会反复损失^[23,40]。

3.4 饲料中钙、磷水平对凡纳滨对虾血清指标的影响

碱性磷酸酶是一种磷酸单酯酶,可催化磷酸的水解反应及基团的转移反应,为二磷酸腺苷磷酸化形成三磷酸腺苷提供无机磷酸^[41]。碱性磷酸酶是一种水解磷酸酯及焦磷酸酯的水解同工酶,其活性受到饲料磷水平的影响,可作为动物体内磷酸状态的评价指标之一^[42]。本试验中,饲料磷水平显著降低了对虾血清碱性磷酸酶的活性。饲料磷水平0.5%~2.0%使凡纳滨对虾血清碱性磷酸酶活性显著降低^[10]。这与本试验研究结果一致,也与真鲷(*Pagrosomus major*)^[31]、日本沼虾(*M. nipponensis*)^[43]等结果相一致。但随饲料磷水平的升高,红螯螯虾血清碱性磷酸酶活性也显著升高^[3],在日本花鲈^[24]、虹鳟^[26]中也有相似结果。但斑点叉尾鲷血清碱性磷酸酶活性与饲料磷水平间无显著相关性^[25]。这可能是碱性磷酸酶的活性受到水化学^[44]、采食量^[45]和生长阶段^[46]等的影响。

酚氧化酶原激活系统是一种酶级联系统,甲壳

动物的酚氧化酶原系统存在于血淋巴中的颗粒细胞中^[47]。系统中的酚氧化酶原可以被细菌脂多糖、钙离子及胰蛋白酶等激活后转变成具有活性的酚氧化酶^[48]。Sung 等^[49]研究发现,镁离子、钙离子能增强斑节对虾和罗氏沼虾(*M. rosenbergii*)酚氧化酶的活性。本试验饲料钙水平提高了凡纳滨对虾的血清酚氧化酶的活性,与上述研究一致;而随着磷水平的提高,凡纳滨对虾血清酚氧化酶活性均呈先升后降的趋势。这可能是饲料中的磷主要以磷酸根的形式存在,过多的磷酸根与铁、镁等金属离子反应生成不溶性磷酸盐,从而影响铁、镁等离子的消化吸收和血清酚氧化酶的活性^[50]。

本试验中,饲料磷水平对血清钙离子无显著性差异。在黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)^[51]中也有类似报道。唐琴等^[51]认为,饲养试验结束后,饥饿 24 h 后取样,血清的钙、磷含量已不能反映鱼体的摄食情况。本试验中,饲料磷水平显著降低了对虾的血清总胆固醇和甘油三酯含量。0.61%~1.51%磷水平降低了军曹鱼血清总胆固醇和甘油三酯含量^[19]。黑鲷血清总胆固醇和甘油三酯含量随饲料磷水平的提高而降低^[18]。本试验结果与上述研究结果一致,也与大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)^[52]、日本花鲈^[24]、双棘黄姑鱼(*Protonibeia diacanthus*)^[53]报道相同。黄晓聪等^[53]认为,这与脂肪代谢有关,磷缺乏导致脂肪生成增多,当磷足够时脂肪生成减少,总胆固醇和甘油三酯的含量下降。

4 结 论

文章需有结论部分,综述类文章要有展望部分

初体质量(4.2±0.15)g 的凡纳滨对虾,在水温 28~31℃、盐度 21~24 条件下,饲料中添加 0%、0.5%、1% 的钙时,饲料中磷的适宜添加水平为 1.12%、0.88%、0.78%。在添加 0.5% 钙和 0.88% 的磷时凡纳滨对虾特定生长率最大。

参考文献:

[1] 陈昌生,纪德华,王兴标,等. Ca²⁺、Mg²⁺ 对凡纳滨对虾存活及生长的影响[J]. 水产学报,2004,28(4):413-418.

[2] 艾春香. 虾蟹类钙磷营养研究进展[J]. 饲料博览,1999,11(9):33-34.

[3] 王冬冬,叶金云,王友慧,等. 饲料中不同磷水平对红螯螯虾幼虾生长和体组成的影响[J]. 上海海洋大学学报,2010,19(3):344-351.

[4] 李春霞. 饲料中钙、磷含量对动物机体的影响[J]. 养殖技术顾问,2014(4):54-55.

[5] 罗文佳. 凡纳滨对虾磷需求量及磷对饲料利用率的影响

响研究[D]. 广州:中山大学,2010.

[6] Deshimaru O, Kuroki K, Sakamoto S, et al. Absorption of labelled calcium-45Ca by prawn from sea water[J]. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries,1978,44(9):975-977. 外文参考文献,姓前名后,名缩写

[7] Kanazawa A, Teshima S I, Sasaki M, et al. Requirements of the juvenile prawn for calcium, phosphorus, magnesium, potassium, copper, manganese, and iron[J]. Memoirs of Faculty of Fisheries Kagoshima University,1984,33(1):63-71. 英文期刊写全称,而非缩写

[8] 周洪琪,王义强,王顺昌. 中国对虾对于饲料钙、磷、镁、钾、铁的营养需求量[J]. 上海海洋大学学报,1993,2(2/3):113-118.

[9] Davis D A, Lawrence A L, Iii D M G. Response of *Penaeus vannamei* to dietary calcium, phosphorus and calcium:phosphorus ratio [J]. Journal of the World Aquaculture Society,1993,24(4):504-515.

[10] Cheng K M, Hu C Q, Liu Y N, et al. Effects of dietary calcium, phosphorus and calcium/phosphorus ratio on the growth and tissue mineralization of *Litopenaeus vannamei* reared in low-salinity water[J]. Aquaculture,2006,251(2/4):472-483. 外文参考文献,三人以上,后加正体“et al”

[11] Ambasankar K, Ali S A, Dayal M A. Effect of dietary phosphorus on growth and its excretion in tiger shrimp, *Penaeus monodon* [J]. Asian Fisheries Science,2006,19(1/2):21-26. 引用参考文献时斜体字请注意按原文引用

[12] Ambasankar K, Ahamad A S. Effect of dietary phosphorus on growth and phosphorus excretion in Indian white shrimp [J]. Asian Fisheries Science,2002,17(2):119-126.

[13] Huang J, Yang Y, Wang A. Reconsideration of phenoloxidase activity determination in white shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. Fish & Shellfish Immunology,2010,28(1):240-244.

[14] 胡王龙. 饲料磷对黑鲷幼鱼生长和组织生化指标的影响[D]. 杭州:浙江大学,2005.

[15] Pan Q, Chen X Y, Li F, et al. Response of juvenile *Litopenaeus vannamei* to varying levels of calcium phosphate monobasic supplemented to a practical diet [J]. Aquaculture,2005,248(1/4):97-102.

[16] 钱国英,朱秋华. 饲料中的钙磷含量与河蟹生长的关系[J]. 浙江海洋学院学报:自然科学版,1999,18(3):209-214.

[17] Roy P K, Lall S P. Dietary phosphorus requirement of juvenile haddock (*Melanogrammus aeglefinus* L.) [J]. Aquaculture,2003,221(1/4):451-468.

[18] Shao Q, Ma J, Xu Z, et al. Dietary phosphorus requirement of juvenile black seabream, *Sparus macrocephalus*[J]. Aquaculture,2008,277(1/2):92-100.

[19] 杨原志,刘仙钦,董晓慧,等. 饲料磷水平对军曹鱼幼

参考文献著录规则见《来稿须知》,合期号的表示应为2005,10(1/4):100-108.

- 鱼生长、体成分以及生化指标的影响[J]. 广东饲料, 2016, 25(8): 24-28.
- [20] 张曼, 顾钱洪, 李学军, 等. 草鱼集约化养殖中的磷循环[J]. 水产科学, 2015, 34(8): 491-496.
- [21] 游文章, 黄忠志, 廖朝兴, 等. 草鱼对饲料中磷需要量的研究[J]. 水产学报, 1987, 11(4): 285-292.
- [22] Niu J, Liu Y J, Tian L X, et al. Effect of dietary phosphorus sources and varying levels of supplemental phosphorus on survival, growth and body composition of postlarval shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. Aquaculture Nutrition, 2008, 14(5): 472-479.
- [23] 黄凯, 王武, 石祖秀, 等. 低盐度水体中饲用磷酸二氢钙对南美白对虾生长的影响[J]. 淡水渔业, 2004, 34(6): 15-18.
- [24] Zhang C X, Mai K S, Ai Q H, et al. Dietary phosphorus requirement of juvenile Japanese seabass, *Lateolabrax japonicus* [J]. Aquaculture, 2006, 255(1/4): 201-209.
- [25] Eya J C, Lovell R T. Available phosphorus requirements of food-size channel catfish (*Ictalurus punctatus*) fed practical diets in ponds [J]. Aquaculture, 1997, 154(3/4): 283-291.
- [26] Skonberg D I, Yogev L, Hardy R W, et al. Metabolic response to dietary phosphorus intake in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Aquaculture, 1997, 157(1): 11-24.
- [27] 陈宇腾, 杨霞, 叶金云, 等. 中华绒螯蟹幼蟹对饲料中磷的需要量 [J]. 湖州师范学院学报, 2014, 36(8): 25-29.
- [28] 李强, 谢玲玲, 林郁葱, 等. 克氏原螯虾对饲料中磷的需求量 [J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(2): 109-115.
- [29] 任泽林, 李爱杰. 饲料中钙磷含量对虾肉、虾壳中钙磷含量的影响 [J]. 中国饲料, 1996(6): 29-30.
- [30] Andrews J W, Murai T, Campbell C. Effects of dietary calcium and phosphorus on growth, food conversion, bone ash and hematocrit levels of catfish [J]. Journal of Nutrition, 1973, 103(5): 766-771.
- [31] Sakamoto S, Yone Y. Effect of dietary calcium/phosphorus ratio upon growth, feed efficiency and blood serum Ca and P level in red sea bream [J]. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 1973, 39(4): 343-348.
- [32] Watanabe T, Murakami A, Takeuchi L, et al. Requirement of chum salmon held in freshwater for dietary phosphorus [J]. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 1980, 46(3): 361-367.
- [33] Shearer K D, Hardy R W. Phosphorus deficiency in rainbow trout fed a diet containing deboned fillet scrap [J]. The Progressive Fish-Culturist, 1987, 49(3): 192-197.
- [34] Cain K D, Garling D L. Pretreatment of soybean meal with phytase for salmonid diets to reduce phosphorus concentrations in hatchery effluents [J]. The Progressive Fish-Culturist, 1995, 57(2): 114-119.
- [35] Ketola H. Mineral nutrition: effects of phosphorus in trout and salmon feeds on water pollution [J]. Journal of Differential Equations, 1986, 179(2): 465-473.
- [36] Bureau D P, Cho C Y. Phosphorus utilization by rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): estimation of dissolved phosphorus waste output [J]. Aquaculture, 1999, 179(1/4): 127-140.
- [37] Penaflorida V D. Interaction between dietary levels of calcium and phosphorus on growth of juvenile shrimp, *Penaeus monodon* [J]. Aquaculture, 1999, 172(3/4): 281-289.
- [38] Davis D A, Arnold C R. Bioavailability of feed grade calcium phosphate incorporated into practical diets for *Penaeus vannamei* [J]. Aquaculture Nutrition, 2015, 4(3): 209-215.
- [39] Davis D A, Lawrence A L, Iii D M G. Mineral requirements of *Penaeus vannamei*: a preliminary examination of the dietary essentiality for thirteen minerals [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 1992, 23(1): 8-14.
- [40] Gallagher M L, Brown W D, Conklin D E, et al. Effects of varying calcium/phosphorus ratios in diets fed to juvenile lobsters (*Homarus americanus*) [J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part A Physiology, 1978, 60(4): 467-471.
- [41] 王秋颖. 碱性磷酸酶特性及其应用的研究进展 [J]. 中国畜牧兽医, 2011, 38(1): 157-161.
- [42] McComb R B, Bowers Jr G N, Posen S. Alkaline phosphatase [M]. New York: Plenum Press, 1979.
- [43] 鲍蕾. pH、盐度和饵料磷对日本沼虾生长的影响 [D]. 保定: 河北大学, 2000.
- [44] Bowser P R, Wooster G A, Aluisio A L, et al. Plasma chemistries of nitrite stressed Atlantic salmon *Salmo salar* [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 1989, 20(4): 173-180.
- [45] Sauer D M, Haider G. Enzyme activities in the plasma of rainbow trout, *Salmo gairdneri* Richardson; the effects of nutritional status and salinity [J]. Journal of Fish Biology, 2010, 14(4): 407-412.
- [46] Johnston C E, Horney B S, Deluca S, et al. Changes in alkaline phosphatase isoenzyme activity in tissues and plasma of Atlantic salmon (*Salmo salar*) before and during smoltification and gonadal maturation [J]. Fish Physiology & Biochemistry, 1994, 12(6): 485-497.
- [47] 冀培丰. 一氧化氮合酶及其相关因子在凡纳滨对虾免疫反应中特性的研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2010.
- [48] 刘凯. 南美白对虾血细胞中酚氧化酶原系统的激活

- [J]. 动物医学进展, 2009, 30(1): 27-32.
- [49] Sung H H, Chang H J, Her C H, et al. Phenoloxidase activity of hemocytes derived from *Penaeus monodon* and *Macrobrachium rosenbergii* [J]. Journal of Invertebrate Pathology, 1998, 71(1): 26-33.
- [50] 侯水清. 鲤鱼日粮中磷、铁、锌、镁的最适添加水平[J]. 武汉轻工大学学报, 1996(1): 7-15.
- [51] 唐琴, 廖全中, 曾洁, 等. 饲料磷含量对黄颡鱼幼鱼生长、生化组成及血清生化指标的影响[J]. 华中农业大学学报, 2011, 30(4): 506-510.
- [52] El-Zibdeh M, Ide K, Yoshimatsu T, et al. Requirement of yellow croaker *Nibea albiflora* for dietary phosphorus[J]. Journal of the Faculty of Agriculture-Kyushu University (Japan), 1995, 40(1/2): 147-155.
- [53] 黄晓聪. 浅色黄姑鱼和双棘黄姑鱼幼鱼饲料中适宜磷水平及钙磷比研究[D]. 汕头: 汕头大学, 2015.

英文标题、作者、单位、摘要、关键词需与中文部分严格对应

Effects of Dietary Calcium and Phosphorus Levels on Growth, Body Composition, Tissue Calcium and Phosphorus Deposition and Serum Biochemical Indices in Pacific White Shrimp *Litopenaeus vannamei*

作者的姓所有字母全部大写, 名只需首字母大写, 名中不加“-”

AN Wenqiang^{1,2}, LI Wenwei¹, TAN Beiping^{1,2}, YANG Qihui^{1,2}, CHI Shuyan^{1,2}, DONG Xiaohui^{1,2}, LIU Hongyu^{1,2}, ZHANG Shuang^{1,2}, YANG Yuanzhi¹, ZHANG Haitao²

(1. Laboratory of Aquatic Animal Nutrition and Feed, College of Fisheries, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Key Laboratory of Aquatic, Livestock and Poultry Feed Science and Technology in South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhanjiang 524000, China)

列城市、邮编、国家

Abstract: Juvenile Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* with initial body weight of (4.2 ± 0.15) g were cultured in a 0.30 m³ glass fiber reinforced plastics barrel and fed diets containing 0%, 0.5% and 1.0% of calcium (Ca) prepared by calcium lactate and containing 0%, 0.4%, 0.8%, 1.2% and 1.6% of phosphorus (P) prepared by sodium dihydrogen phosphate at water temperature of 28—31 °C and a salinity of 21—24 for 8 weeks to investigate the effects of dietary calcium and phosphorus levels on growth, body composition, tissue calcium and phosphorus deposition and serum biochemical indices in Pacific white shrimp. It was found that dietary Ca, and P levels and the interaction of Ca and P levels significantly affected the weight gain, specific growth rate, protein efficiency, feed conversion ratio and survival rate of the shrimp ($P < 0.01$). The contents of crude protein and crude lipid in muscle and crude protein in whole body of shrimp were significantly affected by dietary Ca and P levels ($P < 0.01$). The interaction of dietary Ca and P levels led to significantly affect the contents of crude protein in whole body and crude protein and crude lipid in muscle ($P < 0.01$). Dietary Ca levels significantly affected the contents of Ca and P in whole body and exoskeleton and P in muscle in the shrimp ($P < 0.01$), and significantly affected the content of Ca in muscle ($P < 0.05$). The dietary P levels and interaction of Ca and P levels significantly affected the content of Ca and P in whole body, muscle and exoskeleton in shrimp ($P < 0.01$). There was no significant effect of Ca and P levels and interaction of dietary Ca and P levels on the content of serum calcium ion ($P > 0.05$). The analysis of break-line model revealed that the maximal specific growth rate was observed in the shrimp fed the diet containing 0.5% Ca and 0.88% P under the conditions of this experiment.

Key words: *Litopenaeus vannamei*; calcium; phosphorus; growth performance; body composition; calcium and phosphorus deposition; serum biochemical index

其他注意:

- 1、投稿word文档无需分栏;正文五号字;图及彩图要保证清晰度;灰度图不明晰则建议用彩图;
- 2、文章退回修改时编辑部将作者、单位及首页下方信息删除,是为了盲审需要,文章再审时候请仍保持无个人信息状态。文章录用后,最终修改稿请添加完整以上信息;