



张文平,周磊涛,周秋白,等.饲料有效磷水平对黄鳝幼鳝生长性能、形体指标、体成分及血清生化指标的影响[J].江西农业大学学报,2022,44(5):1239-1249.

ZHANG W P,ZHOU L T,ZHOU Q B,et al.Effects of dietary available phosphorus levels on growth performance,body composition and serum biochemical indexes of juvenile rice field Eel,*Monopterus albus*[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2022,44(5):1239-1249.

饲料有效磷水平对黄鳝幼鳝生长性能、形体指标、体成分及血清生化指标的影响

张文平,周磊涛,周秋白*,安雨琪,胡重华,梁立文,黄广华,霍欢欢

(江西农业大学 动物科学技术学院/特种水产研究所,江西 南昌 330045)

摘要:【目的】旨在确定黄鳝生长发育磷(P)的需求量,为降低磷排放提供参考依据。【方法】以磷酸二氢钙 $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2]$ 为磷源,制备有效磷(AP)水平分别为0.65%、0.83%、1.00%、1.25%、1.46%、1.69%和1.86%的7组等氮等能饲料,用其饲养黄鳝[体质量 (3.17 ± 0.002) g/尾]10周,试验结束后取样,测定其生长性能、形体指标、体成分及血清生化指标。【结果】随着饲料AP水平升高,黄鳝8周的增重率(WGR)、特定生长率(SGR)先升高后下降,在饲料AP水平为1.23%时达到最佳,而黄鳝10周的WGR、SGR先保持稳定后下降,在饲料AP水平为1.22%时达到最佳。当饲料AP水平超过1.69%时,黄鳝的摄食率,肥满度、胴体比显著减小($P<0.05$)。饲料AP水平对黄鳝全鱼水分、粗蛋白、粗脂肪、肝脏粗脂肪均无显著影响($P>0.05$)。随着饲料AP水平升高,黄鳝全鱼磷呈先保持平稳后显著升高的趋势($P<0.05$);肝糖原呈先升高后下降的趋势,在1.46%组达最高值($P<0.05$);脊椎骨灰分呈先升后降趋势,在1.25%组最高,在0.65%组最低($P<0.05$);脊椎骨总磷呈先升高后保持平稳的趋势,1.25%组最高,但各组间无显著差异($P>0.05$);黄鳝的磷沉积率呈下降趋势($P<0.05$),但各组的磷沉积量无显著差异($P>0.05$)且均趋近1 mg/d。当饲料AP水平超过1.25%,血清磷显著下降($P<0.05$)。随着饲料AP水平的升高,血清碱性磷酸酶(AKP)活性、总抗氧化能力(T-AOC)显著下降($P<0.05$),而血清谷草转氨酶(GOT)活性显著升高($P<0.05$)。【结论】以增重率为评价指标,黄鳝幼鳝(3~15 g)的磷需求量为1.23%,以脊椎骨总磷、脊椎骨灰分为评价指标黄鳝幼鳝(3~24 g)骨骼矿化对饲料的磷需求量为1.24%~1.36%。

关键词:黄鳝;生长性能;磷需求量;胴体比;摄食率;碱性磷酸酶

中图分类号:S966.4 文献标志码:A 文章编号:1000-2286(2022)05-1239-11

Effects of Dietary Available Phosphorus Levels on Growth Performance, Body Composition and Serum Biochemical Indexes of Juvenile Rice Field Eel, *Monopterus albus*

ZHANG Wenping, ZHOU Leitao, ZHOU Qiubai*, AN Yuqi, HU Zhonghua,
LIANG Liwen, HUANG Guanghua, HUO Huanhuan

收稿日期:2022-05-18 修回日期:2022-07-20

基金项目:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-46)

Project supported by China Agriculture Research System of MOF and ARA(CARS-46)

作者简介:张文平,orcid.org/0000-0003-3170-3641,1780337466@qq.com;*通信作者:周秋白,教授,博士生导师,主要从事鱼类健康养殖研究,orcid.org/0000-0001-6135-621X,zhouqiubai@163.com。

(College of Animal Science and Technology/Institute of Special Fisheries, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: [Objective] This study aims to determine the phosphorus demand for the growth and development of rice field eel and provide reference for reducing phosphorus emission. [Method] Using monocalcium phosphate as phosphorus source, seven groups of isonitrogenous and isoenergetic feeds with available phosphorus (AP) contents of 0.65%, 0.83%, 1.00%, 1.25%, 1.46%, 1.69% and 1.86% were prepared to feed rice field eel (initial body weight, (3.17 ± 0.002) g) for 10 weeks. After the test, samples were taken to determine growth performance, body indicators, body composition and serum biochemical indicators. [Result] With the increase of dietary AP level, the weight gain rate (WGR) and specific growth (SGR) of rice field eel increased first and then decreased in 8 weeks, reaching the optimal growth performance when the AP level in diet was 1.23%, while the WGR and SGR of rice field eel remained stable first and then decreased in 10 weeks, reaching the best optimal growth performance when the AP level in diet was 1.22%. When the dietary AP level exceeded 1.69%, the feed rate, condition factor and carcass ratio of rice field eel decreased significantly ($P < 0.05$). The dietary AP level had no significant effect on moisture, crude protein, crude lipid and liver crude lipid of rice field eel ($P > 0.05$). With the increase of dietary AP level, the total phosphorus of rice field eel showed a trend of remaining stable at first and then increasing significantly ($P < 0.05$). The liver glycogen increased first and then decreased, and reached the highest in 1.46% group ($P < 0.05$). The vertebrae ash first increased and then decreased, with the highest in the 1.25% group and the lowest in the 0.65% group ($P < 0.05$). The vertebrae phosphorus increased first and then remained stable, with the highest in the 1.25% group, but there was no significant difference among the groups ($P > 0.05$). With the increase of dietary AP level, the phosphorus retention of rice field eel decreased significantly ($P < 0.05$), and there was no significant difference in phosphorus deposit amount among the groups ($P > 0.05$), they all approached 1 mg/(g·ind). When the dietary AP level exceeded 1.25%, the serum phosphorus decreased significantly ($P < 0.05$). With the increase of dietary AP level, the serum alkaline phosphatase (AKP) activity and total antioxidant capacity (T-AOC) decreased significantly ($P < 0.05$), but the activity of serum glutamic oxaloacetic transaminase (GOT) increased significantly ($P < 0.05$). [Conclusion] Adopting the WGR as the evaluation index, the demand of phosphorus for the suitable growth of juvenile rice field eels (3–15 g) is 1.23%. Adopting the vertebrae phosphorus and vertebrae ash as evaluation indexes, the demand of bone mineralization of juvenile rice field eels (3–24 g) for phosphorus in diet is 1.24%–1.36%.

Keywords: *Monopterus albus*; growth performance; phosphorus requirements; carcass ratio; feed rate; alkaline phosphatase

【研究意义】黄鳝 (*Monopterus albus*) 属合鳃目合鳃科黄鳝属, 底栖淡水鱼类, 肉食性, 有昼伏夜出的习性。黄鳝含肉率高^[1], 营养丰富, 味道鲜美, 深受广大消费者的喜爱, 其生长周期短, 经济效益高, 是我国重要的名特优水产动物。磷 (phosphorus, P) 是水产动物必需的矿物元素, 对于维持鱼类正常生长、骨骼矿化至关重要。天然水中磷含量较低, 鱼类从水中吸收磷的能力也有限, 故鱼类必须从饲料中获取大部分的磷^[2]。然而大多数的商品饲料磷含量超过鱼类磷需求量^[3], 造成磷排放增加, 水体易富营养化^[4]。因此, 探究鱼类对饲料的有效磷需求量, 以期能最大限度的保证鱼类健康生长并保护水质。【前人研究进展】目前, 关于鱼类饲料有效磷的研究较多。研究表明, 饲料有效磷水平为 0.60%~0.70%, 鲤鱼 (*Cyprinus carpi*) 能获得最大生长^[5]; 饲料有效磷水平为 0.25%~0.30%, 斑点叉尾鲷 (*Zctalurus punctatus*) 的血清碱性磷酸酶活性与骨断裂强度最高^[6]; 饲料有效磷水平为 0.74%~0.88%, 胭脂鱼 (*Myxocyprinus asiaticus*) 的增重率、全鱼磷含量、脊椎骨磷含量、鳞片磷含量最高^[7]; 饲料有效磷水平为 0.72%~0.89%, 花鲈 (*Lateolabrax japonicus*) 能获得最佳生长及最低肝脏脂肪沉积^[8]; 饲料有效磷水平为 0.80%, 吉富罗非鱼 (GIFT *Oreochromis niloticus*) 的生长、矿物元素沉积及抗氧化能力等均具最佳效果^[9]。因此, 适宜的饲料有效磷水平对于提高鱼类的生长, 降低肝脏脂肪沉积, 促进骨骼发育具有重要作用。研究发现, 大小为 200 g, 300 g, 400 g

的虹鳟磷需求量分别为 0.60%、0.30% 和 0.15%^[10],表明不同生长阶段的鱼类对磷的需求量可能不同。【本研究切入点】关于黄鳝的磷需求量已有报道,何志刚等^[11]研究表明饲料磷水平为 1.10%,能满足 (34.40~68.31 g)黄鳝生长及组织对磷的需求。但关于 30 g 以下幼鳝的磷需求量未见报道。【拟解决的关键问题】旨在通过探究饲料有效磷(available phosphous, AP)水平对黄鳝幼鳝的生长性能、形体指标、体成分及血清生化指标的影响,得出黄鳝幼鳝的磷需求量,为开发绿色健康黄鳝饲料提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计与饲料配制

试验饲料以秘鲁鱼粉为主要蛋白源,磷酸二氢钙[Ca(H₂PO₄)₂]为磷源,Y₂O₃为外源指示剂,配制成等氮等能,不同有效磷水平的 7 种饲料。饲料 AP 水平分别为 0.65%、0.83%、1.00%、1.25%、1.46%、1.69% 和 1.86%。配制饲料所用的鱼粉、磷酸二氢钙等均购自江西大佑农生物科技有限公司。原料均过 80 目,逐级混匀,再加入豆油,掺入约 20% 的水分,混匀,制成膨化饲料。置于阴凉密闭环境中备用。饲料配方见表 1。

表 1 饲料配方及营养成分
Tab.1 ingredients nutritional composition of the experimental diets

原料/% Ingredients	磷水平/% Phosphorus level						
	0.65	0.83	1.00	1.25	1.46	1.69	1.86
鱼粉 Fish meal	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
复合蛋白粉 Compound protein meal ¹⁾	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
豆粕 Soybean meal	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6
玉米蛋白粉 Corn gluten meal	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
小麦粉 Wheatmeal	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0
豆油 Soybean oil	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
微晶纤维素 Microcrystalline cellulose	4.8	4.0	3.2	2.4	1.6	0.8	0.0
预混料 Premix ²⁾	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	0.0	0.8	1.6	2.4	3.2	4.0	4.8
三氧化二钇 Y ₂ O ₃	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
氯化胆碱 Choline chloride	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
大豆卵磷脂 Soya bean lecithin	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
营养成分/(% (干物质基础) Nutrition content (DM basis) ³⁾							
干物质 Dry matter	89.03	89.29	89.5	89.25	89.22	89.14	88.95
粗蛋白质 Crude protein	48.18	48.42	48.31	48.88	48.28	48.21	48.68
粗脂肪 Crude lipid	6.56	6.39	6.34	6.59	6.21	6.23	6.12
总磷 Total phosphorus	1.27	1.45	1.62	1.87	2.08	2.31	2.48
有效磷 Available phosphorus ⁴⁾	0.65	0.83	1.00	1.25	1.46	1.69	1.86

1)复合蛋白粉主要为大豆浓缩蛋白;2)预混料为每千克饲料提供:VA 6 000.0 IU,VD 2 000.0 IU,VE 100.0 mg,VK 5.0 mg,VB₁ 15.0 mg,VB₂ 15.0 mg,烟酸 30.0 mg,VB₆ 10.0 mg,泛酸 25.0 mg,叶酸 0.2 mg,VB₁₂ 0.03 mg,生物素 0.2 mg,VC 100.0 mg,肌醇 100 mg,Zn 40.0 mg,Fe 150.0 mg,Mn 20.0 mg,I 0.4 mg,Co 0.1 mg,Se 0.1 mg,Mg 50.0 mg;3)营养成分为实测值;4)有效磷=饲料总磷-未利用磷。

1)Compound protein powder is mainly soybean protein concentrate;2)The premix provided the following per of diets:VA 6 000.0 IU,VD 2 000.0 IU,VE 100.0 mg,VK 5.0 mg,VB₁ 15.0 mg,VB₂ 15.0 mg,niacin 30.0 mg,VB₆ 10.0 mg,pantothenic acid 25.0 mg,folic acid 0.2 mg,VB₁₂ 0.03 mg,biotin 0.2 mg,VC 100.0 mg,inositol 100 mg,Zn 40.0 mg,Fe 150.0 mg,Mn 20.0 mg,I 0.4 mg,Co 0.1 mg,Se 0.1 mg,Mg 50.0 mg;3)Nutrient content is measured value;4)Available phosphorus=total phosphorus in diet-unused phosphorus.

1.2 养殖试验前准备

试验前 2 周,用漂白粉对养殖塑料箱(规格:88 cm×66 cm×64 cm)消毒,清水清洗后,再放入已消毒的水葫芦,注入曝气自来水。稳定 1 周后,进行黄鳝苗分组。

试验黄鳝苗来自江西农业大学黄鳝繁育养殖基地。挑选体质健壮,无损伤、均重为 $(3.17 \pm 0.002 \text{ g})$ 的人工繁殖黄鳝苗1400尾,随机分成7组,每组4个重复,每个重复放养50尾,分组后第二天则开始投喂试验饲料。

1.3 养殖管理

黄鳝喂料时间为每天17:00—18:00,每次投喂在水葫芦中间且饲料不易分散的位置,少量多次投喂,最后以绝大多数黄鳝不再摄食为准,捞取剩余残饵,称量并记录。养殖过程中,对死亡黄鳝进行称量记录。试验养殖期间,水中水温为 $24 \sim 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$,pH为 $6.5 \sim 7.5$,溶解氧为 $4 \sim 5 \text{ mg/L}$,氨氮为 $0 \sim 0.2 \text{ mg/L}$,亚硝酸盐为 $0 \sim 0.05 \text{ mg/L}$,总磷为 0.03 mg/L ,每3 d换水1次。试验养殖时间为2021年4月19日至2021年6月27日,共70 d。

1.4 样品采集与分析

1.4.1 样品采集 养殖试验开始时在暂养箱中挑选均重为 3.17 g 的黄鳝16尾,作试验初始鱼营养成分分析。养殖10周后,从每箱中挑选均重大小的黄鳝4尾,每组16尾,饥饿24 h后,丁香酚麻醉取样。黄鳝在解剖前称重、测量体长,再以 1 mL 一次性无菌注射器尾静脉采血。每组随机挑选12尾黄鳝置于低温无菌冰盘上分别解剖取胰脏,用于生化指标测定;采集样品经液氮速冻后再放至 $-80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保存。解剖完的黄鳝胴体分装后于 $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保存,用于脊椎骨样品的制备^[11]。剩余4尾黄鳝解剖取其内脏团、胰脏、肠道,分别称量并记录质量,用于形体指标的分析,再分装于 $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存,用于全鱼营养成分分析。

1.4.2 生长性能与形体指标分析 养殖试验开始和结束时将黄鳝饥饿24 h^[12],对各箱黄鳝分别计数与称量,记录黄鳝的初均质量(initial body weight, IBW)与末均质量(final body weight, FBW),计算增重率(weight gain rate, WGR)、特定生长率(specific growth rate, SGR)、成活率(survival rate, SR);记录每天的饲料投喂量,计算饲料系数(feed conversion rate, FCR)与摄食率(feed rate, FR)。肥满度(condition factor, CF)、胴体比(carass ratio, CR)、脏体比(viscerosomatic index, VSI)、肝体比(hepatosomatic index, HSI)、肠体比(intestine somatic index, ISI)等相关计算公式如下:

$$\text{增重率(WGR)} = 100\% \times (W_t - W_0)/W_0 \quad (1)$$

$$\text{特定生长率(SGR)} = 100\% \times (\ln W_t - \ln W_0)/t \quad (2)$$

$$\text{成活率(SR)} = 100\% \times N_t/N_0 \quad (3)$$

$$\text{摄食率(FR)} = 100\% \times F_c/[0.5 \times (W_t + W_0) \times t] \quad (4)$$

$$\text{饲料系数(FCR)} = F_c/(W_t - W_0) \quad (5)$$

$$\text{肥满度(CF)} = 100^2 \times W_d/L^3 \quad (6)$$

$$\text{胴体比(CR)} = 100\% \times W_c/W_d \quad (7)$$

$$\text{脏体比(VSI)} = 100\% \times W_g/W_d \quad (8)$$

$$\text{肝体比(HSI)} = 100\% \times W_l/W_d \quad (9)$$

$$\text{肠体比(ISI)} = 100\% \times W_i/W_d \quad (10)$$

1.4.3 营养成分分析 饲料原料、饲料、全鱼、肝脏、脊椎骨等常规营养成分采用相同方法测定。水分测定采用 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 干燥恒重法(GB/T 6435—2014);粗蛋白质测定采用凯氏定氮法(GB/T 6432—1994);粗脂肪测定采用索氏抽提法(GB/T 6433—2006);粗灰分测定采用 $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 灼烧法(GB/T 6438—2007);总磷测定采用钼黄比色法(GB/T 6437—2002),钙测定采用乙二胺四乙酸二钠结合滴定法(GB/T 6436—2018)。

1.4.4 生化指标测定 采集的血液于 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中静置过夜后,在 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下使用高速冷冻离心机(3H20RI,湖南赫西仪器装备有限公司)以 3500 r/min 离心 15 min 取其上清液,再置于 $-80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存待测。血清磷、钙、碱性磷酸酶、甲状腺激素、维生素 D_3 、降钙素、总抗氧化能力及肝糖原均采用上海酶联生物科技有限公司试剂盒测定。

磷沉积率(phosphorus retention, PR)、日采食量(average daily feed intake, ADFI)及磷沉积量(phosphorus deposit amount, FDA)的计算公式如下:

$$\text{磷沉积率(PR)} = 100\% \times (W_t \times P_t - W_0 \times P_0)/(F_c \times W_p) \quad (11)$$

$$\text{日采食量(ADFI)} = F_c/(t \times N_t) \quad (12)$$

磷沉积量(FDA, mg/(d·ind)) = 1 000 × ADFI × W_p × PR (13)

式中, W_t 、 W_0 分别表示末均质量和初均质量(g); t 表示养殖时间(d); N_t 、 N_0 分别表示终末尾数和初始尾数; F_c 表示摄食量(g); W_d 、 W_c 、 W_g 、 W_l 、 W_i 分别表示样品鱼体、胴体、内脏团、肝胰脏、肠道质量(g); L 表示体长(cm); P_t 、 P_0 分别表示终末鱼体总磷和初始鱼体总磷(%); W_p 表示饲料的总磷含量(%)。

1.5 数据处理与分析

试验结果采用平均值±标准误(Mean±SE)表示,需求量采用回归分析^[13],利用Spss 22.0软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),若组间差异显著,再采用Duncan’s法进行多重比较,显著水平为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 饲料有效磷水平对黄鳢幼鳢生长性能的影响

在养殖8周后,黄鳢的WGR和SGR在1.25%组达到最高,并显著高于0.65%~0.83%组($P<0.05$)。而养殖10周后(黄鳢养殖8周称量后再养殖2周),黄鳢的WGR和SGR在1.25%组虽最高但与0.65%~0.83%组无显著差异($P>0.05$)。养殖8周和10周,饲料AP水平升高至1.46%,黄鳢的WGR和SGR均显著下降($P<0.05$);饲料AP水平升高至1.69%,黄鳢的摄食率均显著下降($P<0.05$);饲料AP水平对黄鳢的饲料系数和成活率无显著影响($P>0.05$),见表2和表3。

表2 饲料有效磷水平对黄鳢生长性能的影响(8周)

Tab.2 Effects of dietary available phosphorus levels on production performance of *M. albus*(8 weeks)

磷水平/% Phosphorus level	初均质量/g IBW	末均质量/g FBW	增重率/% WGR	特定生长率/(%·d ⁻¹) SGR	摄食率/% FR	饲料系数 FCR	成活率/% SR
0.65	3.17±0.00	15.12±0.16 ^{bc}	377.35±4.84 ^{bc}	2.79±0.02 ^{bc}	1.65±0.04 ^a	0.71±0.01	97.50±1.26
0.83	3.17±0.00	14.71±0.10 ^{cd}	364.78±2.94 ^{cd}	2.74±0.01 ^{cd}	1.65±0.01 ^a	0.72±0.01	97.00±1.29
1.00	3.17±0.00	15.42±0.21 ^{ab}	387.51±6.80 ^{ab}	2.83±0.03 ^{ab}	1.67±0.02 ^a	0.72±0.00	99.50±0.50
1.25	3.17±0.00	15.78±0.20 ^a	397.75±6.10 ^a	2.87±0.02 ^a	1.65±0.01 ^a	0.70±0.00	100.00±0.00
1.46	3.17±0.00	14.87±0.25 ^d	369.25±7.11 ^d	2.70±0.02 ^d	1.62±0.02 ^a	0.71±0.01	98.67±0.67
1.69	3.17±0.00	13.92±0.03 ^e	339.45±0.89 ^e	2.64±0.00 ^e	1.53±0.01 ^b	0.73±0.05	98.00±2.00
1.86	3.17±0.00	13.79±0.09 ^e	335.63±2.82 ^e	2.63±0.01 ^e	1.51±0.01 ^b	0.70±0.02	99.00±0.58

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

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 饲料有效磷水平对黄鳢生长性能的影响

Tab.3 Effects of dietary available phosphorus levels on production performance of *M. albus*(10 weeks)

磷水平/% Phosphorus level	初均质量/g IBW	末均质量/g FBW	增重率/% WGR	特定生长率/(%/d) SGR	摄食率/% FR	饲料系数 FCR	成活率/% SR
0.65	3.17±0.00	23.76±0.08 ^a	650.26±3.15 ^a	2.84±0.01 ^a	1.56±0.00 ^a	0.73±0.01	97.50±1.89
0.83	3.17±0.00	23.44±0.06 ^a	640.07±1.60 ^a	2.82±0.00 ^a	1.56±0.02 ^a	0.74±0.01	95.50±1.71
1.00	3.17±0.00	23.83±0.94 ^a	652.50±30.65 ^a	2.84±0.06 ^a	1.56±0.01 ^a	0.74±0.00	97.50±0.96
1.25	3.17±0.00	24.48±0.02 ^a	667.62±4.55 ^a	2.87±0.01 ^a	1.56±0.01 ^a	0.72±0.00	99.00±1.00
1.46	3.17±0.00	22.19±0.16 ^b	601.40±5.25 ^b	2.74±0.01 ^b	1.54±0.03 ^a	0.73±0.01	98.00±1.16
1.69	3.17±0.00	21.40±0.37 ^b	575.32±11.50 ^{bc}	2.69±0.02 ^b	1.46±0.02 ^b	0.74±0.02	98.00±2.00
1.86	3.17±0.00	20.45±0.05 ^c	546.22±1.48 ^c	2.63±0.00 ^c	1.45±0.02 ^b	0.73±0.00	99.00±0.58

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

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 ($P<0.05$).

2.2 饲料有效磷水平对黄鳢幼鳢形体指标的影响

饲料AP水平对黄鳢的CF、CR、VSI、HSI和ISI有显著影响($P<0.05$),见表4。随着饲料AP水平的升高,黄鳢的CF呈先升高后下降的趋势,在1.25%组最高,1.86%组最低;黄鳢的CR呈下降趋势,饲料AP

水平升高至 1.46%,黄鳝的 CR 显著下降($P<0.05$);黄鳝的 VSI、ISI 呈先升高后下降的趋势,在饲料 AP 水平为 1.46% 时达最高值;黄鳝 ISI 在 1.69% 组最高且显著高于 0.65%、1.25% 与 1.46% 组($P<0.05$),其余组间无显著差异($P>0.05$)。

2.3 饲料有效磷水平对黄鳝幼鳝体成分的影响

饲料 AP 水平对黄鳝全鱼水分、粗蛋白质、粗脂肪和肝脏粗脂肪无显著影响($P>0.05$),见表 5。随着饲料 AP 水平的升高,黄鳝的全鱼磷呈先平稳后升高的趋势,饲料 AP 水平为 1.69% 时显著升高($P<0.05$);黄鳝的肝糖原呈先升高后下降的趋势,饲料 AP 水平升高至 1.46% 时显著升高($P<0.05$);黄鳝的脊椎骨粗灰分呈先上升后下降的趋势,在 1.25% 组达最高值;黄鳝的脊椎骨总磷呈先上升后趋于稳定的趋势,在 1.25% 组达最高值。黄鳝的全鱼磷沉积率呈下降趋势($P<0.05$);黄鳝的磷沉积量在各组间无显著差异($P>0.05$)且趋近于 1 mg/d·ind。

表 4 饲料有效磷水平对黄鳝形体指标的影响

Tab.4 Effects of dietary available phosphorus levels on body indexes of *M. albus*

磷水平/% Phosphorus level	肥满度/(g·cm ⁻³) CF	胴体比/% CR	脏体比/% VSI	肝体比/% HSI	肠体比/% ISI
0.65	24.79±0.45 ^{ab}	84.16±0.34 ^a	9.06±0.22 ^b	5.52±0.20 ^b	2.78±0.08 ^b
0.83	25.25±0.32 ^{ab}	82.96±0.46 ^{ab}	9.04±0.19 ^b	5.25±0.21 ^b	3.05±0.09 ^{ab}
1.00	25.40±0.62 ^a	82.84±0.46 ^{ab}	9.43±0.30 ^{ab}	5.72±0.26 ^b	2.97±0.08 ^{ab}
1.25	25.65±0.44 ^a	82.62±0.63 ^{ab}	9.23±0.24 ^{ab}	5.57±0.06 ^b	2.80±0.07 ^b
1.46	25.25±0.38 ^{ab}	82.33±0.70 ^b	10.03±0.39 ^a	6.35±0.25 ^a	2.85±0.12 ^b
1.69	24.20±0.27 ^{ab}	82.19±0.57 ^b	9.65±0.19 ^{ab}	5.79±0.15 ^{ab}	3.18±0.11 ^a
1.86	23.79±0.58 ^b	81.73±0.41 ^b	9.27±0.24 ^{ab}	5.84±0.12 ^{ab}	2.99±0.09 ^{ab}

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

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 5 饲料有效磷水平对黄鳝体成分的影响

Tab.5 Effects of dietary available phosphorus levels on body composition of *M. albus*

项目 Items		磷水平/% Phosphorus level						
		0.65	0.83	1.00	1.25	1.46	1.69	1.86
全鱼 Whole body	水分/%	72.81±0.40	73.30±0.10	73.75±1.45	72.18±0.47	72.87±0.80	73.56±0.07	72.41±0.56
	粗蛋白质/%	17.59±0.22	17.12±0.18	17.11±0.06	17.34±0.09	17.34±0.11	17.09±0.20	17.50±0.10
	粗脂肪/%	5.81±0.05	5.80±0.05	5.72±0.03	5.82±0.09	5.83±0.05	5.73±0.06	5.72±0.03
	灰分/%	2.15±0.01 ^c	2.24±0.00 ^b	2.13±0.01 ^c	2.10±0.01 ^c	2.22±0.01 ^b	2.37±0.02 ^a	2.40±0.05 ^a
	磷/%	0.37±0.00 ^b	0.37±0.01 ^b	0.37±0.00 ^b	0.37±0.00 ^b	0.39±0.00 ^b	0.42±0.01 ^a	0.43±0.01 ^a
肝脏 Liver	粗脂肪/%	1.20±0.02	1.28±0.02	1.20±0.05	1.11±0.03	1.11±0.02	1.10±0.05	1.12±0.10
	肝糖原/ (mg·gprot ⁻¹)	130.39±2.97 ^b	135.32±10.63 ^{ab}	156.09±11.51 ^{ab}	166.04±13.36 ^{ab}	186.16±26.31 ^a	153.89±7.95 ^{ab}	158.90±14.83 ^{ab}
脊椎骨 Vertebra	灰分/%	48.40±0.38 ^b	48.99±0.24 ^{ab}	49.54±0.43 ^{ab}	49.95±0.59 ^a	49.76±0.34 ^{ab}	49.51±0.05 ^{ab}	49.18±0.77 ^{ab}
	磷/%	8.04±0.26	8.17±0.20	8.24±0.10	8.45±0.10	8.41±0.25	8.40±0.06	8.44±0.07
	钙/%	9.32±0.07 ^b	9.47±0.01 ^{ab}	9.62±0.06 ^a	9.65±0.17 ^a	9.67±0.06 ^a	9.44±0.01 ^b	9.40±0.04 ^b
	磷沉积率/%	40.46±0.44 ^a	35.36±1.37 ^b	30.60±0.35 ^c	26.67±0.38 ^d	25.33±0.30 ^{de}	25.35±0.51 ^{de}	24.25±0.58 ^e
	日采食量/ (g/d·ind)	0.21±0.00 ^{ab}	0.20±0.00 ^{ab}	0.21±0.01 ^{ab}	0.22±0.00 ^a	0.20±0.00 ^b	0.18±0.00 ^c	0.18±0.00 ^c
	磷沉积量/ (mg/d·ind)	1.00±0.10	0.97±0.20	0.99±0.30	1.02±0.10	1.00±0.20	1.02±0.20	1.02±0.10

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

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 ($P<0.05$).

2.4 黄鳝幼鳝适宜的饲料有效磷水平

采用折线回归方程拟合 8 周与 10 周 WGR(Y)与饲料 AP 水平(X)的关系,分别得到 $Y=33.681X+354.98$ ($R^2=0.990\ 4$) 和 $Y=-106.25X+526.8$ ($R^2=0.951\ 6$) 与 $Y=27.486X+630.22$ ($R^2=0.769\ 6$) 与 $Y=-189.75X+894.6$ ($R^2=0.951\ 8$),经分析得出黄鳝幼鳝获得最佳增重的饲料 AP 为 1.22%~1.23%(图 1)。采用二次曲线模型^[13]拟合脊椎骨灰分(Y)与饲料 AP 水平(X)的关系,得到 $Y=-2.977\ 1X^2+8.086\ 7X+44.391$ ($R^2=0.982\ 7$),经分析得出饲料 AP 水平为 1.36%,黄鳝幼鳝的脊椎骨灰分最高;采用折线模型^[13]拟合脊椎骨磷(Y)与饲料 AP 水平(X)的关系,得到 $Y=8.43-0.666\ 2(1.24-X)$,经分析得出饲料 AP 水平为 1.24%,黄鳝脊椎骨磷将近饱和(图 2)。

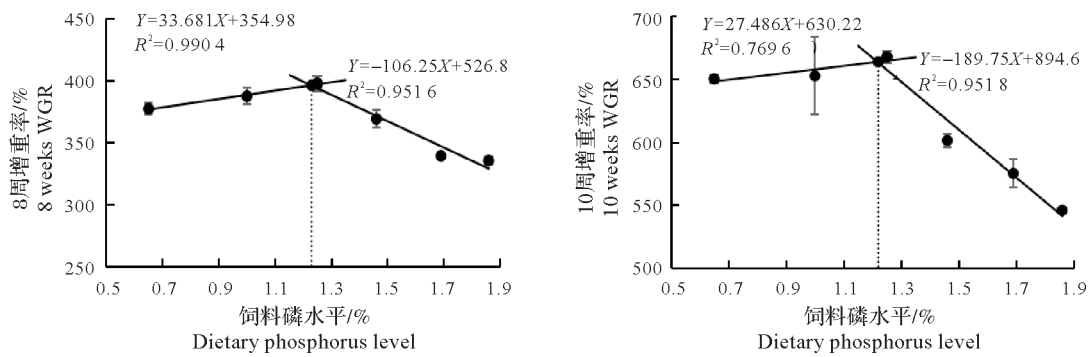


图 1 饲料有效磷水平对黄鳝幼鳝增重率的影响

Fig.1 Effects of dietary available phosphorus levels on weight gain rate of juvenile *M. albus*

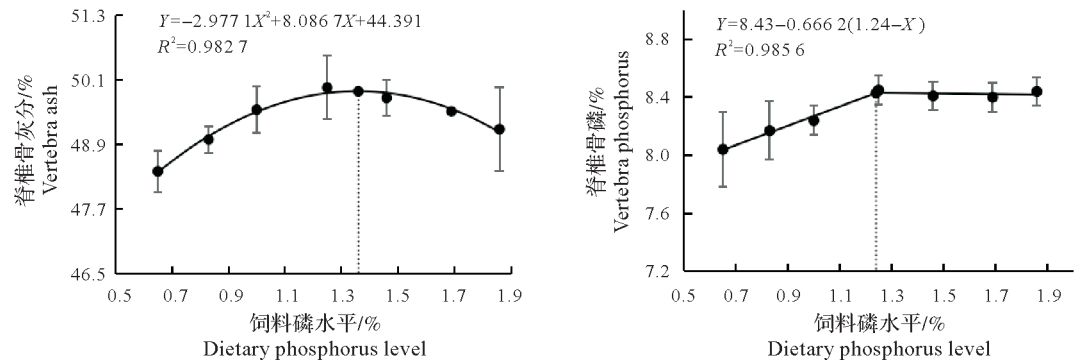


图 2 饲料有效磷水平对黄鳝脊椎骨灰分、脊椎骨磷的影响

Fig.2 Effect of dietary available phosphorus level on vertebra ash and vertebra phosphorus of *M. albus*

2.5 饲料有效磷水平对血清生化指标的影响

饲料 AP 水平对黄鳝的血清磷、AKP、PTH、CT、T-AOC、GOT 有显著影响 ($P<0.05$) (表 6)。随着饲料

表 6 饲料有效磷水平对黄鳝血清生化指标的影响

Tab.6 Effects of dietary available phosphorus levels on serum biochemical indices of *M. albus*

磷水平/% Phosphorus level	血清磷/ (mmol·L ⁻¹) Serum phosphorus	血清钙/ (mmol·L ⁻¹) Serum calcium	碱性磷酸酶/ [U·(100mL) ⁻¹] AKP	甲状旁腺激素/ (pg·mL ⁻¹) PTH	维生素 D ₃ / (ng·mL ⁻¹) VD ₃	降钙素/ (pg·mL ⁻¹) CT	总抗氧化能力/ (mmol·L ⁻¹) T-AOC
0.65	2.62±0.20 ^{ab}	1.41±0.02	2.66±0.47 ^a	126.25±4.09 ^{bc}	36.01±3.60	140.97±4.31 ^b	0.69±0.01 ^a
0.83	2.67±0.27 ^{ab}	1.41±0.02	2.36±0.42 ^{ab}	126.94±6.71 ^{bc}	34.73±1.89	141.57±3.03 ^b	0.67±0.01 ^a
1.00	2.54±0.10 ^{ab}	1.36±0.02	2.07±0.39 ^{ab}	138.08±2.04 ^{ab}	33.07±0.94	142.23±3.38 ^b	0.66±0.01 ^a
1.25	2.81±0.43 ^a	1.39±0.03	1.93±0.16 ^{ab}	114.69±5.46 ^c	31.96±0.72	142.40±3.57 ^b	0.65±0.02 ^{ab}
1.46	2.50±0.19 ^{ab}	1.38±0.03	1.57±0.12 ^b	132.28±4.83 ^{ab}	31.65±1.03	143.33±1.98 ^b	0.61±0.02 ^{bc}
1.69	2.25±0.18 ^{ab}	1.44±0.02	1.58±0.24 ^b	138.61±3.21 ^{ab}	33.08±0.75	148.50±5.23 ^b	0.60±0.01 ^c
1.86	1.99±0.03 ^b	1.40±0.03	1.40±0.18 ^b	144.35±1.96 ^a	35.63±1.43	166.85±3.61 ^a	0.57±0.01 ^c

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

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 ($P<0.05$).

AP水平的升高,黄鳝的血清 AKP活性呈下降趋势,饲料AP水平升高至1.46%时显著下降($P<0.05$);饲料AP水平升高至1.25%,黄鳝的血清磷达最高值,随后呈下降趋势;黄鳝血清PTH与血清磷趋势正好相反,在1.25%组最低,在1.86%组最高;黄鳝血清CT呈先平稳后升高的趋势,饲料AP水平升高至1.86%时显著升高($P<0.05$);黄鳝血清T-AOC呈下降趋势,饲料AP水平升高至1.46%时显著下降($P<0.05$);黄鳝血清GOT呈升高趋势,饲料AP水平升高至1.25%时显著升高($P<0.05$);黄鳝的血清钙、 VD_3 在各组间无显著差异($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 饲料有效磷水平对黄鳝生长性能的影响

在生命体中,磷扮演着重要的角色,它不仅参与动物体骨骼和牙齿的形成,也是细胞中ATP、核酸、多种辅酶、磷脂等的重要组成成分^[13]。研究表明,鱼类摄入磷不足常表现出骨骼畸形、食欲不振、生长缓慢等现象^[5-8],鱼类摄入磷过量对于生长也不利^[8-9]。本试验中,饲料低磷组黄鳝生长较慢,但未出现骨骼畸形、食欲不振的现象,可能与饲料中磷未严重缺乏有关。当饲料磷水平升高至1.25%,黄鳝的WGR和SGR均最佳,而饲料磷水平超过1.25%,黄鳝的WGR和SGR显著下降,表明饲料AP水平过高会对黄鳝的生长不利,可能是饲料高磷组摄食率显著下降,导致黄鳝营养需求不被满足,影响了生长。

以WGR为评价指标,折线回归分析得出适宜黄鳝(3~15 g)生长的磷需求量为1.23%。稍高于34~68 g的黄鳝(1.10%)^[11]及尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*, 1.17%)^[14]的磷需求,但与吉富罗非鱼(0.80%)^[9]、军曹鱼(*Rachycobla*, 0.93%)^[15]、黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*, 0.85%)^[16]、乌鳢(*Channa argus*×*Channa maculata*, 0.94%)^[17]等的磷需求有较大差异。这可能是鱼的大小、种类、养殖方式等的不同造成的差异^[8,15-16]。

Lellis等^[10]研究大小分别为200 g、300 g和400 g的虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)适宜生长的磷需求量分别为0.60%、0.30%和0.15%,表明随个体增大虹鳟对磷需求量减小。研究发现,4 g的花鲈适宜生长的磷需求量为0.72%^[8],而6 g的花鲈适宜生长的磷需求量为0.68%^[18],表明随个体增大花鲈对磷需求量减小。本试验发现,在养殖8周和10周后,0.65%~0.83%组黄鳝的WGR与1.25%组由差异显著转为差异不显著,分析可能是1.25%组的黄鳝在8周后的磷需求量相较之前下降,导致长速减缓。对WGR在8周与10周的折线回归分析发现,黄鳝增重最佳的磷需求分别为1.23%和1.22%,进一步说明黄鳝随个体增大对磷需求量呈下降趋势。

3.2 饲料有效磷水平对黄鳝体成分的影响

饲料AP水平对黄鳝生长性能有影响的同时,对黄鳝体成分和磷沉积也有影响。随着饲料AP水平的升高,黄鳝全鱼磷呈先保持平稳后升高的趋势,这与大黄鱼^[2]、花鲈^[18]、吉富罗非鱼^[9]等全鱼磷呈先升高后平稳趋势的研究结果有较大差异。分析饲料低磷组磷水平可能未严重不足,导致饲料低磷组与适宜磷组出现相同的趋势。研究表明,骨骼、鳞片和其它组织有能力缓冲磷供应的变化^[18],花鲈肝脏磷含量随饲料磷水平升高而显著升高^[8],而本试验中黄鳝脊椎骨磷在饲料高磷组保持平稳趋势。因此,饲料高磷组黄鳝全鱼磷显著升高,可能是磷在肌肉或肝脏等组织的沉积升高导致的。然而关于磷在肌肉或肝脏组织中沉积增加有何影响,还未见报道有待进一步研究。

在鱼类营养研究中,全鱼磷、脊椎骨灰分、脊椎骨总磷是探究适宜磷需求量的常用指标^[19]。由于在黄鳝全鱼磷趋势中不能得出适宜磷需求量,因此以脊椎骨灰分、脊椎骨总磷为评价指标得出适宜黄鳝骨骼矿化的磷需求量为1.24%~1.36%,这高于以WGR为评价指标得出的磷需求量(1.23%)。研究表明,基于身体组织中磷积累的需求往往高于基于生长速率的需求^[10-21],这也说明磷在黄鳝组织中不必达到最大沉积就能获得最大增重。

本试验中,随着饲料AP水平的升高,黄鳝的磷沉积率呈下降趋势,在哲罗鲑等^[22]的研究中有类似的磷沉积率结果。0.65%组的黄鳝的磷沉积率最高,但0.65%组的WGR低于1.25%组,因此本试验中磷沉积率结果不适宜作为探究黄鳝磷需求的评价指标。但通过磷沉积率计算黄鳝的磷沉积量可知,各组磷沉积量趋近于1 mg/d·ind,说明黄鳝每天每尾至少需要1 mg磷。

3.3 饲料有效磷水平对黄鳝血清生化指标的影响

血清中的钙磷含量能反映机体对钙磷的吸收和利用情况,也能被用来判断饲料磷对鱼类的有效性^[23-24]。本试验研究发现,饲料低磷对血清磷无显著影响,但饲料高磷会降低血清磷含量,表明饲料高磷可能引起机体内的磷代谢紊乱,减少了血磷的可利用性。PTH能促进溶骨,提高血钙,同时抑制肾脏对磷酸盐的重吸收,降低血磷^[25]。本试验中,血清PTH的结果与血清磷的结果正好相反,饲料高磷组血清PTH逐渐升高,而血清磷逐渐降低,表明PTH参与了血磷代谢的过程,进一步说明饲料高磷会引起磷代谢紊乱,对于鱼类的生长可能不利。

饲料高磷组血清PTH升高,血清钙应该升高,但本试验发现,饲料AP水平对血清钙无显著影响。这与尼罗罗非鱼^[14]、黄颡鱼^[16]等血清钙的结果相同。CT能抑制溶骨作用及肾脏对钙的重吸收,降低血钙^[26]。本试验中,饲料高磷组血清CT逐渐升高,分析可能CT的升高抑制了血清钙的增长,因此表现出组间血清钙无差异。

血清AKP是一组同工酶,主要来源于骨骼、肝脏、胎盘和小肠等,其中大部分来源于骨骼,骨骼释放的碱性磷酸酶与成骨作用有关^[27]。本试验研究发现,饲料低磷与适宜磷对血清AKP无显著影响,但饲料高磷会显著降低血清AKP的活性,表明饲料高磷可能影响黄鳝的骨骼发育。钙、磷参与了动物体骨骼的形成,本试验,饲料高磷组脊椎骨磷保持平稳,而脊椎骨钙出现显著下降,这表明饲料高磷对骨骼成分产生影响,进一步说明饲料高磷降低血清AKP的活性,会减弱骨骼矿化。

GOT常作为评价肝功能是否正常的评价指标,血清GOT升高表明肝细胞受损^[28]。本试验研究发现,饲料低磷对血清GOT无显著影响,而饲料高磷会显著升高血清GOT的活性,在花鲈^[8]中也有相同的结果。表明饲料高磷水平可能会引起黄鳝肝脏损伤。

3.4 饲料有效磷水平对黄鳝形体指标的影响

肥满度又称丰满系数,广泛被鱼类学家和渔业工作者用以表示鱼类生长状况和质量优劣的指标^[29]。本试验,饲料低磷和适宜磷对黄鳝肥满度无显著影响,但饲料高磷会显著降低肥满度。这与吉富罗非鱼^[9,30]的肥满度结果相同。分析可能是饲料高磷组黄鳝生长较差,导致体长和体质量减小,肥满度降低。

本试验研究发现,饲料低磷和适宜磷对黄鳝的VSI和HSI无显著影响,但饲料高磷会使其显著升高。Karanth等^[31]指出脏体比和肝体比升高可能是肝脏脂肪和糖原蓄积所致。本试验,饲料高磷组黄鳝肝脏粗脂肪低于其它组,说明饲料高磷组黄鳝肝脏脂肪没有蓄积。在测定肝糖原后发现,当饲料AP水平在0.65%~1.46%时,黄鳝肝糖原含量呈升高趋势,当饲料AP水平超过1.46%,黄鳝肝糖原含量下降,这与VSI和HSI的趋势一致,表明VSI和HSI显著升高与肝糖原蓄积有关。肝糖原蓄积可作为鱼类饥饿、产卵等时期的能量储备,但蓄积量过高也会加重肝脏糖代谢的负担^[32]。再结合本试验GOT的结果,分析饲料高磷组肝糖原蓄积可能对肝脏产生负面影响。

在鱼体中,胴体尤其是肌肉构成人们取食的主要部分。本试验中,饲料低磷和适宜磷对黄鳝胴体比无显著影响,而饲料高磷会显著减小胴体比,可能与饲料高磷组黄鳝的生长较差有关。而结合前面的分析发现,可能是饲料高磷会减少黄鳝的摄食量,促进肝糖原积累,升高血清GOT活性,引起肝脏损伤,降低血清AKP活性,减弱骨骼矿化,使得黄鳝生长较差,导致饲料高磷组黄鳝的胴体比降低。本试验还发现,血清T-AOC的变化趋势与胴体比一致。研究表明,饲料高磷会降低草鱼(*Carps*)肌肉的超氧化物歧化酶和过氧化氢酶的活性,减弱肌肉抗氧化能力,促使肌肉蛋白质和脂质氧化^[33],因此黄鳝抗氧化能力的减弱可能也是造成胴体比下降的原因。综上所述,饲料低磷和适宜磷对黄鳝胴体比无显著影响,饲料高磷会降低黄鳝的胴体比,而胴体比的减少很可能会影响人们对于黄鳝的选择,这对于黄鳝产业的发展是不利的。

4 结 论

饲料适宜磷水平对于维持黄鳝正常生长、骨骼矿化至关重要。饲料高磷会减少黄鳝的摄食量,降低肥满度,促进肝糖原的积累,升高血清GOT活性,引起肝脏损伤,降低血清AKP活性与抗氧化能力,减弱骨骼矿化,使黄鳝胴体比降低。黄鳝对磷需求量随着个体发育呈下降趋势。黄鳝每天每尾至少需要1 mg磷。本研究表明,以增重率为评价指标幼鳝(3~15 g)适宜生长对饲料的磷需求量为1.23%,以脊椎骨总磷、脊椎骨灰分为评价指标幼鳝(3~24 g)骨骼矿化对饲料的磷需求量为1.24%~1.36%。

参考文献 Reference:

- [1] 周秋白,李有根,陈云香,等.黄鳝含肉率及肌肉营养成分分析[J].淡水渔业,2000(11):41-43.
ZHOU Q B,LI Y G,CHEN Y X,et al.Analysis of meat content and muscle nutrient composition of rice field eel[J].Freshwater fisheries,2000(11):41-43.
- [2] MAI K,ZHANG C,AI Q,et al.Dietary phosphorus requirement of large yellow croaker,*Pseudosciaena crocea* R[J].Aquaculture,2006,251(2/3/4):346-353.
- [3] RODEHUTSCORD M,PFEFFER E.Requirement for phosphorus in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) growing from 50 to 200 g[J].Water science and technology,1995,31(10):137-141.
- [4] AUER M T,KIESER M S,CANALE R P.Identification of critical nutrient levels through field verification of models for phosphorus and phytoplankton growth[J].Canadian journal of fisheries and aquatic sciences,1986,43(2):379-388.
- [5] OGINO C,TAKEDA H.Mineral requirements in fish-III calcium and phosphorus requirements in carp[J].Bulletin of the Japanese society of scientific fisherie,1976,42(7):793-799.
- [6] 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):283-291.
- [7] YUAN Y C,YANG H J,GONG S Y,et al.Dietary phosphorus requirement of juvenile Chinese sucker, *Myxocyprinus asiaticus* [J].Aquaculture nutrition,2011,17(2):159-169.
- [8] 张树威.饲料磷水平对淡水养殖花鲈生长、体组成及脂代谢的影响[D].厦门:集美大学,2018.
ZHANG S W.Effects of dietary phosphorus levels on growth, body composition and lipid metabolism of *Lateolabrax japonicus* reared in freshwater[D].Xiamen:Jimei University,2018.
- [9] 白富瑾,罗莉,陈任孝,等.饲料中有效磷对吉富罗非鱼生长、体组成及生化指标的影响[J].水产学报,2015,39(7):1024-1033.
BAI F J,LUO L,CHEN R X,et al.Effects of dietary available phosphorus on growth, body composition and biochemical indices of GIFT tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J].Journal of fisheries of China,2015,39(7):1024-1033.
- [10] LELLIS W A,BARROWS F T,HARDY R W.Effects of phase-feeding dietary phosphorus on survival, growth, and processing characteristics of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* [J].Aquaculture,2004,242(1/2/3/4):607-616.
- [11] 何志刚,胡毅,于海罗,等.饲料中不同磷水平对黄鳝生长、体成分及部分生理生化指标的影响[J].水产学报,2014,38(10):1770-1777.
HE Z G,HU Y,YU H L,et al.Influence of dietary phosphorus levels on growth performance, body composition and biochemical indices of juvenile rice field eel (*Monopterus albus*) [J].Journal of fisheries of China,2014,38(10):1770-1777.
- [12] 王颖,刘瑜,高淼,等.饲料铜水平对黄鳝肝脏生化指标及肝脏、肠道组织结构的影响[J].江西农业大学学报,2020,42(6):1204-1212.
WANG Y,LIU Y,GAO M,et al.Effects of dietary copper level on the liver biochemical indexes, and intestinal and liver histological structure of swamp eel (*Monopterus albus*) [J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2020,42(6):1204-1212.
- [13] 麦康森.水产动物营养与饲料学[M].2版.北京:中国农业出版社,2011:184-186.
MAI K S.Nutrition and feed science of aquatic animals[M].2nd ed.Beijing:China Agriculture Press,2011:184-186.
- [14] 刘洋,尹向辉,阴明杰.饲料中不同磷水平对尼罗罗非鱼生长性能、体组成及血液钙、磷代谢的影响[J].中国饲料,2018(6):82-87.
LIU Y,YIN X H,YIN M G.The influence of different levels of phosphorus on growth performance, body composition, calcium and phosphorus metabolism of Nile tilapia[J].China feed,2018(6):82-87.
- [15] 杨原志,刘仙钦,董晓慧,等.饲料磷水平对军曹鱼幼鱼生长、体成分以及生化指标的影响[J].广东饲料,2016,25(8):24-28.
YANG Y Z,LIU X Q,DONG X H,et al.Effects of dietary phosphorus level on growth, body composition and biochemical indices of juvenile cobia (*Rachycobia*) [J].Guangdong feed,2016,25(8):24-28.
- [16] 丛林梅,郑伟,刘凡宁,等.饲料磷含量对黄颡鱼生长和磷代谢的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(11):15-22.
CONG L M,ZHENG W,LIU F N,et al.Effects of dietary phosphorus content on growth and phosphorus metabolism of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J].Journal of northwest A&F university(natural science edition),2016,44(11):15-22.

- [17] SHEN H M, CHEN X R, CHEN W Y, et al. Influence of dietary phosphorus levels on growth, body composition, metabolic response and antioxidant capacity of juvenile snakehead (*Channa argus* × *Channa maculata*) [J]. Aquaculture nutrition, 2017, 23(4): 662-670.
- [18] ZHANG C, MAI K, AI Q, et al. Dietary phosphorus requirement of juvenile Japanese seabass, *Lateolabrax japonicus* [J]. Aquaculture, 2006, 255(1/2/3/4): 201-209.
- [19] FJELLDAL P G, HANSEN T, ALBREKTSEN S. Inadequate phosphorus nutrition in juvenile Atlantic salmon has a negative effect on long-term bone health [J]. Aquaculture, 2012, 334: 117-123.
- [20] VIELMA J, KOSKELA J, RUOHONEN K. Growth, bone mineralization, and heat and low oxygen tolerance in European whitefish (*Coregonus lavaretus* L.) fed with graded levels of phosphorus [J]. Aquaculture, 2002, 212(1/2/3/4): 321-333.
- [21] KETOLA H G, RICHMOND M E. Requirement of rainbow trout for dietary phosphorus and its relationship to the amount discharged in hatchery effluents [J]. Transactions of the American fisheries society, 1994, 123(4): 587-594.
- [22] WANG C, LI J, WANG L, et al. Effects of dietary phosphorus on growth, body composition and immunity of young taimen *Hucho taimen* (Pallas, 1773) [J]. Aquaculture research, 2017, 48(6): 3066-3079.
- [23] JIN J, CHU Z, CHEN X, et al. Responses of hybrid sturgeon (*Huso dauricus* ♀ × *Acipenser schrenckii* ♂) to oral administration of phosphorus [J]. Aquaculture research, 2020, 51(4): 1428-1436.
- [24] 陈翠英, 潘庆. 磷缺乏影响鱼类脂质代谢及抗病性的研究进展 [J]. 饲料与畜牧, 2012(12): 48-50.
CHEN C Y, PAN Q. Research progress on effects of phosphorus deficiency on lipid metabolism and disease resistance of fish [J]. Feed and husbandry, 2012(12): 48-50.
- [25] GUERREIRO P M, RENFRO J L, POWER D M, et al. The parathyroid hormone family of peptides: structure, tissue distribution, regulation, and potential functional roles in calcium and phosphate balance in fish [J]. American journal of physiology regulatory, integrative and comparative physiology, 2007, 292(2): 679-696.
- [26] 吉中力. 淡水环境中饲料不同的钙和磷水平对花鲈 (*Lateolabrax japonicus*) 钙磷吸收和沉积的影响 [D]. 厦门: 集美大学, 2017.
JI Z L. The effects of dietary calcium and phosphorus levels on the absorption and deposition of calcium and phosphorus of *Lateolabrax japonicus* reared in freshwater [D]. Xiamen: Jimei University, 2017.
- [27] 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.
WANG Q Y. Advances on characteristic and application of alkaline phosphatase [J]. China animal husbandry and veterinary medicine, 2011, 38(1): 157-161.
- [28] 陈晨, 黄峰, 舒秋艳, 等. 共轭亚油酸对草鱼生长、肌肉成分、谷草转氨酶及谷丙转氨酶活性的影响 [J]. 水生生物学报, 2010, 24(3): 647-651.
CHEN C, HUANG F, SHU Q Y, et al. Effects of dietary conjugated linoleic acids on growth performance, muscle composition, AST and ALT activities in serum in juveniles grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) [J]. Acta hydrobiologia Sinica, 2010, 24(3): 647-651.
- [29] 杨东方, 苗振清. 数学模型在生态学的应用及研究 [M]. 北京: 海洋出版社, 2010, 65-66.
YANG D F, MIAO Z Q. Application and research of mathematical model in ecology [M]. Beijing: China Ocean Press, 2010, 65-66.
- [30] 蒋明, 姚鹰飞, 文华, 等. 吉富罗非鱼成鱼对饲料中有效磷的需要量 [J]. 水产学报, 2013, 37(11): 1725-1732.
JIANG M, YAO Y F, WEN H, et al. Dietary available phosphorus requirement of adult GIFT strain of *Oreochromis niloticus* reared in freshwater [J]. Journal of fisheries of China, 2013, 37(11): 1725-1732.
- [31] KARANTH S, SHARMA P, PAL A K, et al. Effect of different vegetable oils on growth and fatty acid profile of rohu (*Labeo rohita*, Hamilton); Evaluation of a return fish oil diet to restore human cardio-protective fatty acids [J]. Asian-Australasian journal of animal sciences, 2009, 22(4): 565-575.
- [32] 党江雨, 高攀为, 徐祺, 等. 亚东鲑幼鱼饲料中适宜淀粉种类与水平的研究 [J]. 水生生物学报, 2022, 46(1): 69-78.
DANG J Y, GAO B W, XU Z, et al. The suitable starch types and levels in the diet of brown trout (*Salmo trutta*) juveniles [J]. Acta hydrobiologia Sinica, 2022, 46(1): 69-78.
- [33] 张大军, 王世联. 磷对草鱼生长性能及肌肉抗氧化特性的影响 [J]. 中国饲料, 2020(12): 60-64.
ZHANG D J, WANG S L. Effect of phosphorus level on growth performance and antioxidant property of muscle of grass carp [J]. China feed, 2020(12): 60-64.