

借助新标记批量测定群养大黄鱼个体的饲料效率

潘育军^{1,2}, 傅苒馨^{1,2}, 王公嗣^{1,2}, 张森^{1,2}, 朱星丞^{1,2},

李晓彤^{1,2}, 艾庆辉³, 张立宁⁴, 任鹏⁴, 王志勇^{1,2}

(1. 集美大学水产学院, 福建 厦门 361021; 2. 农业农村部东海海水健康养殖重点实验室, 福建 厦门 361021;
3. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003; 4. 浙江省海洋水产养殖研究所, 浙江 温州 325005)

[摘要] 设计制作一种新型体表标签, 标记了770尾18月龄大黄鱼, 在室内进行28 d以植物蛋白源为主的无鱼粉配合饲料饲养实验, 借助视频记录观察摄食情况, 获得了210尾大黄鱼的完整摄食量和饲料效率测定数据。结果显示, 大黄鱼个体间的摄食情况和饲料效率都差异巨大。实验期间有的个体摄食活跃, 最高摄食饲料量达到409颗 (颗粒均重0.2627 g), 增重显著, 增重率达43.77%; 有的个体则很少摄食、甚至完全没有摄食, 体重出现负生长, 减重最多的达30.3%; 有的个体在初始体重、摄食量均相近的情况下, 饲料效率、增重率以及特定生长率却存在极显著差异 ($P < 0.01$), 在体重正增长的个体中, 饲料效率最高的达0.827 (饲料系数1.21), 最低的只有0.008 (饲料系数128.73)。这些结果提示大黄鱼对无鱼粉饲料的适应性与饲料效率都有很大的遗传改良潜力。

[关键词] 新标记; 大黄鱼; 无鱼粉配合饲料; 个体摄食量; 饲料效率; 适应性差异

[中图分类号] S 961

Measuring of Feed Intake and Feed Efficiency of Large Yellow Croaker of Individuals by Means of a New Labeling Method Under Groupculture Conditions

PAN Yujun^{1,2}, FU Ranxin^{1,2}, WANG Gongsi^{1,2}, ZHANG Sen^{1,2}, ZHU Xingcheng^{1,2},

LI Xiaotong^{1,2}, AI Qinghui³, ZHANG Lining⁴, REN Peng⁴, WANG Zhiyong^{1,2}

(1. Fisheries College, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Key Laboratory of Healthy Mariculture for the East China Sea, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xiamen 361021, China; 3. Fisheries College of Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 4. Zhejiang Marine Fisheries Research Institute, Wenzhou 325005, China)

Abstract: In this study, a new type of surface labels was designed and used to mark 770 large yellow croakers at the age of 18 months for keeping track of feed intake. A 28-day indoor feeding experiment was conducted using a plant protein source based fishmeal free formula feed. The feeding behavior was observed and recorded using video, while complete feed intake (FI) and feed efficiency (FE) data were obtained for 210 large yellow croakers. The results showed that there were huge differences in FI and FE among individuals of

[收稿日期] 2023-06-13

[基金项目] 国家自然科学基金重点项目“大黄鱼适应无鱼粉饲料的遗传基础解析”(32130110); 国家海水鱼产业技术体系“大黄鱼种质资源的品种改良”(CARS-47-G04); 温州市农业新品种选育协作组项目“水产特色鱼虾优良农业新品种选育”(2019ZX002)

[作者简介] 通信作者: 王志勇 (1963—), 博士, 教授, 博导, 从事水产生物遗传育种与生物技术方向研究。
E-mail: zywang@jmu.edu.cn

large yellow croakers. During the experiment, some individuals were active in feeding, with the highest FI reaching 409 pellets (each pellet weighing 0.2627 g); and these individuals showed significant weight gain, with the highest weight gain rate of 43.77%. On the other hand, some individuals rarely or even did not feed at all, resulting in negative growth with a maximum weight loss of 30.3%. Even among individuals with similar initial body weight and FI, there were extremely significant differences in FE, weight gain rate (WGR), and specific growth rate (SGR) ($P < 0.01$). Among the individuals with positive weight gain, the highest FE was 0.827 (feed conversion ratio (FCR) of 1.21), while the lowest was only 0.008 (FCR of 128.73). It is suggested that large yellow croaker has great potential for genetic improvement in both adaptation to fishmeal-free feeds and feed efficiency.

Keywords: new label; *Larmichthys crocea*; fishmeal-free feed; individual feed intake; feed efficiency; adaptive differences

0 引言

大黄鱼 (*Larmichthys crocea*) 是我国养殖量最大的肉食性海水鱼类, 2021 年大黄鱼国内养殖产量达 25.42 万 t。如果完全使用天然饲料, 每年需要冰鲜杂鱼 185 万 t 左右^[1]; 如果完全使用鱼粉蛋白配合饲料, 每年需要 20 万 t 以上鱼粉。因此, 国内研究者就非鱼粉蛋白源替代鱼粉制作大黄鱼配合饲料开展了许多研究^[2-7], 而无鱼粉饲料也有研制与应用的报道^[8-9]。然而, 使用鱼粉替代的配合饲料投喂大黄鱼存在一些问题。如孙广文等^[10]分别以大豆浓缩蛋白和玉米蛋白粉替代 5% 和 10% 的鱼粉配合饲料投喂大黄鱼幼鱼 10 周, 发现替代 10% 鱼粉处理组的存活率、终末体重和特定生长率均显著低于正常鱼粉含量组 ($P < 0.05$), 玉米蛋白粉替代 5% 及替代 10% 鱼粉处理组的饲料系数 (feed conversion ratio, FCR) 显著高于正常鱼粉含量组 ($P < 0.05$)。在其他肉食性鱼类的鱼粉替代研究中也存在类似的问题, 包括生长速率减慢^[11-13]、饲料系数升高^[14]、蛋白质利用率降低^[15]和产生肠炎^[16]等。这对无鱼粉饲料的应用是个挑战。

饲料效率 (feed efficiency, FE) 是动物养殖生产中的一个极其重要的参数。与饲料效率较低的个体相比, 饲料效率较高的个体摄食较少的饲料就能达到类似的生长速度^[17]。饲料占大黄鱼养殖总成本的 50% 甚至 70% 以上, 因此开展大黄鱼饲料效率性状的遗传改良意义甚大, 而对饲料效率的测定是遗传改良的基础。刘灵婕等^[9]对不同体重的大黄鱼鱼苗进行分组实验, 经无鱼粉无鱼油饲料喂养 63 ~ 71 d 后, 各组存活个体的生长差异非常明显, 差异最大的达到 4.67 倍, 最小的也有 2.28 倍, 说明大黄鱼不同个体对无鱼粉无鱼油饲料的适应性差异很大, 但由于鱼苗太小无法进行个体标记, 未能测定个体的饲料效率。有研究表明^[18-19], 鱼类之间的社会相互作用可能会改变饲料效率, 这可能导致单独饲养和群体饲养时获得的测量结果存在巨大差异。但鱼类生活于水中, 在群体饲养条件下测定其个体摄食量比较困难。已经有几种方法和技术来测量群体饲养的鱼个体摄食量^[20], 最简单的方法是解剖获得每条鱼的胃内容物^[21], 但这种方法只能用于单次摄入量的评价。Grima 等^[22]和 Scholtens 等^[23]分别通过在饲料颗粒中加入 X 光致密标记物, 再用 X 光照射鱼体, 从而得到每个个体的摄食量, 但这可能会改变鱼体的摄食行为和摄食量。还有一种方法是直接观察或视频记录个体的日采食量^[24], De Verdal 等^[25]将两种不同颜色的 T-bar 标签注射在尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 背鳍附近的肌肉上以达到区分鱼个体的目的, 再通过录像记录个体的日采食量, 但由于颜色组合有限, 实验鱼群体规模限制在 10 ~ 20 尾。这在大规模的生产实践中不太适用, 需要更精确和更易处理的方法来帮助测量群体饲养条件下个体的摄食量。

本研究设计制作了一种新型体表标签, 用新标签标记 770 尾 18 月龄大黄鱼, 在室内进行 28 d 全植物蛋白源配合饲料饲养实验, 并借助视频记录观察摄食情况, 尝试为在群养条件下批量测定鱼类个体摄食量与饲料效率提供参考方法, 为开展适应并高效利用全植物蛋白源配合饲料大黄鱼的基因组选

择育种提供数据基础。

1 材料和方法

1.1 饲料制备

以发酵豆粕、高筋面粉、玉米蛋白粉、花生饼作为配方中的主要蛋白质源, 以鱼油 (精炼)、大豆磷脂油作为配方中的主要脂肪源设计饲料配方, 其组成及营养水平见表 1, 饲料由福州市珊瑚饲料有限公司生产。饲料最终制成直径约 8 mm, 长度约 4 mm 的短棒状硬颗粒膨化饲料。使用前经过 2 目筛绢网结合肉眼观察筛选, 去除加工与运输过程中损坏的颗粒, 使最终投用的颗粒大小尽可能均匀一致。筛选后随机取样 200 粒, 用精密天平称重, 均重为 0.2627 g, 变异系数 (C. V.) 为 0.054。投喂前用适量淡水喷洒使之湿润, 以避免实验鱼摄入太硬的饲料颗粒诱发肠炎。

表 1 本研究使用的全植物蛋白源饲料组成及营养水平 (干物质基础)

Tab. 1 Composition and nutrient level of pure plant protein source feed used in this study (dry matter basis)

组分	含量 /%	组分	含量 /%	组分	含量 /%
酶解羽毛粉	5.00	鱼油 (精炼)	8.00	维生素预混合饲料	1.00
花生饼	9.00	氯化胆碱 (60%)	0.20	微量元素预混合饲料	1.00
玉米蛋白粉	15.00	大豆磷脂油	3.00	诱食剂	0.10
鱼溶浆	4.00	赖氨酸	0.30	高筋面粉	15.85
发酵豆粕	35.00	蛋氨酸	0.55	磷酸二氢钙	2.00
水分	9.55	粗蛋白	40.00	粗脂肪	11.93

1.2 实验鱼及其管理

养殖实验于 2022 年 7—8 月在浙江省海洋水产养殖研究所洞头基地进行, 实验鱼为 18 月龄大黄鱼。大黄鱼从海区网箱运回基地, 在水泥池驯养 7 d 后, 挑选体型正常、健康无伤的 770 尾作为实验用鱼, 体重范围为 150 ~ 300 g, 均重 (207.54 ± 34.39) g, 平均体长 (24.35 ± 1.54) cm。将实验鱼全部养殖于 1 口 51.2 m^3 ($8\text{ m} \times 4\text{ m} \times 1.6\text{ m}$) 的长方形水泥池, 每天换水一次, 换水量为 100%, 同时清洗池壁并池底吸污 1 次, 24 h 不间断充气给氧, 使水体保持充足的溶氧, 整个实验期间水温 $28.6 \sim 31.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 海水盐度 28 ~ 30。

1.3 鱼个体标记方法

如图 1 所示, 在红色、蓝色、橙色的椭圆形 PVC 塑料片 (厚度约 0.2 mm, 直径约 15 mm) 上印由阿拉伯数字 (0 ~ 9) 组成的数字标签, 为了便于区分, 用英文字母 I、F、K 代替数字 1、2、9, 同时使用两头宽、中间细的工字形粗胶针 (长度约 30 ~ 40 mm) 作为固定标签的材料。

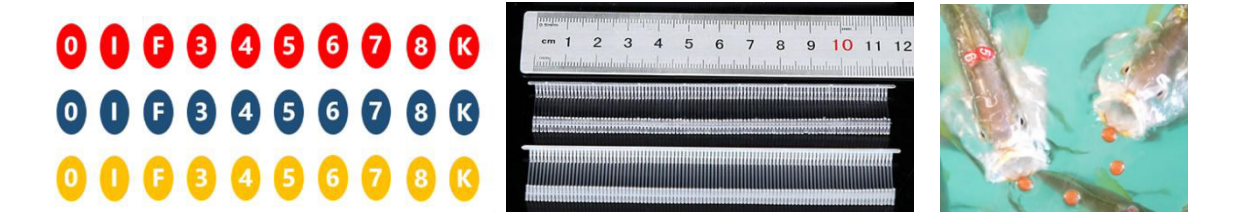


图 1 本研究使用的固定在鱼体表椭圆形数字塑料标签、工字形胶针和固定到鱼体的状态

Fig. 1 The oval plastic labels and 工-shaped plastic tag-pin used in this study and the state fixed to the fish

大黄鱼用丁香酚麻醉后, 先称量初始体重 (W_0) 和测量体长 (L_0), 再用 Avery Dennison Mark III 型手枪握把和工字形粗胶针把 2 个数字塑料标签分别固定在大黄鱼靠近背鳍的两侧背部肌肉中, 这样

就得到 3 种颜色、10 个数字/字母及左右两个方位的组合，一共有 900 种组合，每种组合可记为一个 4 位数（见表 2）。水泥池中 770 尾大黄鱼分别使用了不同的颜色数字组合，这样每尾鱼都可以单独识别。注射标签时，在标签的胶针上涂抹红霉素软膏以防止伤口感染。

表 2 本研究中使用的鱼体标记系统编号(示例)

Tab. 2 Fish body marking system number used in this study (example)

序号	标签	鱼体编号	序号	标签	鱼体编号
1	左:蓝 0;右:蓝 I	0001	6	左:红 6;右:橙 5	1625
2	左:蓝 0;右:红 F	0012	7	左:橙 8;右:蓝 6	2806
3	左:蓝 0;右:橙 3	0023	8	左:橙 5;右:红 7	2517
4	左:红 I;右:蓝 0	1100	9	左:橙 K;右:橙 K	2929
5	左:红 F;右:红 4	1214	10	左:橙 6;右:红 F	2612

说明:4 位数中,左起第 1 位与第 3 位分别代表左边与右边(鱼尾朝着观察者)标签颜色,蓝、红、橙 3 种颜色分别记为 0、1、2;左起第 2 位与第 4 位分别是左边与右边标签上的数字。

1.4 个体摄食量的测定与饲料效率的计算

根据 Wang 等^[26]的研究,饥饿处理 1 周后再摄食对罗非鱼个体体重、氮保留效率和体成分无显著影响。由于实验鱼主要摄食含鱼粉商品饲料长大,为了使实验鱼更快适应无鱼粉饲料,喂食开始前,对实验鱼进行饥饿处理 5 d。实验时,在水面设置长方形摄食框(0.8 m×0.6 m)用于防止投放的饲料漂散,在摄食框的正上方安置摄像机(Alpha 7S III 全画幅微单™数码相机,120 帧 4K 超高清(QFHD: 3840 PI×2160 PI)),将每一次的摄食过程录制下来。采用人工投饲,每天上午(8:30—10:30)投喂一次,直到鱼不再摄食。投喂结束后,当天即在电脑中播放分析视频,计算每尾鱼每餐吃进的饲料颗粒数量,以此来计算个体的摄食量;视频分析使用可用于个体运动分析的 Kinovea 0.9.5 软件(<https://www.kinovea.org/>)。喂食实验结束(第 29 天)后,将实验鱼全部捞出用丁香酚麻醉,再次称量体重(W_1)和测量体长(L_1),并解剖观察性腺鉴定性别,剪取肠道和肝脏用于消化酶活性测定。

本次无鱼粉饲料投喂实验进行了 28 d,因此每尾鱼的摄食量 F_i (单位 g) 和饲料效率 F_e 的计算公式为:

摄食量 F_i = 该尾鱼在 28 d 中摄入饲料颗粒总数 × 饲料颗粒均重;

饲料效率 F_e = $(W_1 - W_0) / F_i$ 。

2 结果

2.1 不同个体的摄食情况

实验期间,部分鱼的标签脱落,到实验结束时 2 枚标签仍完好保留的仅 258 尾,即标记完整保持率只有 33.5%。该 258 尾个体中,只有 210 尾参与过摄食,总摄食量为 4130 g,有 48 尾自始至终没有摄食。整个实验期间,日参与摄食个体数量比例变化在 28.57%~64.29% 之间。除完全没有摄食的个体之外,其他个体摄食活跃度差别也很大,210 尾大黄鱼平均参与摄食次数(日数)为 14.29 次,最活跃的个体(19 尾) 28 d 都参与了摄食,有 20 尾个体整个实验期间总共只摄食 1 粒饲料。不同个体总摄食量和日摄食量差异都很大,总摄食饲料量变化在 1 粒(0.2627 g)到 409 粒(107.4443 g)之间,日摄食饲料量从 1 粒到 21 粒(5.5167 g)不等,个体间日摄食量的平均变异系数达 66.29% (见表 3)。图 2 显示出 210 尾具有完整记录大黄鱼的初始体重及其在整个实验期间摄食的饲料颗粒总数。可见,实验期间大黄鱼是否摄食、摄食量多少与其个体大小(体重)的相关性不大,如体重同为 200 g 左右的个体,摄食量最多的达 409 粒饲料,最少的只有 1 粒。

表 3 实验期间 210 尾大黄鱼每日摄食情况统计结果
Tab. 3 Summary statistics of 210 individuals feed intake at each measured meal

餐次	总摄食量 /g	参与摄食 个体/尾	平均摄食量 /g	最高摄食量 /g	最低摄食量 /g	摄食量 标准差	摄食量变异系数 /%
1	47.866	60	0.798	3.682	0.263	0.767	96.156
2	73.114	71	1.030	3.419	0.263	0.785	76.222
3	89.683	95	0.944	3.156	0.263	0.683	72.393
4	94.680	98	0.966	3.419	0.263	0.751	77.764
5	115.457	100	1.155	4.997	0.263	0.882	76.405
6	122.558	92	1.332	3.682	0.263	0.908	68.127
7	146.228	103	1.420	3.419	0.263	0.882	62.113
8	131.500	88	1.494	4.997	0.263	0.988	66.098
9	148.069	101	1.466	3.682	0.263	0.837	57.089
10	191.464	112	1.710	4.734	0.263	1.030	60.243
11	184.626	113	1.634	4.997	0.263	0.944	57.776
12	173.580	113	1.536	3.945	0.263	0.953	62.051
13	183.574	110	1.669	4.734	0.263	0.980	58.751
14	196.724	109	1.805	4.734	0.263	0.999	55.364
15	180.418	124	1.455	5.523	0.263	1.031	70.835
16	179.892	117	1.538	4.997	0.263	0.938	61.000
17	187.782	135	1.391	4.471	0.263	0.967	69.485
18	178.840	122	1.466	4.997	0.263	0.935	63.752
19	144.124	111	1.298	4.208	0.263	0.892	68.678
20	167.268	115	1.455	4.734	0.263	0.967	66.515
21	182.785	118	1.549	4.471	0.263	0.917	59.223
22	163.323	114	1.433	3.419	0.263	0.760	53.064
23	133.604	114	1.172	3.419	0.263	0.826	70.469
24	169.635	116	1.462	4.734	0.263	0.972	66.463
25	135.971	106	1.283	3.945	0.263	0.866	67.540
26	154.118	113	1.364	3.945	0.263	0.852	62.461
27	140.705	121	1.163	4.471	0.263	0.802	68.957
28	104.674	100	1.047	3.156	0.263	0.639	61.023
总计	147.224	106.82	1.358	4.217	0.263	0.884	66.286

说明:平均摄食量、最低摄食量等的计算不包含没有参与摄食的个体。

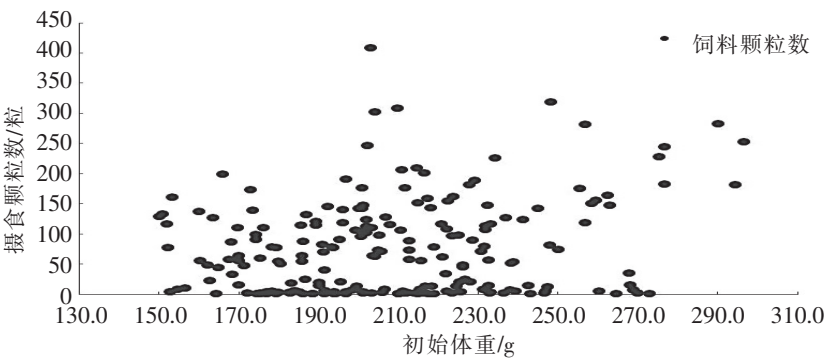


图 2 实验期间 210 尾大黄鱼的总摄食量及其初始体重

Fig. 2 The total feed intake of 210 large yellow croaker and their initial body weight during the experiment

2.2 不同个体的增重与饲料效率

实验期间不同个体的增重差异很大。如图 3 所示，210 尾有摄食的大黄鱼中，85 尾体重有正增长，其余个体体重则为负增长；增重最多的达 88.9 g，增重率为 43.77%；体重减少最多达 61.6 g，增重率为 -30.3%。增重率 (y) 与摄食量 (x) 呈线性相关，关系式为： $y = 0.0045x - 0.1083$ ， $R^2 = 0.7736$ 。如图 4 所示，增重率大于 0 的个体摄食量均大于 12.87 g；但增重率小于 0 的个体中有 32 尾摄食量大于 12.87 g；增重率接近 0 的个体（9 尾）摄食量也并不一致。这表明大黄鱼不同个体基础代谢需要消耗的能量不一致。有些个体初始体重和摄食量相近，但增重率不同，也表明了这一点（见表 4）。

根据大黄鱼不同个体的体重变化和摄食量，计算个体的饲料效率，并按照 Elvy 等^[27]的方法，将增重率 > 0 的 85 尾个体的饲料效率值从最低到最高分作四等分，把饲料效率值的第 3 四分位数到最大值定义为高效值，中位数前后 10 尾个体（包括中位数）定义为中效值组，最小值到第 1 四分位数的个体定义为低效值，分别得到高效值组（H - FE）、中效值组（M - FE）和低效值组（S - FE）个体各 21 尾。

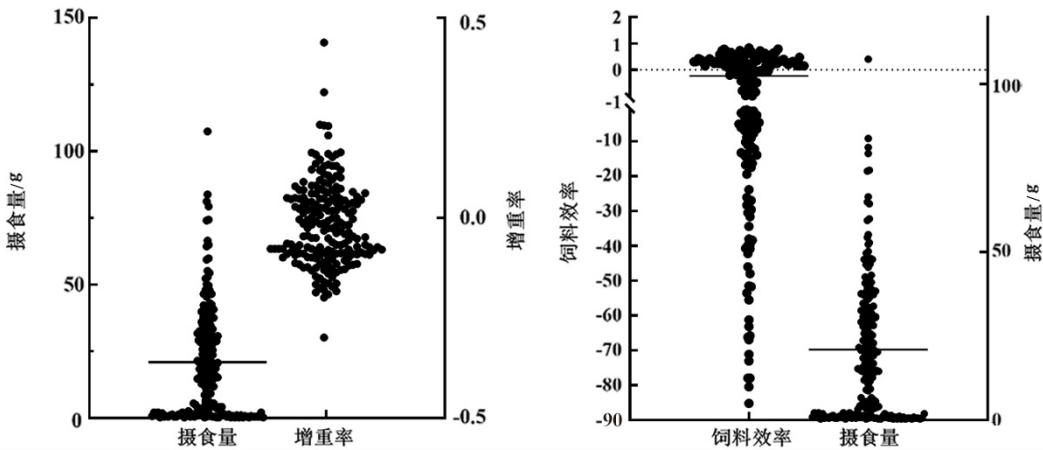


图 3 210 尾大黄鱼不同个体在实验期间的摄食量、增重率和饲料效率
Fig.3 Feed intake, weight gain ratio and feed efficiency of 210 individual large yellow croaker during the experiment

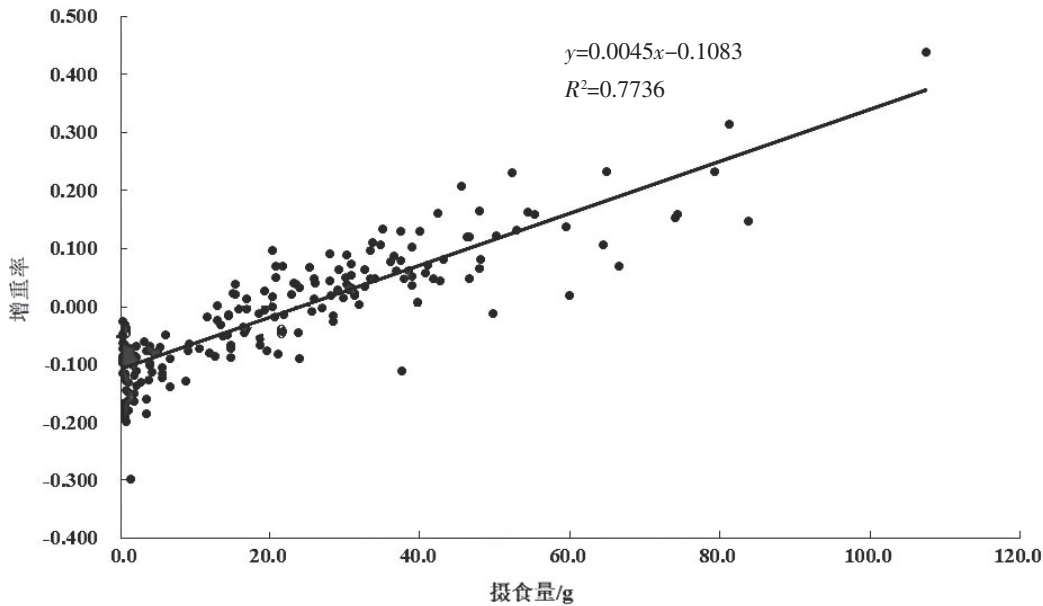


图 4 摄食量与增重率之间的线性回归分析
Fig.4 Linear regression analysis between feed intake and weight gain rate

表4 12尾初始体重与摄食量均相近的大黄鱼的增重量与饲料效率

Tab.4 Weight gain and feed efficiency of 12 large yellow croakers with similar initial body weight and feed intake

个体编号	初始体重/g	摄食量/粒	增重量/g	增重率	饲料效率
0728	206.7	128	22.7	0.110	0.675
1410	199.3	106	18.0	0.090	0.646
0206	209.6	121	19.4	0.093	0.610
1703	189.3	115	16.7	0.088	0.553
0016	203.3	110	5.7	0.028	0.197
2515	207.8	116	5.9	0.028	0.194
1606	196.1	119	4.5	0.023	0.144
1227	201.9	113	2.9	0.014	0.098
0303	189.2	121	0.4	0.002	0.013
0311	202.0	102	-0.7	-0.003	-0.026
0400	222.2	108	-3.7	-0.017	-0.130
0111	202.0	108	-5.3	-0.026	-0.187

如图5所示, H-FE组饲料效率最高的个体达0.827(饲料系数1.21), S-FE组个体饲料效率最低为0.008(饲料系数128.73), H-FE组的平均饲料效率是S-FE组的4.5倍, 各组之间的饲料效率均存在极显著差异($P<0.01$)。

H-FE组和S-FE组的平均摄食量、日摄食量、体重增加、特定生长率均存在显著差异($P<0.05$)。如图6~8、表5所示: H-FE组平均摄食量(186.8粒)是S-FE组(120.19粒)的1.5倍, 日平均摄食量均高于S-FE组且变异系数(22.69%)显著低于S-FE组(31.67%); H-FE组平均增重(33.70 g)是S-FE组(4.77 g)的7倍, 特定生长率(0.54)是S-FE组(0.08)的6.8倍; H-FE组的平均饱满度是增加的, S-FE组的平均饱满度是下降的。

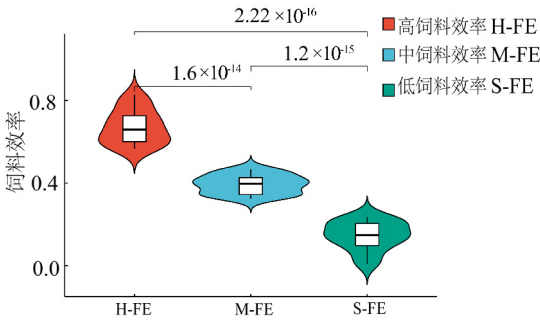


图5 体重正增长的大黄鱼个体中高、中、低饲料效率的分布情况

Fig.5 Distribution of high, medium and small feed efficiency in large yellow croaker with positive body weight growth

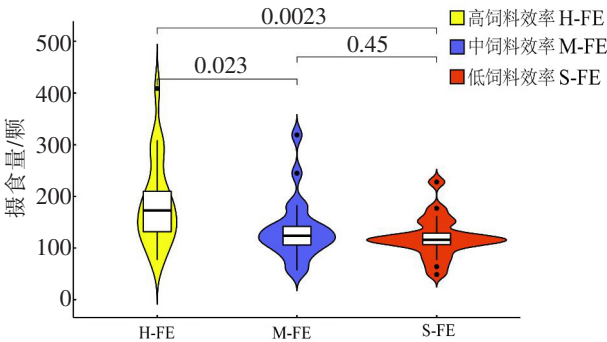


图6 体重正增长的大黄鱼个体中高、中、低饲料效率个体的摄食量情况

Fig.6 Feed intake of high, medium and small feed efficiency individuals of large yellow croaker with positive body weight growth

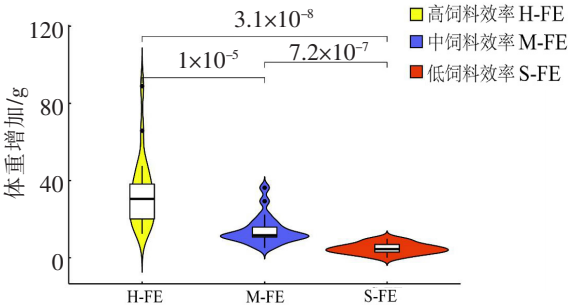


图7 体重正增长的大黄鱼个体中高、中、低饲料效率个体的体重增加情况

Fig.7 Body weight gain in high, medium and small feed efficiency individuals of large yellow croaker with positive body weight gain

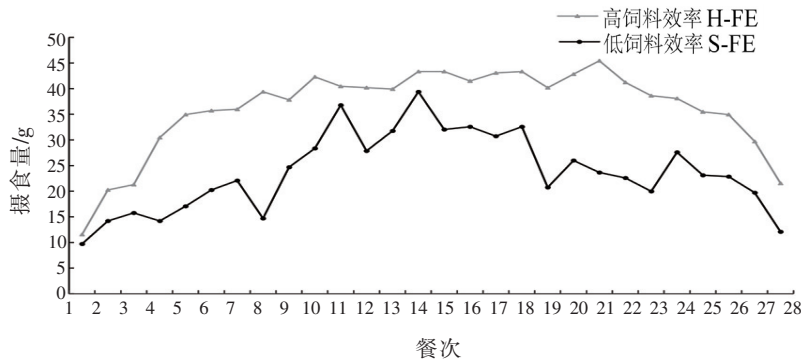


图 8 大黄鱼 H-FE 组与 S-FE 组个体的日摄食量情况

Fig.8 Daily feed intake of large yellow croaker in H-FE group and S-FE group

表 5 大黄鱼 H-FE 组与 S-FE 组个体摄食量与生长相关性状的总体分析

Tab. 5 Overall analysis of feed intake and growth-related traits of large yellow croaker in H-FE and S-FE groups

性状	时间/d	高饲料效率 H-FE	低饲料效率 S-FE	评估倍数
初始体重/g	0	200. 59	207. 80	—
终末体重/g	8	233. 88	212. 59	1. 10
体重增加/g	28	33. 70	4. 77	7. 00
摄食量/g	28	49. 13	31. 60	1. 50
饲料效率	28	0. 67	0. 15	4. 50
增重率/%	28	16. 56	2. 34	7. 00
特定生长率/%	28	0. 54	0. 08	6. 80
初始平均肥满度	0	1. 42	1. 43	—
终末平均肥满度	28	1. 51	1. 41	1. 06

2.3 性别对饲料效率性状的影响

体重正增长的大黄鱼，雌雄个体间的饲料效率、摄食量、体重增加和特定生长率差异均不显著 ($P>0.05$)，但就平均而言，雌性比雄性增重多 3.55%，饲料消耗多 2.38%，平均饲料效率高 7.89%（见表 6）。

表 6 大黄鱼雌雄个体间生长相关性状统计分析

Tab. 6 Statistical analysis of growth-related traits between male and female individuals of large yellow croaker

性状	性别	平均值 Mean ± SD	性状	性别	平均值 Mean ± SD
初始体重/g	♀	210. 40 ± 37. 23	增重率/%	♀	8. 28 ± 7. 14
	♂	205. 42 ± 32. 63		♂	7. 98 ± 7. 54
摄食量/g	♀	38. 76 ± 17. 70	饲料效率	♀	0. 41 ± 0. 21
	♂	37. 86 ± 17. 33		♂	0. 38 ± 0. 20
终末体重/g	♀	227. 63 ± 41. 88	特定生长率/%	♀	0. 28 ± 0. 22
	♂	222. 07 ± 39. 73		♂	0. 27 ± 0. 24
增重量/g	♀	17. 23 ± 14. 76	平均日摄食量/g	♀	1. 38 ± 0. 63
	♂	16. 64 ± 16. 28		♂	1. 35 ± 0. 62

3 讨论

3.1 关于标记方法

在群体饲养条件下测定鱼类个体摄食量是一项困难的工作。同种鱼个体间形态差异很小, 要跟踪测定养殖群体中不同个体的摄食量, 需要在其体表增加标记辨识度。这种标记应满足以下几个特性: 一是标记应不容易掉落, 可保留一段时间; 二是标记上的数字在水中要清晰、易辨别、不混淆; 三是标记要尽可能减小对鱼摄食的影响, 最好能贴在皮肤上; 四是标记的组合要足够多, 能满足批量观测的要求; 五是注射标记的位置, 要有利于标记的保留, 在水面应可直接观察。基于以上要求, 本研究使用了一种新的塑料标签标记方法, 该方法所使用的标签制作简单, 容易辨别, 可通过录像用肉眼清晰地识别鱼个体, 跟踪观测其摄食行为和摄食量, 批量获得群养条件下个体的摄食量和饲料效率数据, 可为同类研究提供借鉴。

如前所述, 本文实验标签保持率较低, 仅为 33.5%, 主要原因是在实验期间, 特别是第 3 周之后, 由于部分个体标签固定位置处的伤口发炎, 肌纤维遭到破坏, 失去对标签的固定作用。在后续进行不同饲料投喂实验时, 改进了注射位置, 把标记固定在背鳍根部的肌肉中, 同样经历了 28 d, 标签保持率提高到了 74% (未发表资料), 使获得的有效记录大幅度增加。本研究实验期间水温偏高, 不利于大黄鱼伤口愈合, 也是导致标签脱落率高的主要原因。检查脱落的标签, 发现有些是由于工字型胶针被拉断, 多数是一端的横向短塑料丝脱落, 建议采用强度和韧度更好的工字形胶针以降低标签脱落率。此外, 实验中发现在第 3 周和第 4 周, 尤其是第 4 周脱落的标签远多于前 2 周。根据 De Verdal 等^[25]在尼罗罗非鱼的研究, 连续 10 天 19 餐的投喂就足以准确测定不同个体的摄食量和饲料效率。本实验通过计算第 14、21 和 28 天参与摄食个体摄食量排序之间的秩相关系数 (见图 9), 发现第 14 天和第 28 天的相关系数为 0.889 ($P < 0.01$), 第 21 天和第 28 天的相关系数为 0.967 ($P < 0.01$), 第 21 天和第 28 天所有摄食个体的摄食量排序高度一致, 这表明将实验周期缩短至 21 d 以内是可行的。如果将实验周期缩短至 2 周或 3 周, 本研究所用标签的完整保持率将大幅度提高, 从而大大提高获得有效数据的效率。本实验采用人工对视频进行逐帧分析, 由于鱼个体数量较多, 工作量巨大, 今后可以建立人工智能识别 (机器识别) 方法来代替人工识别, 既减少劳动强度又提高效率。

3.2 大黄鱼个体间摄食量和饲料效率差异

本研究通过给大黄鱼注射可视标签, 并通过视频记录跟踪观察鱼的摄食情况和摄食量。在标记完整保留的 258 尾大黄鱼中, 摄食活跃程度与摄食量差异巨大, 有些个体摄食很少, 有 48 尾完全没有参与摄食, 加上水温较高, 导致多数个体 (173 尾) 体重出现负增长。这可能与个体间对饲料的偏好性和性格 (勇敢或胆小) 差异有关, 有些个体可能因为胆小以及不适应室内水泥池的养殖环境, 导致摄食量偏少或不摄食。本研究同期在海区网箱用相同饲料投喂 2000 尾同样大小规格的大黄鱼, 其个体平均日摄食量为 5 g, 高于水泥池中的摄食量 (1.358 g)。但网箱由于操作不便以及受天气的影响比较大, 不容易拍摄到清晰的视频。今后可以在正式投喂无鱼粉饲料之前, 先投喂一段时间含鱼粉的商品饲料, 计算出每尾鱼的摄食量, 把看起来是由于不适应室内水泥池环境而不摄食或摄食偏少的鱼剔除出去, 再使用无鱼粉饲料进行投喂, 这样就可以排除或减少环境因素对鱼摄食的影响。

体重正增长的实验鱼其摄食都比较活跃且摄食量都比较大, 可以认为这些鱼受室内养殖环境的影响小, 可以利用这些鱼的记录研究个体间饲料效率的差异。从本研究结果看, 85 尾体重正增长的实验鱼个体间饲料效率差异很大, 饲料效率最高的个体达 0.827 (饲料系数 1.21), 最低的仅为 0.008 (饲料系数 128.73), 按四分位分组, 高效值 (H-FE) 组的平均饲料效率是低效值 (S-FE) 组的 4.5 倍, 高、中、低效值各组之间的饲料效率均存在极显著差异 ($P < 0.01$), 初始体重和摄食量都相近的个体之间也同样如此 (见表 4)。实验中观察到, H-FE 组大黄鱼绝大多数个体每日都参与摄食, 而且摄食量都比较大, 增重量也大, 表明其对摄食的饲料能较好地消化和吸收利用; S-FE 组许多个体的日摄食量很不稳定, 这些个体可能在摄食后无法很好地消化吸收或吸收率较低, 取肠道切片

观察可看到其肠道微绒毛受到损伤或变短（未发表数据）。说明大黄鱼不同个体对植物蛋白源无鱼粉饲料的适应性与利用率的差异很大，通过遗传选育可望大幅度提高其对无鱼粉饲料的适应性与利用率，大幅度降低饲料系数，提高养殖效益。全基因组选择是目前最准确有效的选育方法，本研究为开展适应并高效利用全植物蛋白源配合饲料大黄鱼的基因组选择育种提供了部分参考群的标准与数据。

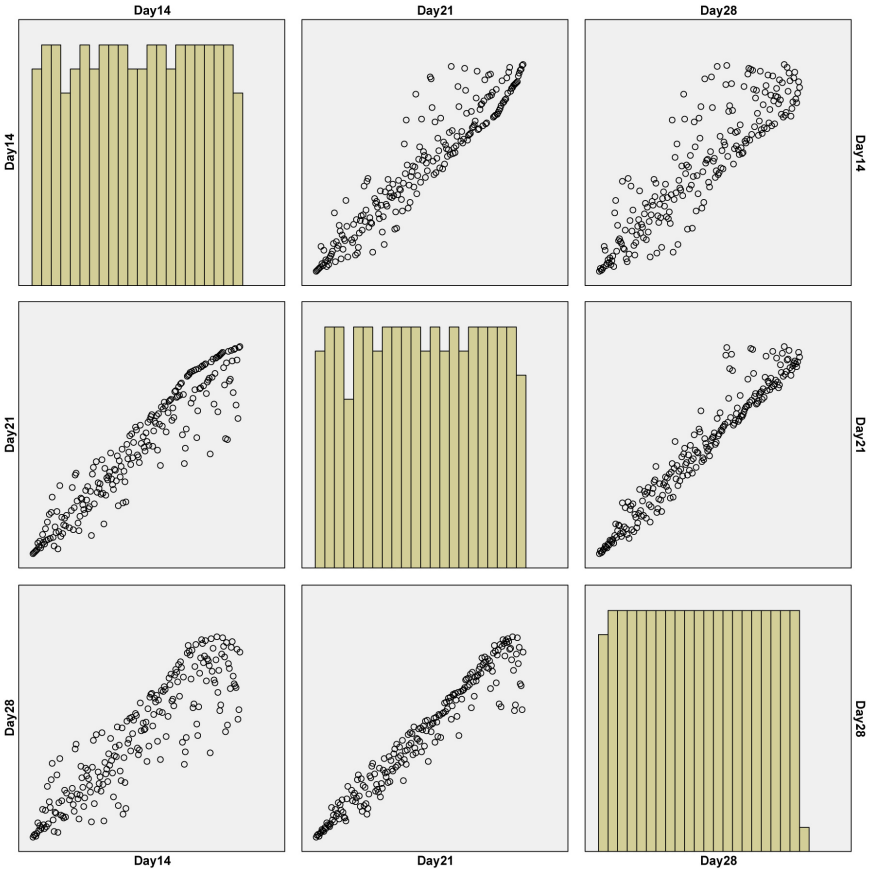


图 9 大黄鱼第 14、21、28 天的摄食量排序的散点图矩阵 (SPLOM)

Fig.9 Scatter plot matrix of feed intake ranking of large yellow croaker at 14th,21st and 20ty day

值得指出的是，本研究中实验鱼初始体重在 150 ~ 300 g 之间，差异较大，但分析发现初始体重与摄食量的相关系数为 0.209，相关性较小。如图 2 所示，各种不同大小（体重）的个体，都存在体重相同或相近但摄食量差异很大的情况。大黄鱼性情温和，不会互相残杀，本研究在投喂过程中虽偶尔可见激烈的抢食行为，但抢到饲料的个体一般在摄食后就离开投饲区，未见到大个体驱逐小个体从而影响到小个体摄食的情况，而且实验期间每餐投喂饲料时间都持续 70 min 以上，直到实验鱼不再摄食。换言之，所有个体都有充分的摄食机会，基本可以消除大个体对小个体摄食的影响。

另外，本研究中不同个体每餐的摄食量是通过人工对整个摄食过程的视频逐帧进行观察分析记录的，每次投饲都是人工一至数粒饲料缓慢投放，避免同时投放较多饲料、同时有较多的鱼进行摄食造成观察困难，而且视频在电脑中可以慢放、倒退，确保观察计数准确。因此，几乎所有个体每一次的摄食都可被观察和记录。实验中有时可看到个别个体摄入饲料后再将饲料吐出的现象，被吐出的饲料就没有计入摄食量中，不影响结果的准确性和可靠性。Rodde 等^[28]对均重 36 ~ 260 g 的尼罗罗非鱼持续投喂 210 d，每 14 d 测定一次饲料效率，结果发现对幼鱼进行为期 14 d 的养殖实验测得的饲料效率就可以较准确地反映整个养殖期的饲料效率。De Verdal 等^[25]发现通过测定尼罗罗非幼鱼 11 餐的摄

食量,就可以达到95%的重复性和较高的摄食量估计精度。本研究实验鱼的饲料效率是通过28 d的饲养周期进行测定的,其准确性和可靠性是较高的。

3.3 性别与饲料效率的关系

大黄鱼雌鱼平均生长速度明显快于雄鱼^[29],但雌鱼与雄鱼之间饲料效率是否存在差异迄今未见研究报道。本研究发现在体重正增长的个体中,雌雄个体间的摄食量、增重、特定生长率和饲料效率差异均不显著($P>0.05$),但雌鱼平均增重量比雄鱼高3.55%,消耗的饲料比雄鱼多2.38%,平均饲料效率比雄鱼高7.89%。当然,这是饲养28 d后得出的结果,长时间饲养的结果如何,还有待今后进一步实验验证。

[参 考 文 献]

- [1]刘聪,张溢卓,马林.我国配合饲料投喂大黄鱼的SWOT分析[J].中国水产,2021(12):57-61.
- [2]吴钊,陈乃松,华雪铭,等.4种豆粕替代鱼粉对大黄鱼生长、抗氧化及抗菌能力的影响[J].海洋渔业,2016,38(5):495-506.
- [3]张帆.大黄鱼(*Pseudosciaena crocea* R.)脂类营养生理和饲料替代蛋白源的研究[D].青岛:中国海洋大学,2012.
- [4]苗新.大黄鱼对豆粕和双低菜粕的耐受性研究[D].青岛:中国海洋大学,2014.
- [5]韩星星,叶坤,王志勇,等.脱脂黑水虻虫粉替代鱼粉对大黄鱼幼鱼生长、体成分、血清生化指标及抗氧化能力的影响[J].中国水产科学,2020,27(5):524-535.
- [6]ZHANG L, MAI K, AI Q, et al. Use of a compound protein source as a replacement for fish meal in diets of large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea* R[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2010, 39(1): 83-90.
- [7]AI Q, MAI K, TAN B, et al. Replacement of fish meal by meat and bone meal in diets for large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea*[J]. Aquaculture, 2006, 260(1): 255-263.
- [8]潘明官.大黄鱼无鱼粉浮性膨化饲料的应用[Z].国家科技成果登记,2014.
- [9]刘灵婕,林晓煜,王秋荣,等.无鱼粉无鱼油饲料喂养下大黄鱼幼鱼个体间生长及相关基因表达差异[J].集美大学学报(自然科学版),2020,25(6):401-410.
- [10]孙广文,王卓铎,刘敏,等.大豆浓缩蛋白和玉米蛋白粉替代鱼粉对大黄鱼生长性能和体组成的影响[J].广东饲料,2019,28(11):26-29.
- [11]CARTER C G, HAULER R C. Fish meal replacement by plant meals in extruded feeds for Atlantic salmon, *Salmo salar* L. [J]. Aquaculture, 2000, 185(3): 299-311.
- [12]GOMEZ-REQUENI P, MINGARRO M, CALDUCH-GINER J A, et al. Protein growth performance, amino acid utilisation and somatotrophic axis responsiveness to fish meal replacement by plant protein sources in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) [J]. Aquaculture, 2004, 232(1): 493-510.
- [13]BONALDO A, PARMA L, MANDRIOLI L, et al. Increasing dietary plant proteins affects growth performance and ammonia excretion but not digestibility and gut histology in turbot (*Psetta maxima*) juveniles [J]. Aquaculture, 2011, 318(1): 101-108.
- [14]REFSTIE S, STOREBAKKEN T, ROEM A J. Feed consumption and conversion in Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed diets with fish meal, extracted soybean meal or soybean meal with reduced content of oligosaccharides, trypsin inhibitors, lectins and soya antigens [J]. Aquaculture, 1998, 162(3): 301-312.
- [15]OPSTVEDT J, AKSNES A, HOPE B, et al. Efficiency of feed utilization in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fed diets with increasing substitution of fish meal with vegetable proteins [J]. Aquaculture, 2003, 221(1): 365-379.
- [16]STOREBAKKEN T, SHEARER K D, BAEVERFJORD G, et al. Digestibility of macronutrients, energy and amino acids, absorption of elements and absence of intestinal enteritis in Atlantic salmon, *Salmo salar*, fed diets with wheat gluten [J]. Aquaculture, 2000, 184(1): 115-132.
- [17]MARTINS C I M, CONCEIÇÃO L E C, SCHRAMA J W. Feeding behavior and stress response explain individual differences in feed efficiency in juveniles of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* [J]. Aquaculture, 2011, 312(1): 192-197.

- [18] RODDE C, VANDEPUTTE M, TRINH T Q, et al. The effects of feed restriction and isolated or group rearing on the measurement of individual feed intake and estimation of feed conversion ratio in juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) for selective breeding purposes[J]. *Frontiers in Genetics*, 2021, 11: 596521.
- [19] VERDAL H, KOMEN H, QUILLET E, et al. Improving feed efficiency in fish using selective breeding: a review[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2018, 10(4): 833-851.
- [20] JOBLING M, COVÉS D, DAMSGÅRD B, et al. Techniques for measuring feed intake[M]//*Food Intake in Fish*; John Wiley & Sons Ltd, 2001: 49-87.
- [21] RINDORF A, LEWY P. Bias in estimating food consumption of fish by stomach-content analysis[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2004, 61(12): 2487-2498.
- [22] GRIMA L, QUILLET E, BOUJARD T, et al. Genetic variability in residual feed intake in rainbow trout clones and testing of indirect selection criteria[J]. *Genetics Selection Evolution*, 2008, 40(6): 607.
- [23] SCHOLTENS M, DODDS K, WALKER S, et al. Opportunities for improving feed efficiency and spinal health in New Zealand farmed Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) using genomic information[J]. *Aquaculture*, 2023, 563(1): 738936.
- [24] BARAS E, NARANJOS G V, AGUILA D V, et al. Ontogenetic variation of food intake and gut evacuation rate in larvae of the doncella *Pseudoplatystoma punctifer*, as measured using a non-destructive method[J]. *Aquaculture Research*, 2012, 43(12): 1764-1776.
- [25] DE VERDAL H, MEKKAWY W, LIND C E, et al. Measuring individual feed efficiency and its correlations with performance traits in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*[J]. *Aquaculture*, 2017, 468: 489-495.
- [26] WANG Y, LI C, QIN J G, et al. Cyclical feed deprivation and refeeding fails to enhance compensatory growth in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L. [J]. *Aquaculture Research*, 2009, 40(2): 204-210.
- [27] ELVY J E, SYMONDS J E, HILTON Z, et al. The relationship of feed intake, growth, nutrient retention, and oxygen consumption to feed conversion ratio of farmed saltwater Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*)[J]. *Aquaculture*, 2022, 554: 738184.
- [28] RODDE C, CHATAIN B, VANDEPUTTE M, et al. Can individual feed conversion ratio at commercial size be predicted from juvenile performance in individually reared Nile tilapia *Oreochromis niloticus*? [J]. *Aquaculture Reports*, 2020, 17: 100349.
- [29] 湛微, 王盼盼, 肖世俊, 等. 大黄鱼形态指标体系及雌雄差异分析[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2014, 19(6): 401-408.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 黄力行)