

利用 γ -射线辐照提高玉米蛋白粉替代卵形鲳鲹 饲料中鱼粉的潜力

朱明¹, 吴玉波¹, 任幸², 黄迪¹, 姜丹莉¹, 王岩^{2*}

(1. 浙江大学动物科学学院, 浙江 杭州 310058;

2. 浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021)

摘要: 通过8周饲养实验检验了 γ -射线辐照处理对利用玉米蛋白粉替代卵形鲳鲹饲料中鱼粉的影响。采用2×3实验设计。对照饲料(C)中鱼粉含量为250 g/kg。用玉米蛋白粉或 γ -射线辐照玉米蛋白粉分别替代饲料C中鱼粉的20%、40%或60%, 配成6种等氮等脂饲料(R20、R40和R60: 以玉米蛋白粉为鱼粉替代物; IR20、IR40和IR60: 以 γ -射线辐照玉米蛋白粉为鱼粉替代物)。实验鱼初始体质量为(31.9±0.2) g。结果显示, 饲料鱼粉替代水平显著影响鱼体增重(WG)、摄食率(FI)、饲料系数(FCR)、氮储积效率(NRE)、磷储积效率(PRE)和鱼体磷含量, 而 γ -射线辐照处理显著影响鱼体的磷含量。无论以何种玉米蛋白粉作为鱼粉替代物, FI和WG均随饲料鱼粉替代水平增加而下降。在相同替代水平下, 使用玉米蛋白粉或 γ -射线辐照玉米蛋白粉作鱼粉替代物对FI、WG、FCR、NRE、PRE和鱼体组成(水分、粗蛋白、粗脂肪和灰分)无显著不同的影响。摄食饲料R20的鱼FI、WG、FCR和NRE与摄食饲料C的鱼相比无显著性差异, 表明通过添加玉米蛋白粉可将卵形鲳鲹饲料中鱼粉含量降低至200 g/kg。研究表明, 通过 γ -射线辐照处理不能提高玉米蛋白粉替代饲料鱼粉的水平。

关键词: 卵形鲳鲹; 玉米蛋白粉; γ -射线辐照; 生长; 饲料利用效率

中图分类号: S 963.7

文献标志码: A

随着世界人口的增长, 水产品是人类动物性食品蛋白质供给中所占的比例日益增加, 全球水产养殖产业规模不断扩大^[1]。鱼类养殖产值占水产养殖总产值的70%以上, 而世界鱼类养殖产量中70%以上为淡水鱼类^[1]。海洋占地球表面积的70%以上, 海水占地表水贮存量的97%以上, 因此海水养殖在未来有很大的增长空间。多数海水养殖鱼类为肉食性, 其饲料配方中的鱼粉含量往往超过30%^[2]。鱼粉资源有限、价格昂贵, 降低饲料鱼粉含量是海水鱼类养殖产业可持续发展的关键。

利用廉价的动、植物蛋白原料替代鱼类饲料中鱼粉的研究始于20世纪70年代^[3]。与鱼粉相

比, 植物性蛋白原料(如豆粕、大豆浓缩蛋白等)含有抗营养因子, 蛋白质消化率较低且缺乏部分必需氨基酸, 特别是蛋氨酸^[4]。因此, 大量添加植物蛋白性原料替代肉食性鱼类饲料中的鱼粉往往导致鱼类生长速率显著下降。最近研究表明利用⁶⁰Co产生的 γ -射线进行辐照处理可显著提高豆粕或大豆浓缩蛋白在花鲈(*Lateolabrax japonicus*)和卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)饲料中的添加量^[5-6]。 γ -射线辐照被广泛应用于食品灭菌^[7-8], 上述研究表明 γ -射线辐照有可能成为提高大豆蛋白原料替代肉食性鱼类饲料鱼粉水平的新途径。

玉米蛋白粉是以玉米为原料生产淀粉或酿酒后的副产物, 其蛋白质含量高、供应充足且

收稿日期: 2016-09-12 修回日期: 2017-02-24

资助项目: 宁波市农业重大专项(2015C10003)

通信作者: 王岩, E-mail: ywang@zju.edu.cn

价格低廉^[9]。研究表明利用玉米蛋白粉可部分替代金头鲷(*Sparus aurata*)^[10-11],大菱鲂(*Psetta maxima*)^[12],牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)^[13],低眼无齿鲈(*Pangasianodon hypophthalmus*)^[14],革胡子鲶(*Clarias gariepinus*)^[15]和蓝鳃太阳鱼(*Lepomis macrochirus*)^[16]等鱼类饲料中的鱼粉,但大量添加玉米蛋白粉替代饲料中的鱼粉则会导致鱼体生长性能下降。有关限制玉米蛋白粉替代肉食性鱼类饲料鱼粉的原因尚不清楚。Wu等^[6]推测 γ -射线辐照后大豆蛋白质结构改变可能是其提高豆粕或大豆浓缩蛋白替代饲料鱼粉水平的机制之一。Soliman等^[17]报道 γ -射线辐照能够改变玉米胚蛋白分子结构和物理特性,因此有理由推测 γ -射线处理可提高玉米蛋白粉替代肉食性鱼类饲料鱼粉的水平。

卵形鲳鲹隶属于鲈形目(Perciformes),鲹科(Carangidae),鲳鲹属(*Trachinotus*),是一种广盐性海洋鱼类,具有生长快、肉质鲜美等优良性状,是我国东南沿海网箱养殖的主要鱼类种类之一^[18]。有关卵形鲳鲹的饲料蛋白质、粗脂肪、蛋氨酸和精氨酸需求已有报道^[18-20]。当利用鸡肉粉^[21]、豆粕和大豆浓缩蛋白^[6]作为鱼粉替代物时可将卵形鲳鲹饲料中鱼粉含量降低至24%。本文报道了利用玉米蛋白粉替代饲料鱼粉对卵形鲳鲹摄食、生长、饲料利用效率和养殖废物排放的影响,目的是评价玉米蛋白粉作为海水鱼类饲料蛋白源的潜力,同时评价 γ -射线辐照对于改善玉米蛋白粉作为饲料鱼粉替代物的作用。

1 材料与方法

1.1 饲料原料和实验饲料

宠物级鸡肉粉由美国油脂蛋白提炼协会(NRA)提供。鱼粉(超级蒸汽鱼粉,产地新西兰)、喷雾干燥血粉、玉米蛋白粉、豆粕(去皮)、菜籽粕、面粉和鱼油购自浙江省科盛饲料股份有限公司。饲料原料(g/kg)组成见表1。 γ -射线辐照玉米蛋白粉在银都辐照技术有限公司(杭州,中国)完成,放射源为⁶⁰Co,辐照剂量为10 kGy^[22]。

采用2×3实验设计(2种玉米蛋白粉类型×3个鱼粉替代水平)。对照组(C)饲料鱼粉含量为250 g/kg。用玉米蛋白粉(R)或 γ -射线辐照蛋白粉(IR)分别替代饲料C中鱼粉的20%(R20或IR20)、40%(R40或IR40)和60%(R60或IR60)。其中,饲料R20和

表1 饲料原料组成

Tab. 1 Proximate composition of

the feed ingredients				
原料 ingredient	干物质 dry matter	粗蛋白 crude protein	粗脂肪 lipid	灰分 ash
鱼粉 fish meal	903	687	68	154
鸡肉粉 poultry by-product meal	942	675	130	136
血粉 blood meal	950	900	0	30
玉米蛋白粉 corn gluten meal	909	687	19	17
辐照玉米蛋白粉 corn gluten meal, irradiated	908	691	19	17
豆粕 soybean meal	892	449	5	57
菜籽粕 rapeseed meal	882	492	10	70
面粉 wheat flour	859	161	10	10

注:数据表示为2次测量的平均值($n=2$),粗蛋白、粗脂肪和灰分表示为自然贮存条件下的含量,下同

Notes: crude protein, crude lipid and ash are expressed as they are in air and given as means of two measurements ($n=2$), the same below

IR20鱼粉含量为200 g/kg,饲料R40和IR40鱼粉含量为150 g/kg,饲料R60和IR60鱼粉含量为100 g/kg。实验饲料的粗蛋白和粗脂肪含量分别为470和85 g/kg。通过添加晶体DL-蛋氨酸和L-赖氨酸保证饲料蛋氨酸和赖氨酸含量不缺乏。实验饲料配方和营养组成见表2。饲料C、IR20、IR40和IR60氨基酸组成见表3。

将饲料原料粉碎并过40目筛。根据配方称重各饲料原料,逐批加入原料并用手混匀,然后在饲料搅拌机中加水混合15 min。用SLP-45单螺杆饲料膨化机(中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所,上海)制成直径3 mm、长5 mm的缓沉性颗粒。饲料在室内自然风干,然后密封在塑料袋中,在-20 °C下保存备用。

1.2 实验鱼、网箱和饲养实验

饲养实验在广东南澳县深澳湾进行。卵形鲳鲹购自广东饶平县一家海水育苗厂,用活水船运到实验地点后在网箱(3 m×3 m×2 m)内暂养1个月。实验前,挑选483尾健康、大小相近的实验鱼,按每个网箱23尾鱼的密度随机放养在21个实验网箱(1 m×1 m×1.5 m)中。驯养时间为1周。驯养期间每天早、晚按饱食量投喂饲料C。

实验开始前停喂24 h。从每个网箱中随机取20尾鱼,成群称重后放回网箱中。实验鱼初始体质量为(31.9±0.2) g (mean±SD, $n=21$)。每个饲料设3个重复,共用21个网箱。放养结束后从剩余

表 2 实验饲料配方和营养组成
Tab. 2 Formulation and proximate composition of the test diets

原料 ingredient	C	R20	R40	R60	IR20	IR40	IR60
鱼粉 fish meal	250	200	150	100	200	150	100
玉米蛋白粉 corn gluten meal	0	56	111	166	0	0	0
辐照玉米蛋白粉 corn gluten meal, irradiated	0	0	0	0	56	111	166
鸡肉粉 poultry by-product meal	150	150	150	150	150	150	150
血粉 blood meal	30	30	30	30	30	30	30
豆粕 soybean meal	261	261	261	261	261	261	261
菜籽粕 rapeseed meal	60	60	60	60	60	60	60
氯化胆碱 choline chloride	2	2	2	2	2	2	2
面粉 wheat flour	140	140	140	140	140	140	140
膨润土 bentonite	35	19	10	1	19	10	1
CaHPO ₄	16	16	16	16	16	16	16
赖氨酸 L-Lys	2	6	6	6	6	6	6
DL-蛋氨酸 DL-Met	1	3	3	3	3	3	3
维生素和矿物质预混物 vitamin and mineral premix	15	15	15	15	15	15	15
鱼油 fish oil	38	42	46	50	42	46	50
干物质 dry matter	879	886	880	883	887	890	885
粗蛋白 crude protein	459	465	460	463	467	467	466
粗脂肪 lipid	74	81	83	74	77	81	85
灰分 ash	121	102	87	74	102	89	74
磷 phosphorus	16	14	13	11	15	14	11

注: 维生素和矿物质预混物(每kg饲料): 维生素A, 8000 IU; 维生素D₃, 2000 IU; 维生素E, 100 mg; 维生素K₃, 7.5 mg; 维生素B₁, 15 mg; 维生素B₂, 15 mg; 维生素B₆(吡哆醇), 12.5 mg; 维生素B₁₂, 0.05 mg; D-生物素, 0.25 mg; D-泛酸钙, 40 mg; 叶酸, 5 mg; 烟碱酸, 50 mg; 维生素C, 140 mg; 肌醇, 120 mg; 硫酸亚铁, 40 mg; 五水硫酸铜, 25 mg; 四水硫酸锰, 10 mg; 硫酸锌, 100 mg; 七水硫酸镁, 200 mg; 碳酸钴, 0.35 mg; 碘化钾, 0.05 mg; 亚硒酸钠, 0.3 mg; 乙氧基喹啉, 5 mg

Notes: vitamin and mineral premix (every kg diet): vitamin A, 8000 IU; vitamin D₃, 2000 IU; vitamin E, 100 mg; vitamin K₃, 7.5 mg; vitamin B₁, 15 mg; vitamin B₂, 15 mg; vitamin B₆, 12.5 mg; vitamin B₁₂, 0.05 mg; D-biotin, 0.25 mg; D-calcium pantothenate, 40 mg; folic acid, 5 mg; niacinamide, 50 mg; vitamin C, 140 mg; inositol, 120 mg; FeSO₄, 40 mg; CuSO₄·5H₂O, 25 mg; MnSO₄·4H₂O, 10 mg; ZnSO₄, 100 mg; MgSO₄·7H₂O, 200 mg; CoCO₃, 0.35 mg; KI, 0.05 mg; Na₂SeO₃, 0.3 mg; C₁₄H₁₉NO, 5 mg

的驯养鱼中随机抽取3组鱼(每组3尾), 分别测量体长、体质量后解剖取肝脏称重。取样的鱼保存在-20 °C下用于分析初始鱼体成分。

饲养实验持续8周。每天08:00和16:00按饱食量投喂。实验期间及时记录死鱼数量并对死鱼称重。每天测量水温, 每周测量盐度。实验期间水温为23.6~27.2 °C, 盐度为28.5~31.0。实验结束时停喂24 h, 将每个网箱中的鱼捞出、计数并成群称重。从每个网箱中随机取3尾鱼, 分别测量体长、体质量和肝脏重后保存在-20 °C下用于分析实验结束时的鱼体成分。

1.3 化学分析

将所取的样品鱼在常温下解冻, 在高压蒸汽灭菌锅内(120 °C)蒸煮20 min后匀浆, 在105 °C下烘干。采用AOAC^[23]方法测定饲料原料、饲料以及实验鱼的水分、粗蛋白(凯氏定氮法)、粗脂肪(索氏抽提法)、灰分(550 °C下灼烧)和磷含量(钒钼酸铵法)。饲料C、IR20、IR40和IR60的氨基酸含量用Sykam-433氨基酸分析仪(Sykam有限责任公司, 慕尼黑, 德国)分析。

利用SDS-PAGE电泳分析辐照对玉米蛋白粉蛋白分子量的影响。按Zheng等^[24]的方法提取玉

表 3 实验饲料氨基酸组成
Tab. 3 Amino acid composition of the test diets %

氨基酸 amino acid	饲料 diet			
	C	IR20	IR40	IR60
天冬氨酸 Asp	4.04	3.76	3.82	3.71
苏氨酸 Thr	1.74	1.68	1.62	1.65
丝氨酸 Ser	2.08	2.08	2.03	2.16
谷氨酸 Glu	6.51	6.44	6.93	6.94
脯氨酸 Pro	2.16	2.16	2.30	2.46
甘氨酸 Gly	2.57	2.43	2.28	2.36
丙氨酸 Ala	2.30	2.38	2.42	2.42
缬氨酸 Val	2.12	2.00	2.03	2.10
蛋氨酸 Met	0.76	0.84	0.76	0.80
异亮氨酸 Ile	1.66	1.64	1.63	1.69
亮氨酸 Leu	3.37	3.54	3.84	4.15
酪氨酸 Tyr	0.96	0.97	0.96	1.10
苯丙氨酸 Phe	1.92	1.90	2.04	2.08
组氨酸 His	1.98	1.86	1.87	1.97
赖氨酸 Lys	3.20	2.96	2.89	2.60
精氨酸 Arg	2.42	2.26	2.18	2.09

注: 氨基酸含量以干样计算

Notes: content of amino acids are expressed on a dry diet basis and given as means ($n=2$)

米蛋白粉中的蛋白质, 将提取物等量加到点样孔内, 利用EPS100电泳仪(Tanon, 上海)进行电泳(电压60 V)。丙烯酰胺浓缩胶浓度为5%, 分离胶浓度为10%。采用考马斯亮蓝R-250对SDS凝胶进行染色。

1.4 数据统计分析

实验鱼摄食率(FI)、增重(WG)、饲料系数(FCR)、肥满度(CF)、肝体指数(HSI)、氮储积效率(NRE)、磷储积效率(PRE)、氮废物排放量(TNW)和磷废物排放量(TPW)按下列公式计算:

$$FI (\%/d) = 100 \times I / [(W_0 + W_t) / 2 \times t]$$

$$WG (g) = W_t / N_t - W_0 / N_0$$

$$FCR = I / (W_t - W_0 + W_d)$$

$$CF (g/cm^3) = 100 \times W_s / L_s^3$$

$$HSI (\%) = 100 \times W_l / W_s$$

$$NRE (\%) = 100 \times (W_t \times CN_t - W_0 \times CN_0 + W_d \times CN_0) / (I \times CP_f)$$

$$PRE (\%) = 100 \times (W_t \times CP_t - W_0 \times CP_0 + W_d \times CP_0) /$$

$$(I \times CP_f)$$

$$TNW (g N/kg 鱼产量) = 1000 \times (I \times CN_f) \times (1 - NRE / 100) / (W_t + W_d - W_0)$$

$$TPW (g P/kg 鱼产量) = 1000 \times (I \times CP_f) \times (1 - PRE / 100) / (W_t + W_d - W_0)$$

式中, I 为每个网箱内投喂的饲料质量(g); W_0 和 W_t 分别为实验开始和结束时每个网箱内鱼的总质量(g); W_d 为每个网箱内死鱼的质量(g); t 为实验时间(d); N_0 和 N_t 为实验开始和结束时每个网箱内鱼的数量(尾); CN_0 和 CN_t 分别为实验开始和结束时鱼体蛋白质含量(%); CN_f 为饲料粗蛋白含量(%); CP_0 和 CP_t 分别为实验开始和结束时鱼体磷含量(%); CP_f 为饲料磷含量(%); W_s 、 L_s 和 W_l 分别为取样鱼的质量(g)、体长(cm)和肝质量(g)。

采用双因素方差分析(Two-Way ANOVA)检验 γ -射线辐照处理和饲料鱼粉替代水平对FI、WG、FCR、NRE、PRE、CF、HSI、鱼体组成(水分、粗蛋白、粗脂肪、灰分和磷)、TNW和TPW的影响。方差分析显示显著差异后采用Duncan多重比较法进一步检验实验饲料(R20、R40、R60、IR20、IR40和IR60)间的差异。采用Dunnett检验比较对照组(C)与饲料R20、R40、R60、IR20、IR40和IR60间在FI、WG、FCR、NRE、PRE、CF、HSI、鱼体组成(水分、粗蛋白、粗脂肪、灰分和磷)、TNW和TPW方面的差异。取 $P < 0.05$ 为差异显著性水平。统计分析利用SPSS 19.0软件完成。

2 结果

2.1 存活、摄食、生长和饲料利用效率

鱼粉替代水平显著影响FI、WG、FCR、NRE和PRE (ANOVA, $P < 0.05$), 而 γ -射线辐照处理对上述参数无显著影响(ANOVA, $P > 0.05$, 表4)。无论用未处理玉米蛋白粉还是 γ -射线辐照玉米蛋白粉作为鱼粉替代物, FI、WG和FCR均随鱼粉替代水平增加而呈降低的趋势, NRE与PRE随鱼粉替代水平增加而呈增加的趋势。摄食饲料R20的鱼WG大于摄食饲料R60的鱼(Duncan's test, $P < 0.05$), FI和FCR高于摄食饲料R40和R60的鱼(Duncan's test, $P < 0.05$), 而NRE与PRE低于后者(Duncan's test, $P < 0.05$)。摄食饲料IR20的鱼WG与摄食饲料IR40和IR60的鱼无显著差异(Duncan's test, $P > 0.05$), FI和FCR高于摄食饲料R40的

表 4 卵形鲳鲹摄食、生长和饲料利用效率

Tab. 4 Feed intake, growth performance and feed utilization efficiency of *T. ovatus* fed the test diet

饲料 diet	终末体质量/g FBW	增重/g WG	摄食率/(%/d) FI	饲料系数 FCR	氮储积效率/% NRE	磷储积效率/% PRE
C	159±2 ^B	127±2 ^B	3.29±0.03 ^B	1.39±0.02 ^B	24.9±0.7	23.2±0.4 ^A
R20	154±1 ^{Bc}	122±1 ^{Bc}	3.20±0.01 ^{Bc}	1.38±0.01 ^{Bc}	24.3±0.8 ^a	23.5±0.4 ^{Aa}
R40	149±2 ^{Abc}	116±1 ^{Abc}	2.94±0.02 ^{Ab}	1.28±0.01 ^{Ab}	26.9±0.9 ^{bc}	30.8±1.5 ^{Bb}
R60	138±4 ^{Aa}	105±4 ^{Aa}	2.61±0 ^{Aa}	1.19±0.01 ^{Aa}	27.8±1.2 ^c	39.3±1.2 ^{Bc}
IR20	149±0 ^{Abc}	117±0 ^{Abc}	3.13±0.04 ^{Ac}	1.34±0.02 ^{Bc}	24.8±0.4 ^{ab}	26.3±0.9 ^{Aa}
IR40	145±2 ^{Aab}	113±2 ^{Ab}	2.88±0.08 ^{Ab}	1.26±0.02 ^{Ab}	26.0±0.4 ^{abc}	33.1±0.5 ^{Bb}
IR60	144±3 ^{Aab}	112±3 ^{Aab}	2.95±0.02 ^{Ab}	1.35±0.01 ^{Bc}	25.3±0.4 ^{abc}	37.5±1.1 ^{Bc}
FMRL	0.003	0.002	0	0	0.034	0
CGMT	0.697	0.842	0.088	0.059	0.158	0.196
交互 interaction	0.071	0.074	0	0	0.190	0.078

注: FMRL. 鱼粉替代水平; CGMT. 玉米蛋白粉处理(未处理和 γ -射线辐照处理)。数据上标不同小写字母表示实验饲料间差异显著($P<0.05$)。上标不同大写字母表示对照饲料与实验饲料间差异显著($P<0.05$)，下同

Notes: FBW. final body weight; WG. weight gain; FI. feed intake; FCR. feed conversion rate; NRE. nitrogen retention efficiency; PRE. phosphorus retention efficiency; FMRL. fish meal replacement level; CGMT. corn gluten meal treatment (untreated and γ -ray irradiated). The data in the same column with different superscripts are significant in difference ($P<0.05$). The small letters represent the comparison between the test diets, while the capital letters represent the comparison between control diet and test diets; the same below

鱼(Duncan's test, $P<0.05$)，而PRE低于后者(Duncan's test, $P<0.05$)。在相同替代水平下，用未处理玉米蛋白粉或 γ -射线辐照玉米蛋白粉替代鱼粉(IR20与R20相比，IR40与R40相比，IR60与R60相比)对WG、NRE和PRE无显著不同的影响(Duncan's test, $P>0.05$)。

摄食饲料R20的鱼FI、WG和NRE与摄食饲料C的鱼无显著差异(Dunnett test, $P>0.05$)。摄食饲料R40、R60、IR40和IR60的鱼FI和WG显著低于摄食饲料C的鱼(Dunnett test, $P<0.05$)，但PRE显著高于后者(Dunnett test, $P<0.05$)。摄食饲料R40、R60、IR40和IR60的鱼NRE与摄食饲料C的鱼相比无显著差异(Dunnett test, $P>0.05$)。

2.2 肥满度、肝体指数与鱼体组成

鱼粉替代水平和 γ -射线辐照处理对HSI和鱼体组成(水分，粗蛋白，粗脂肪和灰分)无显著影响(ANOVA, $P>0.05$ ，表5)。 γ -射线辐照处理显著影响CF(ANOVA, $P<0.05$)，同时鱼体的磷含量受鱼粉替代水平和 γ -射线辐照处理的交互作用影响(ANOVA, $P<0.05$)。无论用未处理玉米蛋白粉还是 γ -射线辐照玉米蛋白粉作为鱼粉替代物，鱼体的磷含量均随鱼粉替代水平增加而呈增加的趋势。在相同替代水平下，用 γ -射线辐照玉米蛋白粉替代鱼粉较用未处理玉米蛋白粉替代鱼粉(IR20

与R20相比，IR40与R40相比，IR60与R60相比)可导致鱼体的磷含量升高(Duncan's test, $P<0.05$)。

摄食饲料R20和IR20的鱼CF、HSI和鱼体组成与摄食饲料C的鱼之间无显著差异(Dunnett test, $P>0.05$)。摄食饲料R40、R60、IR40和IR60的鱼磷含量高于摄食饲料C的鱼(Dunnett test, $P<0.05$)。

2.3 饲料来源的氮、磷废物排放量

无论用未处理玉米蛋白粉还是 γ -射线辐照玉米蛋白粉作为鱼粉替代物，TPW随鱼粉替代水平升高而呈下降的趋势(图1)。在20%和40%的鱼粉替代水平下，用未处理玉米蛋白粉或 γ -射线辐照玉米蛋白粉替代鱼粉(IR20与R20相比，IR40与R40相比)对TNW和TPW未产生显著不同的影响(Duncan's test, $P>0.05$)；在60%的鱼粉替代水平下，摄食饲料IR60的鱼TNW和TPW高于摄食饲料R60的鱼(Duncan's test, $P<0.05$)。摄食饲料R20和IR20的鱼与摄食饲料C的鱼相比TNW无显著差异(Duncan's test, $P>0.05$)，但TPW低于后者(Duncan's test, $P<0.05$)。

2.4 辐照对玉米蛋白粉蛋白质分子量的影响

玉米蛋白粉中以分子量 <40 ku的蛋白质为主。辐照前、后玉米蛋白粉的蛋白质分子量分布未表现出明显的差异(图2)。

表 5 卵形鲳鲹肥满度、肝体比和全鱼组成

Tab. 5 Condition factor, hepatosomatic index and whole body composition of *T. ovatus* fed the test diet

饲料 diets	肥满度/(g/cm ³) CF	肝体比/% HSI	水分/(g/kg) moisture	粗蛋白/(g/kg) crude protein	粗脂肪/(g/kg) lipid	灰分/(g/kg) ash	磷/(g/kg) phosphorus
初始 initial	3.52±0.06	2.13±0.12	781±2	148±1	59±4	35±1	5.9±0.2
C	3.98±0.17	1.63±0.07	668±4	174±2	136±1	34±0	5.7±0.0 ^A
R20	4.05±0.06	1.68±0.10 ^{ab}	677±10	170±4	131±6	33±0	5.3±0.1 ^{Aa}
R40	4.20±0.12	1.65±0.13 ^{ab}	671±12	172±4	132±10	35±1	5.8±0.2 ^{Ab}
R60	3.99±0.09	1.69±0.06 ^{ab}	690±9	167±5	119±3	33±1	5.8±0.1 ^{Ab}
IR20	3.91±0.11	1.47±0.05 ^a	680±1	169±0	126±0	34±1	5.9±0.1 ^{Ab}
IR40	3.92±0.11	1.86±0.12 ^b	681±6	167±1	127±7	33±0	6.4±0.2 ^{Bc}
IR60	3.98±0.09	1.77±0.14 ^{ab}	685±7	172±1	116±2	34±0	6.4±0.1 ^{Bc}
FMRL	0.561	0.192	0.373	0.998	0.113	0.817	0
CGMT	0.039	0.975	0.685	0.857	0.380	0.506	0
交互 interaction	0.508	0.047	0.666	0.236	0.982	0.109	0.951

注: 粗蛋白、粗脂肪、灰分和磷表示为鱼湿重

Notes: CF. condition factor; HSI. hepatosomatic index. Crude protein, crude lipid, ash and phosphorus are expressed on a wet weight basis

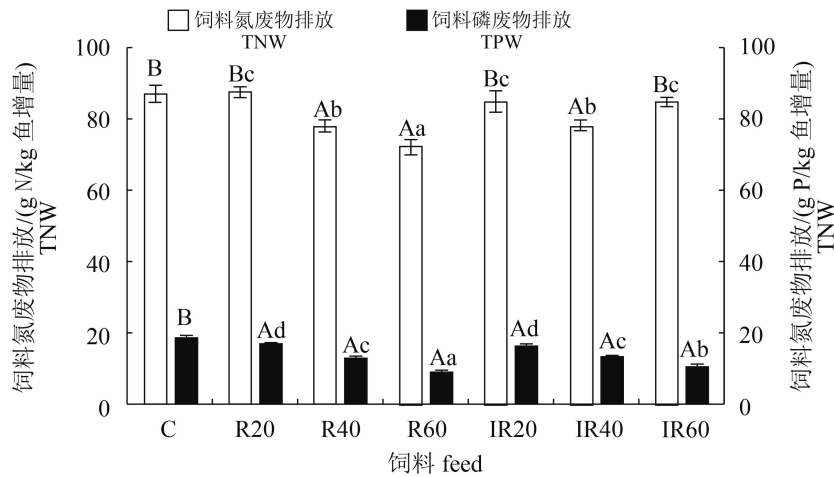


图 1 卵形鲳鲹氮和磷废物排放

不同小写字母表示实验饲料间差异显著(P<0.05), 不同大写字母表示对照饲料与实验饲料间差异显著(P<0.05)

Fig. 1 Nitrogen and phosphorus wastes of *T. ovatus* fed the test diet

The small letters represent the comparison between the test diets, while the capital letters represent the comparison between control diet and test diets

3 讨论

3.1 评价饲料鱼粉替代水平的方法

评价饲料鱼粉替代水平的标准尚未建立。很多研究用在不影响实验鱼生长性能的前提下可替代对照饲料中鱼粉含量的相对比例(%)作为标准来评价鱼粉替代蛋白源的质量优劣或可替代鱼粉的潜力。Wang等^[25]指出采用该标准时对照饲料中的鱼粉含量对结果影响很大, 当对照

饲料配方中鱼粉水平过高时往往出现替代的鱼粉百分比和饲料鱼粉含量均较高的现象。因此, Wang等^[25]建议采用添加鱼粉替代蛋白源后可达到的最低饲料鱼粉水平评价饲料鱼粉替代的效果和潜力。最近的研究发现饲料鱼粉替代水平与基础配方组成相关^[26]。因此, 选择合适的对照饲料是正确评价鱼粉替代水平的基础。本研究中, 饲料C鱼粉含量(250 g/kg)虽然低于现有商品饲料配方中的鱼粉含量, 但足以满足卵形鲳鲹

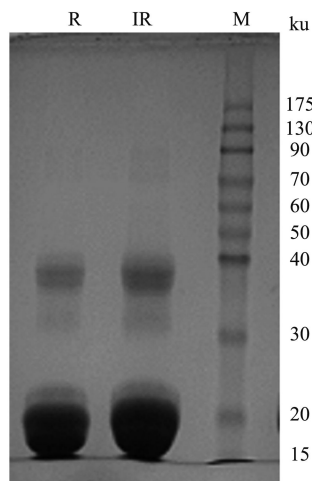


图2 未处理玉米蛋白粉与辐照玉米蛋白粉的蛋白电泳图

R. 未处理玉米蛋白粉; IR. 辐照玉米蛋白粉; M. 标记蛋白

Fig. 2 The electrophoretogram of corn gluten meal and irradiated corn gluten meal

R. corn gluten meal; IR. irradiated corn gluten meal; M. Marker

的快速生长需求^[27]。与前期研究结果^[21]相比,本研究中摄食饲料C的鱼具有较高的WG和较低的FCR,也证明饲料C配方较为合理。因此,本实验结果可反映出利用玉米蛋白粉替代卵形鲳鲹饲料鱼粉对摄食、生长、食物利用、鱼体组成和氮、磷废物排放的影响。

3.2 利用玉米蛋白粉替代卵形鲳鲹饲料鱼粉的潜力

研究表明,通过添加玉米蛋白粉作为鱼粉替代物,可将金头鲷饲料中鱼粉含量降低至250~360 g/kg^[10-11],将大菱鲆饲料鱼粉含量降低至310 g/kg^[12],将牙鲆饲料中鱼粉含量降低至450 g/kg^[13],将低眼无齿鲈饲料中鱼粉含量降低至170 g/kg^[14]。Wu等^[28]报道利用玉米蛋白粉完全替代饲料中的鱼粉对罗非鱼生长不会产生负面影响。本实验中,摄食饲料R20的鱼WG和FCR与摄食饲料C的鱼生长情况无显著差异,表明通过添加玉米蛋白粉作为鱼粉替代物可将卵形鲳鲹饲料鱼粉水平降低至200 g/kg。

有关限制玉米蛋白粉替代饲料鱼粉的原因尚不清楚。研究表明增加饲料中玉米蛋白粉的含量可导致鱼类摄食率下降^[14-15]。刘兴旺等^[29]认为玉米蛋白粉缺乏鱼粉中所含有的促摄食物质,推测随玉米蛋白粉替代鱼粉水平的增加,饲料中促摄食物质含量降低。本实验中,随着

鱼粉替代水平的升高,卵形鲳鲹的FI、WG和FCR下降,而NRE和PRE呈上升趋势,初步分析这些结果的起因是配方中添加的玉米蛋白粉导致FI下降。所以摄食量下降可能是限制玉米蛋白粉替代卵形鲳鲹饲料鱼粉的重要机制。玉米容易受霉菌毒素污染,而霉菌毒素可显著降低鱼类摄食、代谢和生长^[30]。本研究未分析玉米蛋白粉、饲料、鱼类血液和肝脏中霉菌毒素的含量,也未检查鱼类肝脏和肠道组织病变情况,实验结果无法确定霉菌毒素是否是限制玉米蛋白粉替代饲料鱼粉的关键因素,此问题有待进一步研究。

3.3 γ -射线辐照处理对玉米蛋白粉及其作为鱼粉替代物的影响

研究表明经 γ -射线辐照处理后植物蛋白原料更容易被家畜利用^[31-33]。Zhang等^[5]首次发现 γ -射线辐照处理豆粕可提高其替代花鲈饲料中鱼粉的水平,随后对卵形鲳鲹的研究表明 γ -射线辐照处理可显著提高豆粕和大豆浓缩蛋白替代饲料中鱼粉的水平^[6]。本研究中,在相同替代水平下,利用未处理玉米蛋白粉,或 γ -射线辐照玉米蛋白粉作为鱼粉替代物对实验鱼的FI、WG和FCR无显著影响,表明 γ -射线辐照处理对于提高玉米蛋白粉作为卵形鲳鲹饲料鱼粉替代水平没有明显的正面效果。这一结果与对豆粕和大豆浓缩蛋白的研究结果^[5-6]不一致,原因有待分析。 γ -射线辐照豆粕不会改变其基本营养成分和氨基酸组成^[5],但会导致其蛋白质结构发生变化,使部分分子量较大的蛋白质转化为分子量较小的蛋白质^[6]。Wu等^[6]推测改变蛋白质结构,增加小分子蛋白质在蛋白质中的比例可能是 γ -射线辐照改善豆粕和大豆浓缩蛋白作为鱼粉替代物的机制。本研究发现 γ -射线辐照未导致玉米蛋白粉的基本营养组成发生明显变化,同时也未明显增加玉米蛋白粉中小分子蛋白质的比例,这或许是 γ -射线辐照不能显著提高玉米蛋白粉替代鱼粉水平的原由。

3.4 利用玉米蛋白粉替代卵形鲳鲹饲料鱼粉对环境的影响

鱼类饲料中氮、磷废物排放是造成养殖水体富营养化的主要原因,降低氮、磷废物排放量是优化水产养殖饲喂策略的目标。Cho等^[34]提出了计算水产养殖过程中饲料氮、磷固体和液

体废物量的模型, 根据该模型已评价了多种鱼类养殖中饲料来源的氮、磷废物量^[35]。Wang等^[36]改进了Cho的模型并评价了利用廉价动、植物蛋白原料替代饲料鱼粉对花鲈^[26]、卵形鲳鲹^[37]、点带石斑鱼(*Epinephelus malabricus*)^[36]氮、磷废物排放的影响。利用豆粕等植物蛋白原料替代饲料鱼粉往往导致饲料氮废物排放量增加^[6]。Sato等^[38]报道利用玉米蛋白粉替代饲料鱼粉可降低虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)的磷废物排放量。本实验中, TNW和TPW随着玉米蛋白粉替代饲料鱼粉水平的增加呈下降的趋势, 这一结果与NRE和PRE随替代水平增加而升高的趋势一致, 表明利用玉米蛋白粉替代鱼粉使得饲料的氮、磷利用率增加, 从而降低了饲料来源的氮、磷废物排放量。Wu等^[6]报道利用 γ -射线辐照豆粕或大豆浓缩蛋白替代卵形鲳鲹饲料鱼粉不能显著降低其饲料氮、磷废物排放量。本实验中, 用玉米蛋白粉或 γ -射线辐照玉米蛋白粉替代饲料鱼粉时TNW和TPW无显著差异, 表明 γ -射线辐照处理不能降低玉米蛋白粉替代饲料鱼粉时的氮、磷废物排放量。

综上所述, 添加玉米蛋白粉将卵形鲳鲹饲料中鱼粉含量降至200 g/kg, 对鱼的摄食、生长、食物利用、鱼体组成和氮、磷废物排放无显著的负面影响。通过 γ -射线辐照处理不能提高玉米蛋白粉替代卵形鲳鲹饲料鱼粉的水平, 其原因有待进一步研究。

参考文献:

- [1] FAO. FAO yearbook: fishery and aquaculture statistics[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014.
- [2] NRC. Nutrient Requirements of Fish and Shrimp[M]. Washington, DC: National Academy Press, 2011: 107-109.
- [3] Cho C Y, Bayley H S, Slinger S J. Partial replacement of herring meal with soybean meal and other changes in a diet for rainbow trout (*Salmo gairdneri*)[J]. Journal of the Fisheries Board of Canada, 1974, 31(9): 1523-1528.
- [4] Hardy R W. Utilization of plant proteins in fish diets: effects of global demand and supplies of fishmeal[J]. Aquaculture Research, 2010, 41(5): 770-776.
- [5] Zhang Y Q, Wu Y B, Jiang D L, *et al.* Gamma-irradiated soybean meal replaced more fish meal in the diets of Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*)[J]. Animal Feed Science and Technology, 2014, 197: 155-163.
- [6] Wu Y B, Wang Y, Ren G, *et al.* Improvement of fish meal replacements by soybean meal and soy protein concentrate in golden pompano diet through γ -ray irradiation[J]. Aquaculture Nutrition, 2016, 22(4): 873-880.
- [7] Gaber M H. Effect of γ -irradiation on the molecular properties of bovine serum albumin[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2005, 100(2): 203-206.
- [8] Farkas J. Irradiation for better foods[J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(4): 148-152.
- [9] Hertrampf J W, Piedad-Pascual F. Handbook on Ingredients for Aquaculture Feeds[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000: 573.
- [10] Robaina L, Moyano F J, Izquierdo M S, *et al.* Corn gluten and meat and bone meals as protein sources in diets for gilthead seabream (*Sparus aurata*): nutritional and histological implications[J]. Aquaculture, 1997, 157(3-4): 347-359.
- [11] Pereira T G, Oliva-Teles A. Evaluation of corn gluten meal as a protein source in diets for gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) juveniles[J]. Aquaculture Research, 2003, 34(13): 1111-1117.
- [12] Regost C, Arzel J, Kaushik S J. Partial or total replacement of fish meal by corn gluten meal in diet for turbot (*Psetta maxima*)[J]. Aquaculture, 1999, 180(1-2): 99-117.
- [13] Kikuchi K. Partial replacement of fish meal with corn gluten meal in diets for Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 1999, 30(3): 357-363.
- [14] Güroy B, Şahin İ, Kayalı S, *et al.* Evaluation of feed utilization and growth performance of juvenile striped catfish *Pangasianodon hypophthalmus* fed diets with varying inclusion levels of corn gluten meal[J]. Aquaculture Nutrition, 2013, 19(3): 258-266.
- [15] Abdel-Warith A A, Younis E M, Al-Asgah N A, *et al.* Maize gluten meal as a protein source in the diets for African catfish *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) and its effect on liver glycogen and histology[J]. Indian Journal of Fisheries, 2014, 61(3): 74-82.
- [16] Masagounder K, Hayward R S, Firman J D. Replacing fish meal with increasing levels of meat and bone meal,

- soybean meal and corn gluten meal, in diets of juvenile bluegill, *Lepomis macrochirus*[J]. Aquaculture Research, 2014, 45(7): 1202-1211.
- [17] Soliman E A, Furuta M. Influence of γ -irradiation on mechanical and water barrier properties of corn protein-based films[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2009, 78(7-8): 651-654.
- [18] Wang F, Han H, Wang Y, *et al.* Growth, feed utilization and body composition of juvenile golden pompano *Trachinotus ovatus* fed at different dietary protein and lipid levels[J]. Aquaculture Nutrition, 2013, 19(3): 360-367.
- [19] Niu J, Du Q, Lin H Z, *et al.* Quantitative dietary methionine requirement of juvenile golden pompano *Trachinotus ovatus* at a constant dietary cystine level[J]. Aquaculture Nutrition, 2013, 19(5): 677-686.
- [20] Lin H Z, Tan X H, Zhou C P, *et al.* Effect of dietary arginine levels on the growth performance, feed utilization, non-specific immune response and disease resistance of juvenile golden pompano *Trachinotus ovatus*[J]. Aquaculture, 2015, 437: 382-389.
- [21] Ma X Z, Wang F, Han H, *et al.* Replacement of dietary fish meal with poultry by-product meal and soybean meal in the diets for golden pompano *Trachinotus ovatus* reared in net pens[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2014, 45(6): 662-671.
- [22] Wu Y B, Ren G, Qin J G, *et al.* The suitable dose of gamma irradiation on soybean meal as a fish meal substitute in diets for golden pompano (*Trachinotus ovatus*)[J]. Aquaculture Research, 2016, 47(6): 1944-1953.
- [23] AOAC (Association of Official Analytical Chemists). Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists[M]. 16th ed. Arlington, Virginia: AOAC, 1995.
- [24] Zheng X Q, Liu X L, Yu S F, *et al.* Effects of extrusion and starch removal pretreatment on zein proteins extracted from corn gluten meal[J]. Cereal Chemistry, 2014, 91(5): 496-501.
- [25] Wang Y, Guo J L, Bureau D P, *et al.* Replacement of fish meal by rendered animal ingredients in feeds for cuneate drum (*Nibea miichthioides*)[J]. Aquaculture, 2006, 252(2-4): 421-428.
- [26] Wang Y, Wang F, Ji W X, *et al.* Optimizing dietary protein sources for Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicus*) with an emphasis on using poultry by-product meal to substitute fish meal[J]. Aquaculture Research, 2015, 46(4): 874-883.
- [27] Wu Y B, Han H, Qin J G, *et al.* Effect of feeding frequency on growth, feed utilization, body composition and waste output of juvenile golden pompano (*Trachinotus ovatus*) reared in net pens[J]. Aquaculture Research, 2015, 46(6): 1436-1443.
- [28] Wu Y V, Rosati R R, Sessa D J, *et al.* Evaluation of corn gluten meal as a protein source in tilapia diets[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1995, 43(6): 1585-1588.
- [29] 刘兴旺, 麦康森, 艾庆辉, 等. 玉米蛋白粉替代鱼粉对大菱鲆摄食、生长及体组成的影响[J]. 水产学报, 2012, 36(3): 466-472.
- Liu X W, Mai K S, Ai Q H, *et al.* Replacement of fish meal by corn gluten meal in diets of *Scophthatmus maximus*[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(3): 466-472.
- [30] Deng S X, Tian L X, Liu F J, *et al.* Toxic effects and residue of aflatoxin B1 in tilapia (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*) during long-term dietary exposure[J]. Aquaculture, 2010, 307(3-4): 233-240.
- [31] DeRouchey J M, Tokach M D, Nelssen J L, *et al.* Effect of irradiation of individual feed ingredients and the complete diet on nursery pig performance[J]. Journal of Animal Science, 2003, 81(7): 1799-1805.
- [32] Mani V, Chandra P. Effect of feeding irradiated soybean on nutrient intake, digestibility and N-balance in goats[J]. Small Ruminant Research, 2003, 48(2): 77-81.
- [33] Ghanbari F, Ghoorchi T, Shawrang P, *et al.* Comparison of electron beam and gamma ray irradiations effects on ruminal crude protein and amino acid degradation kinetics, and *in vitro* digestibility of cottonseed meal[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2012, 81(6): 672-678.
- [34] Cho C Y, Bureau D P. Reduction of waste output from salmonid aquaculture through feeds and feeding[J]. Progressive Fish-Culturist, 1997, 59(2): 155-160.
- [35] Lazzari R, Baldissero B. Nitrogen and phosphorus waste in fish farming[J]. Boletim do Instituto de Pesca, São Paulo, 2008, 34(4): 591-600.
- [36] Wang Y, Li K, Han H, *et al.* Potential of using a blend of rendered animal protein ingredients to replace fish meal

- in practical diets for malabar grouper (*Epinephelus malabricus*)[J]. *Aquaculture*, 2008, 281(1-4): 113-117.
- [37] Wang Y, Ma X Z, Wang F, *et al.* Supplementations of poultry by-product meal and selenium yeast increase fish meal replacement by soybean meal in golden pompano (*Trachinotus ovatus*) diet[J]. *Aquaculture Research*, 2017, 48(4): 1904-1914.
- [38] Satoh S, Hernández A, Tokoro T, *et al.* Comparison of phosphorus retention efficiency between rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed a commercial diet and a low fish meal based diet[J]. *Aquaculture*, 2003, 224(1-4): 271-282.

The potential to replace dietary fish meal with corn gluten meal for golden pompano (*Trachinotus ovatus*)

ZHU Ming¹, WU Yubo¹, REN Xing², HUANG Di¹, JIANG Danli¹, WANG Yan^{2*}

(1. College of Animal Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Abstract: An 8-week feeding trial was conducted to evaluate the potential of fish meal replacement with corn gluten meal (CGM) in diets for golden pompano (*Trachinotus ovatus*). A 2×3 layout was used. A basal diet (C) was formulated to contain 250 g/kg fish meal. In the test diets, 20, 40 and 60% of the fish meal in the basal diet was respectively replaced by either CGM (R) or γ -ray irradiated CGM (IR). The six test diets were abbreviated as R20, R40, R60, IR20, IR40 and IR60 (CGM was used as a fish meal substitute in diets R20, R40 and R60, and γ -ray irradiated CGM was used as a fish meal substitute in diets IR20, IR40 and IR60). All the diets were formulated at equal protein and lipid levels. Initial body weight of fish was (31.9±0.2) g. The results showed that weight gain, feed intake, feed conversion ratio (FCR), nitrogen retention efficiency (NRE), phosphorus retention efficiency (PRE) and body content of phosphorus were significantly affected by fish meal replacement level, while body phosphorus content was affected by the type of CGM used. Feed intake and weight gain decreased with increasing fish meal replacement level, regardless of CGM or γ -ray irradiated CGM as a fish meal substitute. At the same fish meal replacement level, no significant differences were found in the feed intake, weight gain, FCR, NRE, PRE, condition factor, hepatosomatic index and body composition (moisture, crude protein, crude lipid and ash) between fish fed the diets with fish meal replaced by CGM and γ -ray irradiated CGM. No significant differences were found in feed intake, weight gain, FCR and NRE between fish fed diets C and R20, suggesting that dietary fish meal level for *T. ovatus* can be reduced to 200 g/kg when CGM was used as a fish meal substitute. This study reveals that γ -ray irradiation could not improve CGM as a fish meal substitute in *T. ovatus* diet.

Key words: *Trachinotus ovatus*; corn gluten meal; γ -ray irradiation; growth; feed utilization

Corresponding author: WANG Yan. E-mail: ywang@zju.edu.cn

Funding projects: The Key Special Projects of Ningbo City(China) in Agriculture (2015C10003)