

王裕玉,徐钢春,聂志娟,等.水产动物饲料中动物蛋白源替代鱼粉研究进展[J].江苏农业科学,2019,47(16):24-29.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.16.006

水产动物饲料中动物蛋白源替代鱼粉研究进展

王裕玉,徐钢春,聂志娟,邵乃麟,徐 跑

(中国水产科学研究院淡水渔业研究中心/农业农村部淡水渔业和种质资源利用重点实验室,江苏无锡 214081)

摘要:由于动物蛋白源在营养组成上与鱼粉相似,且具有来源广泛和价格低廉等特点,因而具有成为水产饲料中鱼粉替代物的潜力。本文综述了国内外水生生物对动物蛋白源的应用情况、影响水生生物对动物蛋白源利用的制约因素以及提高应用效果的方法,以期对动物蛋白源的研究和应用提供参考。

关键词:水产动物饲料;动物蛋白源;鱼粉;生长性能;消化率;研究进展;综述

中图分类号: S963.32⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)16-0024-06

蛋白质是水产饲料中的主要营养物质,也是决定饲料成本的关键因素。大多数水产动物,尤其是肉食性鱼类对饲料中的蛋白质含量要求较高(40%~50%)^[1]。鱼粉含有高质量的蛋白质和必需氨基酸(EAA),富含 $\omega-3$ 不饱和脂肪酸,碳水化合物含量低,具有良好的适口性以及较高的消化吸收率等特点,因而一直以来是水产饲料中应用最广泛的优质蛋白源^[2-3]。近年来,受过度捕捞、环境污染及飓风等不良气候

的影响,海洋渔业资源衰减,全球每年的鱼粉产量维持在 650 万 t 左右,这个数值在未来甚至有可能下降^[4],而当今世界水产养殖业却以每年平均 11% 的速度增长^[1],据估算,到 2020 年,全球水产饲料中对鱼粉的需求量将超过总的鱼粉供应量^[5],这种供需不平衡的矛盾,导致了鱼粉价格和养殖成本不断上涨,从而严重制约了水产养殖业的可持续发展。此外,鱼粉中含有较多的磷而不能被水产动物利用,如果用量超过水产动物的需求量,多余的磷排放会造成养殖水体磷污染。因此,从经济利益和生态效益的角度出发,当务之急是寻找到能够部分或完全替代鱼粉的蛋白源。

动物器官和肌肉组织中含有高含量的蛋白质,既有存在于羽毛、毛发和蹄中的不可溶性蛋白,又有存在于血清和血浆中的可溶性蛋白。常见的动物性蛋白源有肉骨粉、禽副产品粉、血粉、羽毛粉、鱼类副产品和其他廉价动物资源,它们在营养组成上与鱼粉相似,价格低廉,更为重要的是,与植物蛋白源相比较,动物蛋白源不含抗营养因子以及碳水化合物,因此

收稿日期:2018-05-13

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项资金(编号:CARS-46);
江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(16)1004];江苏省水产
三新工程项目(编号:D2016-18)。

作者简介:王裕玉(1983—),男,山东日照人,博士,助理研究员,主要
研究方向为水产营养生理与生态养殖。E-mail:wangyy@ffrc.cn。
通信作者:徐 跑,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为鱼类
遗传育种、淡水名特水产品养殖、工程化循环水养殖。E-mail:
xup13806190669@163.com。

[61]胡小康,苏 芳,巨晓棠,等.农田土壤温室气体减排措施研究
进展[C]//2010 年全国低碳农业研讨会论文集.北京:中国农
学会,2010:203-206.

[62]Yan X,Du L,Shi S,et al. Nitrous oxide emission from wetland rice
soil as affected by the application of controlled-availability
fertilizers and mid-season aeration[J]. Biology and Fertility of
Soils,2000,32(1):60-66.

[63]李方敏,樊小林,刘 芳,等.控释肥料对稻田氧化亚氮排放的
影响[J].应用生态学报,2004(11):2170-2174.

[64]李 虎,王立刚,邱建军.农田土壤 N₂O 排放和减排措施的研究
进展[J].中国土壤与肥料,2007(5):1-5.

[65]Gao B,Ju X T,Zhang Q,et al. New estimates of direct N₂O
emissions from Chinese croplands from 1980 to 2007 using localized
emission factors[J]. Biogeosciences,2011,8(10):3011-3024.

[66]蔡祖聪,徐 华,马 静.稻田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放[M].
合肥:中国科学技术大学出版社,2009:161-170.

[67]Xing G X,Shi S L,Shen G Y,et al. Nitrous oxide emissions from
paddy soil in three rice-based cropping systems in China[J].
Nutrient Cycling in Agroecosystems,2002,64(1/2):135-143.

[68]熊正琴,邢光熹,施书莲,等.轮作制度对水稻生长季节稻田氧

化亚氮排放的影响[J].应用生态学报,2003,14(10):1761-1764.

[69]Li X C,Hu F,Shi W. Plant material addition affects soil nitrous
oxide production differently between aerobic and oxygen-limited
conditions[J]. Applied Soil Ecology,2013,64(1):91-98.

[70]Wang M L,Hu R G,Zhao J S,et al. Iron oxidation affects nitrous
oxide emissions via donating electrons to denitrification in paddy
soils[J]. Geoderma,2016,271:173-180.

[71]Li X L,Ma J,Yao Y J,et al. Methane and nitrous oxide emissions
from irrigated lowland rice paddies after wheat straw application and
midseason aeration[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2014,
100(1):65-76.

[72]杨士红,刘晓静,罗童元,等.生物炭施用对节水灌溉稻田温室
气体排放影响研究进展[J].江苏农业科学,2016,44(10):
5-9.

[73]魏甲彬,成小琳,周玲红,等.冬季施用鸡粪和生物炭对南方稻
田土壤 CO₂ 与 CH₄ 排放的影响[J].中国生态农业学报,2017,
25(12):1742-1751.

[74]杨士红,王乙江,徐俊增,等.节水灌溉稻田土壤呼吸变化及其
影响因素分析[J].农业工程学报,2015,31(8):140-146.

是水产饲料的潜在鱼粉替代源^[6]。在 20 世纪 60 年代,广大研究者就开始了利用各种动物蛋白源替代水产饲料中鱼粉的研究工作,并取得了较好的研究结果^[7-9]。本研究就国内外动物蛋白源的研究现状,在饲料中的适宜添加量及影响其利用的因素等方面作一综述,综合评价常用动物蛋白源的营养价值,以期对水产饲料的配制提供科学参考。

1 动物蛋白源消化吸收率

水产动物对动物蛋白产品的消化率差异较大。鲢鳙鱼类对禽畜粉的蛋白质消化率为 74% ~ 96%^[8,10],对肉骨粉的蛋白质消化率为 83% ~ 89%^[8,11],而美国红鱼对肉骨粉的蛋白质消化率为 74% ~ 79%^[12];鲑鱼对鱼粉、肉骨粉和家禽副产品粉的磷消化率分别为 17% ~ 81%、22% ~ 45% 和 15% ~ 64%,不同磷消化率可能是由骨磷水平及磷的化学形式的差异造成的^[13]。水产动物对动物蛋白源的利用能力因鱼的食性而存在差异,杂食性和肉食性鱼类对肉骨粉氨基酸表观消化率高达 74% ~ 84%,而甲壳类对其消化率仅为 55% ~ 57%。动物蛋白的来源和组织的不同会导致动物蛋白的组成成分和在鱼类上的消化率有明显差异。水产动物对动物组织中骨骼、羽毛以及相关组织的蛋白质消化率不如肌肉^[2]。

动物蛋白原料的加工工艺会影响到消化吸收率。麦瑞拉鲢幼鱼对羽毛粉干物质、粗蛋白、粗脂肪和总能的消化率分别为 55.28%、60.5%、61.95% 和 58.66%,显著低于鱼粉和鸡肉粉^[14];鲢鳙鱼类对羽毛粉的蛋白消化率为 71% ~ 87%^[8,10];酶处理羽毛粉的蛋白和 EAA 的消化率高于蒸汽水解羽毛粉,即使同一种羽毛粉在不同鱼类上的消化率也存在差异^[15];虹鳟对不同加工工艺的肉粉的干物质、蛋白质、脂肪和能量的消化率分别为 61% ~ 72%、83% ~ 89%、73% ~ 93% 和 68% ~ 83%^[8];虹鳟对喷干血粉的蛋白消化率(97% ~ 99%)高于烘干血粉(82%)、蒸干血粉(84%)和回环干燥血粉(85% ~ 88%)^[8],对回环血粉的赖氨酸消化率显著高于烘干血粉的消化率^[16]。在加工过程中,高温处理会破坏动物蛋白,尤其是使赖氨酸失去活性,从而使得其消化吸收率降低^[13]。

2 常见动物蛋白源

2.1 肉骨粉

肉骨粉(meat and bone meal, MBM)是最重要的动物蛋白产品之一,是来自于食品加工业的动物躯体、骨骼、内脏等下脚料,经过高温高压蒸制水解并分离出大部分脂肪后,加工而成的高蛋白饲料原料。粗蛋白含量高达 50% ~ 60%,氨基酸组成较合理,赖氨酸含量为 1% ~ 2.6%^[2];富含钙、磷等矿物质和 B 族维生素,价格相对便宜,可以作为鱼粉替代物应用于水产饲料中。但是,蛋氨酸、胱氨酸和其他含硫氨基酸是 MBM 的第一限制性氨基酸^[13];MBM 中磷含量很高(3.5% ~ 5.5%),因而 MBM 可以作为植物蛋白型水产饲料中潜在的磷源^[17],然而,这种磷大部分以相对不溶的羟基磷石灰和磷酸钙的形式存在,不宜被鱼类消化吸收^[18],采用酸化法可以提高骨磷的利用率。另外,MBM 含有的脂肪大部分属于饱和脂肪酸,很容易发生氧化酸败。

在日本沼虾^[9]、鲑鱼^[11]、金头鲷^[19]、低眼巨鲈^[20]、大黄鱼^[21-22]和非洲鲈鱼^[23]和牙鲆^[24]等鱼虾类的饲料中,肉粉/

肉骨粉替代鱼粉的比例为 20% ~ 75% 时,其生长性能、饲料效率和蛋白质效率等均未出现显著性差异,但当高比例 MBM 添加到饲料中,尤其是 100% 替代时会引起鱼类的生长急剧下降,死亡率升高,大多数的替代性研究规律符合这一生长模式。高替代比例会引起饲料蛋氨酸、赖氨酸和异亮氨酸的含量不足,氨基酸比例失调,同时 MBM 中脂肪的饱和度较高,影响了鱼虾类的适口性;另外,MBM 中高含量的灰分降低了鱼虾类对某些营养素的利用,从而导致鱼虾类的生长下降^[7]。

2.2 家禽副产品粉

家禽副产品粉(poultry by-product meal, PBM)是家禽屠宰之后的头、脖子、爪子和鸡架等下脚料,经提炼油脂和粉碎后得到的粉状产品,通常不包括羽毛和消化道部分,其蛋白质含量、氨基酸组成与鱼粉类似^[2],因而对很多水产动物来说 PBM 是一种有价值的蛋白源。随着欧美宠物市场对家畜副产品粉需求的升高,促使其加工技术不断提高,该类产品质量明显上升,宠物级鸡肉粉的蛋白含量和消化率等指标都已接近甚至优于鱼粉^[8]。但是,当前市场上宠物级鸡肉粉的价格和鱼粉价格相近,因此宠物级 PBM 在水产饲料配方中的应用受到限制。

PBM 营养价值因加工条件和原料组成的不同而有很大差异,进而导致替代水平出现差异。早期的研究表明,由于 EAA 含量和风味等因素的影响,鲢鳙类饲料中 PBM 替代鱼粉的比例一般低于 30%^[25]。最近的研究表明,高质量的 PBM 可以替代对虾和一些经济价值高的鱼饲料中 50% ~ 100% 的鱼粉,而不会影响其生长性能和鱼体健康等^[6,26]。与鱼粉组相比较,饲料中 15% ~ 40% 的鱼粉蛋白被 PBM 替代时,对小龙虾的生产性能等无显著影响,而当替代比例为 55% 时,成活率和生长性能显著降低,饲料系数显著升高^[27];佛罗里达鲷饲料中添加 0% ~ 9.8% 的 PBM 对生长无不良影响,但 PBM 添加量为 14.7% 时,其增重率显著低于全鱼粉组^[28]。PBM 中低含量的蛋氨酸和赖氨酸是影响鱼虾类利用效果的主要因素之一^[28],EAA 不平衡最终引起生长率下降。

2.3 血粉

血粉(blood meal, BM)是屠宰畜禽时的新鲜血液经过高温、高压、蒸煮、干燥和灭菌等工艺得到的黑红色粉状产品。它的粗蛋白质含量高达 70% ~ 80%,氨基酸含量较为平衡,亮氨酸、缬氨酸含量分别是进口鱼粉中的 2.65 倍、2.79 倍,赖氨酸含量高达 6% ~ 8%、铁含量高达 1 900 ~ 2 900 mg/kg,而磷含量仅为 0.3%。血粉比合成的赖氨酸更有优势,是高生物效价赖氨酸的优质原料^[8,11,13],常与谷物类等赖氨酸含量低的植物性蛋白原料复合使用,可平衡饲料 EAA 含量,可见,血粉潜在的营养价值高,具有很大的开发利用价值。但其略带苦味,适口性差,导致动物吸收率低。不同的加工方法导致血粉的营养价值表现出很大的差异性。高温干燥的 BM 具有很高的蛋白(85% ~ 90%)和赖氨酸(7% ~ 8%)含量;喷雾干燥血粉的缺点是未能解决适口性问题,而且在喷雾之前要除去血纤维,生产成本低;发酵 BM 过程中产生大量的菌体蛋白活性细胞和蛋白酶,提高了适口性和利用率。Lee 等的研究表明,血粉代替 50% 的鱼粉对尼罗罗非鱼生长和饲料利用无不利影响,100% 血粉组增重和特定生长率较低^[29];而饲料中完全用血粉替代鱼粉对胡子鲇存活、生长和饲料效率无不良影响^[30]。

2.4 羽毛粉

羽毛粉(feather meal, FeM)是家禽羽毛经过除杂、高温高压处理、灭菌和干燥等加工工艺制得的浅黄色、浅灰色的粉状产品。水解羽毛粉蛋白含量高(74%~91%),胱氨酸含量高(4%~5%),是半胱氨酸的良好来源,但赖氨酸(2%)、蛋氨酸(1%)、灰分和磷含量低;水解羽毛粉是蛋白酶、多不饱和脂肪酸和抗氧化肽的良好来源^[15]。研究者对日本沼虾、点带石斑鱼、牙鲆、南亚黑鲷、虹鳟、尼罗非鱼和欧洲鲈的研究发现,水解羽毛粉可以替代饲料中 25%~76% 鱼粉而对其生长和免疫功能等无负面影响^[9,15]。替代水平因鱼的种类和羽毛粉的加工方式不同而存在差异。值得注意的是,羽毛粉含有大量的二硫键而难以被水解利用,适口性和氨基酸平衡性都很差,因此限制了其作为蛋白源的利用。与其他蛋白源混合或者添加包被晶体氨基酸,可以改善其适口性和氨基酸平衡,从而使羽毛粉广泛应用于水产饲料中。

2.5 动物源蛋白水解物

动物源蛋白水解物(hydrolyzed animal protein, HAP)是以畜禽或水产动物为原料,采用酶、酸或碱作为生物催化剂,将蛋白质水解成含有多种氨基酸和肽类的水解液,再经喷雾干燥而成粉状产品;常见动物源蛋白水解物有乳清蛋白水解物、海洋鱼蛋白水解物和胶原蛋白水解物等,氨基酸含量在 45%~85% 之间。胶原蛋白粉是不完全蛋白质,其非必需氨基酸(NEAA)含量高于 EAA 含量,其中甘氨酸含量高达 22% 以上,精氨酸含量超过 5%,脯氨酸含量也较高,而蛋氨酸、赖氨酸、组氨酸、苏氨酸含量偏低^[31],胶原蛋白的风味好,可以作为部分替代鱼粉的蛋白源使用。

在大西洋鲑、虹鳟、欧洲海鲈、大西洋庸鲈、欧洲鲷、大菱鲆、鲤鱼和罗非鱼等鱼类饲料中添加适量鱼水解蛋白能有效提高其成活率、摄食量、生长速度、免疫反应、肠道发育和抗病力等^[32-34],这主要是由于不同分子量的可溶性多肽可能会影响鱼类的生长和免疫状况;鱼水解蛋白替代大菱鲆饲料中 10% 鱼粉蛋白时,生长性能及肠道组织学结构方面与鱼粉组无差异,但是要优于 10% 鸡水解蛋白替代组^[35];Cahu 等研究发现,饲料中用鱼水解蛋白替代 25% 鱼粉蛋白时,能促进海鲈成鱼消化模式的发生,而 50% 和 75% 替代时生长会减缓^[36];Liang 等对鲈鱼的研究中得到了类似的结果^[37]。当酶处理过的鱼水解蛋白或酸解鱼蛋白替代饲料中的鱼粉量低于 15% 时,对大西洋鲑的生长性能有积极效果^[38];在高含量植物蛋白饲料中,鱼水解蛋白替代 10% 鱼粉蛋白并不影响大菱鲆幼鱼的生长,然而,20% 替代降低了生长速度和饲料利用率,增加了采食量^[34]。由此可见,饲料中适量添加鱼水解蛋白是可行的,能达到降低饲料成本的目的。适宜替代量与动物的种类、规格以及鱼水解蛋白的特性有关。鱼蛋白水解的程度会影响水解蛋白产品的黏度、可溶性和分解产物等特性,进而会影响食物通过消化道的吸收力和吸收比率^[38];此外,鱼水解蛋白的溶解性还与原料、水解方法、温度和水解时间有关^[32]。

2.6 水产品下脚料

鱼类产品的加工过程中会产生鱼头、鱼皮、鱼鳍、鱼尾、鱼骨、残留鱼肉等水产品下脚料,通过乳酸菌发酵,可以将其分解为鱼类可消化吸收的小分子肽类和游离氨基酸等,同时提高自溶酶类的活性。适量的酸贮液体鱼蛋白(fish silage)可

作为水产饲料蛋白源,并取得了良好的应用效果,特别是在不利的微生物条件下,水解产物中的酸有助于鱼类的生长和福祉^[13,39]。Hanafy 等的研究结果显示,干燥的发酵水产品下脚料可以替代罗非鱼和非洲鲈鱼饲料中 25%~50% 的鱼粉而不会降低其生长速度^[40];Nwanna 等以酸贮液体虾蛋白作为替代源饲喂尼罗非鱼,结果显示,替代水平为 15% 时罗非鱼生长性能最好^[41]。饲喂这些动物蛋白源的效果较好的原因可能主要有 2 个方面:一是发酵产物中的 EAA 含量丰富,赖氨酸、蛋氨酸的含量高于鱼粉;二是产物中非蛋白质氮的大幅增加,这表明有些蛋白质是以多肽和氨基酸的形式存在的^[38]。然而,当发酵水产品下脚料、酸贮液体虾蛋白的替代比例分别超过 20%、50%、75% 时,非洲鲈鱼^[39]、罗非鱼和尼罗非鱼^[41]的生长会显著下降。酸贮液体鱼蛋白的质量受发酵方法的影响,一般认为酸性会引起鱼类的摄食和肠道的蛋白酶活性降低,这可能是导致高比例替代时生长减缓的原因。

2.7 昆虫源蛋白质

昆虫干体的蛋白质含量高达 50% 以上,其氨基酸种类和比例与动物需求指标接近。脂肪含量为 10%~50%,不饱和脂肪酸的含量很高;维生素、矿物质成分和微量元素含量较丰富;还含有抗菌肽、壳聚糖等可以调节机体生理功能的特殊活性物质,壳聚糖可以增强动物体内巨噬细胞的功能,降低胆固醇含量,促进动物肠道乳酸菌和双歧杆菌的生长等。昆虫具有食物转化率高、繁殖生长速度快、蛋白质含量高特点,因此,昆虫蛋白源是极具开发潜力的动物蛋白源之一。常见的可以作为饲料蛋白源的昆虫有蝇蛆、蚕蛹、黄粉虫等。研究表明,蝇蛆、蚕蛹、黄粉虫等昆虫蛋白部分替代鱼粉对罗非鱼、黄颡鱼等无负面影响,而高含量昆虫蛋白替代鱼粉严重限制了鱼类的生长^[24,42]。

3 影响动物蛋白应用的因素

3.1 适口性较差

动物蛋白源中脂肪的饱和度较高,18:2 ω -6 多不饱和脂肪酸含量高,而 ω -3 高不饱和脂肪酸含量较低,当动物蛋白替代鱼粉的比例过高时,饱和脂肪酸含量升高,这可能会影响鱼类的适口性,从而抑制动物的食欲^[8,21,27],进而降低生长性能。风味不好是限制动物蛋白产品利用的普遍缺点。Subhadra 等研究发现,在含 2% 血粉的饲料中添加 10% 的不同脂肪源,大口黑鲈摄食率和生长速度降低,可能是由于血粉缺少风味氨基酸导致适口性差^[43]。然而,Samocha 等对凡纳滨对虾^[3]、Campos 等对欧洲鲈的研究^[15]发现,动物蛋白高比例替代饲料鱼粉蛋白时,其摄食强度未受到影响,适口性并不是影响鱼虾利用动物蛋白源的重要因素。有的学者在对尼罗罗非鱼^[44]和斑点叉尾鲷^[45]的研究中均发现,MBM 具有提高饲料风味和充当诱食剂的作用,但是不排除高含量的动物蛋白降低适口性的可能。不同的研究者对适口性的研究结论存在差异,这可能与动物蛋白质量、加工方式和动物的种类有关。

3.2 消化吸收率较差

动物蛋白较低的消化率是高比例动物蛋白替代引起生长降低的原因之一^[7,21]。研究表明,大黄鱼对肉骨粉的干物质(52.4%)、蛋白质(78.3%)、脂肪(74.2%)、磷(27.6%)和能量(70.2%)的消化率显著低于白鱼粉和红鱼粉(分别为

70.0% 和 65.2%、92.4% 和 89.3%、90.5% 和 88.3%、60.3% 和 53.2%、82.6% 和 80.5%)^[18]; 军曹鱼对肉骨粉的干物质(60.42%)、蛋白质(87.21%)和磷(62.44%)的消化率显著低于鱼粉(87.56%、96.27%和71.22%)^[45]。动物蛋白源消化率低的主要原因有3个:(1)灰分含量高。蛋白质的可消化氨基酸含量与灰分含量呈负相关。MBM 和 PBM 中灰分含量高达20%以上^[2],影响了蛋白质和氨基酸消化率,而低蛋白消化并不是由灰分直接造成的,而是由结缔组织的含量和质量决定的。(2)氨基酸不平衡。低质量的胶原质缺乏数种 EAA,引起氨基酸指数失调,从而降低蛋白质的消化率^[13]; MBM 氨基酸组成不平衡,导致在虹鳟和鲤鱼饲料中 MBM 替代鱼粉后,消化率会显著降低^[46-47]。(3)饱和脂肪的影响。对银鲈^[48]和杂交条纹鲈^[49]的研究发现,鱼类能够很好地利用鱼粉、鸡肉粉、羽毛粉的脂肪作为能量来源,然而对肉骨粉的利用能力较低,这是因为鱼类对饱和脂肪的消化吸收能力较差。

3.3 氨基酸不平衡

鱼粉中 EAA 含量较高,种类齐全,各种氨基酸之间的比例与水产动物需求比例相似。动物蛋白源中蛋白质含量较高,但是一般会缺乏一种或某几种 EAA。Ile 和蛋氨酸是 BM 的限制性氨基酸^[2];赖氨酸、蛋氨酸和色氨酸是 PBM 的限制性氨基酸^[28];Met 是 MBM 的第一限制性氨基酸^[47];骨胶原蛋白在结缔组织和软骨等组织中的含量很高,占 MBM 蛋白的50%~60%,色氨酸含量偏低^[50];Ai 等研究认为替代水平超过45%时,赖氨酸、精氨酸和苏氨酸含量不足,大黄鱼生长性能明显下降与 EAA 不平衡有关^[21]。当饲料中动物蛋白源的添加量逐渐升高,特别是其作为饲料中唯一蛋白源时,氨基酸不平衡导致的负面效应表现得越来越明显^[7,9,47]。

4 改善动物蛋白源替代鱼粉效果的措施

4.1 添加氨基酸

研究发现,在尼罗罗非、牙鲆、杂交条纹鲈饲料中添加某种或某几种 EAA,可以改善饲料 EAA 平衡,提高对饲料蛋白的利用,从而促进生长和提高饲料效率^[24,44,51],且添加氨基酸混合物的效果比添加单一氨基酸效果更明显。Hu 等研究发现,以鸡肉粉、牛肉骨粉、喷雾血球干燥粉、水解羽毛粉(40:35:20:5)组成的混合蛋白替代20%鱼粉时,对花鲈生长无影响,而高比例替代会引起肝脏脂肪变性,进而影响健康和肉质,饲料中补充赖氨酸、蛋氨酸、苏氨酸极显著提高了其生长性能^[52];Mendoza 等用酶处理的水解羽毛粉可以替代凡纳滨对虾饲料中43%的鱼粉,当适当添加包膜 EAA 和必需脂肪酸时,替代水平能超过60%^[53];汽压水解羽毛粉替代凡纳滨对虾饲料中33%鱼粉对其生长性能无不良影响,在饲料中补充赖氨酸与蛋氨酸,替代比例可达到66%^[54];在鸡肉粉完全替代鱼粉的饲料中补充包被氨基酸明显促进凡纳滨对虾的生长,且达到了鱼粉组的饲喂效果^[26]。然而,对佛罗里达鲷^[28]和尼罗罗非鱼^[29]的研究发现,添加晶体氨基酸对生长无明显效果,并不能提高鱼虾对动物蛋白源的利用。水产饲料中添加晶体氨基酸的效果不理想的可能原因归结于晶体氨基酸溶失和氨基酸吸收不同步^[1]。

4.2 多种蛋白源的搭配

虽然各种蛋白源中氨基酸的种类和比例不同,但是将不

同动植物蛋白源按照一定比例搭配使用,可以使原料中的 EAA 互补,提高饲料的必需氨基酸指数(EAAI),从而在整体上提高饲料的营养水平,使其比例接近水生生物需求模式,起到促生长的作用^[55]。向日葵饼、花生饼和血粉的混合物可以100%替代鱼粉蛋白,而不会影响鲈鱼的生长与健康^[56]; Millamena 报道,处理过的血粉和肉粉按照1:4比例替代石斑鱼稚鱼饲料中80%的鱼粉蛋白对其生长、成活和饲料转化率无不良影响,但100%替代组生长率显著降低^[7];在大菱鲆幼鱼饲料中,酶解动物软骨蛋白粉与小麦粉、豆粕蛋白复合饲料替代40%鱼粉,不影响其生长、摄食、存活,并能保持其肉质^[57];对尼罗罗非鱼^[44]和杂交鳢^[58]的研究也表明,动植物复合蛋白源替代鱼粉,可提高对蛋白源的利用,提高机体的抗氧化能力。然而,有研究指出,混合蛋白源替代鱼粉并没有达到预期的效果,这是因为饲料中某些 EAA(精氨酸和赖氨酸,亮氨酸和异亮氨酸)的拮抗作用,会造成氨基酸不平衡。血粉中具有较为丰富的亮氨酸,但异亮氨酸较缺乏,若投喂高比例的血粉,由于亮氨酸的拮抗作用,会造成异亮氨酸缺乏症^[59]。

4.3 适当的加工工艺

加热:用于生产动物蛋白的原料中通常含有沙门氏杆菌、大肠杆菌、链球菌、布鲁氏菌、孢子形成菌以及霉菌等各种各样的微生物。一般通过提炼加工过程来破坏这些潜在的有害病原微生物。如植物菌对热较为敏感,在油脂提炼过程中被完全杀死,但是过度的蒸汽加热处理会破坏半胱氨酸和赖氨酸等热敏性氨基酸,因而造成氨基酸的不平衡,降低某些氨基酸的利用率。

发酵法:利用现代生物工程发酵技术,接种霉菌、酵母菌等,经过一系列酶促反应,将动物蛋白分解为小分子的短肽和游离氨基酸等;也可利用特定的细菌发酵,使得有效养分释放出来或者被细菌利用重组为新的菌体蛋白。动物血经微生物发酵后,游离氨基酸总量增加14.9倍,蛋氨酸、色氨酸等必需氨基酸含量也会增加,另外,发酵血粉具有酒香味,适口性好,且富含维生素及未知生长因子。在陆生动物以及水产动物上的研究表明,发酵技术能够促进动物生长,增强抗病能力。

酶化法:利用生物酶等对动物下脚料进行酶化处理,该加工方法生产出来的血粉等动物性蛋白含量高达80%~93%,游离氨基酸含量高,且 EAA 组成合理,易被动物吸收利用,是一种很有开发前景的蛋白源;该加工方法具有设备简单、投资少、技术要求不高的特点。利用酶处理的羽毛粉饲喂罗非鱼稚鱼、幼鱼的效果优于饲喂水解羽毛粉^[6]。

热喷法:热喷羽毛、毛发、蹄角等角蛋白类可制成角蛋白粉、热喷血粉、热喷孵化副产物及死禽等,经热喷技术处理过的动物性下脚料,可灭活病原微生物,并保持蛋白质的生物学价值,富含 EAA,是一项非常有应用前景的加工方法。用热喷技术加工的蛋白源可直接投喂或配成配合饲料投喂。

5 小结

许多研究者用价格低廉而来源丰富的动物蛋白源部分或完全代替鱼粉进行广泛的研究,并取得了较为明显的应用效果,但是有关水生生物对动物蛋白源的利用还存在许多研究盲区,相关的研究方法、研究深度及广度均有待于进一步加

强,为了进一步发挥动物蛋白的最大潜力,值得深入研究的领域包括:(1)不同的水生生物利用同一种动物蛋白源的比较研究;(2)探讨水生动物对所添加晶体氨基酸的消化、吸收及排泄等机制;(3)通过发酵和酶工程等技术对动物蛋白源进行加工处理,以提高饲料原料的营养价值。

参考文献:

- [1] Deng J M, Mai K S, Ai Q H, et al. Effects of replacing fish meal with soy protein concentrate on feed intake and growth of juvenile Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus* [J]. Aquaculture, 2006, 258 (1): 503–513.
- [2] Natural Research Council. Nutrient requirement of fish and shrimp [M]. Washington D C: National Academic Press, 2011: 282.
- [3] Samocha T M, Davis D A, Saoud I P, et al. Substitution of fish meal by co-extruded soybean poultry by-product meal in practical diets for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei* [J]. Aquaculture, 2004, 231 (1/2/3/4): 197–203.
- [4] Tacon A G, Metian M. Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: trends and future prospects [J]. Aquaculture, 2008, 285 (1): 146–158.
- [5] New M B, Wijkstroem U N. Use of fishmeal and fish oil in aquafeeds: further thoughts on the fishmeal trap [C]//FAO Fisheries circular. Rome: FAO, 2002: 127.
- [6] Fasakin E A, Serwata R D, Davies S J. Comparative utilization of rendered animal derived products with or without composite mixture of soybean meal in hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* × *Oreochromis mossambicus*) diets [J]. Aquaculture, 2005, 249 (1): 329–338.
- [7] Millamena O M. Replacement of fish meal by animal by-product meals in a practical diet for grow-out culture of grouper *Epinephelus coioides* [J]. Aquaculture, 2002, 204 (1/2): 75–84.
- [8] Bureau D P, Harris A M, Cho C Y. Apparent digestibility of rendered animal protein ingredients for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Aquaculture, 1999, 180 (3/4): 345–358.
- [9] Yang Y, Xie S Q, Lei W, et al. Effect of replacement of fish meal by meat and bone meal and poultry by-product meal in diets on the growth and immune response of *Macrobrachium nipponense* [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2004, 17 (2): 105–114.
- [10] Tibbetts S M, Milley J E, Lall S P. Apparent protein and energy digestibility of common and alternative feed ingredients by Atlantic cod, *Gadus morhua* (Linnaeus, 1758) [J]. Aquaculture, 2006, 261 (4): 1314–1327.
- [11] Bureau D P, Harris A M, Bevan D J, et al. Feather meals and meat and bone meals from different origins as protein sources in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) diets [J]. Aquaculture, 2000, 181 (3/4): 281–291.
- [12] McGoogan B B, Reigh R C. Apparent digestibility of selected ingredients in red drum (*Sciaenops ocellatus*) diets [J]. Aquaculture, 1996, 141 (3/4): 233–244.
- [13] Meeker D L. 动物蛋白及油脂产品加工及使用 [M]. 2 版. 香港: 美国动物蛋白及油脂提炼协会, 2006: 56.
- [14] 房进广, 梁旭方, 刘立维, 等. 麦瑞拉拉鲢幼鱼对 12 种原料表观消化率的比较研究 [J]. 水生生物学报, 2016, 40 (6): 1178–1186.
- [15] Campos I, Matos E, Marques A, et al. Hydrolyzed feather meal as a partial fishmeal replacement in diets for European seabass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles [J]. Aquaculture, 2017, 476: 152–159.
- [16] Ei-Haroun E R, Bureau D P. Comparison of the bioavailability of lysine in blood meals of various origins to that of L-lysine HCL for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Aquaculture, 2007, 262 (2/3/4): 402–409.
- [17] Suloma A, Mabroke R S, El-Haroun E R. Meat and bone meal as a potential source of Phosphorus in plant-protein-based diets for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Aquaculture International, 2013, 21 (2): 375–385.
- [18] 李会涛, 麦康森, 艾庆辉, 等. 大黄鱼对几种饲料蛋白原料消化率的研究 [J]. 水生生物学报, 2007, 31 (3): 370–376.
- [19] Moutinho S, Martinez-Llorens S, Tomas-Vidal A A, et al. Meat and bone meal as partial replacement for fish meal in diets for gilthead seabream (*Sparus aurata*) juveniles: growth, feed efficiency, amino acid utilization, and economic efficiency [J]. Aquaculture, 2017, 468 (1): 271–277.
- [20] Kader M A, Bulbul M, Yokoyama S, et al. Evaluation of meat and bone meal as replacement for protein concentrate in the practical diet for sutchi catfish, *Pangasius hypophthalmus* (Sauvage, 1878), reared under pond condition [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2011, 42 (3): 287–296.
- [21] Ai Q H, Mai K S, Tan B P, et al. Replacement of fish meal by meat and bone meal in diets for large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea* [J]. Aquaculture, 2006, 260 (1/2/3/4): 255–263.
- [22] Li J, Zhang L, Mai K S, et al. Potential of several protein sources as fish meal substitutes in diets for large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea* R [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2010, 41 (2): 278–283.
- [23] Goda A M, El-Haroun E R, Chowdhury M. Effect of totally or partially replacing fish meal by alternative protein sources on growth of African catfish *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) reared in concrete tanks [J]. Aquaculture Research, 2007, 38 (3): 279–287.
- [24] Lee J, Choi I C, Kim K T, et al. Response of dietary substitution of fishmeal with various protein sources on growth, body composition and blood chemistry of olive flounder (*Paralichthys olivaceus*, Temminck & Schlegel, 1846) [J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2012, 38 (3): 735–744.
- [25] Fowler L G. Poultry by-product meal as a dietary-protein source in fall chinook salmon diets [J]. Aquaculture, 1991, 99 (3/4): 309–321.
- [26] 林建伟, 张春晓, 孙云章, 等. 鸡肉粉完全替代鱼粉饲料中补充包被氨基酸对凡纳滨对虾生长、体成分及组织氨基酸含量的影响 [J]. 水生生物学报, 2016, 40 (4): 700–711.
- [27] Fuertes J B, Celada J D, Carral J M, et al. Replacement of fish meal with poultry by-product meal in practical diets for juvenile crayfish (*Pacifastacus leniusculus* Dana, Astacidae) from the onset of exogenous feeding [J]. Aquaculture, 2013, 405: 22–27.
- [28] Rossi J W, Davis D A. Replacement of fishmeal with poultry by-product meal in the diet of Florida pompano *Trachinotus carolinus* L. [J]. Aquaculture, 2012, 338–341: 160–166.
- [29] Lee K J, Bai S C. Hemoglobin power as a dietary animal protein source for juvenile Nile tilapia [J]. The Progressive Fish-Culturist,

- 1997,59(4):266–271.
- [30] Agbebi O T, Otubusin S O, Ogunleye F O. Effect of different levels of substitution of fishmeal with blood meal in pelleted feeds on catfish *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) culture in net cages[J]. European Journal of Scientific Research, 2009, 31(1):6–10.
- [31] 谷瑞增, 刘艳, 林峰, 等. 蛋白水解物在动物细胞培养中的应用研究进展[J]. 生物技术通报, 2012(9):21–27.
- [32] Kotzamanis Y P, Gisbert E, Gatesoupe F J, et al. Effects of different dietary levels of fish protein hydrolysates on growth, digestive enzymes, gut microbiota, and resistance to *Vibrio anguillarum* in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) larvae[J]. Comparative Biochemistry and Physiology A – molecular & Integrative Physiology, 2007, 147(1):205–214.
- [33] Day O J, Howell B R, Jones D A. The effect of dietary hydrolyzed fish protein concentrate on the survival and growth of juvenile Dover sole, *Solea solea* (L.), during and after weaning[J]. Aquaculture Research, 1997, 28(12):911–921.
- [34] Xu H G, Mu Y C, Zhang Y E, et al. Graded levels of fish protein hydrolysate in high plant diets for turbot (*Scophthalmus maximus*): effects on growth performance and lipid accumulation[J]. Aquaculture, 2016, 454:140–147.
- [35] 牟玉超, 柳茜, 卫育良, 等. 饲料中添加两种蛋白水解物对大菱鲆 (*Scophthalmus maximus* L.) 幼鱼生长性能及肠道组织学结构的影响[J]. 渔业科学进展, 2017, 38(2):83–90.
- [36] Cahu C L, Zambonino I L, Quazuguel P, et al. Protein hydrolysate vs. fish meal in compound diets for 10 – day old sea bass *Dicentrarchus labrax* larvae[J]. Aquaculture, 1999, 171(1/2):109–119.
- [37] Liang M, Wang J, Chang Q, et al. Effects of different levels of fish protein hydrolysate in the diet on the nonspecific immunity of Japanese sea bass, *Lateolabrax japonicus* (Cuvieret Valenciennes, 1928)[J]. Aquaculture Research, 2006, 37(1):102–106.
- [38] Refstie S, Olli J J, Standal H. Feed intake, growth, and protein utilisation by post – smolt Atlantic salmon (*Salmon salar*) in response to graded levels of fish protein hydrolysate in the diet[J]. Aquaculture, 2004, 239(1):331–349.
- [39] Olsen R L, Toppe J. Fish silage hydrolysates; not only a feed nutrient, but also a useful feed additive[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 66:93–97.
- [40] Hanafy M A, Ibrahim S M. Storage stability of yogurt fermented fish silage[J]. Journal of Egyptian Academic Society Environment, 2004, 5(2):23–41.
- [41] Nwanna L C, Daramola J A. Harnessing of shrimp head waste in nigerian for low cost production of tilapia[J]. Pakistan Journal of Nutrition, 2001, 2:339–345.
- [42] Ogunji J O, Nimptsch J, Wiegand C, et al. Evaluation of the influence of housefly maggot meal (maggot meal) diets on catalase, glutathione S – transferase and glycogen concentration in the liver of *Oreochromis niloticus* fingerling[J]. Comparative Biochemistry and Physiology A – molecular & Integrative Physiology, 2007, 147(4):942–947.
- [43] Subhadra B, Lochmann R, Rawles S, et al. Effect of fish – meal replacement with poultry by – product meal on the growth, tissue composition and hematological parameters of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) fed diets containing different lipids[J]. Aquaculture, 2006, 260(1):221–231.
- [44] Wu Y V, Tudor K W, Brown P B, et al. Substitution of plant proteins or meat and bone meal for fish meal in diets of Nile tilapia[J]. North American Journal of Aquaculture, 1999, 61(1):58–63.
- [45] Mohson A A, Lovell R T. Partial substitution of soybean meal with animal protein sources in diets for channel catfish[J]. Aquaculture, 1990, 90(3):303–311.
- [46] Zhou Q C, Tan B P, Mai K S, et al. Apparent digestibility of selected feed ingredients for juvenile cobia *Rachycentron canadum* [J]. Aquaculture, 2004, 241(1/2/3/4):441–451.
- [47] Watanabe T, Pongmaneerat J. Quality evaluation of some animal protein sources for rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* [J]. Nipón Suisan Gakkaishi, 1991, 57(3):495–501.
- [48] Allan G L, Parkinson S, Booth M A, et al. Replacement of fish meal in diets for Australian silver perch, *Bidyanus bidyanus*: I. Digestibility of alternative ingredients[J]. Aquaculture, 2000, 186(3/4):293–310.
- [49] Sullivan J A, Reigh R C. Apparent digestibility of selected feedstuffs in diets for hybrid striped bass (*Morone saxatilis* × *Morone chrysops*) [J]. Aquaculture, 1995, 138(1/2/3/4):313–322.
- [50] Wang X C, Castanon F, Parsons C M. Order of amino acid limitation in meat and bone meal[J]. Poultry Science, 1997, 76(1):54–58.
- [51] Gaylord T G, Rawles S D. The modification of poultry byproduct meal for use in hybrid striped bass diets[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2005, 36(3):363–374.
- [52] Hu L, Yun B, Xue M, et al. Effects of fish meal quality and fish meal substitution by animal protein blend on growth performance, flesh quality and liver histology of Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*) [J]. Aquaculture, 2013, 372(1):52–61.
- [53] Mendoza R, Dedios A, Vazquez C, et al. Fish meal replacement with feather – enzymatic hydrolysates co – extruded with soybean meal in practical diets for the Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. Aquaculture Nutrition, 2001, 7(3):143–151.
- [54] Cheng Z J, Behnke K C, Dominy W G. Effect of feather meal on growth and body composition of the juvenile Pacific white shrimp, *Litopenaeus Vannamei* [J]. Journal of Applied Aquaculture, 2002, 12(1):57–68.
- [55] 麦康森. 水产动物营养与饲料科学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016:32.
- [56] Nyina – Wamwiza L, Wathélet B, Richir J, et al. Partial or total replacement of fish meal by local agricultural by – products in diets of juvenile African catfish (*Clarias gariepinus*): growth performance feed efficiency and digestibility[J]. Aquaculture Nutrition, 2010, 16(3):237–247.
- [57] 刘运正, 何良, 麦康森, 等. 新型复合动植物蛋白源部分替代鱼粉对大菱鲆幼鱼生长和肉质的影响[J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2016, 46(1):33–39.
- [58] 林仕梅, 马卉佳, 徐韬, 等. 复合蛋白源替代鱼粉对杂交鳢生长、体组成与生化指标的影响[J]. 水产学报, 2018, 42(5):744–753.
- [59] 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(3/4):299–311.