



大豆浓缩蛋白替代鱼粉加工现状及对鱼类影响

朱 瑞, 李 良, 吴莉芳, 李 民, 于 哲, 段 晶, 王婧瑶

(吉林农业大学 动物科学技术学院/动物生产及产品质量安全教育部重点实验室/动物营养与饲料科学重点实验室, 吉林 长春 130118)

摘 要: 鱼粉价格上涨, 饲料成本上升, 严重制约着水产养殖业的可持续发展, 开发新型饲料蛋白源、节约鱼粉蛋白成为亟待解决的重要问题。大豆浓缩蛋白(soy protein concentrate, SPC)是由豆粕经乙醇或甲醇提取后的大豆制品。它具有高蛋白质含量(65%~70%)、高消化率, 较少的抗营养因子等特点, 被广泛应用于鱼类配合饲料。本文概述了大豆浓缩蛋白的理化特性、产品分类、加工工艺及替代鱼粉对鱼类生长、消化、免疫、肠道组织、抗氧化、蛋白质代谢等方面的影响, 为合理开发利用大豆浓缩蛋白, 节约鱼粉蛋白, 降低饲料成本提供理论依据。

关键词: 大豆浓缩蛋白; 生长性能; 消化酶活力; 肠道组织; 肝脏抗氧化

Soy Protein Concentrate Instead of Fish Meal Processing Status and Impact on Fish

ZHU Rui, LI Liang, WU Li-fang, LI Ming, YU Zhe, DUAN Jing, WANG Jing-yao

(College of Animal Science and Technology, Jilin Agricultural University/Key Laboratory of Animal Production, Product Quality and Security, Ministry of Education/Jilin Provincial Key Laboratory of Animal Nutrition and Feed Science, Changchun 130118, China)

Abstract: The price of fish meal and the cost of feed is rising, which seriously restricts the sustainable development of aquaculture. The development of new feed protein sources and the conservation of fish meal protein have become urgent issues. Soy protein concentrate (SPC) with typically high protein content (65% - 70%), high digestibility and less anti-nutritional factors, is produced through aqueous ethanol or methanol extraction of soybean meal. It is widely used in fish compound feed. The physicochemical properties, variety requirements and processing techniques of soy protein concentrate were summarised and the effects of soy protein concentrate instead of fish meal on fish growth, digestive, immune and intestinal tissue, oxidation resistance and protein metabolism were reviewed on the basis of related literature at home and abroad. And these may provide theoretical basis for the rational development and utilization of soy protein concentrate, the conservation of fish meal protein and the reduction of feed cost.

Keywords: Soy protein concentrate; Growth performance; Digestive enzyme activity; Intestinal tissue; Liver antioxidant

近年来,随着水产养殖业的发展,鱼粉资源短缺,价格上涨,寻求鱼粉资源的替代品已成为国际性研究课题^[1],因此,选用廉价、绿色安全、来源广泛的植物蛋白用于替代鱼粉蛋白具有重要意义^[2]。大豆浓缩蛋白是由豆粕去除可溶性非蛋白部分后的大豆制品,具有营养丰富、价格合理、供应稳定等特点,被广泛应用于鱼类配合饲料^[3]。目前,国内外学者对鱼类配合饲料中大豆浓缩蛋白替代鱼粉做了相关研究,研究的鱼类主要有黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)^[4]、瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)^[5]、大菱鲈(*Scophthalmus maximus*)^[6]、中华鲟(*Acipenser sinensis*)^[7]、鲤鱼(*Cyprinus carpio*)^[8]、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[9]、塞内加尔舌鳎(*Solea senegalensis*)^[10]、军曹鱼(*Rachycentron canadum*)^[11]、牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)^[12]、长鳍鲷(*Seriola rivoliana*)^[13]、大西洋庸鲷(*Hippoglossus hippoglossus*)^[14]、大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)^[15]、大

西洋鲑(*Salmo salar* L.)^[16]、星斑川鲷(*Platichthys stellatus*)^[17]、石斑鱼(*Epinephelus*)^[18]、海鲈(*Lateolabrax japonicus*)^[19]和黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)^[20]等,研究内容主要集中在大豆浓缩蛋白替代鱼粉对鱼类生长性能、消化酶活性、非特异性免疫、肠道组织形态、抗氧化能力和蛋白质代谢酶活性等方面。

本文概述了大豆浓缩蛋白的理化特性、产品分类、加工工艺及其替代鱼粉蛋白对鱼类生长、消化酶活性及肠道组织等的影响,为合理开发利用大豆浓缩蛋白,节约鱼粉蛋白,降低饲料成本提供理论依据。

1 大豆浓缩蛋白理化性质

大豆浓缩蛋白是具有特殊香味的乳白色或浅黄色粉末,是由优质豆粕去除水溶性或醇溶性非蛋白部分(可溶性糖、灰分及气味因子等)后,所制得

收稿日期:2018-10-22

基金项目:吉林省自然科学基金(20170101026JC)。

第一作者简介:朱瑞(1995-),男,在读硕士,主要从事鱼类营养与饲料研究。E-mail:1738158380@qq.com。

通讯作者:吴莉芳(1970-),女,博士,教授,主要从事鱼类营养与饲料研究。E-mail:wulifang2915@126.com。

的粗蛋白质(N×6.25)含量为65%~70%、粗脂肪1%以下、粗灰分6%左右、水分7%~9%、粗纤维4%左右的大豆蛋白制品^[21]。与其它大豆制品相比,大豆浓缩蛋白具有更高的蛋白质和氨基酸水平;与鱼粉相比,两者蛋白含量大致接近,虽然其氨基酸组成不如鱼粉均衡,但是通过外源氨基酸的补充,其营养价值能得到大幅提升^[15]。

在大豆浓缩蛋白加工过程中,热不稳定抗营养因子(蛋白酶抑制因子、凝集素和抗维生素因子等)的清除^[22]、非蛋白可溶性物质(寡糖、灰分及醇溶性蛋白等)的浸出以及大豆抗原蛋白的变性^[23]使得其抗营养因子含量大幅降低。此外,通过物理、化学、生物酶等方法改性后的大豆浓缩蛋白还具有良好的溶解、乳化、凝胶、吸油、吸水、附着等功能特性^[24],因此,其广泛应用于食品及动物配合饲料中。

2 大豆浓缩蛋白的分类

大豆浓缩蛋白因其品种、原料产地及加工条件的不同,产品质量不尽相同,通常按其质量可分为食品级和饲料级。食品级选用国产非转基因大豆生产的低温粕为原料,具有高凝胶、乳化及高分散等特性^[21],其蛋白质含量大于68%,水分含量为7%~9%,脂肪含量小于1%,灰分含量小于6.0%,纤维总量小于4%,对产品微生物和抗营养因子含量有限制,已广泛运用于肉类制品、烘焙蛋糕、冰激淋、糖果等中。饲料级选用进口转基因大豆生产的高温粕为原料,要求其蛋白质含量大于65%,水分含量为7%~9%,脂肪含量小于1%,只对抗营养因子含量有限制^[23],广泛运用于畜牧、水产配合饲料中。

3 大豆浓缩蛋白生产加工情况

大豆浓缩蛋白可通过超滤法^[25]、湿热浸提法、酸法或者醇法^[23]处理优质豆粕获得。超滤法是通过超滤膜选择性去除可溶性非蛋白小分子,从而分离出大豆浓缩蛋白,其蛋白质提取效率高、氮溶解指数高且蛋白质功能完善,但是成本较高,饲料行业难以接受;湿热浸提法^[23]是利用蛋白质受热变性为不溶性物质从而分离出大豆浓缩蛋白,其工艺简单、成本低廉,但蛋白质功能部分丧失,会发生美拉德反应,而且风味较差;酸法^[23]是利用蛋白质在等电点(pI4.5)时溶解度最小的特性来生产大豆浓缩蛋白,产出的大豆浓缩蛋白氮溶解指数高、蛋白质回收率高,但废液不宜处理,而且风味较差;醇法是利用豆粕中蛋白质能溶于水而不溶于醇这一特性,用醇溶液将豆粕中非蛋白可溶物质浸出,醇法

生产的大豆浓缩蛋白氨基酸含量和比例几乎不受影响、大豆乳清蛋白损失少且废液易于处理,虽然其氮溶解指数较低,蛋白质有部分变性,但是经技术不断改进,此方法已成为生产大豆浓缩蛋白的热点技术。目前90%的大豆浓缩蛋白由醇法加工而成。

4 大豆浓缩蛋白替代鱼粉蛋白对鱼类的影响

4.1 对鱼类生长、饲料利用及肌肉营养成分的影响

大豆浓缩蛋白具有氨基酸含量均衡、抗营养因子少、蛋白质含量及利用率高等特点^[2],是一种优质植物性蛋白源,然而,饲料中过量的大豆浓缩蛋白替代鱼粉蛋白可能会对鱼类的健康造成负面影响。Kissinger等^[13]在长鳍鲷、Wang等^[15]在大黄鱼和Kalhor等^[20]在黑鲷的研究表明,大豆浓缩蛋白可以高水平(80%~100%)替代鱼粉而不对鱼类生长及饲料利用产生负面影响。而Yang等^[5]在瓦氏黄颡鱼、Anne等^[8]在鲤鱼、Christoforos^[16]在大西洋鲑鱼、Li等^[17]在星斑川鲷和向芳琴^[19]在海鲈的研究表明,大豆浓缩蛋白仅能部分(40%~80%)替代鱼粉蛋白。刘兴旺等^[6]在大菱鲆和Deng等^[12]在牙鲆中却发现,大豆浓缩蛋白在低水平(0%~40%)替代鱼粉时就会对鱼类生长及饲料利用产生负面影响,主要包括增重率、特定生长率、蛋白质效率、饲料效率的下降。造成上述差异的原因可能包括氨基酸的不平衡^[26]、抗营养因子抑制了营养吸收^[27]、鱼类发育阶段及种类对植物性蛋白源吸收能力的差异^[28]、试验环境差异和饲料配方组分差异等。此外,研究还表明,随着鱼类配合饲料中大豆浓缩蛋白水平的升高,鱼体肌肉粗蛋白和水分含量无显著差异,但脂肪含量往往呈下降趋势^[4-20],原因可能是大豆浓缩蛋白中脂肪的缺乏,以及其含有的非淀粉多糖引发了肠炎^[29],降低了脂肪吸收率。综上所述,大豆浓缩蛋白用于替代鱼粉蛋白是可行的,但在不同种鱼类配合饲料中,其最适替代量不尽相同。

4.2 对鱼类消化酶活性的影响

鱼类消化酶由机体消化腺分泌,是一类水解酶,用于水解食物大分子,以便机体吸收利用^[30],按其功能可分为淀粉酶、脂肪酶和蛋白酶。研究表明,随着大豆浓缩蛋白替代鱼粉蛋白水平的升高,鲤鱼^[8]和海鲈^[19]的胰蛋白酶活性均显著下降,黄颡鱼^[4]和大黄鱼^[15]的胰蛋白酶活性无显著差异,而星斑川鲷^[17]的胰蛋白酶活性呈现先上升后下降趋势;鲤鱼^[8]和大黄鱼^[15]的淀粉酶活性无显著差异,而黄

鲢鱼^[4]、海鲈^[19]和星斑川鲷^[17]的淀粉酶活性呈现先上升后下降趋势;大黄鱼^[15]和星斑川鲷^[17]的脂肪酶活性无显著差异,而海鲈^[19]的脂肪酶活性呈现先上升后下降趋势。综上所述,大豆浓缩蛋白对于不同鱼类消化酶活性影响各异。有研究指出,大豆浓缩蛋白中抗营养因子会抑制鱼类消化酶活性^[5],另有研究指出,大豆浓缩蛋白导致了肠炎从而使得胰蛋白酶活性增加^[31]。此外,同种或不同种类鱼类在不同生理阶段,其消化器官对于大豆浓缩蛋白敏感程度不尽相同^[27],其酶活性也受到食性、发育阶段、健康状况及饲料组成等原因的影响。因此,大豆浓缩蛋白替代鱼粉蛋白对不同种类鱼类不同部位的消化酶活性影响不尽相同。

4.3 对鱼类非特异性免疫的影响

鱼类特异性免疫机制较哺乳动物不够完善,而非特异性免疫对于入侵机体病原响应广泛,因此,非特异性免疫在抵御入侵病原时发挥着重要作用^[32]。Li 等^[17]在星斑川鲷和向芳琴^[19]在海鲈的研究均表明,随着大豆浓缩蛋白替代鱼粉量达到一定水平(60%~80%),其碱性磷酸酶以及溶菌酶的活性均显著降低,而 Wang 等^[15]在大黄鱼的研究中表明,大豆浓缩蛋白替代鱼粉水平对机体非特异性免疫功能无显著影响。此外,Lin 等^[33]在豆粕替代鱼粉蛋白对奥尼罗非鱼(*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*)的研究表明,当替代水平达 50% 以上时,超氧化物歧化酶活性显著降低,当替代比例为 75% 以上时,溶菌酶活性显著降低。闫磊等^[34]在发酵豆粕替代鱼粉蛋白对洛氏鲮(*Rhynchocypris lagowskii* Dybowski)的研究表明,当替代比例为 49.5%~66.0% 时,超氧化物歧化酶和溶菌酶活性与对照组相比显著降低。大豆蛋白源中含有的抗营养因子会直接或间接抑制鱼类免疫相关酶活性^[27],而对于不同鱼类其影响程度不同。因此,过量的大豆浓缩蛋白替代鱼粉蛋白会降低部分鱼类非特异性免疫功能。

4.4 对鱼类肠道组织的影响

肠道是鱼类重要的具有消化吸收功能的器官,是机体内部与外界环境接触最为密切的器官,同时也是机体的免疫屏障,起到抵御病原菌入侵的作用^[35],大豆蛋白源中含有的抗营养因子会给鱼类的肠道造成损伤,从而影响其消化吸收等功能^[27]。Yang 等^[5]在瓦氏黄颡鱼中的研究表明,随着大豆浓缩蛋白替代鱼粉水平的增加,肠道粘膜层厚度降低、肠粘膜上皮细胞数量减少以及肠道绒毛高度降低,而 Kissinger 等^[13]在长鳍鮠中的研究并未观察到明显的组织学差异或肠炎症状。此外,Zhang 等^[36]

在豆粕替代鱼粉对日本鲈鱼(*Lateolabrax japonicus*)肠道影响的研究表明,当替代水平为 75% 以上时,前肠及中肠的绒毛高度显著下降。张帆等^[37]在豆粕替代鱼粉对大黄鱼肠道影响的研究表明,当替代水平为 40%~45% 时,肠壁明显变薄,小肠绒毛损伤严重。研究表明,大豆浓缩蛋白对鱼类产生的影响主要表现在肠道变化上,其所含的抗营养因子会对肠道造成机械损伤及致过敏作用^[5],破坏鱼类消化道结构、影响机体正常生理代谢、抑制营养物质消化吸收、危害其健康和正常生长,但其对于不同鱼类的影响程度不同。因此,过量的大豆浓缩蛋白替代鱼粉会损伤部分鱼类的肠道组织结构。

4.5 大豆浓缩蛋白替代鱼粉对鱼类抗氧化能力的影响

鱼类抗氧化能力是阻止机体因受不利环境胁迫而应激的能力,主要用于清除体内活性氧自由基。过氧化氢酶、超氧化物歧化酶以及丙二醛含量是反映机体抗氧化能力的重要指标^[4]。Wang 等^[15]在大黄鱼和 Li 等^[17]在星斑川鲷中的研究表明,随着大豆浓缩蛋白替代鱼粉量达到一定水平时,超氧化物歧化酶活性显著降低。而李晨晨等^[4]在大豆浓缩蛋白替代鱼粉对黄颡鱼的研究表明,过氧化氢酶和超氧化物歧化酶的活性呈先升高后下降趋势,30% 组活性均最高,此时,丙二醛含量最低。部分研究指出,随着饲料中大豆浓缩蛋白替代鱼粉蛋白水平的升高,鱼体抗氧化酶活性下降,这主要归功于抗营养因子的负面作用^[6]。但在少数情况下,大豆浓缩蛋白低水平替代鱼粉提高了机体抗氧化能力,这可能是跟大豆浓缩蛋白含有大豆异黄酮^[38]成分有关,大豆异黄酮起到了清除鱼体内超氧阴离子自由基的作用。因此,过量的大豆浓缩蛋白替代鱼粉会降低鱼类抗氧化能力,而少量的替代反而会提高某些鱼类抗氧化能力。

4.6 大豆浓缩蛋白替代鱼粉对鱼类蛋白质代谢能力的影响

蛋白质代谢是机体将大分子的蛋白质分解为氨基酸,进而吸收利用的过程,转氨酶的活性反映了机体蛋白质代谢能力,谷丙转氨酶与谷草转氨酶正是鱼类蛋白质代谢的关键酶。Yang 等^[6]在瓦氏黄颡鱼的研究中表明,随着大豆浓缩蛋白替代水平的升高,60%、80% 和 100% 组谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性显著降低,Deng^[13]在牙鲆,Wang 等^[16]在大黄鱼的研究中也观察到类似现象。研究表明,高水平的大豆浓缩蛋白替代鱼粉会破坏肝脏组织结构,从而影响蛋白质代谢功能^[6],此外,大豆浓缩蛋白某些氨基酸含量的不足也会降低鱼体蛋白质代

谢能力^[26]。因此,过量的大豆浓缩蛋白替代鱼粉会降低鱼类蛋白质代谢能力。

5 展 望

综上所述,虽然人们对大豆浓缩蛋白替代鱼粉蛋白做了相关研究,但其对鱼类抗营养作用机制方面尚缺乏系统、深入的研究,探讨其抗营养作用机制是未来研究的主要内容。进一步分离纯化大豆浓缩蛋白中的主要抗营养因子(如大豆抗原蛋白等),添加到鱼类配合饲料中,采用免疫学及分子生物学等技术手段与方法,探究大豆主要抗营养因子对鱼类抗营养作用的分子机制。对于合理开发利用大豆浓缩蛋白,缓解我国鱼粉资源短缺的紧张局势,保障鱼类饲料安全均具有重要的现实意义。

参考文献

[1] 吴莉芳,秦贵信,张东鸣,等. 饲料大豆蛋白对鲤鱼生长及肌肉营养成分的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008(10): 67-73, 80. (Wu L F, Qing G X, Zhang D M, et al. Effect of dietary soybean protein level on the growth performance of carp and nutritional components in the muscle[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2008(10): 67-73, 80.)

[2] Ragnar L O, Mohammad R H. A limited supply of fish meal: Impact on future increases in global aquaculture production[J]. Trends in Food Science & Technology, 2012, 27(2): 120-128.

[3] 艾庆辉,谢小军. 水生动物对植物蛋白源利用的研究进展[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2005(6): 51-57. (Ai Q H, Xie X J. Advance in utilization of plant proteins by aquatic animals[J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2005(6): 51-57.)

[4] 李晨晨,黄文文,金敏,等. 大豆浓缩蛋白替代鱼粉对黄颡鱼生长、饲料利用、消化酶和抗氧化酶活性的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(1): 375-386. (Li C C, Huang W W, Jin M, et al. Effects of fish meal replacement with soybean protein concentrate on growth performance, feed utilization and digestive enzyme and antioxidant enzyme activities of Yellow Catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2018, 30(1): 375-386.)

[5] Yang Y H, Ai Q H, Mai K S, et al. Effects of dietary soy protein concentrate on growth performance, digestion, and protein metabolism of Juvenile Darkbarbel Catfish *Pelteobagrus vachelli*[J]. The Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh, 2014, 66(6): 895-895.

[6] 刘兴旺,艾庆辉,麦康森,等. 大豆浓缩蛋白替代鱼粉对大菱鲆摄食、生长及体组成的影响[J]. 水产学报, 2014, 38(1): 91-98. (Liu X W, Ai Q H, Mai K S, et al. Effects of replacing fish meal with soy protein concentrate on feed intake and growth of turbot (*Scophthalmus maximus*) [J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(1): 91-98.)

[7] 刘伟,文华,蒋明,等. 大豆浓缩蛋白对中华鲟幼鱼生长、血

脂和体成分的影响研究[J]. 淡水渔业, 2010, 40(4): 27-32. (Liu W, Wen H, Jiang M, et al. Effects of soy protein concentration on growth performance, plasma lipids and carcass composition of juvenile chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) [J]. Freshwater Fisheries, 2010, 40(4): 27-32.)

[8] Anne M, Escaffre, José L, et al. Nutritional value of soy protein concentrate for larvae of common carp (*Cyprinus carpio*) based on growth performance and digestive enzyme activities[J]. Aquaculture, 1997, 153(1): 63-80.

[9] Kaushik S J, Cravedi J P, Lalles J P, et al. Partial or total replacement of fish meal by soybean protein on growth, protein utilization, potential estrogenic or antigenic effects, cholesterolemia and flesh quality in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*[J]. Aquaculture, 1995, 133(3): 257-274.

[10] Aragao C, Lec C, Dias J, et al. Soy protein concentrate as a protein source for Senegalese sole (*Solea senegalensis* Kaup 1858) diets: Effects on growth and amino acid metabolism of postlarvae [J]. Aquaculture Research, 2015, 34(15): 1443-1452.

[11] Salze G, McLean E P, Battle P R, et al. Use of soy protein concentrate and novel ingredients in the total elimination of fish meal and fish oil in diets for juvenile cobia, *Rachycentron canadum*[J]. Aquaculture, 2010, 298(3): 294-299.

[12] Deng J, 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.

[13] Kissinger K R, García-Ortega A, Trushenski J T. Partial fish meal replacement by soy protein concentrate, squid and algal meals in low fish-oil diets containing *Schizochytrium limacinum* for longfin yellowtail *Seriola rivoliana*[J]. Aquaculture, 2016, 452: 37-44.

[14] Berge G M, Grisdale H B, Helland S J. Soy protein concentrate in diets for Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*) [J]. Aquaculture, 1999, 178(1): 139-148.

[15] Wang P, Zhu J Q, Feng J, et al. Effects of dietary soy protein concentrate meal on growth, immunity, enzyme activity and protein metabolism in relation to gene expression in large yellow croaker *Larimichthys crocea*[J]. Aquaculture, 2017, 477: 15-22.

[16] Metochis C, Crampton V O, Ruohonen K, et al. The effects of increasing dietary levels of soy protein concentrate on the immune responses and disease resistance (furunculosis) of vaccinated and non-vaccinated Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) [J]. Fish and Shellfish Immunology, 2016(59): 83-94.

[17] Li P Y, Wang J Y, Song Z D, et al. Evaluation of soy protein concentrate as a substitute for fishmeal in diets for juvenile starry flounder (*Platichthys stellatus*) [J]. Aquaculture, 2015(448): 578-585.

[18] Mohd F N, Yong A S K, Shapawi R, et al. Soy protein concentrate as an alternative in replacement of fish meal in the feeds of hybrid grouper brown-marbled grouper (*Epinephelus fuscoguttatus*) × giant grouper (*E. lanceolatus*) juvenile [J]. Aquaculture Research, 2018, 49(4): 431-441.

[19] 向芳琴. 大豆浓缩蛋白对海鲈生长、免疫及肠道菌群的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017. (Xiang F Q. Effect of sea bass on growth, immune and intestinal flora by soy protein concentrate[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017.)

- [20] Kalhor H, Zhou J, Hua Y, et al. Soy protein concentrate as a substitute for fish meal in diets for juvenile *Acanthopagrus schlegelii*: Effects on growth, phosphorus discharge and digestive enzyme activity[J]. *Aquaculture Research*, 2018, 49(5): 1896-1906.
- [21] 李德发. 大豆抗营养因子[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003: 275-282. (Li D F. Soybean antinutritional factors[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2003: 275-282.)
- [22] Shi L, Arntfield S D, Nickerson M. Changes in levels of phytic acid, lectins and oxalates during soaking and cooking of Canadian pulses[J]. *Food Research International*, 2018, 107(5): 660-668.
- [23] Pandjaitan N, Hettiarachchy N, Ju Z Y, et al. Evaluation of genistin and genistein contents in soybean varieties and soy protein concentrate prepared with 3 basic methods[J]. *Journal of Food Science*, 2000, 65(3): 399-402.
- [24] 宋宏哲, 赵勇, 白志明. 醇法大豆浓缩蛋白的改性技术综述[J]. *粮油食品科技*, 2008(2): 30-32. (Song H Z, Zhao Y, Bai Z M. Overviews of the technology of modifying soybean protein concentrate by alcohol leaching[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2008(2): 30-32.)
- [25] Lee Y. Manufacturing soy protein concentrates and isolates by membrane technology[J]. *International Journal of Agriculture Innovations & Research*, 2015, 3(4): 1150-1158.
- [26] Ai Q H, Xie A J. Effects of replacement of fish meal by soybean meal and supplementation of methionine in fish meal/soybean meal based diets on growth performance of the southern catfish *Silurus meridionalis*[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2005, 36(4): 498-507.
- [27] 段晶, 王婧瑶, 吴莉莉, 等. 大豆蛋白源替代鱼粉蛋白对鱼类生长、消化及肠道组织的影响[J]. *大豆科学*, 2018, 37(3): 477-482. (Duan J, Wang J Y, Wu L F, et al. Effects of replacement of fish meal protein with soybean protein on growth, digestion and intestinal tissue of fish[J]. *Soybean Science*, 2018, 37(3): 477-482.)
- [28] 周歧存, 麦康森, 刘永坚, 等. 动植物蛋白源替代鱼粉研究进展[J]. *水产学报*, 2005(3): 404-410. (Zhou Q C, Mai K S, Liu Y J, et al. Advances in research on animal and vegetable protein sources instead of fishmeal[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2005(3): 404-410.)
- [29] Storebakken T K D, Shearer K D, Roem A J. Availability of protein, phosphorus and other elements in fish meal, soy-protein concentrate and phytase treated soy protein concentrate-based diets to Atlantic salmon, *Salmo salar*[J]. *Aquaculture*, 1998, 161(1): 365-379.
- [30] 徐革锋, 陈侠君, 杜佳, 等. 鱼类消化系统的结构、功能及消化酶的分布与特性[J]. *水产学杂志*, 2009, 22(4): 49-55. (Xu G F, Cheng X J, Du W, et al. Fish digestive system: It's structure, function and the distributions and characteristics of digestive enzymes[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2009, 22(4): 49-55.)
- [31] Penn M H, Bendiksen E A, Campbell P, et al. High level of dietary pea protein concentrate induces enteropathy in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)[J]. *Aquaculture*, 2011, 310(3): 267-273.
- [32] 李莉, 李春梅. 鱼类非特异性免疫研究进展[J]. *河南农业科学*, 2012, 41(2): 26-32. (Li L, Li C M. Research progress on non-specific immune of fish[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2012, 41(2): 26-32.)
- [33] Lin S, Luo L. Effects of different levels of soybean meal inclusion in replacement for fish meal on growth, digestive enzymes and transaminase activities in practical diets for juvenile tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. aureus*[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2011, 168: 80-87.
- [34] 闫磊, 祖岫杰, 吴莉莉, 等. 发酵豆粕替代鱼粉对洛氏鲮生长、饲料利用及非特异性免疫指标的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(1): 7-13. (Yan L, Zu Y J, Wu L F, et al. Effects of replacing fish meal with fermented soybean on growth performance, feed utilization and non-specific immune indexes of *Phoxinus lagowskii* Dybowski[J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 2017, 45(1): 7-13.)
- [35] 周小秋, 冯琳, 姜维丹, 等. 营养与鱼类免疫研究进展[J]. *动物营养学报*, 2014, 26(10): 3175-3184. (Zhou X Q, Feng L, Jiang W D, et al. Advanced research in nutrition and fish immunity[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2014, 26(10): 3175-3184.)
- [36] Zhang C, Rahimnejad S, Wang Y R, et al. Substituting fish meal with soybean meal in diets for Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*): Effects on growth, digestive enzymes activity, gut histology, and expression of gut inflammatory and transporter genes[J]. *Aquaculture*, 2018, 483: 173-182.
- [37] 张帆, 张文兵, 麦康森, 等. 饲料中豆粕替代鱼粉对大黄鱼生长、消化酶活性和消化道组织学的影响[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(S1): 75-82. (Zhang F, Zhang W B, Mai K S, et al. Effects of replacement of dietary fish meal by soybean meal on growth, digestive enzyme activity and digestive tract histology of juvenile large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea*. R[J]. *Periodical of Ocean University of China(Natural Science Edition)*, 2012, 42(S1): 75-82.)
- [38] 徐春华, 张治广, 谢明杰. 大豆异黄酮的抗氧化和抗肿瘤活性研究[J]. *大豆科学*, 2010, 29(5): 870-873. (Xu C H, Zhang Z G, Xie M J. Research on antioxygenic and antitumor activities of soybean isoflavones[J]. *Soybean Science*, 2010, 29(5): 870-873.)