

鲟营养需求与饲料研究进展

张配瑜 刘海燕 杨振才

RESEARCH PROGRESS IN NUTRITIONAL REQUIREMENTS AND FEED OF STURGEONS

ZHANG Pei-Yu, LIU Hai-Yan, YANG Zhen-Cai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2020.155>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

军曹鱼营养需求与饲料研究进展

PROGRESS IN NUTRITIONAL REQUIREMENTS AND FEED RESEARCH OF COBIA *RACHYCENTRON CANADUM*

水生生物学报. 2019, 43(3): 680–692 <https://doi.org/10.7541/2019.081>

基于生物能量学原理构建异育银鲫生长、饲料需求和污染排放模型

BIOENERGETICS-BASED MODEL TO DETERMINE GROWTH, FEED REQUIREMENT AND WASTE OUTPUT OF GIBEL CARP (*CARASSIUS AURATUS GIBELIO*)

水生生物学报. 2018, 42(2): 221–231 <https://doi.org/10.7541/2018.028>

裸藻遗传转化技术的研究进展

RESEARCH PROGRESS ON GENETIC TRANSFORMATION TECHNOLOGY OF *EUGLENA*

水生生物学报. 2018, 42(3): 655–662 <https://doi.org/10.7541/2018.081>

三峡水库产漂流性卵鱼类繁殖现状及水文需求研究

NATURAL REPRODUCTION AND HYDROLOGIC REQUIREMENTS OF PELAGOPHIL FISH IN THE THREE GORGES RESERVOIR

水生生物学报. 2019, 43(S1): 84–96 <https://doi.org/10.7541/2019.171>

天鹅洲故道水生态研究进展

PROGRESS IN STUDIES ON WATER ECOLOGY IN TIAN' E ZHOU OXBOW

水生生物学报. 2017, 41(4): 935–946 <https://doi.org/10.7541/2017.117>

不同年龄段养殖宽体沙鳅肌肉营养成分分析与评价

NUTRITIONAL COMPOSITION OF MUSCLE IN CULTURED *SINIBOTIA REEVESAE* POPULATION AT DIFFERENT AGES

水生生物学报. 2018, 42(3): 542–549 <https://doi.org/10.7541/2018.068>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

鲟营养需求与饲料研究进展

张配瑜 刘海燕 杨振才

(河北师范大学生命科学学院, 石家庄 050024)

摘要: 鲟(Sturgeons)是我国重要的经济养殖鱼类之一, 最近几年, 我国鲟养殖总产量一直高居世界第一。目前除了一部分开口饲料从国外进口外, 鲟其他生长阶段的饲料均采用国产鲟饲料。但国产饲料质量参差不齐, 造成鲟生长速度差异较大, 甚至导致鱼体抗病力下降。文章对其能量、蛋白质、脂肪、碳水化合物、矿物盐类、维生素需求量, 以及蛋白源、脂肪源和添加剂的研究进展进行了综述, 以期对鲟营养需求的深入研究和配合饲料的合理配制提供参考依据。幼鲟对蛋白质的适宜需求量约为36%—40%, 赖氨酸和蛋氨酸需求量分别为2.80%和1.13%, 蛋能比为18—22 mg/kJ, 脂肪的需求量约为11.1%—35.7%, 碳水化合物约为11%—35%, 磷为0.50%—0.87%; 鲟能较好地利用动植物蛋白原料和植物油, 一些功能性添加剂有促生长和提高免疫的功效, 关于维生素和矿物盐需求的研究还不够全面。

关键词: 鲟; 养殖现状; 营养需求; 配合饲料

中图分类号: S965.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2020)06-1342-18

鲟(Sturgeons)是软骨硬鳞鱼, 属于脊索门, 硬骨鱼纲, 辐鳍亚纲, 鲟形目, 鲟科。共有27个物种, 其中4种已灭绝^[1]。现存23种分为4个属, 其中鳇属(*Huso*)2种, 铲鲟属(*Scaphirhynchus*)2种, 拟铲鲟属(*Pseudoscaphirhynchus*)3种, 鲟属(*Acipenser*)16种^[2]。由于鲟的鱼肉鲜美和其鱼卵可以被加工成鱼子酱, 因此具有较高的商业价值^[3]。在自然生境中, 鲟由于生长缓慢和性成熟晚, 加上过度捕捞、自然栖息地的破坏、水质恶化、大坝建设等导致85%的鲟物种面临灭绝^[4-6]。缓解鲟自然种群下降的最优策略是通过鲟的水产养殖以满足市场对鱼子酱和鱼肉需求^[7]。中国是鲟和鱼子酱的主要生产国和出口国, 鲟养殖产业在鲟资源保护和渔业发展中发挥着重要作用。通过全球抽样调查, 推测2017年中国鲟产量为 7.96×10^7 kg, 约占世界总产量的78%, 之后分别是俄罗斯(6.80×10^6 kg), 亚美尼亚(6.00×10^6 kg), 伊朗(2.51×10^6 kg)和其他产量少于 1.00×10^6 kg的52个国家^[8]。2016年世界鲟产量前三的品种分别是西伯利亚鲟(*Acipenser baerii*)、杂交鲟(达氏鳇×施氏

鲟*Huso dauricus*♀×*A. schrenckii*♂、西伯利亚鲟×施氏鲟*A. baerii*♀×*A. schrenckii*♂)和施氏鲟(*A. schrenckii*), 分别占总产量的39.5%、35.6%和10.2%^[8]。我国开始鲟养殖以来, 进行大规模商业化养殖的品种也是西伯利亚鲟、达氏鳇×施氏鲟杂交鲟、西伯利亚鲟×施氏鲟杂交鲟和施氏鲟, 占国内鲟养殖总产量的90%^[9]。主要养殖区域集中在山东、云南、湖北、贵州和湖南等省份, 上述省份2017年的鲟养殖产量分别为 1.14×10^7 、 0.96×10^7 、 0.81×10^7 、 0.79×10^7 和 0.65×10^7 kg, 分别占全国鲟养殖总产量的13.8%、11.6%、9.7%、9.5%和7.9%^[10]。

在全球鲟养殖方面, 早期一般用鲑鳟鱼饲料来饲喂鲟, 但长期的投喂会导致鲟生长较差和相关营养缺乏症, 之后关于鲟的营养需求研究逐渐增加, 但主要研究对象是美国白鲟和西伯利亚鲟^[11, 12], 对于其他鲟品种营养需求与利用的系统研究相对较少, 但这些信息对鲟的养殖又至关重要。近年来对主养的鲟品种营养需求研究越来越多, 本文就鲟对基本营养素和微量营养素的需求以及饲料的研究

收稿日期: 2019-12-04; 修订日期: 2020-07-18

基金项目: 河北省现代农业产业技术体系项目(HBCT2018180205和HBCT2018170205); 河北师范大学科技类研究基金(L2020B23)资助
[Supported by the Earmarked Fund for Modern Agro-industry Technology Research Team of Hebei (HBCT2018180205, HBCT2018170205); Scientific research fund of Hebei Normal University (L2020B23)]

作者简介: 张配瑜(1992—), 男, 讲师; 主要研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: peiyuz@mail.hebtu.edu.cn

通信作者: 杨振才, 教授; E-mail: zcyang@hebtu.edu.cn

进行综述, 以供后续研究参考。

1 鲟营养需求研究进展

1.1 蛋白质营养研究

蛋白质需求 关于鲟蛋白质需求的研究较多。Moore等^[13]以酪蛋白、谷朊粉、鸡蛋白为蛋白源(比例为62:30:8), 配制蛋白含量为20.0%—52.7%配合饲料开展为期8周的养殖实验, 以增重率为评价指标, 发现高首鲟[*Acipenser transmontanus*, (145.20±0.20) g, 本处及后文都指初始体重]的蛋白需求量为40.5%。Mohseni等^[14]以鱼粉和小麦粉为主要蛋白源, 以蛋白质效率为评价指标, 指出波斯鲟(*Acipenser persicus*, 136.8 g)的蛋白需求量为40%, 合适的蛋能比18—20 mg/kJ。Guo等^[15]以鱼粉和豆粕为蛋白源, 配制7种蛋白水平(250、300、350、400、450、500、550 g/kg饲料)的等能饲料, 以特定生长率为评价指标, 采用二项式回归分析得出杂交鲟[西伯利亚鲟×俄罗斯鲟*Acipenser baerii* ♀×*A. gueldenstaedtii* ♂, (25.10±0.12) g]的蛋白需求为370 g/kg饲料。刘阳洋^[16]以鱼粉为主要蛋白源, 饲喂匙吻鲟[*Polyodon spathula*, (158.00±0.29) g] 8周, 以体增重为评价指标, 得出最适蛋白水平为40.67%。李同庆等^[17]研究了4种蛋白水平(28%、32、36和41%)的饲料对施氏鲟的影响, 36%蛋白组生长速度最快。关于鲟的蛋白需求见表1。从表1可以看出,

大部分鲟幼鱼的蛋白需求在40%左右, 杂交鲟、施氏鲟的蛋白需求约36%—37%。

合适的蛋能比 饲料中的蛋能比在鱼类营养中扮演着重要角色, 影响鱼体的生长、饲料效率和体成分。合适的蛋能比既有利于鱼体的快速生长, 也可降低饲料成本和含氮废物的排放^[18]。关于鲟合适的蛋能比研究不多, Guo等^[15]得出25 g杂交鲟(西伯利亚鲟×俄罗斯鲟)适宜蛋白和能量为40%和17.9 kJ/g, 蛋能比为21.9 mg蛋白/kJ。Mohseni等^[14]以鱼粉和小麦粉为主要蛋白源, 以蛋白质效率为评价指标, 指出波斯鲟(136.8 g)合适的蛋能比为18—20 mg/kJ。Mohseni等^[19]以鱼粉为主要蛋白源, 鱼油和玉米油(1:1)为主要脂肪源, 设计3组蛋白水平(40%、45%和50%)和4组能量水平(16、17、18和19 kJ/g)的12种饲料, 饲喂波斯鲟[(103.3±3.5) g] 14周, 发现最大特定生长率(*SGR*)出现在40%蛋白水平和19 kJ/g的饲料组, 但与40%蛋白水平和18 kJ/g的饲料组无显著差异, 饲料效率在各组间无显著差异, 基于成本考虑和*SGR*, 波斯鲟最适蛋能比为22.0 mg/kJ。由表1可知, 大多数鲟品种适宜蛋能比为18—22 mg/kJ。

必需氨基酸的需求 蛋白质在经过鱼体消化酶分解后, 变成氨基酸进入体内, 鱼体对蛋白质的需求实质上是对蛋白质中平衡氨基酸的需求。有关鲟必需氨基酸需求的研究很少。研究表明, 鲟

表1 鲟对蛋白质需求量

Tab. 1 The dietary protein requirement of sturgeons (%)

鲟品种Sturgeon species	试验鱼规格Initial body weight (g)	蛋白质需求量Protein requirement (%)	主要蛋白源Major protein source	适宜蛋能比Optimal protein to energy (mg/kg)	评估指标Evaluated index	参考文献Reference
高首鲟AT	145.20±0.20	40.5	酪蛋白、谷朊粉 Casein, Wheat gluten	—	体增重 <i>BWG</i>	[13]
波斯鲟AP	136.8	40	鱼粉、小麦粉FM, Wheat flour	18—20	蛋白质效率 <i>PER</i>	[14]
波斯鲟AP	103.3±3.5	40	鱼粉FM	22.0	特定生长率和体增重 <i>SGR</i> and <i>BWG</i>	[19]
西伯利亚鲟×俄罗斯鲟AB×AG	25.10±0.12	36	鱼粉、豆粕FM, SBM	21.9	特定生长率 <i>SGR</i>	[15]
匙吻鲟PS	158.00±0.29	40.67	鱼粉FM	—	体增重 <i>BWG</i>	[16]
匙吻鲟PS	19.91±3.73	39.10	鱼粉、酪蛋白FM, Casein	—	蛋白酶和α-淀粉酶 Protease and α-Amylase	[20]
达氏鲟AD	400.68±8.55	41.50—42.97	鱼粉FM	—	增重率和饲料系数 <i>WGR</i> and <i>FCR</i>	[21]
达氏鲟AD	184.24±6.79	44.67	鱼粉、酪蛋白FM, Casein	23.5	特定生长率 <i>SGR</i>	[22]
密苏里铲鲟SA	73.3	40	鱼粉、酪蛋白和血粉FM, Casein and BM	21.27	体增重 <i>BWG</i>	[23]

注: 高首鲟*Acipenser transmontanus* (AT); 波斯鲟*Acipenser persicus* (AP); 西伯利亚鲟×俄罗斯鲟*Acipenser baerii*×*A. gueldenstaedtii* (AB×AG); 匙吻鲟*Polyodon spathula* (PS); 达氏鲟*Acipenser dabryanus* (AD); 密苏里铲鲟*Scaphirhynchus albus* (SA); 鱼粉Fish meal (FM); 豆粕Soybean meal (SBM); 血粉Blood meal (BM); 体增重Body weight gain (*BWG*); 蛋白质效率Protein efficiency ratio (*PER*); 特定生长率Specific growth rate (*SGR*); 增重率Weight gain rate (*WGR*); 饲料系数Feed coefficient ratio (*FCR*)

必需氨基酸主要有: 赖氨酸、亮氨酸、精氨酸、组氨酸、异亮氨酸、蛋氨酸、苯丙氨酸、苏氨酸、色氨酸和缬氨酸^[24], 且含硫氨基酸(蛋氨酸和胱氨酸)是杂交鲟(达氏鳇♀×施氏鲟♂ *Huso dauricus* ♀ × *Acipenser schrenckii* ♂)肌肉的第二限制性氨基酸^[25]。目前, 仅一篇文章用传统剂量反应来评估鲟的氨基酸需求, Wang等^[26]以鱼粉、次粉、豆粕和玉米蛋白粉为蛋白源, 配制7种不同水平精氨酸(1.74%、2.04%、2.34%、2.64%、2.94%、3.24%和3.54%)的饲料, 饲喂杂交鲟[施氏鲟×西伯利亚鲟 *A. schrenckii* ♀ × *A. baerii* ♂, (3.63±0.08) g] 8周, 以特定生长率(SGR)为评价指标, 得出饲料中最适精氨酸需求为2.47%, 占6.18%饲料蛋白。全鱼或肌肉组织必需氨基酸模式与必需氨基酸的需求呈现出高度关联, 因此首先通过传统剂量反应评估其中一种必需氨基酸的需求, 再根据此种必需氨基酸占全鱼或肌肉总必需氨基酸的比例, 即可推算出其他必需氨基酸的需求量^[27]。Wang等^[28]用以鱼粉和大豆浓缩蛋白为蛋白源饲喂杂交鲟[施氏鲟×西伯利亚鲟, (7.68±0.08) g] 8周, 其肌肉中必需氨基酸的含量分别为苏氨酸32.47、缬氨酸36.68、蛋氨酸20.57、异亮氨酸23.70、亮氨酸49.47、苯丙氨酸17.65、赖氨酸50.00、组氨酸15.45和精氨酸(44.08 g/kg氨基酸)。因此各必需氨基酸占总必需氨基酸的比例分别为苏氨酸(11.19%)、缬氨酸(12.64%)、蛋氨酸(6.98%)、异亮氨酸(8.17%)、亮氨酸(17.05%)、苯

丙氨酸(6.08%)、赖氨酸(17.24%)、组氨酸(5.33%)和精氨酸(15.20%), Wang等^[28]得出该杂交鲟精氨酸需求量是2.47% (g/100g饲料), 因此推算其他必需氨基酸的需求量分别为苏氨酸(1.82%)、缬氨酸(2.05%)、蛋氨酸(1.13%)、异亮氨酸(1.33%)、亮氨酸(2.77%)、苯丙氨酸(0.99%)、赖氨酸(2.80%)和组氨酸(0.87%)。Ng和Hung^[24]评估了高首鲟必需氨基酸的需求量(表2), 通过对比, 发现高首鲟和杂交鲟的必需氨基酸需求较接近, 因此, 杂交鲟和高首鲟的必需氨基酸需求可供其他品种鲟参考, 但需要进一步的证实。

替代蛋白源的研究进展 近些年, 由于鱼粉价格飙升, 寻找合适、廉价的替代蛋白源成为水产养殖的当务之急。表观消化率是评价水产动物对饲料原料的营养品质最基本的手段之一^[29]。关于鲟对替代蛋白源消化率的报道较少。Liu等^[30]评估了8.4 g西伯利亚鲟对鱼粉、肉骨粉、家禽副产品粉、水解羽毛粉、发酵羽毛粉、溶剂萃取棉粕和豆粕的蛋白消化率, 分别为94.5%、84.5%、90.4%、90.9%、87.7%、87.6%和91.8%, 研究表明幼鲟可以有效地利用动植物蛋白源, 但在制作配方时需考虑必需氨基酸的需求。Safari等^[29]研究了达氏鳇(17.70±0.234) kg对5类不同蛋白原料(3种鱼粉、3种陆生动物副产品、3种植物浓缩蛋白、9种高植物蛋白源和3种低植物蛋白源)进行消化率的评估, 发现鳃鱼粉(93.2%)的蛋白表观消化率高于沙丁鱼

表2 鲟对必需氨基酸的需求

Tab. 2 The dietary essential amino acids requirement in sturgeons

必需氨基酸 EAA	施氏鲟×西伯利亚鲟 肌肉氨基酸含量 (g/kg蛋白质)AS×AB amino acids content in muscle (g/kg protein)	施氏鲟×西伯利亚鲟 g/100 g氨基酸AS×AB g/100 g amino acid	施氏鲟×西伯利亚鲟 精氨酸需求(%干物质 饲料)AS×AB Arginine requirement (% on dry matter basis)	施氏鲟×西伯利亚鲟根据精氨酸 需求推算其他必需氨基酸 需求(%干物质饲料)AS×AB Speculated other EAA requirement based on arginine requirement (% on dry matter basis)	高首鲟必需氨基酸需求(%干物质饲料)AT EAA requirement (% on dry matter basis)
苏氨酸Thr	32.47	11.19	—	1.82	1.46
缬氨酸Val	36.68	12.64	—	2.05	1.46
蛋氨酸Met	20.57	6.98	—	1.13	0.90
异亮氨酸Ile	23.70	8.17	—	1.33	1.32
亮氨酸Leu	49.47	17.05	—	2.77	1.89
苯丙氨酸Phe	17.65	6.08	—	0.99	1.32
赖氨酸Lys	50.00	17.24	—	2.80	2.38
组氨酸His	15.45	5.33	—	0.87	1.00
精氨酸Arg	44.08	15.20	2.47	—	2.12
参考文献 Reference	[28]	[28]	[26]	—	[24]

注: 施氏鲟×西伯利亚鲟 *Acipenser schrenckii* ♀ × *Acipenser baerii* ♂ (AS×AB); 必需氨基酸Essential amino acids (EAA); 苏氨酸Threonine (Thr); 缬氨酸Valine (Val); 蛋氨酸Methionine (Met); 异亮氨酸Isoleucine (Ile); 亮氨酸Leucine (Leu); 苯丙氨酸Phenylalanine (Phe); 赖氨酸Lysine (Lys); 组氨酸Histidine (His); 精氨酸Arginine (Arg); “—”没有数据No data; 其他缩写同表1 Other abbreviations are the same as shown in Tab. 1

鱼粉(90.2%)和墨西哥沙丁鱼鱼粉(89.5%), 但无显著差异; 对于动物副产品, 达氏鲟对家禽副产品粉(91.7%)的蛋白消化优于羽毛粉(75.0%)和血粉(73.1%); 对于植物蛋白浓缩物(大豆浓缩蛋白、玉米蛋白粉和小麦蛋白粉)的蛋白消化率都超过了80%, 且对大豆浓缩蛋白消化率最高; 另外, 达氏鲟对高植物蛋白源的蛋白消化率(62.9%)高于低植物蛋白源(41.5%)。Stuart和Huang^[31]研究高首鲟对不同蛋白源的利用情况, 依据能量留存率, 鲟蛋白源质量顺序为: 酪蛋白>脱脂虾粉>鳀鱼粉>大豆浓缩

蛋白>鸡蛋蛋白>明胶, 由于酪蛋白组的死亡率为11.7%, 根据生长结果脱脂虾粉可以完全替代且优于鳀鱼粉。由表3可知, 西伯利亚鲟可很好地消化动植物蛋白源, 而达氏鲟对蛋白源的消化效果顺序为鱼粉>植物蛋白浓缩物>动物副产品>高蛋白植物源>低蛋白植物源, 杂交鲟对豆粕的消化率高于家禽副产品粉。

Sicuro等^[33]以杂交鲟(意大利鲟×西伯利亚鲟*Acipenser naccarii*×*Acipenser baerii*)为研究对象, 用玉米蛋白粉替代饲料中85%的鱼粉(玉米蛋白粉含

表3 鲟对不同蛋白源的表现消化率

Tab. 3 Apparent digestibility in different protein sources consumed by sturgeons (%)

鲟品种 Sturgeon species	蛋白源 Protein source	干物质 Dry matter	蛋白质 Protein	脂肪 Lipid	能量 Energy
西伯利亚鲟AB ^[30]	鱼粉FM	79.9	94.5	—	93.2
	肉骨粉MBM	59.1	84.5	—	74.8
	家禽副产品粉PBM	77.2	90.5	—	86.3
	水解羽毛粉HFeM	82.6	90.9	—	80.0
	发酵羽毛粉FFeM	77.0	87.7	—	73.9
	溶剂萃取棉粕SECM	70.4	87.6	—	71.8
	豆粕SBM	76.9	91.8	—	79.5
达氏鲟HH ^[29]	鳀鱼鱼粉AFM	89.1	93.2	98.1	96.8
	沙丁鱼鱼粉SFM	90.2	90.2	95.6	94.3
	墨西哥沙丁鱼鱼粉MSM	89.7	89.5	91.5	87.5
	血粉BM	67.1	73.1	73.1	77.5
	羽毛粉FM	70.3	75.0	74	78.8
	家禽副产品粉PBM	89.7	91.7	89.7	93.3
	大豆浓缩蛋白SPC	96.1	92.0	78.1	90.1
	玉米蛋白粉CGM	96.7	81.0	77.7	80.4
	小麦蛋白粉WGM	95.9	82.8	79.0	78.5
	加拿大全脂双低菜粕FFCM	78.1	60.2	81.7	85.9
	全脂豆粕FFSBM	79.1	51.1	70.3	71.1
	加拿大双低菜粕CM	80.5	64.3	65.3	66.5
	豆粕SBM	87.0	55.5	69.0	70.7
	玉米面粉CF	72.2	43.3	67.4	69.0
	小麦粉WF	79.1	44.2	65.9	58.1
	全麦粉WW	67.1	37.2	67.0	73.3
	鱼粉FM	81.0	—	—	64.5
	豆粕SBM	81.9	—	—	88.2
	家禽副产品粉PBM	64.7	—	—	52.3

注: 西伯利亚鲟*Acipenser baerii* Brandt (AB); 达氏鲟*Huso huso* (HH); 俄罗斯鲟×贝斯特尔鲟*Acipenser guldenstadti* ×*A. bester* (AG×AB); 肉骨粉Meat and bone meal (MBM); 家禽副产品粉Poultry by-product meal (PBM); 水解羽毛粉Hydrolysed feather meal (HFeM); 发酵羽毛粉Fermented feather meal (FFeM); 溶剂萃取棉粕Solvent-extracted cottonseed meal (SECM); 鳀鱼鱼粉Anchovy fish meal (AFM); 沙丁鱼鱼粉Sardine fish meal (SFM); 墨西哥沙丁鱼鱼粉Mexican sardine meal (MSFM); 羽毛粉Feather meal (FM); 大豆浓缩蛋白Soy concentrate protein (SPC); 玉米蛋白粉Corn gluten meal (CGM); 小麦蛋白粉Wheat gluten meal (WGM); 加拿大全脂双低菜粕Full fat canola meal (FFCM); 全脂豆粕Full fat soybean meal (FFSBM); 加拿大双低菜粕Canola meal (CM); 玉米面粉Corn flour (CF); 小麦粉Wheat flour (WF); 全麦粉Whole wheat (WW); “—”没有数据No data; 其他简写同表1—2 Other abbreviations are the same as shown in Tab. 1—2

量为55%), 进行为期60d的养殖实验, 结果显示对鲟生长无负面影响, 且饲料成本可减少20%。Xu等^[34]以大豆分离蛋白替代施氏鲟饲料中0—100%的鱼粉, 并在100%替代水平添加晶体氨基酸(蛋氨酸、赖氨酸、苏氨酸), 以增重率为评价指标, 大豆分离蛋白适宜的替代比例为57.64%, 且晶体氨基酸的添加对生长无促进作用。Jahanbakhshi等^[35]发现芝麻饼粕和玉米蛋白粉(1:1)替代达氏鳇饲料中37%的鱼粉对血液指标无显著影响。Yun等^[36]用混合植物蛋白源(豆粕:小麦蛋白粉=6:4)在两个蛋白水平(36%和40%)下完全替代西伯利亚鲟饲料中的鱼粉, 并补充晶体氨基酸和磷酸氢钙, 进行为期8周的养殖实验, 发现植物蛋白源替代鱼粉对生长无负面影

响, 且能有效降低磷的排放。由表4可见, 鲟可以较好地利用一些植物蛋白源, 分析其原因可能是替代源有较高的营养价值, 比如大米浓缩蛋白含有75.5%的蛋白质且有较高含量的n-6高不饱和脂肪酸^[37]。玉米蛋白粉蛋白含量较高(67%—71%), 不含有抗营养因子, 较低含量的纤维素, 且含有生物活性肽^[38, 39]。豆粕和大豆浓缩蛋白也含有较多的蛋白质, 广泛应用于水产饲料中。其次, 鲟能较好地消化吸收这些植物蛋白源, 由表3可以看出, 鲟对大豆浓缩蛋白、麦麸和玉米蛋白粉的蛋白质消化率都高达80%以上; 第三, 鲟能够耐受较高的碳水化合物, 在Yun等^[36]的研究中发现西伯利亚鲟可耐受362.5 g/kg饲料的碳水化合物。另外, 杂交鲟(意

表4 鲟饲料中其他蛋白源替代鱼粉量

Tab. 4 The replacement amount of dietary fish meal by other protein resources for sturgeons (%)

鲟品种Sturgeon species	蛋白源Protein source	试验鱼规格Initial body weight(g)	鱼粉替代水平Replacement level (%)	评估指标Evaluated index	参考文献Reference
植物蛋白源Plant derived protein sources					
意大利鲟×西伯利亚鲟AN×AB	玉米蛋白粉CGM	364.8±4.5	85	特定生长率SGR	[33]
施氏鲟AS	大豆分离蛋白SPI	26.38±0.24	57.64	增重率WGR	[34]
达氏鳇HH	玉米蛋白粉和芝麻饼粕CGM and SOC(1:1)	—	37	血液指标Blood indices	[35]
西伯利亚鲟AB	豆粕和小麦蛋白粉SBM and WGM(6:4)	39.0±0.20	100	增重率和特定生长率WGR and SGR	[36]
西伯利亚鲟×施氏鲟AB×AS	豆粕、菜粕、棉粕SBM, RM, CM(5:7:6)	8.63±0.24	50	特定生长率SGR	[47]
西伯利亚鲟AB	大米浓缩蛋白RCP	19.1±6.7	100	生长良好Good growth performance	[48]
西伯利亚鲟AB	大豆浓缩蛋白SCP	14.0±1.3	63.2	特定生长率SGR	[49]
西伯利亚鲟AB	螺旋藻粉SM	92.1±3.6	50	蛋白质效率PER	[50]
动物蛋白源Animal derived protein sources					
高首鲟AT	脱脂虾粉DSM	15.6±0.3	100	体增重和存活率BWG and SR	[31]
西伯利亚鲟AB	酪蛋白酸钠SC	6.77	20—60	特定生长率SGR	[41]
西伯利亚鲟AB	肉骨粉、家禽副产品粉、水解羽毛粉MBM, PBM, FFeM(4:4:2)	28.9±0.2	50	增重率WGR	[42]
西伯利亚鲟AB	家禽副产品粉、肉骨粉、水解羽毛粉、血粉PBM, MBM, FFeM, BM(40:35:20:5)	39.0±0.2	100	增重率WGR	[43]
俄罗斯鲟AG	磷虾粉KM	481	60	增重率和特定生长率WGR, SGR	[44]
西伯利亚鲟AB	全脂黑水虻粉FFHI	640±3.9	15	增重率和特定生长率WGR, SGR	[45]
西伯利亚鲟AB	全脂黄粉虫粉FFTM	640±3.9	15	增重率和特定生长率WGR, SGR	[45]
西伯利亚鲟AB	脱脂黑水虻幼虫粉DHILM	24.2±7.59	26.4	肝和螺旋瓣显微结构Liver and spiral valve microscopic structure	[46]

注: 意大利鲟×西伯利亚鲟*Acipenser naccarii*×*Acipenser baerii* (AN×AB); 施氏鲟*Acipenser schrenckii* (AS); 俄罗斯鲟*Acipenser guldenstadti* (AG); 大豆分离蛋白Soy protein isolate (SPI); 芝麻饼粕Sesame oil cake (SOC); 菜粕Rapeseed meal (RM); 棉粕Cottonseed meal (CM); 大米浓缩蛋白Rice concentrate protein (RCP); 螺旋藻粉Spirulina meal (SM); 脱脂虾粉Defatted shrimp meal (DSM); 酪蛋白酸钠Sodium caseinate (SC); 磷虾粉Krill meal (KM); 全脂黑水虻粉Full-fat *Hermetia illucens* (FFTM); 全脂黄粉虫粉Full-fat *Tenebrio molitor* (FFTM); 脱脂黑水虻幼虫粉Defatted *Tenebrio molitor* larva meal (DHILM); 其他简写同表1—3 Other abbreviations are the same as shown in Tab. 1—3

大利鲟×西伯利亚鲟)可以耐受39.4%的碳水化合物^[33], 这是因为鲟肠道内含有较高的淀粉酶活性^[40], 至于鲟能耐受碳水化合物的最大程度, 还有待进一步的研究。

在西伯利亚鲟(6.77 g)的研究中, 用酪蛋白酸钠替代0%、20%、40%、60%、80%和100%的鱼粉, 进行为期50 d的养殖实验, 发现20%—60%水平下的鲟特定生长率最高^[41]。Zhu等^[42]在为期8周的西伯利亚鲟养殖实验中[(28.9±0.2) g], 发现混合动物蛋白源(肉骨粉:家禽副产品粉:水解羽毛粉=4:4:2)可替代50%的鱼粉, 且外源添加晶体氨基酸(苏氨酸和赖氨酸)对鱼体生长有良好的促进作用。同样在西伯利亚鲟的研究中, Xue等^[43]发现在36%和40%两个蛋白水平下, 混合动物蛋白源(家禽副产品粉:肉骨粉:水解羽毛粉:血粉=40:35:20:5)可以完全替代鱼粉, 在添加晶体氨基酸的情况下, 对鱼体生长无负面影响。Gong等^[44]以磷虾粉替代鱼粉, 以增重率和特定生长率为评价指标, 发现替代60%鱼粉俄罗斯鲟(481 g)的生长表现优于鱼粉组。Józefiak等^[45]发现用全脂黄粉虫粉和黑水虻虫粉可以替代15%的鱼粉, 而对西伯利亚鲟无显著性影响。Caimi等^[46]也发现黑水虻幼虫粉替代26.4%的鱼粉对西伯利亚鲟[(24.2±7.59) g]的肝脏和后肠微观结构无负面影响。由表4可见, 鲟可以很好地利用部分动物蛋白源。

综上所述, 目前关于鲟替代蛋白源的研究主要集中在西伯利亚鲟上, 对于其他品种的鲟研究较少, 西伯利亚鲟可以较好地利用植物蛋白源和动物蛋白源, 且能够较好地利用晶体氨基酸, 关于其他鲟品种饲料学的蛋白原料评价需要更多的研究。

1.2 脂肪营养需求研究进展

脂肪需求 关于鲟脂肪需求的研究较少, Hung等^[51]以110 g高首鲟为研究对象, 通过饲喂不同水平的鱼油(25.8%、30.4%、35.7%和40.2%)的饲料, 以SGR和饲料效率为评价指标, 发现高脂饲料(25.8%—35.7%)对鲟的生长无负面影响, 低蛋白高脂饲料(37.8%蛋白、40.2%脂肪)对生长有抑制作用, 可能是低蛋白高脂饲料降低了鲟的摄食量或饲料效率。Mohseni等^[14]采用正交实验法设计2种蛋白水平(40%和45%)和4种脂肪水平(鱼油:10%、15%、20%和25%)共8种饲料, 饲喂波斯鲟(136.8 g) 150d, 以体增重为评价指标, 40%蛋白和25%脂肪处理组的增重率最高, 优于45%蛋白和25%脂肪处理组, 且在40%蛋白水平下, 增重率会随着饲料脂肪增加而增加, 表明波斯鲟可利用高脂饲料。Keramat等^[52]用高脂(30%)和低脂(15%)饲料在2个投喂水平下(饱食和60%饱食)饲喂达氏鳇[(61.3±

4.4) g] 90d, 发现高脂饲料组的体增重显著高于低脂饲料, 表明达氏鳇可很好地利用饲料中的脂肪。Zhu等^[53]以葵花油、鱼油、亚麻油为混合脂肪源, 配制成3种不同脂肪水平(5%、15%和25%)的俄罗斯鲟[(9.61±0.03) g]饲料, 进行为期8周的养殖实验, 发现鲟在25%脂肪水平下生长最佳。Guo等^[54]以豆油和鱼油(1:1)为脂肪源, 在蛋白水平为37%下配制不同脂肪水平(4%—19%)的杂交鲟饲料[西伯利亚鲟×俄罗斯鲟, (66.7±0.11) g], 以SGR为评估指标, 采用折线回归模型拟合鲟饲料最适脂肪水平为11.1%。肖懿哲等^[55]以酪蛋白、鱼粉、糊精和纤维素等为主要原料配制而成的等氮(蛋白质含量41%)和等能(11.2 MJ/kg饲料)半精制饲料, 以等量混合的海水鱼油和豆油作为添加的脂肪源, 研究了油脂的添加水平对施氏鲟的影响, 提出8%是适宜的添加量(不包括饲料其他原料的脂肪)。关于鲟脂肪需求的研究进展见表综上所述, 波斯鲟、俄罗斯鲟、高首鲟和达氏鳇都能较好地利用高脂饲料(脂肪>25%), 但脂肪的精准需求还需要进一步的研究, 因为上述实验鲟生长最佳出现在最高脂肪水平处理组, 可能鲟还可利用更多的脂肪; 而杂交鲟(西伯利亚鲟×俄罗斯鲟)的脂肪需求只有11.1%, 因此不同鲟品种对脂肪需求不同, 可能与体内脂肪酶活性高低有关。

脂肪酸的需求 一般认为海洋鱼类不具备将短链不饱和脂肪酸转化为长链不饱和脂肪酸的能力, 而淡水鱼具备这种能力^[56]。鲟是洄游性鱼类, 据报道, 高首鲟具有合成长链不饱和脂肪酸的能力^[57]。因此, 鲟饲料中需要补充不饱和脂肪酸以满足其正常生长和生理需求。Wang等^[58]用葵花油和亚麻油为混合油, 用含有不同水平的 α -亚麻酸饲料饲喂俄罗斯鲟[(11.68±0.13) g] 8周, 根据特定生长率和饲料转化效率, 鲟 α -亚麻酸需求量为6.85—10.69 g/kg饲料, 过量的亚麻酸会抑制鱼体生长。

鱼类对必需脂肪酸除了考虑量的需求, 还需要考虑必需脂肪酸的比例。Li等^[59]分别用葵花油和紫苏油替代椰子油, 配制成0.5%、1%、2%的亚油酸(LA)和亚麻酸(LN), 及用葵花油和紫苏油同时替代椰子油, 配制成含有0.5%LA+0.5%LN、1%LA+1%LN的俄罗斯鲟[(9.59±0.19) g]饲料, 以增重率为评估指标, 鲟的LA和LN需求为1%和1%。Zhu等^[53]以鱼油、亚麻油和葵花油配制成3个脂肪水平(5%、15%和25%), 每个脂肪水平下3种n-3/n-6多不饱和脂肪酸(PUFA)比例(1:3、1:1和3:1)的9种饲料, 饲喂俄罗斯鲟[(9.61±0.03) g] 8周, 以增重率为评估指标, 发现脂肪水平为25%、n-3/n-6

PUFA为1:3时生长最佳。

鱼油替代的研究进展 随着水产养殖业的不断发展,鱼油的供需矛盾日益突出,寻找合适和廉价的鱼油替代物成为学者和相关企业关注的焦点。鲟鱼油替代源的研究较多, Xu等^[57]在高首鲟(35 g)饲料中添加15%混合油(玉米油、鱼肝油、猪油, 1:1:1)、玉米油、鱼肝油、猪油、亚麻油、豆油、红花油和加拿大菜油,发现各组的体增重、饲料效率和体成分无显著影响。在短期养殖过程中(30—90d), 亚麻油可完全替代鱼油对生长无负面影响,但在长期养殖过程中(360d), 则对鲟生长产生负面影响^[60]。同样地, Hosseini等^[61]发现加拿大菜油和豆油可完全替代欧洲鳊[(206±7.3) g]饲料中的鱼油而对生长无负面影响,但会降低肌肉中二十二碳六烯酸(DHA)和二十碳五烯酸(EPA)的含量。Xu等^[62]报道高首鲟可去饱和和延长饲料中的高不饱和脂肪酸(18:2n-6、18:3n-3)。Sener等^[63]以豆油和葵花油完全替代俄罗斯鲟 [(27.23±0.98) g]饲料中的鱼油,以SGR为评估指标,葵花油可完全替代鱼

油对生长无负面影响。Sener等^[64]发现用玉米油和葵花油混合油替代50%鱼油,以体增重为评价指标,对俄罗斯鲟[(143.89±2.84) g]无负面影响。Giovanni等^[65]在以螺旋藻粉完全替代鱼粉的情况下,再用玉米油和豆油完全分别完全替代鱼油,发现对高首鲟(17.5 g)的生长表现无负面影响,但会降低肌肉中的DHA和EPA。关于鲟替代脂肪源的研究进展见表6。综上所述,在短期养殖过程中(< 90d), 豆油、玉米油、亚麻油、葵花油、加拿大菜油和螺旋藻油等植物脂肪源可以完全替代鱼油而对生长无负面影响,甚至生长表现优于鱼油,如在达氏鳇的研究中,加拿大菜油在低脂和高脂水平下完全替代鱼油生长快于鱼油组^[66]。但能否真正完全替代鱼油,还需要进行长期实验验证(>360d)。另外,俄罗斯鲟的研究,混合脂肪源的替代生长效果要优于单一脂肪源替代效果,更多的研究应集中在混合脂肪源的研究中^[67]。这是因为以上这些植物油中富含n-3多不饱和脂肪酸(亚油酸和亚麻酸),能满足鲟必需脂肪酸的需求,但植物油替代鱼油会导致鲟肌肉组织

表5 鲟脂肪需求及脂肪酸的需求量

Tab. 5 Requirements of dietary lipid and fatty acid in sturgeons

项目Item	鲟品种Sturgeon species	试验鱼规格Initial body weight (g)	设计值Design value (%)	需求量Requirement (%)	脂肪水平Lipid level (%)	脂肪源Lipid source	评估指标Evaluated index	参考文献Reference
脂肪需求Lipid requirement	高首鲟AT	110	25.8—40.2	25.8—35.7	—	鱼油FO	特定生长率SGR	[51]
	波斯鲟AP	136.8	10—25	25	—	鱼油FO	增重率WGR	[14]
	西伯利亚鲟×俄罗斯鲟AB×AG	66.7±0.11	4—19	11.1	—	鱼油:豆油FO:SBO(1:1)	特定生长率SGR	[54]
	达氏鳇HH	61.3±4.4	15、30	30	—	鱼油:豆油FO:SBO(1:1)	体增重BWG	[52]
	俄罗斯鲟AG	9.61±0.03	5、15、25	25	—	葵花油、亚麻油、鱼油SFO, LO, FO(34:10.67:5.33)	增重率WGR	[53]
	施氏鲟AS	15.9±0.94	0-10	8	—	鱼油、豆油FO, SBO	增重率、蛋白质效率、饲料系数WGR, PER, FCR	[55]
必需脂肪酸EFA								
α-亚麻酸α-LN	俄罗斯鲟AG	11.68±0.13	0—2	0.69—1.07	9.8	葵花油、亚麻油SFO, LO	特定生长率、饲料转化效率SGR, FCR	[58]
亚油酸和亚麻酸LA, LN	俄罗斯鲟AG	9.59±0.19	0.5-2LA+0LN、0.5LN+0LA、0.5LN+0.5LA、1LA+1LN	1%LA和1%LN	12	椰子油、葵花油、紫苏油CO, SFO, PO	特定生长率、增重率SGR, WGR	[59]
n-3/n-6高不饱和脂肪酸PUFA	俄罗斯鲟AG	9.61±0.03	1:3、1:1、3:1	1:3	25	葵花油、鱼油、亚麻油SFO, FO, LO	增重率WGR	[53]

注: 必需脂肪酸Essential fatty acid (EFA); α-亚麻酸α-linolenic acid (α-LN); 亚油酸Linoleic acid (LA); 高不饱和脂肪酸Highly polyunsaturated fatty acid (PUFA); 鱼油Fish oil (FO); 豆油Soybean meal (SBO); 葵花油Sunflower oil (SFO); 亚麻油Linseed oil (LO); 椰子油Coconut oil (CO); 紫苏油Perilla oil (PO); 饲料转化效率Feed conversion ratio (FCR); “—”没有数据, No data; 其他缩写同表1—4 Other abbreviations are the same as shown in Tab. 1—4

中的高不饱和脂肪酸(HUFA)明显下降, 这是急需研究和解决的问题。

1.3 能量收支

鱼类的一切生命活动都离不开能量, 饲料中的能量需求主要来自于饲料中蛋白质、脂肪和碳水化合物。影响鱼类能量代谢的因素有水温、养殖密度、不同生长阶段、饲料蛋白水平和投喂水平等^[15, 72, 73]。国内外有关鲟能量学的研究只有零星报道, Cui等^[74]用活水蚓饲喂不同体重(2.4—22.5 g)的高首鲟来研究摄食水平(0、2%、4%、6%、8%初始体重和饱食)和鱼体规格对能量收支的影响。无论鲟体重多少, 特定生长率都会随着摄食水平线性增加, 饲料转化效率在饱食时最大。可消化能占总摄入能量的94.8%—96.8%, 饱食投喂时, 64.9%的代谢能用于代谢消耗, 35.1%的代谢能用于生长, 且不受鱼体规格的影响。Guo等^[15]研究7种蛋白水平(250、300、350、350、400、450、500和550 g/kg)对初重为25.1 g的杂交鲟(西伯利亚鲟×俄罗斯

鲟)能量收支的影响, 生长实验表明, 当饲料蛋白水平在250—400 g/kg时, 特定生长率会随之上升, 之后就显著下降, 摄食量会随着饲料蛋白水平的升高而减少, 在鲟摄食350 g/kg蛋白水平的饲料时, 能量收支模型为: $C \text{ 摄入能量}(100\%) = F \text{ 粪便能量}(35.08\%) + U \text{ 尿能量}(4.53) + R \text{ 代谢能}(34.1\%) + G \text{ 生长净能}(26.23\%)$ 。邢浩春等^[75]研究了在低蛋白含量(28%)不同浓度维生素B₆对施氏鲟幼鲟(34.7 g)能量收支的影响, 结果表明45—60 mg/kg维生素B₆饲料转化效率最高, 特定生长率最高, 45和60 mg/kg维生素B₆能量收支方程分别为: $100C = 21.3F + 11.5U + 46.3R + 21.0G$ 和 $100C = 19.7F + 10.3U + 52.7R + 17.3G$, 该研究与郭文英^[76]鲟品种不同, 郭文英的研究对象是杂交鲟, 该研究使用的是施氏鲟, 在郭文英^[76]的研究中蛋白水平为25%时, 生长能分配率22.6%, 高于该研究的最高值21.0%, 这可能由于鲟品种不同而引起的。也可能是由于该研究中饲料配方中鱼粉的用量(19%)低于郭文英^[76]鱼粉用量的最低值

表 6 鲟饲料中其他脂肪源替代鱼油量

Tab. 6 The replacement amount of dietary fish oil by other lipid sources in sturgeons

鲟品种 Sturgeon species	脂肪源Lipid source	试验鱼规格 Initial body weight (g)	对照组 Control	脂肪水平Lipid level (%)	替代水平 Replacement level (%)	评估指标Evaluated index	参考文献 Reference
高首鲟AT	玉米油、猪油、亚麻油、豆油、红花油、加拿大菜油(单独替代)CO, Lard, LO, SBO, SFO, CO (Separate replacement)	35	玉米油、鱼肝油和猪油CO, CLO and lard(1:1:1)	15	100	体增重、饲料转化效率BWG, FCR	[57]
俄罗斯鲟AG	豆油、葵花油SBO, SFO (SR)	27.23±0.98	鱼油FO	10	100	特定生长率、体增重SGR, BWG	[63]
俄罗斯鲟AG	玉米油+葵花油(混合油)CO + SFO (Oil mixture)	143.89±2.84	鱼油FO	10	50	体增重、特定生长率BWG, SGR	[64]
高首鲟AT	玉米油、豆油CO, SBO (SR)	17.5	鱼肝油CLO	7.5	100	体增重、特定生长率BWG, SGR	[65]
欧洲鳇HH	豆油、加拿大菜油 SBO, CO (SR)	206±7.3	鱼油FO	12	100	体增重BWG	[61]
里海鲟HH	葵花油+豆油、葵花油+加拿大菜油、豆油+加拿大菜油SFO + SBO, SFO + CO, SBO + CO (OM)	26.97±0.49	鱼油FO	10	50	增重率、特定生长率WGR, SGR	[68]
施氏鲟AS	牛油、猪油、菜油、玉米油、豆油TO, Lard, RO, CO, SBO (SR)	9.83±0.19	鱼油FO	10	100	增重率WGR	[69]
中华鲟AS	玉米油、豆油CO, SBO (SR)	47.5	鱼油FO	9	100	特定生长率SGR	[70]
俄罗斯鲟AG	亚麻油+豆油+牛油LO + SBO + TO(1:1:1)(OM)	1.39±0.15	鱼油FO	9	100	体增重、特定生长率BWG, SGR	[67]
达氏鳇HH	加拿大菜油CO	207±0.05	鱼油FO	12、24	100	体增重、特定生长率BWG, SGR	[66]
西伯利亚鲟×施氏鲟AB×AS	亚麻油、豆油LO, SBO (SR)	70.8±0.5	鱼油FO	10	100	增重率、特定生长率WGR, SGR	[71]

注: 欧洲鳇*Huso huso* (HH); 里海鲟*Huso huso* (HH); 中华鲟*Acipenser sinensis* (AS); 玉米油Corn oil (CO); 猪油Lard; 红花油Safflower oil (SFO); 加拿大菜油Canola oil (CO); 单独替代Separate replacement (SR); 混合油Oil mixture (OM); 牛油Tallow oil (TO); 鱼肝油Cod liver oil (CLO); 饲料转化效率Feed conversion ratio (FCR); 其他简写同表1—5 Other abbreviations are the same as shown in Tab. 1—5

(28.2%)导致的。郭文英^[76]研究 α -淀粉水平(9%—25%)对西伯利亚鲟能量收支的影响,以鱼粉(15%)和膨化大豆(16%)为主要蛋白源,生长能分配率随着淀粉水平的增加而增加,为31.94%—40.31%,生长速度在21%和25%的添加水平下最高。

1.4 碳水化合物的营养需求

目前关于鲟适宜碳水化合物的需求研究较少。Fynn等^[77]用含不同水平D-葡萄糖(0、7%、14%、21%、28%和35%)饲喂高首鲟8周,以增重率为评估指标,得出饲料葡萄糖的适宜添加水平为14%—35%。为了探究高首鲟合适的糖源,Hung等^[78]配制8种等氮等脂但糖源不同(麦芽糖、葡萄糖、生玉米淀粉、糊精、蔗糖、乳糖、果糖和纤维素)的配合饲料饲喂鲟8周,体增重和饲料效率按上述糖源顺序逐渐下降,得出高首鲟能较好地利用麦芽糖和葡萄糖,而对蔗糖、乳糖和果糖的利用较差。分析原因可能是鲟消化道里的蔗糖酶和乳糖酶活性较低,从而对这两种糖源的消化率较差^[79];其次,也可能是高首鲟对蔗糖、乳糖和果糖的耐受力较差,Hung等^[80]表明饲喂这3种糖源的高首鲟肝细胞的细胞质回缩且胞间糖原减少,后肠肠腔水分较多,与哺乳动物腹泻类似。同样对于高首鲟,Lin等^[81]发现对淀粉的利用效果优于葡萄糖,高首鲟对淀粉和葡萄糖利用效果的差异可能来自于2个报道中饲料配方、饲料蛋白水平和投喂频率的不同。而在施氏鲟的研究中,其最适的糖源为糊精和 α 淀粉,对果糖的利用最差^[82],Yazdani等^[83]也表明西伯利亚鲟可较好利用糊精(10%—20%)从而减少饲料中鱼油和植物油的用量。另外,投喂频率对鲟利用碳水化合物也会产生影响。Lin等^[81]采用连续投喂和1d两次投喂两种方式饲喂糖源为淀粉和葡萄糖的2种高首鲟饲料,发现投喂方式对鲟利用碳水化合物的影响大于碳水化合物源的影响,且连续投喂的特定生长率和饲料效率远高于1d投喂两次。这与鲟的摄食习性有关,鲟是下位口,且为少量多次摄食,摄食速度较慢。因此,不同鲟品种利用碳水化合物源的能力不同,根据目前的文献记载,鲟对果糖的利用较差,建议鲟饲料中不要添加果糖。尽管鲟可较好地利用多糖如糊精和 α 淀粉,但对生淀粉利用能力较差^[84]。

饲料脂肪水平也会影响鲟利用碳水化合物。Mohseni等^[85]采用正交实验法设计4种饲料蛋白水平(35%、40%、45%和50%) $\times$ 4种碳脂比(碳水化合物:脂肪,C:L,0.8、1.1、1.4和1.7)共16种饲料,发现最适宜碳脂比(1.4)可有效节约蛋白质,饲喂35%蛋白质和碳脂比为1.4的饲料鲟的特定生长

率、饲料效率和蛋白质效率要高于40%蛋白和碳脂比为0.8以及50%蛋白水平及碳脂比为0.8和1.7。综上所述,不同鲟品种对不同糖源的利用效果不同,高首鲟能较好地利用葡萄糖、麦芽糖和淀粉,施氏鲟和西伯利亚鲟的最适糖源是糊精和 α 淀粉。

1.5 其他营养素的需求

维生素是维持鱼类生长和发育所必需的一类低分子有机化合物,这类物质不能在体内合成或者合成较少,必须由食物提供,维生素对维持鱼类正常生理代谢有着极其重要的作用。关于鲟对维生素需求研究相对较少。鲟作为一群古老鱼类,据报道,具有自身合成维生素C(Vc)的能力^[86]。这是因为鲟肾脏中含有将葡萄糖转化为L-维生素C的L-古洛糖酸内酯氧化酶^[87]。这一观点在西伯利亚鲟中得到了验证,Moreau等^[88]报道西伯利亚幼鲟[(25.5 $\pm$ 0.5)g]在摄入无维生素C的饲料3个月后并没有出现Vc缺乏症,且生长表现与Vc添加组(300 mg/kg饲料)无显著性差异。在杂交鲟(西伯利亚鲟 $\times$ 小体鲟)、达氏鲟也得到了同样的结果^[89,90]。而Desimira等^[91]在闪光鲟(155 g)的研究中,发现与高剂量Vc添加组(800 mg/kg)和无Vc组相比较,低剂量的Vc(200—400 mg/kg)可显著地促进鲟的生长。Xie等^[92]发现添加500 mg/kg的Vc可增强西伯利亚鲟的免疫力。因此,建议在鲟幼鱼阶段的饲料中添加适量Vc,增强免疫力。Wen等^[93]以体增重为评价指标,发现施氏鲟对维生素A的需求量为923 IU/kg饲料。Amlashi等^[94]以特定生长率为评估指标,达氏鲟对饲料维生素E的需求量为25—400 mg/kg。鲟对维生素的需求汇总见表7,多数B族维生素需求的研究未见报道,如维生素B1、B2、B12、烟酸、泛酸、生物素等。

最近几年对矿物盐的报道越来越多。矿物盐是构成鱼体组织的重要组分,同时也是维持渗透压和酸碱平衡等正常生理代谢不可缺少的营养素。磷是水产动物不可或缺的营养元素,磷缺乏会导致鱼类骨骼和鳞片矿化不良,水产动物摄入过量的磷会导致磷的排放增加,因此很有必要研究水产动物磷的需求^[102]。Xu等^[103]以磷酸二氢钠为磷源配制不同磷水平(0.12%—1.38%)的西伯利亚鲟饲料,以增重率和全鱼磷含量为评价指标,得出饲料适宜磷水平为0.5%—0.87%。Jin等^[104]以玉米淀粉为载体给杂交鲟(达氏鲟 $\times$ 施氏鲟)灌喂不同剂量的磷酸二氢钙(0、100、200和400 mg/kg体重),发现杂交鲟能较好地吸收磷源,在灌喂4h后血磷就达到峰值,以磷的排泄率为评价指标,磷的适宜添加水平为100 mg/kg体重(饲料中水平为1%)。

铜是水产动物必需的微量元素, 是许多酶的辅助因子, 如细胞色素氧化酶、Cu-Zn超氧化物歧化酶等(Cu-Zn SOD)^[105]。Mohseni等^[106]以CuSO₄为铜源, 配制不同铜水平(1.1—195 mg/kg饲料)的达氏鳇饲料[(8.49±0.32) g], 以体增重为评价指标, 适宜的铜添加量为10.3—13.1 mg/kg饲料。在俄罗斯鲟(11.85 g)的研究中, 同样以CuSO₄为铜源, 配制0.3—16.1 mg/kg的饲料, 以增重率、全鱼铜含量、肝脏Cu-Zn SOD和血浆铜蓝蛋白为评价指标, 饲料中适宜铜添加量为7—8 mg/kg饲料^[107]。Wang等^[108]比较俄罗斯鲟对不同水平的铜源的利用情况, 发现蛋氨酸铜和纳米氧化铜的生物利用度是CuSO₄的1.5—2倍, 鲟对蛋氨酸铜、纳米氧化铜和CuSO₄的需求量分别为5、5和8 mg/kg。Moazenzadeh等^[109]以CuSO₄为铜源, 配制不同铜梯度(1.8—28.3 mg/kg)的西伯利亚鲟[(27.57±0.24) g]饲料, 以特定生长率、全鱼蛋白质含量和超氧化物歧化酶活性为评价指标, 鲟饲料中铜的需求量分别是9.51、9.58和16.10 mg/kg。锌也是非常重要的必需微量元素, 它是200多种酶的辅助因子, 包括碱性磷酸酶、DNA聚合物和Cu-Zn SOD等, 参与各种生命活动^[110]。Moazenzadeh等^[110, 111]以硫酸锌为锌源, 配制不同锌水平(14.7—46.4 mg/kg)的西伯利亚鲟[(26.52±0.94) g]饲料, 以终末体重和肝脏锌含量为评价指标, 鲟饲料适宜的锌添加量为29.15 mg/kg和34.60 mg/kg。Arshad等^[112]以L-蛋氨酸硒为硒源, 添加不同水平的硒(1.26—20.26 mg/kg)饲喂达氏鳇[(3.5±2.0) g] 8周,

以体增重和特定生长率为评估指标, 得出饲料中适宜硒添加水平为11.56—20.26 mg/kg。鱼类对于不同来源的硒生物利用度不同, 如鲤对纳米硒的利用率高于亚硒酸钠和蛋氨酸硒, 同样, 虹鳟对酵母硒的生物利用度高于亚硒酸钠^[113]。关于鲟对矿物盐的需求见表8。其他的矿物盐还未见报道, 如钙、镁、铁、锰、钴和碘等。

1.6 饲料添加剂的研究进展

功能性饲料添加剂是一种具有动物保健作用的饲料添加剂, 具有改善动物生长性能、增加免疫力和提高抗应激能力等功效。目前应用于水产中的饲料添加剂主要包括益生菌、益生元、合生元、免疫增强剂、有机酸、核苷酸及中草药提取物等^[116]。

Mohseni等^[117]在达氏鳇饲料中添加不同梯度(0—1200 mg/kg)的L-肉碱, 发现添加剂量为300 mg/kg可显著促进鱼体的生长。Jalali等^[118]在达氏鳇饲料中添加0、2.0、4.0和6.0 g/kg的海藻酸(Ergosan), 以特定生长率和增重率为评价指标, 海藻酸的适宜添加剂量为4%—6%。Esterabadi等^[119]研究益生元(Immunogen)对达氏鳇生长的影响, 发现饲料中添加0.5%—1%的益生元可显著促进鱼体生长。同样在达氏鳇的研究中, Hossein等^[120]添加2%的灭活酿酒酵母可显著提高特定生长率、增重率及增加肠道中乳酸菌的数量。Askarian等^[121]研究了来自达氏鳇消化道中的弯曲乳杆菌和波斯鲟胃肠道中的肠系膜明串珠菌两种乳酸菌对波斯鲟和达氏鳇生

表7 鲟对维生素的需求量

Tab. 7 The requirement of dietary vitamin in sturgeons

鲟品种Sturgeon species	维生素Vitamin	试验鱼规格Initial body weight (g)	设计值Design value (mg/kg)	需求量Requirement (mg/kg)	评估指标Evaluated index	参考文献Reference
闪光鲟AS	维生素C V _C	155	0—800	200—400	体增重、特定生长率BWG, SGR	[91]
施氏鲟AS	维生素A V _A	12.09±0.22	0.003—2.49	0.28	体增重BWG	[93]
达氏鳇HH	维生素E V _E	49.7±0.1	0—400	25—400	特定生长率SGR	[94]
施氏鲟AS	吡哆醇Pyridoxine	34.7	0—75	45—60	饲料转化效率FCR	[75]
西伯利亚鲟AB	维生素K ₃ VK ₃	5.14	0—990	19.79—24.57	肝胰脏和肾脏总抗氧化酶活T-AOC in hepatopancreas and kidney	[95]
裸腹鲟AN	叶酸Folic acid	32	1.5—5.5	3.5	血液Blood	[96]
高首鲟AT	胆碱Choline	2	0—8000	1700—3200	饲料系数FCR	[97]
西伯利亚鲟AB	氯化胆碱Choline chloride	37.67±2.92	0—7500	1500	增重率、特定生长率和饲料系数WGR, SGR, FCR	[98]
中华鲟AS	氯化胆碱Choline chloride	12.50	220—5370	1656	肌肉脂肪含量Lipid content in muscle	[99]
施氏鲟AS	肌醇Inositol	11.90±0.12	28.75—936.28	336.1	体增重BWG	[100]
西伯利亚鲟AB	维生素D ₃ VD ₃	3.47±0.14	0.006-25	0.042	体增重BWG	[101]

注: 闪光鲟*Acipenser stellatus* (AS); 裸腹鲟*Acipenser nudiiventris* (AN); 总抗氧化酶活Total antioxidant capacity (T-AOC); 其他简写同表1—6 Other abbreviations are the same as shown in Tab. 1—6

长、消化酶活性和肠道微生物的影响,发现达氏鳇摄入含有 9×10^9 cfu/g饲料的弯曲乳杆菌可获得最高的特定生长率、存活率和消化酶(淀粉酶、蛋白酶和脂肪酶)活性,而在波斯鳇中,添加 2×10^9 cfu/g饲料的肠系膜明串珠菌也可取得同样的效果。Xu等^[122]发现在杂交鳇(施氏鳇 $\times$ 达氏鳇)饲料中添加1%丙氨酸-谷氨酰胺和0.9%—1.5%谷氨酰胺可显著促进鳇的生长,降低饲料系数和提高肠道消化酶活。同样在杂交鳇(施氏鳇 $\times$ 西伯利亚鳇)的研究中,添加1%的丙氨酸谷氨酰胺可促进鱼体生长^[123]。表9按归纳总结近年来饲料添加剂在鳇上的研究,为配制鳇优质高效饲料提供参考依据。

2 总结与展望

近几年,虽然关于鳇的营养学研究越来越多,但每种鳇的营养需求还需要进一步完善和扩充,其

中,蛋白质需求在鳇中的报道并不集中在某一品种上,在波斯鳇、匙吻鳇和达氏鳇等中均有报道,需求量总体在40%左右。在蛋白源的替代研究中,研究对象主要是西伯利亚鳇,植物蛋白源和动物蛋白源均可被利用。不同鳇品种对脂肪需求不同,需求量为11.1%—35.7%,且鳇能较好地利用植物油;碳水化合物需求量为10%—35%;关于矿物盐、维生素、添加剂的需求在鳇中均有报道。本文总结了鳇营养与饲料学相关的几乎所有文献,为鳇精准营养需求提供了大量数据,为鳇配合饲料的进一步开发提供科学依据。

但仍有一些问题需要解决:(1)鳇氨基酸需求的研究相对缺乏,需要进一步的研究;(2)对鳇的研究均停留在幼鱼阶段,很有必要研究其他生长阶段的营养需求;(3)关于维生素和矿物盐的需求还不全面,需进一步的研究;(4)关于营养素对鳇肌肉品质

表8 鳇对矿物盐的需求量

Tab. 8 The requirement of dietary mineral in sturgeons

鳇品种 Sturgeon species	矿物质 Mineral	矿物质来源Mineral source	试验鱼规格 Initial body weight (g)	设计值Design value (mg/kg)	需求量 Requirement (mg/kg)	评估指标Evaluated index	参考文献 Reference
达氏鳇HH	硒Se	L-硒代蛋氨酸L-SeMet	3.5 $\pm$ 2.0	1.26—20.26	11.56—20.26	体增重、特定生长率 BWG, SGR	[114]
西伯利亚鳇AB	磷P	磷酸二氢钠 Monosodium phosphate	14.50 $\pm$ 1.00	1200—13800	5000—8700	增重率、全鱼磷含量 WGR, Phosphorus content of whole fish	[103]
施氏鳇AS	磷P	磷酸二氢钙 Monocalcium phosphate	4.7	18000—166000	8800—10000	特定生长率、脊椎骨 磷含量SGR, Phosphorus concentration in vertebrate	[115]
达氏鳇HH	铜Cu	硫酸铜Copper sulfate	8.49 $\pm$ 0.32	1.1—195	10.3—13.1	体增重、全鱼和肌肉 蛋白质含量BWG, Protein content in whole fish and muscle	[106]
俄罗斯鳇AG	铜Cu	硫酸铜Copper sulfate	11.85	0.3—16.1	7—8	增重率、全鱼铜含 量、肝脏Cu-Zn SOD活 性、血浆铜蓝蛋白 WGR, Copper content of whole fish, hepatic Cu-Zn SOD activity, Plasma ceruloplasmin activity	[107]
俄罗斯鳇AG	铜Cu	蛋氨酸铜、纳米氧化 铜、硫酸铜CuMet, CuONano, Copper sulfate	9.82 $\pm$ 0.08	2.46—16.15	5—8	体增重、全鱼铜含 量、肝脏Cu-Zn SOD活 性BWG, Copper content of whole fish, hepatic Cu-Zn SOD activity	[108]
西伯利亚鳇AB	铜Cu	硫酸铜Copper sulfate	27.57 $\pm$ 0.24	1.8—28.3	9.51—16.10	特定生长率、全鱼蛋 白质含量和SOD活性 SGR, Protein content of whole fish, SOD activity	[109]
西伯利亚鳇AB	锌Zn	硫酸锌Zinc sulfate	26.52 $\pm$ 0.94	14.7—46.4	29.15—34.60	终末体重、肝脏锌含 量FBW, Hepatic zinc content	[110, 111]

注: 硒Selenium (Se); 磷Phosphorus (P); 铜Copper (Cu); 锌Zinc (Zn); L-蛋氨酸硒L-selenomethionine (L-SeMet); 蛋氨酸铜Copper-methionine (Cu-Met); 纳米氧化铜Nano-copper oxide (CuONano); 超氧化物歧化酶Superoxide dismutase (SOD); 终末体重Final body weight (FBW); 其他简写同表1—7 Other abbreviations are the same as shown in Tab. 1—7

表 9 鲟饲料添加剂的适宜添加量
Tab. 9 Optimal level of dietary additive in sturgeons

鲟品种 Sturgeon species	添加剂 Additive	试验鱼规格 Initial body weight	设计值范围 Design value	适宜添加量 Optimal level	评估指标 Evaluated index	参考文献 Reference
达氏鳇HH	L-肉碱L-carnitine	100 mg	0—1200 mg/kg	300 mg/kg	特定生长率、蛋白质效率、饲料系数SGR, PER, FCR	[117]
达氏鳇HH	海藻酸Ergosan	41.7±1.8 g	0—6 g/kg	4—6 g/kg	特定生长率、增重率SGR, WGR	[118]
达氏鳇HH	益生元Immunogen	8.71±0.02 g	0—4%	0.5%—1%	特定生长率、饲料系数SGR, FCR	[119]
达氏鳇HH	灭活酿酒酵母Inactive brewer's yeast	11.44±0.56 g	0—2%	2%	特定生长率、饲料系数、存活率SGR, FCR, SR	[120]
达氏鳇HH	弯曲杆菌LC	50.10±1.03 mg	2×10^9 — 9×10^9 cfu/g	9×10^9 cfu/g	特定生长率、消化酶活性SGR, Digestive enzymes	[121]
波斯鳇AP	肠系膜明串珠菌LM	40.30±2.06 mg	2×10^9 — 9×10^9 cfu/g	2×10^9 cfu/g	特定生长率、消化酶活性SGR, Digestive enzymes	[121]
施氏鳇×达氏鳇 AS×HH	丙氨酸-谷氨酰胺Alanyl-L-Glutamine	22.38±0.18 g	0—1%	1%	增重率、饲料系数和消化酶活性WGR, FCR, Digestive enzymes	[122]
施氏鳇×达氏鳇 AS×HH	谷氨酰胺glutamine	22.38±0.18 g	0—1.5%	0.9—1.5	增重率、饲料系数和消化酶活性WGR, FCR, Digestive enzymes	[122]
施氏鳇×西伯利亚鳇 AS×AB	L-谷氨酰-L-谷氨酰胺L-Alanyl-L-Glutamine	0.42±0.05 g	0—1%	1%	存活率、增重率和特定生长率SR, WGR, SGR	[123]
施氏鳇×达氏鳇 AS×HH	谷氨酰胺Glutamine	22.38±0.18 g	0—1.5%	0.9%—1.2%	血清补体C3、C4、肝脏和血清抗氧化能力 Complement C3, C4, Hepatic and serum antioxidant ability	[124]
西伯利亚鳇AB	阿拉伯糖基木聚糖(平均聚合度30)AXOS average degree of polymerization 30	25.9±0.9 g	0、2%	2%	吞噬活性、补体活性、过氧化物酶Phagocytic activity, Complement activity, CAT	[125]
达氏鳇HH	多种混合酶Multienzyme complex	10.2±0.8 g	0—1000 mg/kg	250 mg/kg	特定生长率SGR	[126]
达氏鳇HH	核苷酸混合物Nucleotide mixture	12.57±0.5 g	0—0.5%	0.35%	特定生长率、增重率SGR, WGR	[127]
闪光鳇AS	低聚果糖FOS	30.16±0.14 g	0—2%	1%	特定生长率、增重率SGR, WGR	[128]
闪光鳇AS	大蒜粉Garlic powder	5.5 g	0—3%	1.5%—3%	特定生长率、增重率SGR, WGR	[129]
波斯鳇AP	Beta-葡聚糖Beta-glucan	20.1±0.8	0—0.3%	0.2%	特定生长率SGR	[130]
达氏鳇HH	酵母益生元Yeast prebiotic	40.8±6 g	0—2%	1%—2%	特定生长率SGR	[131]
达氏鳇HH	螺旋藻粉SM	32.16±0.38 g	0—10%	10%	特定生长率、增重率SGR, WGR	[132]

注: 弯曲杆菌*Lactobacillus curvatus* (LC); 肠系膜明串珠菌*Leuconostoc mesenteroides* (LM); 阿拉伯糖基木聚糖Arabinoxylan-oligosaccharides (AXOS); 低聚果糖Fructooligosaccharide (FOS); 过氧化氢酶Catalase (CAT). 其他简写同表 1—8 Other abbreviations are the same as shown in Tab. 1—8

和风味的影响较少,只集中在全鱼和肌肉的营养成分分析,需进一步研究营养素对肌肉物理和化学特性的影响;(5)需要比较不同品种的鲟对不同营养素需求的差异,应用组学进行相关分子机制的研究。

参考文献:

- [1] Birstein V J. Sturgeons and paddlefishes: threatened fishes in need of conservation [J]. *Conservation Biology*, 1993, 7(4): 773-787.
- [2] Scott W, Crossman E J. Sturgeon family Acipenseridae [J]. *Freshwater Fishes of Canada*, 1973(184): 78.
- [3] Carmona R, Domezain A, García-Gallego M, et al. Biology, Conservation and Sustainable Development of Sturgeons [M]. Netherland Springer, 2009: 321-337.
- [4] Bronzi P, Rosenthal H, Gessner J. Global sturgeon aquaculture production: an overview [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2011, 27(2): 169-175.
- [5] Tripp S J, Phelps Q E, Colombo R E, et al. Maturation and reproduction of shovelnose sturgeon in the middle Mississippi River [J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 2009, 29(3): 730-738.
- [6] Lu X, Rasco B A. Sturgeon (*Acipenser transmontanus*) sexual maturation and caviar quality [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2014, 6(2): 89-99.
- [7] Hoseinifar S H, Mirvaghefi A, Mojazi Amiri B, et al. The effects of oligofructose on growth performance, survival and autochthonous intestinal microbiota of beluga (*Huso huso*) juveniles [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2011, 17(5): 498-504.
- [8] Bronzi P, Chebanov M, Michaels J T, et al. Sturgeon meat and caviar production: Global update 2017 [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2019, 35(1): 257-266.
- [9] Shen L, Shi Y, Zou Y C, et al. Sturgeon aquaculture in China: status, challenge and proposals based on nationwide surveys of 2010-2012 [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2014, 30(6): 1547-1551.
- [10] He Y H, Yuan Y M, Zhang H Y, et al. Current situation, opportunities and countermeasures of sturgeon industry in China [J]. *Hunan Agricultural Science*, 2019(7): 118-121. [贺艳辉, 袁永明, 张红燕, 等. 中国鲟产业发展现状、机遇与对策建议 [J]. 湖南农业科学, 2019(7): 118-121.]
- [11] Ramón Carmona A D, Manuel G G, José A H, et al. Biology Conservation and Sustainable Development of Sturgeons [M]. Netherlands Springer, 2009: 121-137.
- [12] Hung S S O. Recent advances in sturgeon nutrition [J]. *Animal Nutrition*, 2017, 3(3): 191-204.
- [13] Moore B J, Hung S S O, Medrano J F. Protein requirement of hatchery-produced juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) [J]. *Aquaculture*, 1988, 71(3): 235-245.
- [14] Mohseni M, Sajjadi M, Pourkazemi M. Growth performance and body composition of sub-yearling Persian sturgeon, (*Acipenser persicus*, Borodin, 1897), fed different dietary protein and lipid levels [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2007, 23(3): 204-208.
- [15] Guo Z, Zhu X, Liu J, et al. Effects of dietary protein level on growth performance, nitrogen and energy budget of juvenile hybrid sturgeon, *Acipenser baerii* ♀ × *A. gueldenstaedtii* ♂ [J]. *Aquaculture*, 2012(338-341): 89-95.
- [16] Liu Y Y. Study on dietary protein and lipid requirement of *polyodon spathula* [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018: 7-19. [刘阳洋. 匙吻鲟对蛋白质和脂肪营养需求量的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018: 7-19.]
- [17] Li T Q, Hao Y J, An R Y, et al. Effects of dietary protein level on digestibility in *Acipenser schrenk* larvae [J]. *Freshwater Fisheries*, 2002, 32(5): 51-54. [李同庆, 郝玉江, 安瑞永, 等. 饲料蛋白水平对史氏鲟幼体消化率的影响 [J]. 淡水渔业, 2002, 32(5): 51-54.]
- [18] Ellis S C, Reigh R C. Effects of dietary lipid and carbohydrate levels on growth and body composition of juvenile red drum, *Sciaenops ocellatus* [J]. *Aquaculture*, 1991, 97(4): 383-394.
- [19] Mohseni M, Pourkazemi M, Hosseini M R, et al. Effects of the dietary protein levels and the protein to energy ratio in sub-yearling Persian sturgeon, *Acipenser persicus* (Borodin) [J]. *Aquaculture Research*, 2013, 44(3): 378-387.
- [20] Sun H T, Ji H. Effects of dietary protein levels on muscle composition and digestive activities in juvenile paddlefish *Polyodon spathula* [J]. *Fisheries Science*, 2011, 30(12): 721-725. [孙海涛, 吉红. 饲料蛋白水平对匙吻鲟幼鱼肌肉营养成分及消化酶活力的影响 [J]. 水产科学, 2011, 30(12): 721-725.]
- [21] Zhang L, Wei Q W, Zhang S H, et al. Effects of dietary protein level on growth performance, body composition, digestive enzyme activities and blood biochemical parameters of juvenile *Acipenser dabryanus* [J]. *Freshwater Fisheries*, 2016, 46(6): 79-86. [张磊, 危起伟, 张书环, 等. 饲料蛋白水平对达氏鲟幼鱼生长性能、体组成、消化酶活性以及血液生化指标的影响 [J]. 淡水渔业, 2016, 46(6): 79-86.]
- [22] Li Q, Lu X, Liang H, et al. Effects of dietary levels of protein on growth, feed utilization and physiological parameters for juvenile Dabry's sturgeon, *Acipenser dabryanus* [J]. *Aquaculture Research*, 2018, 49(6): 2099-2107.
- [23] Kittel E C, Small B C. Effect of altering dietary protein: energy ratios on juvenile pallid sturgeon growth performance [J]. *North American Journal of Aquaculture*, 2014, 76(1): 28-35.
- [24] Ng W K, Hung S S O. Estimating the ideal dietary indispensable amino acid pattern for growth of white sturgeon, *Acipenser transmontanus* (Richardson) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 1995, 1(2): 85-94.
- [25] Shi L Q, Wang X C. Evaluation of nutritional components and quality in the muscle and cartilage of hybrid

- sturgeon [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, **34**(16): 338-341. [石奇立, 王锡昌. 杂交鲟肌肉和软骨的营养成分分析及品质评价 [J]. 食品工业科技, 2013, **34**(16): 338-341.]
- [26] Wang L S, Wu J G, Wang C A, *et al.* Dietary arginine requirement of juvenile hybrid sturgeon (*Acipenser schrenckii* ♀ × *Acipenser baerii* ♂) [J]. *Aquaculture Research*, 2017, **48**(10): 5193-5201.
- [27] Akiyama T, Oohara I, Yamamoto T. Comparison of essential amino acid requirements with A/E ratio among fish species (review paper) [J]. *Fisheries Science*, 1997, **63**(6): 963-970.
- [28] Wang L S, Xu Q Y, Wang C A, *et al.* Effects of dietary α -ketoglutarate supplementation on the growth performance, glutamine synthesis and amino acid concentrations of juvenile hybrid sturgeon *Acipenser schrenckii* ♀ × *Acipenser baerii* ♂ fed high levels of soy protein concentrate [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2016(211): 199-207.
- [29] Safari O, Naserizadeh M, Mohammadi A M. Digestibility of selected feedstuffs in subadult Caspian great sturgeon, *Huso huso* using settlement faecal collection and stripping methods [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2016, **22**(2): 293-303.
- [30] Liu H, Wu X, Zhao W, *et al.* Nutrients apparent digestibility coefficients of selected protein sources for juvenile Siberian sturgeon (*Acipenser baerii* Brandt), compared by two chromic oxide analyses methods [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2009, **15**(6): 650-656.
- [31] Stuart J S, Hung S S O. Growth of juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) fed different proteins [J]. *Aquaculture*, 1989, **76**(3): 303-316.
- [32] Degani G. Availability of protein and energy from three protein sources in hybrid sturgeon *Acipenser guldenstadti* × *A. bester* [J]. *Aquaculture Research*, 2002, **33**(9): 725-727.
- [33] Sicuro B, Gai F, Daprà F, *et al.* Hybrid sturgeon 'AL' (*Acipenser naccarii* × *Acipenser baeri*) diets: the use of alternative plant protein sources [J]. *Aquaculture Research*, 2012, **43**(2): 161-166.
- [34] Xu Q Y, Wang C A, Zhao Z G, *et al.* Effects of replacement of fish meal by soy protein isolate on the growth, digestive enzyme activity and serum biochemical parameters for juvenile amur sturgeon (*Acipenser schrenckii*) [J]. *Asian-Australas Journal of Animal Sciences*, 2012, **25**(11): 1588-1594.
- [35] Jahanbakhshi A, Imanpoor M R, Taghizadeh V, *et al.* Hematological and serum biochemical indices changes induced by replacing fish meal with plant protein (sesame oil cake and corn gluten) in the Great sturgeon (*Huso huso*) [J]. *Comparative Clinical Pathology*, 2012, **22**(6): 1087-1092.
- [36] Yun B, Xue M, Wang J, *et al.* Fishmeal can be totally replaced by plant protein blend at two protein levels in diets of juvenile Siberian sturgeon, *Acipenser baerii* Brandt [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2014, **20**(1): 69-78.
- [37] Palmegiano G B, Daprà F, Forneris G, *et al.* Rice protein concentrate meal as a potential ingredient in practical diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture*, 2006, **258**(1): 357-367.
- [38] Men K, Ai Q, Mai K, *et al.* Effects of dietary corn gluten meal on growth, digestion and protein metabolism in relation to IGF-I gene expression of Japanese seabass, *Lateolabrax japonicus* [J]. *Aquaculture*, 2014, **428-429**: 303-309.
- [39] Li G, Liu W, Wang Y, *et al.* Functions and Applications of Bioactive Peptides from Corn Gluten Meal [M]. Advances in Food and Nutrition Research. Beijing: Academic Press, 2019: 1-41.
- [40] Furné M, García-Gallego M, Hidalgo M C, *et al.* Effect of starvation and refeeding on digestive enzyme activities in sturgeon (*Acipenser naccarii*) and trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2008, **149**(4): 420-425.
- [41] Jan Mazurkiewicz A P. The usability of barothermally modified casein in feed mixes for Siberian sturgeon (*Acipenser baeri* Brandt) juveniles [J]. *Archives of Polish Fisheries*, 2003, **11**: 79-90.
- [42] Zhu H, Gong G, Wang J, *et al.* Replacement of fish meal with blend of rendered animal protein in diets for Siberian sturgeon (*Acipenser baerii* Brandt), results in performance equal to fish meal fed fish [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2011, **17**(2): e389-e395.
- [43] Xue M, Yun B, Wang J, *et al.* Performance, body compositions, input and output of nitrogen and phosphorus in Siberian sturgeon, *Acipenser baerii* Brandt, as affected by dietary animal protein blend replacing fishmeal and protein levels [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2012, **18**(5): 493-501.
- [44] Gong Y Y, Huang Y Q, Gao L J, *et al.* Substitution of krill meal for fish meal in feed for Russian sturgeon, *Acipenser gueldenstaedtii* [J]. *Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh*, 2016(68): 1-7.
- [45] Józefiak A, Nogales-Mérida S, Rawski M, *et al.* Effects of insect diets on the gastrointestinal tract health and growth performance of Siberian sturgeon (*Acipenser baerii* Brandt, 1869) [J]. *BMC Veterinary Research*, 2019, **15**(1): 348.
- [46] Caimi C, Gasco L, Biasato I, *et al.* Could dietary black soldier fly meal inclusion affect the liver and intestinal histological traits and the oxidative stress biomarkers of siberian sturgeon (*Acipenser baerii*) juveniles [J]? *Animals (Basel)*, 2020, **10**(1): 1-15.
- [47] Jiang H B, Chen L Q, Qin J G. Fishmeal replacement by soybean, rapeseed and cottonseed meals in hybrid sturgeon *Acipenser baerii* ♀ × *Acipenser schrenckii* ♂ [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2018, **24**(4): 1369-1377.
- [48] Sicuro B, Piccinno M, Daprà F, *et al.* Utilization of rice protein concentrate in siberian sturgeon (*Acipenser baerii* Brandt) nutrition [J]. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2015(15): 311-317.

- [49] Mazurkiewicz J, Przybył A, Golski J. Usability of some plant protein ingredients in the diets of Siberian sturgeon *Acipenser baerii* Brandt [J]. *Archives of Polish Fisheries*, 2009, **17**(2): 45-52.
- [50] Palmegiano G B, Agradi E, Forneris G, *et al.* Spirulina as a nutrient source in diets for growing sturgeon (*Acipenser baeri*) [J]. *Aquaculture Research*, 2005, **36**(2): 188-195.
- [51] Hung S S O, Storebakken T, Cui Y, *et al.* High-energy diets for white sturgeon, *Acipenser transmontanus* Richardson [J]. *Aquaculture Nutrition*, 1997, **3**(4): 281-286.
- [52] Keramat Amirkolaie A, Mahdavi S, Hosseini S A. Dietary fat content and feed supply influence growth and body composition in juvenile beluga sturgeon (*Huso huso*) [J]. *Aquaculture International*, 2012, **20**(5): 859-867.
- [53] Zhu H, He A, Chen L, *et al.* Effects of dietary lipid level and n-3/n-6 fatty acid ratio on growth, fatty acid composition and lipid peroxidation in Russian sturgeon *Acipenser gueldenstaedtii* [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2017, **23**(4): 879-890.
- [54] Guo Z, Zhu X, Liu J, *et al.* Dietary lipid requirement of juvenile hybrid sturgeon, *Acipenser baerii*♀ × *A. gueldenstaedtii*♂ [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2011, **27**(2): 743-748.
- [55] Xiao Y Z, Lin J Z. Optimal dietary lipid in *Acipenser schrenckii* [J]. *Reservoir Fisheries*, 2001, **21**(5): 4-5. [肖懿哲, 林金忠. 史氏鲟饲料脂肪的最适量研究 [J]. 水利渔业, 2001, **21**(5): 4-5.]
- [56] Glencross B D. Exploring the nutritional demand for essential fatty acids by aquaculture species [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2009, **1**(2): 71-124.
- [57] Xu R, Hung S S O, German J B. White sturgeon tissue fatty acid compositions are affected by dietary lipids [J]. *The Journal of Nutrition*, 1993, **123**(10): 1685-1692.
- [58] Wang X, Li Q, Wang J, *et al.* Effects of dietary alpha-linolenic acids on growth performance, lipid metabolism and antioxidant responses of juvenile Russian sturgeon *Acipenser gueldenstaedtii* [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2019, **25**(1): 184-193.
- [59] Li Q, Zhu H, Li E, *et al.* Growth performance, lipid requirement and antioxidant capacity of juvenile Russian sturgeon *Acipenser gueldenstaedti* fed various levels of linoleic and linolenic acids [J]. *Aquaculture Research*, 2017, **48**(6): 3216-3229.
- [60] Agradi E, Abrami G, Serrini G, *et al.* The role of dietary n-3 fatty acid and vitamin E supplements in growth of sturgeon (*Acipenser naccarii*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 1993, **105**(1): 187-195.
- [61] Hosseini S V, Kenari A A, Regenstein J M, *et al.* Effects of alternative dietary lipid sources on growth performance and fatty acid composition of beluga sturgeon, *Huso huso*, juveniles [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2010, **41**(4): 471-489.
- [62] Xu R, Hung S S O, German J B. Effects of dietary lipids on the fatty acid composition of triglycerides and phospholipids in tissues of white sturgeon [J]. *Aquaculture Nutrition*, 1996, **2**(2): 101-109.
- [63] Şener E, Yildiz M, Savaş E. Effects of dietary lipids on growth and fatty acid composition in russian sturgeon (*Acipenser gueldenstaedtii*) juveniles [J]. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 2005, **29**(5): 1101-1107.
- [64] Şener E, Yildiz M, Savaş E. Effect of vegetable protein and oil supplementation on growth performance and body composition of russian sturgeon juveniles (*Acipenser gueldenstaedtii* Brandt, 1833) at low temperatures [J]. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2006(6): 23-27.
- [65] Palmegiano G B, Gai F, Daprà F, *et al.* Effects of spirulina and plant oil on the growth and lipid traits of white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) fingerlings [J]. *Aquaculture Research*, 2008, **39**(6): 587-595.
- [66] Falahatkar B, Asheri S, Safarpour Amlashi A, *et al.* Canola oil, as a good alternative dietary lipid source in sturgeon: Effects on growth, physiology and fatty acid profile in Beluga sturgeon *Huso huso* L [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2018, **24**(4): 1263-1273.
- [67] Li Q, Zhu H Y, Wei J J, *et al.* Effects of dietary lipid sources on growth performance, lipid metabolism and antioxidant status of juvenile Russian sturgeon *Acipenser gueldenstaedtii* [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2017, **23**(3): 500-510.
- [68] Hassankiadeh M N, Hossein K, A M, *et al.* Effects of dietary fish oil substitution with mixed vegetable oils on growth and fillet fatty acid composition of juvenile Caspian great sturgeon (*Huso huso*) [J]. *Aquaculture International*, 2013, **21**(1): 143-155.
- [69] Huang F, Jiang M, Wen H, *et al.* Effects of different dietary lipid sources on growth performance, tissue fatty acid composition and serum lipid indices of juvenile Amur sturgeon, *Acipenser schrenckii* Brandt, 1869 [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2014, **30**(6): 1602-1608.
- [70] Wu F, Liu W, Wei Q W, *et al.* Effects of dietary lipid sources on growth performance, carcass composition, and blood parameters of juvenile Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis* Gray, 1835) [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2014, **30**(6): 1620-1625.
- [71] Liu C, Wang J, Ma Z, *et al.* Effects of totally replacing dietary fish oil by linseed oil or soybean oil on juvenile hybrid sturgeon, *Acipenser baeri* Brandt♀ × *A. schrenckii* Brandt♂ [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2018, **24**(1): 184-194.
- [72] Fang J, Tian X, Dong S. The influence of water temperature and ration on the growth, body composition and energy budget of tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*) [J]. *Aquaculture*, 2010, **299**(1): 106-114.
- [73] Liu B, Liu Y, Liu Z, *et al.* Influence of stocking density on growth, body composition and energy budget of At-

- lantic salmon *Salmo salar* L. in recirculating aquaculture systems [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, **32**(5): 982-990.
- [74] Cui Y, Hung S S O, Zhu X. Effect of ration and body size on the energy budget of juvenile white sturgeon [J]. *Journal of Fish Biology*, 1996, **49**(5): 863-876.
- [75] Xing H C, Du L Q, Li T Q, *et al.* Effects of dietary vitamin B₆ on energy budget of juvenile *Acipenser schrenki* Brandt [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, **53**(14): 3351-3353. [邢浩春, 杜利强, 李同庆, 等. 维生素B₆对史氏鲟幼鱼能量收支的影响 [J]. 湖南农业科学, 2014, **53**(14): 3351-3353.]
- [76] Guo W Y. Effects of dietary α -starch level and starch types on growth performance and energy budget of juvenile *Acipenser baeri* [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2010: 16-35. [郭文英. α -淀粉水平及不同淀粉类型对西伯利亚鲟幼鱼摄食生长和能量收支的影响 [D]. 石家庄: 河北师范大学, 2010: 16-35.]
- [77] Fynn-Aikins K, Hung S S O, Liu W, *et al.* Growth, lipogenesis and liver composition of juvenile white sturgeon fed different levels of D-glucose [J]. *Aquaculture*, 1992, **105**(1): 61-72.
- [78] Hung S S O, Fynn-Aikins F K, Lutes P B, *et al.* Ability of juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) to utilize different carbohydrate sources [J]. *The Journal of Nutrition*, 1989, **119**(5): 727-733.
- [79] Herold M A, Hung S S O, Fynn-Aikins K. Apparent digestibility coefficients of carbohydrates for white sturgeon [J]. *The Progressive Fish-Culturist*, 1995, **57**(2): 137-140.
- [80] Hung S S O, Groff J M, Lutes P B, *et al.* Hepatic and intestinal histology of juvenile white sturgeon fed different carbohydrates [J]. *Aquaculture*, 1990, **87**(3): 349-360.
- [81] Lin J H, Cui Y, Hung S S O, *et al.* Effect of feeding strategy and carbohydrate source on carbohydrate utilization by white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) and hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* $\times$ *O. aureus*) [J]. *Aquaculture*, 1997, **148**(2): 201-211.
- [82] Jiang M, Liu W, Wen H, *et al.* Effect of dietary carbohydrate sources on the growth performance, feed utilization, muscle composition, postprandial glycemic and glycogen response of Amur sturgeon, *Acipenser schrenckii* Brandt, 1869 [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2014, **30**(6): 1613-1619.
- [83] Yazdani S, Borzoui A, Akrami R. The effect of dietary dextrin levels on growth performance, body composition and hepatosomatic index in juvenile Siberian sturgeon, *Acipenser baerii* [J]. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 2016, **15**: 1078-1088.
- [84] Kaushik S J, Luquet P, Blanc D, *et al.* Studies on the nutrition of Siberian sturgeon, *Acipenser baeri*: I. Utilization of digestible carbohydrates by sturgeon [J]. *Aquaculture*, 1989, **76**(1): 97-107.
- [85] Mohseni M, Hassani M H S, Pourali F H, *et al.* The optimum dietary carbohydrate/lipid ratio can spare protein in growing beluga, *Huso huso* [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2011, **27**(2): 775-780.
- [86] Dabrowski K. Primitive actinotterigian fishes can synthesize ascorbic acid [J]. *Experientia*, 1994, **50**(8): 745-748.
- [87] Moreau R, Dabrowski K, Sato P H. Renal l-gulonolactone oxidase activity as affected by dietary ascorbic acid in lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*) [J]. *Aquaculture*, 1999, **180**(3): 359-372.
- [88] Moreau R, Kaushik S J, Dabrowski K. Ascorbic acid status as affected by dietary treatment in the Siberian sturgeon (*Acipenser baeri* Brandt): tissue concentration, mobilisation and L-gulonolactone oxidase activity [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 1996, **15**(5): 431-438.
- [89] Papp Z G, Saroglia M, Jeney Z, *et al.* Effects of dietary vitamin C on tissue ascorbate and collagen status in sturgeon hybrids (*Acipenser ruthenus* L. $\times$ *Acipenser baeri* Brandt). [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 1999, **15**(4-5): 258-260.
- [90] Falahatkar B, Soltani M, Abtahi B, *et al.* Effects of dietary vitamin C supplementation on performance, tissue chemical composition and alkaline phosphatase activity in great sturgeon (*Huso huso*) [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2006, **22**(S1): 283-286.
- [91] Desimira D S M, Victor C, Catalina M C, *et al.* Effects of different levels of dietary vitamins C on growth performance of stellate sturgeon (*Acipenser stellatus*, Pallas, 1771) [J]. *Animal Science and Biotechnologies*, 2013, **46**(2): 244-249.
- [92] Xie Z, Niu C, Zhang Z, *et al.* Dietary ascorbic acid may be necessary for enhancing the immune response in Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*), a species capable of ascorbic acid biosynthesis [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2006, **145**(2): 152-157.
- [93] Wen H, Yan A S, Gao Q, *et al.* Dietary vitamin A requirement of juvenile Amur sturgeon (*Acipenser schrenckii*) [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2008, **24**(5): 534-538.
- [94] Amlashi A S, Falahatkar B, Sattari M, *et al.* Effect of dietary vitamin E on growth, muscle composition, hematological and immunological parameters of sub-yearling beluga *Huso huso* L [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2011, **30**(3): 807-814.
- [95] Wang L S, Xu H, Wang Y, *et al.* Effects of dietary vitamin K₃ on growth and antioxidation in Siberian sturgeon *Acipenser baerii* [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2015, **30**(6): 641-646. [王连生, 许红, 王洋, 等. 维生素K₃对西伯利亚鲟生长和抗氧化功能的影响 [J]. 大连海洋大学学报, 2015, **30**(6): 641-646.]
- [96] Naderi M, Khara H, Yazdani Sadati M A. Effects dietary vitamin C and folic acid on growth performance, hematological and immunological parameters of juvenile barbel Sturgeon *Acipenser nudiventris* [J]. *Journal of Animal Physiology and Development (Quarterly Jour-*

- nal of Biological Sciences*), 2017(10): 67-77.
- [97] Hung S S O. Choline requirement of hatchery-produced juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) [J]. *Aquaculture*, 1989, **78**(2): 183-194.
- [98] Yazdani Sadati M A, Sayed Hassani M H, Pourkazemi M, *et al.* Influence of different levels of dietary choline on growth rate, body composition, hematological indices and liver lipid of juvenile Siberian sturgeon *Acipenser baerii* Brandt, 1869 [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2014, **30**(6): 1632-1636.
- [99] Liu W, Wen H, Zhou J, *et al.* Effects of choline chloride on growth and physiological indices in Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) juvenile [J]. *Reservoir Fisheries*, 2007, **27**(3): 91-93. [刘伟, 文华, 周俊, 等. 氯化胆碱对中华鲟幼鱼生长和生理指标的影响 [J]. 水利渔业, 2007, **27**(3): 91-93.]
- [100] Wang C A, Liu H, Li J, *et al.* Effects of dietary myo-inositol on growth, chemical composition and plasma chemistry of Amur sturgeon *Acipenser schrenckii* [J]. *Aquaculture International*, 2018, **26**(6): 1481-1492.
- [101] Wang L, Xu H, Wang Y, *et al.* Effects of the supplementation of vitamin D₃ on the growth and vitamin D metabolites in juvenile Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*) [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2017, **43**(3): 901-909.
- [102] Watanabe T, Kiron V, Satoh S. Trace minerals in fish nutrition [J]. *Aquaculture*, 1997, **151**(1): 185-207.
- [103] Xu Q Y, Xu H, Wang C, *et al.* Studies on dietary phosphorus requirement of juvenile Siberian sturgeon *Acipenser baerii* [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2011, **27**(2): 709-714.
- [104] 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.
- [105] Tan X Y, Luo Z, Liu X, *et al.* Dietary copper requirement of juvenile yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2011, **17**(2): 170-176.
- [106] Mohseni M, Pourkazemi M, Bai S C. Effects of dietary inorganic copper on growth performance and immune responses of juvenile beluga, *Huso huso* [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2014, **20**(5): 547-556.
- [107] Wang H, Li E, Zhu H, *et al.* Dietary copper requirement of juvenile Russian sturgeon *Acipenser gueldenstaedtii* [J]. *Aquaculture*, 2016, **454**: 118-124.
- [108] Wang H, Zhu H, Wang X, *et al.* Comparison of copper bioavailability in copper-methionine, nano-copper oxide and copper sulfate additives in the diet of Russian sturgeon *Acipenser gueldenstaedtii* [J]. *Aquaculture*, 2018, **482**: 146-154.
- [109] Moazen-zadeh K, Islami R H, Zamini A, *et al.* Quantitative dietary copper requirement of juvenile Siberian sturgeon, *Acipenser baerii*, and effects on muscle composition and some enzymatic activities [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2020, **26**(4): 1108-1118.
- [110] Moazen-zadeh K, Islami R H, Zamini A, *et al.* Effects of dietary zinc level on performance, zinc status, tissue composition and enzyme activities of juvenile Siberian sturgeon, *Acipenser baerii* (Brandt 1869) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2018, **24**(4): 1330-1339.
- [111] Moazen-zadeh K, Islami R H, Zamini A, *et al.* Dietary zinc requirement of Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*, Brandt 1869) juveniles, based on the growth performance and blood parameters [J]. *International Aquatic Research*, 2017, **9**(1): 25-35.
- [112] Saffari S, Keyvanshokoh S, Zakeri M, *et al.* Effects of different dietary selenium sources (sodium selenite, selenomethionine and nanoselenium) on growth performance, muscle composition, blood enzymes and antioxidant status of common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2017, **23**(3): 611-617.
- [113] Fontagné-Dicharry S, Godin S, Liu H, *et al.* Influence of the forms and levels of dietary selenium on antioxidant status and oxidative stress-related parameters in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fry [J]. *British Journal of Nutrition*, 2015, **113**(12): 1876-1887.
- [114] Arshad U, Takami G A, Sadeghi M, *et al.* Influence of dietary L-selenomethionine exposure on growth and survival of juvenile *Huso huso* [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2011, **27**(2): 761-765.
- [115] Wen H, Yan A S, Gao Q, *et al.* Dietary phosphorus requirement of juvenile *Acipenser schrenckii* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2008, **32**(2): 242-248. [文华, 严安生, 高强, 等. 史氏鲟幼鲟对饲料中磷的需要量 [J]. 水产学报, 2008, **32**(2): 242-248.]
- [116] Ma Y C, Zhang G R, Li M M, *et al.* Progress in nutritional requirements and feed research of cobia *Rachycentron canadum* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(2): 680-692. [麻永财, 张关荣, 李孟孟, 等. 军曹鱼营养需求与饲料研究进展 [J]. 水生生物学报, 2019, **43**(2): 680-692.]
- [117] Mohseni M, Ozorio R O A, Pourkazemi M, *et al.* Effects of dietary L-carnitine supplements on growth and body composition in beluga sturgeon (*Huso huso*) juveniles [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2008, **24**(6): 646-649.
- [118] Jalali M A, Ahmadi-far E, Sudagar M, *et al.* Growth efficiency, body composition, survival and haematological changes in great sturgeon (*Huso huso* Linnaeus, 1758) juveniles fed diets supplemented with different levels of Ergosan [J]. *Aquaculture Research*, 2009, **40**(7): 804-809.
- [119] Mohajer Esterabadi M, Vahabzadeh H, Zamini A A, *et al.* Effect of dietary immunogen prebiotic on growth and survival indices of giant sturgeon (*Huso huso* Linne, 1758) juveniles [J]. *Journal of Fisheries*, 2010(4): 61-72.
- [120] Hoseinifar S H, Mirvaghefi A, Merrifield D L. The effects of dietary inactive brewer's yeast *Saccharomyces cerevisiae* var. *ellipsoideus* on the growth, physiological responses and gut microbiota of juvenile beluga (*Huso huso*) [J]. *Aquaculture*, 2011, **318**(1): 90-94.
- [121] Askarian F, Kousha A, Salma W, *et al.* The effect of

- lactic acid bacteria administration on growth, digestive enzyme activity and gut microbiota in Persian sturgeon (*Acipenser persicus*) and beluga (*Huso huso*) fry [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2011, **17**(5): 488-497.
- [122] Xu Q Y, Qing Z, Hong X, *et al.* Dietary glutamine supplementation improves growth performance and intestinal digestion/absorption ability in young hybrid sturgeon (*Acipenser schrenckii* ♀ × *Huso dauricus* ♂) [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2011, **27**(2): 721-726.
- [123] Wang C A, Xu Q Y, Xu H, *et al.* Dietary L-alanyl-L-glutamine supplementation improves growth performance and physiological function of hybrid sturgeon *Acipenser schrenckii* ♀ × *A. baerii* ♂ [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2011, **27**(2): 727-732.
- [124] Zhu Q, Xu Q Y, Xu H, *et al.* Dietary glutamine supplementation improves tissue antioxidant status and serum non-specific immunity of juvenile Hybrid sturgeon (*Acipenser schrenckii* ♀ × *Huso dauricus* ♂) [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2011, **27**(2): 715-720.
- [125] Geraylou Z, Souffreau C, Rurangwa E, *et al.* Effects of arabinoxylan-oligosaccharides (AXOS) on juvenile Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*) performance, immune responses and gastrointestinal microbial community [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2012, **33**(4): 718-724.
- [126] Ghomi M R, Shahriari R, Langroudi H F, *et al.* Effects of exogenous dietary enzyme on growth, body composition, and fatty acid profiles of cultured great sturgeon *Huso huso* fingerlings [J]. *Aquaculture International*, 2012, **20**(2): 249-254.
- [127] Abtahi B, Yousefi M, Kenari A A. Influence of dietary nucleotides supplementation on growth, body composition and fatty acid profile of Beluga sturgeon juveniles (*Huso huso*) [J]. *Aquaculture Research*, 2013, **44**(2): 254-260.
- [128] Akrami R, Iri Y, Khoshbavar Rostami H, *et al.* Effect of dietary supplementation of fructooligosaccharide (FOS) on growth performance, survival, lactobacillus bacterial population and hemato-immunological parameters of stellate sturgeon (*Acipenser stellatus*) juvenile [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2013, **35**(4): 1235-1239.
- [129] Lee D H, Lim S R, Han J J, *et al.* Effects of dietary garlic powder on growth, feed utilization and whole body composition changes in fingerling Sterlet sturgeon, *Acipenser ruthenus* [J]. *Asian-Australas Journal Animal Science*, 2014, **27**(9): 1303-1310.
- [130] Aramli M S, Kamangar B, Nazari R M. Effects of dietary β -glucan on the growth and innate immune response of juvenile Persian sturgeon, *Acipenser persicus* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2015, **47**(1): 606-610.
- [131] Adel M, Nayak S, Lazado C C, *et al.* Effects of dietary prebiotic GroBiotic®-A on growth performance, plasma thyroid hormones and mucosal immunity of great sturgeon, *Huso huso* (Linnaeus, 1758) [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2016, **32**(5): 825-831.
- [132] Adel M, Yeganeh S, Dadar M, *et al.* Effects of dietary *Spirulina platensis* on growth performance, humoral and mucosal immune responses and disease resistance in juvenile great sturgeon (*Huso huso* Linnaeus, 1754) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2016, **56**: 436-444.

RESEARCH PROGRESS IN NUTRITIONAL REQUIREMENTS AND FEED OF STURGEONS

ZHANG Pei-Yu, LIU Hai-Yan and YANG Zhen-Cai

(College of Life Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: Sturgeon is one of most important domestic economic cultured fish species in China. The domestic aquaculture production of sturgeon has been the largest in the world for several years. At present, starter feed for sturgeon larvae are imported from other countries, formulated feed for sturgeon at other stages are produced in China. The quality of domestic feeds was inconsistent, leading to significantly different growth rate and sometimes resulting in decreased disease resistance in sturgeons. Therefore, the latest research on energy, proteins, lipids, carbohydrates, minerals, vitamins and alternative proteins, as well as lipid sources and functional additives were reviewed, thereby laying the foundation for further research on nutritional requirements and for formulating nutritionally balanced feed. The optimal requirements for proteins, lysine, methionine, protein-to-energy ratio, lipids, carbohydrates and phosphorus in juvenile sturgeons were 36%—440%, 2.80%, 1.13%, 18—22 mg/kJ, 11.1%—35.7%, 11%—35% and 0.50%—0.87% respectively. Sturgeons can make a good use of animal and plant derived protein sources, plant oils, and some functional additives can promote sturgeon growth and enhance its immune response. In addition, information about requirements of minerals and vitamins is incomplete.

Key words: Sturgeon; Aquaculture situation; Nutrient requirement; Formulated feed