



福建省水产饲料研究会 信息简报

B-2088184-5

第 18 期 (总第 320 期)

2020 年 09 月 30 日

祝各位领导、饲料界同仁国庆中秋愉快、安康幸福、事业兴旺！



行业会议

第六届中国（广州）国际渔业博览会在广州举行

2020 中国（广州）国际渔业博览会（以下简称：“渔博会”）由广东省农业农村厅指导，广东省水产流通与加工协会、广州环球搏毅展览公司联合主办。展会以“渔聚广州，商通天下”为主题，于 2020 年 9 月 24-26 日在中国进出口商品交易会展馆 B 区 13.2 馆举行。展会规模达 10000 平方米，打造一个聚集水产品、加工设备、冷冻冷藏设备、保鲜设备、监测设备、养殖设备、远洋捕捞、冷链物流于一体的有效商贸平台，旨在促进海洋经济贸易交流，带动我国渔业产业提质增效跨越发展。本届广州国际渔博会将呈现四大亮点：

一、疫情下国内知名企业踊跃参展，打造精品渔业展

据介绍，今年展会规划水产品海鲜展区、水产养殖展区、冷链设备展区。重点展览各种渔业水产品、海鲜活动、冻品干货、水产深加工产品、水产品加工设备、冷藏冷冻设备、水产养殖技术与设备等，国际展商汇聚来自智利、厄瓜多尔、泰国、美国、新西兰、菲律宾、俄罗斯等国家展商共同参与，国内展品汇聚来自广东、广西、福建、山东、浙江、江苏、辽宁、安徽、江西、湖北等 30 多个省市展商。其中展团涵盖了广西展团、福建展团、山东展团、珠海展团、茂名展团、阳江展团、佛山展团、饶平展团、梅州展团等；广东省名优水产企业积极参与，本次活动将迎来广东省渔业技术推广总站、广东强竞农业、广东顺欣、广远集团、广东国渔、广州水产集团、广州黄沙水产、广东冠利、广东绿卡、广东仙泉湖、广东中之平实业集团、珠海集元、信良记、广东天业、广东大昌、广州冰泉等知名水产品及冷链企业，广东省水产流通与加工协会、广东省冷藏行业协会、广东省食品冷链物流产业技术创新战略联盟、广东省远洋渔业协会、广东省鳗鱼协会、茂名市罗非鱼协会、珠海市农产品流通协会、珠海市斗门生态农业园管理委员会、江门市水产行业协会等社会团体也积极参与，带来名优水产品亮相广州国际渔博会。

高质量水产品将迎来厄瓜多尔白对虾、智利三文鱼、阿拉斯加狭鳕鱼、新西兰黑金鲍、福建大黄鱼、山东海参、江苏大闸蟹、湖北小龙虾、广西桂花鱼、珠海白蕉海鲈、茂名罗非鱼、顺德鳗鱼、中山脆肉鲩、梅州客都草鱼、惠来鲍鱼等。届时，国内外近 300 多家企业将携上千种水产海鲜相关产品、技术亮相 2020 广州国际渔博会，全方位展示渔业产业发展成果。



二、创新展会模式，打造云上展会+云直播

受全球疫情影响，线上线下结合成为当下各行业扩大影响力的重要方式，当下，看直播、逛云展已经成为新趋势。本届展会，创新亮点之一——2020年环球水产品美食烹饪大赛评选暨广东名优水产品厨艺秀云直播，展会现场将联动多家流量平台抖音、快手、南方农村报、一亩田、腾讯大粤网等网络平台，实行互联网+的新零售模式，全线实现菜品集中展示、名厨解说并烹饪菜品、主播试吃、产品推介等形式，开展主播带货。以创新为动力，以市场需求为导向，此次展会将传承推广粤菜文化，开展水产品优质食材的生产供应对接活动，促进渔业与餐饮高度融合，提升渔业品牌和粤菜品牌影响力。帮助企业拓宽营销新渠道，为展商观众带来多元化互动交流平台。

确保展会顺利开展，组委会制定了疫情防控工作方案和应急预案，严格履行防控职责，严格履行防控职责，确保全员参与、全面覆盖，全方位、全过程、全领域防控，做到不留死角，打造一场专业、高效、安全的渔业盛会。

三、大咖齐聚，多场论坛共探渔业产业发展新趋势

本届展会通过展会与论坛的结合，为来自全球各地的水产行业人士提供一个专业的交流平台。开设多场专业会议论坛，助推现代渔业绿色发展。搭建成果技术与应用领域的精准对接平台。

展会期间，2020年中国国际渔业合作论坛、第三届珠三角冷链物流发展论坛、2020年广东省特色水产品养殖（龟鳖类）发展论坛、产销供需对接大会等多场活动，重点邀请行业相关协会团体、科研机构（中国远洋渔业协会、中国渔业协会、中国水产科学研究院东海水产研究所、中国远洋渔业数据中心、中国物流与采购联合会冷链物流专业委员会....）等知名专家学者、业界人士、专业供货商、采购商共济一堂、共襄盛举！

四、打通行业上下游，邀约几十家采购团+数千名采购商汇聚，实现现场产销对接

第六届中国（广州）国际渔博会再度携手与第六届中国（广州）国际冷链设备暨生鲜配送展览会、2020粤港澳大湾区水产养殖博览会。聚集鲜活、冷冻水产、冷链配送、餐饮供应链与一体的展贸平台，为餐饮行业实现一站式的采购服务。

组委会通过联动政府部门、商协会及专业机构邀请全国酒店、餐饮及贸易商等，精准定位，全球范围邀请专业买家。组委会重点邀请知名电商及零售巨头有京东生鲜、天猫生鲜、盒马鲜生、卜蜂莲花、永辉超市、新辣道、渔民新村、南海渔村等批发商、经销商、贸易商、餐饮酒楼。预计专家买家达超10000名，现场观众达20000人次。

第六届广州国际渔博会将于 9 月 24-26 日在中国进出口商品交易会展馆 B 区 13.2 馆盛大召开,将为您倾心打造成一场专业顶级的国际化水产盛会!希望汇聚全国各地水产届专业人士、餐饮、酒店、连锁超市、食品等行业专业采购商来共同打造一场高质量的水产盛会!(卢慧粮 林建明 通讯员:马楚华报道)

摘自搜狐网

企业管理

我国饲料企业经营发展路径及其经济效应探讨

沈捷 岳珊

九江职业技术学院 江西九江 332007

摘要: 作为我国国民经济中重要的支柱性产业,饲料企业涉及到种植业、养殖业及零售业多个领域,是一个紧密结合的市场机制。改革开放以来,饲料企业不断发展壮大,从最初几百家组成的国营企业发展成为当前具有多种门类的完善的产业体系,与此同时带动了养殖业、零售业的发展,为市场经济注入了新的时代活力。从当前我国饲料企业经营发展现状看,还普遍存在供需不平衡、行业波动性大等问题,此次研究针对饲料企业经营发展存在的问题提出相应发展路径,并以九江市为例探究饲料企业经济效应,提出提高饲料企业经济效益的对策,以期为我国饲料企业经营发展提供借鉴。

关键词: 饲料企业; 经营发展; 经济效应; 发展路径; 对策;

Discussion on the development path and economic effect of feed enterprises in China

SHEN Jie YUE Shan

Jiujiang Vocational and Technical College

Abstract: As an important pillar industry in China's national economy, feed enterprises involve many fields such as planting, breeding and retailing, which is a closely integrated market mechanism. Since the reform and opening up, feed enterprises have been developing and growing. From the initial hundreds of state-owned enterprises, they have developed into a complete industrial system with various categories. At the same time, it has driven the development of breeding industry and retail industry, and injected new era vitality into the market economy. From the current situation of the operation and development of China's feed enterprises, there are still problems such as imbalance between supply and demand, and great fluctuation in the industry. This study puts forward the corresponding development path for the problems existing in the operation and development of feed enterprises, and takes Jiujiang City as an example to explore the economic effect of feed enterprises, and puts forward countermeasures to improve the economic effect of

feed enterprises,with a view to the operation and development of feed enterprises in China The exhibition provides reference.

Keyword : feed enterprise; business development; economic effect; development path; Countermeasures;

饲料工业是养殖业生产体系中重要的组成部分,也是衡量养殖现代化水平的重要标志之一。近年来,我国在《全国饲料工业“十三五”发展规划》(以下简称《规划》)中对当前我国饲料企业发展面临的形式进行全面的分析,并明确指出“十三五”发展总体思路,对饲料企业发展目标及发展方向进行说明(郑微微等,2015)。当前我国正处于社会经济转型时期,饲料企业经营发展迎来了新的机遇与挑战,如何在市场经济环境下寻求经营发展路径、提高经济效应成为饲料企业发展需要思考的问题。

1 我国饲料企业经营发展面临的问题

1.1 饲料原料供需不平衡

当前我国饲料行业在配方方面仍沿用传统的玉米-豆粕模式,随着饲料产量的增加,豆粕、玉米及鱼粉等原料需求也呈现出大幅度增长。随着严查超载效应持续扩大,贸易购销主体积极性欠佳,产地基层售粮进度依旧偏慢,多重因素共振对市场基本面供需形成干扰,区间波动行情仍将延续。北方玉米主产区收割基本结束,种植户存在惜售心理,当前产地新季玉米上市量仍然偏少(余可发,2017)。2019 年全球大豆(3389,-14.00,-0.41%)供应宽松格局得到改变,美豆新作产量一降再降,CBOT 大豆价格随之上移。国内非洲猪瘟疫情下半年对豆粕消费的影响持续发酵,各区域豆粕现货价格分化加剧。受技术条件、资金及自然资源等方的限制,再加上城市化进程的发展、耕地面积减小,大宗饲料原料供给仍面临较大的困难。

1.2 行业利润大幅度下降

饲料企业最重要的成本是原料成本,主要包括能量、蛋白类原料等,其中能量在产品成本中占 50%左右。近年来,玉米、豆粕等大宗原料及各类饲料添加剂价格持续上涨,但从饲料产品销售情况来看,其价格并未有相同幅度的提升。另外,饲料企业的人工费用、电力费用、管理费用等成本长期居高不下,这些都导致饲料行业利润大幅下降。随着互联网+农业的发展,行业网络平台上几乎都能看到当天各种饲料原料的报价。在饲料原料价格透明化之后,饲料成本变得更为透明,饲料定价可操作空间在一定程度上被压缩。产能利用率低,拉高成本。调查显示,中国 2018 年饲料产量达 1.87 亿 t,其中

猪料产量为 7549 万 t，虽然占全球猪料总量的 27.7%，但在过去 3 年来已下降 40%。而目前国内饲料企业产能利用率普遍在 50%左右，部分企业甚至更低，产能利用率不足，投入高，回报少，成本拉高。业内许多饲料企业的营销手段上趋同性比较大，基本是开个会议，打打促销，降降价，送送礼，虽然账面上销量达成目标，但实际利润甚微，甚至越来越低。

1.3 经营管理水平有待提升

目前我国饲料企业在经营管理方面都有自己鲜明的特征，但也不可避免的暴露出一些弊端。当大企业在饲料经营管理方面取得一定成效后，往往会引发一大批中小企业的竞相模仿，部分企业在模仿、借鉴过程中忽略了自身企业发展实际，仅学习表面流程化的东西，不仅不会起到较好的效果，而且会导致原有优势丧失。作为一个传统行业，饲料行业近年来开始注重信息化及机械化发展，在具体经营管理中各家企业的侧重点表现出明显不同，有的企业在营销方面做得好，有企业则在市场数据分析方面体现出优势。但总体上中小企业都表现出运营水平低、抵御风险能力差等问题。

2 我国饲料企业经营发展路径

2.1 提升企业竞争力

饲料企业之间的竞争很大程度上体现在客户数量方面，饲料企业往往将客户数量最大化作为可持续发展的战略目标，只有赢得客户群体才能占领市场，在市场竞争的获利结构及获利能力核心环节方面占据优势。首先，在获利机构多元化模式下，企业能对竞争对手产品分流进行抗击，从结构层面最大化锁定目标消费群体，赢得买方竞争力，那么企业核心竞争力及品牌竞争力也随之提升。企业有客户数量增长，可持续获利也会逐渐趋于稳定，有利于饲料企业的持续稳定发展。

2.2 实现良性循环发展

当前，市场经济呈现出一体化发展趋势，各行各业联系更为紧密，种植业、养殖业及畜产品加工业等与饲料企业息息相关的产业链条不断延长，共存关系逐渐凸显。饲料企业的发展不仅要获得上游供应商的支持，更需要下游经销商的配合。作为饲料企业的源头行业，种植、养殖、畜牧等行业与饲料企业形成良性循环。基于这一市场特点，饲料企业必须加强对经销商、养殖专业户及企业等的紧密联系与合作，建立一个良性的循环管理机构，确保经销商及养殖户致富，而饲料企业也将会逐渐成为当地龙头企业，带动当地经济发展的同时促进新农村建设（王毅，2018）。

2.3 提升市场竞争力

当前,我国饲料企业发展呈现出产业链整合的趋势,即由以往单纯的横向发展转变为在产业链条上纵深发展,这是几十年发展成功企业积累的实践经验,同时也是世界经济发展快速增长的经验。从当前发展现状看,我国养殖业处于分散状态,整体管理水平处于较低状态,且养殖户技术水平较低,再加上资金薄弱等,抵御风险的能力低,未能建立起完善的畜禽产品销售网络,针对这一现象必须加强产业化运作,合理分配利益,提升养殖户的积极性与参与热情,保护养殖户的利益。作为企业方可以提供饲料、种苗及疫苗等技术支持,积极回收产品,并对产品进行深加工,实施统一化销售,增加企业经营利润,赢得一批忠实的客户群体,提高市场竞争力。

3 我国饲料企业经济效应探讨

3.1 饲料企业经济效应分析

以九江市饲料企业经营状况为例,选择该市 8 个大型饲料企业、8 个中型饲料企业及 50 个小型饲料企业,对该市饲料企业经济效益进行分析。3 种类型企业固定资产产值率、生产率及盈利情况如表 1 所示。通常企业投资回报率主要是通过百万元产值在固定资产中的比例反映的,固定资产产值率越高,企业固定资产生产能力利用效果越好。饲料企业的经济效益往往是通过固定资产盈利率反映的(张瑞门, 2017)。由表 1 可以发现,大型饲料企业百万元产值占用固定资产比例最小,其次为中型饲料企业。固定资产产值率对比大型饲料企业占比最高,达到 230.36%,小型饲料企业最低,为 201.24%。集中反映了大型饲料企业达到的经济效应最高。

从饲料企业流动资金利用情况看,企业规模不同,其流动资金年周转率、流动资金产值率及盈利率也明显不同。如表 2 所示,大型饲料企业流动资金年周转率达到 9.50%,显著高于中型及小型饲料企业。从流动资金产值率看,大型饲料企业达到 955.68%,中型饲料企业仅为 675.28%,小型饲料企业为 620.50%。另外,从经济效应来看,大型企业在产值利润率及资金利润率方面都显著高于中型饲料企业及小型饲料企业,与中小型饲料企业相比,大型饲料企业呈现出规模经济特点,首先在设备方面投入力度大,能获得更高的生产效率。其次,大型企业接触国内最新研究成果,与优秀企业合作,引进新技术、新设备、新管理经验,有利于生产效率的提升。

表 1 九江市各类饲料企业固定资产利用情况分析

							万元 /%
不同规模企业	企业数量	固定资产总值	全年总产值	全年总收入	年盈利总额	固定资产生产率	固定资产盈利率
大型饲料企业	8	75500	175000	173750	19500	230.36	128.32
中型饲料企业	8	16500	36034	33950	1745	211.86	55.04
小型饲料企业	50	16750	33550	32680	1430	201.24	44.26

表 2 九江市各类饲料企业流动资金利用情况分析

							万元 /%
不同规模企业	企业数量	产品销售总额	年盈利总额	流动资金年平均占用额	流动资金年周转率	流动资金产值率	流动资金盈利率
大型饲料企业	8	173684	19150	18350	9.42	955.68	104.32
中型饲料企业	8	33900	1757	5250	6.52	675.28	33.32
小型饲料企业	50	32650	1474	5440	6.04	620.50	26.35

3.2 提升饲料企业经济效益的对策

3.2.1 提升技术水平

首先，基于当前社会经济的发展，要想提升饲料企业经济效应，首先要注重对技术水平的提升，尽管我国饲料企业门槛低、饲料产品同质化现象普遍，饲料企业可以实施差异化营销策略，注重对产品质量的提升，增加产品附加值。注重提升产能和饲料品质，提高设备稳定性，坚持研发技术水平更高的齿轮式制粒机，通过大量用户使用数据和报告不断修改和提升产品，解决应用中的难题，提升产品使用寿命和稳定性。企业要在技术研发、物力、人力等方面的资金投入，与市场建立紧密的联系，关注市场信息，积极与国际交流合作，引进新技术，针对不同物料设计专业的制粒设备，如专业化猪料制粒机、牛羊料制粒机、水产料制粒机、木屑制粒机、肥料制粒机等，产品覆盖各个领域，满足国内外不同客户的不同需求，大大提高了饲料企业的经济效益。

3.2.2 加强经营管理

随着农产品加工的现代化和智能化进程不断加快，饲料生产技术日新月异，饲料加工设备不断推陈出新，加工形式也根据需求进行多元化改进，为饲料产品内在质量的提升和饲料转化效率的提高提供十分主要的手段。在经营管理方面要关注饲料产品生产及销售环节，将产品做好、做大，打好基础，不能盲目扩大规模，注重优秀人才及先进技术的引进，建立健全企业内部发展机制，加强经营管理（[Jie Xiao, 2017](#)）。饲料企业在饲料行政管理部门监督、指导下，以饲料质量安全与市场秩序为重点，加强行业自律建设，进一步规范生产经营行为，提升饲料质量安全水平。同时要在做专、做精、创品牌上下功夫，大力发展特色饲料和附加值高的饲料，增强饲料企业市场竞争力和生存力。另外，创新现有的饲料企业制度，包括行业协会及企业本身的创新，从消费者利益出发，保护消费者利益，为饲料企业创建宽松、良性的竞争关系，处理好经济利益与社会效益的关

系，保障企业健康、稳定发展。

3.2.3 精准市场定位

最后，企业在发展中做好精准定位，分析在市场竞争中存在的优势与劣势，拓展饲料生产技术，强化技术实力，在自己擅长、熟悉的链条上实现多样化经营，采用密集化运作方式，抢占市场，降低成本，提高经济效益。为适应现代畜牧业发展形势的需要，更好地为客户提供服务，饲料企业应建立专业化技术服务团队，根据客户遇到的实际问题，从品种、营养、管理到猪场设计进行有针对性的指导与建议。此外，还可以与国内外知名动保企业、高校专家老师及饲料企业、养殖设备公司等关联企业紧密合作、分工协作，及时向客户提供最新的国内外养殖新技术、新信息与新理念，帮助客户提高饲养管理水平，与时俱进。

4 结语

随着市场环境的不断发展，饲料企业发展空间也在不断扩大，饲料企业要紧紧抓住市场经济转型的大好时机迎接挑战，不断转换经营发展理念，理清思路、准确定位，通过技术研发、人才引进、管理模式创新等多种途径为饲料企业经营发展注入新的时代动力，形成自身核心竞争力，提高经济效应，发挥在国民经济中的作用。

参考文献：略

原文刊登在《中国饲料》2020,(02),98-101 DOI:10.15906/j.cnki.cn11-2975/s.20200223

信息化环境下的新型财务管理模式应用——基于饲料企业为例

刘嘉琦

武汉学院

摘要：在互联网、电子计算机等高科技不断应用和普及的过程中，信息化管理已经到企业内部管理各方面逐渐的普及。财务管理属于现代企业日常生产经营管理主要部分，已经逐渐被各个公司的管理层、决策层接受。信息化技术因为其安全性、精准性及数字化的特点，在饲料企业财务管理中使用。基于此，本文就将饲料企业为例，分析信息化环境中新型财务管理模式的使用。

关键词：信息环境;财务管理;饲料企业;

据相关统计表示，截止到2017年末，国内获得饲料生产许可的企业数量已经超过七千家，并且目前退出市场的中小企业在不断的增加，降幅在30%以下。以此表示，国内饲料企业同行业竞争比较激烈。对于此种激烈的市场竞争，饲料生产企业要提高自己的财务管理水平，从而使成本费用得到降低，以此提高获利能力。另外，“互联网+”模式的出现，饲料企业要掌握自身的生产经营特点，结合大数据客户管理平台、电子商务、

物联网、互联网、云计算等全新的信息化技术，合理到自身财务管理中使用，从而提高获得利润的效率。

一、饲料企业财务管理现状

(一)基本经营情况

生产成本控制属于饲料企业财务管理中的主要生产控制环节，其能够对企业经营成果进行衡量。我国饲料企业在经营管理方面较为先进，发展规模和经营管理水平也比其他行业领先，在成本控制方面具有自身特有的管理方法。但是目前饲料行业竞争越来越激烈，将目前成本目标控制为主的财务管理已经无法满足企业竞争导致成本不断降低的问题。

(二)存在的问题

1、管理决策问题

在饲料企业管理决策中忽略企业机会成本与经济利润的关系，企业高层管理人员只是以公司财务报表数据制定形影决策，导致相应市场因素分析忽略。制定公司报表数据利用基本会计方法，其计算的只是选择价值，被企业高管所忽略的就是经济学计算处理分析，也就是计算得到的放弃价值。假如某家饲料企业经理做出最终投资项目决策，此种目标决策投资回报率为 30%，如果单纯通过企业利润角度分析，此决策正确。但是，在经理选择此决策时候也放弃了其他回报率在 30%以上的投资决策。基于市场经济发展分析，如果此决策根据企业利润最大化目标是错误的。

2、合作方财务管理问题

饲料生产企业合作方对于是否能够生产出满足需求的产品，从而有效实现营业利润具有密切的联系，本文中的合作方指的是企业原料供应商和客户。要求企业和供应商具有良好供应关系，并且还能够保证企业及时获得生产原料。但是，目前大部分企业无法实现此理想状态，主要原因是因为双方信息化财务管理水平不同。企业之间缺少整体性的财务管理思路，彼此之间信息不连通，并且也没有创建完整性的理念。另外，因为企业客户具有信誉等级不等的问题，饲料企业无法在短时间分辨客户或者分销商销售、回款能力，容易出现盲目发送货物的问题，以此导致对方无法支付货款，从而使资金回流不畅通，甚至还会出现坏账、死账的情况，提高了企业的财务风险。

二、基于信息化的新型财务管理模式优势

因为经济活动网络化、数字化的时代逐渐来临，饲料企业财务管理出现了多种全新

的变化，比如电子订单、电子采购及电子支付等。此种变化提高了饲料企业购销活动的便捷性，并且费用低廉，对于存货量化监控较为精准，以此使饲料企业传统财务管理改革迫在眉睫。

因为现代饲料企业财务管理缺少和信息时代相互适应的法律规范体系及技术保障，财务管理工作安全性为现代饲料企业的重要内容。电子商务属于信息时代主要的交易手段，财务管理及业务管理要求一体化，分布式操作及电子单据会提高竞争对手和恶意破坏攻击点，信息化财务管理能够消除不断发展的饲料企业。

三、基于信息化环境饲料企业财务管理模式的改革

(一)创建企业信息化建设目标

饲料企业管理人员要充分了解信息技术是新时期主要经营资源，企业管理及决策过程中要充分使用信息资源，精准掌握市场发展机遇，更好的使用企业人力、物力及技术等资源，开展相应生产及经营活动。所以，信息化要涉及到企业战略发展、组织机构、管理制度等方面内容。另外，根据饲料企业所设置的经营战略，创建企业经济责任目标体系，将其作为企业中长期战略目标。

(二)创建业务技术良好人才队伍

要求饲料企业财务工作人员能力良好，能够为财务网络化管理提供技术及智力保障。饲料企业要基于人才培养及吸引方面，争取在短时间内实现财会人员电算化及计算机培训。另外，企业各个领导班子要实现企业技术改革及更新，利用多种专业技能培训促进会计电算化在企业中普及及推广，以此为企业创建具有较强业务能力的财务信息化管理人员，有效实施财务信息化管理。

(三)创建计算机平台

计算机属于大部分饲料企业的主要设备，比如财务报表的制作、行政部门发布通告等，都和计算机具有密切关系。因为饲料企业计算机使用人员的水平各有不同，导致出现电脑病毒、木马及运行异常等情况，对计算机的正常运行造成了严重的影响。另外，因为网络咨询不断丰富，部分自控能力较差的工作人员容易受到电脑游戏吸引，使计算机工作效率得到降低，还为企业信息带来了一定的安全隐患。以此，饲料企业要鼓励工作人员不断的学习，使其能够良好使用电脑。实现电脑及管理管理措施的制定，提高电脑工作效率，保证内部信息不丢失。

(四)创建网络平台

实施信息化管理的主要核心就是实现信息共享,在网络技术不断发展和使用的过程中,其能够灵活且便捷的传递信息,创建具有较高运行效率、安全的网络平台。部分的小规模饲料企业生产企业和办公都在工厂中,业务人员要长期在外工作。目前,部分饲料企业办公网络都是通过联通、电信等网路服务商的宽带,通过交换机分到办公区的电脑中,办公区电脑使用同个工作组方法实现共享。根据上述情况来看,办公网络就会具有一定的威胁,数据在传输过程中会受到监听。所以,利用虚拟专用网络技术解决上述问题。VPN 就是使用加密及访问控制技术,在公共网络中实现安全网络的创建,保证数据在加密通道中实现传输,能够在异地机构和员工、总部相互联系。

四、结束语

以我国信息化社会发展情况分析,了解到信息化财务在饲料企业中使用广泛,问题的反馈及处理速度在不断加快。要想促进信息经济化中企业经济效益的持续提高,就要实现风险管理,加大科研资金比,创新传统财务工作管理系统,信息化财务管理在饲料企业中使用在我国企业发展中具有较大的空间。

参考文献:略

原文刊登在《财经界》2020,(30),103-104

研究进展

近年我国淡水鱼营养与饲料科学研究进展(下)

张震¹ 郝强² 周小秋³ 周志刚^{2*}

(1. 中国农业科学院饲料研究所农业农村部饲料生物技术重点实验室,北京 100081; 2. 中国农业科学院饲料研究所中国-挪威鱼类消化道微生物联合实验室,北京 100081; 2. 四川农业大学动物营养研究所,成都 611130)

摘要:淡水鱼养殖总产量占全国淡水养殖总产量的近 85%,是我国渔业经济的支柱产业。淡水鱼营养与饲料科技的进步支撑我国淡水鱼产业的健康可持续发展。同时,我国目前在进行养殖生产的淡水鱼类种类繁多。本文按照大宗淡水鱼、罗非鱼、名特优养殖鱼类等代表养殖品种在营养需求与原料利用、营养生理与代谢调控、肠道微生态与健康、功能性饲料、养殖环境、饲料加工和投饲技术等方面阐述在过去 5 年我国淡水鱼营养与饲料科学的研究进展,并对营养和饲料科学对淡水鱼产业发展的贡献进行总结及展望。

关键词:水产养殖,淡水鱼,营养与饲料,研究进展

3. 罗非鱼营养与饲料科学研究进展

3.1 罗非鱼营养需求与原料利用

罗非鱼 (*Tilapia*) 是一种杂食性经济鱼类, 包括非鲫属和口孵非鲫属等的数种鱼类, 是世界上最广泛养殖的鱼类之一, 我国主要养殖的有尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*)、奥利亚罗非鱼 (*Oreochromis aurea*)、莫桑比克罗非鱼 (*Oreochromis mossambicus*) 以及各种组合的杂交后代等, 2019 年我国养殖产量超过 164 万吨。对吉富罗非鱼 (GIFT, *Oreochromis niloticus*) 的研究发现, 与投喂 26.02%粗蛋白质水平的饲料相比, 投喂 36.27%粗蛋白质水平的饲料的罗非鱼增重率和饲料效率显著升高, 谷丙转氨酶的水平显著下降。在吉富罗非鱼的饲料中, 使用淀粉替代蛋白, 提高饲料中淀粉/蛋白比率 (淀粉水平由 13.1%增加到 32.3%, 蛋白水平由 38.2%降低到 30.5%), 发现鱼体可以通过促进外周葡萄糖的储存和利用, 进一步增强葡萄糖耐受和体内蛋白质沉积, 从而很好的适应淀粉水平升高。脂类和糖类都是鱼类重要的非蛋白能量来源, Dizhi Xie 等研究表明, 在等氮等能饲料中 (粗蛋白水平 27%, 饲料总能 15.5 MJ/kg), 当其中糖类/脂类含量比值为 1.95 时, 尼罗罗非鱼获得最优生长性能和健康状况, 而当糖类/脂类含量比值过高 (>3.41) 时, 则会造成鱼体脂肪肝。同样是等氮等能饲料中 (粗蛋白水平 34.5%, 饲料总能 14.5 MJ/kg), Rui-Yu Du 等研究发现, 提高饲料中脂类/淀粉比值 (脂类水平由 6.12%增加到 12.7%, 淀粉水平由 22.5%降低到 13.8%), 对吉富罗非鱼生长没有显著影响, 但是高脂肪水平则会升高血糖水平和减低肌肉内葡萄糖的利用率, 损伤鱼体的糖稳态。在 3 组等脂饲料中 (粗脂肪水平 7%), 使亚油酸 (18:2n-6)、油酸 (18:1n-9) 和 EPA (20:5n-3)+DHA (20:6n-3) 的含量分别达到饲料总脂肪酸的 55%, 投喂尼罗罗非鱼 8 周, 结果表明亚油酸、EPA 和 DHA 更利于鱼体生长和脂代谢调控, 而油酸则会引起鱼体肝脏内脂肪沉积和肝脏损伤。Ming Jiang 等研究表明, 依据折线模型, 以吉富罗非鱼的生长指标和血清超氧化物歧化酶的含量为指标, 6%脂肪水平的饲料中维生素 E 适宜添加量 43.2–45.8 mg/kg, 13%脂肪水平的饲料中维生素 E 适宜添加量为 66.0–76.1 mg/kg。Lijun Ning 等研究表明, 依据折线模型, 以尼罗罗非鱼的生长指标和肝脏谷胱甘肽过氧化物酶的含量为指标, 饲料中硒 (硒代蛋氨酸的形式) 最适添加量为 0.57 mg/kg。

3.2 罗非鱼营养生理与代谢调控

在无鱼粉饲料基础上补充苯丙氨酸可以增强杂交罗非鱼 (*Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus*) 的鱼体蛋白质沉积, 提高其生长性能, 还可以降低血清谷丙转氨

酶和谷草转氨酶的水平以及增强血清溶菌酶和 IgM 的水平; 基于折线模型, 饲料中最适添加量为 0.878%。Xiao-Qin Li 等研究表明, 在等氮 (粗蛋白水平 31%) 等能 (饲料总能 18 MJ/kg) 饲料中, 与摄食含 6% 鱼粉的饲料相比, 摄食无鱼粉 (全植物蛋白源) 饲料的杂交罗非鱼 (*Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus*) 增重率、体蛋白沉积和肠绒毛高度均显著下降, 而在无鱼粉饲料中补充蛋白酶 (碱性丝氨酸肽链内切酶, 175 mg/kg) 可以增强鱼体对饲料蛋白的消化率, 提高鱼体的生长性能。在无鱼粉饲料中添加 0.15g/kg 的胆汁酸显著提高吉富罗非鱼的增重率、降低肌肉和肝脏内脂肪含量, 但是过量添加 (1.35g/kg) 则会损伤肝脏、诱发胆结石、并导致生长性能下降。

与摄食对照饲料 (糖水平 30%, 粗脂肪水平 5%) 相比, 尼罗罗非鱼摄食高能 (糖水平 40%, 粗脂肪水平 10%) 饲料后, 肝脏和肌肉内 mTOR (雷帕霉素靶蛋白) 表达水平和磷酸化水平显著升高、鱼体增重率显著增加, 但是同时造成鱼体脂肪沉积、抗氧化能力下降和机体炎症反应发生。Fang ning Xu 等研究表明, 在高脂饲料 (粗脂肪水平 12%) 中, 添加 300 mg/kg 的 α -硫辛酸不仅可以显著增加吉富罗非鱼肝脏和脂肪组织内脂分解和脂肪酸 β 氧化相关基因的表达, 降低体内脂肪水平, 同时还提高鱼体的增重率、降低饲料系数, 并且显著增加血清和肝脏中超氧化物歧化酶和谷胱甘肽过氧化物酶的活性, 提高鱼体抗氧化能力。而在高脂饲料 (粗脂肪水平 13%) 中添加 2.5% 米屈胍 (Mildronate, 肉碱合成的抑制剂) 显著会降低尼罗罗非鱼肝脏内肉碱水平、增加肝脏内脂肪积累, 血清内 β -羟基丁酸水平显著降低, 线粒体脂肪酸 β 氧化效率下降, 说明线粒体内脂肪酸 β 氧化对尼罗罗非鱼适应高脂饲料的非常重要。

3.3 罗非鱼肠道微生态与健康

Chao Ran 等研究表明, 杂交罗非鱼 (*Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus*) 肠道优势菌群在门的水平上主要是变形菌门和梭杆菌门, 在属的水平上主要是邻单胞菌属和鲸杆菌属, 饲料添加 200 mg/kg 精油 (包括 100 mg/kg 百里酚和 100 mg/kg 香芹酚) 能够改变肠道菌群结构, 并且进一步利用无菌斑马鱼模型证明, 精油诱导的菌群参与对鱼体的免疫调节, 平衡精油对鱼体免疫激活作用。Yao Zheng 等研究表明, 吉富罗非鱼肠道优势菌群在门的水平上主要是变形菌门和梭杆菌门, 并且饲料中添加 0.025 g/kg 或 0.05 g/kg 白藜芦醇不改变菌群多样性水平, 但是潜在致病菌链球菌 (*Streptococcaceae*) 丰度显著降低。Yun Xia 等研究表明, 尼罗罗非鱼肠道优势菌群在门的水平上主要是梭

杆菌门和变形菌门,在属的水平上主要是邻单胞菌属和鲸杆菌属,饲料中补充 10^8 CFU/g 哺乳动物来源的乳酸乳球菌 JCM5805 (*Lactococcus lactis* subsp. *lactis* JCM5805), 投喂罗非鱼 6 周, 显著提高增重率、降低饲料系数, 并且显著增强对致病菌无乳链球菌 WC1535 (*Streptococcus agalactiae* WC1535) 的抵抗力; 肠道菌群中鲸杆菌属丰度显著降低(由对照组的 82.15% 降至处理组的 1.15%), 处理组乳球菌丰度增至 2.35%, 但是在饲料中止补充 JCM5805 一周后, 肠道菌群结构显著改变, 而且肠道内检测不到乳球菌的存在。

3.4 罗非鱼功能性饲料

黄芩苷 (Baicalin) 能显著抑制致病菌无乳链球菌 (*Streptococcus agalactiae*) 主要毒力因子溶血素和透明质酸酶的产生, 从而增强尼罗罗非鱼对无乳链球菌 PBSA0901 的抵抗力。尼罗罗非鱼饲料中添加 1.0% 酵母 (*Rhodotorula mucilaginosa*) 水解物不仅提高罗非鱼的生长性能, 还增强鱼体的抗氧化能力和对致病菌海豚链球菌 (*Streptococcus iniae*) 的抵抗力。饲料中添加 0.5% 枯草芽孢杆菌 LT3-1 (*Bacillus subtilis* LT3-1, 3.8×10^{10} CFU/kg) 投喂吉富罗非鱼 6 周, 罗非鱼增重率显著增加, 血清谷草转氨酶和丙二醛水平显著降低, 血清溶菌酶含量显著上升, 并且显著提高致病菌无乳链球菌 (*Streptococcus agalactiae*) 浸浴时的存活率。饲料中添加 1.0% 枸杞多糖 (*Lycium barbarum polysaccharides*) 投喂尼罗罗非鱼 40 d, 罗非鱼血清补体 C3 活性显著增加, 脾脏细胞的凋亡率显著下降, 增强鱼体的非特异性免疫能力。在高盐环境 (16 Practical salinity units) 下筛选出一株土著枯草芽孢杆菌 E221 (*Bacillus subtilis* E221), 饲料中添加 1.0×10^8 CFU/g 枯草芽孢杆菌 E221 可以显著提高尼罗罗非鱼在高盐度环境下的增重率、降低饲料系数。低温养殖环境下 ($10^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}$), 饲料中添加 0.2% 黄芪水提物 (*Astragalus membranaceus extract powder*) 可以通过提高吉富罗非鱼抗氧化能力、抑制低温诱导细胞凋亡来增强对低温耐受力。

3.5 罗非鱼养殖环境、饲料加工和投饲

当前水体环境中, 重金属污染日益严重, Jingjie Wang 等研究表明尼罗罗非鱼摄入的过量的铜在肝脏中积累最高, 锌在肠道中积累最高, 并且过量的铜和锌积累均抑制肝脏内超氧化物歧化酶和谷胱甘肽过氧化物酶的活性, 导致肝脏丙二醛含量升高, 损害鱼体抗氧化能力。在尼罗罗非鱼摄食中水平粗脂肪 (6%) 饲料的情况下, 与养殖水体为低盐度 (0) 和高盐度 (16) 相比, 中盐度 (8) 组尼罗罗非鱼增重率显著增加、饲料系数

显著降低、肌肉产量和品质显著提高。而在摄食高水平粗脂肪（12%）饲料时，随着水体盐度升高，其成活率和增重率均显著降低、饲料系数显著增加、产肉率显著降低。

在池塘工程化循环水养殖系统（In-pond raceway system, IPRS），在投喂频率为 2 次/d 条件下，与日摄食率为 3% 相比，日摄食率为 5% 时吉富罗非鱼的增重率显著增加，饲料效率显著提高，而且血清谷丙转氨酶、谷草转氨酶、可的松和超氧化物歧化酶水平在两组间没有显著差异。Wei Liu 等研究表明，在 40 d 的养殖周期内，与一直摄食高蛋白水平（35%）饲料（投喂频率 3 次/d）相比，先摄食低水平蛋白（25%）饲料 10 d（投喂频率 1 次/d）再摄食高蛋白水平（35%）饲料 30 d（投喂频率 3 次/d）或者先摄食低水平蛋白（25%）20 d（投喂频率 1 次/d）再摄食蛋白水平（35%）饲料 20 d（投喂频率 3 次/d），吉富罗非鱼显示饥饿补偿效应，在末重、特定生长率和饲料蛋白质效率上均没有显著差异。

4. 名特优养殖鱼类营养与饲料科学研究进展

4.1 名特优养殖鱼类营养需求与原料利用

大口黑鲈（*Micropterus Salmoides*）是一种肉食性经济鱼类，2019 年我国养殖产量为 47.8 万吨，现在养殖中使用冰鲜杂鱼或人工配合饲料均能将其成功饲养至商品鱼规格。大口黑鲈人工配合饲料配方的优化一直是关注重点，Xing Ren 等研究发现，在饲料鱼粉水平为 400 g/kg 的饲料中，使用鸡肉粉和豆粕可使大口鲈鱼饲料鱼粉水平降至 160 g/kg；徐韬等研究发现，在饲料鱼粉水平为 350 g/kg 的饲料中，发酵桑叶替代 15% 鱼粉不会影响大口黑鲈的生长，而 30% 的替代鱼粉则会显著抑制大口黑鲈的生长。4 种淀粉来源中，投喂添加豌豆淀粉或者高直链玉米淀粉饲料的生长性能优于添加小麦淀粉或者木薯淀粉。人工配合饲料种纤维素来源不同也会影响大口黑鲈的肝脏和肠道健康，进而影响其生长性能。但是，Dongmei Ma 研究表明，尽管经过 10 年的改进，配方饲料仍然不能满足大口黑鲈的营养需要。经过 8 个月的饲养试验，与投喂冰鲜杂鱼相比，投喂配方饲料的鱼增重率和比生长率显著降低，而肝体指数和肝细胞空泡化评分显著提高。并且进一步的转录差异分析证实了配方饲料导致炎症和肝损伤。

黄颡鱼（*Pelteobagrus fulvidraco*）是一种底层杂食性经济鱼类，在我国淡水水体中分布较广，其肉质细腻、口感鲜美、营养丰富。现在黄颡鱼育苗技术已经成熟，支撑人工养殖快速发展，2019 年产量超过 50 万吨，是我国主要名特优鱼类之一。黄颡鱼对蛋

白质、脂肪、无机盐、维生素 E、赖氨酸的需求量均已有研究。黑水虻、黄粉虫、鸡肉粉等动物性蛋白原料均可以作为黄颡鱼饲料中鱼粉的替代蛋白源。黄颡鱼对植物性蛋白源——豆粕、发酵豆粕、菜粕和发酵菜粕这 4 种饲料营养物质的表观消化率均较高，蛋白质表观消化率均在 90% 以上，均可以作为黄颡鱼饲料中优质的蛋白源。

黄颡 (*Monopterus albus*) 是一种底层肉食性经济鱼类，不仅营养丰富、味道鲜美，而且具有药用价值，在国内外市场中供不应求，目前主要在华中和华南地区网箱养殖，是我国重要的名特优鱼类之一，2019 年我国养殖产量超过 30 万吨。目前有关黄颡研究很多都是关于性转变现象，关于其营养学研究较少。黄颡幼鱼对饲料蛋白的最佳需求量是 38.64%–39.08%。在 40% 粗蛋白水平的饲料中，当黑水虻替代鱼粉，在饲料中水平少于 15.78% 时，可显著改善黄颡的生长性能；在 42% 粗蛋白水平的饲料中，酶解鱼溶浆替代鱼粉，在饲料中水平在 10% 和 15% 时，黄颡的增重率均显著高于鱼粉组；在植物蛋白源中，大豆浓缩蛋白 (SPC) 具有较低水平的抗营养因子。在 45% 粗蛋白水平的饲料中，大豆浓缩蛋白最高可替代 34% 的鱼粉，而不影响黄颡的生长性能。低鱼粉饲料 (32%) 中添加适量的牛磺酸，可以显著改善黄颡的生长性能，以及增强肠道蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶的活性。

鲟鱼 (*Acipenser*) 是一种底层肉食性经济鱼类，在我国主要养殖品种是杂交鲟 (*Acipenser baerii* × *Acipenser schrenckii*)，其生长快、抗病能力强，是我国养殖量最大的冷水鱼养殖品种，2019 年我国养殖产量超过 10 万吨。杂交鲟对肉骨粉 (80% 牛肉、10% 猪肉、10% 家禽)、猪肉骨粉、家禽副产物粉和血粉这 4 种动物性蛋白原料的表观消化率高，可以很好的利用这些原料；鲟鱼因其肌肉中富含 n-3 多不饱和脂肪酸和较高的 n-3/n-6 多不饱和脂肪酸比而具有优越的营养功能，所以对其饲料中脂肪源的研究也备受关注。饲料中添加长链 n-3 多不饱和脂肪酸对于鲟鱼幼苗早期发育是必需的；在油脂添加量为 8% 的饲料中用亚麻油 (含亚麻酸最丰富的植物油) 或豆油 (富含亚油酸) 完全替代鱼油，对杂交鲟生长没有产生负面影响；同时含有亚麻酸和亚油酸则对鲟鱼的生长最为有利。

肉食性鱼类鳊鱼 (*Siniperca chuatsi*) 对不同形式的碳水化合物表现出不同的代谢效率，利用糊精的能力高于葡萄糖。在肉食性鱼类乌鳢 (*Channa argus*) 饲料中，木薯粉

替代饲料中 50% 的面粉（实际添加量为 12%），不会对乌鳢的生长性能产生不利影响，但过高的替代比例（ $\geq 75\%$ ，实际添加量 18%）会使增重率下降，且导致肝脏损伤。

4.2 名特优养殖鱼类营养生理与代谢调控

对于肉食性大口黑鲈，与摄食鱼粉对照组饲料（65%）相比，摄食无鱼粉饲料（鸡肉粉含量 65%）8 周后，血清中营养物质含量显著降低、谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性显著上升，肝脏 GH-IGF 信号通路被显著抑制；而在无鱼粉饲料（鸡肉粉替代）饲料中添加赖氨酸有效含量为 7 g/kg 的赖氨酸后，大口黑鲈生长性能显著提高，血清甘油三酯水平升高、谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性显著降低，肝脏 GH-IGF 信号通路被显著激活。与对照组（鱼粉含量 36%）相比，豆粕替代组（鱼粉含量 22%）饲料投喂黄颡鱼 8 周后，黄颡鱼增重率显著下降，豆粕替代组导致肠道氧化损伤和抗氧化能力下降；而在豆粕替代组的基础上补充赖氨酸（3%）和蛋氨酸（2%）可以缓解这些负面效应。在低鱼粉（22%）饲料中添加 2 g/kg 的蛋氨酸（饲料中精氨酸实际水平 6.18%）可以增强黄颡肠道消化酶活力，降低肝体比和血清谷草转氨酶活力，提高黄颡生长性能，且蛋氨酸羟基类似物效果优于晶体蛋氨酸和包膜蛋氨酸。在低鱼粉（25%）饲料基础上添加 2.0 g/kg 的精氨酸（饲料中精氨酸实际水平 2.64%）可以提高黄颡鱼的增重，降低饲料系数，增强胃蛋白酶活性和消化吸收能力，提高免疫功能和抗氧化能力；而且，Qiming Chen 等研究表明在低鱼粉（25%）饲料基础上补充精氨酸至饲料中实际水平为 2.81% 时，不仅可以改善黄颡鱼的生长性能，还可以增强其抗氨氮胁迫的能力。在低鱼粉（17%）饲料基础上补充亮氨酸可以通过调节 Insulin-like growth factor 1 (IGF-1) 基因表达、肌肉生长相关基因、蛋白质合成和降解相关信号通路，促进瓦氏黄颡鱼与长吻鮠杂交种（*Pelteobagrus vachelli* \times *Leiocassis longirostris*）的肌肉生长和蛋白质沉积，提高其生长性能；基于折线模型，饲料中最适添加量为 2.81%。低鱼粉（16%）饲料下补充苏氨酸同样可以提高瓦氏黄颡鱼与长吻鮠杂交种（*Pelteobagrus vachelli* \times *Leiocassis longirostris*）提高其生长性能，促进肌肉生长和蛋白质沉积；基于二次回归模型，饲料中最适添加量是 1.377 %。

大口黑鲈作为一种肉食性鱼类，其对饲料脂肪需求较高，适宜的饲料粗脂肪水平是 10% - 15.45%，但是大口黑鲈在养殖过程中极易出现肝脏疾病，成为大口黑鲈产业可持续发展的第一限制因素。饲料粗脂肪水平为 11%-12% 时，大口黑鲈的生长性能提高、肝

体比不变、脂体比增加、肝脏 β -氧化关键限速酶 CPT1 酶活显著增加；而当饲料粗脂肪水平升高为 17%-18%，肝脏 CPT1 酶活被抑制、肝脏谷草转氨酶 AST 水平显著升高，诱发肝脏损伤。适宜水平饲料粗脂肪水平（7%-12%）不仅可以节约饲料蛋白的添加，而且显著提高鳊鱼的生长性能，且不影响鱼体健康，但是饲料粗脂肪水平升高至 17% 时，鳊鱼不仅增重率下降，而且诱导明显的脂肪肝。氧化鱼油则可通过降低磷脂和脂肪酸的不饱和度，增加血浆中氧化胆固醇和溶血磷脂的含量，并抑制胆汁酸的合成，从而影响鱼类的健康，降低生长性能。饲料中补充二丁基羟基甲苯和左旋肉碱则能够改善了大口黑鲈的脂质代谢和抗氧化能力，提高生长性能。投喂黄颡鱼高脂饲料（15.4%）8 周，肠道内甘油三酯的含量显著增加，激活内质网应激，进一步诱导细胞自噬和凋亡，而细胞自噬和凋亡又发挥降低肠道甘油三酯含量的自我保护作用。Hong-na Ma 等研究表明，在粗脂肪水平为 10% 饲料中，添加适量的花生四烯酸（占脂肪酸总量的 4.96%-7.49%）不仅可以提高黄颡鱼的生长性能，还可以显著降低血清谷草转氨酶水平和血糖水平。Yongnan Li 等研究发现，与豆油和亚麻籽油相比，鱼油更能激活虹鳟（*Oncorhynchus mykiss*）的肝脏超长链脂肪酸延伸酶 6（Elovl6）的表达。

大口黑鲈分别饲喂含 5%、10% 和 20% 小麦淀粉的等氮等能（粗蛋白水平 45%，饲料总能 16.2 MJ/kg）饲料 12 周，5% 和 10% 小麦淀粉组的生长性能显著高于 20% 小麦淀粉组，而 5% 和 10% 间无差异；而且相对其它两组，20% 小麦淀粉组大口黑鲈血清谷丙转氨酶和谷草转氨酶的水平显著升高，造成肝脏损伤；Wei Zhang 等研究发现，投喂大口黑鲈含 12%、24% 和 36% 玉米淀粉的等氮等能饲料 8 周后，12% 玉米淀粉组生长性能最高，而 24% 和 36% 玉米淀粉组则诱导鱼体发生明显的脂肪肝症状。西伯利亚鲟在生长上具有饥饿补偿效应，但是幼鱼期如果使用高葡萄糖刺激，当再恢复投喂后，如果使用低碳水化合物的饲料则会抑制其饥饿补偿效应，降低其生长性能。

4.3 名特优养殖鱼类肠道微生态与健康

大口黑鲈肠道优势菌群在门的水平上主要是梭杆菌门和变形菌门，与投喂对照组相比，投喂添加 8% 大豆纤维的饲料鱼体肠道内梭杆菌门丰度显著下降，而变形菌门的丰度显著升高；而在大口黑鲈的饲料中补充 0.1% 或者 0.2% 的啤酒酵母水解物后，在门的水平上，梭杆菌门的丰度显著上升，而变形菌门的丰度显著下降，在属的水平上索氏鲸杆菌（梭杆菌门）的丰度显著上升，而邻单胞菌（变形菌门）的丰度显著下降。黄鳝肠

道优势菌在门的水平上主要是厚壁菌门、梭杆菌门、变形菌门，与摄食对照组（粗脂肪 6.30%）相比，摄食高脂饲料（粗脂肪 12.11%）后，肠道内厚壁菌门丰度显著下降，梭杆菌门丰度显著升高。南方鲶（*Silurus meridionalis*）幼鱼肠道内优势菌是软壁菌门、梭杆菌门、变形菌门；在早期发育过程中，随着日龄的变化，肠道内微生物发生显著改变，在 8 dpf（day post-fertilization）和 18dpf 时，肠道内软壁菌门的丰度在 75% 以上；而随着日龄的增长，软壁菌门丰度显著降低，而梭杆菌门的丰度显著增加，由 8dpf 时的 7.2% 增长至 65 dpf 时的 45% 以上。欧洲鳗鲡（*Anguilla anguilla*）在鳗线期（Elver）、黄鳗期（Yellow eel）、银鳗期（Silver eel）肠道内优势菌均是梭杆菌门和变形菌门。达氏鳊（*Huso dauricus*）是黑龙江流域土著鲟，比较野生和养殖达氏鳊肠道菌群发现，野生达氏鳊肠道内优势菌是变形菌门（47.9%）、梭杆菌门（30.5%）、厚壁菌门（8.85%），而养殖达氏鳊肠道优势菌是梭杆菌门（78%）、变形菌门（15.4%）。以鱼类土著菌索氏鲸杆菌培养物为核心，分别配伍不同类别益生菌培养物从而获得的不同功能的混合细菌培养物，投喂杂交鲟（*Acipenser baerii* × *Acipenser schrenckii*）添加了这些混合细菌培养物的饲料，可以有效改善鲟鱼肠道菌群结构，提高鲟鱼生长性能，增强抗病力。

4.4 名特优养殖鱼类功能性饲料

在糖水平为 18.7% 的饲料中添加 300 mg/kg 的胆汁酸，显著提高的大口黑鲈生长性能，并且通过改善鱼体的糖代谢和脂代谢减轻由高糖引起的鱼体脂肪肝。Yulong Gong 等研究表明基础饲料中添加 1.50% 的啤酒酵母水解物不仅可以提高大口黑鲈的生长性能，还增强鱼体免疫应答，提高对嗜水气单胞菌的抵抗力。黄颡鱼饲料中添加 1.0% 的酵母培养物（粗蛋白含量为 55%）同样具有提高黄颡鱼生长性能和提高其抗嗜水气单胞菌感染的能力。植酸酶可以有效减少黄颡鱼饲料中矿物磷添加，降低对水环境的氮磷污染，而不影响鱼体生长性能。甘草（*Glycyrrhiza uralensis*）提取物可以显著提高黄颡鱼对柱状黄杆菌（*Flavobacterium columnare*）的抵抗力。饲料中添加 150-250mg/kg 的类胡萝卜素可以显著提高黄颡鱼对奇异变形杆菌（*Proteus mirabilis*）的抵抗力。与基础饲料（牛磺酸含量 0.02%）相比，饲料添加 1.09-2.55% 牛磺酸可以显著提高黄颡鱼抵抗高氨氮水平的能力。饲料中补充 80 mg/kg 的虾青素和 150 mg/kg 的大黄素均可以提高黄颡鱼抵抗短时（24 h）高密度应激的能力。与对照饲料（豆粕含量 18%）相比，高豆粕饲料（33%，替代部分鱼粉）后显著降低了黄颡的生长性能，并导致肠道上皮细胞损伤，

而在高豆粕饲料中补充丁酸钠（250-1000 mg/kg）不仅可以改善生长性能，也可以改善肠上皮细胞形态，降低血清丙二醛水平，增强黄鳝抗氧化能力。杂交鲟（*Acipenser schrenckii*×*Acipenser baeri*）饲料中添加 1% α -酮戊二酸显著增加肝脏中谷氨酰胺的水平，并进一步提高鱼体的抗氧化能力。

4.5 名特优养殖鱼类养殖环境、饲料加工、投饲

池塘工业化跑道式循环水养殖系统（In-pond raceway system, IPRS）可以有效的减少对水体的污染，方便饲养条件控制，Julin Yuan 等研究表明，跟常规池塘养殖（Usual-pond system, UPS）相比，大口黑鲈在 37500 尾/公顷的养殖密度下养殖 240 天，IPRS 显著提高鱼体存活率，肌肉中粗蛋白水平显著增加、粗脂肪水平显著降低，但是增重率下降，饲料系数没有差异，IPRS 参数需要进一步优化。Mingsong Xiao 等利用血液代谢组学检测发现，跟常规池塘养殖相比，循环水养殖系统中生长的鳊鱼在不饱和脂肪酸合成、溶菌酶、色氨酸代谢上发生显著改变。池塘中黄颡鱼（*Pelteobagrus fulvidraco* Richardson）和莲藕（*Nelumbo nucifera* Gaertn）共同养殖，与单独养殖黄颡鱼和莲藕的池塘相比，鱼的产量和莲藕产量均没有显著差异，而且相对于只养殖黄颡鱼，共养殖体系中氮磷的利用率显著提高，减少水体污染。对于依靠采食活饵的鳊鱼，在池塘中铺设人工沉水植被，增加生境复杂性，可以显著提高鳊鱼对活饵摄入量和特定生长率。

初孵幼鱼对环境条件的变化高度敏感，尤其是水温和溶氧，Jun Qiang 等利用响应面法，以存活率和特定生长率为指标，得到杂交黄颡鱼（*Tachysurus fulvidraco*×*Pseudobagrus vachellii*）初孵幼鱼的最适养殖水温和溶氧分别为 26.8℃和 7.3 mg/L。氨氮水平也是影响鱼体生长重要环境因子，循环水养殖系统中，在适宜养殖温度 18℃下，当水中氨氮水平达到 2 mg/L 时，中华鲟（*Acipenser sinensis*）生长性能和抗氧化能力显著降低。

在池塘工程化循环水养殖（In-pond raceway system, IPRS）条件，投喂频率为 2 次/d 时大口黑鲈（*Micropterus salmoides*）生长性能和抗氧化能力显著优于 3 次/d 和 4 次/d。在集约化养殖系统中，由于残饵和排泄很容易导致系统内氨累积，Muzi Zhang 等研究表明在氨氮应激（水中总氨氮水平 5.70 mg/L）条件下，相比于投喂 1 次/d 和 4 次/d，黄颡鱼投喂 2 次/d 时存活率最高，而且肝脏内脂代谢通路相关酶活力显著升高。Lin Luo 等研究表明，在水温保持 18 ± 1.0 °C 循环水养殖系统内，杂交鲟鱼（*Acipenser*

schrenckii Brandt× *Acipenser baeri* Brandt) 的摄食率和摄食次数分别为 5% 体重/d、6 次/d 时, 其增重率最高; 依据特定生长率进行折线分析表明, 杂交鲟幼鱼的最优摄食率和摄食次数分别为 3.7% 体重/d、6 次/d。

5 营养和饲料科学对淡水鱼产业发展的贡献及展望

没有现代的饲料工业, 就没有现代的水产养殖业。饲料成本占水产养殖成本的 60%—70%, 在过去鱼粉和鱼油是水产饲料中成本最大, 而且是最重要的组分, 它们营养均衡, 富含鱼类生长所需的必需氨基酸、脂肪酸、微量元素等, 有助于提高生长性能、健康状态、肉质品质等。但是由于过高的价格以及供应不足, 鱼粉和鱼油已经不能满足水产饲料对其的需求。鱼粉鱼油资源严重不足, 推动开发替代蛋白源脂肪源, 开发高能饲料, 开发功能性饲料, 促进鱼类营养需求、营养生理和肠道微生态等的更进一步的研究, 以及饲料加工和养殖设备的发展, 成为推动水产动物精准营养的主要动力。

精确定义鱼类的营养需求, 以及在确定营养需求的条件下, 选择廉价高效的原料, 对于节省饲料成本, 提高养殖效益, 发挥着重要作用。目前, 淡水鱼养殖代表种, 如草鱼、异育银鲫、罗非鱼、团头鲂等在不同阶段的营养需要和对主要饲料原料利用率已经有详实的数据参考。目前, 大口黑鲈已经可以完全使用配合饲料进行养殖, 但仍不能完全满足其营养需要。黄颡鱼育苗技术成熟以及黄鳝规模化全人工繁育技术成功等支撑它们人工养殖产量的快速发展, 也推动了其在营养与饲料方面研究的快速发展。但是, 由于我国淡水鱼养殖种类繁多, 针对每种鱼的特定生长阶段(主要是幼鱼阶段)研究比较多, 但是全养殖周期尤其是成鱼阶段的研究不多。现在滤食性的鲢鳙鱼主要是通过跟其他鱼类混养的方式进行养殖, 它们营养需求和配合饲料开发还较少研究, 目前有着很大的产业需求。

现在低鱼粉/低蛋白饲料和高能(高脂、高糖)饲料在淡水鱼养殖中的普遍使用, 使鱼体面对饲料氨基酸不平衡、抗营养因子水平增加、能量水平过高等问题, 影响着鱼体营养代谢和免疫机能。许多研究者对淡水鱼类面对这些不利因素时所引发的鱼体营养生理和代谢调控的变化有着广泛的研究, 为改善这些负面效应提供了充足的支撑。并在摄食调控, 营养物质消化吸收、转运、代谢等关键过程和调控的关键靶点等方面取得很多新成果。开发出很多可以提高和改善淡水鱼生长性能、改善免疫机能、增强抗应激作用的功能性成分, 如杜仲提取物、二甲基- β -丙酸噻亭氢溴酸盐 Br-DMPT、大豆异黄酮、

小球藻粉、姜黄素、紫松果菊、茶多酚、黄芩苷、虾青素、大黄素、黄芪多糖、枸杞多糖、植酸酶、丁酸钠等。

肠道微生物对宿主营养代谢和免疫的调控作用被广泛认识和重视，微生态制剂也广泛使用在淡水鱼的养殖中。对包括草鱼、异育银鲫、鳙鱼、团头鲂、罗非鱼、大口黑鲈、黄鳝、南方鲶、欧洲鳗鲡、达氏鳇、鲟鱼等研究均发现淡水鱼肠道菌群组成与畜禽等陆生动物在肠道菌群组成上存在明显的差异，变形菌门和梭杆菌门是淡水鱼肠道的主要优势菌，最显著的特征就是梭杆菌门（主要是鲸杆菌属）的丰度特别高，而且梭杆菌门丰度的高低与鱼体健康状态存在显著关联。当病原菌攻毒、重金属处理等处理造成鱼类肠道屏障损伤时，梭杆菌门的丰度显著降低；而当岩藻多糖、酵母水解物等处理改善鱼类肠道屏障时，梭杆菌门的丰度显著下降。所以鲸杆菌属是一类极富潜力的鱼类土著益生菌。但是同时现在淡水鱼饲料中普遍应用的微生态制剂主要是酵母菌、乳杆菌、芽孢杆菌等，它们不是淡水鱼肠道的优势类群，其应用的风险，包括停喂风险、损肠风险等需要引起关注。

伴随着淡水鱼养殖规模的快速发展，相关的饲料加工和养殖的机械装备也快速发展。现在国产化的微粉碎和膨化成套设备等饲料加工设备已经逐步普及，对提高饲料加工工艺水平有着重要作用。鱼类饲料对加工工艺有着更高的要求，既要减少水中溶失，又要在鱼摄入后容易消化。目前淡水鱼饲料加工工艺参数等方面还有许多需要进一步研究，特别是根据养殖对象情况，结合饲料原料特性进行特定饲料加工技术研究还不多。池塘工业化跑道式循环水养殖系统等工业化集约化养殖设备已经开始在淡水鱼养殖中应用，可以实现高密度养殖，有效的减少对水体的污染，方便饲养条件控制等，但是为了达到最佳养殖效果还需要在投饲技术、吸污技术、养殖系统水体生态环境管理等方面进行设备优化，推进淡水鱼养殖绿色可持续发展。

致谢：感谢中国农业科学院饲料研究所周伟和张青双在文献收集和整理方面的鼎力协助。感谢四川农业大学动物营养研究所冯琳教授对文稿所提的宝贵意见。

摘自水产饲料创新团队微信公众号

生物技术在水产动物生物饲料研究中的应用进展

翁俊杰 艾蓉 傅玲琳 王彦波 刘长军

浙江工商大学食品与生物工程学院 浙江象山县水产技术推广站

摘要: 抗生素的滥用和资源的紧张引起了一系列重要安全和环境问题,使得基于生物技术的生物饲料在水产养殖中的研究和应用引起了广泛关注。鉴于此,结合对近年来国内外相关研究的剖析,本文综述了目前生物技术在水产动物生物饲料研究中的研究进展,其中涉及基因工程、酶工程、微生物工程三方面,分别从分子、细胞和整体水平阐述,此外讨论了本领域未来的发展趋势。本文旨在为水产动物生物饲料的深入研发提供一定的借鉴和参考,以保障水产养殖业可持续健康发展。

关键词: 生物技术; 水产动物; 生物饲料; 应用进展; 水产养殖;

Application of biotechnology in the research of aquatic animal biological feed

Weng Junjie Ai Rong Fu Linglin Wang Yanbo Liu Changjun

Abstract: The abuse of antibiotics and the shortage of resources have caused a series of important security and environmental issues. Consequently, the research and application of biotechnology-based biological feed in aquaculture have aroused widespread concern. In view of this, combined with recent research at home and abroad, this article reviews the current research progress of biotechnology in aquatic animal biological feed. The biotechnology mainly includes three aspects: genetic engineering, enzyme engineering and microbial engineering, which are explained at the molecular, cellular and overall levels. Besides, the development trends in this field are discussed. This review aims to provide some reference for the in-depth development of aquatic animal biological feed and to ensure the sustainable and healthy development of aquaculture industry.

Keyword: biotechnology; aquatic animal; biological feed; application progress; aquaculture;

目前我国水产养殖正处于稳定发展的阶段,据报道,我国的水产养殖产量约占世界水产养殖总产量的70%^[1],且规模仍在不断扩大。然而,传统的水产养殖方式带来的水产动物安全隐患和养殖环境恶化引起了广泛的关注。此外,抗生素及其他化学药物在水产养殖中不合理使用和滥用引起的残留和耐药性现象,严重影响了消费者的食用安全,因此如何借助于新的技术手段,研究和开发新一代饲料和饲料添加剂成为研究的热点。近年来随着包括基因工程、酶工程、微生物工程等在内的生物技术的持续发展,水产动物生物饲料逐渐成为饲料行业和生物饲料产业的发展趋势之一,目前关联的水产动物饲用益生菌、抗菌肽、酶制剂、饲料酵母、微藻、单细胞蛋白等均已逐渐用于水产养殖且取得了显著的效果。随着全球饲料行业和水产养殖业的快速发展,蛋白资源的紧缺和环境保护的加强已成为制约相关行业发展的重要因素,依托现代生物技术并加快其在水产动物生物饲料研究中的应用具有重要的现实意义和理论价值。

1 基因工程

1.1 基因工程与饲用益生菌

研究表明,饲用益生菌可以通过改变与养殖动物相关的微生物群落,起到维护动物胃肠道微生物群的生态平衡、保护其正常生理功能的作用,从而达到改善饲料利用率、增强机体免疫力等目的,而且还能减少由抗菌药物引起的动物畸变和抗生素耐药性等问题。目前在水产养殖中应用较多的益生菌种类包括乳杆菌、双歧杆菌、酵母菌、芽孢杆菌、嗜热链球菌等。近年来,随着基因工程技术的快速发展,逐渐应用到饲用益生菌中,通过构建工程菌的方法可以使之表达一些有用的外源基因,扩大其生物学功能,从而达到一种制剂发挥多种功能的目的,而且还能增强益生菌的稳定性。Santos 等^[2]通过基因融合手段在枯草芽孢杆菌中成功表达了烟曲霉菌的植酸酶基因,构建后的菌株不仅明显减弱了植酸在斑马鱼饮食中的抗营养作用,还促进了斑马鱼的生长。Lin 等^[3]同样发现通过重组技术构建的益生菌可以改善斑马鱼的营养代谢和肝脏氧化应激反应,且对嗜水气单胞菌和无乳链球菌的抵抗力也得到显著增强。研究表明,饲料中添加能表达木聚糖酶基因的重组解淀粉芽孢杆菌 R8,饲喂尼罗罗非鱼 60 d 后发现鱼体内与碳水化合物代谢相关的酶基因以及肝脏中的胰岛素样生长因子-1(Insulin like Growth Factor,IGF-1) 基因的表达水平显著升高,提高了饲料利用率和对嗜水气单胞菌的抵抗力^[4]。基因工程应用于饲用益生菌的安全性也引起了关注,Zhao 等^[5]利用基因克隆技术从凝结芽孢杆菌中克隆了新型 α -半乳糖苷酶,经过蛋白质活性和抗性分析,在揭示其显著的蛋白酶抗性和高水解活性基础上,进一步研究证实了饲用安全性。

1.2 基因工程与饲用抗菌肽

由于抗菌肽在体内的表达水平较低,且提取和纯化既困难又昂贵,所以目前商业上的饲用抗菌肽主要是通过基因工程技术生产。近年来随着技术的不断进步,泥鳅、河豚、鲈鱼、青蟹等水产动物抗菌肽基因被克隆,为饲用抗菌肽的研发奠定了基础。研究发现,在饲料中添加饲用抗菌肽可以显著改善水产养殖动物的免疫力和对疾病的抵抗力,最终促进动物生长发育,He 等^[6]利用基因工程成功在小球藻中表达了重组抗菌肽 Scy-hepc,体外和体内的结果表明饲喂表达了抗菌肽的小球藻可显著增强鲤鱼对嗜水气单胞菌的抵抗力。进一步研究揭示不同的饲用抗菌肽抗菌机制有所不同。迄今研究证明饲用抗菌肽主要通过两种途径起作用,一种是抗菌肽与病原微生物细胞膜上的特定受体结合使膜的通透性发生改变,从而改变细胞内外渗透压,使细胞内容物外流导致细胞死亡;另一

种是抗菌肽直接穿过细胞膜在细胞中发挥作用，抑制细胞的生物学活动，例如抑制细胞内酶活性、阻断 DNA 复制、RNA 转录和蛋白质翻译等。由此可见，抗菌肽与细胞膜的相互作用对于抗菌肽的功效至关重要，综析国内外的研究报道，目前主要存在三种肽-膜互作模型（图 1）。桶板模型（Barrel-stave）通过抗菌肽先在膜表面聚集，再以多聚体的形式插入膜双分子层中，形成一个跨膜离子通道使细胞质外流导致细胞死亡；环孔模型（Toroidal）则是通过抗菌肽插入膜中，借助于抗菌肽疏水端可以使膜疏水中心形成裂口，引起膜向内弯曲形成一个直径为 1~2 nm 的环孔；第三种地毯模型（Carpet-like）是一种膜渗透模型，肽不是插入膜中而是在膜表面积聚，形成一个“地毯”覆盖在膜表面，以“去垢剂”的作用方式破坏细胞膜而引起细胞死亡^[7]。此外，研究人员也提出了一些其他肽-膜互作模型，如聚集体模型、分子电穿孔和“筏沉没”模型等，这些对理解抗菌肽的抗菌机制也是重要的^[2]。随着对水产动物各种抗菌肽结构和功能研究的深入，通过基因工程构建新型的饲用抗菌肽成为未来研究的趋势，如从河豚的皮肤黏液中提取纯化并克隆了新型抗菌肽 Tp HAMP2，分析表明^[8]该重组肽与天然肽具有相同的抗菌活性，这为饲用抗菌肽的商业化提供了可能。

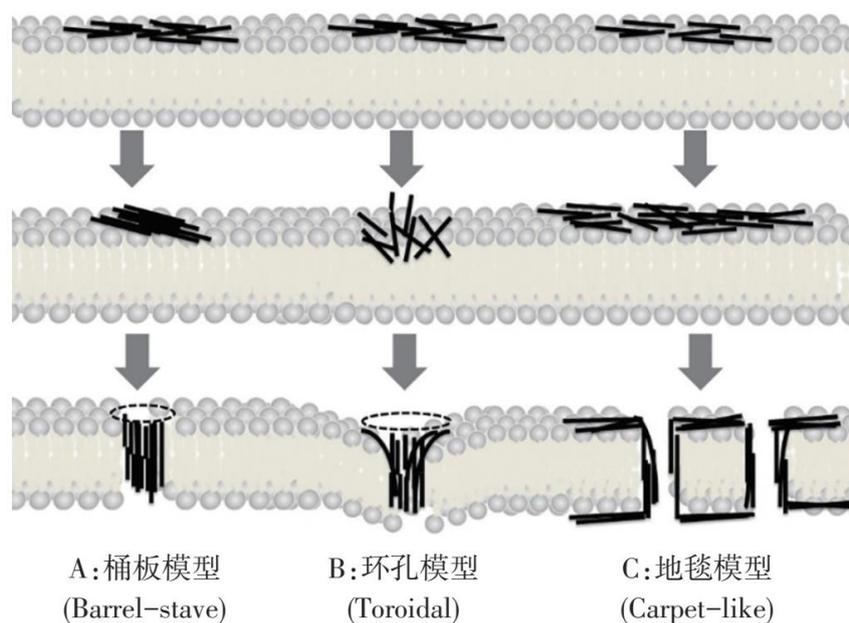


图 1 抗菌肽作用机制模型

2 酶工程

2.1 酶工程与饲用效果

饲用酶制剂作为酶工程在饲料行业的应用取得了显著的效果，涉及饲用植酸酶、木

聚糖酶、纤维素酶、淀粉酶、蛋白酶、 β -葡聚糖酶等,近五年酶制剂在水产动物饲料中的研究参见表 1。在水产饲料中添加适量的酶制剂可促进养殖动物对营养的吸收以改善生长性能。Li 等^[9]发现在饲料中添加 175 mg/kg 蛋白酶可明显提高饲料干物质和蛋白质的表观消化率,且改善了生长性能,此发现在罗非鱼、虹鳟鱼和长鳍鲤中均有类似报道。有些植物性饲料原料中含有多种抗营养因子,因此需要对酶进行复配以弥补单一酶改善抗营养因子的不足。杨航等^[10]用由植酸酶、果胶酶、 β -葡聚糖酶、木聚糖酶组成的复合酶制剂,有效降解了饲料中的植酸、果胶质、 β -葡聚糖和阿拉伯木聚糖等抗营养因子,提高了草鱼对蛋白质、磷和干物质的利用率。此外,酶制剂在饲料配伍加工过程中的作用时间以及与饲料中其他添加剂的相互作用也引起了关注。研究发现,在饲料制粒和熟化过程中蛋白酶就已经发挥了水解蛋白质的作用,该蛋白酶经过制粒和熟化过程后活性依然可保留 79.3%和 67.5%^[9]。Zhu 等^[11]发现饲料中的柠檬酸可为植酸酶提供适宜的酸性环境来提高黄鲶鱼对磷的利用率。Yao 等^[12]发现在饲料中添加蛋白酶、糖酶和有机酸盐可显著提高太平洋白虾的生长性能和饲料利用率,且三种添加剂的组合使用比单独添加具有更显著的效果。这为科学合理地设计包含饲用酶制剂在内的生物饲料配方和配套生产工艺提供了理论依据。

表 1 酶制剂在水产动物饲料中的应用研究

项目	添加量	水产动物	应用效果
植酸酶	4 000 IU/kg	虹鳟鱼 (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	显著提高了磷、钙、镁的表观消化率和利用率 ^[13]
	500 IU/kg	黄鲶鱼 (<i>Pelteobagrus fulvidraco</i>)	显著提高了磷、钠、钙、镁、锌的表观消化率,未改善生长性能 ^[13]
	1 000 IU/kg	黄鲶鱼 (<i>Pelteobagrus fulvidraco</i>)	改善了蛋白质和磷的表观消化率,显著增重 22% ^[14]
蛋白酶	175 mg/kg	中华绒螯蟹 (<i>Eriocheir sinensis</i>)	显著影响了肝脏和胰脏的胰蛋白酶活性以及蛋白质和脂肪的利用率 ^[15]
	175 mg/kg	美南白对虾 (<i>Litopenaeus vannamei</i>)	血清中的总超氧化物歧化酶和多酚氧化酶含量显著增加 ^[16]
植酸酶、 β -葡聚糖酶、纤维素酶、木聚糖酶	0.5 g/kg	莫桑比克罗非鱼 (<i>Oreochromis mossambicus</i>)	显著提高了蛋白质消化率、肠道蛋白酶活性以及生长性能 ^[17]
菠萝蛋白酶、半胱氨酸蛋白酶	1%	尼罗罗非鱼 (<i>Oreochromis niloticus</i>)	显著提高了蛋白质的消化率和饲料利用率,促进了罗非鱼生长 ^[18]
木瓜蛋白酶、菠萝蛋白酶	1%、2%	草鱼 (<i>Ctenopharyngodon idella</i>)	显著提高了脂质利用率,改善了生长性能和免疫力 ^[19]

2.2 酶工程与饲用机制

基于酶工程技术的酶制剂在水产动物生物饲料中取得了显著的应用效果,这与酶制剂的生理活性具有显著的关联。酶制剂的饲用机制主要包括以下几个方面:一是降解植物性饲料中的抗营养因子,改善水产动物对饲料营养物质的消化、吸收和利用。研究发现添加植酸酶和蛋白酶可消除鱼饲料中植酸、蛋白酶抑制剂和植物凝集素的抗营养作用,

显著提高尼罗罗非鱼对蛋白质、磷、矿物质和脂质的利用率^[20]。Castillo 等^[21]的研究也证实了这一点。二是改善肠道结构和调节肠道菌群。Adeoye 等^[22]发现用复合酶制剂（植酸酶、蛋白酶和木聚糖酶）饲喂罗非鱼可增加肠道微绒毛密度，且饲用前后肠道中变形杆菌和放线菌的菌落特征发生改变。在草鱼的研究中也得到了类似的研究结果^[10]。三是调节养殖水产动物的免疫能力。据报道，菠萝蛋白酶可以调节 T 细胞和 B 细胞的免疫应答、一氧化氮介导干扰素 γ (Interferon- γ , IFN- γ) 和巨噬细胞产生的肿瘤坏死因子 α (Tumor Necrosis Factor- α , TNF- α)^[23]，而在木瓜蛋白酶上存在的酶促和非酶促位点都可以激活 T 淋巴细胞和先天免疫反应^[24]。Choi 等^[19]发现在饲料中添加混合蛋白酶喂养草鱼后，其体内相关免疫基因表达显著增加，免疫力得到显著改善。

3 微生物工程

3.1 微生物工程与饲用单细胞蛋白

单细胞蛋白 (single cell protein, SCP) 又称为微生物蛋白。随着蛋白资源紧张在现代饲料工业领域引起广泛关注，饲用酵母、细菌等 SCP 均已逐渐应用于水产饲料中且取得显著效果。其中细菌 SCP 中蛋白含量可高达 80%且易于培养，因此被认为是最合适的 SCP 生产来源。细菌主要是以碳氢化合物或甲醇作为底物进行发酵生产 SCP，因此原料来源非常广泛，一般的食品加工废弃物和副产物等均能作为底物来综合利用，这很大程度上减少了饲料的生产成本。目前 SCP 生产以固态发酵和液体深层发酵为主，其原料和菌种的多样性使得在发酵生产过程中需要多种生物反应模式以适合发酵菌种的增长（表 2）。目前用于 SCP 生产的细菌主要包括双歧杆菌、乳酸菌、光合细菌、芽孢杆菌等，而一些新型的潜在菌种也在逐步研究中。现已在鱼类和虾类上成功测试了几种基于甲烷营养菌的 SCP 产品^[25]。研究发现产氨棒杆菌 SCP 可以替代虾饲料中 10%~20% 的鱼粉^[26]。Tlustý 等^[27]研究发现扭脱甲基杆菌 SCP 可替代鲑鱼饲料中 55% 的鱼粉，在鳟鱼饲料中可以替代鱼粉 10%^[28]，而在虾饲料中能够完全替代鱼粉^[27]。此外借助于生物工程技术的进步，菌种发酵方式逐步由单一菌种趋向于复合菌株的协同发酵，通过不同菌种间的协同互补可生产产量更高、营养成分更齐全的 SCP。孙立瑞等^[29]发现在甲烷氧化菌培养中加入光合菌能够明显促进甲烷氧化菌生长，且缩短了发酵周期，显著提高了 SCP 产量。Chumpol 等^[30]在南美白对虾饲料中添加了 1% 的两种紫色非硫细菌 SCP 混合物，虾的生长性能、免疫力和存活率均得到显著提高，且显著优于单一 SCP。细菌和微藻的 SCP 混合物在斑节对虾上的研究结果同样表明，SCP 可安全替代虾饲料中的

鱼粉和鱼油^[31]，且当饲料中添加 10%SCP 混合蛋白时就能够加快生长速度^[32]。

表 2 不同反应模式和微生物种类的比较优势^[25]

项目	微生物种类	比较优势
好氧生物反应器	异养、兼养微生物	细胞产量高、成本高、能耗高
厌氧生物反应器	异养、兼养微生物	细胞产量低、成本低、能耗低
气体生物反应器	甲基营养、化学自养、兼养微生物	可变细胞产量、成本高、能耗高
光合生物反应器	光自养、兼养微生物	细胞产量高、成本高、能耗高
开放式系统	光自养、异养、兼养微生物	可变细胞产量、成本低、能耗低

3.2 微生物工程与饲用微藻

同样，借助于微生物工程的饲用微藻已成功用于水产动物生物饲料中，涉及小球藻、螺旋藻、节旋藻等藻类。研究表明，饲用微藻通过富含的生物活性分子而发挥其生物学作用。如饲用微藻中富含的不饱和脂肪酸可有效改善养殖动物体内的脂肪酸谱^[33]；饲用小球藻中的 β -葡聚糖对鱼类具有明显的抗有害菌活性和免疫刺激活性；部分饲用微藻中的类胡萝卜素可以保护细胞免受自由基侵害，防止脂质过氧化和维持重要免疫细胞、组织的结构完整性，并促进生长发育和提高存活率^[33]；饲用微藻中虾青素的抗氧化、抗高血脂作用可显著改善鱼虾的健康状况^[34]，在以克氏原螯虾^[35]和金鲟鱼^[36]为研究对象的实验中均得到了验证。

此外，结合基因工程和微生物工程各自的优势，已逐步应用于莱茵衣藻等饲用微藻开发中^[33]，旨在增强饲用微藻的生物学作用，改善水产动物的免疫力、抗病性。已有研究证明，通过生物技术改良后可生产牛乳铁蛋白抗菌肽的饲用微藻，可以显著增加养殖鱼体内多不饱和脂肪酸和抗体含量，使鱼体对细菌性肾脏疾病的免疫力得到增强^[37]。近五年国内外对饲用微藻种类及其在水产动物中的应用研究参见表 3。

表 3 饲用微藻种类及其在水产动物中的应用

项目	水产动物	添加浓度(%)	饲喂天数(d)	应用效果
杜氏盐藻 (<i>Dunaliella salina</i>)	斑节对虾 (<i>Penaeus monodon</i>)	2	60	显著增强了对白斑综合症病毒的免疫力 ^[38]
螺旋藻 (<i>Spirulina platensis</i>)	花鲈 (<i>Lateolabrax maculatus</i>)	4	56	显著提高了饲料利用率和肠道蛋白酶活性，且增强了免疫力和抗氧化能力 ^[39]
节旋藻 (<i>Arthrospira platensis</i>)	尼罗罗非鱼 (<i>Oreochromis niloticus</i>)	1	83	生长性能没有显著影响，增强了对荧光假单胞菌的免疫力 ^[40]
微拟球藻 (<i>Nannochloropsis salina</i>)	尼罗罗非鱼 (<i>Oreochromis niloticus</i>)	82	36	与对照组相比显著改善了鱼体内的脂肪酸谱， ω -3 脂肪酸含量显著增加 ^[41]
拟微绿球藻 (<i>Nannochloropsis sp.</i>)	大菱鲆幼鱼 (<i>Scophthalmus maximus</i> L.)	5	70	显著增加了肌肉中的必需氨基酸含量和抗氧化能力 ^[42]
螺旋藻 (<i>Spirulina platensis</i>)	虹鳟鱼 (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	2.5	49	改善了虹鳟鱼的黏膜免疫反应和抗病性 ^[43]
节旋藻 (<i>Arthrospira platensis</i>)	异育银鲫 (<i>Carassius auratus gibelio</i>)	3.38	46	显著增强了鱼的免疫反应和对嗜水气单胞菌的抵抗力 ^[44]

4 展望

基因工程、酶工程、微生物工程等生物技术的应用,为水产动物生物饲料的开发提供了新的思路。目前饲用益生菌、抗菌肽、酶制剂、微藻等都已应用于实际水产养殖生产中,但是由于相关作用机理还尚未完全研究清楚,尤其是缺乏在分子和细胞层面的深入研究,这很大程度上限制了在可持续水产养殖业中的靶向针对性应用。剖析国内外的相关研究,学科交叉下生物饲料与水产动物互作机制的深入探究、微生境下各种益生因子关联网络的构建、迅速发展的生物技术背景下可利用资源的拓展等已经逐渐成为本领域未来发展的趋势,可为水产动物生物饲料的研发奠定坚实的基础,为水产品安全生产和水产养殖环境保护提供必要的保障。

参考文献: 略

饲料工业 2020,41(18),48-53 DOI:10.13302/j.cnki.fi.2020.18.009

科学研究

饲料中添加螺旋藻和叶黄素对黄颡鱼“黄优一号”生长、抗氧化能力和体色异常调控的比较研究

刘翠 刘昊昆 朱晓鸣 韩冬 金俊琰 杨云霞 解绶启

中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室 中国科学院大学 湖北省水产动物营养与饲料工程技术研究中心

摘要: 本研究以杂交黄颡鱼(黄颡鱼♀×瓦氏黄颡鱼♂)“黄优一号”(体重 4.79 ± 0.01 g)为研究对象,探究饲料中螺旋藻和叶黄素对黄颡鱼生长、抗氧化能力和抗病能力及体色异常调控的影响。实验设计四组饲料,不添加任何色素源的对照组(Con),添加2%的螺旋藻组(Spirulina, SP),添加0.2%的叶黄素组(Lutein, Lut)以及添加2%螺旋藻和0.1%溶血磷脂组(Spirulina+Lysophospholipids SPL)。720尾鱼随机放入12个缸,每缸60尾鱼,先使用对照组饲料投喂20天至体表颜色异常,再用四种饲料饲养35天,共四个处理,每个处理3个重复。养殖实验结束后进行嗜水气单胞菌攻毒实验。研究结果表明,各个处理组间特定生长率(SGR)和摄食率(FR)均没有显著差异($P > 0.05$);但SP和SPL组饲料效率(FE)显著高于对照组($P < 0.05$)。各组间全鱼水分,蛋白和脂肪含量没有显著差异($P > 0.05$)。各组间实验鱼皮肤亮度没有显著性差异($P > 0.05$);但SP和SPL组皮肤黄度和饱和度显著高于另外两组($P < 0.05$);同时,SP和SPL组背部皮肤红度显著高于对照组($P < 0.05$);SPL组腹部皮肤红度显著高于对照组($P < 0.05$)。SP和SPL组腹部皮肤叶黄素含量显著高于对照组($P < 0.05$)。对照组超氧化物歧化酶(SOD)活性显著低于另外三个处理组($P < 0.05$);各组过氧化氢酶(CAT)活性没有显著性差异($P > 0.05$);SPL组谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)活性和还原型谷胱甘肽(GSH)含量显著高于叶黄素和对照组($P < 0.05$);SP和SPL组丙二醛(MDA)含量显著低于另外两个处理组($P < 0.05$)。SP和SPL组的实验鱼感染嗜水气单胞菌后的累计存活率显著高于叶黄素和对照组($P < 0.05$)。综上所述,黄颡鱼“黄优一号”在前期投喂缺乏色素的饲料造成体色异常后,饲料中添加螺旋藻或配合添加溶血卵磷脂比叶黄素更有效的改善鱼体的体色,同时更能提高黄颡鱼的抗氧化能力和抗病力。

关键词: 螺旋藻; 叶黄素; 杂交黄颡鱼; 体色; 抗氧化能力;

Comparative Study of the Effects of *Arthrospira platensis* and Lutein on the Growth, Antioxidant Capacity and Pigmentation in Hybrid Yellow Catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*♀ × *Pelteobagrus vachelli*♂)

LIU Cui LIU Hao-Kun ZHU Xiao-Ming HAN Dong JIN Jun-Yan YANG Yun-Xia XIE Shou-Qi
State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences University of Chinese Academy of Sciences Hubei Engineering Research Center for Aquatic Animal Nutrition and Feed

Abstract: *Arthrospira platensis* is rich in protein, vitamins, minerals, essential amino acids, pigments carotenoids, essential fatty acids and antioxidant compounds. Carotenoids, including lutein, β -carotene, astaxanthin and so forth, which dissolve in fat and result in yellow, red, orange, and green pigmentation of the eggs, skin, and flesh of many fish species. Antioxidant compounds, such as phycocyanin, and tocopherols have significant effects on scavenging free radicals. Lutein is considered an effective functional compound benefiting human health and widely used as a natural food colorant due to its antioxidant potential and the intense yellow color. However, high density in intensive aquaculture has led to the outbreak of bacterial infection that has caused high mortality of yellow catfish, which impeded further rapid development of the yellow catfish culture industry. Nutritional and environmental factors cause abnormal body color which also has negative effects on fish quality and values. To evaluate the different effects of *Arthrospira platensis* and lutein on the growth, pigmentation, antioxidant capacity and disease resistance in hybrid yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*♀ × *Pelteobagrus vachelli*♂), four isonitrogenous (400g crude protein kg⁻¹ diet) and isolipidic (85g crude lipid kg⁻¹ diet) diets containing 2% *A. platensis* (SP), 0.2% lutein (Lut), 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids (SPL) and without pigments (Control) were designed. A total of 720 fish [initial body weight of (4.79±0.01) g] were stocked into 12 tanks at a density of 60 fish per tank. Fish were fed without pigments feed for 20 days, then fed four experimental diets for 35 days. A bacterial challenge test using *Aeromonas hydrophila* was subsequently conducted. The results indicated that there was no significant difference in final body weight (FBW), specific growth rate (SGR) and feeding rate (FR) among all groups ($P > 0.05$). The feed efficiency (FE) of the 2% *A. platensis* and 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids groups were significantly higher than those of the 0.2% lutein and control groups ($P < 0.05$), and supplemental 0.1% lysophospholipids significantly increased feed efficiency ($P < 0.05$). The protein retention efficiency (PRE) in control group was

lowest ($P < 0.05$), while that in 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids was highest ($P < 0.05$). The chemical composition results showed that there were no differences on moisture, crude protein and crude lipid of the whole body among all groups ($P > 0.05$), while ash in 0.2% lutein and 2% *A. platensis* groups were lower than that in the control group ($P < 0.05$). The lightness of skin showed no difference in different groups, while the skin yellowness of the 2% *A. platensis* and 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids groups were significantly higher than those in the 0.2% lutein and control groups ($P < 0.05$). The skin redness of the 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids group was significantly higher than that in the control group ($P < 0.05$), and the redness of dorsal skin in the 2% *A. platensis* group had the similar results. The skin chroma of the 2% *A. platensis* and 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids groups were significantly higher than those in the 0.2% lutein and control groups ($P < 0.05$). The lutein contents in abdominal skin of the 2% *A. platensis* and 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids groups were 18.65 and 18.10 $\mu\text{g/g}$, which increased significantly compared to that in the control group (13.16 $\mu\text{g/g}$) and initial fish (13.32 $\mu\text{g/g}$) ($P < 0.05$). There was no significant difference in lutein content in dorsal skin among all groups ($P > 0.05$). The photograph of experimental fish also showed fish fed 2% *A. platensis* and 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids had better body color. Dietary *A. platensis* and lutein significantly increased the activities of plasma SOD ($P < 0.05$), noteworthy, the activities of plasma GPX and the contents of plasma GSH in the 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids group were higher than those in the 0.2% lutein and control groups ($P < 0.05$), and the contents of MDA decreased significantly in the 2% *A. platensis* and 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids groups ($P < 0.05$). At 96h post challenged with *A. hydrophila*, the cumulative survival rates of yellow catfish of 2% *A. platensis*, 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids, 0.2% lutein and control groups were 20.83%, 16.67%, 5.55% and 0, respectively. The cumulative survival rates of yellow catfish of 2% *A. platensis*, 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids were significantly higher compared to that of the 0.2% lutein and control groups ($P < 0.05$). In conclusion, supplemental *A. platensis* can increase pigmentation, as well as enhance total antioxidant capacity and disease resistance of hybrid yellow catfish. Lutein also can effectively enhance pigmentation, and lysophospholipids can improve feed utilization significantly. However, dietary *A. platensis* can be more effective than lutein to improve the body color, enhance antioxidant capacity and disease resistance of hybrid yellow

catfish.

Keyword: *Arthrospira platensis*; Lutein; Hybrid yellow catfish; Pigmentation; Antioxidation;

藻类因其蛋白质含量高,氨基酸配比合理,所含脂肪多以不饱和脂肪酸为主,且富含维生素(如维生素 A、B₁、B₂、B₆、B₁₂、V_C、V_E、烟酸盐、生物素、叶酸和泛酸等),矿物质和类胡萝卜素等能够提高传统食品的营养价值,最终影响人类和动物的生长和健康^[1]。螺旋藻隶属于蓝藻门,是目前开发利用最多的微藻之一,在水产养殖中可用作蛋白质替代源或功能性添加剂。在之前的研究中发现螺旋藻能够替代 5%的鱼粉,同时能显著提高鸚鵡鱼(*Oplegnathus fasciatus*)的特定生长率和蛋白质效率^[2]。饲料中添加 1%的螺旋藻能够显著增强尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)的抵抗嗜水气单胞菌的能力,提高感染后的存活率^[3]。同时,螺旋藻富含类胡萝卜素能够提高水产动物的体色和色素含量^[4,5]。叶黄素广泛存在于植物中,尤其是万寿菊,主要呈橙黄色或红色,常用作家禽和水产动物着色剂^[6]。溶血卵磷脂是由卵磷脂失去一个脂肪酸基团所形成的磷脂的统称,研究表明溶血卵磷脂能够促进动物的生长和对脂类等营养物质的吸收^[7,8]。

鱼类的体色是由真皮层下的色素细胞和色素颗粒相互作用形成的。鱼体内的色素主要包括黑色素和类胡萝卜素。和其他动物一样,鱼类不能自身合成类胡萝卜素,必须从食物中获取^[9]。因此,类胡萝卜素缺乏会严重影响鱼体体色,饲料中添加含天然或者人工合成的类胡萝卜素改善鱼体体色是水产动物营养学研究的热点。同时,随着经济的快速发展和生活水平的不断提高,人们对水产品的品质和营养要求越来越高。水产养殖业因此备受关注,但在高度密度集约化养殖条件下,鱼类体色异常和健康问题频频出现。养殖中发生体色异常的多为无鳞鱼,但近年来有鳞鱼类也经常发生体色异常。养殖鱼类体色异常不仅降低了其商品价值,同时给养殖者带来巨大的经济损失。

黄颡鱼隶属于鲶形目、鲿科,黄颡鱼属,分布于河川、湖泊、沟渠等水域中,其肉质细嫩、少刺无鳞、营养丰富,是一种优质名贵经济鱼类。杂交黄颡鱼“黄优一号”是以连续 3 代选育的黄颡鱼为母本,以连续选育 2 代选育的瓦氏黄颡鱼为父本,人工杂交得到的子一代。黄颡鱼“黄优一号”较好的展现了杂交优势,与黄颡鱼相比,生长速度显著提高,同时品质比瓦氏黄颡鱼接受度更高。但在人工养殖条件下黄颡鱼体色异常仍是比较受关注的问题。本文主要比较研究了饲料中添加螺旋藻以及叶黄素对杂交黄颡鱼“黄优一号”生长,抗氧化和体色异常调控的影响,以及饲料中添加溶血磷脂对黄颡鱼的影响。

1 实验材料和方法

1.1 实验饲料

表 1 饲料配方及生化组成

Tab. 1 Formulation and Chemical composition of experimental diets

原料 Ingredients (%干物质 Dry matter)	Con	SP	Lut	SPL
鱼粉 Fishmeal ¹	30.00	28.24	30.00	28.24
螺旋藻 A. platensis ²	0.00	2.00	0.00	2.00
叶黄素 Lutein ³	0.00	0.00	0.20	0.00
溶血磷脂 Lysophospholipids	0.00	0.00	0.00	0.10
豆粕 Soybean meal	18.25	18.25	18.25	18.25
菜粕 Rapeseed meal	18.30	18.30	18.30	18.30
面粉 Wheat flour	15.00	15.00	15.00	15.00
鱼油 Fish oil	2.54	2.54	2.54	2.54
豆油 Soybean oil	2.54	2.54	2.54	2.54
纤维素 Cellulose	4.87	4.63	4.67	4.53
多维预混 Vitamin premix ⁴	0.39	0.39	0.39	0.39
多矿预混 Mineral premix ⁵	5.00	5.00	5.00	5.00
CMC	3.00	3.00	3.00	3.00
胆碱 Choline chloride	0.11	0.11	0.11	0.11
Total	100.00	100.00	100.00	100.00
化学组成 Chemical composition (%)				
水分 Moisture	7.88	6.42	6.99	7.31
%干物质 Dry matter				
粗蛋白 Crude protein	39.80	39.60	39.55	39.05
粗脂肪 Crude lipid	8.61	8.37	8.75	8.05
叶黄素 Lutein (μg/g)	4.23	7.52	8.66	7.50

¹ 鱼粉：白鱼粉，美国海鲜公司。¹ Fishmeal: White fishmeal, American Seafood Company, Seattle, Washington, USA.² 螺旋藻：内蒙古鄂尔多斯绿蚨源螺旋藻业有限公司。² A. platensis: Lvfyuan company, Ordos, China.³ 叶黄素：总叶黄素≥20.00g/kg, 水分≤8.0%，广州立达尔生物科技股份有限公司；³ Lutein: Total lutein≥20.00g/kg, moisture≤8.0%, Guangzhou leader bio-technology CO., LTD.⁴ 维生

素预混物 (mg/kg 饲料): 维生素 A, 1.65; 维生素 D, 0.025; 维生素 E, 50; 维生素 K, 10; 维生素 C, 100; 硫胺素, 20; 核黄素, 20; 维生素 B6, 20; 维生素 B12, 0.02; 叶酸, 5; 泛酸钙, 50; 肌醇, 100; 烟酸, 100; 生物素, 0.1; 纤维素, 645.2。⁴ Vitamin premix (mg/kg diet): Vitamin A, 1.65; Vitamin D, 0.025; Vitamin E, 50; Vitamin K, 10; Vitamin C, 100; Thiamin, 20; Riboflavin, 20; Pyridoxine, 20; Cyanocobalamine, 0.02; Folic acid, 5; Calcium pantothenate, 50; Inositol, 100; Niacin, 100; Biotin, 0.1; Cellulose, 645.2。⁵ 矿物盐预混物 (mg/kg 饲料): 氯化钠, 500; 七水合硫酸镁, 8155.6; 二水合磷酸二氢钠, 12500.0; 磷酸二氢钾, 16000.0; 二水合磷酸氢钙, 7650.6; 七水合硫酸亚铁, 2286.2; 五水合乳酸钙, 1750.0; 七水合硫酸锌, 178.0; 一水合硫酸锰, 61.4; 五水合硫酸铜, 15.5; 七水合硫酸钴, 0.5; 碘化钾, 1.5; 玉米淀粉, 753.7。⁵ Mineral premix (mg/kg diet): NaCl, 500; MgSO₄·7H₂O, 8155.6; NaH₂PO₄·2H₂O, 12500.0; KH₂PO₄, 16000.0; CaHPO₄·H₂O, 7650.6; FeSO₄·7H₂O, 2286.2; C₆H₁₀CaO₆·5H₂O, 1750.0; ZnSO₄·7H₂O, 178.0; MnSO₄·H₂O, 61.4; CuSO₄·5H₂O, 15.5; CoSO₄·7H₂O, 0.5; KI, 1.5; Corn starch, 753.7.

实验设计 4 组饲料, 不添加任何色素源的对照组 (Con), 添加 2% 的螺旋藻组 (SP), 添加 0.2% 的叶黄素组 (Lut) 以及添加 2% 螺旋藻和 0.1% 溶血磷脂组 (SPL)。饲料配方, 化学组成和色素含量如表 1 所示。其中螺旋藻购于内蒙古鄂尔多斯绿蚨源螺旋藻业有限公司, 叶黄素由湖北省武汉市大北农水产科技有限公司提供, 溶血卵磷脂由珠海建明工业有限公司提供。饲料由实验饲料机 (SLR-45, 中国水产科学院渔业机械研究所) 制成颗粒于 60°C 烘干, 冷藏于 4°C 备用。

1.2 饲养管理

养殖实验开始之前, 对实验鱼暂养 2 周进行驯化。暂养期间用商品饲料饱食投喂实验鱼, 使其适应实验条件, 每天投喂两次, 时间为 8:30 和 18:30; 实验前一天, 实验鱼饥饿 24h, 选取体格健壮、规格均匀的个体 (体重 4.79 ± 0.01 g), 称重后随机放入 12 个养殖缸中, 每缸 60 尾。实验鱼先用对照组饲料饲养 20d 至体表颜色异常, 再用四种饲料饲养 35d, 共 4 个处理, 每处理 3 平行。实验期间, 每天 8:30 和 18:30 投喂, 每次投喂 1h 至表观饱食。

实验在室内循环水养殖系统的圆缸 (水体积 250 L) 中进行。使用充气头在非投喂期间连续充气增氧。实验期间水温变化范围为 28.5 ± 1 °C。光照周期为 12L/12D, 光照周期从 8:00 至 20:00, 使用节能灯作为光源。每周监测水体溶氧和氨氮, 溶氧 > 7.5 mg/L, 氨氮 < 0.1 mg/L, pH 为 6.5-7.0。

1.3 攻毒实验

实验用菌为嗜水气单胞菌，由中国科学院水生生物研究所健康养殖实验室李爱华老师提供。该菌由鲫鱼体内分离出，经 BHI 固体培养基复苏生长后，单克隆转移到 BHI 液体培养基，在 30°C 条件下培养 6h，然后在 3500 g 离心 10min，收获沉淀物并用 PBS 冲洗 3 次，获得攻毒实验菌种。在正式试验之前，先进行一个预实验，通过腹腔注射 0.5 mL 四种浓度 (2×10^7 、 2×10^8 、 2×10^9 、 2×10^{10} CFU/mL) 的嗜水气单胞菌，确定本实验杂交黄颡鱼在 27.5°C 时的 3 天半致死浓度为 2×10^9 CFU/mL。

养殖实验结束后，每缸选 15 尾鱼腹腔注射 0.5 mL 2×10^9 CFU/mL 嗜水气单胞菌进行攻毒实验。实验水温 27.5°C。统计攻毒后 96h 内各处理组杂交黄颡鱼的累计存活率。存活率计算公式如下：

$$\text{存活率}(\%) = (\text{存活鱼总数} / \text{起始鱼总数}) \times 100$$

1.4 实验取样

实验开始时，随机取 3 组（每组 12 尾）鱼抹干称重，存于 -20°C 冰箱中，用于初始体成分分析。20d 实验结束时，将实验鱼饥饿 24h 后，称重取样，随机选 3 个缸，每缸取 2 尾鱼抹干称重，存于 -20°C 冰箱中，用于中间体重成分分析每缸取 4 尾拍照记录实验鱼体表颜色。35d 养殖结束后将实验鱼饥饿 24h 后，称重取样，每缸取 2 尾鱼抹干称重，存于 -20°C 冰箱中，用于终末体成分分析。然后每缸取 6 尾鱼，用肝素钠（浓度：0.2%）抗凝的注射器尾静脉取血，放入抗凝离心管中，4°C 下 3000r/min 离心 7min，取上清血浆于 -80°C 冰箱保存，用于血液学指标测定。上述 6 尾鱼抽完血后冰盘解剖，取背皮和腹皮用灭菌后的锡箔纸包起来于 -80°C 冰箱保存，用于色素含量的测定。另外每缸取 3 尾鱼麻醉后用柯尼卡-美能达 CR400 色差计（Japan）进行皮肤颜色的测定，在每尾鱼左侧背部和腹部的同一位置（分别为背鳍下部和腹部）测量 2 次，在每次测量中，色差计的探头需旋转 180 度，将 2 次测量的结果取平均值。L 表示亮度，+a* 表示红色，-a* 表示绿色，+b* 表示黄色，-b* 表示蓝色^[10]。C 表示色饱和度，计算公式为 $C = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ ^[11]。最后拍取各个处理组实验鱼照片。

1.5 样品分析

全鱼和饲料的生化组成测定参考 AOAC^[12]的方法，水分是在 105°C 烘干至恒重测得；粗蛋白采用凯氏定氮仪（2300 Kjeltac Analyzer Unit, FOSS TECATOR, Sweden）测定；粗脂肪用索氏抽提法（Soxtec system HT6, Tecator, Haganas, Sweden）以乙醚为溶剂

测定；灰分在马福炉（中国湖北英山县建立电炉制造厂）中 550°C 下充分灼烧测得。皮肤和饲料叶黄素的测定分别根据 Karadas 等 (2006)^[13]和 Ferreira 等(2007)^[14]描述的方法略作修改。皮肤前处理如下：准确称取皮肤样品 200—300 mg（精确到 0.0001g）放入 10 mL 离心管中，加入 0.7 mL 5% NaCl 溶液和 1 mL 乙醇，后用组织匀浆机匀浆 3min，匀浆时加入 2 mL 正己烷，匀浆后加入 2 mL 正己烷反复冲洗匀浆机上残留的组织样品，之后合并提取剂，4°C，4600 r/min 条件下离心 10min，取上清液并放入氮吹仪吹干，残留物复溶于色谱级甲醇:甲基叔丁基醚 = 86 : 14 (v/v)，溶解液经 0.22 μ m 有机滤膜过滤，待上机（Waters e2695,U.S.A.）进样分析。饲料样品的前处理：准确称取饲料样品 1g（精确到 0.001），加入蒸馏水 1 mL，漩涡振荡 1min 后加 3 mL 提取剂（正己烷：丙酮：乙醇：甲苯，50：35：30：35，v/v/v/v），漩涡振 1min，于黑暗处放置 16h。之后加入 40% 氢氧化钾-甲醇溶液皂化饲料中的叶黄素酯，然后加入 3 mL 正己烷，于黑暗处放置 1h，加入 3 mL 10% 硫酸钠溶液，放置 1h，收集正己烷层并准确记录体积。用移液器吸取 200 μ L 正己烷层，氮吹仪吹干，残留物复溶于色谱级甲醇:甲基叔丁基醚 = 86 : 14 (v/v)，溶解液经 0.22 μ m 有机滤膜过滤，待上机（Waters e2695,U.S.A.）进样分析。高效液相色谱用的色谱柱是 Waters YMC Carotenoid C30 column (5 μ m, 4.6 \times 250 mm)，流动相 A 是甲醇：甲基叔丁基醚：水 = 810 : 150 : 40，流动相 B 是甲醇：甲基叔丁基醚 = 60 : 900。

血浆超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化氢酶（CAT）、谷胱甘肽过氧化氢酶（GPX）、还原型谷胱甘肽（GSH）和丙二醛（MDA）的测定均使用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒。

1.6 数据处理

使用统计软件 SPSS 19.0 进行统计分析。实验结果首先进行方差齐性检验；方差齐性后，进行单因素方差分析 (One-way ANOVA)；若各实验组间差异显著，则进行 Duncan's 多重比较；P<0.05 表示差异显著。

2 结果

2.1 生长和饲料利用

养殖期间实验鱼的生长和饲料利用如表 2 所示。对照饲料养殖 20 天后各个处理组的实验鱼的末重没有任何差异。后期不同饲料投喂 35 天后，各个处理组间特定生长率（SGR）和摄食率（FR）均没有显著差异（P>0.05）；但螺旋藻和螺旋藻加溶血卵磷脂

组饲料效率 (FE) 显著高于对照组 ($P < 0.05$), 其中螺旋藻加溶血卵磷脂组饲料效率最高 ($P < 0.05$)。对照组的蛋白沉积率 (PRE) 显著低于另外三个处理组 ($P < 0.05$), 同样的, 螺旋藻加溶血卵磷脂组蛋白沉积率最高 ($P < 0.05$)。

表 2 不同实验饲料对黄颡鱼生长和饲料利用的影响

Tab.2 Effects of different diets on growth and feed utilization of yellow catfish

	Con	SP	Lut	SPL
初始体重 IBW (g) ¹	4.78 ± 0.02	4.79 ± 0.01	4.80 ± 0.01	4.80 ± 0.01
20 天体重 20 days BW (g) ²	8.64 ± 0.15	8.46 ± 0.34	8.81 ± 0.42	8.30 ± 0.14
终末体重 FBW (g) ³	18.93 ± 0.15	19.73 ± 1.38	17.99 ± 1.25	18.73 ± 1.64
特定生长率 SGR (%/d) ⁴	1.98 ± 0.18	2.23 ± 0.18	1.78 ± 0.20	2.37 ± 0.07
饲料效率 FE (%) ⁵	31.48 ± 4.66 ^a	48.50 ± 2.17 ^b	38.40 ± 5.56 ^{ab}	63.20 ± 2.11 ^c
摄食率 FR (%BW/d) ⁶	3.56 ± 0.32	3.16 ± 0.04	3.39 ± 0.22	3.36 ± 0.18
蛋白沉积率 PRE (%) ⁷	14.03 ± 2.34 ^a	22.03 ± 0.93 ^b	19.10 ± 1.47 ^b	27.88 ± 0.06 ^c

表中数据表示为平均值±标准误 (n=3), 同行数值不同上标英文字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。Data presented are Means ± SE (n=3), Values in the same row with different superscript letters are significantly different ($P < 0.05$).¹ 初始体重 IBW (g): Initial body weight; ² 20 天体重 20 days BW (g): 20 days body weight; ³ 终末体重 FBW (g): Final body weight; ⁴ 特定生长率 SGR (%/d) = $100 \times [\ln(\text{终末体重}) - \ln(\text{初始体重})] / \text{天数}$ Specific growth rate (%/d) = $100 \times [\ln(\text{FBW}) - \ln(\text{IBW})] / \text{days}$; ⁵ 饲料效率 FE (%) = $(100 \times \text{鱼体总增重}) / \text{饲料干物质摄入量}$ Feed efficiency (%) = $(100 \times \text{fresh body weight gain}) / \text{dry feed intake}$; ⁶ 摄食率 FR (%BW/d) = $100 \times \text{干物质摄食量} / [\text{天数} \times (\text{初始体重} + \text{终末体重}) / 2]$ Feed rate (%BW/d) = $100 \times \text{dry feed intake} / [\text{days} \times (\text{IBW} + \text{FBW}) / 2]$; ⁷ 蛋白质沉积率 PRE (%) = $(100 \times \text{鱼体蛋白质沉积量}) / \text{蛋白质摄入量}$ Protein retention efficiency (%) = $(100 \times \text{body retained protein}) / \text{protein intake}$;

2.2 全鱼基本组分

表 3 不同实验饲料对黄颡鱼的鱼体组成的影响 (%)

Tab.3 Effects of different diets on body chemical composition of yellow catfish (%)

	Con	SP	Lut	SPL
水分 Moisture	74.98 ± 0.25	74.16 ± 0.32	74.36 ± 0.91	73.13 ± 0.56
粗蛋白 Crude protein	14.30 ± 0.11	14.58 ± 0.09	14.34 ± 0.23	14.57 ± 0.25
粗脂肪 Crude lipid	5.77 ± 0.46	6.77 ± 0.46	7.52 ± 0.16	7.54 ± 0.61
灰分 Ash	3.66 ± 0.06 ^b	3.48 ± 0.05 ^{ab}	3.36 ± 0.06 ^a	3.29 ± 0.06 ^a

表中数据表示为平均值±标准误 (n=3), 同行数值不同上标英文字母表示差异显著 (P < 0.05)。Data presented are Means ± SE (n=3), Values in the same row with different superscript letters are significantly different (P < 0.05).

养殖实验结束后, 各组间全鱼水分, 蛋白和脂肪含量没有显著差异 (P>0.05); 叶黄素和螺旋藻加溶血卵磷脂组灰分含量显著低于对照组 (P>0.05) (表 3)。

2.3 鱼体体色和皮肤色素含量

养殖试验结束后, 实验鱼体表颜色测量结果如表 4 所示, 各组间实验鱼皮肤亮度没有显著性差异 (P>0.05); 螺旋藻和螺旋藻加溶血卵磷脂组皮肤黄度显著高于另外两组 (P<0.05); 同时, 螺旋藻和螺旋藻加溶血卵磷脂组背部皮肤红度显著高于对照组 (P<0.05); 螺旋藻加溶血卵磷脂组腹部皮肤红度显著高于对照组 (P<0.05); 螺旋藻和螺旋藻加溶血卵磷脂组实验鱼皮肤颜色饱和度显著高于另外两组 (P<0.05)。养殖初期, 对照组饲料养殖 20 天和后期不同饲料养殖 35 天后实验鱼照片如图 1 示。

表 4. 不同实验饲料对黄颡鱼皮肤的颜色影响
Tab.4 Body color of yellow catfish fed different experimental diets

		Con	SP	Lut	SPL
背部皮肤 Dorsal skin	亮度 L	38.92 ± 1.36	40.01 ± 1.48	40.57 ± 1.43	38.85 ± 1.93
	红度 a*	-2.56 ± 0.23 ^b	-3.22 ± 0.33 ^a	-3.42 ± 0.19 ^{ab}	-3.69 ± 0.26 ^a
	黄度 b*	5.42 ± 0.43 ^a	7.07 ± 0.78 ^b	8.95 ± 0.48 ^a	9.37 ± 0.77 ^b
	饱和度 C	5.91 ± 0.49 ^a	9.60 ± 0.48 ^b	7.31 ± 0.70 ^a	10.45 ± 0.8 ^b
腹部皮肤 Abdominal skin	亮度 L	83.69 ± 0.36	83.07 ± 0.28	82.86 ± 0.32	82.85 ± 0.31
	红度 a*	-7.22 ± 0.24 ^b	-7.81 ± 0.35 ^{ab}	-7.86 ± 0.25 ^{ab}	-8.53 ± 0.36 ^a
	黄度 b*	13.69 ± 0.90 ^a	17.68 ± 0.86 ^c	22.46 ± 1.72 ^b	24.43 ± 0.69 ^c
	饱和度 C	15.51 ± 0.85 ^a	26.16 ± 1.11 ^c	19.34 ± 0.91 ^b	25.18 ± 0.99 ^c

表中数据表示为平均值±标准误(n=9), 同行数值不同上标英文字母表示差异显著 (P < 0.05)。Data presented are Means ± SE (n=9), Values in the same row with different superscript letters are significantly different (P < 0.05).

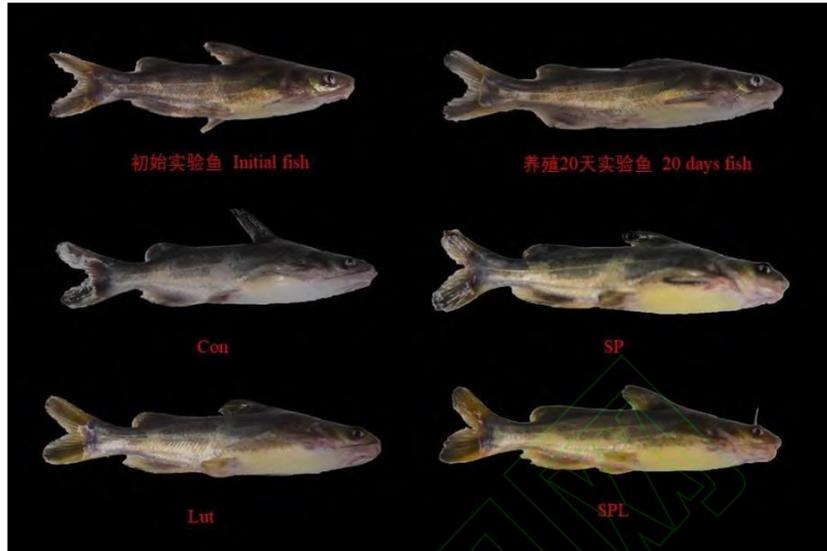


图1 不同养殖阶段和不同处理组的实验鱼 (Con: 对照组, 不添加色素; SP: 添加 2% 螺旋藻; Lut: 添加 0.2% 叶黄素; SPL: 添加添加 2% 螺旋藻和 0.1%溶血卵磷脂)
 Fig.1 The fish of different stage and different treatment groups. (Con: without pigments; SP: 2% *A. platensis*; Lut: 0.2% lutein; SPL: 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids)

对照饲料养殖 20 天和各处理组实验鱼背部皮肤叶黄素含量没有显著性差异 ($P>0.05$) (表 5); 螺旋藻和螺旋藻加溶血卵磷脂组腹部皮肤叶黄素含量显著高于对照组 ($P<0.05$)。

表 5 不同实验饲料对黄颡鱼皮肤叶黄素含量的影响 ($\mu\text{g/g}$)

Tab.5 Effects of different diets on skin lutein contents of yellow catfish ($\mu\text{g/g}$)

	20d	Con	SP	Lut	SPL
背部皮肤 Dorsal skin	15.03 \pm 1.88	16.90 \pm 0.91	18.27 \pm 0.50	17.31 \pm 1.30	16.70 \pm 0.99
腹部皮肤 Abdominal skin	13.32 \pm 1.39 ^a	13.16 \pm 1.42 ^a	18.65 \pm 0.78 ^b	15.98 \pm 1.38 ^{ab}	18.10 \pm 1.64 ^b

表中数据表示为平均值 \pm 标准误($n=6$)，同行数值不同上标英文字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。Data presented are Means \pm SE ($n=6$), Values in the same row with different superscript letters are significantly different ($P < 0.05$).

2.4 血液抗氧化指标和攻毒后存活率

养殖实验结束后，对照组超氧化物歧化酶 (SOD) 活性显著低于另外三个处理组 ($P<0.05$) (表 6); 各组过氧化氢酶 (CAT) 活性没有显著性差异 ($P>0.05$); 螺旋藻加溶血卵磷脂组谷胱甘肽过氧化物酶 (GPX) 活性和还原型谷胱甘肽 (GSH) 含量显著高于叶黄素和对照组 ($P<0.05$); 螺旋藻和螺旋藻加溶血卵磷脂组的丙二醛 (MDA) 含量显著低于另外两个处理组 ($P<0.05$)。

表 6 不同实验饲料对黄颡鱼血浆抗氧化产物和抗氧化酶活性的影响

Tab.6 Effects of different diets on oxidant and antioxidant activities in the plasma of yellow catfish

	Con	SP	Lut	SPL
超氧化物歧化酶 SOD (U/ml)	9.29 ± 1.21 ^a	14.97 ± 0.93 ^b	13.48 ± 1.24 ^b	13.84 ± 1.72 ^b
过氧化氢酶 CAT (U/ml)	30.38 ± 1.89	31.39 ± 1.99	31.81 ± 1.63	33.62 ± 0.83
谷胱甘肽过氧化物酶 GPX (U/ml)	38.78 ± 1.82 ^a	44.64 ± 3.30 ^{ab}	41.46 ± 3.83 ^a	53.66 ± 3.01 ^b
还原型谷胱甘肽 GSH (μmol/L)	15.13 ± 1.56 ^a	20.85 ± 2.08 ^{ab}	16.78 ± 1.64 ^a	25.33 ± 2.17 ^b
丙二醛 MDA (μmol/L)	5.96 ± 0.42 ^b	4.51 ± 0.40 ^a	6.81 ± 0.59 ^b	4.59 ± 0.29 ^a

表中数据表示为平均值±标准误(n=6)，同行数值不同上标英文字母表示差异显著 (P < 0.05)。Data presented are Means ± SE (n=6), Values in the same row with different superscript letters are significantly different (P < 0.05).

嗜水气单胞菌攻毒后各处理组实验鱼的累计存活率如图 2 所示，攻毒 96h 后螺旋藻和螺旋藻加溶血卵磷脂组的实验鱼累计存活率显著高于叶黄素和对照组 (P<0.05)。

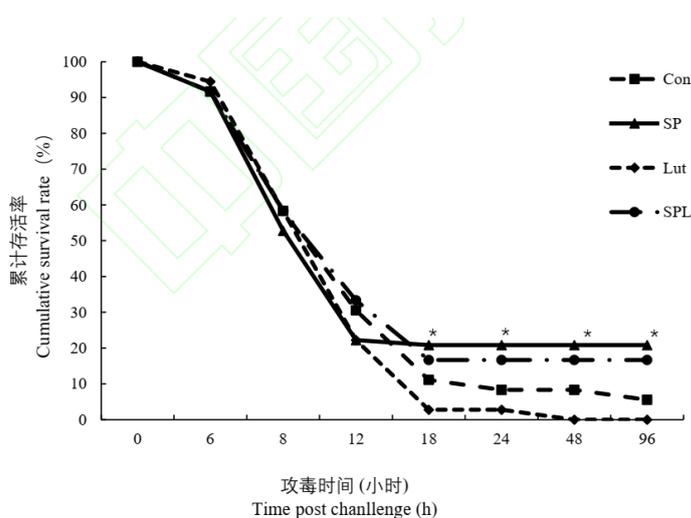


图 2 不同处理组对黄颡鱼攻毒后 96 小时累计存活率的影响。每个数值为三个重复的平均值 (n=12)。标记有*表示该实验组与对照组在某一时间具有显著性差异 (P < 0.05)。

Fig.2 The cumulative survival rate (%) of yellow catfish fed with different diets challenging with *A. hydrophila* for 96 h. Each datum represents the mean of three replicates (n=12). Markers assigned with * mean significantly difference between experimental groups and the control group at a specific sampling time (P < 0.05).

3 讨论

本研究前期使用不补充任何色素添加剂的对照组饲料投喂杂交黄颡鱼，20 天后各个处理间的实验鱼体重没有统计学差异。在后期 35 天用对照组饲料以及分别添加叶黄素、螺旋藻和螺旋藻加溶血卵磷脂的饲料继续投喂杂交黄颡鱼，对杂交黄颡鱼生长和摄

食率的影响并不显著,但造成饲料效率和蛋白沉积率的差异。螺旋藻作为新型水产动物饲料原料已经引起了较高的关注,在里海褐鲌 (*Salmo trutta caspius*) 饲料中添加 2.64% 的螺旋藻替代 2% 的鱼粉对鱼体的生长和饲料利用均无显著影响,但当添加量达到 3.96% 替代 4% 的鱼粉时,实验鱼的特定生长率和饲料转化效率显著提高^[15],说明螺旋藻可以替代水产动物饲料中的鱼粉,从而减轻鱼粉供不应求的压力。饲料中可以添加螺旋藻的含量高达 75% 对尼罗罗非鱼的生长没有负面影响,而且添加量在 30% 左右时,鱼体的生长达到最大值^[16]。有学者报道螺旋藻能够改善动物肠道微生物平衡,从而促进食物消化吸收,最终提高动物的生长^[4,5]。卵磷脂可以提高饲料转化率,促进脂质的吸收和转运,提高鱼类对脂肪和其他营养物质的消化吸收^[17]。在本研究中,饲料中添加 0.1% 的溶血卵磷脂能显著提高杂交黄颡鱼的饲料效率,于本研究结果一致的是在异育银鲫饲料中添加 0.1% 的溶血卵磷脂同样能提高异育银鲫的饲料效率^[7]。在对建鲤 (*Cyprinus carpio* var. Jian) 的研究中发现,添加 0.1% 的乳化剂溶血卵磷脂实验鱼的饲料效率相比于对照组显著提高 17.9%^[18],相似的是本研究中添加 0.1% 溶血卵磷脂相比于只添加 2% 的螺旋藻处理组,黄颡鱼的饲料效率显著提升 30.3%。叶黄素是家禽和水产饲料中常用的着色剂,较多的研究结果显示其对动物的生长没有明显的促进作用^[19,20],这与本研究结果一致。

在本研究中,叶黄素、螺旋藻和溶血卵磷脂的添加对杂交黄颡鱼的体蛋白和体脂肪均无显著影响,这与在淡水虾 (*Macrobrachium rosenbergii*)^[21],尼罗罗非鱼^[22,23]和奥尼罗非鱼 (*Oreochromis aureus* ♂×*Oreochromis niloticus* ♀)^[24] 中的研究结果一致。但之前研究表明添加 28.79% 的螺旋藻能够降低鱼体的脂肪含量^[25],是因为螺旋藻富含一种具有抗氧化和降脂功能的多酚类物质^[26,27,28]。此外,螺旋藻富含多不饱和脂肪酸,能够降低胆固醇和甘油三酯在鱼体肝脏中的大量堆积,从而降低体脂的含量^[29]。

鱼类的体色是影响其品质的重要因素之一,直接影响养殖鱼类的价格和消费者的选择。野生黄颡鱼体表颜色为黄黑相间的黄褐色,但在人工养殖过程中,配合饲料中营养物质含量,色素的缺乏以及养殖环境和鱼体自身的健康状况均会对鱼类的体色造成影响^[30]。在本研究中,前期由于饲料中缺乏色素的补充造成杂交黄颡鱼体色退化,在后期饲料中添加叶黄素,螺旋藻及溶血卵磷脂对杂交黄颡鱼皮肤的亮度没有影响,但可以增加鱼体皮肤的黄度,红度和饱和度,其中螺旋藻的提升效果更为显著,说明螺旋藻能够更快捷的改善鱼体体色,提高水产动物的品质,从而增加水产品的价值。螺旋藻作为天然

的类胡萝卜素来源,在其他研究中也得到证实能够增强鱼体的体色和肉色^[31,32]。叶黄素同样能够改善鱼类的体色,在饲料中添加叶黄素和虾青素混合物能够增强大黄鱼皮肤的黄度值,改善鱼体的体色^[33]。但本研究的结果表明,在杂交黄颡鱼的体色异常的情况下,饲料中添加螺旋藻能够比叶黄素更高效的改善鱼体的体色。与对照组相比,螺旋藻饲料中添加溶血卵磷脂能够显著改善鱼体的体色,但与只添加螺旋藻的处理组相比,差异并不显著。

在饲料中添加螺旋藻以及溶血卵磷脂,杂交黄颡鱼腹部皮肤叶黄素的含量显著高于对照组,添加叶黄素也能够增加腹部皮肤的叶黄素含量,但效果并不显著。在本研究中,虽然叶黄素饲料中的叶黄素含量高于螺旋藻饲料,但最终叶黄素在杂交黄颡鱼皮肤中的沉积量却相反,可能是由于螺旋藻饲料中叶黄素更易被鱼体吸收。在沙鳅(*Botia dario*)的研究中发现,饲料中添加 10%的螺旋藻可以显著增加鱼体皮肤和肌肉中的类胡萝卜素含量^[34]。叶黄素属于脂溶性类胡萝卜素,和其他类胡萝卜素一样,鱼体不能自身合成,必须从食物中获取^[35]。叶黄素在动物体内的转运吸收,需要脂质的参与,最终由高密度脂蛋白(HDL)和低密度脂蛋白(LDL)转运到靶组织中^[36]。溶血卵磷脂是一种生物乳化剂,能够有效促进乳糜微粒的形成,增强脂肪的吸收和利用,进而有助于叶黄素的吸收和转运^[24]。

近年来,螺旋藻在水产养殖中的应用不只是作为鱼粉的替代源,同时作为一种功能型添加剂越来越受关注。螺旋藻因其富含藻蓝蛋白,类胡萝卜素和藻多糖等生物活性物质,能够增强抗氧化酶的活性,防止脂质过氧化和 DNA 损伤,清除自由基^[37]。在本研究中,饲料中添加螺旋藻能够增强杂交黄颡鱼血浆超氧化物歧化酶(SOD)和谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)活性,同时增加还原型谷胱甘肽(GSH)含量,降低脂质过氧化产物丙二醛(MDA)含量。与本研究一致,螺旋藻能够显著提高罗非鱼 GSH 含量,GPX 和 SOD 活性降低的现象,通过清除自由基和提高鱼体的抗氧化性能使溴氰菊酯对鱼体的毒性最小化^[37]。同时,在石斑鱼(*Plectropomus leopardus*)的饲料中添加螺旋藻能够显著增强鱼体的总抗氧化能力(T-AOC),降低丙二醛的含量,显著提高鱼体感染哈维氏弧菌(*V. harveyi*)后的存活率^[38]。此外,研究表明鱼体的抗氧化状态和鱼体体色具有相关性,虹鳟肝脏的非酶和酶抗氧化反应都与皮肤和肌肉的红度值显著相关^[39],同样在本研究中抗氧化能力高的实验鱼相对应黄度值也显著提高,说明提高鱼体的抗氧化能力同时可以促进鱼体着色。在本文中,螺旋藻能够显著提高杂交黄颡鱼感染嗜水气单胞菌

后的存活率，提高鱼体对病菌的抵抗能力。这些结果表明螺旋藻可以作为水产动物的免疫增强剂。在饲料中添加叶黄素和虾青素等比例混合物，能够增强大黄鱼的总抗氧化能力，SOD 和 CAT（过氧化氢酶）活性，降低 MDA 含量，说明饲料中添加螺旋藻能够增强鱼体抗氧化能力^[33]。此外，叶黄素能够提高金鱼（*Carassius auratus*）幼鱼养殖中的存活率^[40]，这与本研究中的结果相似。

4 结论

在本研究中，饲料中添加 0.2%叶黄素、2%螺旋藻以及复合添加 2%螺旋藻和 0.1%的溶血磷脂对杂交黄颡鱼幼鱼的生长没有负面影响，并且可以增加饲料效率和蛋白沉积率；叶黄素，螺旋藻和溶血卵磷脂的添加对杂交黄颡鱼鱼体水分，蛋白和脂肪含量没有影响；饲料中添加 2%螺旋藻以及复合添加 2%螺旋藻和 0.1%的溶血磷脂可以增加杂交黄颡鱼皮肤的黄度，红度和饱和度以及杂交黄颡鱼皮肤中叶黄素含量，同时可以增强杂交黄颡鱼抗氧化能力，降低鱼体血浆中丙二醛含量。此外叶黄素，螺旋藻和溶血卵磷脂的添加均可以提高杂交黄颡鱼感染嗜水气单胞菌后的存活率，但螺旋藻添加组的效果更为显著。综上所述，杂交黄颡鱼“黄优一号”在前期投喂缺乏色素的饲料造成体色异常后，饲料中添加螺旋藻或配合添加溶血卵磷脂比叶黄素更有效的改善鱼体的体色，同时更能提高黄颡鱼的抗氧化能力和抗病力。

参考文献：略

原文刊登在（水生生物学报录用定稿）网络首发时间: 2020-09-22 11:10:26

饲料中蛋白水平对三疣梭子蟹雌体生长、卵巢发育和生化组成的影响

何先林 柳梅梅 朱筛成 董志国 万夕和 吴旭干

上海海洋大学农业农村部鱼类营养和环境生态研究中心 江苏海洋大学海洋学院 江苏省海洋水产研究所 上海海洋大学上海水产养殖工程技术研究中心 上海海洋大学水产科学国家级实验教学示范中心

摘要：本实验配制蛋白水平分别为 32.16%、36.13%、39.59%和 41.24%的等脂等能配合饲料(分别记为饲料 1#~4#)进行池塘养殖三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)，初始平均体重为(10.98±0.28) g 雌体 120 d，以探究饲料蛋白水平对三疣梭子蟹雌体生长、卵巢发育和生化组成的影响。结果显示，饲料蛋白水平对池塘养殖条件下雌体的生长无显著影响；饲料 3#组雌体的卵巢指数和总可食率均最高(P<0.05)；饲料 4#组卵巢中粗蛋白含量最高(P<0.05)，饲料 3#组和饲料 4#组的肝胰腺粗蛋白含量显

著高于饲料 1#组和饲料 2#组($P<0.05$), 而肌肉中的粗蛋白含量则在饲料 1#组和饲料 3#组中较高($P<0.05$); 卵巢中的总脂含量随着饲料蛋白水平的增加呈上升趋势($P<0.05$), 肝胰腺和肌肉中总脂含量均在饲料 1#组中最高而饲料 2#组中最低($P<0.05$)。饲料 1#组和饲料 3#组肌肉中的总必需氨基酸(Σ EAA)和总非必需氨基酸(Σ NEAA)均显著高于另外 2 组($P<0.05$)。综上所述, 在本实验条件下, 三疣梭子蟹雌体体育肥饲料中适宜的蛋白水平约为 40.16%。研究表明, 适宜的饲料蛋白水平可以提高三疣梭子蟹的卵巢发育和肌肉的营养品质; 为池塘养殖三疣梭子蟹配合饲料提供参考。

关键词: 三疣梭子蟹; 蛋白水平; 卵巢发育; 生化组成;

Effects of dietary protein levels on the growth, ovarian development and biochemical composition of the swimming crab(*Portunus trituberculatus*)

HE Xianlin LIU Meimei ZHU Shaicheng DONG Zhiguo WAN Xihe WU Xugan

Center for Fish Nutrition and Environmental Ecology, Ministry of Agriculture and Villages, Shanghai Ocean University Key Laboratory of Marine Biotechnology of Jiangsu Province, Jiangsu Ocean University Jiangsu Marine Fisheries Research Institute Shanghai Aquaculture Engineering Research Center, Shanghai Ocean University National Experimental Teaching Demonstration Center of Aquatic Science, Shanghai Ocean University

Abstract: The study was designed to investigate the effects of dietary protein levels on the growth, ovarian development, and biochemical composition of the swimming crab *Portunus trituberculatus* (initial body weight of 10.98 ± 0.28 g). Four experimental diets, which were isoenergetic and islipidic, were formulated to contain different protein levels (30%, 34%, 38%, and 42%, defined as diets 1~4, respectively). These diets were fed to pond-reared *P. trituberculatus* females for a 120-day culture experiment. The results showed that: The dietary protein levels had no significant influence on the growth of pond-reared *P. trituberculatus* females. Diet 3 had the highest gonadosomatic index (GSI) and total edible yield (TEY). The crude protein contents in the ovary and hepatopancreas increased significantly with the increasing dietary protein ($P<0.05$). Among the four treatments, diets 1 and 3 had the highest crude protein contents in the muscles ($P<0.05$). Similarly, an increasing trend was found for the total lipid contents in the ovary with the increasing levels of dietary protein ($P<0.05$). Diet 1 had the highest total lipid contents in the hepatopancreas and muscles, while the lowest total lipid content was found for diet 2 ($P<0.05$). The contents of total essential amino acids (Σ EAA) and non-essential amino acids (Σ NEAA) in the muscles of diets 1 and 3

were significantly higher than those of the other two treatments ($P < 0.05$). These results indicate that the appropriate protein level in the diet of adult *P. trituberculatus* females is approximately 40.16%. The results show that an appropriate dietary protein level could improve ovarian development and muscle nutrition, which provides a reference for the formulation of a diet for *P. trituberculatus* inhabiting a pond.

Keyword : *Portunus trituberculatus*; Dietary protein levels; Ovarian development; Biochemical composition;

三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)广泛分布于东亚沿海, 是我国沿海重要的养殖经济蟹类, 目前, 在江苏、浙江和福建等地广泛养殖(Dong et al, 2010; 环朋朋等, 2019), 2018 年池塘养殖产量达到 116251 t (农业农村部渔业渔政管理局, 2019)。目前, 我国三疣梭子蟹池塘养殖主要依靠大量投喂冰鲜杂鱼和低值贝类等, 这种投喂模式容易引起池塘水质恶化、病害爆发, 从而导致养殖效果和商品蟹品质不稳定, 影响产业健康发展(Wu et al, 2010); 另一方面, 大量投喂冰鲜杂鱼给海洋资源保护带来了巨大压力, 导致渔业资源的过度捕捞和利用(Cao et al, 2015)。因此, 研发高效实用的专用配合饲料势在必行。

确定和优化主要营养参数是研发配合饲料的重要前提, 其中, 蛋白质是最重要的营养参数之一, 是影响水产动物生长的关键营养成分, 其对于维持水生动物生长发育和维持机体正常生命活动具有重要意义(麦康森, 2011)。饲料蛋白水平和质量不仅直接影响养殖效果, 且影响饲料配方成本和养殖成本, 当饲料中的蛋白质不足时会导致生长减缓或停止, 而摄入过高的蛋白饲料是有害的, 如果消耗了太多的蛋白质, 只有一部分可以用来产生新的蛋白质, 其余的蛋白质将转化为能量, 这将增加饲料成本和氮的排泄(Bai et al, 2016; 公绪鹏等, 2018)。有关三疣梭子蟹的蛋白营养研究近年来日益受到重视, Huo 等(2014)以初始体重为(3.75±0.20) g 的三疣梭子蟹幼蟹为研究对象养殖 8 周, 结果表明, 饲料蛋白质和脂类水平对躯体粗蛋白、粗脂肪、水分含量和肌肉氨基酸分布有显著影响, 51%蛋白水平和 5%脂质水平的饲料最适三疣梭子蟹幼蟹生长; Jin 等(2013)以初始体重为(2.50±0.08) g 的三疣梭子蟹幼蟹为研究对象养殖 8 周, 结果表明, 饲料蛋白对增重率、饲料系数和蛋白质效率均有显著影响, 在 50.2%饲料蛋白水平下获得最大增重率和特定生长率。这些研究主要集中于幼蟹阶段, 且主要在室内循环水养殖系统中进

行研究。实际上,我国三疣梭子蟹养殖主要在池塘养殖条件下进行,且养殖中后期的饲料用量远远大于养殖前期。迄今为止,有关三疣梭子蟹在室外池塘条件下,适宜的饲料蛋白含量研究较少,这不利于其配合饲料的开发。

因此,本研究在室外池塘条件下,采用不同蛋白水平的等能等脂配合饲料投喂三疣梭子蟹 120 d,比较了饲料蛋白水平对三疣梭子蟹生长、卵巢发育和生化组成的影响,以期三疣梭子蟹的配合饲料配制提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 实验饲料配制

根据先前对三疣梭子蟹的研究(段青源等, 2011),设计 4 种不同蛋白水平的实验饲料,以鱼粉、豆粕和菜粕等为主要蛋白源,以鱼油、猪油和豆油为主要脂肪源,采用面粉和纤维素调节饲料总能水平,使得 4 组饲料中的粗蛋白水平不同,但总脂和总能水平基本一致,分别记为饲料 1#~饲料 4#。饲料配制前,所有饲料原料均粉碎后过 60 目筛,按照表 1 的饲料配方利用混合机混合均匀,然后用双螺旋小型膨化机挤压成沉性膨化饲料(DSD30 试验机,济南鼎润机械设备有限公司)粒径分为 1.6 mm(养殖实验 0~60 d 采用)和 3.5 mm(养殖实验 61~120 d 采用)。所有实验饲料制粒后在室温中冷却风干后-20℃冰箱中保存备用。饲料中生化成分测定方法见 1.4,表 2 为饲料中常规营养成分、能量和氨基酸含量。

表 1 实验 4 种饲料配方(%)
Tab.1 Formulations of four experimental diets (%)

原料 Ingredients	饲料 1#D 1#	饲料 2#D 2#	饲料 3#D 3#	饲料 4#D 4#
豆粕-46% Soybean meal	12.00	13.00	14.00	15.00
菜粕-36% Rapeseed meal	8.00	10.00	12.00	14.00
酪蛋白 Casein	2.60	3.60	4.60	5.60
鱼粉 Fish meal	14.00	18.00	22.00	26.00
乌贼膏 Squid paste	5.00	5.00	5.00	5.00
虾膏 Shrimp paste	4.00	4.00	4.00	4.00
啤酒酵母粉 Yeast meal	2.00	2.00	2.00	2.00

南极磷虾粉 Antarctic krill meal	4.00	4.00	4.00	4.00
高筋面粉 Wheat flour	28.00	22.00	16.00	10.00
微晶纤维素 Cellulose	6.50	4.30	2.10	0.00
膨润土 Bentonite	0.50	1.00	1.50	1.90
多维预混料 ¹ Vitamin premix ¹	0.80	0.80	0.80	0.80
多矿预混料 ² Mineral premix ²	2.50	2.50	2.50	2.50
氯化胆碱(60%)Choline chloride (60%)	0.50	0.50	0.50	0.50
甜菜碱 Betaine	0.15	0.15	0.15	0.15
牛磺酸 Taurine	0.30	0.30	0.30	0.30
精炼鱼油 Fish oil	2.60	2.30	2.00	1.70
猪油 Lard	2.00	2.00	2.00	2.00
豆油 Soybean oil	1.80	1.80	1.80	1.80
磷脂油 Lecithin	2.00	2.00	2.00	2.00

注：1. 维生素预混料(mg/kg 饲料)：维生素 A，125；维生素 D₃，30；维生素 E，1300；维生素 K₃，35.4；维生素 B₁，100；维生素 B₂，150；维生素 B₆，150；维生素 B₁₂，0.2；维生素 C，1225；生物素，4；D-泛酸钙，250；叶酸，25；烟酰胺，3002. 矿物质预混料(mg/kg 饲料)：一水硫酸亚铁，200；五水硫酸铜，96；一水硫酸锌，360；一水硫酸锰，120；一水硫酸镁，240；磷酸二氢钾，4200；磷酸二氢钠，500；碘化钾，5.4；六水氯化钴，2.1；亚硒酸钠，3；磷酸二氢钙，15000；六水氯化钴，2.1；亚硒酸钠，3

Note: 1. Vitamin mixture(mg/kg diet): retinol acetate, 125; cholecalciferol, 30; alpha-tocopherol, 1300; menadione, 35.4; thiamine, 100; riboflavin, 150; Vitamin B₆, 150; vitamin B₁₂, 0.2; Vitamin C, 1225; biotin, 4; D - calcium pantothenate, 250; folic acid, 25; nicotinamide, 3002. Mineral mixture(mg/kg diet): FeSO₄·H₂O, 200; CuSO₄·5H₂O, 96; ZnSO₄·H₂O, 360; MnSO₄·H₂O, 120; MgSO₄·H₂O, 240; KH₂PO₄, 4200; NaH₂PO₄, 500; KI, 5.4; CoCl₂·6H₂O, 2.1; Na₂SeO₃, 3; Ca(H₂PO₄)₂, 15000; CoCl₂·6H₂O, 2.1; Na₂SeO₃, 3

表 2 实验饲料常规营养成分、能量及氨基酸组成(%，干重)

Tab.2 Proximate composition, energy and amino acid composition of experimental diets (%，Dry weight)

项目 Items	饲料 1#D 1#	饲料 2#D 2#	饲料 3#D 3#	饲料 4#D 4#
常规营养成分 Proximate nutritional composition (%)				
水分 Moisture	11.87	12.98	11.92	10.25
粗蛋白 Crude protein	32.16	36.13	39.59	41.24
总脂 Total lipid	15.17	15.24	16.32	16.58
灰分 Ash	9.69	11.10	12.05	13.29
能量 Energy (kJ/g) ¹	18.51	18.33	18.77	19.00
氨基酸含量(mg/g) Amino acid composition (mg/g)				
异亮氨酸 Ile	13.96	16.63	17.94	19.11
亮氨酸 Leu	23.89	28.97	31.16	32.31
赖氨酸 Lys	19.18	24.84	27.48	29.19
蛋氨酸 Met	6.69	8.48	9.14	9.30
苯丙氨酸 Phe	13.90	16.63	17.77	18.27
苏氨酸 Thr	12.25	15.16	16.63	17.38
色氨酸 Trp	4.21	4.92	5.41	5.83
缬氨酸 Val	15.38	18.70	20.15	22.01
精氨酸 Arg	18.21	22.12	24.18	25.35
组氨酸 His	9.08	11.85	12.60	13.70
Σ EAA ²	136.74	168.29	182.46	192.46
天门冬氨酸 Asp	28.08	34.51	37.86	39.78
丝氨酸 Ser	12.54	14.67	16.63	16.49
谷氨酸 Glu	59.12	67.93	70.56	70.31
甘氨酸 Gly	16.00	19.08	21.68	22.95
丙氨酸 Ala	16.85	20.16	22.59	23.90
半胱氨酸 Cys	3.52	4.35	6.30	6.69
酪氨酸 Tyr	10.04	12.55	13.45	14.43
脯氨酸 Pro	16.23	17.83	18.00	18.50
Σ NEAA ³	162.37	191.09	207.08	213.04

TAA ⁴	299.11	359.38	389.55	405.50
EAA/TAA	0.46	0.47	0.47	0.47

注：¹根据蛋白质、脂肪、碳水化合物的能量(23.01、38.07和17.15 kJ/g)计算饲料的能量(Anderson et al, 2003)；²∑EAA表示总必需氨基酸；³∑NEAA表示总非必需氨基酸；⁴TAA表示总氨基酸。Note: ¹Dietary energy was calculated based on the energy of protein, lipid and carbohydrate (23.01, 38.07 and 17.15 kJ/g); ²∑EAA means total essential amino acids; ³∑NEAA means total non-essential amino acids; ⁴TAA means total amino acids

1.2 实验用蟹的养殖管理

实验幼蟹购买于南通协通水产养殖有限公司池塘养殖的，挑选四肢健全，活力较好的三疣梭子蟹幼蟹用于实验，雌体平均体重为(10.98±0.28) g，雄体平均体重为(10.66±0.42) g。养殖实验在四周为水泥，池底为泥土的室外土池(长×宽×深=14 m×11 m×1.5 m)中进行，每个池塘放雌蟹120只，雄蟹60只。因为雌蟹经济效益较高，所以主要养殖雌体，雄蟹主要用于交配后促进雌体卵巢发育，以提供卵巢发育良好的膏蟹。本实验分为4个饲料组，每个饲料组设置3个重复池塘。

养殖期间，每日上午08:00和下午16:00投喂饲料，上午的投喂比例(投喂量占一天总投喂量的比例)约为30%，下午的投喂比例约为70%，日投喂约占蟹总体重的3%~5%。具体投喂量根据水温、天气和残饵情况适当调整。养殖期间每3 d测定一次水质指标，根据水质情况每次更换总水体1/3的水，养殖过程中水质指标维持在：pH 7.0~9.0；平均溶氧>4 mg/L；氨氮浓度<0.5 mg/L；亚硝酸盐浓度<0.15 mg/L。此外，养殖期间每15 d进行一次全池泼洒碘消毒制剂和微生态制剂(北京水世纪生物技术有限公司)，以保持良好的水质。每天根据溶解氧情况适时开启增氧机增氧。实验于7月下旬开始，到11月下旬结束实验，整个养殖周期共4个月。

1.3 样品采集和解剖

实验过程中每40 d打样称重一次，每个池塘随机采集10只左右雌体，精确称重后，用于计算平均体重、增重率(Weight gain rate, WGR)和特定增长率(Specific growth rate, SGR)。

各指标计算公式如下：

$$WGR(\%)=100\times(W_t-W_{t-1})/W_{t-1}$$

$$SGR(\%/d)=100\times(\ln W_t-\ln W_{t-1})/d$$

式中， W_t 、 W_{t-1} 分别为实验第 t 次打样的平均体重(g)和第 $t-1$ 打样的平均体重(g)， d 为养殖天数，即每次打样时间差。

本实验采集养殖第 120 天的样品用于组织系数和生化组成测定。采样前停食一天，随机从每口池塘采集 4 只生殖蜕壳后的雌蟹，用毛巾擦干体表水分后用电子天平(精确度 = 0.01 g)称重，用游标卡尺(精确度 = 0.02 mm)测量甲壳长和甲壳宽，然后进行活体解剖，取出每只雌蟹的肝胰腺和卵巢，精确称重后分别计算卵巢指数(Gonadosomatic index, GSI)和肝胰腺指数(Hepatosomatic index, HSI)。最后刮出腹部和步足中的所有肌肉，计算出肉率(Meat yield, MY)。采用公式计算总可食率(Total edible yield, TEY)和肥满度(Condition factor, CF)。所有的肝胰腺、卵巢和肌肉分别装入自封袋后，保存于 -40°C 冰箱中用于后续测定。各指标计算公式如下：

$$\text{GSI}(\%) = 100\% \times W_g / W$$

$$\text{HSI}(\%) = 100\% \times W_h / W$$

$$\text{MY}(\%) = 100\% \times W_m / W$$

$$\text{TEY}(\%) = \text{GSI} + \text{HSI} + \text{MY}$$

$$\text{CF} = W / L^3$$

式中， W_g 为终末性腺质量(g)， W_h 为终末肝胰腺质量(g)， W_m 为终末肌肉质量(g)， W 为三疣梭子蟹体质量(g)， L 为甲壳长(cm)。

1.4 生化成分分析

将每个池塘采集的 2 个雌体卵巢、肝胰腺和肌肉分别合并，采用冷冻干燥法冻干 48 h 测定三疣梭子蟹组织中的水分含量后用于后续生化分析；采用凯氏定氮法测定样品的粗蛋白含量(AOAC, 1995)；参考 [Folch 等\(1957\)](#)的方法，使用氯仿：甲醇(V/V=2：1)法测定和测定样品中的总脂含量(采用 550°C 灼烧法测定样品中的灰分含量(AOAC, 1995)；采用苯酚-硫酸法测定样品的总碳水化合物含量(AOAC, 1995)。采用盐酸水解法测定样品的总氨基酸组成([Blackburn et al, 1984](#))，色氨酸测定采用碱性水解法([Chen et al, 2007](#))，含硫氨基酸测定采用过氧甲酸水解法([Spindler et al, 1985](#))，水解后的样品均在氨基酸自动分析仪(S-433D, 德国 Sykam 公司)上进行定性和定量分析。饲料中水分含量测定参照 AOAC 的标准方法，而其他生化成分的分析均与组织中生化成分测定的方法相同。

1.5 数据分析

所有实验数据均采用平均值 \pm 标准差(Mean \pm SD)表示，采用 SPSS 22.0 软件对实验数

据进行统计分析。采用 Levene 法对所有数据进行方差齐性检验，当不满足齐性方差时对百分比数据进行反正弦或平方根处理。采用 ANOVA 对实验结果进行方差分析，采用 Duncan 氏法进行多重比较，取 $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 饲料蛋白水平对三疣梭子蟹雌体生长、卵巢发育和可食率的影响

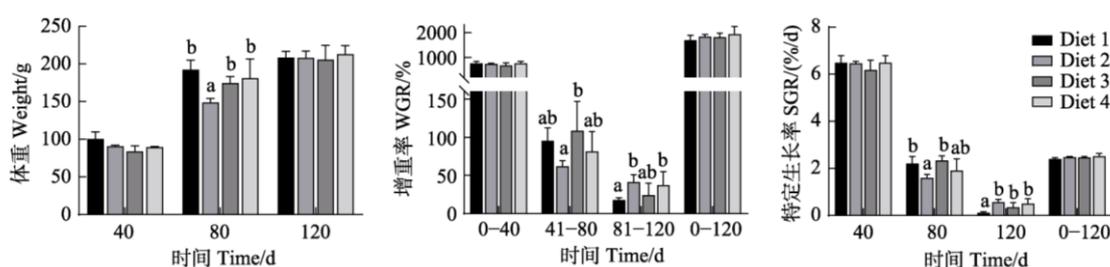


图 1 饲料蛋白水平对三疣梭子蟹雌体生长影响

Fig.1 Effects of dietary protein levels on growth of female *P. trituberculatus*

表 3 饲料蛋白水平对三疣梭子蟹雌体卵巢发育和可食率的影响(n=3)

Tab.3 Effects of dietary protein levels on ovarian development and edible yield of female adult *P. trituberculatus*(n=3)

项目 Items	饲料 1# Diet 1#	饲料 2# Diet 2#	饲料 3# Diet 3#	饲料 4# Diet 4#
卵巢指数 GSI (%)	2.70±0.67 ^a	2.38±0.37 ^a	4.49±1.22 ^b	3.57±1.01 ^b
肝胰腺指数 HSI (%)	8.54±0.80	6.39±0.63	8.90±0.84	7.52±0.32
出肉率 MY (%)	29.40±0.24	27.47±1.89	28.57±1.65	28.53±1.97
总可食率 TEY (%)	40.40±1.47 ^{ab}	35.23±2.00 ^a	42.84±3.21 ^b	39.52±2.40 ^{ab}
饱满度 CF	0.53±0.02	0.56±0.01	0.53±0.01	0.55±0.04

注:实验数据为 $X \pm SD$; 同行数据不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)Notes: The data were presented as $X \pm SD$; values within the same row with different letters mean significant difference ($P < 0.05$)

2.2 饲料蛋白水平对三疣梭子蟹雌体组织中常规生化组成的影响

饲料蛋白水平对三疣梭子蟹组织的常规生化组成的影响如表 4 所示。就水分而言，饲料 1#组的卵巢中含量最高($P < 0.05$)，饲料 2#组的肝胰腺中含量最高($P < 0.05$)，而肌肉中无显著变化($P > 0.05$)；就粗蛋白而言，饲料 4#组的卵巢中含量最高($P < 0.05$)，肝胰腺中饲料 3#组和饲料 4#组显著高于饲料 1#组和饲料 2#组($P < 0.05$)，肌肉中的粗蛋白的含量则是饲料 1#组和饲料 3#组显著高于另外两组($P < 0.05$)；就总脂而言，卵巢中的含量随着蛋白水平的增加呈上升趋势($P < 0.05$)，而肝胰腺和肌肉中的含量均在饲料 1#组中最高，饲料 2#组中最低($P < 0.05$)；就总碳水化合物而言，卵巢和肝胰腺中的含量均在饲料 3#组中

最高(P>0.05), 肌肉中的含量在饲料 1#组最高(P<0.05)。

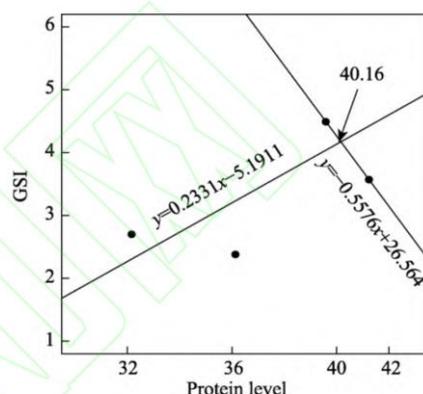


图 2 饲料中不同蛋白对三疣梭子蟹雌体肝胰腺指数的折线模型分析

Fig.2 Broken-line model analysis of the relationship of gonadosomatic index with dietary protein levels of female adult *P. trituberculatus*

表 4 饲料蛋白水平对三疣梭子蟹雌体组织中常规生化组成的影响 (%，湿重) (n=3)

Tab.4 Effects of dietary protein levels on proximate composition of female adult *P. trituberculatus* (%，Wet weight) (n=3)

项目 Items	饲料 1# Diet 1#	饲料 2# Diet 2#	饲料 3# Diet 3#	饲料 4# Diet 4#
卵巢 Ovary				
水分 Moisture	67.94±1.67 ^b	54.87±5.83 ^a	54.08±1.03 ^a	54.53±0.75 ^a
粗蛋白 Crude protein	20.49±0.53 ^a	20.24±1.18 ^a	25.54±0.69 ^b	29.05±0.23 ^c
总脂 Total lipid	7.88±0.65 ^a	7.78±0.33 ^a	10.99±1.41 ^b	12.89±0.37 ^c
总碳水化合物 Total carbohydrate	0.72±0.03 ^a	0.78±0.14 ^{ab}	0.98±0.19 ^b	0.92±0.02 ^{ab}
肝胰腺 Hepatopancreas				
水分 Moisture	65.59±5.98 ^a	74.05±4.76 ^b	63.58±1.05 ^a	67.33±0.05 ^a
粗蛋白 Crude protein	10.25±0.33 ^a	10.56±1.11 ^a	14.07±1.54 ^b	13.24±0.17 ^b
总脂 Total lipid	18.00±2.92 ^c	10.46±0.42 ^a	16.17±1.46 ^b	14.07±0.09 ^b
总碳水化合物 Total carbohydrate	1.72±0.22 ^b	1.19±0.12 ^a	1.73±0.23 ^b	0.91±0.09 ^a
肌肉 Muscle				
水分 Moisture	82.91±2.08	86.18±1.03	82.46±5.79	85.06±2.81
粗蛋白 Crude protein	14.32±0.38 ^c	10.61±0.33 ^a	13.74±1.38 ^c	12.32±1.46 ^{ab}
总脂 Total lipid	0.94±0.09 ^b	0.64±0.05 ^a	0.83±0.15 ^{ab}	0.89±0.13 ^b
总碳水化合物 Total carbohydrate	0.74±0.15 ^c	0.36±0.02 ^a	0.55±0.04 ^b	0.47±0.05 ^{ab}

注：实验数据为 Mean±SD；同行数据不同小写字母表示差异显著(P<0.05)Notes: The data were presented as Mean±SD; values within the same row with different letters mean significant difference (P<0.05)

2.3 饲料蛋白水平对三疣梭子蟹雌体肌肉中氨基酸组成的影响

饲料蛋白水平对三疣梭子蟹肌肉的氨基酸组成的影响如表 5 所示。肌肉中检测出 18 种氨基酸,其中人体必需氨基酸(EAA)10 种;赖氨酸和亮氨酸含量相对较高(>9 mg/g), 苏氨酸和缬氨酸含量相对较低(<2 mg/g), 其中, 饲料 1#组和饲料 3#组中的异亮氨酸、亮氨酸、赖氨酸、蛋氨酸、苯丙氨酸、半胱氨酸、苏氨酸、色氨酸、缬氨酸和酪氨酸含量显著高于饲料 2#和饲料 4#组(P<0.05); 非必需氨基酸(NEAA)中除了丝氨酸和组氨酸含量相对较低(<5 mg/g), 其余含量均大于 8 mg/g。整体上, 饲料 1#组和饲料 3#组三疣梭子蟹肌肉中的总必需氨基酸(Σ EAA)和总的非必需氨基酸(Σ NEAA)含量显著高于饲料 2#和饲料 4#组(P<0.05)。

表 5 饲料蛋白水平对三疣梭子蟹雌体肌肉中氨基酸组成的影响(% , 湿重) (n=3)
Tab.5 Effects of dietary protein level on amino acid composition in muscle of female adult *P. trituberculatus* (% , Wet weight) (n=3)

项目 Items	饲料 1# Diet 1#	饲料 2# Diet 2#	饲料 3# Diet 3#	饲料 4# Diet 4#
氨基酸含量(mg/g, 湿重) Amino acid composition (mg/g, Wet weight)				
异亮氨酸 Ile	5.42±0.23 ^c	4.23±0.01 ^a	5.53±0.15 ^c	4.95±0.03 ^b
亮氨酸 Leu	9.30±0.00 ^c	7.15±0.00 ^a	9.56±0.01 ^d	8.30±0.00 ^b
赖氨酸 Lys	9.60±0.71 ^b	6.98±0.02 ^a	9.73±0.55 ^b	8.25±0.14 ^a
蛋氨酸 Met	3.50±0.15 ^c	2.70±0.04 ^a	3.65±0.19 ^c	3.08±0.02 ^b
苯丙氨酸 Phe	5.27±0.01 ^c	3.99±0.01 ^a	5.33±0.03 ^d	4.61±0.02 ^b
半胱氨酸 Cys	2.07±0.28 ^b	1.50±0.24 ^a	1.70±0.12 ^{ab}	1.75±0.06 ^{ab}
苏氨酸 Thr	5.34±0.16 ^c	4.05±0.01 ^a	5.45±0.06 ^c	4.70±0.05 ^b
色氨酸 Trp	1.45±0.02 ^c	1.07±0.02 ^a	1.45±0.03 ^c	1.27±0.05 ^b
缬氨酸 Val	5.64±0.05 ^c	4.45±0.10 ^a	5.82±0.31 ^c	5.17±0.05 ^b
酪氨酸 Tyr	5.02±0.04 ^c	3.75±0.11 ^a	4.93±0.05 ^c	4.32±0.11 ^b
Σ EAA ¹	52.60±0.80 ^c	39.87±0.12 ^a	53.15±0.56 ^c	46.39±0.04 ^b
天门冬氨酸 Asp	12.24±0.24 ^c	9.32±0.02 ^a	12.39±0.04 ^c	10.88±0.08 ^b
丝氨酸 Ser	4.97±0.24 ^c	3.78±0.00 ^a	5.00±0.26 ^c	4.37±0.03 ^b

谷氨酸 Glu	20.21±0.61 ^c	15.05±0.01 ^a	20.54±0.15 ^c	17.33±0.00 ^b
甘氨酸 Gly	9.47±0.32 ^c	7.59±0.02 ^a	8.87±0.03 ^b	8.73±0.07 ^b
丙氨酸 Ala	8.67±0.49 ^c	6.33±0.00 ^a	7.78±0.05 ^b	6.98±0.01 ^a
脯氨酸 Pro	8.26±0.36 ^b	6.15±0.10 ^a	6.71±0.59 ^a	5.99±0.02 ^a
精氨酸 Arg	12.47±0.20 ^d	9.53±0.02 ^a	11.96±0.01 ^c	10.56±0.10 ^b
组氨酸 His	3.15±0.12 ^b	2.39±0.01 ^a	3.33±0.01 ^c	2.84±0.10 ^b
∑NEAA ²	79.46±1.62 ^c	60.15±0.10 ^a	76.57±0.14 ^c	67.70±0.17 ^b
TAA ³	132.06±2.41 ^c	100.02±0.22 ^a	129.72±0.41 ^c	114.10±0.21 ^b
EAA/TAA	0.40±0.00	0.40±0.00	0.41±0.00	0.41±0.00

注：¹ ∑EAA 表示总必需氨基酸；² ∑NEAA 表示总非必需氨基酸；³ TAA 表示总氨基酸；实验数据为 Mean±SD；同行数据不同小写字母表示差异显著(P<0.05)Notes：¹ ∑EAA means total essential amino acids；² ∑NEAA means total non-essential amino acids；³ TAA means total amino acids.the date were presented as Mean±SD；values within the same row with different letters mean significant difference(P<0.05)

3 讨论

3.1 饲料蛋白水平对三疣梭子蟹雌体生长和卵巢发育的影响

蛋白质是动物体的主要组成物质之一，对其生长发育至关重要(Resources, 2011)。本研究结果表明，室外池塘养殖条件下，饲料中蛋白水平对雌体生长无显著影响，可能原因有：(1)池塘低密度养殖条件下(最终 0.1~0.3 只/m²)，饲料中 32%的蛋白水平可以满足其正常生长需求；(2)饲料 1#和 2#组梭子蟹雌体可能通过摄食更多的饵料来满足其生长发育对蛋白质和氨基酸的需求。卵巢是三疣梭子蟹雌体重要的可食部位之一，卵巢发育好坏直接影响三疣梭子蟹膏蟹的营养品质、经济价值和生殖性能(Wu et al, 2010; 吴旭干等, 2014)。甲壳动物的卵巢发育过程主要是在卵母细胞中大量积累卵黄磷蛋白和脂滴(Yang et al, 2005)，而卵黄磷蛋白主要由卵黄蛋白原、磷脂和类胡萝卜素等组成(Coccia et al, 2010)。本研究中，饲料 3#组(蛋白含量为 39.59%)雌体的卵巢指数显著高于饲料 1#和 2#组，这暗示饲料中较高的蛋白含量可以促进其卵黄磷蛋白的合成，进而促进其卵巢发育和提高卵巢指数。这与红螯螯虾(*Cherax quadricarinatus*)的研究结果类似(Rodríguez-González et al, 2009)。先前有研究在自然海区单个体笼养条件下，基于雌体生长、蛋白质效率、肥满度、卵巢中色素沉积和肌肉及卵巢中的常规生化组成等指标评价三疣梭子蟹雌体饲料中的适宜蛋白质和脂肪含量及其交互作用，结果表明，三疣梭子蟹雌体生长

后期和育肥饲料中适宜蛋白水平为 41.52%(段青源等, 2011), 这略高于本研究结论(39.59%)。这可能是因为本研究实验饲料的粗脂肪水平(15%)显著高于该研究(7%~11%), 适当提高饲料中的粗脂肪水平可以节约甲壳动物饲料中蛋白质, 从而降低其蛋白需求(Catacutan, 2002)。

先前在室内养殖条件下的研究表明, 三疣梭子蟹幼蟹(体重为 2.50~42.9 g)饲料中的蛋白需求为 45%左右(丁雪燕等, 2003), 这显著高于三疣梭子蟹雌体育肥饲料的适宜蛋白水平(40%左右)。由此可见, 三疣梭子蟹在生长和卵巢发育期间的营养需求存在较大差异。通常认为, 三疣梭子蟹幼蟹阶段需要高蛋白和低脂肪的饲料(Jin et al, 2015), 而卵巢发育阶段需要高脂肪和中等蛋白的饲料来满足其正常卵巢发育(Ding et al, 2017)。

3.2 饲料蛋白水平对三疣梭子蟹雌体生化组成的影响

可食组织的生化组成可用于评价三疣梭子蟹的营养和食用价值(吴旭干等, 2014)。在本研究中, 随着饲料蛋白水平的提高, 三疣梭子蟹雌体卵巢和肝胰腺中的粗蛋白含量呈显著上升趋势, 出现这种情况的原因可能是随着饲料蛋白水平的提高, 三疣梭子蟹摄入的蛋白质相对更多, 从而导致其卵巢和肝胰腺中蛋白积累的增加(Unnikrishnan et al, 2010)。随着饲料蛋白水平的提高, 饲料 3#和饲料 4#组雌蟹卵巢中的总脂含量显著增加, 这可能与这 2 组雌体卵巢指数较高有关, 通常卵巢指数较高的蟹类, 其卵巢中的水分含量较低, 但蛋白和脂肪含量较高(于智勇等, 2007; Rosa et al, 2002)。

3.3 饲料蛋白水平对三疣梭子蟹雌体肌肉中氨基酸组成的影响

必需氨基酸对动物生长发育非常重要, 且水产品中的必需氨基酸含量和组成是评价蟹类营养品质的重要依据(Wu et al, 2010)。根据 FAO/WHO 的理想氨基酸模式, 食品中必需氨基酸/总氨基酸(EAA/TAA)理想比值为 0.4 左右(FAO, 1985), 本研究中, 4 种蛋白水平饲料养殖的三疣梭子蟹肌肉中的必需氨基酸的含量均达到了该理想标准。先前研究表明, 三疣梭子蟹的主要限制性氨基酸分为含硫氨基酸(蛋氨酸和半胱氨酸)和异亮氨酸(徐善良等, 2009), 本研究结果表明, 这三种必需氨基酸含量均在饲料 1#组#和饲料 3#组雌体肌肉中较高。谷氨酸和天冬氨酸是 2 种呈鲜味的氨基酸, 其含量均在饲料 3#组中达到最高, 推测饲料 3#组三疣梭子蟹肌肉具有较高的营养品质。

综上所述, 基于池塘养殖条件下三疣梭子蟹雌体的卵巢指数和生化组成变化, 建议池塘养殖条件下三疣梭子蟹雌体育肥饲料中适宜的蛋白水平约为 40.16%。

参考文献: 略

不同蛋白源饲料中添加限制性氨基酸对红鲫 *Carassius auratus* 生长、消化及免疫能力的影响

石立冬 卫力博 翟浩杰 牟玉双 侯仁爽 任同军 韩雨哲

大连海洋大学水产与生命学院 大连海洋大学辽宁省北方鱼类应用生物学与增养殖重点实验室

摘要: 在水温为 (23 ± 1) °C 下, 将初始体质量为 (3.37 ± 0.03) g 的红鲫 *Carassius auratus* 180 尾, 随机分为 4 组, 每组 3 个重复, 每个重复 15 尾, 饲养在 200 L 聚乙烯水槽中, 投喂在 7%肉粉 (MM 组) 和 8%玉米蛋白粉 (CGM 组) 中添加 0.1%蛋氨酸 (MM+CAA 组) 和 0.1%赖氨酸 (CGM+CAA 组) 的饲料 56 d, 研究了上述 2 种蛋白源饲料中两种限制性氨基酸对红鲫生长、免疫及抗氧化能力的影响。结果表明: 蛋白源与氨基酸对红鲫摄食率 (FI)、肌肉总必需氨基酸 (\sum IDAA) 和总氨基酸 (\sum AA) 含量及肠道淀粉酶 (AMS) 活性无显著交互作用 ($P>0.05$); 肉粉蛋白源饲料中添加 0.1% 的两种限制性氨基酸后, 与其余各组相比, 显著提高了红鲫的特定生长率 (SGR)、增重率 (WGR)、肥满度 (CF), 肌肉蛋氨酸 (Met) 和赖氨酸 (Lys) 含量、肠道脂肪酶 (LPS) 和蛋白酶 (PRO) 活性, 肝脏酸性磷酸酶 (ACP)、碱性磷酸酶 (AKP)、过氧化氢酶 (CAT) 和超氧化物歧化酶 (SOD) 活性 ($P<0.05$); 显著降低了肝脏丙二醛 (MDA) 含量 ($P<0.05$), 而饲料系数 (FCR) 显著低于玉米蛋白粉为蛋白源未添加限制性氨基酸组。综上所述, 在本实验条件下, 肉粉蛋白源饲料中添加蛋氨酸和赖氨酸可以显著改善红鲫的生长、消化、免疫、抗氧化指标以及肌肉中限制性氨基酸水平, 提高饲料利用率同时降低饲料成本。

关键词: 蛋白源; 限制性氨基酸; 生长; 红鲫

Effects of Limited Amino Acids Supplementation in Different Protein Sources Diets on Growth Performance, Digestive Capacity, and Immunity of Red Crucian Carp *Carassius auratus*

SHI Lidong¹, WEI Libo¹, ZHAI Haojie¹, MU Yushuang¹, HOU Renshuang¹, REN Tongjun¹,
HAN Yuzhe^{1, 2}

(1. College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

(2. Key Laboratory of Fish Applied Biology and Aquaculture in North China, Dalian Ocean University,
Dalian 116023, China)

Abstract: A total of 180 individuals of red crucian carp *Carassius auratus* with initial body weight of (3.37 ± 0.03) g were randomly divided into 4 groups with 3 replicates per group, reared in a 200 L polyethylene

tank and fed diets containing meat meal protein source (MM group) and corn meal protein source (CGM group) supplemented with two limited amino acids methionine and lysine at a dose of 0.1% and 0.1% (MM + CAA group and CGM + CAA group) at a water temperature of (23 ± 1) °C for 56 d to evaluate effects of limited amino acids supplementation in different protein sources diets on growth performance, immunity, and antioxidant capacity of red crucian carp. The results showed that there were significantly higher specific growth rate (SGR), weight gain rate (WGR), condition factor (CF), the contents of muscular methionine (Met) and lysine (Lys), and activities of intestinal lipase (LPS) and protease (PRO), liver acid phosphatase (ACP), alkaline phosphatase (AKP), catalase (CAT), and superoxide dismutase (SOD), especially in meat meal protein group with limited amino acids supplementation ($P < 0.05$) in the fish fed the diets containing meat meal protein source (MM group) and 0.1% limited amino acids than those in other groups, without significant interaction between protein sources and amino acids on total indispensable amino acid contents (Σ IDAA), total amino acid contents (Σ AA), feeding intake (FI), and amylase activity (AMS) ($P > 0.05$) than those in other groups. Meanwhile, significant decrease in the content of liver malondialdehyde (MDA) was observed in the fish fed the diets containing meat meal protein source (MM group) and 0.1% limited amino acids ($P < 0.05$). The food conversion ratio (FCR) was shown to be significantly decreased in the fish fed the diets containing meat meal protein source and 0.1% limited amino acids than that in the fish fed the diets containing corn meal protein group without amino acids supplementation ($P < 0.05$). To sum up, the addition of methionine and lysine to the practical feed with meat powder as the main protein source led to significantly improve the growth, digestion, immunity, antioxidant index, amino acid level in muscle and the feed utilization rate.

Keyword: protein source; limited amino acid; growth performance; *Carassius auratus*;

肉粉蛋白质含量高, 碳水化合物含量低, 维生素和矿物质丰富^[1], 水产动物饲料中常见的蛋白源, 但消化率低、质量不稳定, 制约了其在水产饲料中的发展^[2]; 玉米蛋白粉为常见的植物性蛋白源之一, 其蛋氨酸和赖氨酸含量较低^[3,4,5], 同样存在肉粉的限制性因素。通常认为, 蛋氨酸和赖氨酸是第一、二限制性氨基酸; 饲料中缺乏必需氨基酸时, 大西洋鲑 *Salmo salar*^[6]、尖吻鲈 *Lates calcarifer*^[7]和凡纳滨对虾 *Penaeus vannamei*^[8]的摄食量和生长性能降低, 罗非鱼 *Oreochromis niloticus*^[9]、淡水鲶 *Mystus nemurus*^[10]的饲料效率降低, 蛋白质沉积率降低。Gaylord 和 Barrows^[11]及黎慧等^[12]研究表明, 补充限制性氨基酸可提高蛋白源利用率。限制性氨基酸在水产动物的肠道发育、消化代谢、免疫能力和抗氧化能力等方面具有一定的调节作用^[13,14,15,16]。红鲫 *Carassius auratus* 属鲤科鲤亚科鲫属, 以繁殖速度快、繁殖能力强、肉质鲜美、营养丰富而著名, 是我国重要的淡水养殖经济种类, 具有较高的经济价值。目前, 在水产养殖研究中针对肉粉和玉米蛋白粉替代鱼粉的研究常见报道, 但对肉粉和玉米蛋白粉两种蛋白源的作用效果比较却鲜有报道。本实验以肉粉和玉米蛋白粉为主要的蛋白源, 添加蛋氨酸和赖氨酸两种限

制性氨基酸，配制成不同蛋白源和限制性氨基酸饲料，旨在探讨肉粉和玉米蛋白粉蛋白源饲料以及限制性氨基酸对红鲫的作用，并为促进肉粉和玉米蛋白粉在红鲫饲料中的应用开发及进一步降低饲料成本提供理论参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

225 尾实验鱼购自大连市香炉礁，在 200 L 聚乙烯水槽中暂养 1 周。暂养期间饲喂对照组饲料，待实验鱼适应养殖环境后开始实验。

实验饲料配方、饲料蛋氨酸、赖氨酸含量实测值及红鲫实际需求量^[17]见表 1（饲料中肉粉和玉米蛋白粉的比例设计依据目前养殖生产中红鲫常用饲料配比），对照组饲喂 MM 组饲料，饲料中肉粉比例为 7%，实验组饲料分为 3 种，CGM 组用玉米蛋白粉完全替代肉粉，饲料中玉米蛋白粉比例为 8%，MM+CAA 组和 CGM+CAA 组分别在 MM 组和 CGM 组中添加 0.1%的晶体蛋氨酸和赖氨酸（由宜兴市天石饲料有限公司提供）。饲料原料过 80 目筛，逐级混匀，混合后的粉状饲料经制粒机制成直径为 2mm 的颗粒饲料，然后放入烘箱（DK-S26，上海森信实验仪器有限公司）中 42℃烘干至水分含量为 10%，于-20℃冰箱中保存。

表 1 实验饲料组成及营养水平（风干基础）

Tab.1 Ingredients and nutrient levels of experimental diets (air-dry basis) /%

项目 Item	MM 组	CGM 组	MM+CAA 组	CGM+CAA 组	
原料 Ingredients	蛋氨酸 ¹	0.00	0.00	0.10	0.10
	赖氨酸 ¹	0.00	0.00	0.10	0.10
	肉粉 ¹	7.00	0.00	7.00	0.00
	玉米蛋白粉 ¹	0.00	8.00	0.00	8.00
	30%甜菜碱 ¹	0.14	0.14	0.14	0.14
	鱼粉	4.00	4.00	4.00	4.00
	豆粕	40.00	40.00	40.00	40.00
	菜粕	6.00	6.00	6.00	6.00
	小麦粉	37.81	36.81	37.61	36.61
	豆油	2.00	2.00	2.00	2.00
	氯化钠	0.30	0.30	0.30	0.30
	磷酸二氢钙	2.00	2.00	2.00	2.00

	50%氯化胆碱	0.15	0.15	0.15	0.15
	维生素预混料 ²	0.10	0.10	0.10	0.10
	矿物质预混料 ³	0.50	0.50	0.50	0.50
	合计	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 nutrient level	水分	10.65	10.32	10.43	10.62
	粗蛋白质	30.75	31.84	30.73	31.82
	粗脂肪	5.20	5.00	5.21	4.98
	粗灰分	5.58	5.73	5.45	5.51
氨基酸含量 amino acid content	鲫实际需求	实测值 Measured value			
蛋氨酸 Methionine	0.60	0.41	0.31	0.58	0.46
赖氨酸 Lysine	1.60	1.44	1.29	1.61	1.41

注：¹蛋氨酸，赖氨酸，玉米蛋白粉，肉粉，30%甜菜碱，宜兴市天石饲料有限公司，江苏，中国；²维生素预混料为每 kg 饲料含有维生素 A，7000 IU；维生素 D3，2000 IU；维生素 E，50 mg；维生素 K3，10 mg；维生素 B1，20 mg；维生素 B2，20 mg；维生素 B6，30 mg；维生素 B12，0.1 mg；烟酸，80 mg；维生素 C，100 mg；泛酸钙，50 mg；叶酸，6 mg；肌醇，80 mg；³矿物质预混料为每 kg 饲料含有 NaCl，3000 mg；MgSO₄·7H₂O，5782 mg；FeSO₄·7H₂O，1000 mg；ZnSO₄·7H₂O，150 mg；MnSO₄·4H₂O，50.3 mg；CuSO₄·5H₂O，15 mg；CoCl₂·6H₂O，1.2 mg；KI，1.5 mg。Note: 1. methionine, lysine, corn gluten meal, meat meal, and 30% betaine. Yixing Tianshi Feed Co., Ltd., Jiangsu, China. 2. Vitamin premix provides the following per kilogram of feed: Vitamin A, 7000 IU; Vitamin D3, 2000 IU; Vitamin E, 50 mg; Vitamin K3, 10 mg; Vitamin B1, 20 mg; Vitamin B2, 20 mg; Vitamin B6, 30 mg; vitamin B12, 0.1 mg; niacin, 80 mg; vitamin C, 100 mg; calcium pantothenate, 50 mg; folic acid, 6 mg; and inositol, 80 mg. 3. Mineral premix provides the following per kg of feed: NaCl, 3000 mg; MgSO₄·7H₂O, 5782 mg; FeSO₄·7H₂O, 1000 mg; ZnSO₄·7H₂O, 150 mg; MnSO₄·4H₂O, 50.3 mg; CuSO₄·5H₂O, 15 mg; CoCl₂·6H₂O, 1.2 mg; KI, 1.5 mg.

1.2 实验设计和管理

实验鱼驯养 7 d 后，选取大小一致、活力较好，初始体质量为 (3.37±0.03) g 的红鲫 180 尾，随机分为 4 组，每组 3 个重复，每个重复 15 尾鱼，以曝气 24 h 以上的自来水作为实验用水，采用气石 24 h 充气，每日 08:00 和 16:00 投喂两次，表观饱食，每日

吸底 1 次、换水 1 次，换水量约为 1/2，实验期间水温为 (23±1) °C，溶氧为 (5±0.5) mg/L，pH 为 (7.3±0.5)，养殖周期为 56 d。

1.3 样品采集及指标测定方法

取样前，实验鱼停食 24 h，放入冰水中，用浓度为 100 mg/L 的 MS-222 进行麻醉处理，称重测量体长，计算其生长指标；称重后，于冰上进行无菌解剖，每个重复 15 尾鱼全部取肝脏、肠道及背部肌肉，同组混样装入样品管。肌肉样品于 -80 °C 冰箱中保存，用于测定肌肉中蛋氨酸 (methionine, Met)、赖氨酸 (lysine, Lys)、总必需氨基酸 (total indispensable amino acid, Σ IDAA) 和总氨基酸 (total amino acid, Σ AA) 含量；肠道和肝脏样品分别注入质量体积比为 1:9 的生理盐水，经 4 °C、4000 r/min、10 min 高速离心后，取上清液，4 °C 保存，用于测定肠道脂肪酶 (lipase, LPS)、淀粉酶 (amylase, AMS)、蛋白酶 (protease, PRO) 和肝脏酸性磷酸酶 (acid phosphatase, ACP)、碱性磷酸酶 (alkaline phosphatase, AKP)、过氧化氢酶 (catalase from micrococcus lysodeikticu, CAT) 和总超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活力及丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量，上述酶活指标均采用南京建成生物工程研究所试剂盒进行测定。实验饲料和肌肉样品氨基酸测定前处理参考国标法 (GB 5009.124 2016)，使用全自动氨基酸分析仪 (L-8900 型，日立制作所) 测得。

1.4 计算公式与数据处理

特定生长率 (specific growth rates, SGR, %/d) = $100 \times (\ln \text{终末体质量} - \ln \text{初始体质量}) / \text{饲养天数}$;

增重率 (weight gain rate, WGR, %) = $100 \times (\text{平均终末体质量} - \text{平均初始体质量}) / \text{平均初始体质量}$;

饲料系数 (food conversion ratio, FCR) = $\text{平均饲料摄入量} / (\text{终末平均体质量} - \text{初始平均体质量})$;

肥满度 (condition factor, CF) = $100 \times \text{终末体质量} \times \text{体长}^{-3}$;

摄食率 (food intake, FI, %) = $100 \times \text{摄入饲料干重} / [\text{饲养天数} \times (\text{初始体质量} + \text{终末体质量}) / 2]$;

实验数据用平均值±标准误 (mean±standard error, SE) 表示，用 SPSS 17.0 软件 (IBM, USA) 进行双因素方差分析 (two-way ANOVA) 分析。当蛋白源和晶体氨基酸之间存在显著交互作用时，再对所有数据进行一次单因素方差分析 (one-way ANOVA)，并采用

Duncan's 进行多重比较来分析各处理组间的显著性，设置 $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 饲料蛋白源和两种限制性氨基酸对红鲫生长性能的影响

饲料蛋白源和氨基酸对红鲫的 SGR、WGR、CF 和 FCR 存在显著交互作用 ($P < 0.05$)。MM 组与 CGM 组相比，WGR、CF 显著提高 ($P < 0.05$)，FCR 显著下降 ($P < 0.05$)；MM+CAA 组与 MM 组相比，SGR、WGR、CF 显著提高 ($P < 0.05$)；CGM+CAA 组与 CGM 组相比，FCR 显著下降 ($P < 0.05$)，但 SGR、WGR 和 CF 无显著变化 ($P > 0.05$)；且 MM+CAA 组的 SGR、WGR、CF 显著高于其余各组 ($P < 0.05$) 组，MM 组 FCR 最低，但 MM+CAA 组与 MM 组无显著差异 ($P > 0.05$) (表 2)。

表 2 饲料蛋白源和两种限制性氨基酸对红鲫生长性能的影响

Tab.2 Effect of feed protein source and two kinds of limited amino acids on growth performance of red crucian carp *Carassius auratus*

组别 Group	特定生长率 SGR/ $\% \cdot d^{-1}$	增重率 WGR/ $\%$	饲料系数 FCR	肥满度 CF	摄食率 FI/ $\%$
MM 组	2.72±0.08 ^a	265.20±6.18 ^b	1.40±0.03 ^a	4.43±0.03 ^b	3.45±0.34
MM+CAA 组	3.19±0.07 ^b	339.50±5.30 ^c	1.63±0.04 ^{ab}	5.03±0.21 ^c	3.19±0.20
CGM 组	2.61±0.01 ^a	214.20±14.00 ^a	2.13±0.10 ^c	3.71±0.07 ^a	4.49±0.70
CGM+CAA 组	2.71±0.06 ^a	215.60±3.10 ^a	1.81±0.15 ^b	3.30±0.13 ^a	3.62±0.80
双因素方差分析 P					
蛋白源	**	**	**	**	NS
氨基酸	**	**	NS	NS	NS
蛋白源×氨基酸	*	**	*	**	NS

注：同列中标有不同小写字母者表示组间有显著性差异 ($P < 0.05$)，标有相同小写字母者表示组间无显著性差异 ($P > 0.05$)；**代表 $P < 0.01$ ，*代表 $P < 0.05$ ，NS 代表无显著差异，下同 Note: Means with different letters in the same column are significant differences between groups ($P < 0.05$), and means with the same letters in the same column are not significant differences between groups ($P > 0.05$); ** stands for $P < 0.01$, * stands for $P < 0.05$, NS means no significant difference, the same below.

2.2 饲料蛋白源和两种限制性氨基酸对红鲫肌肉 Met、Lys、 \sum IDAA 和 \sum AA 的影响

饲料蛋白源和氨基酸对红鲫肌肉 Met 和 Lys 含量存在显著交互作用 ($P < 0.05$)，但对 \sum IDAA 和 \sum AA 无显著交互作用 ($P > 0.05$)。MM 组与 CGM 组相比，肌肉 Met 和 Lys

含量显著升高 ($P < 0.05$); MM+CAA 组与 MM 组相比, 肌肉 Met 和 Lys 含量显著升高 ($P < 0.05$); CGM+CAA 组与 CGM 组相比, 肌肉 Met、Lys 含量显著升高 ($P < 0.05$); 且肌肉 Met 和 Lys 含量在 MM+CAA 组显著高于其余各组 ($P < 0.05$) (如表 3)。

表 3 饲料蛋白源和两种限制性氨基酸对红鲫肌肉 Met、Lys、 Σ IDAA 和 Σ AA 的影响

Tab.3 Effect of feed protein source and two kinds of limited amino acids on Met, Lys, Σ IDAA, and Σ AA contents in muscle of red crucian carp *Carassius auratus* /%

组别 Group	蛋氨酸 Met	赖氨酸 Lys	总必需氨基酸 Σ IDAA	总氨基酸 Σ AA
MM 组	1.38±0.01 ^b	4.64±0.01 ^b	23.41±0.66	45.52±1.35
MM+CAA 组	1.65±0.07 ^c	4.94±0.03 ^c	23.93±0.85	46.05±0.08
CGM 组	1.30±0.03 ^a	4.54±0.02 ^a	23.11±0.36	44.81±0.25
CGM+CAA 组	1.43±0.01 ^b	4.67±0.03 ^b	23.47±1.08	45.14±0.22
双因素方差分析 P				
蛋白源	**	**	NS	NS
氨基酸	**	**	NS	NS
蛋白源×氨基酸	**	*	NS	NS

2.3 饲料蛋白源和两种限制性氨基酸对红鲫肠道消化能力的影响

表 4 饲料蛋白源和两种限制性氨基酸对红鲫肠道消化能力的影响

Tab.4 Effect of feed protein source and two kinds of limited amino acids on intestinal digestive capacity of red crucian carp *Carassius auratus* /U·mg prot⁻¹

组别	脂肪酶 LPS	蛋白酶 PRO	淀粉酶 AMS
MM 组	2.52±0.03 ^a	0.36±0.02 ^b	0.30±0.03
MM+CAA 组	6.36±0.03 ^d	0.63±0.02 ^c	0.32±0.03
CGM 组	3.33±0.06 ^b	0.13±0.01 ^a	0.31±0.01
CGM+CAA 组	3.55±0.03 ^c	0.33±0.01 ^b	0.36±0.01
双因素方差分析 P			
蛋白源	**	**	NS
氨基酸	**	**	NS
蛋白源×氨基酸	**	**	NS

如表 4 所示, 饲料蛋白源和氨基酸对 LPS 和 PRO 活力的交互作用显著 ($P < 0.05$), 但对 AMS 活力无显著交互作用 ($P > 0.05$); MM+CAA 组与 MM 组相比, LPS 和 PRO

活力显著提高 ($P<0.05$); CGM+CAA 组与 CGM 组相比, LPS 和 PRO 活力显著提高 ($P<0.05$); 且 LPS 和 PRO 活力均在 MM+CAA 组显著高于其余各组 ($P<0.05$)。

2.4 饲料蛋白源和两种限制性氨基酸对红鲫肝脏免疫能力的影响

饲料蛋白源和氨基酸对红鲫的 ACP、AKP、CAT、SOD 活力和 MDA 含量有显著交互作用 ($P<0.05$)。MM 组与 CGM 组相比, ACP、CAT 和 SOD 活力显著提高 ($P<0.05$), MDA 含量显著下降 ($P<0.05$), AKP 活力无显著变化 ($P>0.05$); MM+CAA 组与 MM 组相比, ACP、AKP、CAT 和 SOD 活力显著提高 ($P<0.05$), MDA 含量显著下降 ($P<0.05$); CGM+CAA 组与 CGM 组相比, ACP、AKP、CAT 和 SOD 活力显著提高 ($P<0.05$), MDA 含量无显著变化 ($P>0.05$); MM+CAA 组的 ACP、AKP、CAT 和 SOD 活力显著高于其余各组 ($P<0.05$), MM+CAA 组中 MDA 含量显著低于其余各组 ($P<0.05$) (表 5)。

表 5 饲料蛋白源和两种限制性氨基酸对红鲫免疫能力的影响

Tab.5 Effect of feed protein source and two limited amino acids on liver Immunity of red crucian carp *Carassius auratus* /U·mg prot⁻¹

组别 Group	酸性磷酸酶 ACP /U·g prot ⁻¹	碱性磷酸酶 AKP /U·g prot ⁻¹	过氧化氢酶 CAT /U·mg prot ⁻¹	丙二醛 MDA /nmol·mg prot ⁻¹	超氧化物歧化酶 SOD /U·mg prot ⁻¹
MM 组	310.16±8.28 ^b	20.35±0.70 ^{ab}	16.75±0.04 ^b	3.85±0.08 ^b	246.65±2.41 ^b
MM+CAA 组	394.49±2.16 ^c	35.69±1.77 ^c	17.81±0.01 ^d	2.49±0.34 ^a	275.03±0.95 ^d
CGM 组	252.78±2.70 ^a	18.91±0.51 ^a	16.31±0.12 ^a	4.62±0.14 ^c	221.24±0.79 ^a
CGM+CAA 组	317.26±2.41 ^b	21.63±0.23 ^b	17.08±0.06 ^c	4.50±0.02 ^{bc}	262.05±1.99 ^c
双因素方差分析 P 值					
蛋白源	**	**	**	**	**
氨基酸	**	**	**	**	**
蛋白源×氨基酸	**	**	*	*	**

3 讨论

3.1 饲料蛋白源和两种限制性氨基酸对红鲫生长性能的影响

通常认为, 赖氨酸和蛋氨酸是鱼类的第一和第二限制性氨基酸, 对维持生物正常的

生长发育具有重要作用^[18,19,20,21]。已有研究表明,饲料中添加 Met 可以不同程度地提高草鱼 *Ctenopharyngodon idella*^[22]、南亚野鲮 *Labeo rohita* H.^[23]、细鳞巨脂鲤 *Piaractus mesopotamicus*^[24]和松浦镜鲤 *Cyprinus carpio* L.^[25]的增重率、特定生长率及蛋白质效率;可以提高虹鳟 *Oncorhynchus mykiss*^[26]、斑点叉尾鮰 *Ictalurus punctatus*^[27]和建鲤 *Cyprinus carpio* var.Jian^[28]的相关生长基因的表达量。与此类似,饲料中添加 Lys,可以提高勃氏雅罗鱼 *Leuciscus brandti*^[29]和团头鲂 *Megalobrama amblycephala*^[30]的生长性能。特定生长率、增重率和肥满度等指标通常是鱼类营养学研究中用来评价鱼类机体生长速率和体质量增长幅度的指标,饲料系数 (FCR) 等指标通常是用来评价饲料利用率的指标^[31,32]。本研究结果表明,肉粉蛋白源饲料与玉米蛋白粉蛋白源饲料相比,显著提高了红鲫的 WGR 和 SGR,显著降低了 FCR,说明在未添加限制性氨基酸时,肉粉蛋白源饲料更有利于红鲫生长;添加限制性氨基酸后,肉粉蛋白源饲料添加组与未添加组相比,红鲫生长指标得到了显著改善,而玉米蛋白粉蛋白源饲料添加组与未添加组相比,红鲫的生长指标没有显著变化,说明肉粉蛋白源饲料中限制性氨基酸的添加促进了红鲫的生长,但玉米蛋白粉蛋白源饲料与限制性氨基酸之间可能存在某种拮抗机制,导致限制性氨基酸并未发挥促进作用,但目前对于这种拮抗机制的具体作用方式尚不明确,仍有待进一步研究。肉粉蛋白源饲料中添加限制性氨基酸后,红鲫的 SGR、WGR 和 CF 与其余各组相比显著提高,FCR 显著低于玉米蛋白粉蛋白源无添加组,说明肉粉蛋白源饲料中添加 0.1%的两种限制性氨基酸更适合红鲫的生长需求。

3.2 饲料蛋白源和两种限制性氨基酸对红鲫肌肉 Met、Lys、 \sum IDAA 和 \sum AA 的影响

饲料中氨基酸含量与鱼类肌肉氨基酸含量密切相关。研究表明,饲料中缺乏蛋氨酸时,黑鲷 *Sparus macrocephalus*^[33]、大黄鱼 *Pseudosciaena crocea*^[34]和胭脂鱼 *Myxocyprinus asiaticus*^[35]肌肉中的总必需氨基酸含量降低,且随着饲料中蛋氨酸浓度增加,肌肉中蛋氨酸的含量也升高,说明日粮中蛋氨酸缺乏会降低组织中蛋氨酸的含量^[34];随着饲料中赖氨酸含量的升高,黑鲷^[36]、黄颡鱼 *Pelteobagrus fulvidraco*^[21]和军曹鱼 *Rachycentron canadum* 幼鱼^[37]肌肉赖氨酸和蛋氨酸含量升高,说明饲料中蛋氨酸、赖氨酸含量与鱼体肌肉组织中蛋氨酸、赖氨酸和含量存在一定的正相关。本研究中,肉粉蛋白源饲料与玉米蛋白粉蛋白源饲料相比,显著提高了肌肉 Met 和 Lys 含量,说明肉粉蛋白源饲料对改善红鲫肌肉蛋氨酸和赖氨酸组成的效果更显著;在不同蛋白源饲料中添加 0.1%的两种限制性氨基酸后,与未添加限制性氨基酸组相比,红鲫肌肉 Met 和 Lys 含

量显著提高，与上述研究结果相符，说明饲料中蛋氨酸和赖氨酸含量的升高可以导致肌肉蛋氨酸和赖氨酸含量的升高，且在本实验条件下，肉粉蛋白源饲料中添加限制性氨基酸后，红鲫肌肉的 Met 和 Lys 含量显著高于其余各组，说明在肉粉蛋白源饲料中添加限制性氨基酸改善红鲫肌肉蛋氨酸和赖氨酸含量的效果显著优于其余各组饲料。

3.3 饲料蛋白源和两种限制性氨基酸对红鲫肠道消化能力的影响

肠道是动物消化吸收的主要场所，鱼类主要依靠肠道中的消化酶进行化学性消化，因此，肠道消化酶活性在一定程度上可以反映鱼类对饲料原料和营养成分的消化吸收能力^[38]。鄢华^[39]在探究赖氨酸缺乏对幼建鲤 *Cyprinus carpio* var Jian 的影响中发现，赖氨酸缺乏可极显著降低蛋白酶活性，但对淀粉酶活性的影响不显著；彭艳等^[40]在蛋氨酸对幼建鲤的生长影响的研究中发现，适量的蛋氨酸可以显著提高蛋白酶的活性；帅柯^[41]表明，饲料蛋氨酸水平对脂肪酶和蛋白酶活力存在显著影响，适量的蛋氨酸水平可以显著提高脂肪酶和蛋白酶的活性。本实验条件下，在不同蛋白源饲料中添加 0.1% 的两种限制性氨基酸，红鲫肠道的 LPS 和 PRO 活性显著提高，说明在肉粉蛋白源和玉米蛋白粉蛋白源饲料中添加限制性氨基酸能够改善红鲫肠道的消化能力，且添加限制性氨基酸后，LPS 和 PRO 活性在肉粉蛋白源饲料组显著高于其余各组，说明肉粉蛋白源饲料中添加限制性氨基酸后对肠道消化酶活力的改善效果显著优于其余各组饲料。这些消化酶活性的显著提高可以相对解释肉粉蛋白源饲料中添加 0.1% 两种限制性氨基酸条件下的高生长性能。

3.4 饲料蛋白源和两种限制性氨基酸对红鲫肝脏免疫能力的影响

鲤科鱼类的免疫系统包括非特异性免疫和特异性免疫系统^[42]。Salinas 等^[43]认为，鱼类等低等脊椎动物机体的防御主要靠非特异性免疫系统，因此，ACP、AKP 等重要的非特异性免疫因子^[44,45,46]的活性在一定程度上可以反映机体的免疫能力。孙崇岩等^[47]和帅柯^[41]发现，在饲料中添加适量的晶体蛋氨酸可以显著提高建鲤的特异性和非特异性免疫能力；Ruchimat 等^[48]发现，随着饲料中赖氨酸含量的增加，黄尾鲷 *Seriola lalandi* 的免疫能力也呈现增强的趋势；在本实验中，未添加限制性氨基酸时，肉粉蛋白源饲料与玉米蛋白粉蛋白源饲料相比显著提高了红鲫肝脏 ACP 活力，在不同蛋白源饲料中添加 0.1% 的两种限制性氨基酸，红鲫肝脏的 ACP 和 AKP 活力均显著提高，且添加限制性氨基酸后，肉粉蛋白源饲料对肝脏 ACP、AKP 活力的改善效果显著优于其余各组饲料。

SOD 和 CAT 是生物防御体系中的关键酶^[49]。SOD 为清除体内自由基的活性氧清除剂，对增强整个机体的抗氧化能力具有重要作用^[50]。CAT 与 SOD 具有协同作用，可以清除机体内产生的超氧阴离子 ($O_2^{\cdot-}$) 和 H_2O_2 等自由基^[51]。MDA 为机体内脂肪过氧化的终产物，其含量可以反映机体中脂肪过氧化程度及集体损伤程度^[52]。研究表明，蛋氨酸可显著降低鲈 *Lateolabrax japonicus* 肝脏中的脂质过氧化水平和 GSH 含量^[53,54]；廖英杰^[55]发现，团头鲂血清超氧化物歧化酶活力与饲料中赖氨酸的含量呈正相关；本实验条件下，未添加限制性氨基酸时，肉粉蛋白源饲料与玉米蛋白粉蛋白源饲料相比显著提高了红鲫肝脏 CAT、SOD 活力，显著降低了肝脏 MDA 含量，在不同蛋白源饲料中添加 0.1% 的两种限制性氨基酸，红鲫肝脏的 CAT 和 SOD 活力均显著提高，且添加限制性氨基酸后，肉粉蛋白源饲料组红鲫肝脏 CAT 和 SOD 活力显著高于其余各组饲料，肝脏 MDA 含量显著低于其余各组。综上所述，肉粉蛋白源和玉米蛋白粉蛋白源饲料中添加两种限制性氨基酸可以在一定程度上提高鱼类的肝脏免疫能力，改善抗氧化能力，其改善效果以肉粉蛋白源饲料添加限制性氨基酸更显著。

3.5 结论

本实验中，在以肉粉为主要蛋白源的饲料中添加蛋氨酸和赖氨酸两种限制性氨基酸后，红鲫的特定生长率、增重率、肥满度、饲料系数，肌肉蛋氨酸、赖氨酸含量，肠道消化酶活力，肝脏免疫酶活力及抗氧化酶活力均显著提高，且蛋白源和氨基酸对上述指标存在一定的交互作用，但其交互作用机制尚不明确。综上所述，初始体质量为 (3.37 ± 0.03) g 红鲫的饲料中，以肉粉为主要蛋白源时添加赖氨酸和蛋氨酸可以显著改善其生长、消化、免疫、抗氧化性能及肌肉中蛋氨酸、赖氨酸含量，提高饲料利用率，降低成本。

参考文献：略

全文刊登在《水产学杂志》录用定稿 网络首发时间: 2020-08-24 14:05:51

配合饲料和冰鱼对单体养殖中华绒螯蟹生长、性腺发育及其肌肉品质的影响

冯伟 李辉 唐永凯 苏胜彦 王美垚 李建林 俞菊华

南京农业大学无锡渔业学院 上海海洋大学水产科学国家级实验教学示范中心 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与种质资源利用重点实验室

摘要：为研究配合饲料和冰鱼对中华绒螯蟹的养殖性能和营养状况的影响，本实验通过连续采样分析了单体养殖中华绒螯蟹的生长性能、性腺发育和肌肉的营养成分，并进一步比较了终末体质量、

增重率、特定增长率、成活率和蜕壳间隔。结果显示：①配合饲料组的成活率极显著高于冰鱼组，而终末体质量、增重率、特定增长率和蜕壳间隔二组无显著差异；在不同蜕壳阶段，体质量配合饲料组小于冰鱼组，其中第3次蜕壳后二组间差异显著；增重率在雌、雄蟹体间存在差异，其中雌蟹在第2次蜕壳后配合饲料组极显著小于冰鱼组，而雄蟹在第1次和第4次蜕壳后2个阶段配合饲料组极显著大于冰鱼组。②肝胰腺指数在配合饲料和冰鱼2组投喂下分别为3.59%和4.45%，性腺指数二者分别为3.20%和2.25%，肝胰腺指数和性腺指数在二组投喂下无显著差别。③在肌肉氨基酸含量方面，氨基酸总量(Σ TAA)、必需氨基酸总量(Σ TEAA)和呈味氨基酸总量(Σ FAA)配合饲料组显著小于冰鱼组；从单个氨基酸看，赖氨酸(Lys)和精氨酸(Arg)含量配合饲料组显著小于冰鱼组，而脯氨酸(Pro)含量则是配合饲料组显著大于冰鱼组。④在肌肉脂肪酸含量方面，高度不饱和脂肪酸(Σ HUFA)和DHA+EPA含量配合饲料组显著高于冰鱼组；从单个脂肪酸看，单不饱和脂肪酸(Σ MUFA)中C16:1和C18:1n-91含量配合饲料组显著小于冰鱼组，而多不饱和脂肪酸(Σ PUFA)中的ARA和DHA配合饲料组却显著高于冰鱼组。研究表明，在该单体养殖条件下，配合饲料组在中华绒螯蟹生长性能和肌肉品质上接近冰鱼组，而在性腺发育和成活率上则优于冰鱼组，配合饲料对中华绒螯蟹养殖业更具有发展优势。

关键词：中华绒螯蟹；生长性能；性腺发育；营养品质；单体养殖；

Effects of the growth, gonadal development and muscle quality on *Eriocheir sinensis* under the monomer culture with formula feed and frozen fish

Feng Wei Li Hui Tang Yongkai Su Shengyan Wang Meiyao Li Jianlin Yu Juhua

Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences

Abstract: In order to study the effect of formula feed and frozen fish on the breeding performance and nutritional status of *Eriocheir sinensis*, this experiment analyzed the growth performance, gonadal development and nutrient composition of monocultured Chinese mitten crab by continuous sampling, and further compared the FBI, WGR, SGR, SR and MI. The results showed that: ① In terms of survival rate, the formula feed group was significantly higher than the frozen fish group, while there was no significant difference in the FBI, WGR, SGR and MI between the two groups. At different stages of molting, the formula feed group of the body weight was smaller than the frozen fish group, and the differences between the two groups after the third molting was significant; the weight gain rate was different between the female and male crabs, and the weight

gain rate of formula feed group in the female crab was significantly smaller than that of the frozen fish group after the second molting, while the male crabs in the two stages after the first and fourth molting were significantly larger than the frozen fish group. ②The hepatopancreas index was 3.59% and 4.45% under the formula feed and frozen fish groups, respectively, the gonadal index was 3.20% and 2.25%, and the hepatopancreas index and gonadal index were not significant differences under the two groups. ③In terms of muscle amino acid content, the total amino acids, total essential amino acids and total flavor amino acids in the formula feed group was significantly smaller than that of the frozen fish group; from a single amino acid, the lysine and arginine content of the formula feed group was significantly smaller than that of the frozen fish group, and the content of proline is significantly greater in formula feed than the frozen fish group. ④In terms of muscle fatty acid content, the highly unsaturated fatty acid and DHA+EPA content of the formula feed group was significantly higher than the frozen fish group; from the perspective of a single fatty acid, in the monounsaturated fatty acid C16:1 and C18:1n-91 content of the formula feed group was significantly smaller than the frozen fish group, but in the polyunsaturated fatty acid ARA and DHA of formula feed group was significantly higher than the frozen fish group. Studies have shown that the formula feed group is close to the frozen fish group in the growth performance and muscle quality of the Chinese mitten crab, but the gonad development and survival rate fed with formula feed are better than the frozen fish group under the monomer culture conditions, which has more development advantages on Aquaculture.

Keyword : *Eriocheir sinensis*; growth performance; gonadal development; nutritional quality; monomer culture;

中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)俗称河蟹,是我国重要的水产养殖蟹类之一[1]。其养殖主要分布在江苏、湖北、安徽等长江中下游地区,养殖面积约70万公顷,2018年我国中华绒螯蟹养殖总产量高达75.7万吨[2]。饲料质量和饲料营养直接影响水产动物的存活和生长,是决定养殖产品成败和效益的重要因素之一[3]。目前中华绒螯蟹养殖主要为池塘养殖,以投喂野杂鱼、螺蛳和豆粕、菜粕、玉米以及配合饲料为主,但是随着中华绒螯蟹养殖产量的不断提升,野杂鱼的大量投喂导致了养殖水质恶化,活饵料螺蛳的投喂对于幼蟹来说因其觅食竞争而影响其生长[4],而粗饲料的营养单一和不均衡性则无法满足中华绒螯蟹的生长需求,这些因素也导致其病害爆发和成蟹品质不稳定等一系列问题,严重制约了我国中华绒螯蟹养殖业的可持续发展[5,6]。因此,一种新型的蟹类单体养殖设施——“蟹龙宫”进入了人们的视野[7]。该设施具有独立的进水、排水和增氧系统,让中华绒螯蟹在每一养殖盒中生长,既避免了打斗争食、恶劣天气和天敌生物以及投喂不均对其造成的伤残、病死和育成品质等影响,还节约了水资源、改善了水质、缩减了养殖用地以及提升了精准的饵料投喂和管理,大大降低了传统养殖所付出的成本和人力[8]。

冰鱼即为通过低温冷冻方式进行保存的鲜活小鱼，来源通常为海水捕捞。近年来随着养殖面积的扩大，资源丰富且来源稳定的冰鱼进入了养殖户的视野，但是其大量的使用仍造成了不少的问题。因此，诸多学者开展了配合饲料和冰鱼对中华绒螯蟹养殖的研究。唐永凯等^[2]研究了冰鱼和配合饲料对中华绒螯蟹养殖效益的影响，发现冰鱼组有更高的亩产、成蟹规格以及较高的成活率。刘伟杰等^[10]研究了配合饲料和冰鱼对中华绒螯蟹生长性能的影响，发现冰鱼组成活率显著低于配合饲料组，且经济效益低。目前中华绒螯蟹养殖已从提高产量为主，发展为增加产量与提升品质并重，这也是未来中华绒螯蟹养殖发展的方向。配合饲料和冰鱼作为当前最主要的饲料来源，它们对单体养殖中华绒螯蟹生长、性腺发育及其品质的影响研究尚未见报道。本研究使用中华绒螯蟹单体养殖系统，研究了全程投喂配合饲料和冰鱼两种方式对中华绒螯蟹成蟹阶段生长等指标及其肌肉品质的影响，以期中华绒螯蟹饲料选择、精准投喂、以及工业化养殖提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

实验蟹为处于 1 龄的幼蟹，取自中国水产科学院淡水渔业研究中心苏州阳澄湖虾蟹绿色养殖基地。2019 年 3 月 19 日挑选体质健壮、活力强，规格接近的个体，共计 96 只（雌、雄各半）。冰鱼为小型鱼类鳊鱼，取自养殖基地冷库，投喂配合饲料购于江苏海普瑞饲料有限公司，主要原料为优质鱼粉、精炼鱼油、豆粕、花生粕、高精面粉、磷酸二氢钙、碳酸钙、食盐、复合维生素、微量元素和诱食剂等，具体营养成分如表 1 所示。

1.2 实验设计及管理

表1 配合饲料和冰鱼营养成分比较（干重）

Tab.1 Comparison of the nutrient ingredients with formula feed and frozen fish (dry weight) %

成分分析 component analysis	配合饲料 formula feed	冰鱼 frozen fish
水分 moisture	11.33±0.27 ^b	79.15±0.58 ^a
粗蛋白 crude protein	42.60±0.83 ^b	62.67±1.32 ^a
总脂肪 total lipid	8.04±0.22 ^b	18.36±1.27 ^a
灰分 ash	16.21±0.04 ^a	13.92±0.93 ^b

注：同行不同小写字母代表差异显著（ $P<0.05$ ），不同大写字母表示差异极显著（ $P<0.01$ ），下同

Notes: different lowercase letters in the same line indicated significant differences ($P<0.05$) and different uppercase letters indicated extremely significant differences ($P<0.01$), the same below

实验在 6 行×16 列的全封闭循环水“蟹龙宫”系统中进行，系统内每个养殖盒随机放养 1 只蟹，设置配合饲料和冰鱼 2 个组（每组 4 个重复，每个重复 12 只，雌、雄各半）。养殖水源为曝气自来水，水温为（25±3）℃，保持盒中溶解氧 5 mg/L 以上，氨氮小于 0.2 mg/L，pH 为 7.0~8.5。中华绒螯蟹用配合饲料投喂 7 d 以适应该养殖环境，实验前

禁食 24 h。养殖期间，每天在 7:00—8:00、17:00—18:00 两个时间段进行饱食投喂（约为体质量 2%~5%），并根据摄食和生长情况适当调整，定时清理残污和补充水槽新水，养殖周期从 3 月 26 日到 11 月 20 日，共计 240 d。

1.3 样品采集

在实验期间中华绒螯蟹每蜕 1 次壳，记录一次蜕壳间隔时间（molting intervals, d），该间隔为每次中华绒螯蟹蜕壳开始到下一次蜕壳结束所需要的时间，3 d 后等壳钙化后称量其体质量（擦去体表水分）并计算增重率、特定增长率和统计死亡率。待养殖周期结束后，从两组中取体质量相当的中华绒螯蟹雌、雄各 6 只，称其体质量并取出所有肌肉、肝胰腺和性腺，放于 -80 °C 保存，用于后续实验。

1.4 样品分析

生长指标 增重率(weight gain rate, WGR, %) = $(W_n - W_{n-1}) / W_1 \times 100\%$

特定生长率(specific growth rate, SGR, %) = $(\ln W_n - \ln W_{n-1}) / t \times 100\%$

存活率(survival rate, SR, %) = $N_t / N_0 \times 100\%$

肝胰腺指数(hepatosomatic index, HSI, %) = $W_h / W \times 100\%$

性腺指数(gonadosomatic index, GSI, %) = $W_g / W \times 100\%$

肥满度(condition factor, CF, g/cm³) = $W / L^3 \times 100$

式中， W_n 为蟹第 n 次蜕壳后的平均体质量(g)， W_{n-1} 为蟹第 $n-1$ 次蜕壳后的平均体质量(g)， t 为蜕壳间隔(d)， N_t 为蟹终末个数； N_0 为蟹初始个数， W_h 为蟹肝胰腺重量(g)， W_g 为蟹性腺重量(g)， W 为蟹体质量(g)， L 为头胸甲长(cm)。

游离氨基酸组成 采用外标法^[11]确定中华绒螯蟹肌肉氨基酸组成和含量，准确称取 600.0 mg 左右蛋白水解的样品，于特制的水解管底部，缓慢加入 8 mL HCL 并轻轻转动水解管，保证样品得到全部润湿，抽真空，维持 5 min 后，在酒精喷灯上封口。(110±1) °C 水解 22~24 h，切开水解管用去离子水全部转移到 25 mL 容量瓶中、定容，双层滤纸过滤，取滤液 1 mL 置于 25 mL 小烧杯中，在加 NaOH 的真空干燥器中蒸干（水浴加热不超过 50 °C），加入 1 mL pH2.2 的盐酸溶解后，溶液转移 1.5 mL 的离心管中。10 000 r/min 离心 10 min，取上清液 0.5 mL 于样品瓶中测定，所用仪器为安捷伦液相色谱仪。

脂肪酸组成 采用面积归一化法^[12]确定蟹体肌肉脂肪酸组成及相对含量，取部分已制备好的中华绒螯蟹肌肉样品用于脂肪酸分析，总脂肪酸的测定采用氯仿：甲醇：H₂O=2：

2:1 抽提总脂肪, 分别用 1 mol/L KOH-甲醇和 0.5 mol/L 硫酸甲醇溶液使脂肪酸甲酯化, 再用正庚烷萃取脂肪酸甲酯。样品皂化甲酯化后, 直接上气相色谱—质谱仪进行分析。所用仪器为 Agilent 7890B-5977A 气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)。

1.5 数据处理

应用 SPSS 24.0 软件对实验数据进行方差齐性检验, 采用 One-Way ANOVA 和独立 t 检验检查各项指标间的差异性, 数据以平均值±标准差 (mean±SD) 的形式表示, $P<0.05$ 为差异显著, $P<0.01$ 为差异极显著。

2 结果

2.1 生长性状

在成活率方面, 配合饲料和冰鱼组成活率分别为 58.33%和 43.75%, 二组之间存在极显著差异($P<0.01$), 终末体质量、增重率、特定生长率等 3 个指标冰鱼组高于配合饲料组 ($P>0.05$), 蜕壳间隔则是冰鱼组快于配合饲料组 ($P>0.05$) (表 2)。

表2 配合饲料和冰鱼对中华绒螯蟹生长性能的影响 $n=50$
Tab.2 The effect of the growth performance of *E. sinensis* reared in the "Crab Palace" system with formula feed and frozen fish

项目 items	雌 female		雄 male		雌+雄 the sum of female and male	
	配合饲料	冰鱼	配合饲料	冰鱼	配合饲料	冰鱼
	formula feed	frozen fish	formula feed	frozen fish	formula feed	frozen fish
成活率/% SR	75.00 ^A	50.00 ^B	41.67 ^A	37.50 ^A	58.33 ^A	43.75 ^B
初体质量/g IBW	7.63±3.49 ^a	8.72±3.75 ^a	8.99±3.39 ^a	8.09±3.05 ^a	8.31±3.86 ^a	8.40±3.63 ^a
终体质量/g FBW	37.96±9.41 ^a	39.05±7.82 ^a	34.38±6.85 ^a	37.87±9.60 ^a	35.41±8.69 ^a	38.42±8.69 ^a
增重率/% WGR	406.50±95.59 ^a	433.64±161.80 ^a	360.32±170.78 ^a	428.00±164.07 ^a	385.38±135.37 ^a	430.64±160.39 ^a
特定增长率/%SGR	0.90±0.11 ^a	0.91±0.18 ^a	0.83±0.20 ^a	0.90±0.16 ^a	0.87±0.16 ^a	0.91±0.16 ^a
蜕壳间隔/d MI	52.73±24.40 ^a	49.57±23.38 ^a	51.84±20.45 ^a	47.79±17.84 ^a	52.23±22.48 ^a	48.68±20.61 ^a

在该养殖模式下中华绒螯蟹蜕了 3~4 次壳, 冰鱼组每次蜕壳后中华绒螯蟹体质量都高于配合饲料组, 且冰鱼组中华绒螯蟹第 3 次蜕壳后体质量显著高于配合饲料组 ($P<0.05$), 但第 4 次蜕壳后 2 组间体质量几乎接近, 无显著差异 ($P>0.05$) (图 1)。从整体上看, 随着养殖时间的延长, 雌、雄个体的增重率和特定增长率呈下降趋势, 第 3 次蜕壳之前中华绒螯蟹生长普遍较快, 而之后则呈现一种缓慢生长的趋势 (图 2)。其中第 2 次蜕壳后, 雌蟹增重率冰鱼组投喂最高为 66.00%, 比配合饲料组投喂高了 12.87%, 二者存在极显著差异 ($P<0.01$)。相反, 雄蟹增重率配合饲料组在第 1 壳后和第 4 壳后 2 个阶段显著高于冰鱼组 ($P<0.01$), 而中华绒螯蟹特定增长率配合饲料组则在第 1 次蜕壳后显著高于冰鱼组 ($P<0.05$) (图 3)。

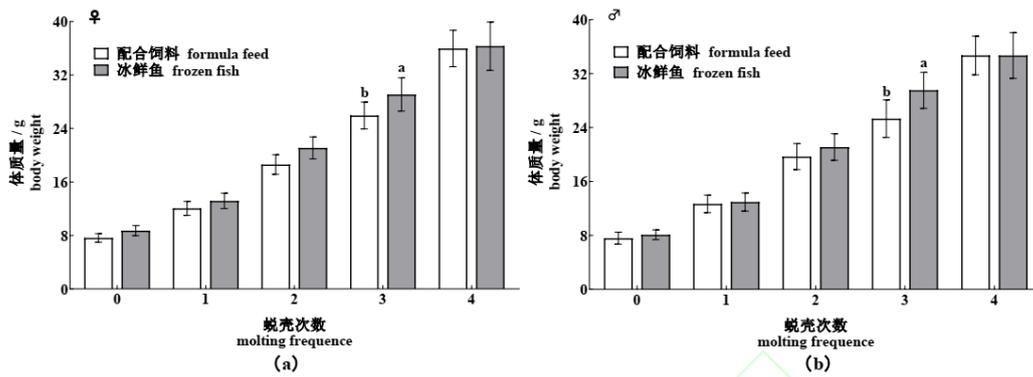


图1 配合饲料和冰鱼对雌 (a)、雄 (b)中华绒螯蟹体质量的影响
图中不同小写字母代表组间差异显著($P < 0.05$), 不同大写字母表示组间差异极显著($P < 0.01$), 下同

Fig. 1 The effect of the body weight of female (a) and male (b) crabs reared in the "Crab Palace" system with formula feed and frozen fish. Different lowercase letters indicated significant differences ($P < 0.05$) and different uppercase letters indicated extremely significant differences in formula feed and frozen fish ($P < 0.01$), the same below.

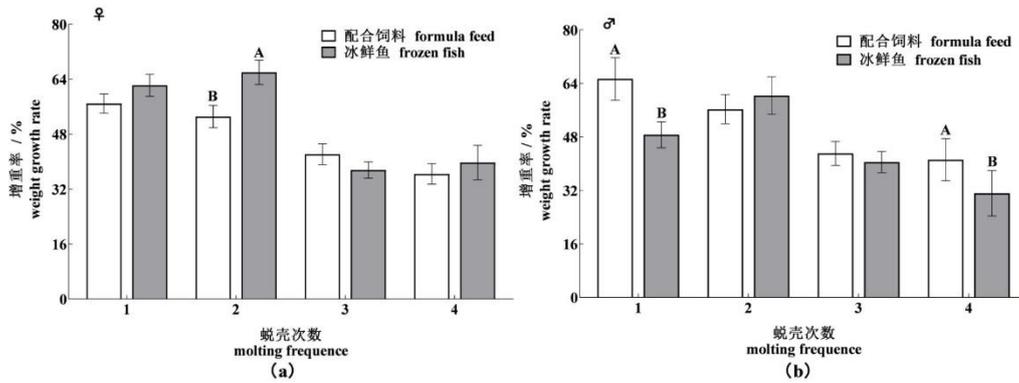


图2 配合饲料和冰鱼对雌(a)、雄(b)中华绒螯蟹增重率的影响

Fig. 2 The effect of the weight growth rate of female (a) and male (b) crabs reared in the "Crab Palace" system with formula feed and frozen fish

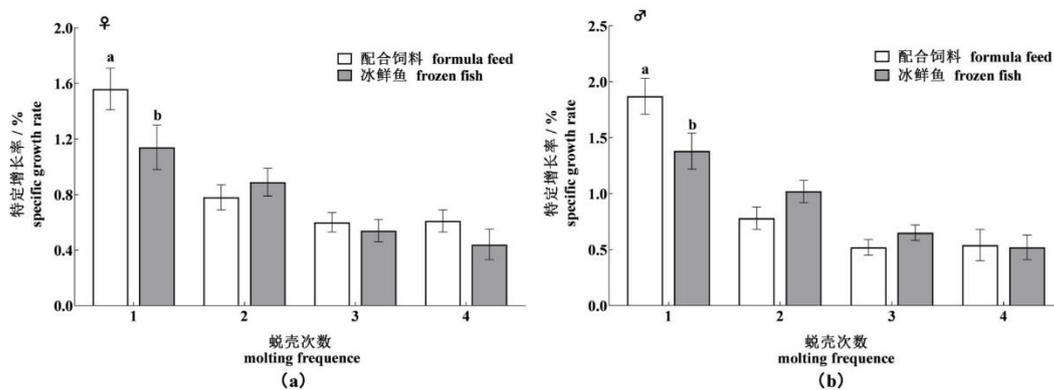


图3 配合饲料和冰鱼对雌 (a)、雄 (b) 中华绒螯蟹特定增长率的影响

Fig. 3 The effect of the specific growth rate of female (a) and male (b) crabs reared in the "Crab Palace" system with formula feed and frozen fish

2.2 配合饲料和冰鱼投喂对中华绒螯蟹肥满度及性腺发育的影响

中华绒螯蟹肥满度、肝胰腺指数和性腺指数在配合饲料和冰鱼组投喂下无显著差异 ($P>0.05$)，但是肝胰腺指数冰鱼组略高于配合饲料组，而性腺指数配合饲料组则略高于冰鱼组 ($P>0.05$)。从雌、雄中华绒螯蟹看，肝胰腺指数雌蟹冰鱼组为 4.75%，雌蟹配合饲料组为 3.46%，二者差异显著 ($P<0.05$)；性腺指数则是雌蟹配合饲料组最高为 3.87%，雌蟹冰鱼组为 2.76%，二组差异显著 ($P<0.05$) (表 3)。

表3 单体条件下配合饲料和冰鱼对中华绒螯蟹肝胰腺指数、性腺指数和肥满度的比较
Tab.3 The comparison of the hepatosomatic index (HSI), gonadosomatic index (GSI) and condition factor (CF) of *E. sinensis* reared in the "Crab Palace" system with formula feed and frozen fish $n=12$

项目 items	雌 female		雄 male		雌+雄 the sum of female and male	
	配合饲料组	冰鱼组	配合饲料组	冰鱼组	配合饲料组	冰鱼组
	formula feed	frozen fish	formula feed	frozen fish	formula feed	frozen fish
肥满度/ g/cm^3 CF	53.87±9.36 ^a	54.88±7.52 ^a	54.54±9.53 ^a	53.23±10.41 ^a	54.05±9.49 ^a	54.15±9.20 ^a
肝胰腺指数/% HSI	3.46±0.65 ^b	4.75±0.58 ^a	3.72±1.12 ^a	3.54±1.87 ^a	3.59±1.08 ^a	4.45±1.02 ^a
性腺指数/% GSI	3.87±1.63 ^a	2.76±2.11 ^b	2.53±0.87 ^a	1.72±0.43 ^a	3.20±1.53 ^a	2.25±0.78 ^a

2.3 配合饲料和冰鱼投喂对中华绒螯蟹肌肉氨基酸组成及含量的比较

表4 配合饲料组和冰鱼组中华绒螯蟹肌肉氨基酸组成与含量 (湿重)
Tab.4 The composition and content of amino acids in the muscles of *E. sinensis* reared in the "Crab Palace" system with formula feed and frozen fish (wet weight) (g/100g, $n=12$)

氨基酸 amino acids	雌 female		雄 male		雌+雄 the sum of male and female	
	配合饲料组	冰鱼组	配合饲料组	冰鱼组	配合饲料组	冰鱼组
	formula feed	frozen fish	formula feed	frozen fish	formula feed	frozen fish
苏氨酸 Thr	3.02±0.08 ^a	3.24±0.12 ^a	3.19±0.31 ^a	3.10±0.21 ^a	3.11±0.22 ^a	3.17±0.22 ^a
缬氨酸 Val	3.15±0.09 ^a	3.26±0.04 ^a	3.26±0.19 ^a	3.39±0.38 ^a	3.21±0.15 ^a	3.33±0.25 ^a
蛋氨酸 Met	0.92±0.73 ^b	1.69±0.06 ^a	1.45±0.16 ^a	1.75±0.43 ^a	1.19±0.55 ^a	1.72±0.28 ^a
苯丙氨酸 Phe	2.45±0.14 ^a	2.65±0.08 ^a	2.73±0.24 ^a	2.58±0.20 ^a	2.59±0.23 ^a	2.62±0.14 ^a
异亮氨酸 Ile	2.56±0.17 ^a	2.96±0.12 ^a	2.85±0.27 ^a	2.89±0.26 ^a	2.70±0.26 ^a	2.92±0.18 ^a
亮氨酸 Leu	4.35±0.31 ^a	5.00±0.18 ^a	4.90±0.56 ^a	4.86±0.42 ^a	4.63±0.51 ^a	4.93±0.30 ^a
赖氨酸 Lys	4.41±0.58 ^b	5.38±0.26 ^a	5.15±0.66 ^a	4.99±0.30 ^a	4.78±0.68 ^b	5.18±0.33 ^a
总必需氨基酸 ΣTEAA	20.86±1.20 ^B	24.18±1.30 ^A	23.53±1.29 ^A	23.56±1.18 ^A	22.21±1.24 ^A	23.87±1.24 ^A
天冬氨酸 Asp	7.00±0.70 ^a	7.03±0.23 ^a	7.24±0.66 ^a	6.72±0.30 ^a	7.12±0.62 ^a	6.88±0.29 ^a
谷氨酸 Glu	10.41±0.57 ^b	11.60±0.50 ^a	11.32±1.18 ^a	10.96±0.38 ^a	10.87±0.97 ^a	11.28±0.53 ^a
甘氨酸 Gly	4.69±0.82 ^b	6.05±0.28 ^a	4.73±0.58 ^a	5.38±0.79 ^a	4.71±0.63 ^a	5.72±0.64 ^a
丙氨酸 Ala	4.12±0.30 ^a	4.48±0.29 ^a	4.42±0.53 ^a	4.43±0.19 ^a	4.27±0.42 ^a	4.46±0.22 ^a
酪氨酸 Tyr	1.98±0.12 ^a	2.04±0.10 ^a	2.23±0.26 ^a	2.09±0.17 ^a	2.11±0.23 ^a	2.06±0.13 ^a
苯丙氨酸 Phe	2.45±0.14 ^a	2.65±0.08 ^a	2.73±0.24 ^a	2.58±0.20 ^a	2.59±0.23 ^a	2.62±0.14 ^a
总呈味氨基酸 ΣFAA	30.65±3.15 ^B	33.85±3.49 ^A	32.67±3.38 ^A	32.16±3.24 ^A	31.67±3.26 ^B	33.02±3.36 ^A
半胱氨酸 Cys-s	0.19±0.12 ^a	0.26±0.03 ^a	0.20±0.11 ^a	0.21±0.08 ^a	0.19±0.10 ^a	0.23±0.06 ^a
组氨酸 His	1.30±0.09 ^a	1.29±0.07 ^a	1.49±0.05 ^a	1.40±0.13 ^a	1.40±0.12 ^a	1.30±0.09 ^a
精氨酸 Arg	5.71±0.82 ^B	7.43±0.47 ^A	5.86±0.87 ^B	6.88±0.34 ^A	5.79±0.76 ^B	7.15±0.47 ^A
丝氨酸 Ser	2.74±0.11 ^a	2.92±0.08 ^a	2.88±0.32 ^a	2.83±0.15 ^a	2.81±0.23 ^a	2.88±0.12 ^a
脯氨酸 Pro	3.68±0.98 ^{AB}	2.47±0.39 ^B	4.63±0.55 ^A	3.13±0.24 ^B	4.10±0.88 ^a	2.80±0.46 ^b
氨基酸总量 ΣTAA	62.68±2.44 ^B	69.75±2.78 ^A	68.53±2.58 ^A	67.59±2.55 ^A	65.58±2.51 ^B	68.63±2.67 ^A
TEAA/TAA	0.33±0.00 ^a	0.35±0.00 ^a	0.34±0.00 ^a	0.35±0.00 ^a	0.34±0.01 ^a	0.35±0.01 ^a

由于色氨酸在酸性水解过程中被破坏没有被检测出来,从中华绒螯蟹肌肉中共测出 17 种游离氨基酸(表 4)。冰鱼组肌肉氨基酸总量(Σ TAA)、呈味氨基酸总量(Σ FAA)显著高于配合饲料组($P<0.05$)。从单个氨基酸来看,除脯氨酸之外,其他氨基酸冰鱼组都略高于配合饲料组,其中赖氨酸和精氨酸显著高于配合饲料组($P<0.05$);从雌、雄个体看,中华绒螯蟹在蛋氨酸、赖氨酸、谷氨酸、甘氨酸、精氨酸、脯氨酸,这 6 个氨基酸组间存在显著差异($P<0.05$)。

2.4 配合饲料和冰鱼投喂对中华绒螯蟹肌肉脂肪酸组成及含量分析

表5 配合饲料组和冰鱼组中华绒螯蟹肌肉脂肪酸组成与含量(总脂肪酸)
Tab.5 The composition and content of fatty acids in the muscles of *E.sinensis* reared in the "Crab Palace" system with formula feed and frozen fish (total fatty acid) (% , n=12)

fatty acids 脂肪酸	雌 female		雄 male		雌+雄 the sum of female and male	
	配合饲料	冰鱼	配合饲料	冰鱼	配合饲料	冰鱼
	formula feed	frozen fish	formula feed	frozen fish	formula feed	frozen fish
C14:0	1.12±0.01 ^a	1.18±0.23 ^a	1.12±0.07 ^a	1.29±0.16 ^a	1.12±0.05 ^a	1.24±0.19 ^a
C15:0	0.52±0.01 ^a	0.51±0.01 ^a	0.53±0.01 ^a	0.49±0.02 ^a	0.53±0.01 ^a	0.40±0.02 ^a
C16:0	18.49±0.27 ^a	17.60±0.54 ^b	17.02±0.36 ^b	18.06±0.41 ^a	17.75±0.85 ^a	17.83±0.50 ^a
C17:0	0.53±0.01 ^a	0.52±0.01 ^a	0.52±0.01 ^a	0.52±0.02 ^a	0.53±0.01 ^a	0.52±0.01 ^a
C18:0	4.08±0.07 ^a	4.01±0.30 ^a	3.65±0.10 ^a	3.98±0.19 ^a	3.87±0.25 ^a	4.00±0.22 ^a
Σ SFA	25.00±6.35 ^a	24.09±6.04 ^a	23.11±5.83 ^b	24.62±6.19 ^a	24.07±6.09 ^a	24.26±6.12 ^a
C16:1	2.90±0.72 ^b	3.22±0.40 ^a	2.93±0.10 ^b	3.48±0.27 ^a	2.92±0.08 ^b	3.35±0.34 ^a
C18:1n-9	37.63±0.64 ^b	40.26±2.63 ^a	40.32±0.98 ^a	40.87±1.39 ^a	38.97±1.65 ^b	40.56±1.91 ^a
C20:1	1.95±0.17 ^a	2.05±0.14 ^a	2.24±0.21 ^a	2.04±0.05 ^a	2.09±0.23 ^a	2.04±0.09 ^a
C22:1n-9	0.40±0.06 ^a	0.47±0.03 ^a	0.47±0.06 ^a	0.42±0.01 ^a	0.43±0.07 ^a	0.44±0.03 ^a
Σ MUFA	42.88±17.97 ^b	46.00±19.21 ^a	45.96±19.25 ^a	46.81±19.49 ^a	44.41±18.61 ^a	46.39±19.34 ^a
C18:2n-6(LA)	15.64±0.19 ^b	16.94±0.81 ^a	17.24±0.52 ^a	16.59±0.51 ^a	16.44±0.94 ^a	16.77±0.63 ^a
C18:3n-3(LNA)	2.85±0.22 ^a	2.97±0.14 ^a	3.25±0.07 ^a	2.90±0.14 ^b	3.05±0.27 ^a	2.94±0.13 ^a
C18:3n-6	0.57±0.04 ^a	0.61±0.03 ^a	0.57±0.02 ^a	0.57±0.12 ^a	0.57±0.03 ^a	0.59±0.08 ^a
C20:3n-6	0.98±0.01 ^a	0.87±0.10 ^a	0.90±0.03 ^a	0.85±0.05 ^a	0.94±0.05 ^a	0.87±0.08 ^a
C22:3	0.53±0.03 ^a	0.44±0.16 ^a	0.43±0.07 ^a	0.43±0.05 ^a	0.48±0.07 ^a	0.44±0.11 ^a
C20:4n-6(ARA)	3.23±0.18 ^a	2.21±0.95 ^b	2.29±0.45 ^a	1.92±0.40 ^a	2.76±0.60 ^a	2.07±0.67 ^b
C22:4	1.18±0.59 ^a	1.03±0.43 ^a	1.04±0.24 ^a	0.91±0.18 ^a	1.11±0.41 ^a	0.97±0.30 ^a
C20:5n-3(EPA)	0.65±0.05 ^a	0.43±0.14 ^b	0.43±0.07 ^a	0.43±0.05 ^a	0.54±0.13 ^a	0.43±0.09 ^a
C22:5n-3	0.58±0.01 ^a	0.47±0.16 ^a	0.46±0.04 ^a	0.43±0.03 ^a	0.52±0.07 ^a	0.45±0.10 ^a
C22:6n-3(DHA)	5.35±0.64 ^a	3.35±1.57 ^b	3.75±0.83 ^a	2.92±0.68 ^b	4.55±1.09 ^a	3.13±1.11 ^b
Σ PUFA	32.12±4.50 ^a	29.89±4.84 ^b	30.91±4.74 ^b	28.51±4.59 ^c	31.52±4.70 ^a	29.22±4.79 ^a
Σ HUFA	12.50±1.83 ^A	8.80±1.12 ^{BC}	9.30±1.25 ^B	7.89±0.95 ^C	10.90±1.54 ^a	8.36±1.03 ^b
Σ n-3PUFA	9.43±2.26 ^a	7.22±1.57 ^{bc}	7.89±1.78 ^b	6.68±1.43 ^c	8.66±1.98 ^a	6.95±1.50 ^b
Σ n-6PUFA	20.42±7.12 ^a	20.63±7.89 ^a	21.00±8.03 ^a	19.93±7.76 ^a	20.71±7.57 ^a	20.30±7.82 ^a
n-3/n-6	0.46±0.02 ^a	0.35±0.01 ^a	0.38±0.01 ^a	0.34±0.01 ^a	0.42±0.02 ^a	0.34±0.01 ^a
DHA+EPA	6.01±0.65 ^A	3.78±0.98 ^B	4.18±0.86 ^A	3.35±0.72 ^B	5.10±1.21 ^a	3.56±1.18 ^b

从中华绒螯蟹肌肉中共检测出 19 种脂肪酸(表 5),其中 2 组间肌肉饱和脂肪酸(Σ SFA)、单不饱和脂肪酸(Σ MUFA)和多不饱和脂肪酸(Σ PUFA)总量均无显著差异($P>0.05$),而高度不饱和脂肪酸(Σ HUFA)和 DHA+EPA 含量则是配合饲料组显著

高于冰鱼组($P<0.05$)。从单个脂肪酸看,在单不饱和脂肪酸(Σ MUFA)中棕榈油酸(C16:1)和油酸(C18:1n-9)含量组间差异显著($P<0.05$);在多不饱和脂肪酸(Σ PUFA)中ARA和DHA等脂肪酸含量组间差异显著($P<0.05$)。3 讨论

3.1 配合饲料和冰鱼投喂对中华绒螯蟹生长性能的影响

饲料是养殖甲壳类营养物质和能量的重要来源,饲料的质量和营养直接影响着中华绒螯蟹的生长和存活^[13]。本研究发现,配合饲料和冰鱼投喂对中华绒螯蟹FBW、WGR和SGR、MI无显著影响,而投喂配合饲料组的中华绒螯蟹成活率显著高于冰鱼组,表明配合饲料投喂对中华绒螯蟹有着较高的成活率、相对较短的蜕壳间隔和较快的生长速度,这与杨丽丽等^[5]在中华绒螯蟹、贲玲芝等^[14]在三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)的研究结果一致,这可能是配合饲料中添加了复合维生素和少量微量元素,提升了中华绒螯蟹免疫抗应激的能力,而海捕冰鱼腐败后通常含有生物胺或携带病菌和有毒重金属^[15,16,17],这些可能造成了冰鱼组成活率低。这表明配合饲料组比冰鱼组对中华绒螯蟹有着更好的养殖性能,可以进一步扩大推广。

近年来,越来越多的研究表明甲壳类不同生长阶段的营养有所不同,通常成体阶段的蛋白需求低于幼体和稚体阶段,而脂肪需求却高于这2个阶段,且成体阶段雌雄个体也表现出极大的差异^[18,19,20]。本研究发现,配合饲料和冰鱼投喂对雌、雄中华绒螯蟹不同蜕壳阶段的体质量(BW)、WGR和SGR的增长有所差异。黄姝等^[21]对实验条件下中华绒螯蟹上的研究结果也表明,中华绒螯蟹BW呈缓慢上升趋势,而WGR和SGR则是先升后降,这与本文研究结果一致。本研究表明雌蟹第3次蜕壳后冰鱼组对中华绒螯蟹BW的增加极显著高于配合饲料组,这可能由于中华绒螯蟹在经历2~3次蜕壳后,进入生殖蜕壳阶段^[22],该阶段中华绒螯蟹性腺开始发育,大量物质开始积累,中华绒螯蟹更偏向于摄食脂肪源更高的冰鱼来增加体质量。对于雌蟹,尤其是第2次蜕壳后的增重率WGR增长最快,这主要由于雌蟹肩负着生殖的任务,冰鱼更高的能量源能提升雌蟹对营养员的吸收与转化,加之第2壳正值5—6月份,水温稳定,昼夜温差不大,加快了雌蟹的生长速度,这与周刚等^[23]研究结果相一致。相反,雄蟹WGR则表现出配合饲料组优于冰鱼的结果,这可能由于雌体蜕壳早于雄体,配合饲料中更加均衡的营养,利于蜕壳前的营养积累,导致了第1次蜕壳和第4次蜕壳后配合饲料和冰鱼投喂其增重率的差异性。SGR则是配合饲料组要好于冰鱼组,且第1次蜕壳差异显著,可能由于配合饲料更好的适口性和诱食效果能够提升中华绒螯蟹前期的SGR。本实验表明2种饲

料投喂对中华绒螯蟹不同蜕壳期和性别有着明显的差异,这也为中华绒螯蟹养殖精准投喂和饲料选择有着重要的帮助。

3.2 配合饲料和冰鱼投喂对中华绒螯蟹肥满度及性腺发育的影响

生殖蜕壳是甲壳类动物由未成熟向性成熟发展的重要过程,是性腺发育的最初阶段^[24]。成蟹的品质不仅影响其市场需求,而且还影响其可食性产量和营养价值,而成蟹品质的好坏则由成蟹的发育度和肥满度决定,而其肝胰腺和性腺的发育度则决定着整体的肥满度^[25,26]。相关研究发现,冰鱼不仅具有高蛋白和高脂肪的特点,而且还具有一定的外源性消化酶,因此中华绒螯蟹对冰鱼等动物蛋白源的消化和能量积累要高于植物性蛋白源以及配合饲料^[27,28]。本研究与之前研究恰好相反,在该养殖条件下配合饲料投喂对中华绒螯蟹 HSI 向 GSI 转化要好于冰鱼,但是配合饲料和冰鱼投喂对中华绒螯蟹 CF、HSI 和 GSI 无显著影响。魏建军等^[29]对中华绒螯蟹的研究表明,养殖环境中,中华绒螯蟹摄食维生素丰富的水草,可以保证机体营养物质的正常代谢,可有效提高营养物质的转化率,这可能是配合饲料中添加的复合维生素对成蟹性腺的积累起到了促进作用。

3.3 配合饲料和冰鱼投喂对中华绒螯蟹肌肉游离氨基酸的影响

中华绒螯蟹的营养价值和商业价值主要取决于其可食部位的营养成分和品质含量,而其风味主要与游离氨基酸和脂肪酸的含量有关,而影响其风味和营养最直接的则是饵料类型和质量^[30,31]。相关研究表明,饵料中的蛋白质在水产动物体内消化,转变成各种氨基酸,输送至各个组织细胞中,合成自身特殊的蛋白质和活性物质^[32]。氨基酸的变化主要与能量利用和蛋白质合成相关,冰鱼有着更高的蛋白质含量,且具有一定的外源消化酶促进了中华绒螯蟹对冰鱼蛋白质中氨基酸的利用率与吸收^[27],分析可能是本研究冰鱼组中华绒螯蟹肌肉中的总必须氨基酸($\sum\text{TEAA}$)、总呈味氨基酸($\sum\text{FAA}$)、氨基酸总量($\sum\text{TAA}$)以及绝大多数氨基酸含量均是冰鱼组优于配合饲料组的主要原因。周凡等^[33]对水产动物研究表明,精氨酸的含量越高,水产动物的生长速度越快,这与本研究结果一致,分析可能是冰鱼中精氨酸含量丰富,促进了冰鱼组中华绒螯蟹的生长性能。熊益民等^[34]研究了低鱼粉饲料中添加不同脯氨酸对凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)生长的影响,发现脯氨酸对生长无明显影响,只是随着添加量的增加而增加,这与本研究中冰鱼组中华绒螯蟹肌肉脯氨酸含量显著小于配合饲料组一致,这可能是配合饲料中所存在的脯氨酸含量可能高于冰鱼组。

3.4 配合饲料和冰鱼投喂对中华绒螯蟹肌肉脂肪酸的影响

蟹类机体脂肪酸组成含量与饵料脂肪酸含量具有直接的相关性^[35,36]。阙有清等^[37]对配合饲料替代杂鱼研究发现,配合饲料和杂鱼对中华绒螯蟹肝胰腺和性腺影响较大,而对肌肉脂肪酸影响较少,这与本研究配合饲料和冰鱼投喂对总饱和脂肪酸(Σ SFA)、总单不饱和脂肪酸(Σ MUFA)、总多不饱和脂肪酸(Σ PUFA)和总高度不饱和脂肪酸(Σ HUFA)无显著差异所一致,这可能由于中华绒螯蟹性腺和肝胰腺脂肪酸周转代谢较快,而肌肉脂肪酸组成相对稳定^[38]。Kimata 等^[39]研究发现棕榈酸油(C16:1)含量与口味之间存在着较高的正相关性,棕榈油酸含量越高肌肉品质也越好,本研究表明冰鱼组中棕榈油酸(C16:1)和油酸(C18:1n-9)含量要显著高于配合饲料,这可能是冰鱼有着更丰富的脂肪源,促进了两种脂肪酸的积累。相反,配合饲料组投喂却在ARA(C20:4n-6)和DHA(C22:6n-3)两类脂肪酸含量上显著高于冰鱼组,这可能是配合饲料具有更加均衡的配方,利于这两种脂肪酸的吸收与积累。

总之,该养殖条件下,中华绒螯蟹在配合饲料和冰鱼投喂下能完成生长蜕壳,但是性腺发育配合饲料却有着更明显的促进作用,中华绒螯蟹肌肉的营养品质虽然冰鱼要好于配合饲料投喂,但二者差异并不是很明显。综合比较配合饲料和冰鱼投喂 2 种方式,配合饲料投喂对中华绒螯蟹产业发展有着巨大的潜力和优势。

参考文献: 略