



福建省水产饲料研究会 信息简报

B-2088184-5

第 9 期 (总第 359 期)

2022 年 5 月 15 日

目录

本会动态	1
本会开展评估材料和年报检查整理工作	1
重要资讯	1
农业农村部畜牧兽医局关于组织开展新版兽药 GMP 实施情况清理行动的通知	1
农业农村部印发《关于 2022 年伏季休渔期间特殊经济品种专项捕捞许可和捕捞辅助船配套服务安排的通告》	4
2022 年第一次国家农产品质量安全抽检总体合格率 97.7%	6
农业农村部：严查青贮小麦等各类毁麦违法违规行为	6
农业农村部组织开展 2022 年全国水产养殖业执法行动	8
行业资讯	9
湛江疫情引发当地水产行业饲料运输困难	9
福建省海洋与渔业局印发《福建省渔业捕捞作业核准规则》	10
陕西加快推进渔业高质量发展	12
烟台长岛上线智慧治理渔船管理系统，赋能渔业综合管理	14
汕头海门国家级渔港经济区建设规划出炉	14
2022 年福建省海洋伏季休渔暨联合执法行动启动仪式举行	16
典型案例	17
三明市将乐生态环境局强制整治非法牛蛙养殖场	17
会议传递	17
2022 年全球水产博览会如期开幕	17
会议通知	19
2022 第三届中国漳州国际水产养殖产业博览会延期通知	19
经营管理	20
在上海思考管理	20
研究进展	23
新型蛋白源在水产饲料中的应用研究进展	23
科学研究	37
大口黑鲈摄食含小肽饲料后的胃排空特征和消化酶活性变化	37
新型植物提取物添加剂对大口黑鲈生长、抗氧化及糖代谢影响的研究	49
饲料研发	58
不同直链淀粉 / 支链淀粉比对大口黑鲈饲料加工特性、营养物质表观消化率和肠道消化酶活性的影响	58
低鱼粉饲料中添加苏氨酸对三倍体虹鳟抗氧化能力、消化生理及肠道炎症因子基因表达的影响	69



福建省水产饲料研究会 信息简报

B-2088184-5

第 9 期 (总第 359 期)

2022 年 5 月 15 日

本会动态

本会开展评估材料和年报检查整理工作

4 月 29 日, 受本会艾春香理事长和翟少伟秘书长委托, 邵建春副秘书长与秘书处刘淑熙老师、郑香霖老师在研究会开展评估材料和年报检查整理工作。本会近两个月将陆续迎来福建省学术类社会团体评估和年报提交两项重要年度工作, 研究会对此高度重视, 提前对两项工作查漏补缺, 充分保障两项工作顺利开展。在本次检查整理工作中, 刘淑熙老师和郑香霖老师对评估材料作了进一步整理归类, 邵建春副秘书长就年报填报的各项资料进行了梳理。此外, 三人还对近期民政厅开展的社会团体分支机构专项整治行动交换了意见, 并初步整理了相关材料。



重要资讯

农业农村部畜牧兽医局关于组织开展新版兽药 GMP 实施情况清理行动的通知

各省、自治区、直辖市农业农村(农牧)、畜牧兽医厅(局、委), 新疆生产建设兵团农业农村局, 中国兽药药品监察所:

为全面实施《兽药生产质量管理规范(2020 年修订)》(以下简称新版兽药 GMP), 切实提高兽药生产质量管理水平, 按照《兽药管理条例》和农业农村部公告第 293 号有关

要求，我局拟于 2022 年 6 月 1 日零时起组织开展新版兽药 GMP 实施情况清理行动（以下简称清理行动）。现就有关事项通知如下。

一、行动目标

通过开展清理行动，严厉打击违法违规生产销售兽药等行为，维护公平竞争市场秩序，不断提升兽药产品质量安全水平，促进兽药产业高质量发展。

二、行动措施

（一）停止兽药生产活动。截止 2022 年 6 月 1 日零时，凡未通过新版兽药 GMP 检查验收的兽药生产企业（生产车间），一律停止兽药生产活动，国家兽药追溯系统将关闭其兽药产品二维码申请功能、产品入库功能；6 月 1 日零时前生产的兽药产品，在产品有效期内可继续销售，国家兽药追溯系统保留其兽药产品出库功能。

（二）注销兽药生产许可和兽药产品批准文号。截止 2022 年 6 月 1 日零时，对未通过新版兽药 GMP 检查验收且未经省级畜牧兽医主管部门批准延期开展兽药 GMP 检查验收的企业（生产车间），按照“谁审批、谁负责”的原则，由省级畜牧兽医主管部门和农业农村部及时注销其兽药生产许可证或相应生产范围，以及相关兽药产品批准文号。

（三）停止兽药委托生产活动。自 2022 年 6 月 1 日零时起，按照《农业农村部办公厅关于新版兽药 GMP 过渡期内实施兽药委托生产的通知》（农办牧〔2020〕55 号）要求，停止委托加工活动。

（四）查处违法违规兽药产品。强化兽药市场监督管理，坚持网上网下一体化监管，发现假、劣兽药，一律查封扣押相关兽药，依法严肃查处，同时开展追踪溯源，捣毁非法生产兽药的“黑窝点”“黑工厂”。对发现兽药标签或最小销售包装未标注二维码、二维码无法识读或查询不到追溯信息等情况，一律下架相关兽药产品、退回兽药生产企业，并责令兽药生产企业限期整改，逾期未改正的，依法严肃查处。

（五）规范管理兽药 GMP 检查验收延期企业。经省级畜牧兽医主管部门批准延期的企业（生产车间），在延期期间，企业停止相关兽药生产活动。批准延期的企业应在延期期间提出新版兽药 GMP 检查验收申请。对延期到期后提交兽药 GMP 检查验收申请的企业，按照新建兽药生产企业有关要求处理，并在延期到期时依法注销其已持有的兽药产品批准文号。

三、任务分工

农业农村部畜牧兽医局负责协调推进清理行动，依法注销相关兽药产品批准文号。

省级畜牧兽医主管部门负责组织开展本辖区内清理行动，依法注销相关兽药生产许可证及相关生产范围，组织查处违法违规行为；通过国家兽药生产许可系统及时报送兽药生产企业变化信息，及时向我局报送需注销的兽药产品批准文号信息和相关工作情况。

中国兽医药品监察所负责协助推进清理行动，及时掌握新版兽药 GMP 实施情况，承担相关技术支撑工作，及时核实各地报送的有关信息，定期报告兽药生产企业清理情况。

四、行动安排

（一）组织部署（5 月 15 日至 5 月 31 日）。省级畜牧兽医主管部门要掌握本行政区域内兽药生产企业实际情况，及时向所有企业告知兽药 GMP 实施和清理行动部署安排。要按照本通知要求，制定清理行动实施方案，明确兽药行政审批、行业管理、综合执法、检验检测等相关部门或机构的任务分工。

（二）集中清理（6 月 1 日至 6 月 30 日）。中国兽医药品监察所根据各省份报送的最新兽药生产企业情况，及时核实信息，于 6 月 1 日零时起关闭相关兽药生产企业兽药产品二维码申请、产品入库功能。省级畜牧兽医主管部门要组织开展专项监督检查，对照生产企业具体情形、对标具体清理措施，及时监督关停有关兽药生产企业或相关生产车间，依法注销兽药生产许可证和相关生产范围，并通过国家兽药生产许可证系统第一时间报送信息，确保检查不留空挡、工作不落项。请省级畜牧兽医主管部门于 6 月 15 日前将注销的兽药生产企业或部分生产范围有关情况报我局。

（三）市场整治（7 月 1 日至 10 月 31 日）。省级畜牧兽医主管部门要在生产环节清理工作的基础上，开展兽药市场专项整治，特别是加大对兽药经营使用环节的监督检查力度，依法严肃查处违法违规行为；要及时追踪溯源问题线索，彻查违法源头；对涉及外埠兽药产品的，要加强协作配合，第一时间将有关情况通报标称兽药生产企业所在地省级畜牧兽医主管部门，形成跨省份、跨区域监管合力。我局将适时组织对各地清理行动开展情况进行抽查。

（四）工作总结（11 月 1 日至 11 月 30 日）。省级畜牧兽医主管部门要及时报送清理行动中查处的大案、要案有关情况，总结清理行动工作，并于 11 月 30 日前将清理行动工作总结报我局。同时，要及时完善监督管理措施，对兽药违法行为保持高压严打态势。

五、联系方式

农业农村部畜牧兽医局冯华兵 010 - 59192819

中国兽医药品监察所陈莎莎 010 - 62103531。

转摘自农业农村部网站

农业农村部印发《关于 2022 年伏季休渔期间特殊经济品种专项捕捞许可和捕捞辅助船配套服务安排的通告》

为加强海洋伏季休渔监管，规范伏季休渔期间专项捕捞管理，推进实施捕捞限额制度，根据《农业农村部关于调整海洋伏季休渔制度的通告》（农业农村部通告〔2021〕1号），4月24日，农业农村部印发《关于 2022 年伏季休渔期间特殊经济品种专项捕捞许可和捕捞辅助船配套服务安排的通告》（农业农村部通告〔2022〕2号），对 2022 年伏季休渔期间特殊经济品种专项捕捞许可及捕捞辅助船配套服务安排有关事项作出安排部署。

一、特殊经济品种专项捕捞许可

2022 年伏季休渔期间专项捕捞许可品种为海蜇、口虾蛄、毛虾、鱿鱼、丁香鱼和脊腹褐虾、葛氏长臂虾。上述品种专项捕捞许可作业海域、作业时间、作业船数、捕捞限额、作业类型、渔具网目尺寸和定点上岸渔港等详见附件 1。

二、捕捞辅助船配套服务专项许可

2022 年捕捞辅助船配套服务专项许可作业海域、作业时间、渔船数量等详见附件 2。

三、有关要求

各有关省（直辖市）渔业主管部门要高度重视，加强组织领导，严格落实属地监管责任，制定周密的专项捕捞实施方案，切实执行好以下制度措施。

（一）严格遴选作业渔船。申请从事专项许可作业的渔船须办理专项（特许）捕捞许可证。2021 年有违规记录及证书证件不齐、失效，或者列入各地“船证不符”整治对象的渔船不得批准从事专项捕捞，省级渔业主管部门应当在政府或部门的网站以及渔港对获准从事专项捕捞的渔船名单进行公告，并将批准的渔船名单于专项捕捞实施前报农业农村部渔业渔政管理局。伏季休渔期间因科学研究、资源调查等特殊需要出海作业的，应当由省级渔业主管部门或农业农村部另行批准。为内地与港澳之间养殖水产品提供运输服务的辅助船，由广东省农业农村厅批准。

（二）渔船标识管理。各地要对伏季休渔期间专项捕捞渔船实行标识管理，定期检查渔船专项捕捞标识悬挂情况。专项捕捞渔船标识要醒目、易识别，标识样式由各省（直辖市）自行确定。

（三）渔船进出港报告。各地要按照《农业农村部关于施行渔船进出港报告制度的通告》（农业农村部通告〔2019〕2号）有关要求，认真落实渔船进出港报告制度，加强对专项捕捞作业渔船和捕捞辅助船进出港报告执行情况的检查。专项捕捞开捕前，各地要对专项捕

捞渔船的标识、证书证件、渔具网目尺寸、渔船通导设备以及船员配备等情况进行全面排查，确保渔船安全合规生产。

（四）渔获物定点上岸。各地要加强定点渔港管理，实行渔获物定点上岸，每个定点渔港配备不少于 2 名执法监管人员，组织大中型渔船通过“渔港通 APP”（通过手机应用市场下载安装）报送渔获产量，小型渔船通过“渔港通 APP”或其他方式报送渔获产量，加强对渔船执法检查，建立检查台账记录。各级渔业主管部门登录“中国渔政管理指挥系统”，进入“渔港综合管理”子系统开展渔船专项捕捞报告信息的监控、审核和上报工作，对渔获物进行实时统计汇总。

（五）限额捕捞。各地要组织做好专项捕捞渔获物产量统计，建立限额捕捞预警机制，捕捞产量达到捕捞限额时，立即召回生产渔船，停止捕捞生产，确保不超过捕捞限额。

（六）科学观察员制度。各地要对专项捕捞渔船建立科学观察员制度，伏季休渔期间每种作业方式每天至少派出 2 名观察员随作业渔船出海，了解渔获物幼鱼比例执行情况、兼捕渔获物等渔船生产情况。农业农村部也将组织团队驻港观察。

（七）渔船船位动态监控。各地要建立渔船船位动态监控机制，对专项捕捞渔船进行实时监控、动态监管，坚决杜绝越界捕捞和违规出海行为，对未开启或关闭船位监控设备的渔船要及时予以召回并依法惩处。

（八）执法船伴航执法。各地要在禁渔区线内专项捕捞作业海域安排渔政船伴航执法，定期对渔船和捕捞辅助船开展登临检查，重点检查渔具最小网目尺寸，渔获物幼鱼比例、兼捕以及渔捞日志记录情况等，切实加强专项捕捞渔船监管。有关省份要协调配合海警做好禁渔区线外鱿鱼等品种专项捕捞的执法工作。

（九）加强渔船安全监管。各地要进一步完善防汛防台风预案，加强风险隐患排查治理，确保渔船“不安全不出海、不安全不作业”。同时，严格落实事故直报制度，加强 24 小时应急值班和领导带班，确保信息畅通。

（十）违法违规处理。对发生违法违规行为的渔船，应当立即终止其专项捕捞资格，并依据《中华人民共和国渔业法》等相关法律法规规定予以严厉处罚。对监管不力发生严重违法违规事件或较大以上生产安全事故的地区，实行熔断机制，所属渔船应当立即予以召回整改，并视情节轻重暂停或取消该地区相关特殊经济品种的专项捕捞许可。

各省（直辖市）渔业主管部门要在专项捕捞作业结束后及时开展工作总结和对资源状况的影响评估，总结评估情况将作为来年专项捕捞许可安排依据。农业农村部将适时对专项

捕捞执行情况进行专项执法检查。

转摘自农业农村部网站

2022 年第一次国家农产品质量安全抽检总体合格率 97.7%

2022 年 1 月~3 月，农业农村部组织开展了 2022 年第一次国家农产品质量安全例行监测工作，抽检蔬菜、畜禽产品和水产品等 3 大类产品 86 个品种 127 项参数 6910 个样品，总体合格率为 97.7%。

据介绍，2022 年第一次例行监测共抽检了 31 个省份的 112 个大中城市的 586 个蔬菜生产基地、426 辆蔬菜运输车、285 个屠宰场、169 个养殖场、665 辆（个）水产品运输车和暂养池、476 个农产品批发（农贸）市场。结果显示，**蔬菜、畜禽产品和水产品合格率分别为 97%、99%和 97.4%。**

从监测品种看，抽检的蔬菜中，水生蔬菜全部合格，瓜类蔬菜、食用菌、甘蓝类蔬菜和叶菜类蔬菜合格率分别为 98.9%、98.7%、98.5%和 97.9%。抽检的畜禽产品中，猪肝全部合格，猪肉、牛肉、羊肉、禽肉和禽蛋的抽检合格率分别为 99.7%、97.8%、99.5%、98.2%和 98.5%。抽检的大宗养殖水产品中，**鲮鱼、对虾和鳊鱼全部合格，草鱼和鲤鱼合格率分别为 99.5%和 99.3%。**

农业农村部已及时将监测结果通报各地，要求地方农业农村部门采取针对性措施管控风险，在重点区域和重点环节加大抽检数量，对本地区农产品质量安全状况做到心中有数。同时印发通知，要求抓好近期新冠肺炎疫情防控特殊时期农产品质量安全工作，严防出现因禁限用药物导致的重大质量问题，保障日常巡查检查、检验检测、认证审核、承诺达标合格证等基础工作不断档。

转摘自中国水产微信公众号

农业农村部：严查青贮小麦等各类毁麦违法违规行为

近日，农业农村部又下发通知要求各地进一步全面排查毁麦开工、青贮小麦等各类毁麦情况，对违法违规行为，发现一起处理一起。相对于青储小麦转饲用引发的热议，实际上，满足饲料需求一直是小麦消费的主要去向之一。特别是自 2020 年以来，我国玉米供应偏紧、价格上涨，玉米、小麦价格倒挂使得大量小麦进入饲用领域，部分饲料企业已更改配方使用小麦。但是，今年以来，随着小麦价格的抬升，小麦也已经基本退出饲用领域。据国家粮油信息中心的预计，今年小麦饲用总量，预计或在 2200 万~2500 万吨，较上年减量接近一半。

1.青储小麦转饲用？农业农村部表态

最近，短视频平台流传农民一亩青储小麦能卖 1500 块钱，此举备受市场争议。

5 月 10 日，农业农村部相关司局负责人接受新华社采访时表示，农业农村部对此高度重视，“五一”期间就组织相关省份进行核查核实。近日，农业农村部又下发通知要求各地进一步全面排查毁麦开工、青贮小麦等各类毁麦情况，对违法违规行为，发现一起处理一起。

该负责人表示，去年以来小麦生产经历了抗秋汛、促弱苗、防病虫害等多个关口，经过多方努力，目前小麦长势良好，丰收的好形势实属不易。下一步，农业农村部将指导各地持续强化小麦后期田管，落实“一喷三防”全覆盖等增产措施，提前组织好跨区机收，确保颗粒归仓。该负责人强调，还有 20 天左右小麦就成熟收获了，对被征用为建设用地的麦田，也要在小麦成熟收获后再开工建设，珍惜农民朋友 200 多天的劳动成果，中国人的饭碗大家一起端。

河南地区一家中型粮库负责人对证券时报·券商中国记者表示，历年来小麦上市前也存在这种现象。农户会将一些生长品质不好的小麦提前收割，卖给饲料厂。“但是，作为青储饲料售卖，不存在价格优势。而且农民把小麦作青储售卖也只属个别现象，销售半径一般都在本地区，跨地市的都很少。养殖场对青储饲料的消耗都是有限的，只有部分农户才能卖出去。”

“相比于待小麦成熟后收割，做青储饲料的收入未必更高，只是在收割、仓储等环节相对省事一些。从今年情况看，小麦收割后不低于 1.5 元/斤，加上一些补贴，卖粮比青储更划算。”河南滑县一位种植大户表示。

出于对粮食安全的保护，今年部分省份出台政策，禁止小麦进行青储售卖。据最新消息，河南省发布紧急通知，严禁任何毁麦事件发生，《通知》指出要加强麦田保护，坚决杜绝毁麦。任何地方、任何单位、任何人员不得以任何理由毁麦或将小麦用于青贮饲料。

2.小麦跨界做饲料，消费量约 3000 万吨

相对于青储小麦转饲用引发的热议，实际上，饲料需求一直是小麦消费的主要去向之一。在夏粮的购销市场上，制粉企业、饲料企业、储备企业和各类贸易商，都是入市收购的主体。

特别是，自 2020 年以来，我国玉米供应偏紧、价格上涨，玉米、小麦价格倒挂使得大量小麦进入饲用领域，部分饲料企业已更改配方使用小麦，从而拉动小麦市场购销火爆，

支撑小麦价格走高。

根据国家粮油信息中心的预计，2020/2021 年度，我国小麦饲用量 3800 万吨，创历史新高，较 2000/2001 年度的 820 万吨增长 363%。而 2021/2022 年度饲料消费及损耗为 3560 万吨，比上年度减少 240 万吨。对于今年小麦饲用总量，预计或在 2200 万~2500 万吨，较上年减量接近一半。

“小麦和稻谷有一部分用作饲料，不会对我们的口粮安全产生任何影响。” 国家粮油信息中心首席分析师王晓辉曾在去年的新闻通气会上如此表示。

数据显示，国内小麦供需多年平衡有余。从供给看，我国小麦产量总体增加，小麦常年产量在 1.25 亿吨至 1.35 亿吨，年度之间面积波动不大。从需求看，我国小麦需求主要包括食用需求、工业需求和饲用需求，消费数量和结构呈现“食用稳、饲用增、总量增”的特点。

其中，食用需求相对稳定，年度间波动不大，消费量 9000 万吨左右；工业需求量小幅波动，消费量 1000 万吨左右；饲用消费受小麦品质、玉米与小麦价差等因素影响，年度之间波动较大，近 20 年在 700 万吨至 3500 万吨之间波动，年平均消费量 1382 万吨。

3.国内饲料价格开始纷纷下调

进入 5 月份之后，伴随着豆粕价格一跌再跌，国内饲料价格已经出现了回落苗头，部分企业已经有所下调猪料、禽料饲料价格，最高下降近 300 元/吨。

“目前小麦也已经基本退出饲用领域，小麦价格太高了。”四川地区一家饲料企业表示。对此，国家粮油信息中心预计，对于今年小麦饲用总量，预计或在 2200 万~2500 万吨，较上年减量接近一半。

根据国家粮食与储备局在 5 月 10 日公布的数据，全国主要粮食品种收购价格周报显示，全国小麦平均收购价格达到 3109 元/吨。而截至 5 月初，全国玉米均价为 2685 元/吨，较 2022 年初上涨 167 元/吨，涨幅高达 6.7%。

为了加大玉米、大豆等饲料原料供给，国内也加大了进口力度。海关数据显示，2022 年 4 月我国进口大豆 807.9 万吨，比上月的 635.3 万吨增加 27.2%，但比上年同期的 744.8 万吨增加 8.5%，创历史同期新高。

转摘自腾氏水产微信公众号

农村部组织开展 2022 年全国水产养殖业执法行动

近日，农业农村部下发《关于开展水产养殖业执法行动的通知》，在全国范围内组织开

展水产养殖业执法行动。全国 31 个省（区、市）将重点针对水域滩涂养殖证制度、水产苗种生产许可证制度、水产苗种产地检疫制度、水产养殖生产记录制度执行情况以及水产养殖用投入品生产、经营和使用执行情况进行检查。

开展水产养殖业执法检查是保障水产品安全有效供给，提升养殖水产品质量安全水平，强化水产养殖行业管理的重要手段。农业农村部要求，各省（区、市）主管部门、执法机构和检测机构三方各司其职、紧密联系，强化监管执法，做好检打联动，严查违法行为，切实推动水产养殖业高质量发展。

转摘自农业农村部渔业渔政管理局网站

行业资讯

湛江疫情引发当地水产行业饲料运输困难

突然其来的疫情让湛江水产养殖行业措手不及，目前坡头南三、官渡、坡头、乾塘等养殖重镇处于今年新一轮养殖阶段，虾苗、鱼种投放覆盖率已达 7-8 成。那么，疫情当前如何保障饲料正常供应，保障水产养殖的顺利进行，已成为水产人眼下最重要的头等大事。

南三 200 多万斤存塘虾告急

“封控区内养殖户所剩的饲料不多了！”南三饲料业务员李明（化名）说道。由于目前当地成品虾量还比较多，整个市场上预估还有 200 多万斤，规格普遍达到 30~40 尾/斤，近期随着气温逐渐变暖，正是吃料猛的时候，对饲料需求量极大，而大部分虾苗也已投放 1 个多月。但是，南三镇从 5 月 9 日升级为封控区，交通管制严格，作为运输主干道的南三大桥已封锁，饲料运输通道几乎中断，只有少数取得《防疫车辆通行证》的车辆方可进出。

据李明介绍，南三镇水产养殖较为密集，每年饲料用量大概在 3 万吨。现在当地经销商、养殖户压力很大，手头上的饲料只能撑 2-3 天，有 10% 的养殖户马上要“断粮”了，1 口高位池每天要投喂至少 10 包料，一旦断粮后果不堪设想，对后期养殖会造成一系列影响。“目前小虾饲料用量不大，主要是大虾的风险极高，本来是计划 5-6 月份上市的，现在疫情封控下不能随便出入，这批虾卖不得又缺料，希望政府能尽快出台政策，保障饲料正常运输。”

另一名湛江区域饲料负责人表示，“现在雷州、遂溪等供货供料是正常的，坡头几乎走不动，不少客户打电话过来要料，有一小波客户已经说没货了。但是现在找车有点麻烦，很多司机不敢过去，特别是外省的一些司机。眼下湛江疫情严峻，政府对外省进湛车辆并没有明确政策，即便是湛江本土厂家也无法进入封控区。虽然当地经销商有备货，但有一

些是直销户，仓库小，能存放的货物不多，一般只能备 5-7 天，最多 10 天的料。”

管控区内饲料厂停工停产

从 5 月 10 日开始，湛江市内公交、客运、出租车、网车全部停运，单位企业全部停工停产。目前，坡头区大街小巷按下“暂停键”，管控区内饲料厂也已停工停产。

“我们饲料厂刚好在官渡管控区，为了不给国家添乱，已暂时停工停产，我们均在工厂隔离，无法正常给养殖户供料，只能通过其他附近的兄弟公司发货，最近的一家兄弟公司在江门，货物都比较充足，可以找车运输，除重点管控区、封控区之外，司机提供 48 小时核酸证明便可通行。”某饲料厂负责人透露道。

至于何时能重新开工，他表示，“还需等政府通知复工，不然都不敢贸然开工。目前冬棚虾已卖得差不多，存塘量不大。现在大部分塘口都是投苗不久的状态，所以现在也不是用料高峰期，停工几天，对我们市场来说的压力不是很大，而且其他分公司发货也能当天或隔天送达，市场能正常运转。若是其他小厂或在本地只有一个厂的，压力就会比较大，疫情之下只能停工。”

转摘自腾氏水产微信公众号

福建省海洋与渔业局印发《福建省渔业捕捞作业核准规则》

近日，为加强福建省渔业捕捞许可的管理，福建省海洋与渔业局印发《福建省渔业捕捞作业核准规则》（以下简称《规则》）。《规则》规范渔业捕捞作业的许可核定以及渔业捕捞许可证的填写，包括核定渔业捕捞的作业类型、作业方式、作业场所、作业时限、渔具数量、渔具规格（最小网目或网囊尺寸）、主要捕捞种类等具体内容。

一、总则

（一）为加强我省渔业捕捞许可的管理，规范渔业捕捞作业的许可核定和渔业捕捞许可证填写，根据《渔业捕捞许可管理规定》、《渔具分类、命名及代号》国家标准（GB/T5147-2003）及农业农村部相关文件，结合我省实际，制定本规则。

（二）县级以上地方人民政府渔业行政主管部门核定渔业捕捞作业，适用本规则。

二、海洋渔业捕捞作业的核定

（三）作业类型的分类与核定

海洋渔业捕捞作业类型划分为刺网、围网、拖网、张网、钓具、笼壶、敷网、掩罩等共 8 种。每艘渔船核定作业类型最多不得超过两种。拖网、张网不得互换且不得与其他作业类型兼作，其他作业类型不得改为拖网、张网作业。

（四）作业场所的划分与核定

1.B 类渔区：农业农村部授权的我国与有关国家缔结的协定确定的共同管理渔区及其他特定渔业资源渔场和水产种质资源保护区。

2.福建省 C2 类渔区：除 B 类渔区外，机动渔船底拖网禁渔区线外的我省毗邻海域向东延伸的我国管辖的东海海域。

3.福建省 A 类渔区：除 B 类渔区外，机动渔船底拖网禁渔区线向陆地一侧的我省毗邻海域。

4.设区市 A 类渔区：除 B 类渔区外，机动渔船底拖网禁渔区线向陆地一侧的设区的市毗邻海域。核定时，直接填写渔船登记所在的设区市的名称，如福州市的填写为“福州市 A 类渔区”、厦门市的填写为“厦门市 A 类渔区”。

5.县（市、区）A 类渔区：除 B 类渔区外，机动渔船底拖网禁渔区线向陆地一侧的县（市、区）毗邻海域。核定时，直接填写渔船登记所在县（市、区）的具体名称，如连江县的填写为“连江县 A 类渔区”、福州市长乐区的填写为“长乐区 A 类渔区”。

6.海洋大中型渔船和拖网作业渔船的作业场所应当核定在福建省 C2 类渔区。海洋小型渔船的作业场所应当核定在 A 类渔区。在 B 类渔区捕捞作业的，应当申请核发专项（特许）渔业捕捞许可证。

7.张网作业海洋大中型渔船，因作业特点确实无法核定在福建省 C2 类渔区的，可核定在县（市、区）A 类渔区。其他因传统作业习惯，经作业水域所在地审批机关批准，海洋大中型渔船捕捞许可作业场所可核定在 A 类渔区。每年底各地应将当地该项审批情况汇总报告省局，并说明理由。

（五）作业时限的分类与核定

海洋渔业捕捞作业时限划分为全年（除禁渔期外）和季节性 2 种。核定时，直接填写具体起止日期。全年的，在起止日期后标注（除禁渔期外）。

（六）海洋渔业捕捞作业核准规范

核定海洋渔业捕捞的作业类型、作业方式、作业场所、作业时限、渔具数量、渔具规格（最小网目或网囊尺寸）、主要捕捞种类等具体内容，执行《福建省海洋渔业捕捞作业核准规范》（附件 1）。对实行捕捞限额管理的，还应当核准捕捞量的限额。

三、内陆水域渔业捕捞作业的核定

（七）作业类型的分类与核定

内陆水域渔业捕捞作业类型分为刺网、围网、钓具、耙刺、陷阱、笼壶、地拉网、敷网、抄网、掩罩等共 10 类。每艘渔船核定作业类型最多不得超过两种。

（八）作业场所的划分与核定

内陆水域捕捞渔船作业场所只能核定在渔船登记所在县（市、区）行政区域，分 水库片或 江（河、溪）至 段 2 种。核定在整个水库或整条江（河、溪）的，直接填写水库或江（河、溪）的名称，允许核定在多个水库或多条江（河、溪）。

（九）作业时限的分类与核定

内陆水域渔业捕捞作业时限划分为全年(除禁渔期外)和季节性 2 种。核定时，直接填写具体起止日期。全年的，在起止日期后标注（除禁渔期外）。

（十）内陆水域渔业捕捞作业核准规范

核定内陆水域渔业捕捞的作业类型、作业方式、作业场所、作业时限、渔具数量、渔具规格、主要捕捞种类等具体内容，执行《福建省内陆水域渔业捕捞作业核准规范》（附件 2）。对实行捕捞限额管理的，还应当核准捕捞量的限额。

四、附则

（十一）因传统作业习惯，福州市仓山区、马尾区和闽侯县作业场所应当核定在县（市、区）A 类渔区的海洋捕捞渔船，其作业场所核定为福州市 A1 类渔区（特指连江县黄岐半岛以南与长乐区梅花半岛以北之间的海域），漳州市龙文区传统在厦门湾海域 A 类渔区生产作业的 21 艘海洋小型捕捞渔船，可按照原作业内容延续核定。

（十二）官井洋大黄鱼繁殖保护区、福建省长乐海蚌资源增殖保护区、厦门海洋珍稀物种保护区属于 B 类渔区。

（十三）徒手捕捞作业由市或县（区）人民政府渔业行政主管部门参照本规则核定，应充分考虑徒手捕捞作业的安全。

（十四）本规则自颁布之日起施行。《福建省渔业捕捞许可作业内容核准规定》（闽海渔〔2010〕234 号）和《关于进一步规范海洋渔业捕捞许可核准作业内容填写工作的通知》（闽海渔电〔2014〕37 号）同时废止。

（十五）本规则自颁布之日起 5 年内有效。

转摘自海上福建微信公众号

陕西加快推进渔业高质量发展

日前，陕西省农业农村厅编制了《陕西省“十四五”渔业高质量发展规划》（以下简称

“《规划》”），加快推进陕西省渔业高质量发展和现代化建设。

《规划》指出，以高质量发展为主题，坚持稳产保供、创新增效、绿色低碳、规范安全、富裕群众、巩固提升渔业综合生产能力。围绕“一山两水三区域”打造陕西绿色特色渔业。着力培育“稻渔综合种养、大水面生态增养殖和冷水鱼生态养殖”三大特色产业、九个示范区，重点强化“资源环境、水产种业、绿色养殖、水产品加工流通、渔业装备和信息化”五大领域科技创新。以冷水鱼为重点全产业链打造渔业产业发展新模式，持续推进渔业治理体系和治理能力现代化。以生态安全为底线，扎实推进长江十年禁渔，贯彻落实黄河流域生态保护和高质量发展规划，加强水生生物资源养护和渔业水域生态环境保护。

《规划》明确，到 2025 年，渔业质量效益和竞争力明显增强，水产品供给能力稳步提升，产业结构更趋合理，产业区域新格局基本建立，渔业基础设施和现代装备条件明显改善，水产养殖业绿色发展取得积极成效，渔业资源养护保护能力进一步提升，渔业治理能力和管理水平明显提高，实现产业更强、生态更优、渔民更富、渔村更美。

产业发展目标。水产养殖面积稳定在 80 万亩，力争推广稻渔综合种养面积 40 万亩以上，大水面增养殖面积 60 万亩，池塘（淤地坝）生态健康养殖 18.6 万亩，冷水鱼养殖 1.5 万亩，实现水产品总产量 18 万吨，渔业经济总产值 80 亿元，渔民人均纯收入 1.8 万元。

绿色生态目标。长江“十年禁渔”政策基础、管理基础、能力基础、社会基础全面夯实，长江流域水生生物监测工作有效实施，生物多样性保护得到强化。严格实施黄河流域禁渔期制度和《陕西省秦岭生态环境保护条例》。池塘和工厂化等集约化养殖尾水排放符合相关管控要求。累计增养殖放流各类鱼种 3000 万尾以上，渔业资源养护保护能力和水平进一步提升。

科技创新目标。渔业科技支撑能力进一步提升，科研推广体系不断健全，渔业科技贡献率达到 65%以上。智慧渔业稳步发展，水产养殖种质资源保护利用体系逐步完善，建设一批水产种质资源保种场，商业化开发利用 3 个~5 个土著品种，主要养殖品种繁育供给率达到 50%以上。

治理能力目标。养殖水域滩涂规划和养殖证制度全面落实，渔船渔具管理制度更加完善，生产性捕捞监管制度体系不断完善，渔政执法监管队伍不断加强，执法监管更加有力，渔业安全生产基础更加巩固。

转摘自陕西日报

烟台长岛上线智慧治理渔船管理系统，赋能渔业综合管理

休渔期已至，如何实现对渔业船舶的精准监控、有效管理？近日，烟台长岛综合试验区大数据服务中心联合区自然资源局研发上线的“长岛智慧治理渔船管理系统”解决了这一难题。

山东省烟台市长岛海洋生态文明综合试验区位于胶东半岛和辽东半岛之间、黄渤海交汇处，周围海域辽阔，捕捞、养殖等产业发达，各类渔业船舶众多。为解决渔民出海发生意外事故不能得到及时救援、防止渔船违规出海作业、防控海上盗捕等问题，烟台长岛综合试验区大数据服务中心联合区自然资源局研发上线“长岛智慧治理渔船管理系统”。该系统按不同方式对渔船进行限定操作，并将渔船按一定规则分类后与对应的渔港进行信息绑定，实现了对船只违规出港报警、航行轨迹追踪等功能，有效实现渔船管控和增强渔民作业安全保障。

平台具备“实时定位、轨迹回放”功能，管理人员可以通过渔船可视化图层实时查看渔船位置信息、轨迹信息，第一时间追踪到渔船准确位置，规范渔船出海行为。同时，通过渔港电子围栏功能对特定区域设置安全网格，船只进出网格都会第一时间收到告警信息，管理人员通过渔船航行数据可轻松查看船只出航、归航时间和航行轨迹。

“渔船统计”功能实现了对渔船总量、在线渔船数量、当前在港渔船数量、出港渔船数量做到精确统计，并可根据需要统计出渔船的日平均出海数量和月平均出海数量。

“渔船里程统计”功能实现了对渔船航行的总里程数、当前出海里程数等做出精确统计，并可根据需要统计出渔船的日平均出海里程数和月平均出海里程数。

“预警信息统计”功能通过渔船可视化图层对违规出海渔船进行监测并通过海域的3D GIS全景实现对该渔船具体位置和相关信息（预警时间、渔船类型、船号、所有人、联系方式、异常类型、等级、处理状态等）的预警、调阅。

“长岛智慧治理渔船管理”系统的上线使长岛渔业综合管理成功破解海上作业监管难题，补齐监管短板，最大限度地消除海域安全管理隐患，确保渔业安全生产监管无缝隙、无死角，为维护好当地正常的渔业生产秩序、渔业资源的可持续发展和海岛渔民生命财产安全护航。

转摘自大众日报

汕头海门国家级渔港经济区建设规划出炉

近日，广东省汕头市农业农村局发布《汕头海门国家级渔港经济区建设规划（2021—2030）》（以下简称“《规划》”）。

规划范围以海门国家中心渔港为核心，涉及汕头市主要渔港港区及周边海域陆域与渔业村镇，包括海门国家中心渔港（潮阳港区）、海门国家中心渔港（潮南港区）、达濠国家一级渔港、广澳渔港、澄海莱芜渔港、南港港口渔港。

《规划》明确了建设目标，通过渔港经济区规划建设，将汕头海门渔港经济区建设成为集渔业生产、渔货交易、水产品加工与渔业休闲产业等为特色的渔港经济区。提升渔港综合服务能力，促进渔港功能多元化，规划打造海门渔港核心区、临港产业片区等，推动渔业新业态健康发展，实现渔业生产美、渔业文化美、渔村生态美、渔村和谐美、村民生活美。

“一心一带两片区”的空间结构

《规划》明确了布局原则为完善功能，高效发展；融合产业，联动发展；节约集约，生态发展；远近结合，有序发展，促进汕头海门渔港经济区形成“一心一带两片区”的空间结构。



图 5.2-1 汕头海门渔港经济区规划布局图

“一心”指海门渔港核心区。以海门渔港为核心打造渔港经济区的核心区。主要包括渔船避风、补给、卸鱼、水产品交易、渔港小镇等。

“一带”指汕头东部沿海：海门潮汕风情渔港小镇、梦回达濠、广澳渔业小镇、妈屿岛、新津河、双涵、莱芜休闲风景区等形成的滨海渔业风情带。

“两片区”指由达濠一级渔港、广澳渔港、南港渔港及广澳渔业小镇等组成的濠江临港产业片区和澄海临港产业片区。

四大任务

规划期内，汕头海门渔港经济区建设将针对汕头市目前渔港经济区建设的短板问题，提出完成渔港综合提升、休闲渔业开发、美丽渔区建设和渔业产业优化四大任务。《规划》明

确了建设内容，根据汕头海门渔港经济区空间布局结构，渔港、渔业、渔镇现状及存在问题，不同区块的优势特色、开发条件，将汕头海门渔港经济区项目划分为渔港核心区项目与渔港辐射区项目。

打造汕头市渔港经济区的核心

针对海门渔港核心区，《规划》提到基于以渔获卸港量及未来水平预测，按照统筹规划、合理布局，集约节约、生态用海，完善功能，协同发展原则，在现有渔港的基础上，通过渔港整治维护、渔港配套设施完善、渔港美化亮化等项目建设，提高渔港防灾减灾能力、完善渔港综合服务功能，打造汕头市渔港经济区的核心——海门渔港核心区。

重点规划建设

《规划》还提到，汕头市滨海渔业风情带位于汕头市东部沿海，主要包括海门潮汕风情渔港小镇、梦回达濠景区、广澳渔业小镇、妈屿岛、新津河、双涵、莱芜休闲风景区，此次规划重点规划建设海门潮汕风情渔港小镇与广澳渔业小镇。

转摘自汕头政务发布微信公众号

2022 年福建省海洋伏季休渔暨联合执法行动启动仪式举行

5月1日中午12时，福建省海域11138艘渔船进入海洋伏季休渔期，最长休渔时间4个月半。当天上午，2022年福建省海洋伏季休渔暨联合执法行动启动仪式在平潭东澳中心渔港隆重举行。



福建省海洋与渔业局副局长翁新平，平潭综合实验区管委会副主任欧阳晓波、福建省海洋与渔业执法总队总队长张思荣、福建海警局副局长刘晓军、福建省公安厅海防总队副队长林峰等领导出席启动仪式。渔民代表和护渔志愿者代表先后发言。

启动仪式上，随着省海洋与渔业局副局长翁新平“行动开始”的一声令下，海洋与渔业、海警部门执法船艇鸣笛启航开展巡航，无人机对停泊在港内的休渔渔船进行实时监控，执法人员走村入户、登船上排开展海洋伏季休渔宣传。

今年伏休期间，各级海洋与渔业行政主管部门聚焦“提高效率、提升效能、提增效益”，

严格落实属地管理，建立应休渔船名册并张榜公布，采取“定人联船”、“定点停泊”、“定期点船”等措施，严格执行船籍港休渔制度，坚持依港管船、依港管人、依港管渔；

同时，加强防火、防汛、防风、防疫情、防污染、防碰撞等安全防范措施，最大限度保障伏休期间渔港渔船渔民安全。

转载自海上福建微信公众号

典型案例

三明市将乐生态环境局强制整治非法牛蛙养殖场

4月22日，将乐生态环境局会同南口镇政府、农业、国土、公安等部门对南口镇大拔村非法牛蛙养殖场开展强制清理拆除。实施强制清理拆除之前，乡镇及各部门多次与养殖户进行沟通，宣讲解释非法养殖给土地和环境带来的破坏，争取养殖户对清拆整治非法牛蛙养殖场工作的理解与支持，但养殖业主未在规定时限内完成清理拆除。本次清拆行动，共出动60多人次，强力清拆非法牛蛙养殖场约4000平方。

牛蛙养殖门槛低、利润高，但养殖活动也带来了一系列环境问题，比如牛蛙养殖污水直排、随意丢弃病死蛙体、散发恶臭气味及蚊蝇滋生等，严重破坏地表水及周边生态环境。将乐地处闽江上游，生态保护区位特殊，县委县政府明确将养殖牛蛙纳入环境保护负面清单，辖区禁止建设牛蛙养殖场。

近期，由于牛蛙价格上涨，将乐辖区牛蛙养殖有抬头趋势。下阶段，将乐将继续保持整治高压态势，多措并举，加大执法力度，加强巡查监管，进一步巩固牛蛙养殖污染整治成效，防止复养回潮，坚决遏制牛蛙养殖污染。

转载自腾氏水产微信公众号

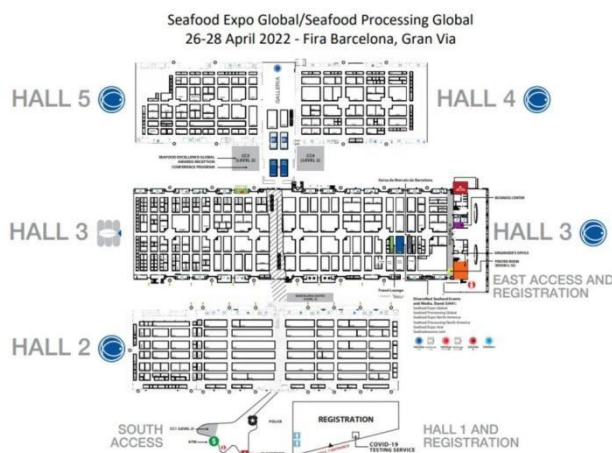
会议传递

2022年全球水产博览会如期开幕

2022年4月26日，受疫情影响连续两年（2020&2021）暂停举办的全球水产博览会在新举办地西班牙巴塞罗那会议中心（Fira Barcelona Gran Via.）盛大开幕。

全球水产博览会是世界上最具有影响力的水产专业展会之一，已在比利时布鲁塞尔成功举办27届。此次移址西班牙举行，一是因为西班牙作为欧洲水产品生产及贸易第一大国，拥有比比利时更好的产业优势及区域优势；二是因为第二大城市巴塞罗那拥有现代化的多功能展馆和丰富的酒店资源，将助力全球水产博览会跨越式发展。

据了解，今年展会总展出净面积为 39848 平方米，共有来自 76 个国家和地区的 1500 多家企业参展，其中中国参展企业仅有 3 家，均为自行参展。本次展会共启用会展中心 6 个馆，其中 1 号馆、2 号馆、3 号馆东部、4 号馆、5 号馆为水产品贸易展区，3 号馆西部为水产设备展区（展馆平面图如下）。



据悉，西班牙巴塞罗那会展中心位于巴塞罗那市内，占地 24 万平方米，交通十分便利，地铁直达展馆负一层。展馆二层则拥有多间不同面积和视觉的现代化会议室，能满足不同类型会议安排。展馆周边的配套设施也十分齐全，一公里内有不少星级酒店、购物中心、餐馆等，能给展商和采购商带来不错的体验。

今年展会期间配套了 20 多场同期会议和讲座，邀请了不少水产行业的权威专家做报告。会议主要围绕水产养殖、水产贸易及领导力、水产的可持续发展、新冠疫情对全球水产贸易的影响、当前水产商业环境所涉及问题等热点内容进行分享。这些活动的举办将为与会者带来商机和便利的交易机会。其中,定于北京时间 4 月 27 日 15:00-18:00 举办的“2022 渔业的未来论坛”，我会将采用现场直播形式在国内同步播出，并为会议提供同声传译服务。

此外，为发掘和鼓励更多优秀水产品亮相展会，吸引更多的终端采购商到场采购，今年的“全球卓越海鲜奖”将继续在展会现场颁发。同时，结合疫情对行业带来的深远影响，奖项的设立更关注深加工水产品，特别设立了“最佳零售产品奖”“最佳酒店&餐厅&餐饮产品奖”，且所有参赛产品都会在 4、5 号馆的连廊处进行统一展示。

转摘自中国水产品微信公众号

会议通知

2022 第三届中国漳州国际水产养殖产业博览会延期通知

尊敬的各位合作伙伴、参展企业、参观采购商：

因近期新冠肺炎疫情在国内多地出现反复，为进一步做好新冠肺炎疫情防控工作，坚决落实国务院应对疫情联防联控机制部署，切实保障参展商、观众及所有相关工作人员身体健康和生命安全，保证展会效果，为了确保活动的能够更成功的举办，给参展商、采购商、来宾朋友们更安全的环境下洽谈交流，经多方商议，在配合政府相关防控要求下，经研究决定将原定于 2022 年 5 月 28-30 日召开的第三届中国漳州国际水产养殖产业博览会延期举办，具体时间根据疫情发展重新择日举行，后期组委会将对外公布，地点不变。请各参展单位及时调整时间安排，如造成不便，敬请谅解！

延期期间我们将继续努力做好展会组织工作，加大展会宣传，为展商和观众创造更大价值，共谋渔业发展。

中国漳州国际水产养殖产业博览会 CAIE 组委会

转摘自 CAIE2022 微信公众号



关于第三届中国漳州国际水产养殖产业博览会 延期举办的通知

尊敬的各位合作伙伴、参展企业、参观采购商：

因近期新冠肺炎疫情在国内多地出现反复，为进一步做好新冠肺炎疫情防控工作，坚决落实国务院应对疫情联防联控机制部署，切实保障参展商、观众及所有相关工作人员身体健康和生命安全，保证展会效果，为了确保活动的能够更成功的举办，给参展商、采购商、来宾朋友们更安全的环境下洽谈交流，经多方商议，在配合政府相关防控要求下，经研究决定将原定于 2022 年 5 月 28-30 日召开的第三届中国漳州国际水产养殖产业博览会延期举办，具体时间根据疫情发展重新择日举行，后期组委会将对外公布，地点不变。请各参展单位及时调整时间安排，如造成不便，敬请谅解！

延期期间我们将继续努力做好展会组织工作，加大展会宣传，为展商和观众创造更大价值，共谋渔业发展。

中国漳州国际水产养殖产业博览会



在上海思考管理

陈春花

北京大学国家发展研究院

此时的上海，这座世界最具活力的城市安静的令人心痛。作为组织管理研究者，我能深切理解特大型城市的管理、再叠加疫情、国情、国际关系诸多要素，其复杂程度和难度难以想象。不过，我希望和大家一起思考难题背后的管理问题。

城市作为有机整体而存在的，各组成部分的相关性与组织性，使得这个巨型系统必须实现“整体大过部分之和”，系统的整体利益才能够贡献于组织目标。哲学早就指出“主体发展到了一定阶段，分裂出自己的对立面，变为了外在的异己的力量，这就是异化”。管理者迫切需要处理好整体与局部的关系，时刻牢记以系统整体利益出发，无论何时都应该明确组织真正的目标是什么，小心避免局部异化，就是避免让局部利益异化走到组织整体目标的对立面。

管理决策的困难之处在于既要面对人，也要面对事。决策效果的关键在于两方面：其一是决策方案是否合理；其二是组织成员接受与支持程度。高层管理者还需要正视另一个重要问题：中层和基层管理者的局限性。一旦涉及到更多的人与事发生冲突时，基层管理者就无法应对复杂性，执行系统会失去其有效性，次生灾难就会此起彼伏。

人类迈进了数字化时代，今天稀缺的不再是信息，而是处理信息的能力。当决策前提条件变化时，需要高层管理者有勇气做出调整，改变既有模式、做出新抉择，如果还固守过去的决策模式或者成功经验，就会为了证明过去的成功而错失未来。对于高层管理者来说，是否有勇气动态调整和应对的决策是巨大挑战，也是智慧体现。

组织行为学研究告诉我们：个体为什么愿意对组织目标做出贡献？主要源于组织与个体都获得了自己的满足感。组织让个体有满足感，个体才愿意去主动协同、实现组织目标。在充满不确定的当下，个人英雄已经不足够，比以往更需要集合智慧、众志成城。从群众中来到群众中去，一直是我党坚持的解决问题的好办法。

数字化时代、信息传播速度快、个体价值诉求多元，管理对象越来越是复杂系统。对于管理者而言，必须竭力超越二元对立论，让自己忠诚于组织的根本目标，化繁就简、求大同存小异、同时推进多个重要任务，协同多个目标的实现，而不是黑白对立、非此即彼。

从工业革命开启至今一两百年间，人类借助于技术，努力构建一个更繁荣，更好的生活；

所获得的飞速发展怎么描述都不为过。这的确是一个伟大的时代，日新月异并充满自信，憧憬胜利的欲望填满每一个角落。也正是这自信与欲望，让生活进入到前所未有的快节奏，导致我们限定在一个狭窄的视角。在当下的时空窘迫中，我们内心的需求到底是什么？新技术将要导致的是从未有过的不平等，还是真正实现共同福祉？

技术比以往任何时候都强大，同时也让我们前所未有地感到胁迫、带来更大的不确定性和散发而出的未知，世界不再是所熟悉的样子。我们似乎开始由自信转入迷茫。2022 被防疫又一次摁下的暂停键，超乎所有人的意料，也注定以其特殊性被载入史册。这是一个令人沮丧的时间点吗？不完全是，回答的内容写在 2021 年新年寄语里，我继续保留这些思考。无论是个体还是人类整体，经由疫情考验之后，终将获得自我与外物的全新认知领悟，我们以此延展生命的维度、重新唤醒身心。

1.相信生活而非憧憬胜利

在相当长的一段时间里，我们只是热衷于成功与增长。技术公司高歌猛进，万亿美元市值涌现；新独角兽公司，从几十亿到千亿的迅速崛起；科技产品和服务帮助到数十亿人的生活，它们创造了前所未有的财富同时也窥见了我们每一个人的“内心”；医学与健康领域的不断发现与创新，帮助了人们延长寿命超过 20 年，也带了伦理底线挑战。这些显见的成功让人们已经习惯了追求成功，并渴望获得一切的成功。但是，当繁华被按下暂停键，成功要付出不可承受的代价时，人生的意义在何处？

几千年前，古希腊米利都学派的泰勒士已经在论证等边三角形的两角相等，这些早慧的哲人，在希腊明媚的阳光下生活，为生活而思想，为思想而创造科学。先哲的智慧早已告诉我们，真正的信念并不是憧憬胜利，而是相信生活。所有重大的挑战，往往最能凸显生活的价值，真实生活的质朴纯粹，因其“普遍性”贯穿在整个人类文明发展的历程之中而生生不息。

2.敬畏责任而非崇拜力量

在新冠病毒之下，再读威尔·杜兰特和阿里尔·杜兰特，“人类历史只是宇宙的一瞬间，而历史的第一个教训就是要学会谦逊。人类的所有记录和成就都会谦卑地复归于千万生灵的历史和视野”。再读时，已经不是共鸣而是忐忑。随着技术让生活更加便捷、空间更加广阔、社会更加繁荣，一个又一个重大发现让人应接不暇时，我们已然对大自然失去敬畏。

今天的技术比以往过去任何时候都强大，如果不能真正基于责任而去运用，后果将不堪设想。我们不能高估人类自己，反而需要更加谨慎和小心。此时，责任，是一个人身份的基

点，是一个组织的基点，是人类共同的基点。

信息技术的普及，让大众在更大范围内获得知识、因知识而获得更多的力量、甚至是权力，也必须由此产生更普遍的责任。真正推动人类进步的，从来不是野心家，而是那些值得信任的一代又一代的创造者。他们因责任而明白自己的渺小，他们因责任而深具同理心；他们因责任而去关注美好的事物，并让创造源源不断。是责任使人类代代相传，而不是其他，就如爱因斯坦所言：“外在的强制在某种意义上，只能减轻但不能消除个人的责任。……任何为唤醒和支持个体的道德责任感所做的努力，都是对全人类的重要贡献。”

3.共生成为基本生存方式

新冠让我们透彻感知“竞争”与“合作”的内涵。在科学层面，世界各地的科学家与医生进行着令人惊叹的合作。他们共享信息、共享成果、共同研究病毒协同作战、带来全球的曙光。在政治层面，我们看到的刚好相反，争夺资源、各种甩锅、故意散布错误信息、阴谋论满天飞，甚至想科技垄断来获得经济与政治优势……爱因斯坦曾说：“用当初产生问题的同样意识水平，是不能解决该问题的”。

我们需要一种新的意识，新的世界观来重塑技术的价值，来理解生存方式。正如我们看到的事实那样，人类所有非凡的进步，并非来自竞争，而是出自于合作。人类得以在万千物种中存在，并非来自人类自身的强大，而是出自于人类与万千物种的关联与共生。科技已经让人类拥有了巨大的能量，我们需要拥有与这巨大能量所匹配的智慧。

4.自我约束并持续学习

未知与冲击让人措手不及，也激发了内在的精神力量，认知自我、不断探索、跟随智慧、从心向善。我们采用全新工作方式、我们探索新的商业模式、我们拓展新的生活社交方式，顽强的自我超越，就是生生不息的力量。我们开始约束自己，我们开始审视过去，我们来叩问内心，寻求回归之路。

在测核酸面前，深感自己的渺小和无知；但是，我们也深知，一切问题的产生并非在技术本身，而在于我们如何明智地使用它们，其核心基石，就是我们是否拥有正直的信仰，自我约束的力量。真正的敌人或许就是人类自己。

几千年前，苏格拉底和孔子都劝诫人要更了解自己，并认知自己的无知。如果不能了解自己，就不能持续拓展空间，生命必然狭窄。如果不能了解自己的无知，就不能持续自我超越，生命必然僵滞。这是自我教育与持续学习的过程。

经历这一轮的洗礼，赋予生命以新的意义，这意义要超越人类自我的狭隘，要赋予技术

以人性的光辉，让我们在质朴与平实生活之中，回归常识，回归科学，回归责任，遇见更美的
的心灵、更好的生活、更温暖的世界。

摘自春暖花开微信公众号

研究进展

新型蛋白源在水产饲料中的应用研究进展

刘国庆^{1, 2} 谭青松^{1, 2*} 解绥启³

(1.华中农业大学水产学院，农业农村部淡水生物繁育重点实验室，池塘健康养殖湖北省工程实验室，湖北武汉 430070； 2.水产养殖国家级实验教学示范中心，湖北武汉 430070； 3.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，湖北武汉 430072)

摘要：蛋白质是水产动物饲料的主要成分，鱼粉和豆粕等我国水产饲料常规蛋白质原料长期 依赖于进口，且全球渔业资源匮乏导致鱼粉供不应求，不利于水产养殖的健康可持续发展。合理开发新型蛋白源、充分利用蛋白源是解决这个问题的关键所在。相比于常规蛋白源，新型蛋白源（如昆虫蛋白、植物蛋白、单细胞蛋白和功能蛋白等）一般具有可持续性、抗营养因子低、营养价值高的优点。文章在参考国内外最新研究成果的基础上，对近年来一些具有应用前景的新型蛋白源的营养特性、应用效果（对水产动物生长、饲料利用、体组成、健康和肉品质等的影响）及其应用时存在的问题和解决措施进行了综述，并展望了新型蛋白源研究的发展方向，以期水产养殖和水产饲料生产的科研和技术人员在水产饲料研发和蛋白源选用方面提供参考。

关键词：蛋白源；替代鱼粉；水产动物；生长性能；健康

A Review on The Use of Unconventional Protein Sources in Aquatic Feeds

LIU Guoqing^{1,2} TAN Qingsong^{1,2*} XIE Shouqi³

(1. Key Lab of Freshwater Animal Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hubei Provincial Engineering Laboratory for Pond Aquaculture, College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Hubei Wuhan 430070, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Aquaculture Education, Hubei Wuhan 430070, China; 3. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Hubei Wuhan 430072, China)

Abstract: Protein is the main component of aquatic animal feed. China's conventional protein raw materials of aquatic feed, such as fish meal and soybean meal, have long been dependent on imports, and the shortage of global fishery resources leads to the shortage of fish meal, which is not conducive to the healthy and sustainable development of aquaculture. The key to solve this problem is to rationally develop new protein sources and make full use of protein sources. Compared with conventional protein sources, unconventional protein sources (such as insect protein, plant protein, single-cell protein and functional protein, etc.) generally have the advantages of strong sustainability, low anti- nutritional factors and high nutritional value. In this paper, based on the reference of latest research achievements at home and abroad, some new types of unconventional protein sources with promising application in recent years, the nutritional characteristics and application effects of these unconventional protein sources (effects on the growth, feed utilization, body composition, health and meat quality of aquatic animals, etc.), as well as the existing problems and solutions in the application of these unconventional protein sources are summarized, and the development direction of the research on these unconventional protein sources is prospected. In order to provide a reference for the research and development of aquatic feed and the selection of protein sources for researchers and technicians in aquaculture and aquatic feed production.

Key words: protein source; fish meal replacement; aquatic animal; growth performance; health

到 2050 年，全球人口将达到 90 亿，随着世界人口数量的增加，水产养殖在满足人类对优质食品蛋白需求方面所发挥的作用愈来愈大。据联合国粮农组织统计，经过几十年的发展，全球水产养殖产量达到 1.145 亿吨，并且 2010 年至 2030 年，水产养殖市场将增长 50%。

鱼粉和豆粕是养殖鱼类配合饲料的主要蛋白源。鱼粉适口性好，可消化率高，且含有某些未知的促生长因子；豆粕蛋白质含量高，氨基酸含量适合于养殖动物的需求。然而，由于全球渔业资源的枯竭，鱼粉供不应求，且大豆等植物原料的使用增加会导致饲料生产与人类食物供应的竞争加剧。水产饲料优质蛋白质原料短缺的问题日益显著，制约了水产养殖业健康可持续发展。开发新型饲料蛋白源并进行高效利用是解决这个问题的关键所在。

20 世纪 70 年代中期，已开始进行使用其他蛋白源替代饲料中鱼粉的研究。至今，寻找具有成本效益、生态友好和可持续的蛋白质资源以替代鱼粉乃至豆粕仍是国内外水产养殖研究前沿。随着人类社会的发展和科学技术水平的不断进步，对于新型蛋白源的应用评估也从最初的单一以水产动物生长性能为指标到现在 的生长性能、机体健康、水产品质量等多角度综合评价。文章总结了近年来国内外水产饲料中关注的一些新型饲料蛋白源，对其营养特性及在水产动物中的应用效果进行综述，并展望了新型蛋白源研究的发展方向，以期为水产养殖和水产饲料生产的科研和技术人员在水产饲料研发和蛋白源选用方面提供一些参考。

1 新型蛋白源种类及特点

伴随蛋白需求的不断增加，常规蛋白资源有限，科研人员转而研究开发新型蛋白质资源或对传统蛋白质资源进行再加工、发酵，获得新型蛋白源，如昆虫粉、新型植物蛋白、单细胞蛋白和一些功能蛋白。

1.1 昆虫粉

据统计，目前全球昆虫的种类已达 1000 余万种， 分布于世界上的每个角落，种类繁多，生活史短，易于养殖，一些昆虫还能利用厨余垃圾、畜禽粪便等废弃物。Veldkamp 等（2012）初步论证了大规模养殖昆虫在技术上的可操作性以及将昆虫作为畜禽料蛋白源的可行性。常见的昆虫粉原料包括黑水虻（*Hermetia illucens*）、黄粉虫（*Tenebrio molitor*）、蝇蛆（*Musca domestica*）和蚯蚓（*Eisenia foetida*）等（见表 1），他们具有蛋白质含量高、氨基酸组成良好（见表 2）、钙磷含量高、碳水化合物含量低、富含 B 族维生素和多种微量元素等优点，但有些种类脂肪含量较高，容易酸败变质，应进行脱脂处理或添加抗氧化

剂和防腐剂。

表1 昆虫粉营养价值和饲用优点

项目	粗蛋白(%)	粗脂肪(%)	饲用优点	参考文献
黄粉虫粉	25~60	15~40	1.氨基酸平衡,必需氨基酸指数高于豆粕; 2.黄粉虫易规模饲养、生产潜力大、占用土地少	Elahi 等(2020); Ghosh 等(2017); 冀凤杰等(2021); Björge 等(2018)
黑水虻粉	30~50	25~40	1.类似鱼粉的氨基酸组成,富含矿物质和维生素; 2.含有月桂酸、几丁质和抗菌肽等生物活性物质; 3.黑水虻生长速度快、生命力顽强	Elwert 等(2010); 徐晨等(2021); Li 等(2019); 王宇等(2020); Li 等(2021)
蝇蛆粉	59~65	12	1.限制性氨基酸、矿物质及维生素(A、D和B族)含量较丰富; 2.蝇蛆繁殖力强、生长周期短、饲养成本低	宋宇琨等(2019); 熊北海等(2017); 刘颖(2017)
蚯蚓粉	51.6~65.7	6.0~17.4	1.蛋白质优于鱼粉,氨基酸平衡,维生素含量丰富(A和B族), 能提供适宜的脂肪酸; 2.蚯蚓来源较广泛、繁殖能力强、生长周期较短	徐晨等(2021); Nalunga 等(2021); Bahadori 等(2017)

表2 昆虫与常规蛋白源的氨基酸含量比较

项目	鱼粉	豆粕	黄粉虫	黑水虻	蝇蛆	蚯蚓
必需氨基酸(EAA, %)						
苯丙氨酸(Phe)	2.37	2.71	1.76	1.51	2.90	1.86
亮氨酸(Leu)	4.28	3.99	3.41	2.64	5.50	4.49
异亮氨酸(Ile)	2.51	2.49	3.56	1.55	2.75	5.07
缬氨酸(Val)	3.01	2.57	2.44	2.21	3.83	2.85
组氨酸(His)	1.24	1.32	1.51	1.34	1.56	4.08
赖氨酸(Lys)	4.53	3.23	2.91	2.22	5.05	5.57
精氨酸(Arg)	3.67	3.75	2.43	1.93	5.60	3.40
苏氨酸(Thr)	2.44	1.97	1.81	1.51	2.78	2.41
蛋氨酸(Met)	1.63	0.69	0.67	1.85	1.36	0.92
色氨酸(Trp)	0.62	0.69	-	-	-	-
非必需氨基酸(NEAA, %)						
酪氨酸(Tyr)	2.01	2.04	3.46	2.35	2.35	1.68
丙氨酸(Ala)	3.86	2.27	3.67	2.94	3.71	3.64
甘氨酸(Gly)	4.58	2.18	2.41	2.16	5.11	2.74
天冬氨酸(Asp)	5.36	5.78	3.59	3.31	5.30	3.46
谷氨酸(Glu)	7.91	9.20	5.68	4.88	9.74	6.92
半胱氨酸(Cys)	0.44	0.67	0.52	-	1.77	0.56
脯氨酸(Pro)	2.94	2.57	3.02	2.09	4.57	1.76
丝氨酸(Ser)	2.25	2.29	2.01	1.67	5.08	1.96
参考文献	Casas 等(2017)	Casas 等(2017)	Ravzanaadii 等(2012)	蔡腾等(2020)	张青等(2017)	王德凤等(2014)

注:“-”代表该种氨基酸在该研究中未见报道。

1.1.1 黄粉虫（Yellow mealworm）

黄粉虫属于鞘翅目，拟步甲科，拟步甲族，粉甲属，其幼虫俗名面包虫。黄粉虫生长发育阶段分为卵、幼虫、蛹、成虫，适宜生长发育温度为 29~32℃，在 32℃时发育历期仅为 59.9 d，在饲用、医用和食品等方面具有较高的综合利用价值。黄粉虫具有食性杂，易规模饲养，生物产量高，占用土地少等优点，且含有 抗菌肽、壳聚糖、甲壳素等活性物质，新鲜黄粉虫幼虫的干物质含量约 36%，是一种高度可持续的新型动物蛋白质资源。并且，欧盟最近也批准将黄粉虫列入鱼 类饲料成分的昆虫清单。

1.1.2 黑水虻（Black soldier fly）

黑水虻学名为光亮扁角水虻或亮斑扁角水虻，隶属于双翅目，水虻科，扁角水虻属。

黑水虻适宜生长温度为 26~27℃，整个生长周期约为 35 d，其中包括 卵、幼虫(包含 6 个龄期)、蛹与成虫。黑水虻分布广泛，生长迅速，生命力顽强，耐恶劣环境，能够抑制家蝇滋生，含有月桂酸、几丁质和抗菌肽等活性物质，并 且在垃圾处理方面具有巨大潜力，新鲜黑水虻幼虫干物质为 20%~44%。近年来，在多种水产动物中都有应用黑水虻作为蛋白源的研究，这是一种具有开发潜力的蛋白源。

1.1.3 蝇蛆（Maggot）

家蝇幼虫（俗称蝇蛆）富含蛋白质、脂肪酸、氨基酸、几丁质、多种维生素、矿物元素以及抗菌活性物质，是一种极具开发潜力的动物性蛋白资源和新型蛋白类免疫增强剂，在水产养殖中具有良好的应用前景。

1.1.4 蚯蚓（Earthworm）

蚯蚓别称地龙。蚯蚓常使用动物粪便（主要是牛粪）养殖，1t 合适的动物粪便可产生多达 100 kg 蚯蚓，按干质量计算，转化效率约为 10%。此外，还可以使用不同的有机基质来饲养蚯蚓。

蚯蚓粉（干物质含量约 90%）是洗净后的鲜蚯蚓经低温干燥粉碎而成的粉状原料，其蛋白质含量高于国产鱼粉，略低于进口鱼粉，是一种营养价值高的优质蛋白质原料。

1.2 植物蛋白源

新型植物蛋白源主要包括浓缩植物蛋白类、发酵植物蛋白类等（见表 3），主要是通过加工技术去除了植物蛋白中的一些抗营养因子，营养价值得到改善，但仍存在少量抗营养因子、氨基酸不平衡（见表 4）等问题。

表3 植物蛋白源营养价值和特点

项目	粗蛋白(%)	粗脂肪(%)	营养特点	参考文献
棉籽浓缩蛋白	>60	2.6	1.棉酚含量低(0.007 9 g/kg); 2.赖氨酸、蛋氨酸和半胱氨酸含量极低	Anderson 等(2016); 张静雅等(2020)
大豆浓缩蛋白	67~71	0.5~1.3	1.氨基酸含量丰富; 2.适口性好、消化率高; 3.抗营养因子含量极低; 4.蛋氨酸含量仅是优质鱼粉的 1/2	杨宁等(2021); Wang 等(2020); Zhang 等(2019)
发酵豆粕	51.5	1.9	1.抗营养因子和抗原蛋白大部分被降解; 2.赖氨酸、蛋氨酸含量提升; 3.富含益生菌、有机酸、消化酶等多种有益产物	刘棚州等(2021); Mukherjee(2016); Shi 等(2017)
干酒糟及其可溶物	26~28	8~10	1.不含植物蛋白成分中常见的抗营养因子; 2.营养价值高、产量高、价格低	Chevanan 等(2009)

表4 新型植物蛋白源与常规蛋白源的氨基酸含量比较

项目	鱼粉	豆粕	棉籽浓缩蛋白	大豆浓缩蛋白	发酵豆粕	干酒糟及其可溶物
必需氨基酸(EAA, %)						
苯丙氨酸(Phe)	2.37	2.71	3.44	3.41	2.68	1.29
亮氨酸(Leu)	4.28	3.99	3.44	5.10	3.97	3.21
异亮氨酸(Ile)	2.51	2.49	1.99	3.16	2.54	1.17
缬氨酸(Val)	3.01	2.57	2.54	3.22	2.29	1.42
组氨酸(His)	1.24	1.32	2.76	1.65	1.33	0.74
赖氨酸(Lys)	4.53	3.23	3.40	4.03	3.18	0.90
精氨酸(Arg)	3.67	3.75	7.20	4.65	3.71	1.22
苏氨酸(Thr)	2.44	1.97	2.11	2.49	1.93	1.03
蛋氨酸(Met)	1.63	0.69	0.67	0.85	0.72	0.52
色氨酸(Trp)	0.62	0.69	0.59	0.88	0.66	0.22
非必需氨基酸(NEAA, %)						
酪氨酸(Tyr)	2.01	2.04	1.97	2.51	1.64	1.01
丙氨酸(Ala)	3.86	2.27	2.33	2.74	2.21	1.83
甘氨酸(Gly)	4.58	2.18	2.38	2.62	2.17	1.08
天冬氨酸(Asp)	5.36	5.78	5.29	7.28	5.83	1.73
谷氨酸(Glu)	7.91	9.20	11.9	11.5	9.23	3.61
半胱氨酸(Cys)	0.44	0.67	1.43	0.82	0.75	0.51
脯氨酸(Pro)	2.94	2.57	2.64	3.21	2.24	1.93
丝氨酸(Ser)	2.25	2.29	2.76	3.14	2.08	1.17
参考文献	Casas 等(2017)	Casas 等(2017)	Li 等(2019)	Casas 等(2017)	Espinosa 等(2020)	Olukosi 等(2013)

1.2.1 棉籽浓缩蛋白 (Cottonseed concentrated protein, CPC)

棉籽粕在水产饲料中应用较广泛，但因其含有游离棉酚和棉绒等，使用受到限制。浓缩棉籽蛋白是一种经过脱酚脱毒的优质植物蛋白源，粗蛋白含量高 (>60%)，棉酚含量仅为 0.0079 g/kg。目前的主流工艺流程为：脱绒的毛棉籽通过刀板剥壳机进行仁壳分离以去除绒壳，通过精分工序最大程度去除纤维成分，然后通过浸出器浸油、脱酚，最后低温烘干。由于采用软化轧胚、低温烘干等工艺取代了高温蒸炒，有效降低了蛋白质的热变性程度，更容易被动物消化吸收。

1.2.2 大豆浓缩蛋白 (Soybean protein concentrate, SPC)

大豆浓缩蛋白是以脱脂大豆粕为原料，消除低聚糖肠胀气因子、胰蛋白酶抑制因子和凝集素等抗营养因子后的一种蛋白原料，粗蛋白含量约为 65%，因去除了部分抗营养因子，营养价值较豆粕得到了提升。SPC 的生产方法有醇法、酸法、湿热变性法和超滤法，详细生产工艺参考李林桂等（2015）。

1.2.3 发酵豆粕 (Fermented soybean meal, FSM)

发酵豆粕是普通豆粕在可控条件下，由微生物 (如芽孢杆菌、酿酒酵母等)或酶制剂进行发酵，干燥后制成的饲料原料。经过发酵，豆粕的粗蛋白和酸溶蛋白含量分别增加了 12.84% 和 5.45 倍，大部分抗营养因子和抗原蛋白被降解，大豆肽的含量增加了 6 倍，营养价值得到了提升。此外，发酵豆粕中富含益生菌、有机酸和消化酶等多种有益产物，有助于改善动物肠道功能，促进消化吸收。

1.2.4 干酒糟及其可溶物 (Dried distillers' grains and solubles, DDGS)

玉米干酒糟及其可溶物(DDGS)是谷物经酵母发酵后蒸馏处理的副产品,含有 26%~28% 的蛋白质,8%~10%的脂肪,并且不含植物蛋白成分中常见的抗营养物质,因此,DDGS 被用作水产饲料中的蛋白质和能量来源。DDGS 不含常规植物蛋白源中常见的抗营养因子,在适量添加的情况下能够改善水产动物的生长性能和健康,还有促进脂代谢的功能。但是,DDGS 的营养组成受原料来源和加工工艺影响较大,质量参差不齐,所以饲料企业在大规模应用玉米 DDGS 前,有必要对原料质量进行整体性评价。

1.3 单细胞蛋白源

单细胞蛋白(Single cell protein, SCP),又称微生物蛋白,是指细菌、真菌和微藻在生长过程中利用各种基质产生的蛋白。SCP 主要包括藻粉、酵母蛋白和 细菌蛋白(见表 5),蛋白质含量可达 30%~80%,具有营养价值高,来源广泛,益于水产动物生长的优点,还含有多种维生素、碳水化合物、脂类、矿物质以及丰富的酶类和生物活性物质。

表5 单细胞蛋白源营养价值及特点

项目	粗蛋白(%)	粗脂肪(%)	营养特点	参考文献
藻类	47~70	7~20	1.赖氨酸和蛋氨酸等水产动物限制性氨基酸含量丰富; 2.含有高水平的维生素、矿物质、酚类物质、必需脂肪酸和色素	Nalage 等(2016); Nasseri 等(2011)
酵母及其他真菌	40~55	1~6	核苷酸和B族维生素含量丰富,优于鱼粉	Nalage 等(2016); 聂琴等(2017)
菌体蛋白	50~80	2~3	蛋白质含量超过了进口鱼粉,并含有丰富的必需氨基酸	Nalage 等(2016); Nasseri 等(2011)

单细胞生物(如细菌和酵母菌)繁殖时间短,仅需 5~15 min 即可使种群数量翻一番,藻类也会在 2~4 h 内成倍增长,能够快速提供大量优质蛋白,具有替代鱼粉、满足饲料产业对蛋白源需求的潜力,且比常规植物蛋白源有更高营养价值。

1.3.1 藻类

藻类包括海藻(大型藻类)和微藻中的一些物种目前被用于各种行业,包括保健品、动物饲料、废水处理和生物燃料等。

在生产力和营养价值方面,藻类比传统陆生作物更具优势。海藻和微藻的单位面积蛋白质产量 $[2.5\sim7.5\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{年})]$ 和 $4\sim15\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{年})]$ 高于大豆、豆类和小麦 $[(0.6\sim1.2\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{年})、1\sim2\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{年})和 1.1\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{年})]$ 。且藻类含有一些有益物质,如色素(胡萝卜素、叶绿素和藻胆蛋白)和多酚等。但藻类的广泛使用还受到许多因素的限制,包括收获途径、季节性和地理位置以及从藻类中分离蛋白质的生产方法的可用性。

1.3.2 酵母及其他真菌

酵母细胞粗蛋白含量高(40%~55%),细胞壁(占干重的 26%~32%)含有对水产动物健康有益的甘露寡糖(MOS)、 β -葡聚糖和几丁质等生物活性成分。在水产饲料中最常使

用的是酿酒酵母（*Saccharomyces cerevisiae*），此外也使用贾丁尼赛伯林德纳酵母（*Cyberlindnera jadinii*）、异常维克汉姆酵母（*Wickerhamomyces anomalus*）、马克斯克鲁维酵母（*Wickerhamomyces anomalus*）、食腺嘌呤芽生葡萄孢酵母（*Blastobotrys adeninivorans*）等。

1.3.3 菌体蛋白

菌体蛋白富含蛋白质（50%~80%），易于大规模生产，是一种新型的饲料蛋白质的替代来源，有益细菌除了提供大量营养素外，还可以提供维生素、脂肪酸和必需氨基酸等微量营养素，这些细菌的一些菌株在人类中的应用已被广泛报道，利用这些微量营养素支持水生动物的生长也已进行了研究。除了直接为水生动物提供营养外，一些有益菌还通过分泌蛋白酶、脂肪酶和促生长因子等胞外酶来改善宿主肠道消化过程。

1.4 其他功能蛋白

功能蛋白主要包括血浆蛋白粉、肠膜蛋白粉、鸡蛋粉、核糖蛋白等（见表 6）。蛋白质和功能蛋白不同，蛋白质为机体提供氨基酸，而功能蛋白则具有生物学活性，能促进生长，增加摄食量，降低死亡率，并能通过调节肠道功能来支持动物健康，其作用效果显著且稳定。

表 6 其他功能蛋白营养价值及特点

项目	粗蛋白(%)	粗脂肪(%)	营养特点	参考文献
血浆蛋白粉	79	0.03	1.氨基酸平衡,蛋氨酸含量较低(0.7%); 2.抗营养因子和不可消化蛋白含量低; 3.适口性优于鱼粉等,来源广泛	Munoz 等(2020); 庞培等(2019)
肠膜蛋白粉	40~55	2	1.含有大量可提高采食量、促进吸收、促进生长的生物活性因子; 2.含有抗氧化因子、免疫调节因子、肠道结构及致密性调节因子	任亚芳(2020); 陈灵涵等(2017)
鸡蛋粉	42~50	> 30	1.营养价值高、富含免疫球蛋白和溶菌酶; 2.蛋氨酸含量高; 3.丰富的脂肪、钙、磷及一些动物必需常量和微量矿物元素	Harmon 等(2002); Zhang 等(2015); 韩帅娟等(2019)
核糖蛋白	64.48	8.2	1.含有一些未知的生长因子; 2.促生长、刺激消化酶分泌和增强机体免疫能力	郝甜甜等(2022)

1.4.1 血浆蛋白粉（Spray dried plasma protein powder，SDPP）

血浆蛋白粉是通过低温喷雾干燥法从饲养的动物非凝血血液血浆中获得的一种屠宰场副产品，血浆蛋白粉具有较高的可消化蛋白质和相对平衡的氨基酸组成。血浆蛋白粉（主要是猪血浆粉）在提高断奶仔猪生长性能和免疫力方面的优势已经被证实。但水产动物的相关研究却十分有限。

1.4.2 肠膜蛋白粉（Dried porcine soluble，DPS）

肠膜蛋白粉主要来自于健康新鲜的肠，经一系列复合蛋白酶酶解、喷雾干燥等工艺制备的新型功能性动物蛋白原料，富含小肽，在哺乳动物的养殖中取得了良好的效果。

1.4.3 鸡蛋粉（Egg powder，EP）

鸡蛋粉是指鸡蛋除去外壳后，以新鲜蛋液为原料，经过干燥、脱水等工序加工而成的可以长期保存的粉末状蛋制品。鸡蛋粉是少有的胆固醇来源，其含有的脂肪 30%均来源于胆固醇。鸡蛋粉氨基酸平衡，营养全面，还含有免疫球蛋白、溶菌酶等大量的活性物质，能够改善虾蟹的体质，增强免疫能力，改善生长性能。

1.4.4 核糖蛋白（Ribose protein，RP）

核糖蛋白是一种新型生物分子免疫蛋白，经特殊工艺加工包装而成的一种粉末状动物蛋白。核糖蛋白除了含有人们所熟知的肽、氨基酸等成分，还含有一些未知的生长因子，如促生长因子和免疫因子等。

2 新型蛋白源在水产动物中的应用概况

新型蛋白源在大多数水产动物饲料中应用时均能在一定程度替代常规蛋白源，在适宜添加范围内对生长性能和健康的影响很小，但超出适当的范围则会对水产动物有较大负面影响。

2.1 昆虫粉（见表 7）

表 7 昆虫粉在水产动物中的应用						
项目	实验鱼种类	实验鱼规格(g)	建议添加量 (%)	替代鱼粉比例(%)	应用效果	参考文献
黄粉虫粉	黄颡鱼	10.04	18~27	50~75	1.对生长性能无负面影响； 2.抗病能力增强	Su 等(2017)
	真鲷	20~25	65	100	促进摄食、改善生长性能、 抗病能力增强	Ido 等(2019)
	鳊 (<i>Siniperca chuatsi</i>)	20.8	20~30	22~32	1.添加 20%时生长性能和 养分利用达到最佳； 2.添加 30%时鱼体 抗氧化能力最佳； 3.鱼片品质下降	Sankian 等(2018)
	虹鳟	115.6	25~50	35~67	1.对生长性能无负面影响 2.鱼片营养价值下降， 脂肪酸分布改变 (EPA、DHA 减少)	Belforti 等(2015); Iaconisi 等(2018)
	金头鲷 (<i>Sparus aurata</i>)	105.2	25	35	添加 50%时对生长性能 无负面影响，但养分消化率下降	Piccolo 等(2017)
	狼鲈 (<i>Dicentrarchus labrax</i> L.)	5.22	25	36	1.添加 25%时对生长无负面影响， 但添加 50%时生长性能下降； 2.使用黄粉虫较鱼粉蛋白质 消化率高	Gasco 等(2016)
	狼鲈	55	36	80	对生长性能、消化率 和鱼片营养价值无负面影响	Basto 等(2021)
黑水虻粉	黑鲷 (<i>Pagellus bogaraveo</i>)	110.7~246.4	21~40	25~50	1.对生长性能无负面影响； 2.各组鱼片物理特性无显著差异， 但皮肤和肌肉颜色发生变化， 在添加 50%时鱼片营养价值降低	Iaconisi 等(2017)
	锦鲤 (<i>Cyprinus carpio</i>)	55.5	6	40	鱼体水分随添加量增加而降低， 且在高添加量时肝脏负担加重	任顺等(2020)
	狼鲈	50	19.5	45	对生长性能、消化率无负面影响， 胆固醇降低(甲壳素作用)	Magalhães 等(2017)
	大西洋鲑	1398	14.75	100	对生长性能、消化率等无负面 影响，鱼片感官质量有微小变化	Belghit 等(2019)
	中华鳖 (<i>Trionyx Sinensis</i>)	224.25	8.5	10	肌肉粗脂肪随添加量线性增加	Li 等(2021)
	虹鳟	100.1	15	50	1.对生长性能、消化率、 肠道和肝脏健康、 鱼片物理参数无负面影响； 2.鱼片多不饱和脂肪酸含量降低	Caimi 等(2021)
	斑马鱼	1.2	46	100	1.影响 F1 代斑马鱼的脂肪酸组成； 2.不影响生长性能、肠道健康	Zarantoniello 等 (2021)

表7(续) 昆虫粉在水产动物中的应用

项目	实验鱼种类	实验鱼规格(g)	建议添加量(%)	替代鱼粉比例(%)	应用效果	参考文献
	狼鲈	12.1	14.8	50	血清抗氧化能力增强、抗病能力提升	Abdel 等(2021)
	大黄鱼 (<i>Larimichthys crocea</i>)	50.08	14	40	1.肌肉粗蛋白随添加量增加而下降,粗脂肪和粗灰分随添加量上升; 2.100%组大黄鱼幼鱼存活率显著低于其他实验组	Han 等(2020)
	虹鳟	178.9	40	50	1.对鱼的存活率、生长性能、鱼片物理品质参数和肠道形态无负面影响; 2.背肌多不饱和脂肪酸含量下降	Renna 等(2017)
	黄颡鱼	1.5	10.8~22.3	25~48	添加 10.8%时生长性能、抗病能力最优	Xiao 等(2018)
	建鲤 (<i>Cyprinus carpio</i> var. Jian)	34.78	5.3~7.9	50~75	1.对生长性能、体组成、消化酶无负面影响; 2.部分出现肝坏死、肠道组织损害	Li 等(2017)
	镜鲤 (<i>Cyprinus carpio</i> var. specularis)	13.68	< 13.1	75	1.体脂肪含量降低、抗氧化能力提升; 2.完全替代鱼粉时肠道组织受损	Xu 等(2020)
	黄颡鱼	1.2	11.3	20	适宜添加量对生长性能、养分利用无不良影响	Hu 等(2017)
	黄颡鱼	2	11.6	30	促进脂代谢	Xiao 等(2018)
	花鲈	5.2	27.8	50	高替代比例会使鱼体脂肪沉积增加,肝脏组织出现病变,肠道结构发育受损	胡俊苗等(2018)
蝇蛆粉	黄颡鱼	0.6	13.7	40	对生长性能、体组成和抗氧化能力无显著负面影响	杨贺舒(2020)
	牛蛙 (<i>Lithobates catesbeiana</i>)	34.1	10.3	50	1.完全替代对生长性能无显著影响; 2.高水平替代下,对养分消化率、肠道健康有负面影响	Li 等(2019)
	罗非鱼	68.85	22	50	1.完全替代鱼粉时生长性能受到抑制; 2.肉质有略微改善; 3.磷排放减少,水环境改善	Wang 等(2017)
	锦鲤	120.24	< 15	< 60	1.促进体色素沉积; 2.饲料的适口性下降 (摄食速率减缓、摄食量减少); 3.背部肌肉粗蛋白含量上升,粗脂肪降低	孟素宜等(2016)
	罗非鱼	80.26	25	100	对生长性能无负面影响	史东杰等(2015)
	黄颡鱼	2.02	8.94	20	1.胰脏脂肪变性随替代水平的增加而加重; 2.替代 60%鱼粉组肝细胞出现出血性损伤,100%替代组前肠细胞出现变性、病理性损伤	文远红等(2015)
蚯蚓粉	非洲鲶 (<i>Clarias gariepinus</i>)	0.19	11.25	25	适宜添加量对生长性能和养分利用无负面影响	Dedeke 等(2013)
	大鳞副泥鳅 (<i>Paramisgurnus dabryanus</i>)	3.86	6.38	22	显著降低了免疫能力	范海等(2016)
	鲤	8	20	70	生长性能和饲料转化率提升,蛋白质消化率随添加量增加而升高	Ngoc 等(2016)

如表 7 所示,昆虫粉作为蛋白源在虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*)、黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*)、罗非鱼 (*Oreochromis mossambicus*) 和花鲈 (*Lateolabrax japonicus*) 等大多数水产动物中应用时都能取得较好的效果,而且在关于真鲷 (*Pagrus major*)、大西洋鲑 (*Salmo salar*)、斑马鱼 (*Danio rerio*) 和罗非鱼的研究中,100%的鱼粉可被昆虫粉替代而不会对生长性能造成负面影响。另外,昆虫粉还具有增强机体抗病能力的作用。但是,也有报道认为,饲料中添加高水平昆虫粉会对一些水产动物的生长性能、养分利用有负面影响,还可造成肝脏、肠道功能受损,也会降低水产动物的存活率。此外,昆虫粉还可能在一定程度上影响鱼肉品质,降低多不饱和脂肪酸含量,影响鱼片的营养价值。水产动物中昆虫粉的适宜添加量差异较大,可能是由于水产动物的种类、大小,昆虫的种类、基质和处理方式的差异。

2.2 新型植物蛋白源

新型植物性蛋白源因加工后的抗营养因子去除、消化率提升等优势，常用来替代水产饲料中的鱼粉。评价新型植物性蛋白源的使用效果，因原料质量、试验鱼种及配方结构不同，研究结果不一致。如表 8 所示，如果将饲料中植物蛋白源的替代量控制在一定范围内，则对生长性能的影响很小，但超出适当的范围则生长性能会急剧下降。利用新型植物蛋白源，一般可替代水产动物日粮中 20%~50% 的蛋白源，在一些研究中可以达到较高的替代水平而不会对生长性能产生负面影响，如：采用 CPC 可替代条纹锯鲷（*Centropristis striata*）日粮中 80% 的鱼粉；采用 SPC 可替代金鱼（*Carassius auratus Linnaeus*）日粮中 80% 的鱼粉和大黄鱼日粮中 100% 的鱼粉；采用 FSM 可替代虹鳟日粮中 80% 的鱼粉；采用 DDGS 可以替代草鱼（*Ctenopharyngodon idellus*）日粮中 82.8% 的菜籽粕、100% 的棉籽粕和金头鲷日粮中 100% 的豆粕。

表 8 新型植物蛋白源在水产动物中的应用

项目	实验鱼种类	实验鱼规格(g)	建议用量(%)	替代比例(%)	应用效果	参考文献
棉籽浓缩蛋白	杂交石斑鱼 (♀ <i>Epinephelus fuscoguttatus</i> × ♂ <i>Epinephelus anceolatu</i>)	11.31	11~22	17~34 ^a	1.生长性能较差(氨基酸失衡、蛋白质消化率低)； 2.抗病性和存活率降低，损害了肠道免疫功能、肝脂肪沉积加重	Yin 等(2018)
	杂交石斑鱼	16.91	< 32.9	60 ^a	1.对生长性能无显著影响； 2.对免疫功能有负面影响(炎症基因表达增加、菌群结构改变、抗氧化能力下降)	Ye 等(2020)
	卵形鲳鲹 (<i>Trachinotus ovatus</i>)	25.5	8.8	26 ^a	1.对生长性能有负面影响(必需氨基酸不平衡)； 2.肠道菌群的丰度和多样性降低	Shen 等(2020)
	杂交石斑鱼	11	15.76	24 ^a	1.随着 CPC 替代水平的提高，消化蛋白酶的活性先升高然后降低； 2.肠道形态减弱，肠道中益生菌的丰度降低、条件致病菌丰度增加	Chen 等(2020)
	虹鳟	17.55	12~20	30~50 ^a	1.替代 50% 以下鱼粉时对生长性能、养分利用、存活率、体组成、血液免疫、抗氧化能力无负面影响； 2.替代 30%~50% 时抗氧化能力增强	Zhao 等(2021)
	斑节对虾 (<i>Penaeus monodon</i>)	0.8	10	33.33 ^a	改善肠道微结构，显著增加褶皱高度和菌群数	Jiang 等(2021)
	凡纳滨对虾 (<i>Litopenaeus Vannamei</i>)	2.4	15	48 ^a	1.蛋白质消化率随添加量而降低； 2.适宜添加量对生长性能、养分利用无显著负面影响	Wan 等(2018)
	条纹锯鲷	29.5	30.2	80 ^a	适宜添加量对摄食、生长性能、养分利用、体组成无显著负面影响	张静雅等(2020)
大豆浓缩蛋白	凡纳滨对虾	3	< 20	57 ^a	1.对生长性能无显著影响； 2.但是抗氧化能力受损，健康水平呈下降趋势	于菲等(2020)

表8(续1) 新型植物蛋白源在水产动物中的应用

项目	实验鱼种类	实验鱼规格(g)	建议用量(%)	替代比例(%)	应用效果	参考文献
	金鱼	2.45	39.34	80 ^a	完全替代鱼粉时对生长性能、饲料利用率、消化能力、免疫功能、抗氧化能力和肠道健康有较大损害	Zhu 等(2020)
	大黄鱼	10.45	44.72	100 ^a	1.完全替代鱼粉对生长无负面影响； 2.高SPC水平日粮的鱼肝IGF-1基因表达较低，并且随着SPC水平的升高，肝脏中TOR基因的表达先降低然后升高	Wang 等(2017)
	杂交石斑鱼	8	—	< 30 ^a	适宜添加量对生长性能无负面影响	Chen 等(2020)
	黄鳊 (<i>Monopterus albus</i>)	25.56	26	45 ^a	1.改善了血脂状况，增强了抗氧化能力，并调节了消化酶； 2.改变了肌肉生长相关基因的表达，可能影响成肌细胞的添加和骨骼肌的生长	Zhang 等(2019)
	三疣梭子蟹 (<i>Portunus trituberculatus</i>)	5	22	51.49 ^a	对脂肪生成具有一定抑制作用	Wang 等(2019)
	杂交石斑鱼	12.5	—	37.23 ^a	替代部分鱼粉能够提高肠道消化能力，但大量替代鱼粉会破坏肠道结构，引起肠道免疫反应	王俊贤(2020)
发酵豆粕	大口黑鲈 (<i>Micropterus salmoides</i>)	19.83	15	20 ^a	替代20%的鱼粉不会影响生长性能和健康，对肠道健康有一定的促进作用	钟国防等(2021)
	黄姑鱼 (<i>Nibea albiglora</i>)	31.24	13.58~20.35	20~30 ^a	血清中谷草转氨酶(AST)、谷丙转氨酶(ALT)、肝脏中IGF-1基因相对表达量显著低于对照组	王立改等(2018)

	花鲈	7.14	17.71	40 ^a	1.豆粕的消化率提高； 2.增强了抗氧化能力和先天免疫反应(下调促炎基因TNF- α 和IL-1 β ，上调抗炎基因TGF- β)； 3.减轻对肠道结构的破坏作用	Rahimnejad 等(2019)
	大口黑鲈	4.43	15.68	30 ^a	替代对生长性能、肠道结构无负面影响，肠道中支原体丰度增加	He 等(2020)
	大黄鱼	10	25.46	45 ^a	对生长性能和肠道完整性无负面影响	Wang 等(2019)
	虹鳟	18.1	7	20 ^a	对生长性能和饲料利用无负面影响，替代水平过高时会导致肠道形态受损、氧化应激加重	Choi 等(2020)
	虹鳟	130.7	30	80 ^a	对生长性能、饲料利用无显著负面影响	Voorhees 等(2019)
	花鲈	14.3	—	26.9~37.1 ^a	替代鱼粉水平较高时对生长、养分消化率、免疫反应、抗氧化能力和肠道健康有负面影响	Rahimnejad 等(2021)
	大菱鲂 (<i>Scophthalmus maximus</i>)	7.57	36	45 ^a	增强抗氧化能力，抑制炎症反应和调节大菱中的肠道菌群(益生菌丰度提升)，抵消了豆粕的负面影响	Li 等(2020)

表8(续2) 新型植物蛋白源在水产动物中的应用

项目	实验鱼种类	实验鱼规格(g)	建议用量(%)	替代比例(%)	应用效果	参考文献
	中华绒螯蟹 (<i>Eriocheir sinensis</i>)	25.53	13.54~20.31	33~50 ^a	1.消化酶活性、氨基酸吸收能力提升； 2.对生长性能、蛋白质代谢相关酶活性以及蛋白质合成和代谢相关的基因表达有正向作用	Xu 等(2020)
	大口黑鲈	5.08	< 13.2	20 ^a	1.替代20%以下鱼粉对生长性能和饲料利用无负面影响； 2.替代水平高时抗病能力减弱，肝脏发生病变	陈晓瑛等(2019)
	凡纳滨对虾	0.27	9.4	20 ^a	生长性能增强，对肠道菌群无影响	Shao 等(2019)
干酒糟及其可溶物	草鱼	5.38	28.2~32.1	72.7~82.8 ^a	1.提升生长速度，促进鱼体健康； 2.促进脂代谢； 3.肌肉胶原蛋白含量增加，但硬度下降	Abouel Azm 等(2021)
	草鱼	5	20.6	100 ^a	1.提升了生长速度，促进鱼体健康； 2.肌肉胶原蛋白含量增加，但硬度下降； 3.对抗氧化能力产生了负面影响	Kong 等(2021)
	大菱鲂	29	< 10	7.8 ^a	1.会降低生长性能并损害整体氮和能量代谢； 2.引起肠道氧化应激； 3.降低血浆三酰甘油和胆固醇水平	Diógenes 等(2018)
	欧洲鲶鱼 (<i>Silurus glanis</i>)	272.7	30	40.6 ^a	1.肝脏空泡化肝细胞减少； 2.鱼体和鱼片成分不受影响； 3.促进磷的摄入和废物排放	Sándor 等(2021)
	金头鲷	15	35	100 ^a	1.完全替代豆粕不会影响生长和饲料利用； 2.降低了饲料价格和饲养成本	Diógenes 等(2019)
	鲤	63.1	40	40 ^a	对生长性能和健康无任何负面影响	Révész 等(2019)

注:1. a:被替代蛋白源为鱼粉;b:被替代蛋白源为菜籽粕;c:被替代蛋白源为家禽粉、大豆粉、小麦粉复合蛋白源;d:被替代蛋白源为豆粕;e:被替代蛋白源为家禽粉、豆粕、玉米粉复合蛋白源;f:被替代的蛋白源为棉籽粕;
2. “—”代表参考文献中没有给出具体添加量。

植物蛋白含量较高时，会导致饲料适口性和消化率下降，氨基酸不平衡，而鱼类对氨基酸组成的变化非常敏感，如果日粮中氨基酸组成不平衡，则鱼的肠道形态会受到氨基酸缺乏的严重制约，导致肠道完整性受损，肠道菌群中益生菌与条件致病菌的比例受损，增加了肠道炎症反应导致肠道损伤的可能性，影响饲料中养分的消化吸收，进而影响鱼的健康和生长性能等。

2.3 单细胞蛋白

作为一种新型蛋白源，单细胞蛋白在水产动物中应用取得了较好的效果。如表 9 所示，大多数单细胞蛋白可以替代日粮中较高水平的鱼粉，此外，也有研究考虑采用单细胞蛋白源以替代饲料中的豆粕，以期未来饲料中广泛利用单细胞蛋白源，减少用于生产饲料大豆的陆地资源占用。单细胞蛋白源还具有一些其他功效，有些藻类蛋白可促进水产动物摄食，促进脂肪代谢，抗应激，而酵母蛋白则可改善肠道形态，促进肠道健康。

表9 单细胞蛋白源在水产动物中的应用

项目	实验鱼种类	实验鱼规格(g)	建议添加(%)	替代比例(%)	应用效果	参考文献
螺旋藻 (<i>Spirulina platensis</i>)	异育银鲫 (<i>Carassius auratus gibelio</i> var. CAS III)	3.2	11.94	20 ^a	摄食率显著上升,饲料效率显著下降,替代20%鱼粉组蛋白质沉积率与对照组无显著差异	曹申平等(2016)
	罗氏沼虾 (<i>Macrobrachium rosenbergii</i>)	0.33	21.4	60 ^a	替代鱼粉水平过高时肝脏代谢异常	曲扬华等(2021)
拟微绿球藻 (<i>Nannochloropsis</i> sp.)	大菱鲆	24.6	5~10	7.76~15.52 ^a	促进脂代谢,提高抗氧化和免疫能力	胡冬雪等(2019)
红藻 (<i>Gracilaria arcuata</i>)	罗非鱼	13	7	20 ^a	肌肉和鱼体水分、灰分、蛋白质随添加量增加而升高,脂肪相反	Younis等(2018)
脱脂微藻 (<i>Tetraselmis</i> sp. CTP4)	金头鲷	6	10	10 ^a	抗鱼体应激反应	Pereira等(2020)
栅藻 (<i>Scenedesmus</i> sp.)	大西洋鲑	229	10	50 ^a	1.添加10%时,多不饱和脂肪酸含量提高; 2.添加20%时,显著降低消化率、养分沉积效率和饲料转化率	Gong等(2019)
酿酒酵母	罗氏沼虾	6.7	23.2	60 ^a	替代60%鱼粉对生长性能无负面影响	Nguyen等(2019)
	异育银鲫	28.7	4~6	40~60 ^a	1.血浆免疫能力、抗氧化能力提升; 2.细菌攻毒后存活率提升	Zhang等(2018)
	凡纳滨对虾	0.35	2	8.1 ^a	1.改善肠道菌群,肠绒毛长度和宽度均得到改善; 2.生长性能,免疫能力提升,对弧菌抵抗力增强	Ayiku等(2020)
酵母水解物	建鲤	19.44	3	26 ^a	抗氧化能力和免疫能力提升,肠道微绒毛形态改善	Yuan等(2019)
异常威克汉姆酵母+酿酒酵母	虹鳟	144.7	23.9	40 ^a	对生长性能、养分保留和肠道健康没有负面影响	Vidakovic等(2020)
细菌蛋白	非洲鲶	18.17	27.9	30 ^a	体蛋白质、脂肪含量增加	Adeoye等(2021)
非转基因细菌浓缩物	虹鳟	2.51	25	50 ^a	高水平影响肌肉中氨基酸和脂肪酸分布,适口性可能降低	Zamani等(2020)
乙醇梭菌 (<i>Clostridium autoethanogenum</i>)	黑鯛	6.03	18	58.2 ^a	降低了磷排放	Chen等(2020)
	草鱼	25.7	5	27.5 ^b	1.添加5%时改善脂肪代谢和抗氧化能力; 2.添加10%时肝细胞损伤,肝脏功能受损,存活率降低	魏洪城等(2018)
甲基杆菌 (<i>Methylobacterium extorquens</i>)	虹鳟	15~16	10	65 ^a	存活率增加	Hardy等(2018)

注:a:被替代蛋白源为鱼粉;b:被替代蛋白源为豆粕。

2.4 功能蛋白

功能蛋白在哺乳动物饲料中作为营养补充剂已经取得了良好的效果，有减轻肠道炎症反应、促进肠绒毛的生长、保护肠道结构的作用。近年来，由于水产饲料中优质蛋白资源短缺，以功能蛋白替代鱼粉的研究得以开展。如表 10 所示，各种功能蛋白可替代在水产

动物日粮中 1%~10% 的鱼粉，应用血粉（BP）+DPS（1:1）复合可以替代鲤鱼日粮中 66.7% 的鱼粉，但会使肠绒毛高度和折叠深度降低，显著影响肠道健康。与此同时，低分子量的多肽类的功能蛋白在高添加量时，可能会有过多氨基酸生成，使肠道内的氨基酸转运系统饱和，或者是肽类与其他原料中的氨基酸吸收不同步，从而导致生长性能较差。

表 10 功能蛋白在水产动物中的应用

项目	实验鱼种类	实验鱼规格 (g)	建议添加 (%)	替代鱼粉 比例(%)	应用效果	参考文献
血浆蛋白粉	大菱鲆	39.2	0.083	< 1	增强免疫能力	姜立生等(2018)
	大口黑鲈	49.5	3.83~7.66	5~10	1.添加量高时适口性和采食量下降, 生长性能受损,饲料利用率降低; 2.溶菌酶、补体和呼吸爆发活性 等免疫功能降低	Li 等(2019)
肠膜蛋白	大口黑鲈	3.5	3	6	1.有利肠道健康,提升消化酶活力, 促进肠道绒毛发育; 2.血清和肝脏抗氧化酶活力提升, 有利于生长	熊娟等(2021)
血粉+肠膜蛋白(1:1)	鲤	69.43	4	66.7	损害肠道健康,肠绒毛高度和折叠深度 均显著低于对照组	Gao 等(2020)
核糖蛋白	大菱鲆	24	1	2.2	可提升生长性能、消化能力和 机体免疫力,具有诱食性	郝甜甜等(2021)

3 新型蛋白源应用时存在的问题及解决措施

新型蛋白源在水产动物中应用已取得了一定的效果，但是仍然存在一些限制性因素，如日粮中昆虫粉添加量过高时，由于几丁质含量太高，导致适口性下降，影响消化能力；高水平的植物蛋白成分也会降低适口性；某些微藻细胞由于其细胞壁难以被消化酶溶解，导致养分消化较差。另外还有氨基酸不平衡、抗营养因子的存在以及安全性等问题。在后期的开发和应用方面可考虑通过以下方式改善新型饲料蛋白源在水产饲料中的应用。

3.1 改善加工工艺

采用一些加工工艺，可在一定程度上去除抗营养因子，从而提高原料的质量，增强对蛋白源的利用。例如通过发酵技术，可以极大地提高原料利用率，目前需要进一步研究发酵过程中的生物活性物质对水产动物肠道菌群、机体健康和生长的影响。而且发酵条件应该根据原料来源、水产动物种类和使用的微生物来调整，进一步评估发酵条件对饲料和水产动物的影响。

3.2 配合饲料添加剂

饲料添加剂可以改善水产动物的适口性，平衡氨基酸，达到提高生长性能和维持机体健康的目的，从而提高蛋白质资源的利用率。何远法等（2018）发现低鱼粉饲料中补充蛋氨酸可提高军曹鱼（*Rachycentron canadum*）的生长性能和体蛋白含量。Ragaza 等（2021）发现，高大豆蛋白饲料中添加 60~90 g/kg 的马尾藻（*Scagassum*）有利于牙鲆（*Paralichthys olivaceus*）的生长、饲料利用率、饲料品质和部分脂肪酸的恢复。Wang 等（2019）发现，

添加高水平大豆浓缩蛋白后，补充磷虾粉可改善适口性，因而不会导致生长性能和摄食量下降。

使用外源酶以消除一些新型蛋白源使用中的负面影响也得到了关注。张海涛等(2017)发现，在含有蝇蛆粉的泥鳅饲料中添加 0.1% 甲壳素酶能够保持其生长性能、形态学指标和非特异性免疫能力；DDGS 和大豆等植物性蛋白质原料中非淀粉多糖（NSP）和植酸磷含量相对较高，限制了其在肉食性鱼类饲料中的应用。在以 DDGS 为主要蛋白源的日粮中添加植酸酶能够改善幼鱼肉品质。而添加非淀粉多糖酶也可以提升饲料的营养价值，改善表观消化率，增加微生物丰富度和多样性。Diógenes 等（2019）发现在 DDGS 饲料中添加非淀粉多糖酶，由于饲料效率提高，每千克鱼的饲养成本降低了 21.4%，并且完全抵消了由 DDGS 引起的肝脏氧化应激。

3.3 提高饲料安全性

在水产养殖中，饲料安全至关重要，新型蛋白源的安全性评估必不可少。有些昆虫在生长过程中会蓄积一些有害物质，从而损害水产动物的生产性能。我国目前还没有出台关于饲用昆虫的相关法规和标准，可参照饲料行业的相关法规和标准。同时应该完善对昆虫饲养环境的管理，确保饲料质量。另外，用于生产单细胞蛋白的某些微生物可能会产生某些有毒物质，例如霉菌毒素、氰毒素，这些毒素可以通过选择适当的微生物处理而抵消。目前，部分微生物菌种还没有列入我国饲料添加剂目录，对其安全性的全面评估还有待深入研究。

4 小结与展望

目前新型蛋白源在水产饲料中的研究主要集中在替代鱼粉、豆粕等传统蛋白源，寻找日粮中新型蛋白源的最适添加量，从而保证水产动物的生长性能、健康和肉品质。

未来，在国家“蓝色粮仓”项目的支持下,关于新型蛋白源的研究应着重在以下几点：①对更多的经济水产动物开展评估,系统研究新型替代源在生产实践中的应用，探究其适宜用量，努力实现在更多的水产动物日粮中零鱼粉添加；②提升新型蛋白源饲料的品质，根据原料的种类选择合适的加工工艺，去除抗营养因子，提升饲料的适口性，提高原料利用率；③研发配合新型蛋白源使用的饲料添加剂，平衡氨基酸，提升可消化性和适口性，尽量去除一些负面影响；④保证新型蛋白源饲料的安全性，把控原料的质量，完善相关法律法规；⑤尝试建立完整的新型蛋白源应用数据库，以供水产相关的生产技术人员和学者参考。

参考文献：略

大口黑鲈摄食含小肽饲料后的胃排空特征和消化酶活性变化

丛湘明^{1,2,3} 李向^{1,2,3} 华雪铭^{1,2,3*} 宓水潮⁴ 杭莹^{1,2,3} 易婉婷^{1,2,3}

(1.上海海洋大学, 农业农村部环境生态与鱼类营养研究中心, 上海 201306; 2.上海海洋大学, 农业农村部 淡水水生遗传资源重点实验室, 上海 201306; 3.上海海洋大学, 国家水产科学实验教育示范中心, 上海 201306; 4.常州亚源生化科技有限公司, 常州 213111)

摘要: 为探究小肽对大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)胃排空特征和消化酶活性变化规律的影响, 配制 3 种试验饲料, D0⁺饲料满足大口黑鲈的营养需求(正对照组), D0⁻饲料在 D0⁺饲料基础上降低 3%蛋白质水平(负对照组), D2 饲料则在 D0⁻饲料基础上添加 2%小肽。这 3 种饲料投喂初始体重在(21.27±0.17)g 的大口黑鲈 60d, 每组 4 个重复, 每个重复 45 尾。饲养试验结束后每组分别挑选规格相同、体重为(85.58±1.81)g 的大口黑鲈 80 尾, 放入 8 个网箱中, 每个网箱 10 尾。所有网箱的鱼投喂与养殖试验对应的饲料, 表观饱食投喂 1 次, 在投喂结束后的 0、3、6、9、12、18、24、30 h 随机对各组 8 个网箱中的 1 个网箱取样。比较摄食上述 3 种饲料后胃内容物剩余重量百分比、3 种数学模型对各组胃排空曲线的拟合程度以及消化酶活性变化。结果发现: 使用大口黑鲈胃内容物干重进行拟合效果较好, 饲料中蛋白质水平的变化及添加小肽对大口黑鲈的胃排空特征及最优模型未产生显著影响, 胃排空变化均为先慢后快再慢型, 但变化趋势不尽相同。线性、指数和平方根模型均能很好地拟合大口黑鲈的胃排空曲线, 模拟 D0⁺组胃排空规律的最佳模型是指数模型, D0⁻组和 D2 组的最佳模型是平方根模型。根据各组最佳模型计算可知 50 %和 80 %胃排空的理论时间, D0⁺组分别为 8.14 和 19.04 h, D0⁻组分别为 11.28 和 21.40 h, D2 组分别为 10.21 和 19.67 h。3 组大口黑鲈胃肠道中的消化酶(淀粉酶、蛋白酶和脂肪酶)活性在胃排空过程中均呈先升高后降低的趋势, D0⁺组摄食后 9 h 时胃肠道中的淀粉酶、脂肪酶和蛋白酶活性达到最高值, 显著高于同组其他时间点($P<0.05$), 而 D0⁻组和 D2 组则在摄食后 9 h 时胃蛋白酶活性达到最高值, 12 h 时胃肠道中的淀粉酶、脂肪酶及肠道蛋白酶活性达到最高值, 显著高于同组其他时间点($P<0.05$)。综上所述, 饲料蛋白质水平的变化以及小肽的添加, 均能引起胃肠道消化酶活性改变, 以保持胃排空时间的相对恒定, 因此不需要调整投喂频率。结合生产实践, 建议大口黑鲈投喂间隔时间为 8~21 h, 每日 2 次。

关键词: 大口黑鲈; 小肽; 胃排空率; 消化酶活性; 投喂频率

Gastric Evacuation Characteristic and Digestive Enzyme Activity Change of Largemouth Bass (*Micropterus salmoides*) Fed Diets Supplemented with Small Peptides

CONG Xiangming^{1,2,3} LI Xiang^{1,2,3} HUA Xueming^{1,2,3*} MI Shuichao⁴ HANG Ying^{1,2,3} YI Wanting^{1,2,3}

(1. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrition of the Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Freshwater Aquatic Genetic Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Changzhou Yayuan Biochemical Co., Ltd., Changzhou 213111, China)

Abstract: In order to investigate the effects of the small peptides on gastric evacuation characteristic and digestive enzyme activity change in the gastrointestinal tract of largemouth bass (*Micropterus salmoides*), three experimental diets were prepared, D0⁺ diet was meet the nutritional requirements of largemouth bass (positive control group), D0⁻ diet reduced 3% dietary protein level based on the D0⁺ diet (negative control group) and the D2 diet was added 2% small peptides based on D0⁻ diet. The three diets were fed to healthy largemouth bass with the initial body weight of (21.27±0.17) g for 60 days with four replicates in each group and 45 individuals in each replicate. At the end of the feeding experiment, 80 fish with similar body weight of (85.58±1.81) g were selected from each group, and then were randomly distributed into 8 cages per group, 10 individuals per cage.

The fish in all cages continued to be fed respectively with above three diets to apparent satiation once a day. At 0, 3, 6, 9, 12, 18, 24 and 30 h after feeding, the fish were sampled from one of the 8 cages in each group. The percentage of gastric content remaining, fitting degree of the three mathematical models to the gastric emptying curve of each group and changes of digestive enzyme activities of largemouth bass were compared after feeding the above three diets in different time periods. The results showed that the dry weight of gastric content were better fitting to the mathematical models, the gastric evacuation characteristic and the optimal model of the largemouth bass were not significantly affected by varying protein levels and supplementation of small peptides in the diet, and the gastric emptying changes were curve digestive pattern (slow - fast-slow) during the gastric evacuation process with not entirely same trend. The linear, exponential and square root models could fit the gastric emptying curve of largemouth bass well. The exponential model was the best model to simulate the gastric emptying pattern of the D0⁺ group, and the square root model was the best model to simulate the gastric emptying pattern of the D0⁻ and D2 groups. The theoretical time of 50% and 80% gastric evacuation was 8.14 and 19.04 h in D0⁺ group, 11.28 and 21.4 h in D0⁻ group, 10.21 and 19.67 h in D2 group, according to the best model calculation in each group. The activities of digestive enzymes (amylase, protease and lipase) in the gastrointestinal tract in the three groups were firstly increased and then decreased during gastric evacuation, and the activities of amylase, lipase and protease in the gastrointestinal tract in D0⁺ group reached the highest value at 9 h after ingestion, which were significantly higher than the other time in the same group ($P < 0.05$). The activity of pepsin in D0⁻ and D2 groups reached the highest value at 9 h after ingestion. While the activities of amylase, lipase and protease in the gastrointestinal tract reached the highest value at 12 h after ingestion, which were significantly higher than the other time in the same group ($P < 0.05$). In conclusion, changes in dietary protein levels and addition of small peptides can cause changes in gastrointestinal digestive enzyme to maintain a relatively constant gastric emptying time, so there is no need to adjust feeding frequency. According to the production practice, it is recommended that the feeding interval of largemouth bass is 8 to 21 h, twice a day.

Key words: *Micropterus salmoides*; small peptide; gastric evacuation rate; digestive enzyme; feeding frequency

鱼类的胃排空率(gastric evacuation rate, GER)指摄食后食物从胃排至肠道的速率^[1], 是建立鱼类摄食和生长模型的重要组成部分^[2-3]。在野生鱼类资源调查中常将测定的胃排空率与相应种群在自然环境中的胃内容物相结合, 用来研究鱼类在自然状态下的日摄食量^[4]、摄食周期以及生态转换效率等一系列生态学相关的问题^[5-6]。在养殖生产中, 胃排空率常被用于人工配合饲料开发^[7]、饵料转换率评估^[3]以及投喂策略优化^[8-10]等研究。20 世纪末以来, 国内学者陆续对鲢鱼(*Silurus asotus* Linnaeus)^[11]、斑点叉尾(*Ictalurus punctatus*)^[12]、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[13]等养殖鱼类的胃排空率进行了系统研究, 并通过多种数学模型对胃内容物重量进行拟合, 为科学制定养殖鱼类投喂频率提供重要参数。

大口黑鲈(*Micropterus salmoides*), 隶属鲈形目(Perciformes), 黑鲈属(*Micropterus*), 是具有适应性强、生长快等优点的肉食性温水鱼类, 且可以全程使用人工配合饲料养殖, 目前已成为我国淡水鱼养殖的主要品种之一。但近几年陆续报道在全程使用配合饲料饲养后期会出现肌肉品质下降^[14]、肝脏病变等状况^[15], 这说明大口黑鲈相关饲料产品还有很大的提升空间。小肽又称寡肽, 是一类由蛋白质水解形成, 以 2~10 个氨基酸组成的易消化吸收

且兼顾多种生物功能的小分子物质^[16]。在本实验室前期研究中发现，饲料中添加 2 %小肽可以提高消化酶活性，促进养殖动物生长^[17]，但是否需要同时改变投喂策略更有利于营养物质的消化吸收还未可知。

因此，本研究在前期研究^[17]基础上，考察摄食含小肽饲料后的大口黑鲈胃排空率及胃排空过程中消化酶活性变化，使用数学模型对胃排空率进行拟合，计算其排空时间，旨在了解添加小肽后对大口黑鲈消化吸收进程的影响，为养殖中投喂频率和饲料配方的优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验饲料

试验所用小肽由常州某生化科技有限公司提供，通过复合水解法以玉米蛋白作为底物，经过浸泡、酸化、酶解、浓缩、均质、喷雾干燥、半成品物理冷却、粉体包衣等多道工艺精制而成。其蛋白质水平为 46 %，其中小肽平均分子质量为 1003 Da，分子质量为 1000 Da 的小分子蛋白质占总蛋白质的 25 %~30 %。

根据大口黑鲈的营养需求并结合养殖生产中常用的商品饲料设计本试验所用饲料配方，以鱼粉、豆粕、玉米蛋白粉等原料为蛋白质源，鱼油、菜籽油和大豆磷脂为脂肪源，配制 3 种饲料：D0⁺饲料满足大口黑鲈的营养需求(正对照组)，D0⁻饲料在 D0⁺饲料基础上降低 3 % 蛋白质水平(饲料中鱼粉、血粉、豆粕、玉米蛋白粉等比例减少)(负对照组)，D2 饲料则在 D0⁻饲料基础上添加 2 %小肽。将饲料原料粉碎后过 60 目筛，按照配方比例充分混匀后，再加入油脂使用混合机混合均匀，随后加入所配饲料质量 15 %~20 %的水后再次混匀，经制粒机制成直径为 2 mm 的颗粒饲料，待 50 °C烘干至水分含量低于 10 %后，密封储存于-20 °C 冰箱中备用。试验饲料组成及营养水平见表 1。

表 1 试验饲料组成及营养水平(风干基础)			
Table 1 Composition and nutrient levels of experimental diets (air-dry basis)			%
项目 Items	饲料 Diets		
	D0 ⁺	D0 ⁻	D2
原料 Ingredients			
鱼粉 Fish meal	45.00	42.13	42.13
豆粕 Soybean meal	10.00	9.36	9.36
血球蛋白粉 Spray-dried blood cells	6.00	5.63	5.63
玉米蛋白粉 Corn gluten meal	10.00	9.36	9.36
小肽 Small peptides			2.00
α-淀粉 α-starch	10.50	13.00	13.00
鱼油 Fish oil	4.00	4.00	4.00
大豆磷脂 Soybean lecithin	1.50	1.50	1.50
菜籽油 Rapeseed oil	2.00	2.00	2.00
维生素预混料 Vitamin premix ¹⁾	1.00	1.00	1.00
矿物质预混料 Mineral premix ²⁾	0.50	0.50	0.50

续表 1

项目 Items	饲料 Diets		
	D0 ⁺	D0 ⁻	D2
酵母膏 Yeast extract	1.00	1.00	1.00
氯化胆碱 Choline chloride	0.50	0.50	0.50
磷酸二氢钙 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	1.00	1.00	1.00
牛磺酸 Taurine	0.30	0.30	0.30
微晶纤维素 Microcrystalline cellulose	2.00	2.00	2.00
沸石粉 Zeolite	4.70	6.72	4.72
合计 Total	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels ³⁾			
粗蛋白质 Crude protein	46.64	43.70	44.64
粗脂肪 Crude lipid	12.07	11.78	11.82
总能 Gross energy / (MJ/kg)	18.94	18.84	18.81

1) 维生素预混料为每千克饲料提供 Vitamin premix provided the following per kg of diets: VA 16 000 IU, VD₃ 8 000 IU, VK₃ 14.72 mg, VB₁ 17.8 mg, VB₂ 48 mg, VB₆ 29.52 mg, VB₁₂ 0.24 mg, VE 160 mg, VC 800 mg, 烟酰胺 niacinamide 79.2 mg, 泛酸钙 calcium pantothenate 73.6 mg, 叶酸 folic acid 6.4 mg, 生物素 biotin 0.64 mg, 肌醇 inositol 320 mg。

2) 矿物质预混料为每千克饲料提供 Mineral premix provided the following per kg of diets: Cu (as copper sulfate) 2.0 mg, Zn (as zinc sulfate) 34.4 mg, Mn (as manganese sulfate) 6.2 mg, Fe (as ferrous sulfate) 21.1 mg, I (as calcium iodate) 1.63 mg, Se (as sodium selenite) 0.18 mg, Co (as cobaltous chloride) 0.24 mg, Mg (as magnesium sulfate monohydrate) 52.7 mg。

3) 总能为计算值,其余为实测值。Gross energy was a calculated value, while the others were measured values.

1.2 饲养管理

饲养试验在上海海洋大学滨海养殖基地进行。提前将购买于浙江省湖州市池塘养殖的鱼苗进行暂养与驯化,选取规格均匀、健康的大口黑鲈 540 尾[初始体重(21.27±0.17) g],随机分配至 12 个网箱中,每个网箱(200 cm×120 cm×100 cm) 45 尾鱼,每组 4 个网箱即 4 个重复,养殖周期为 60 d,每天表观饱食投喂 2 次(08:30 和 16:30),日投喂量为体重的 2%~3%,采用自然光照,水体温度(27±5)℃;定期吸污换水,24 h 连续充气;溶解氧浓度不低于 5 mg/L,氨氮浓度不高于 0.3 mg/L。

1.3 试验设计

D0⁺组、D0⁻组和 D2 组分别从饲养试验结束后的 4 个网箱中挑选规格相同、体重为(85.58±1.81) g 的大口黑鲈 80 尾,将挑选出的大口黑鲈放置在每组相应的小网箱(80 cm×30 cm×50 cm)中,每组 8 个网箱,每个网箱 10 尾。正式试验开始前,通过解剖法确定取样时间间隔,为保证试验采样操作方便,所有正式试验用鱼饥饿处理 48 h,确保其消化道彻底排空。随后,所有网箱的鱼投喂与养殖试验对应的饲料,表观饱食投喂 1 次,投喂持续时间 30 min,分别在投喂结束后的 0、3、6、9、12、18、24、30 h 随机对各组 8 个网箱中的 1 个网箱取样。胃排空试验时水质和管理条件与前期养殖试验相同。

1.4 样品采集与测定

将网箱中 10 尾大口黑鲈全部捞出,使用丁香酚迅速将鱼麻醉。沿着大口黑鲈腹部,从肛门剪至下颌部,暴露内脏。分离出胃和消化道,用镊子分别夹紧胃贲门部和幽门部,将贲门朝向预先干燥称重的离心管,完全挤出胃内容物,对离心管称重,所得重量即为胃内

内容物湿重；将胃内容物置于烘箱中按 GB/T 6435—2006 测定水分含量，然后记录所得干重。

将去除内容物的胃和肠道置于-20℃保存，用于消化酶活性的测定。淀粉酶、脂肪酶活性均采用南京建成生物工程研究所提供的试剂盒进行测定；胃蛋白酶活性采用 GB/T 23527—2009 中酸性蛋白酶活性测定方法测定，肠道蛋白酶活性采用 GB/T 23527—2009 中性蛋白酶活性测定方法测定，组织匀浆液的蛋白质浓度采用考马斯亮蓝染色法进行测定。

1.5 指标计算与数学模型

$$SR(\%)=100\times N_t/N_0;$$

$$WGR(\%)=100\times(W_t-W_0)/W_0;$$

$$FCR=W_f/(W_T-W_0);$$

$$SGR(\%/d)=100\times(\ln W_t-\ln W_0)/t。$$

式中： SR 为存活率； N_t 为终末尾数； N_0 为初始尾数； WGR 为增重率； W_t 为终末体重； W_0 为初始体重； FCR 为饲料系数； W_f 为摄入饲料量； W_T 为试验末总重； W_0 为试验初总重； SGR 为特定生长率。

参考文献^[10]用线性、指数和平方根模型分别拟合胃内容物剩余重量百分比：

$$\text{线性模型：} Y=A-Bt;$$

$$\text{指数模型：} Y=Ae^{-Bt};$$

$$\text{平方根模型：} Y^{0.5}=A-Bt。$$

式中： Y 为任一取样时间胃内容物重量占总摄食量的百分比，即胃内容物剩余重量百分比 $(\%)=(\text{任一取样时间时胃内容物重量}/\text{总摄食量})\times 100$ ； B 为瞬时胃排空率 $(\%/h)$ ； t 为摄食后的时间 (h) ； A 为常数。通过比较各拟合模型的相关系数 (R^2) 、残差平方和 (RSS) 、残差的标准差 (SDR) 来选择大口黑鲈的最佳排空模型。

1.6 数据处理与统计分析

试验数据用 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)，若发现各时间点存在显著差异则采用 Duncan 氏法进行多重比较。3 种数学模型的参数 A 、 B 均由统计软件 Origin 2018 进行曲线拟合得到。所有统计值均以平均值 $\pm$ 标准差(mean $\pm$ SD)表示，显著水平定为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 大口黑鲈摄食不同饲料后生长性能的变化

从表 2 可以看出, D0⁺组终末体重与增重率最高, D2 组终末体重与增重率略高于 D0⁻组, 但差异不显著($P>0.05$)。3 组间饲料系数、特定生长率与存活率也都差异不显著($P>0.05$)。

表 2 各组大口黑鲈摄食不同饲料的生长性能
Table 2 Growth performance of largemouth bass fed different diets in each group

组别 Groups	初始体重 IBW /g	终末体重 FBW /g	增重率 WGR/%	饲料系数 FCR	特定生长率 SGR/(%/d)	存活率 SR/%
D0 ⁺	21.24±0.15	83.56±2.90	293.25±11.84	0.85±0.04	2.28±0.05	95.56±2.22
D0 ⁻	21.31±0.21	80.71±1.81	278.81±6.30	0.88±0.03	2.22±0.03	94.44±1.92
D2	21.29±0.16	81.15±2.03	281.20±9.42	0.86±0.02	2.23±0.04	95.56±2.72

同列数据肩标无字母表示差异不显著($P>0.05$)。

In the same column, values with no letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$).

2.2 大口黑鲈摄食不同饲料后胃内容物水分含量的变化

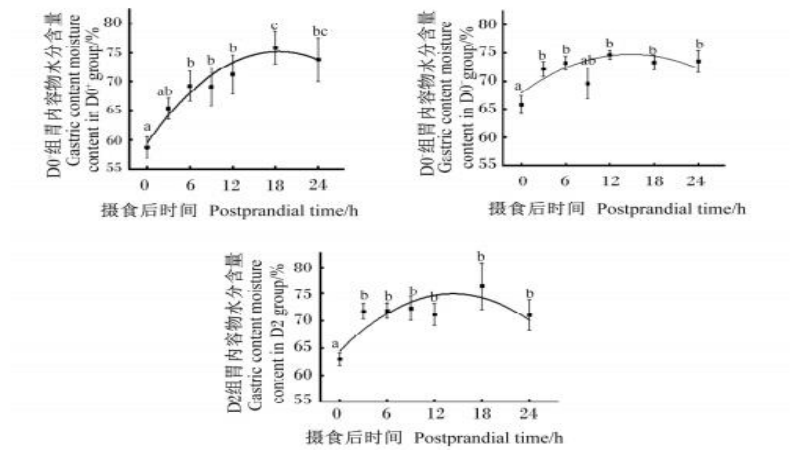
由于 30 h 时大口黑鲈胃内容物已排空未采集到内容物, 因此摄食后各组胃内容物水分含量变化为 24 h 内, 结果如图 1 所示。3 组大口黑鲈胃内容物水分含量均在摄食后 0~6 h 显著上升($P<0.05$), 均呈现先上升后下降的趋势。D0⁺组、D0⁻组和 D2 组胃内容物水分含量分别在 18、12 和 18 h 最高。D0⁻组和 D2 组胃内容物水分含量在 3~24 h 内保持稳定。

2.3 大口黑鲈摄食不同饲料后胃排空模型的选择与胃排空时间

分别使用线性、平方根及指数模型对 3 组大口黑鲈胃排空数据进行拟合。结果显示(表 3, 图 2), 3 组胃内容物的干重和湿重数据能较好地与 3 种模型进行拟合。比较各组各模型的 R^2 , 采用湿重拟合结果中只有 D2 组线性模型 R^2 高于 0.900。综合 R^2 、RSS 以及 SDR 可知, 使用胃内容物干重拟合结果相对要优于湿重拟合结果。在本试验条件下, D0⁺组胃排空规律的最佳模型是使用干重拟合的指数模型, D0⁻组和 D2 组的最佳模型是使用干重拟合的平方根模型。

将图 2 中最佳模型与表 4 结合来看, D0⁺、D0⁻和 D2 组的胃内容物完全排空均为 30 h, 但 3 组的变化趋势不尽相同。D0⁺组中在 0~9 h, 胃内容物剩余重量百分比在 9 h 时急剧下降, 胃内容物剩余重量百分比降至 42 %左右, 随后缓慢下降至 24 h 时, 胃内容物已排空 85%左右; 在 30 h 时, 胃内容物已基本排空。D0⁻组中在 0~9 h, 胃内容物剩余重量百分比保持着相对匀速下降趋势, 9~18 h 时胃内容物剩余重量百分比急剧降至 23 %左右, 随后缓慢下降至 24 h 时, 胃内容物已排空 80 %左右; 在 30 h 时, 胃内容物已基本排空。D2 组在整个排空过程中, 胃内容物剩余重量百分比也呈现先慢后快再慢的特点, 但保持着相对匀速下降趋势, 12 h 时胃内容物剩余重量百分比降至 42 %左右, 在 24 h 时, 胃内容物已排空 85 %左右; 在 30 h 时, 胃内容物已基本排空。因此, 根据各组最佳模型拟合得到的方程式

$Y=99.080e^{-0.084t}$ 、 $Y^{0.5}=9.972-0.257t$ 和 $Y^{0.5}=9.8689-0.274t$ ，计算可知 50 %和 80 %胃排空的理论时间，D0⁺组分别为 8.14 和 19.04 h，D0⁻组分别为 11.28 和 21.4 h，D2 组分别为 10.21 和 19.67 h。



不同小写字母表示不同取样时间点的数据之间差异显著 ($P<0.05$)。下图同。
Different letters represented significant difference among different sampling time points ($P<0.05$). The same as below.

图 1 各组大口黑鲈摄食不同饲料的胃内容物水分含量
Fig.1 Gastric content moisture content of largemouth bass fed different diets in each group

表 3 各组大口黑鲈摄食不同饲料的胃排空曲线的 3 种数学模型拟合
Table 3 Fitting with 3 types of mathematical models for gastric evacuation curve of largemouth bass fed different diets in each group

项目 Items	组别 Groups	模型 Models	公式 Equations	R^2	RSS	SDR
干重 Dry weight	D0 ⁺	线性模型	$Y=82.837-2.986t$	0.847	12 379.985	12.518
		平方根模型	$Y^{0.5}=9.646-0.280t$	0.901	7 867.903	9.974
		指数模型	$Y=99.080e^{-0.084t}$	0.914	6 985.017	9.398
	D0 ⁻	线性模型	$Y=91.925-3.217t$	0.897	8 959.736	10.650
		平方根模型	$Y^{0.5}=9.972-0.257t$	0.913	7 711.435	9.877
		指数模型	$Y=103.404e^{-0.070t}$	0.890	9 706.077	11.046
	D2	线性模型	$Y=88.554-3.203t$	0.897	8 904.038	10.616
		平方根模型	$Y^{0.5}=9.869-0.274t$	0.922	6 837.580	9.303
		指数模型	$Y=101.786e^{-0.077t}$	0.905	8 335.720	10.232
续表 3						
项目 Items	组别 Groups	模型 Models	公式 Equations	R^2	RSS	SDR
湿重 Wet weight	D0 ⁺	线性模型	$Y=98.554-3.187t$	0.865	11 991.963	12.320
		平方根模型	$Y^{0.5}=10.171-0.222t$	0.854	13 191.932	12.917
		指数模型	$Y=106.638e^{-0.058t}$	0.824	15 661.114	14.056
	D0 ⁻	线性模型	$Y=106.890-3.588t$	0.883	7 052.997	9.449
		平方根模型	$Y^{0.5}=10.605-0.245t$	0.862	15 322.741	13.913
		指数模型	$Y=114.725e^{-0.060t}$	0.817	20 328.520	15.985
	D2	线性模型	$Y=107.133-3.638t$	0.907	10 266.075	11.400
		平方根模型	$Y^{0.5}=10.623-0.250t$	0.888	12 601.464	12.614
		指数模型	$Y=115.145e^{-0.061t}$	0.840	17 867.011	14.971

R^2 为相关系数;RSS 为残差平方和;SDR 为残差的标准差。
 R^2 was correlation coefficient; RSS was residual sum of squares; SDR was standard difference residual.

2.4 各组胃排空过程中消化酶活性的变化

由图 3 至图 5 可知，各组胃肠道中的淀粉酶、蛋白酶和脂肪酶活性均呈先升高后降低的趋势，D0⁺组摄食后 9 h 时胃肠道中的淀粉酶、脂肪酶和蛋白酶活性达到最高值，而 D0⁻组和 D2 组则在摄食后 9 h 时胃蛋白酶活性达到最高值，显著高于同组其他时间点($P<0.05$)，12h 时胃肠道中的淀粉酶、脂肪酶及肠道蛋白酶活性达到最高值，显著高于同组其他时间点

($P<0.05$)。

通过比较各组各时间点 3 种消化酶活性(图 6)可知, 刚摄食后, D0 组胃淀粉酶和胃蛋白酶活性显著高于 D0+ 组和 D2 组($P<0.05$), 而 D0+ 组肠道淀粉酶活性显著高于其余 2 组($P<0.05$), 肠道蛋白酶活性显著低于 D0- 组和 D2 组($P<0.05$); 3 组胃脂肪酶活性除 6 h 外其余时间点差异不显著($P>0.05$)。随着时间的推移, 胃肠道 3 种消化酶的活性也发生了变化, 在摄食后 6h 时 D0+ 组胃蛋白酶、淀粉酶以及肠道脂肪酶活性显著高于其余 2 组($P<0.05$), 摄食 12 h 后 D0+ 组胃肠道的淀粉酶和胃蛋白酶活性显著低于其余 2 组($P<0.05$)。

表 4 各组大口黑鲈摄食不同饲料的体重与胃内容物重量(干重)
Table 4 Body weight and gastric content weight (dry weight) of largemouth bass fed different diets in each group

项目 Items	组别 Groups	摄食后时间 Postprandial time/h							
		0	3	6	9	12	18	24	30
体重 Body weight/g	D0 ⁺	85.56 ±2.32	85.40 ±1.72	85.78 ±1.50	85.40 ±2.11	85.50 ±2.14	85.29 ±1.83	85.26 ±2.04	85.80 ±1.64
		85.90 ±1.76	85.50 ±1.78	85.50 ±1.67	85.60 ±1.93	85.20 ±1.72	85.70 ±1.58	85.30 ±1.83	85.79 ±1.57
	D0 ⁻	85.90 ±1.43	85.60 ±1.93	85.99 ±1.50	85.70 ±1.69	85.90 ±1.67	85.30 ±1.97	85.39 ±2.07	85.80 ±1.25
		85.90 ±1.43	85.60 ±1.93	85.99 ±1.50	85.70 ±1.69	85.90 ±1.67	85.30 ±1.97	85.39 ±2.07	85.80 ±1.25
	D2	1.10 ±0.11	0.82 ±0.08	0.70 ±0.14	0.47 ±0.09	0.40 ±0.10	0.29 ±0.09	0.17 ±0.07	0
		1.10 ±0.11	0.82 ±0.08	0.70 ±0.14	0.47 ±0.09	0.40 ±0.10	0.29 ±0.09	0.17 ±0.07	0
胃内容物干重 Dry weight of gastric content/g	D0 ⁺	1.10 ±0.12	0.89 ±0.15	0.78 ±0.10	0.72 ±0.11	0.52 ±0.11	0.26 ±0.06	0.21 ±0.05	0
		1.10 ±0.12	0.89 ±0.15	0.78 ±0.10	0.72 ±0.11	0.52 ±0.11	0.26 ±0.06	0.21 ±0.05	0
	D0 ⁻	1.21 ±0.11	0.91 ±0.12	0.85 ±0.12	0.71 ±0.13	0.52 ±0.12	0.24 ±0.06	0.19 ±0.08	0
		1.21 ±0.11	0.91 ±0.12	0.85 ±0.12	0.71 ±0.13	0.52 ±0.12	0.24 ±0.06	0.19 ±0.08	0
	D2	99.75 ±10.43	74.29 ±7.33	63.74 ±12.57	42.33 ±8.52	36.22 ±8.88	25.95 ±7.83	15.87 ±6.10	0
		99.75 ±10.43	74.29 ±7.33	63.74 ±12.57	42.33 ±8.52	36.22 ±8.88	25.95 ±7.83	15.87 ±6.10	0
胃内容物剩余重量 百分比(干重) Percentage of gastric content remaining (dry weight) / %	D0 ⁺	99.88 ±11.05	80.79 ±13.26	70.52 ±9.47	65.64 ±9.88	47.33 ±9.71	23.60 ±5.46	19.52 ±4.63	0
		99.88 ±11.05	80.79 ±13.26	70.52 ±9.47	65.64 ±9.88	47.33 ±9.71	23.60 ±5.46	19.52 ±4.63	0
	D0 ⁻	99.93 ±9.41	75.29 ±9.84	70.15 ±9.76	58.70 ±10.82	42.87 ±10.19	20.09 ±5.00	15.48 ±6.25	0
		99.93 ±9.41	75.29 ±9.84	70.15 ±9.76	58.70 ±10.82	42.87 ±10.19	20.09 ±5.00	15.48 ±6.25	0
	D2	99.93 ±9.41	75.29 ±9.84	70.15 ±9.76	58.70 ±10.82	42.87 ±10.19	20.09 ±5.00	15.48 ±6.25	0
		99.93 ±9.41	75.29 ±9.84	70.15 ±9.76	58.70 ±10.82	42.87 ±10.19	20.09 ±5.00	15.48 ±6.25	0

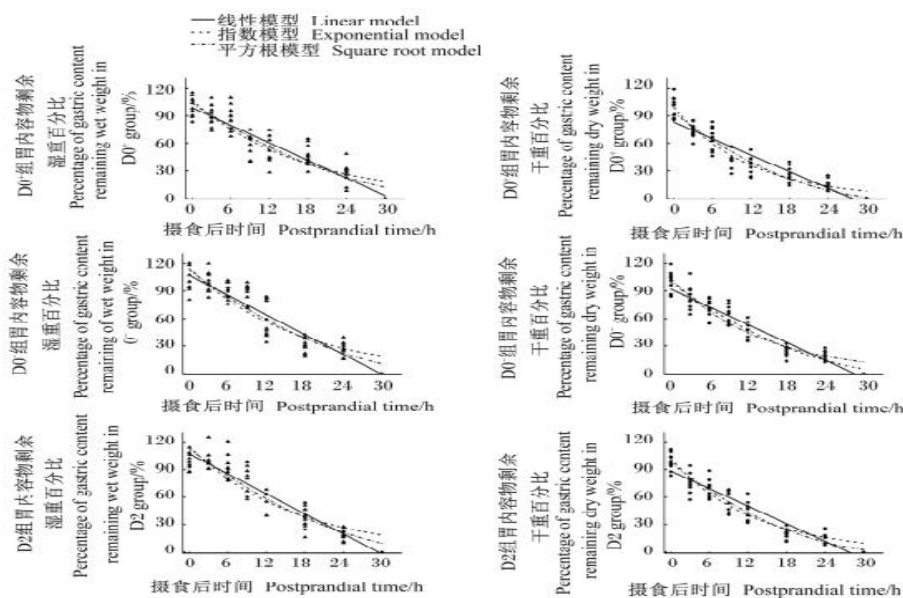


图 2 3 种数学模型对各组大口黑鲈胃内容物剩余重量百分比变化的拟合结果
Fig.2 Fitting results changes of percentage of gastric content remaining weight of largemouth bass in each group by three mathematical models

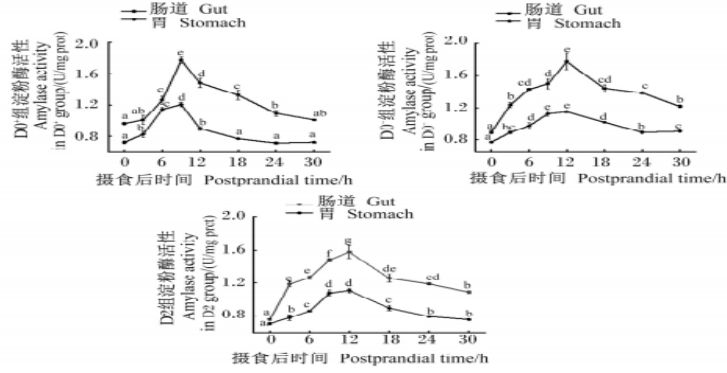


图 3 各组大口黑鲈摄食不同饲料 30 h 内胃肠道淀粉酶活性变化
Fig.3 Amylase activity changes in stomach and gut of largemouth bass fed different diets within 30 h in each group

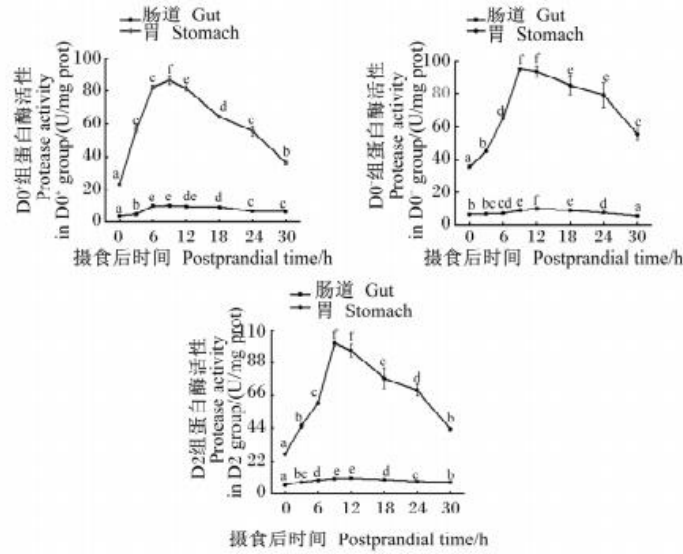


图 4 各组大口黑鲈摄食不同饲料 30 h 内胃肠道蛋白酶活性变化
Fig.4 Protease activity changes in stomach and gut of largemouth bass fed different diets within 30 h in each group

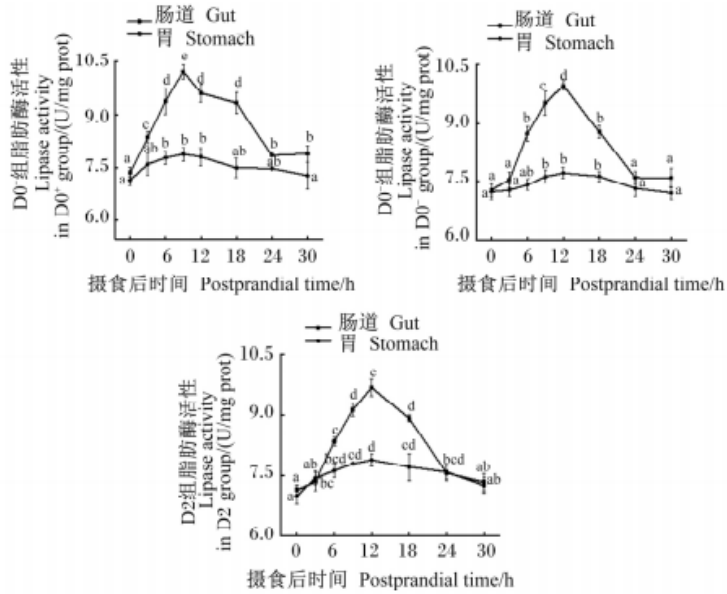


图 5 各组大口黑鲈摄食不同饲料 30 h 内胃肠道脂肪酶活性变化
Fig.5 Lipase activity changes in stomach and gut of largemouth bass fed different diets within 30 h in each group

3 讨论

3.1 不同饲料对大口黑鲈胃排空特征的影响

虽然鱼类种属繁多,有着不同的生活习性与摄食习惯,但主要胃排空类型分为3种:第1种类型为先快后慢型,当食物到达鱼类胃部后,先经过一段时间的快速排空,随后随着时间的增加胃排空速率逐渐减慢,如摄食浮游生物的鳊鱼(*Engraulis*)^[18]和玉筋鱼(*Ammodytes personatus*)^[5],投喂饲料的斑点叉尾^[12]和瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)^[19];第2种类型为直线下降型,鱼类摄食后其胃内容物重量随时间的推移呈线性下降趋势,如许氏平鲷(*Sebastes schlegelii*)^[20]、黑鲷(*Sparus macrocephalus*)^[21]等肉食性鱼类;第3种类型为先慢后快再慢型,鱼类摄食后其初始胃排空速率较低,随后排空速率开始加快,最后又降低排空速率直至胃内容物排空,如厚颌鲂幼鱼(*Megalobrama pellegrini*)^[22]、云龙石斑鱼(*E. moara*♀×*E. lanceolatus*)^[23]和虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[24]等。本研究发现,摄食不同饲料后的大口黑鲈胃排空特征不尽相同,但都呈现出先慢后快再慢的特点,D0⁺组和D0组尤为明显,胃内容物剩余重量百分比分别于9和18h明显下降。这说明不同饲料对于大口黑鲈胃排空的总体趋势影响不大,在使用不同品质鱼粉制作的饲料投喂欧白鲑(*Coregonus albula*)^[25]及不同蛋白质水平的饲料投喂虹鳟^[24]时也得到了类似的结果。

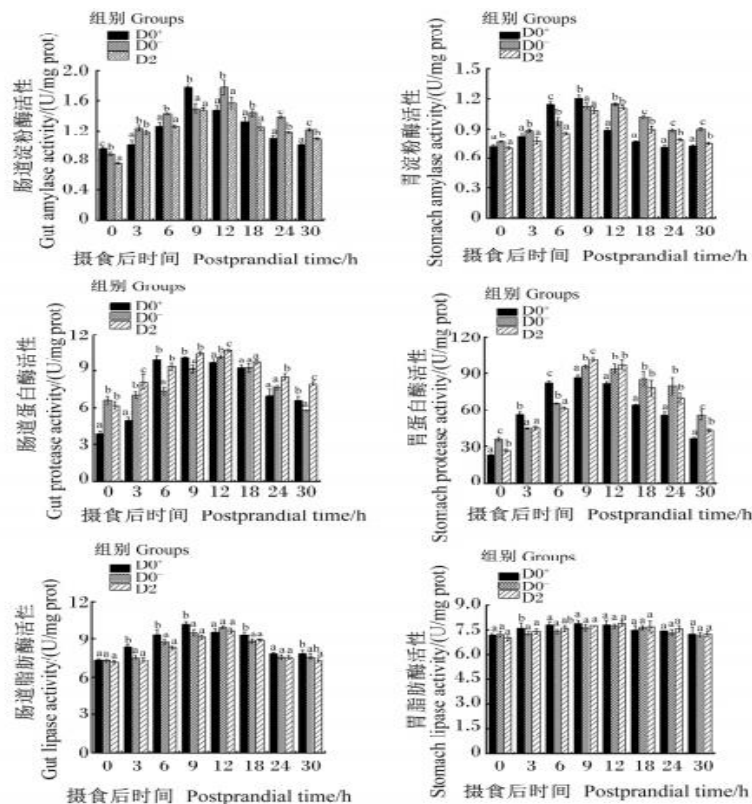


图6 各时间点内3组大口黑鲈摄食不同饲料的胃肠道消化酶活性的比较
Fig.6 Comparison of digestive enzyme activities in stomach and gut of largemouth bass fed different diets among three groups at each time point

3.2 不同饲料对大口黑鲈最优模型的影响

在本试验中, 3 组大口黑鲈胃内容物水分含量均在摄食 3 h 后上升, 自 6 h 开始基本保持不变, 这种现象是鱼类消化饲料的主要步骤之一^[12]。研究表明, 鱼类胃内容物中的水分含量对胃排空模型的建立有一定的影响^[26], 用湿重来模拟鱼类胃排空有可能高估胃内容物的实际含量。本研究中, 各组胃内容物剩余湿重百分比在 0~6 h 会有个别取样点超过 100 % 的现象, 在虹鳟^[13]和南方鲇幼鱼^[27]等试验中均出现此现象, 这种现象会导致拟合模型的可靠性降低。从本试验湿重拟合结果来看确实如此, 各组各模型的 R^2 只有 D2 组的线性模型高于 0.900。因此, 本试验采用胃内容物干重来模拟评估大口黑鲈胃排空模型。

由于鱼类胃排空机制复杂多样, 因此很难用统一的模型表现不同鱼类胃排空方式。文献报道的拟合模型就有 10 余种, 如平方根模型、指数模型、线性模型、幂函数模型、逻辑斯蒂克模型、Gompertz 模型、倒数模型等^[1]。其中最为常用的拟合模型是线性模型、指数模型以及平方根模型^[28]。目前研究表明, 眼斑拟石首鱼(*Sciaenopsocellatus*)^[29]、许氏平鲈^[20]、大眼梭鲈(*Stizostedion vitreum vitreum*)^[30]等鱼类的胃排空方式适用线性模型拟合, 而俄罗斯鲟(*Acipenser gueldenstaedtii*)幼鱼^[31]、厚颌鲂幼鱼^[22]、鲇鱼^[11]等鱼类的胃排空方式适用平方根模型拟合; 斑点叉尾^[12]、瓦氏黄颡鱼^[19]和银大麻哈鱼(*Oncorhynchus kisutch*)^[32]等鱼类的胃排空方式适用指数模型拟合。在本试验中, 3 组数据能较好地用 3 种模型进行拟合, 由结果可以看出经 D0⁺组指数模型和平方根模型的 R^2 、RSS 以及 SDR 差异不大, 综合比较后, D0⁺组胃排空规律的最佳模型是指数模型, D0⁻组和 D2 组的最佳模型是平方根模型, 其方程式分别为 $Y=99.080e^{-0.084t}$ 、 $Y^{0.5}=9.972-0.257t$ 和 $Y^{0.5}=9.8689-0.274t$, 通过计算可知 50 % 和 80 % 胃排空的理论时间, D0⁺组分别为 8.14 和 19.04 h, D0⁻组分别为 11.28 和 21.40 h, D2 组分别为 10.21 和 19.67 h。3 组 50 % 和 80 % 胃排空时间有一定差异, D0⁺组最短, 可能是因为 D0⁺组饲料中蛋白质水平高于其他 2 组, 尤其是鱼粉中存在“未知生长因子”, 使得饲料更容易被机体消化分解; D2 组胃排空后期时间缩短, 可能与小肽促进营养物质的吸收功能有关。

有研究表明, 当鱼类胃内容物排出超过 50 % 后, 其食欲的恢复也超过 50 %^[33], 当排空超过 80 % 时, 其食欲完全恢复^[34]。在理想情况下, 当鱼类的食欲恢复时, 立即获得饲料, 才能保证良好的生长, 并避免过度投喂所造成的养殖水体污染。但张鹏飞等^[35]认为胃排空率达到 80 % 作为投喂最佳时间间隔的判定指标并不充分, 还要考虑到鱼类的摄食节律, 郭浩宇等^[20]在许氏平鲈幼鱼的研究中认为, 投喂间隔时间应结合养殖过程中的实际观察; 朱

云海等^[36]在日本黄姑鱼(*Nibea japonica*)的研究中认为,投喂间隔时间应该在食欲开始恢复和完全恢复之间。因此,综合3组拟合结果大口黑鲈投喂间隔时间应为8~21 h,此时食欲已得到较大程度的恢复,能取得较好的投喂效果。谢苏明等^[37]研究大口黑鲈投喂频率后发现,分别于每天06:00和18:00各投喂1次的生长率、抗氧化能力优于其他组,间隔时间为12 h,与本试验结论基本吻合。

3.3 胃排空过程中消化酶活性的变化

消化酶在鱼类生长发育过程中有着极其重要的作用,根据消化对象的不同,大致可分为蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶和纤维素酶等几种^[38]。鱼类在摄食消化过程中,随着时间的推移,消化酶的活性也发生相应的变化,消化道中酶的数量经过一段时间达到峰值,之后便会随着饲料的减少而减少,消化道排空时最少^[39]。

在本试验中,3组大口黑鲈胃肠道中的蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶活性随着时间的推移都呈现先升高后降低的规律性时序变化和组织差异性,这与在斑点叉尾^[12]、云龙石斑鱼^[23]、全雄黄颡鱼(all-male *Pelteobagrus fulvidraco*)^[40]和罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)^[41]的研究结果一致。D0⁺组饲料蛋白质水平及鱼粉用量高于其他2组,机体更容易获取所需要的营养,因此,胃肠道的淀粉酶和蛋白酶活性变化速率要快于其余2组,这与D0⁺组胃排空变化速率快于其余2组的结果相吻合;而D0⁻组和D2组为了获得足够的营养,机体通过增强胃肠道消化酶活性的方式来强化营养物质的消化吸收,因此消化酶活性在前期达到峰值要慢于D0⁺组。本研究中,D2组大口黑鲈6~9 h胃内容物排空速度高于D0⁻组,其9 h胃蛋白酶活性也显著高于D0⁻组,9~30 h肠道的蛋白酶活性都显著高于D0⁺组和D0⁻组,可能因为饲料中添加的小肽在胃部经过胃蛋白酶-盐酸系统的分泌和消化作用释放到达肠道,经肠道中PepT1跨膜运输进行完整的转运吸收^[42],在此过程中通过激活细胞膜上的受体或与细胞内受体结合等方式,引起细胞信号传递,诱导胃肠道内分泌细胞分泌多种激素^[16],进而提高胃肠道内消化酶的活性^[43],增强肠道对蛋白质的吸收利用。

但是从生长结果来看,3组之间差异不显著,这与我们前期在(11.04±0.05) g的大口黑鲈研究^[17]中得出来的结果基本一致。目前,尚未见到关于胃排空特征和消化酶活性与生长性能差异的报道,基于本试验现有结果,推测饲料蛋白质水平的变化以及小肽的添加均能引起消化酶活性改变,以保持胃排空时间的相对恒定,进而保证了各组大口黑鲈对营养物质的吸收利用相对稳定,从而导致了各组生长性能差异不显著。

4 结论

综上所述, 改变饲料蛋白质水平(3 %以内)或在饲料中添加 2 %小肽对大口黑鲈总体胃排空时间及胃排空变化趋势影响不显著, 胃排空方式为先慢后快再慢型, 以平方根方模型为最优; 摄食不同饲料后的大口黑鲈胃肠道消化酶活性均呈各自的规律性变化, 以维持胃排空时间的相对恒定, 因此不需要改变投喂频率。结合生产实践, 建议大口黑鲈投喂间隔时间为 8~21h, 每日投喂 2 次。

参考文献: 略

原文刊登在《动物营养学报》, 网络首发时间: 2022-04-22 16:19:57

新型植物提取物添加剂对大口黑鲈生长、抗氧化及糖代谢影响的研究

张小雨^{1,2,3} 高彬^{1,2,3} 徐田田^{1,2,3} 韩敏祯^{1,2,3} 李松林^{1,2,3,4} 吕利群^{1,2,3,4} 许丹^{1,2,3,4*} 刘兴旺⁵

(1.上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 2.上海海洋大学国家水生动物病原体采集中心, 上海 201306; 3.上海海洋大学水产养殖部淡水水生遗传资源重点实验室, 上海 201306; 4.上海海洋大学水产科学实验教学示范中心, 上海 201306; 5.上海牧渔科技有限公司, 上海 201306)

摘要: 为评估新型植物提取物添加剂对大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 生长、抗氧化及糖代谢的影响, 配制基础饲料并添加 0、1500mg/kg 和 3000mg/kg 的新型植物提取物添加剂以生产 3 种试验饲料[S1 (对照组)、S2 组和 S3 组], 分别投喂 3 组 (共 225 尾) 初始重量为 (7.50±0.23) g 的大口黑鲈 8 周。结果显示: 饲料中添加新型植物提取物添加剂显著提高了大口黑鲈增重率 (WGR) 和存活率, 并降低了饲料系数 (FCR) ($P<0.05$)。肝脏炎症因子白细胞介素 10 (IL-10) 和 1β (IL- 1β) 在 S2 组表达量显著上调 ($P<0.05$), 肿瘤坏死因子 α (TNF- α) 表达量在 S3 组显著下调 ($P<0.05$)。肝脏过氧化物酶体增殖物激活受体 α (PPAR α)、脂肪酸合酶 (FAS) 表达量在 S2 组显著上调 ($P<0.05$)。肝脏葡萄糖激酶 (GK)、己糖激酶 (HK) 和 6 磷酸葡萄糖脱氢酶 (G6PDH) 表达量在 S2 组显著上调 ($P<0.05$)。丙酮酸激酶 (PK)、葡萄糖-6-磷酸脱氢酶 (G6Pase) 和磷酸烯醇式丙酮酸激酶 (PEPCK) 的表达量则随新型植物提取物添加剂添加而显著升高 ($P<0.05$)。综上所述, 新型植物提取物添加剂能够显著提高大口黑鲈的存活率和生长性能, 通过影响糖酵解途径的 GK、HK、PK、增强 G6Pase 的表达降低大口黑鲈糖原积累, 从而减轻大口黑鲈的肝糖应激。

关键词: 大口黑鲈; 生长; 抗氧化能力; 肝糖应激; 糖代谢

Effects of Plant Extracts Feed Additives on Growth, Antioxidant and Glucose Metabolism of Largemouth Bass

ZHANG Xiaoyu^{1,2,3} GAO Bin^{1,2,3} XU Tiantian^{1,2,3} HAN Minzhen^{1,2,3} LI Songlin^{1,2,3,4} LYU Liquan^{1,2,3,4}
XU Dan^{1,2,3,4*} LIU Xingwang⁵

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. National Pathogen Collection Center for Aquatic Animals, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Key Laboratory of Aquaculture Ministry for Freshwater Aquatic Genetic Resources, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. National Experimental Teaching Demonstration Center for Fishery Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 5. Shanghai Moryo Tehnology Co., Ltd., Shanghai 201306, China)

Abstract: To assess the effects of plant extracts feed additives on the growth, antioxidant and glucose metabolism of largemouth bass, three experimental diets were formulated with 0, 1 500 mg/kg and 3 000 mg/kg of plant extracts feed additives supplementation to feed three groups (S1, S2 and S3 group) of largemouth bass (225

fishes intotal) with an initial weight of (7.50 ± 0.23) g for eight weeks respectively. The results showed that the addition of plant extracts feed additives to the diet significantly increased the weight gain rate (WGR), and survival rate of large-mouth bass, and reduced the bait coefficient (FCR) ($P < 0.05$). Plasma total protein (TP), total cholesterol (TC) and triglycerides (TG) were increased with the addition of plant extracts feed additives, and those in S3 group were significantly higher than those in the control and S2 groups ($P < 0.05$), low density lipoprotein (LDL) and albumin (ALB) in S3 group were significantly higher than those in control group ($P < 0.05$). Hepatic superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) activities decreased significantly ($P < 0.05$) with the increase of plant extracts feed additives addition. Hepatic inflammatory factors interleukin IL-10 and 1β (IL- 1β) expression were significantly upregulated in the S2 group ($P < 0.05$), and tumour necrosis factor alpha (TNF- α) expression was significantly downregulated in the S3 group ($P < 0.05$). Liver peroxisome proliferator-activated receptor alpha (PPAR α) and fatty acid synthase (FAS) expression were significantly upregulated in S2 group ($P < 0.05$). The expression of pyruvate kinase (PK), glucose-6-phosphate dehydrogenase (G6Pase) and phosphoenolpyruvate kinase (PEPCK), on the other hand, were significantly increased with the addition of plant extracts feed additives ($P < 0.05$). In summary, plant extracts feed additives significantly improved the survival and growth performance of Californian bass and reduced liver sugar stress in largemouth bass by affecting the glycolytic and pentose phosphate pathways.

Key words: *Micropterus salmoides*; growth; antioxidant capacity; glycogen stress; glucose metabolism

大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*)，属鲈形目、太阳鱼科、黑鲈属，因其肉质肥美、适应能力强、生长速度快等特点成为我国重要的淡水养殖品种^[1]。作为一种典型的肉食性鱼类，该鱼配合饲料开发过程有一定难度^[2]，其人工配合饲料形式一般是软颗粒饲料与膨化颗粒饲料^[3]，且人工饲料配方在营养水平和饲料参数方面仍有不足^[4]。研究显示，大口黑鲈对饲料碳水化合物利用能力十分低下^[5-6]，饲料淀粉种类^[7]、可消化淀粉水平^[8]都会对大口黑鲈造成影响。最新研究表明，当饲料淀粉超过 5% 就会抑制大口黑鲈生长并造成氧化应激^[9]，且大口黑鲈生长及饲料利用随饲料碳水化合物水平升高而呈线性下降，在摄食后易出现肝脏病变，生长缓慢和疾病频发等不良影响^[10]。

大口黑鲈对碳水化合物的低利用率成为限制其配合饲料开发推广最重要原因之一。作为膨化配合饲料黏结及膨化成分，淀粉在饲料中添加使用是不可缺少的，因此碳水化合物引起大口黑鲈“肝糖应激”及对肝糖应激导致的炎症反应进行调控，从而改善大口黑鲈在摄食人工配合饲料后的健康状态已成为相关研究热点^[2]。针对肉食性鱼类肝糖应激，一种以桑叶黄酮及栗木单宁为主要原料并复配若干功能性氨基酸的新型植物提取物添加剂被研究应用。在前期研究中发现新型植物提取物添加剂具有消除肝糖应激导致的鱼类炎症因子及促进生长等作用。本研究以大口黑鲈为研究对象，分别添加不同梯度新型植物提取物添加剂以评估其对大口黑鲈生长、抗氧化及糖代谢的影响。

1 材料与方法

1.1 试验设计及饲料配制

以进口鱼粉、玉米蛋白粉、棉籽蛋白、豆粕等为主要蛋白源，鱼油、豆油为主要脂肪源，α-淀粉等为主要糖源，配制基础饲料。在基础饲料中分别添加 0[S1 组（对照组）]、1 500mg/kg（S2 组）和 3000mg/kg（S3 组）的新型植物提取物添加剂（购自广州飞禧特生物科技有限公司，主要成分：桑叶黄酮 65%、单宁酸 30%、功能性氨基酸 5%），配制成 3 组等氮等能的试验饲料（见表 1）。各饲料原料经粉碎过筛后，按照配方称取并搅拌混匀，制成直径为 2mm 的颗粒饲料，风干后 4℃冰箱保存备用。

1.2 试验用鱼及养殖管理

养殖试验在盐城恒兴饲料有限公司淡水鱼养殖车间进行。挑选初始体质量(7.50±0.23) g 的幼鱼 225 尾，随机分为 3 组，每组 3 个平行，每个平行 25 尾鱼，分别放入 9 个循环系统箱（70cm×9cm×80cm）中。养殖试验持续 8 周，每天投喂 2 次，表观饱食投喂，每天记录各养殖桶的投喂克数。每天吸污换水（换水量不超过水体 1/3）确保水质，24h 连续充气增氧，期间水温 25~30℃。

1.3 样品收集

养殖试验结束前禁食 24h，统计每个养殖桶的鱼尾总数和总重量。每个养殖桶随机抽取 9 尾鱼，3 尾鱼装入自封袋保存放在-20℃冰箱，用于体成分测定；6 尾鱼进行尾静脉取血，静置后离心（3000r/min，10min，4℃）取上层血浆，加入 100μL2%草酸钾，分装到离心管中置于-80℃待测。取血后，立即将鲈鱼解剖，取肝脏组织装入冻存管保存到-80℃冰箱中用于相关酶活性、基因表达量的测定。

表 1 试验饲料配方及营养水平(%，干物质)

项目	S1 组(对照组)	S2 组	S3 组
原料组成			
进口鱼粉	45.00	45.00	45.00
玉米蛋白粉	5.00	5.00	5.00
棉籽蛋白	5.00	5.00	5.00
豆粕	7.90	7.90	7.90
血球蛋白粉	2.00	2.00	2.00
谷朊粉	2.00	2.00	2.00
α-淀粉	10.00	10.00	10.00
纤维素	10.00	9.85	9.70
鱼油	4.00	4.00	4.00
豆油	4.00	4.00	4.00
海藻酸钠	2.00	2.00	2.00
预混料	2.00	2.00	2.00
磷酸二氢钙	1.00	1.00	1.00
营养水平			
粗蛋白	44.87	44.94	44.91
粗脂肪	14.44	14.16	14.10
粗灰分	7.11	6.68	7.22
粗纤维	21.5	19.8	22.3
无氮浸出物	6.07	8.28	5.82

注：1. 预混料为每千克饲料提供：VA 醋酸酯 16 000 IU、VE 醋酸酯 200 mg、VD₃ 2 500 IU、VK₃(MSB)5.1 mg、VB₁ 24.5 mg、核黄素 36 mg、泛酸钙 58.8 mg、VB₆ 19.8 mg、VB₁₂ 0.1 mg、烟酸 19 mg、叶酸 19.6 mg、生物素 1.2 mg、肌醇 784 mg、MgSO₄·7H₂O 120 mg、CuSO₄·5H₂O 10 mg、ZnSO₄·H₂O 50 mg、FeSO₄·H₂O 80 mg、MnSO₄·H₂O 45 mg、CoCl₂(1%) 50 mg、Na₂SeO₃(1%) 20 mg、Ca(IO₃)₂(1%) 60 mg；
2. 营养水平为实测值。

1.4 指标测定及分析方法

1.4.1 生长指标的计算方法

存活率 (SR, %) = (试验结束时试验鱼数目/试验开始时试验鱼数目) × 100

增重率 (WGR, %) = (终末体重-初始体重)/初始体重 × 100

特定生长率 (SGR, %/d) = [ln (终末体重) - ln (初始体重)] / 试验天数 × 100

饲料系数 (FCR) = 耗料量 / (终末体重-初始体重)

1.4.2 饲料和鱼体组成常规营养成分测定

水分含量采用 105 °C 烘箱干燥法 (GB5009.3—2016) 测定; 粗脂肪含量采用索氏抽提法 (GB 5009.6—2016) 测定; 粗蛋白含量采用凯氏定氮法 (GB5009.5—2016) 测定; 粗灰分含量采用马弗炉灼烧法 (550°C) (GB5009.4—2016) 测定。

1.4.3 血浆生化指标测定

取保存于-80°C的血浆, 4°C冰箱解冻。检测血糖 (GLU)、总胆固醇 (TC)、三酰甘油 (TG)、总蛋白 (TP)、低密度脂蛋白 (LDL)、高密度脂蛋白 (HDL) 和白蛋白 (ALB) 含量, GLU 含量采用葡萄糖氧化酶法测定, TC、TG、TP、LDL、HDL 和 ALB 含量使用南京建成生物工程研究所有限公司试剂盒测定。

1.4.4 肝脏酶活性指标测定

取保存于-80°C的肝脏, 4°C冰箱解冻, 滤纸吸干表面血液和水分, 以生理盐水为匀浆介质按照 1:9 的比例制成组织匀浆液, 3000r/min 冷冻离心 (4°C) 10min, 取上清液用于过氧化氢酶 (CAT) 和总超氧化物歧化酶 (T-SOD) 测定。CAT 使用北京索莱宝科技有限公司检测试剂盒测定, T-SOD 使用南京建成生物工程研究所有限公司试剂盒测定。

1.4.5 抗氧化及糖代谢相关基因表达量

肝脏总 RNA 参照 Trizol 试剂盒 (Invitrogen, USA) 提取, 提取肝脏样品中的总 RNA。然后利用 Prime-Script™ 反转录试剂盒将提取的总 RNA 反转录为 cDNA。反转录后检测 cDNA 浓度并用 DEPC 水稀释到 200ng/μL。分装后置于-20°C保存备用。利用已有的目的基因白细胞介素 10 (Interleukin-10, IL-10)、白细胞介素 1β (Interleukin-1β, IL-1β)、肿瘤坏死因子 α (Tumor necrosis factor α, TNF-α)、过氧化物酶体增殖物激活受体 α (Peroxisome proliferators-activated receptor α, PPARα)、脂肪酸合酶 (Fatty acid synthase, FAS)、葡萄糖激酶 (GK)、己糖激酶 (HK)、丙酮酸激酶 (PK)、6 磷酸葡萄糖脱氢酶 (G6PDH)、磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶 (PEPCK) 和葡萄糖 6 磷酸酶 (G6Pase) 的引物序列合成引物,

引物序列如表 2 所示。定量 PCR 体系为 20μL，其中 2×SYBR Green qPCR Mix 10 μL，上下游引物各 1 μL，cDNA 1 μL 和 7μL 超纯水。定量仪器为实时定量 PCR 仪(Bio-Rad CFX96)。实时定量 PCR 程序为 94℃持续 3min；94℃持续 15s，退火温度 58℃持续 15s，72℃持续 20 s，共计 40 个循环。得到各基因的 Ct 值，并根据 2-ΔΔCt 方法测定目的基因的表达量。

1.5 数据统计与分析

采用 SPSS17.0（SPSS Incorporation，USA）统计软件对所得数据进行单因素方差分析（ANOVA），若差异显著（ $P<0.05$ ），组间比较采用最小显著差法（LSD）进行多重比较分析。数据以“平均值±标准误”的形式表示。

表2 大口黑鲈抗氧化和糖代谢相关基因的实时定量PCR引物

目的基因	正向引物(5'~3')	反向引物(5'~3')
IL-10	AATTACCCAGCAACAGCC	GAGCTCCACAAGCAGTCAGA
IL-1β	CACATGAGCGACTGACGAGA	GCAGGACCCCTGTTTGACAT
TNF-α	GGTGTGACAGCCTACGGTTT	TGGGCTTACGACCTGAGAGA
FAS	GAGTCGGCCTATGTGACTGG	CAGAAGCAACTGTCCCGACT
PPARα	GGGCATCTCCACAGGCATTA	CCTGACACATACAGCGCAAC
GK	GACACTGGCCTCTTCATGAGT	TGTAGTTGCGGTGCTCCTGAC
HK	CTTCCTGGTGCAGGGTCAAG	CTCTCTCGTCGCACACTACC
PK	CTCTTCATCCGCAAAGC	AATTCCCAGGTCACCAAG
G6PDH	TTAGACCGGGCAAAACCCAC	AAAATCGCTGCTCAAGCACA
G6Pase	AGTGTCGACCCATTTGGTGC	ACCTGGATTGACCTTTTGTAGGT
PEPCK	GGAAACGGCCAACATTCT	GCCAAACGACAGTTCTCAT

2 结果与分析

2.1 新型植物提取物添加剂对大口黑鲈生长性能的影响（见表 3）

如表 3 所示，经过 8 周的生长试验，试验组大口黑鲈增重率（WGR）和存活率均显著高于对照组（ $P<0.05$ ）。饲料系数（FCR）则呈现相反的趋势（ $P<0.05$ ）。

表3 新型植物提取物添加剂对大口黑鲈幼鱼生长性能的影响

项目	S1组(对照组)	S2组	S3组
初始均重(g)	7.57±0.02	7.59±0.03	7.58±0.01
终末均重(g)	33.40±0.90 ^a	37.90±1.25 ^c	36.30±1.25 ^b
增重率(%)	341.1±11.1 ^a	398.8±16.2 ^c	378.2±25.8 ^b
特定生长率(%/d)	2.61±0.01	2.87±0.10	2.79±0.01
饲料系数	1.02±0.03 ^a	0.94±0.03 ^b	0.97±0.09 ^b
存活率(%)	96.0±2.00 ^a	99.0±1.00 ^b	99.00±1.00 ^b

注:同行数据肩标不含有相同字母表示差异显著($P<0.05$),含有相同字母或无字母表示差异不显著($P>0.05$);下表同。

2.2 新型植物提取物添加剂对大口黑鲈体组成的影响（见表 4）

如表 4 所示，在本试验条件下，大口黑鲈体组织水分、粗蛋白、粗脂肪和灰分含量各组间没有显著差异（ $P>0.05$ ），但粗蛋白、粗脂肪有随着新型植物提取物添加剂添加呈升高的趋势。

表4 新型植物提取物添加剂对大口黑鲈幼鱼体成分的影响(%)

项目	S1组(对照组)	S2组	S3组
粗蛋白	15.9±0.38	16.5±0.69	16.6±0.24
粗脂肪	6.82±0.50	7.78±0.69	6.88±0.63
粗灰分	3.31±0.09	3.59±0.08	3.51±0.15
水分	73.1±0.58	72.1±0.85	72.4±0.42

2.3 新型植物提取物添加剂对大口黑鲈血浆生化指标的影响（见表5）

如表5所示，血浆总蛋白（TP）、总胆固醇（TC）、三酰甘油（TG）随着新型植物提取物添加剂添加而升高，高水平添加组（S3）显著高于对照组和低水平添加组（ $P<0.05$ ）；低密度脂蛋白（LDL）和白蛋白（ALB）S3组显著高于对照组（ $P<0.05$ ）。

表5 新型植物提取物添加剂对大口黑鲈血浆生化指标的影响

项目	S1组(对照组)	S2组	S3组
总蛋白(TP,g/L)	24.4±1.38 ^a	28.1±1.90 ^a	34.2±1.58 ^b
总胆固醇(TC,mmol/L)	9.38±0.62 ^a	10.7±0.87 ^a	13.2±0.85 ^b
三酰甘油(TG,mmol/L)	65.0±5.63 ^a	75.5±4.96 ^a	125.9±17.6 ^b
血糖(GLU,mmol/L)	6.36±1.14	5.00±0.68	6.30±0.71
低密度脂蛋白(LDL,mmol/L)	2.18±0.21 ^a	2.55±0.31 ^{ab}	2.81±0.19 ^b
高密度脂蛋白(HDL,mmol/L)	3.43±0.14	3.58±0.15	3.48±0.16
白蛋白(ALB,g/L)	6.93±0.31 ^a	8.13±0.98 ^{ab}	10.6±0.57 ^b

2.4 新型植物提取物添加剂对大口黑鲈肝脏抗氧化能力的影响（见表6）

由表6可知，在本试验条件下，大口黑鲈肝脏超氧化物歧化酶（SOD）和过氧化氢酶（CAT）活性随着新型植物提取物添加剂添加量升高显著下降（ $P<0.05$ ）。

表6 新型植物提取物添加剂对大口黑鲈肝脏抗氧化酶活性的影响(U/mg prot.)

项目	S1组(对照组)	S2组	S3组
超氧化物歧化酶	244.00±1.99 ^c	188.26±0.84 ^b	166.66±0.50 ^a
过氧化氢酶	54.24±0.64 ^c	39.04±0.95 ^b	25.34±2.34 ^a

2.5 新型植物提取物添加剂对大口黑鲈肝脏炎症因子及肿瘤坏死因子基因表达的影响（见图1）

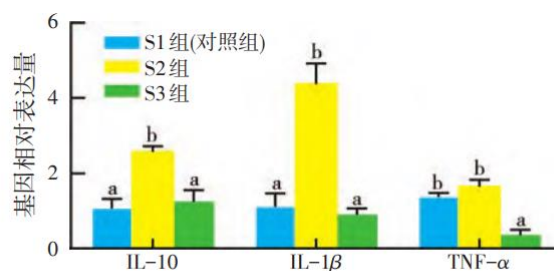


图1 新型植物提取物添加剂对大口黑鲈肝脏炎症相关基因相对表达量的影响

由图 1 可知, 肝脏炎症因子白细胞介素 IL-10 和 IL-1 β 在 1500mg/kg 添加组表达显著上调 ($P<0.05$), 肿瘤坏死因子 α (TNF- α) 的表达在 3000mg/kg 新型植物提取物添加剂添加组显著下调 ($P<0.05$)。

2.6 新型植物提取物添加剂对大口黑鲈糖脂代谢基因表达的影响 (见图 2~图 3)

如图 2、图 3 可知, 在本试验条件下, 肝脏过氧化物酶体增殖物激活受体 α (PPAR α)、脂肪酸合酶 (FAS) 表达量在 S2 组显著上调 ($P<0.05$)。肝脏葡萄糖激酶 (GK)、己糖激酶 (HK) 和 6 磷酸葡萄糖脱氢酶 (G6PDH) 表达量在 S2 组显著上调 ($P<0.05$)。丙酮酸激酶 (PK)、糖原磷酸化酶 (GPase) 和磷酸烯醇式丙酮酸激酶 (PEPCK) 表达量则随着新型植物提取物添加剂添加而显著升高 ($P<0.05$)。

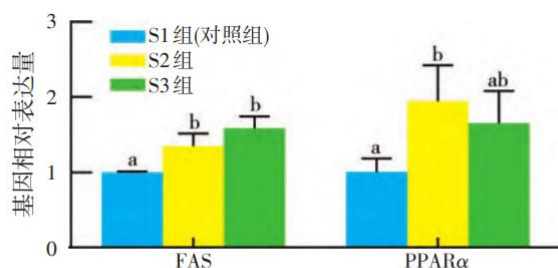
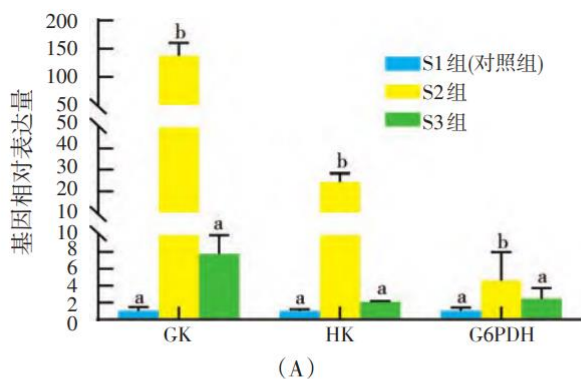
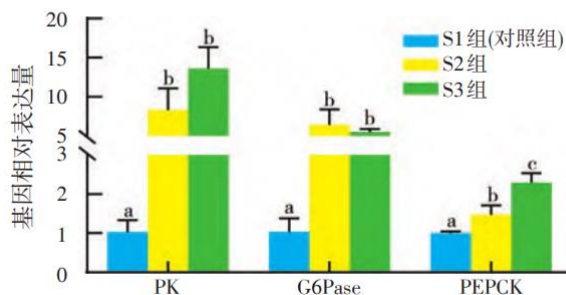


图2 新型植物提取物添加剂对大口黑鲈肝脏相关脂肪代谢基因相对表达量的影响



(A)



(B)

图3 新型植物提取物添加剂对大口黑鲈肝脏相关糖代谢基因 GK、HK、G6PDH(A); PK、G6Pase、PEPCK(B) 相对表达量的影响

3 讨论

3.1 新型植物提取物添加剂对大口黑鲈生长性能的影响

近年来针对大口黑鲈碳水化合物代谢及其调控的研究已经成为行业热点。研究发现胆汁酸、肉碱等添加剂均能够通过促进大口黑鲈脂肪代谢、提高肝脏抗氧化能力起到促进大口黑鲈生长的效果^[11-12]。本研究结果发现饲料中添加 1500、3000 mg/kg 新型植物提取物添加剂能够显著提高大口黑鲈的成活率和生长性能。主要原因是新型植物提取物添加剂的作用机制与其组成有关，其组成中含有大量的桑叶黄酮和少部分功能性氨基酸，前期研究曾经发现桑叶黄酮在罗非鱼和凡纳滨对虾上均有一定的促生长作用^[13-14]，而大菱鲆幼鱼因摄食功能性氨基酸后生长性能也大大提升^[15]，以上研究结果与本文研究结果相同，说明桑叶黄酮和功能性氨基酸是调控生长作用的组成成分。

3.2 新型植物提取物添加剂对大口黑鲈抗氧化及炎症因子的影响

鱼类机体的健康情况与抗氧化水平高低有直接关系，与冰鲜鱼相比，含高碳水化合物的配合饲料导致大口黑鲈肝糖原含量升高，摄食率和增重率显著降低^[16]，同时肝脏氧化应激严重^[9]。本研究发现大口黑鲈肝脏 SOD 和 CAT 活性随新型植物提取物添加剂添加量升高呈显著下降，是由于桑叶黄酮和单宁酸的共同作用，缓解了大口黑鲈的肝脏氧化应激，在前期研究中，桑叶黄酮和单宁酸已被证实对哺乳动物、水产动物均有抗氧化作用^[17-18]，与本研究结果一致。同样的作用也展现在胆汁酸添加剂中，其能够缓解由于高淀粉或高脂肪导致大口黑鲈肝脏氧化应激^[19]。这些添加剂消除肝脏氧化应激的具体机制还值得进一步研究。

鱼体肝脏促炎和抗炎细胞因子基因的转录表达与植物提取物添加有关系^[20]。适度高表达转录的促炎细胞因子有利于维持免疫平衡，增强抗感染能力^[21]。添加剂调控促炎细胞因子高转录是否导致炎症或免疫调节目前尚未清楚，但植物提取物类似免疫兴奋剂，能够通过上调促炎细胞因子起到免疫调节的作用^[22]。在本研究中，抗炎因子 IL-10 和促炎因子 IL-1 β 均表现出先上调再下调的趋势，特别是 IL-1 β 与对照组相比上升 4 倍。该结果与胆汁酸添加后的炎症因子反应类似^[23]。但是与胆汁酸添加不同的是在新型植物提取物添加剂高剂量添加后 TNF- α 表达量显著下调，而胆汁酸是通过激活 TNF- α 起到改善大口黑鲈肝糖应激的作用^[23]。这些差异背后的调控机制都值得深入研究和讨论。

3.3 新型植物提取物添加剂对大口黑鲈糖脂代谢的影响

胆汁酸作为市面上常见的鱼类饲料添加剂，对大口黑鲈氧化应激调控机制是激活肝脏

胆汁酸-FXR 信号通路, 促进糖原合成, 并使糖酵解、脂肪合成相关基因表达受到抑制^[24]。同时, FXR 通过诱导 SHP 的表达, 抑制由肝脏 X 受体 (LXR) /LRH 所介导的 SREBP-1c 的反式激活, 从而抑制脂肪生成相关基因的表达^[25]。而本研究的结果则发现饲料中添加新型植物提取物添加剂能够显著促进大口黑鲈体内脂肪合成 (FAS) 和脂肪分解 (PPAR α)。同时, 添加新型植物提取物添加剂上调糖原磷酸化酶 (GPase) 以及 6 磷酸葡萄糖脱氢酶 (G6PDH)。这些结果说明新型植物提取物添加剂调节大口黑鲈糖脂代谢的作用机制是一种崭新途径, 与市面上传统的胆汁酸添加剂是不同的。一方面, 桑叶黄酮通过促进磷酸戊糖途径使部分体内葡萄糖转化为脂肪, 同时通过上调 PPAR α 促进体内脂肪的 β 氧化, 从而使葡萄糖通过脂肪分解途径得到了利用。另一方面, 单宁酸在一定水平时可以促进肝脏糖原分解, 同时促进糖酵解的相关酶的表达, 从而促进了糖酵解进行。本研究结果显示新型植物提取物添加剂添加后 S2 组 GK 表达量上升近 150 倍, S3 组上升约 8 倍, 糖酵解过程中 HK、PK、PEPCK 都有不同程度上调表达。因此, 新型植物提取物添加剂可通过影响糖酵解途径降低糖原积累, 从而减轻大口黑鲈的肝糖应激。但新型植物提取物添加剂的添加量与糖代谢酶活性没有呈线性影响, 可能是桑叶黄酮和单宁酸的复配结果对大口黑鲈糖酵解的调节作用仍是不充分的。这方面的作用机制值得进一步研究。

大口黑鲈作为典型肉食性鱼类, 其糖异生水平更高^[26], 而通过糖酵解分解葡萄糖和棕榈盐产生的 ATP 的能力非常有限。本研究结果显示, 添加新型植物提取物添加剂促进了糖酵解和磷酸戊糖途径, 对其糖异生关键酶 PEPCK 也具有一定的表达促进作用。但是与糖酵解作用的促进相比, 这种上调的效果是有限的。可以推测新型植物提取物添加剂作为一种生理活性成分, 对大口黑鲈的机体调控是通过复杂的网络调控进行的, 在消除大口黑鲈摄食碳水化合物后的一系列肝糖应激反应, 如消除炎症因子、提高抗氧化能力、改善糖脂代谢途径等方面均具有一定的积极作用, 从而起到促进大口黑鲈生长、改善大口黑鲈健康的作用。

4 小结

在本研究条件下, 添加不同梯度的新型植物提取物添加剂能显著提高大口黑鲈的成活率和生长性能; 新型植物提取物添加剂可通过影响糖酵解途径和酸戊糖途径, 促进肝脏糖原分解, 降低糖原积累, 缓解大口黑鲈肝脏氧化应激。但因养殖条件受限, 本养殖周期为 8 周, 虽然养殖效果明显, 但低于饲料源评价周期, 因此新型植物提取物添加剂在更长的养殖周期内出现的效果还需要进一步探讨。

参考文献: 略

原文刊登在《饲料工业》, 2021,43(8):29-34.

不同直链淀粉 / 支链淀粉比大口黑鲈饲料加工特性、营养物质表观消化率和肠道消化酶活性的影响

车明晓¹ 姚春风² 陆梓晔¹ 迟淑艳^{1,3,4*} 谭北平^{1,3,4}

(1.广东海洋大学水产学院, 水产经济动物营养与饲料实验室, 湛江 524088; 2.广东粤海饲料集团股份有限公司, 湛江 524017; 3.广东省水产动物精准营养与高效饲料工程技术研究中心, 湛江 524088; 4.农业农村部华南水产与畜禽饲料重点实验室, 湛江 524088)

摘要: 本试验旨在研究不同直链淀粉/支链淀粉比(AM/AP)对膨化颗粒饲料加工特性的影响以及对大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)营养物质表观消化率和肠道消化酶活性的影响。配制 AM/AP 分别为 0(D1)、0.22(D2)、0.56(D3)、1.18(D4)、2.62(D5)的 5 种等氮等脂等淀粉的试验饲料, 将初始体重为(2.15±0.04)g 的 600 尾鱼平均分为 5 组, 每组 4 个重复, 每个重复 30 尾鱼, 养殖试验持续 56 d。结果表明: D4 组饲料硬度、膨化度和淀粉糊化度显著低于 D1、D2 组($P<0.05$), 与 D5 组没有显著差异($P>0.05$); D4 组大口黑鲈增重率、特定生长率和饲料系数显著高于 D1 组($P<0.05$); D4 组干物质表观消化率和粗蛋白质表观消化率显著高于 D1 组($P<0.05$); D4 和 D5 组粗脂肪表观消化率和淀粉表观消化率显著低于 D1 和 D2 组($P<0.05$); D4 组肠道总蛋白酶和胰蛋白酶活性显著高于 D1 组($P<0.05$), 脂肪酶和淀粉酶活性显著低于 D1 组($P<0.05$)。综上所述, 饲料中 AM/AP 升高会降低膨化饲料的淀粉糊化度和膨化度, 提高大口黑鲈肠道蛋白酶活性及粗蛋白质表观消化率; 以特定生长率为判据, 经二元回归模型拟合分析, 大口黑鲈饲料中最适 AM/AP 范围为 1.18~2.62。

关键词: 大口黑鲈; AM/AP; 饲料加工特性; 表观消化率; 消化酶

Effects of Different Amylose/ Amylopectin Ratios on Diet Processing Characteristics, Nutrient Apparent Digestibility and Digestive Enzyme Activities of Largemouth Bass (*Micropterus salmoides*)

CHE Mingxiao¹ YAO Chunfeng² LU Ziyi¹ CHI Shuyan^{1, 3, 4*} TAN Beiping^{1 3, 4}

(1.Laboratory of Aquatic Economic Animal Nutrition and Feed, College of Fisheries, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2.Guangdong Yuehai Feeds Group Co. LTD, Zhanjiang 524017, China; 3.Aquatic Animals Precision Nutrition and High Efficiency Feed Engineering Research Center of Guangdong Province, Zhanjiang 524088, China; 4. Key Laboratory of Aquatic, Livestock and Poultry Feed Science and Technology in South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: This experiment was conducted to investigate the effects of different amylose/amylopectin ratios(AM/AP) on the processing characteristics of expanded diets, nutrient apparent digestibility and the activities of intestinal digestive enzymes in largemouth bass (*Micropterus salmoides*). Five groups of experimental diets with equal nitrogen, equal fat and equal starch were prepared with AM/AP of 0 (D1), 0.22(D2), 0.56(D3), 1.18 (D4) and 2.62 (D5), respectively. A total of 600 fish with an initial body weight of (2.15 ± 0.04) g were randomly divided into 5 groups with 4 replicates per group and 30 fish per replicate. The feeding experiment lasted for 50 days. The results showed as follows; the hardness, expansion degree and starch gelatinization degree of diets of D4 group were significantly lower than those of D1 and D2 groups ($P<0.05$), but was not significantly different from D5 group ($P>0.05$). The weight gain rate, specific growth rate and feed conversion ratio of D4 group were significantly higher than those of D1 and D2 groups ($P<0.05$). The apparent digestibility of dry matter and crude protein of D4 group were significantly higher than those of D1 group ($P<0.05$). D4 and D5 groups had a significantly lower apparent digestibility of crude fat and starch compared with D1 and D2 groups ($P<0.05$). The activity of total intestinal protease and trypsin of D4 group was

significantly higher than that of group D1 ($P<0.05$). In the intestine, lipase and amylase activities of D4 group were significantly lower than those of D1 group ($P<0.05$). In conclusion, AM/AP in diets will reduce starch gelatinization degree and expansion degree of expanded diets and improve intestinal protease activity and apparent digestibility of crude protein in largemouth bass. Taking the specific growth rate as the criterion, through the fitting analysis of binary regression model, the optimum AM/AP in the diets of largemouth bass is 1.18 to 2.62.

Key words: *Micropterus salmoides*; amylose/amylopectin ratio; diet processing characteristics; apparent digestibility; digestive enzyme

2020 年我国淡水鲈鱼的养殖产量已达到 61.9 万 t, 比 2019 年增长 29.66 %^[1], 其中有“淡水石斑鱼”之称的大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 作为一种重要的经济鱼类^[2,3], 养殖产量逐年增长, 但是相较于大菱鲈 (*Scophthalmus maximus*)^[4]和乌鳢 (*Channa argus*)^[5]等其他肉食性鱼类, 大口黑鲈对血糖清除相对缓慢^[6], 利用饲料中淀粉的能力更低^[7], 若摄入过量碳水化合物会导致生长迟缓和肝糖原异常积累, 造成肝脏损伤^[8,9,10,11,12]。因此, 饲料中淀粉的利用效率直接影响大口黑鲈生长和养殖成本。

淀粉作为饲料中碳水化合物的主要存在形式, 不但为机体提供能量, 还在饲料中起着黏合和膨胀的作用, 有助于改善饲料的物理品质^[13]。淀粉分为直链淀粉 (AM) 和支链淀粉 (AP), 分子聚集状态与结构不同, 性质和功能也不同^[14,15]。AM 的分支很少, 可以形成具有复杂晶体结构的抗性淀粉, 在动物肠道内会抵抗消化^[16], 而 AP 分支多, 其分子表面积更大, 分子间氢键作用力更小^[17], 这一特征使其更容易消化^[18]。相较于 AP, AM 糊化温度更高, 稳定性能更强, 具有抗润胀性, 但增稠性和黏合性较低^[19]。通过控制饮食中的直链淀粉/支链淀粉比 (AM/AP), 可改善猪、羊和鸡等动物生长和健康状况^[20,21,22]。AM/AP 是淀粉发挥功能特性的重要因素之一, 不仅对水产膨化饲料的加工产生重要的影响^[23], 还影响养殖动物对饲料的消化^[24]、蛋白质和脂肪的代谢^[25]以及能量的分配。因此, 本试验通过设置饲料中不同的 AM/AP, 一方面评价不同 AM/AP 对饲料加工特性的影响, 另一方面探索不同 AM/AP 对大口黑鲈营养物质表观消化率和肠道消化酶活性的影响, 旨在明确大口黑鲈饲料中淀粉的添加形式, 更有效地推动高效配合饲料替代鲜活饵料的进度, 有助于实现养殖和环境的可持续性发展。

1 材料与方法

1.1 试验饲料

以鱼粉、鸡肉粉和酪蛋白为主要蛋白质源, 豆油和鱼油为主要脂肪源, 以蜡质玉米淀粉 (WCS, AM 含量为 0, AP 含量为 92.28 %) 和高直链玉米淀粉 (HACS, AM 含量为

65.37%，AP 含量为 24.47%）来调整饲料中 AM/AP，使其比值分别为 0、0.22、0.56、1.18、2.62，配制 5 种等氮等脂等淀粉含量的试验饲料（其组成及营养水平见表 1），同时各组饲料添加 0.1 %三氧化二钇作为外源指示剂，用以评价大口黑鲈对营养物质的表观消化率。将原料粉碎过 60 目筛网，按照配方准确称取，采用逐级扩大法将原料混合均匀，在 V 型混合机中混合 12 min，然后加入鱼油、豆油和水（25%，质量分数），用搅拌机搅拌均匀后，使用干法膨化机制作沉性膨化颗粒饲料，模板孔径为 3 mm，饲料颗粒长度为 3 mm，制粒完成后在 25℃空调房中自然晾干，晾至水分含量约为 10 %后装入封口袋，存放于-20℃的冰箱中。

表 1 试验饲料组成及营养水平 (饲喂基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of experimental diets (as-fed basis)

%

项目 Items	组别 Groups				
	D1	D2	D3	D4	D5
原料 Ingredients					
进口鱼粉 Imported fish meal	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
国产鱼粉 Domestic fish meal	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
酪蛋白 Casein	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
鸡肉粉 Chicken powder	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
血浆蛋白粉 Plasma protein powder	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
鱿鱼膏 Squid paste	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
啤酒酵母粉 Beer yeast powder	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
鱼油 Fish oil	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
豆油 Soybean oil	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
溶血磷脂 Lysophospholipid	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
蜡质玉米淀粉 WCS	11.0				
高直链玉米淀粉:蜡质玉米淀粉 (25:75) HACS :WCS (25:75)		11.0			
高直链玉米淀粉:蜡质玉米淀粉 (50:50) HACS :WCS (50:50)			11.0		
高直链玉米淀粉:蜡质玉米淀粉 (75:25) HACS :WCS (75:25)				11.0	
高直链玉米淀粉 HACS					11.0
微晶纤维素 Microcrystalline cellulose	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
多维预混料 Multi-vitamin premix	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
多矿预混料 Multi-mineral premix	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
三氧化二钇 Y ₂ O ₃	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
合计 Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

续表 1

项目 Items	组别 Groups				
	D1	D2	D3	D4	D5
营养水平 Nutrient levels					
水分 Moisture	8.19	8.10	8.52	8.67	8.22
粗蛋白质 CP	50.22	50.24	50.17	50.29	50.31
粗脂肪 EE	10.68	10.51	10.29	10.32	10.52
直链淀粉/支链淀粉比 AM/AP	0.00	0.22	0.56	1.18	2.62

多维预混料和多矿预混料为大口黑鲈专用预混料(广东粤海饲料集团股份有限公司)。

Multi-vitamin premix and multi-mineral premix are special premixes for largemouth bass (Guangdong Yuehai Feed Group Co. Ltd.).

1.2 试验设计与饲养管理

购买遗传背景一致的大口黑鲈鱼苗（英熙鱼虾苗场，高州，广东），在桶中暂养 2 周，暂养期间投喂商品饲料（粗蛋白质 48%，粗脂肪 7%）。正式试验开始前，禁饲 24 h，挑选健康、规格均匀的鱼苗 600 尾[初始体重（2.15±0.04)g]，随机分配到 20 个 0.4 m³ 的玻璃

纤维钢化桶中，试验分为 5 组，每组 4 个重复，每桶 30 尾鱼苗。每天 08:00 和 16:00 投喂至表观饱食，投喂后用虹吸管清除桶底部的残饵。养殖试验持续 56 d。养殖试验在广东湛江国联饲料有限公司室内循环水养殖系统进行，水温 28~31 °C，溶解氧含量>5 mg/L。

1.3 样品收集

养殖试验到第 8 周结束，试验鱼禁食 24 h，记录每桶鱼的数量和总重量，用于计算增重率、特定生长率和存活率；记录每桶鱼摄食饲料的重量，用于计算饲料系数。每个桶随机取 3 尾鱼，取肠道于冻存管中，用液氮速冻，后保存在-80 °C 冰箱中，用于测定肠道消化酶活性。样品分析前于 4 °C 冰箱内解冻，在冰盘剪碎并迅速准确称取一定量组织，根据不同酶活性测定要求加入一定体积的匀浆介质，在冰浴条件下机械匀浆，4 °C 3000 r/min 离心 10 min，取上清液测定消化酶活性。养殖试验第 5 周至试验结束期间收集粪便，投喂饲料 3 h 后用镊子收集有完整包膜的粪便，在滤纸上吸干水分放在 50 mL 离心管中，于-20 °C 冰箱中保存。

1.4 样品测定

饲料和粪便样品中水分含量采用 105 °C 常压烘箱干燥法测定（GZX-9146MBE 干燥箱，上海），粗蛋白质含量采用杜马斯燃烧法测定（Primacs SN-100 杜马斯定氮仪，荷兰），粗脂肪含量采用索氏抽提法测定（ANKOMXT15i 自动脂肪分析仪，美国）。饲料和粪便中 Y₂O₃ 含量委托上海微谱检测技术有限公司检测，使用 ICP-OES 检测（Perkin Elmer Optima 8000，美国）。

饲料硬度和淀粉糊化度委托中国农业科学院饲料研究所检测。饲料硬度使用 Perten 硬度分析仪（TVT-6700，瑞典）测定；饲料淀粉糊化度参照熊易强^[26]的方法测定；饲料溶失率参照《饲料质量与安全检测技术》^[27]中的方法测定；饲料沉降速度参照中国农业科学院饲料研究所杨俊成等^[28]的方法测定；饲料膨化度参照 Glencross 等^[29]的方法测定。

肠道胰蛋白酶、脂肪酶、淀粉酶活性采用试剂盒（南京建成生物工程研究所）测定。其中，胰蛋白酶活性单位定义：在 pH 8.0，37 °C 条件下，每毫克蛋白中含有的胰蛋白酶每分钟使吸光度变化 0.003 即为 1 个酶活力单位。淀粉酶活性单位定义：组织中每毫克蛋白在 37 °C 与底物作用 30 min，水解 10 mg 淀粉定义为 1 个酶活力单位。脂肪酶活性定义：37 °C 条件下，每克组织蛋白在本反应体系中与底物反应 1 min，每消耗 1 μmol 底物为 1 个酶活力单位。肠道总蛋白酶活性采用试剂盒（上海酶联生物科技公司，上海）测定。总蛋白酶活性定义：37 °C 条件下，每分钟内催化 1 μmol 底物转化为产物所需的酶量定为 1 个酶活力

单位。

1.5 计算公式

增重率 (WGR, %)=100× (末均重-初均重) /初均重;

饲料系数 (FCR) =均摄食量/ (末均重-初均重) ;

特定生长率 (SGR, % / d)=100× (ln 末均重-ln 初均重) /饲喂天数;

干物质表观消化率 (%) =100× (1-饲料中 Y₂O₃ 含量/粪便中 Y₂O₃ 含量) ;

营养物质表观消化率 (%) =100× [1- (粪便中营养物质含量/饲料中营养物质含量) ×
(饲料中 Y₂O₃ 含量/粪便中 Y₂O₃ 含量)];

沉降速度 (cm/s) =水面高度/颗粒从水面降低到管底所用的时间。

1.6 数据处理

试验数据用 SPSS 21.0 软件进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 并用 Duncan 氏法进行多重比较检验, 显著性水平为 $P<0.05$, 数据以平均值±标准差表示。采用 Pearson Correlation(2-tailed) 方法对相关数据进行相关性分析, 显著水平为 $P<0.05$ 。

2 结果

2.1 AM/AP 对饲料加工特性的影响

由表 2 可知, D4 组饲料硬度和膨化度显著低于 D1、D2 组 ($P<0.05$), 与 D3 和 D5 组没有显著差异 ($P>0.05$);D4 和 D5 组淀粉糊化度显著低于 D1、D2 和 D3 组 ($P<0.05$); 各组间饲料溶失率差异不显著 ($P>0.05$); D4 和 D5 组饲料沉降速率显著高于 D1 和 D2 组 ($P<0.05$)。

表 2 AM/AP 对饲料加工特性的影响
Table 2 Effects of AM/AP on diet processing characteristics (n=3)

项目 Items	组别 Groups				
	D1	D2	D3	D4	D5
硬度 Hardness/N	65.99±2.94 ^a	50.93±4.03 ^b	29.54±4.99 ^c	27.79±4.64 ^{cd}	24.62±3.66 ^d
淀粉糊化度 Starch gelatinization degree/%	62.26±1.12 ^a	48.79±4.12 ^b	43.93±2.09 ^b	37.38±1.51 ^c	34.01±2.50 ^c
膨化度 Expansion degree/%	41.75±1.39 ^a	40.00±2.33 ^a	37.38±1.51 ^b	34.88±2.69 ^{bc}	35.38±1.99 ^c
溶失率 Dissolution rate/%	9.56±0.35	8.88±0.34	9.23±0.18	9.08±1.17	9.43±1.05
沉降速度 Settling rate/(cm/s)	9.58±0.36 ^b	9.87±0.53 ^b	10.17±0.28 ^{ab}	10.45±0.25 ^a	10.41±0.32 ^a

同行数据肩标不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 相同字母或无字母表示差异不显著 ($P>0.05$)。表 5、表 6、表 8 同。

Values in the same line with different letter superscripts mean significant differences ($P<0.05$), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$). The same as Table 5, Table 6 and Table 8.

由表 3 可知, 饲料 AM/AP 与饲料硬度、膨化度、淀粉糊化度和沉降速率呈极显著负相关 ($P<0.01$)。

表 3 AM/AP 与饲料加工特性的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between AM/AP and diet processing characteristics ($n=3$)

项目 Items		直链淀粉/支链淀粉比 AM/AP
硬度	相关系数 Correlation coefficient	-0.814**
Hardness	P 值 P-value	0.001
淀粉糊化度	相关系数 Correlation coefficient	-0.855**
Starch gelatinization degree	P 值 P-value	0.001
膨化度	相关系数 Correlation coefficient	-0.829**
Expansion degree	P 值 P-value	0.001
溶失率	相关系数 Correlation coefficient	0.231
Dissolution rate	P 值 P-value	0.408
沉降速率	相关系数 Correlation coefficient	0.413
Settling rate	P 值 P-value	0.014**

* 表示相关性为显著,显著水平为 0.05; ** 表示相关性为极显著,显著水平为 0.01;相关系数<0,表示二者之间呈现负相关关系;相关系数>0,表示二者之间呈现正相关关系。表 4、表 7、表 9 同。

* indicates a significant correlation, the significance level is 0.05; ** indicates an extremely significant correlation, the significance level is 0.01; correlation coefficient <0, the two factors present negative correlation; correlation coefficient >0, the two factors present positive correlation. The same as Table 4, Table 7 and Table 9.

由表 4 可知,饲料硬度与淀粉糊化度和膨化度呈极显著负相关 ($P<0.01$)。

表 4 饲料硬度与淀粉糊化度和膨化度的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between hardness and starch gelatinization degree and expansion degree of diets ($n=3$)

项目 Item		淀粉糊化度 Starch gelatinization degree	膨化度 Expansion degree
硬度	相关系数 Correlation coefficient	0.951**	0.896**
Hardness	P 值 P-value	0.001	0.001

由图 1 看出,饲料膨化度在饲料 AM/AP 为 1.81 时达到最小值($y=2.418x^2-8.751x+41.73$, $R^2=0.9982$), 淀粉糊化度在饲料 AM/AP 为 1.95 时达到最小值 ($y=7.325x^2-28.5x+58.76$, $R^2=0.9300$)。

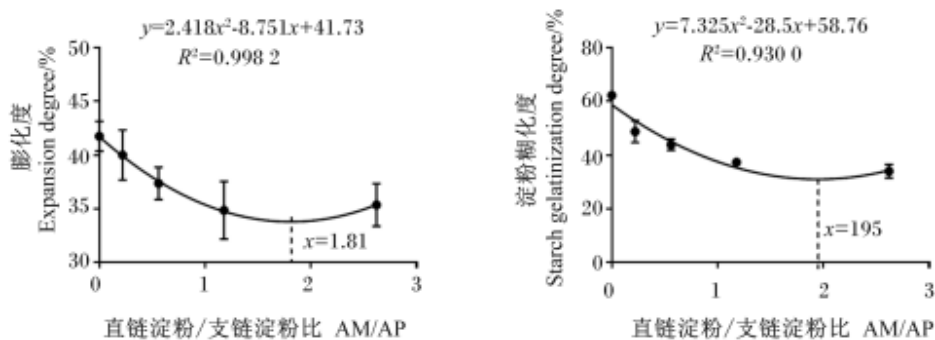


图 1 AM/AP 和饲料膨化度和淀粉糊化度的相关性分析

Fig.1 Relationship between AM/AP and expansion degree and starch gelatinization degree of diets

2.2 AM/AP 对大口黑鲈生长性能的影响

由表 5 可知,大口黑鲈的增重率、特定生长率随 AM/AP 的升高呈上升趋势, D4 组显著高于 D1 和 D2 组 ($P<0.05$), 与 D3 组和 D5 组没有显著差异 ($P>0.05$)。

如图 2 所示,经二元回归模型拟合分析后发现,特定生长率随着饲料中 AM/AP 的增加

而上升，在 AM/AP 为 1.83 时达到最大值（ $y=-0.07217x^2+0.2645x+3.303$ ， $R^2=0.8759$ ）。饲料系数随 AM/AP 的升高呈上升趋势，D4 组饲料系数显著高于 D1 组（ $P<0.05$ ），显著低于 D5 组（ $P<0.05$ ），和其余各组相比差异不显著（ $P>0.05$ ）。

表 5 AM/AP 对大口黑鲈生长性能的影响
Table 5 Effects of AM/AP on growth performance of largemouth bass (n=3)

项目 Items	组别 Groups				
	D1	D2	D3	D4	D5
末均重 FBW/g	27.32±0.45 ^d	29.53±1.08 ^c	31.86±1.07 ^b	32.72±0.19 ^{ab}	33.93±0.36 ^a
增重率 WGR/%	1170.82±20.63 ^d	1273.41±50.39 ^c	1381.97±49.95 ^b	1422.23±8.63 ^{ab}	1478.12±14.61 ^a
特定生长率 SGR/(%/d)	3.28±0.13 ^d	3.37±0.04 ^c	3.46±0.19 ^b	3.49±0.11 ^{ab}	3.51±0.12 ^a
饲料系数 FCR	0.74±0.03 ^c	0.78±0.03 ^b	0.79±0.01 ^b	0.77±0.02 ^b	0.84±0.03 ^a
成活率 SR/%	96.67±3.35	93.33±3.35	93.33±3.35	100.00±0.00	94.43±1.96

2.3 AM/AP 对大口黑鲈饲料营养物质表观消化率的影响

由表 6 可知，D4 组干物质表观消化率显著高于 D1 组（ $P<0.05$ ），和其余各组相比差异不显著（ $P>0.05$ ）；与 D2、D3 组相比，D4、D5 组粗蛋白质表观消化率差异不显著（ $P>0.05$ ），但显著高于 D1 组（ $P<0.05$ ）。

由图 3 可看出，粗蛋白质表观消化率在 AM/AP 为 1.50 时达到最大值（ $y=-1.879x^2+5.644x+92.87$ ， $R^2=0.6837$ ）；D4 组粗脂肪表观消化率与 D3 组差异不显著（ $P>0.05$ ），但显著高于 D5 组（ $P<0.05$ ），显著低于 D1 和 D2 组（ $P<0.05$ ）；D4 和 D5 组显著低于其余 3 组（ $P<0.05$ ）；淀粉表观消化率在 AM/AP 为 2.15 时达到最小值（ $y=7.467x^2-32.03x+91.41$ ， $R^2=0.9064$ ）。

由表 7 可知，干物质表观消化率与饲料中 AM/AP 无显著相关（ $P>0.05$ ），粗蛋白质表观消化率与饲料中 AM/AP 呈显著正相关（ $P<0.05$ ），粗脂肪表观消化率与饲料中 AM/AP 呈极显著负相关（ $P<0.01$ ），淀粉表观消化率与饲料中 AM/AP 呈极显著负相关（ $P<0.01$ ）。

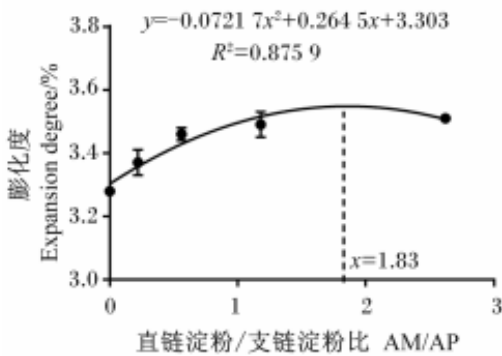


图 2 AM/AP 对大口黑鲈特定生长率的影响
Fig.2 Effects of AM/AP on specific growth rate of largemouth bass

表 6 AM/AP 对大口黑鲈营养物质表观消化率的影响

Table 6 Effect of AM/AP on apparent digestibility of nutrients of largemouth bass($n=3$)

%

项目 Items	组别 Groups				
	D1	D2	D3	D4	D5
干物质表观消化率 Apparent digestibility of dry matter	81.97±2.35 ^b	86.00±1.11 ^a	86.02±1.30 ^a	85.80±2.08 ^a	84.48±0.17 ^{ab}
粗蛋白质表观消化率 Apparent digestibility of crude protein	93.32±0.91 ^b	94.17±0.51 ^{ab}	94.08±0.39 ^{ab}	94.79±0.79 ^a	94.64±0.06 ^a
粗脂肪表观消化率 Apparent digestibility of ether extract	96.83±0.25 ^a	97.65±0.71 ^a	95.37±0.26 ^{ab}	94.74±1.59 ^b	90.67±0.78 ^c
淀粉表观消化率 Apparent digestibility of starch	88.26±2.73 ^a	88.47±1.13 ^a	76.68±6.18 ^b	62.26±3.53 ^c	59.04±0.44 ^c

表 7 AM/AP 与大口黑鲈营养物质表观消化率的相关性分析

Table 7 Correlation analysis between AM/AP and apparent digestibility of nutrients of largemouth bass($n=3$)

项目 Items	直链淀粉/支链淀粉比 AM/AP	
干物质表观消化率 Apparent digestibility of dry matter	相关系数 Correlation coefficient	0.154
	P 值 P -value	0.585
粗蛋白质表观消化率 Apparent digestibility of crude protein	相关系数 Correlation coefficient	0.588 [*]
	P 值 P -value	0.021
粗脂肪表观消化率 Apparent digestibility of ether extract	相关系数 Correlation coefficient	-0.851 ^{**}
	P 值 P -value	0.002
淀粉表观消化率 Apparent digestibility of starch	相关系数 Correlation coefficient	-0.936 ^{**}
	P 值 P -value	0.001

2.4 AM/AP 对大口黑鲈肠道消化酶活性的影响

由表 8 可知, D4 组肠道总蛋白酶和胰蛋白酶活性与 D3 和 D5 组差异不显著($P>0.05$), 显著高于 D1 组($P<0.05$); D4 和 D5 组肠道脂肪酶活性显著低于 D1 和 D2 组($P<0.05$); 与 D2、D3 和 D5 组相比, D4 组肠道淀粉酶活性差异不显著($P>0.05$), 但显著低于 D1 组($P<0.05$)。

由表 9 可知, 肠道总蛋白酶和胰蛋白酶活性与饲料中 AM/AP 呈极显著正相关($P<0.01$), 肠道脂肪酶和淀粉酶活性与饲料中 AM/AP 呈极显著负相关($P<0.01$)。

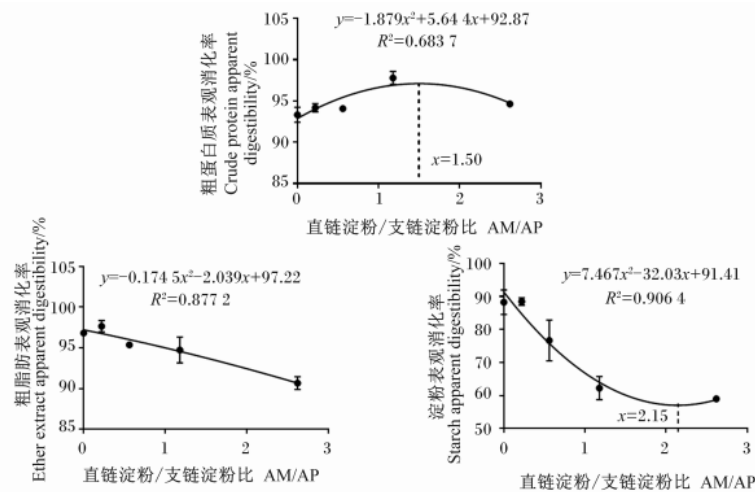


图 3 AM/AP 对大口黑鲈粗蛋白质、粗脂肪和淀粉表观消化率的影响

Fig.3 Effects of AM/AP on apparent digestibility of crude protein, ether extract and starch of largemouth bass

表 8 AM/AP 对大口黑鲈肠道消化酶活性的影响

Table 8 Effects of AM/AP on digestive enzyme activities in intestinal tract of largemouth bass ($n=3$)

项目 Items	组别 Groups				
	D1	D2	D3	D4	D5
总蛋白酶 Total protease/(U/mL)	892.50 $\pm 172.46^c$	1 134.09 $\pm 120.63^b$	1 156.14 $\pm 229.22^b$	1 330.00 $\pm 85.40^{ab}$	1 470.91 $\pm 119.95^a$
胰蛋白酶 Trypsin/(U/mg prot)	12 356.86 $\pm 1 047.39^b$	13 047.57 $\pm 371.67^b$	15 635.62 $\pm 947.74^a$	16 702.87 $\pm 895.56^a$	16 157.36 $\pm 1 070.57^a$
脂肪酶 Lipase/(U/mg prot)	2.31 $\pm 0.25^a$	2.01 $\pm 0.34^a$	1.69 $\pm 0.20^b$	1.21 $\pm 0.18^c$	0.94 $\pm 0.15^c$
淀粉酶 Amylase/(U/mg prot)	0.31 $\pm 0.04^a$	0.28 $\pm 0.03^{ab}$	0.28 $\pm 0.01^{ab}$	0.22 $\pm 0.05^{bc}$	0.17 $\pm 0.05^c$

表 9 AM/AP 与大口黑鲈肠道消化酶活性的相关性分析

Table 9 Correlation analysis between AM/AP and digestive enzyme activities in intestinal tract of largemouth bass($n=3$)

项目 Items	直链淀粉/支链淀粉比 AM/AP	
总蛋白酶 Total protease	相关系数 Correlation coefficient	0.815 **
	P 值 P-value	0.002
胰蛋白酶 Trypsin	相关系数 Correlation coefficient	0.710 **
	P 值 P-value	0.003
脂肪酶 Lipase	相关系数 Correlation coefficient	-0.958 **
	P 值 P-value	0.001
淀粉酶 Amylase	相关系数 Correlation coefficient	-0.673 **
	P 值 P-value	0.006

3 讨论

3.1 AM/AP 对饲料加工特性的影响

水产动物和陆生动物相比，对饲料成形工艺要求较高。在饲料的制造加工过程中，AM/AP 是对饲料质量产生影响的重要因素之一^[29,30]。AP 分子呈分支状，分子间氢键在膨化的高温作用下易断裂，形成不易崩塌的网状结构^[31]，在膨化过程中能承受较强的压力而结构不被破坏，因而容易膨化，并且膨化度较大。玉米淀粉在被挤压的过程中，AP 部分会发生降解，而 AM 部分没有发生显著变化^[32]。高直链玉米的膨化度低于普通玉米，膨化产品内部气室较小且密集^[31]。AP 含量较高的木薯淀粉参与形成的膨化颗粒饲料的膨化度显著高于玉米淀粉和面粉组^[33,34]。袁军^[35]发现，添加 40 %木薯淀粉组膨化度最高，而添加 40 %玉米淀粉组膨化度最低。本试验结果显示，饲料中 AM/AP 与膨化度呈极显著负相关。AP 在水产膨化饲料生产过程中起到的膨胀作用强于 AM，因此，饲料中较高的 AP 含量会提高饲料的膨化度。

淀粉糊化程度会对产品最终质量产生影响^[36]，糊化后的淀粉具有冷黏性，使淀粉凝胶化，增大最终黏度^[37,38]。AP 与淀粉溶胀现象密切相关^[39]，可以促进淀粉的糊化，而 AM 会阻碍淀粉的糊化^[40,41]，可能是 AM 分子间连接紧密不易断裂，导致淀粉糊化度降低^[42]，因此淀粉糊化度与饲料中 AM/AP 呈负相关。在本试验中，饲料硬度与膨化度和淀粉糊化度呈

显著正相关，与袁军^[35]关于玉米、木薯粉和面粉对膨化饲料硬度的研究结果不同，可能是饲料加工时温度影响了 AM 糊化温度，高直链玉米淀粉在 115.3 °C 时开始糊化，完全糊化时温度为 130.7 °C^[43,44]，温度不足会导致 AM 糊化度较低，凝胶性弱，而 AP 较 AM 易糊化^[45]，黏结性强，因此饲料硬度较高^[46]。

3.2 AM/AP 对大口黑鲈生长性能和营养物质表观消化率的影响

淀粉作为动物能量来源之一，可以提高动物产品生产效率，减低饲料成本。饲料中不同的 AM 和 AP 含量会影响动物对营养物质的消化利用，因此选择合适的 AM/AP 可以改善大口黑鲈对淀粉的利用效率。饲料中 AM/AP 为 0.32 时，暗纹东方鲀 (*Takifugu obscurus*) 可获得最佳的生长和饲料利用率^[24]。饲料中 AM/AP 为 0.24 时，罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 的增重率最高，AM/AP 升高则会抑制罗非鱼的生长^[47]。而 AM/AP 为 2.33 时，太阳鲈 (*Morone chrysops* ♀ × *M. saxatilis*) 增重率高于全 AP 组和 AM/AP 为 0.43 组^[48]。本试验研究结果显示，AM/AP 的升高会促进大口黑鲈的生长，在 AM/AP 为 2.62 时，表现出最佳的生长，但饲料系数较高。这原因可能是 AM 相对于 AP 更不易消化，鱼类摄食低 AM/AP 的饲料后，消化后的葡萄糖快速入血，而鱼类利用淀粉的能力因鱼类种类而异^[49]，大口黑鲈和太阳鲈是肉食性鱼类，其调节血糖的能力弱于作为杂食性鱼类^[50]的罗非鱼和暗纹东方鲀。因此，高 AM/AP 的饲料更有利于大口黑鲈的生长。

淀粉经膨化后，晶体结构被破坏，淀粉凝胶化，消化酶更容易接触发挥作用，提高了养殖动物对淀粉的消化利用率，降低了饲料系数^[51,52]。贾艳菊等^[51]发现膨化处理的饲料可以提高鳖的饲料利用率。膨化饲料相较于普通颗粒饲料可以提高异育银鲫 (*Carassius auratus gibelio*)^[53]和真鲷 (*Pagrus major*)^[54]的增重率和特定生长率，降低饲料系数。郭冉等^[55]发现，淀粉糊化度为 32.07 % 时，可以显著提高凡纳滨对虾的生长，高于该值则会抑制对虾生长。玉米和木薯等 AM/AP 较低的淀粉源做出的饲料其淀粉糊化度更高，显著提高了吉富罗非鱼对饲料中营养成分的吸收利用^[35]。本试验研究结果显示，AM/AP 较低的饲料淀粉糊化度和膨化度更高，尽管饲料系数最低，但是生长性能也降低。这原因可能是低 AM/AP 淀粉消化率高，但消化后的葡萄糖超出鱼体承受范围，对鱼体代谢造成障碍，表现为较慢的生长速度。

干物质表观消化率在一定程度上能反映出机体对养分的消化程度^[56]。本试验结果表明，随饲料中 AM/AP 增加，干物质表观消化率呈先升高后降低的趋势，在 D3 组达到最大值。杨伟^[47]在罗非鱼上的研究表明，当饲料中的 AM/AP 为 0.24 时，干物质表观消化率和粗蛋

白质表观消化率最高, AM/AP 增加到 0.76 时, 粗脂肪表观消化率最高, 与本试验研究结果相似, 表明适当的增加饲料中 AM 的含量可以提高大口黑鲈对饲料中营养物质的利用能力。随饲料中 AM/AP 增加, 粗蛋白质表观消化率和肠道中蛋白酶活性呈升高趋势, 提示饲料中一定含量的 AM 可以影响大口黑鲈对蛋白质的消化。

3.3 AM/AP 对大口黑鲈肠道消化酶活性的影响

消化酶活性的强弱与营养物质结构相关, 并直接影响养殖动物对营养物质的消化能力^[57,58]。淀粉颗粒内 AM 和 AP 形成的晶体结构会抵抗水和酶的接触^[59], 影响淀粉在动物肠道内被消化的程度^[60]。AM 分子间氢键作用力比 AP 更强, 难于被降解, AP 越多, 猪小肠淀粉的消化率越高^[52], 虹鳟^[61]和海鲈^[62]对蜡质玉米淀粉的消化率明显高于普通玉米淀粉。AM/AP 为 0.98 时, 罗非鱼淀粉表观消化率明显低于 AM/AP 为 0.11 的饲料^[48], 与本试验研究结果一致。相较于 AP, 油脂等化合物更易于和 AM 结合形成复合物, 导致淀粉疏水性增强, 膨化度降低, 同时也降低了与淀粉酶的接触^[63]。并且在制粒过程中, AM 分子在挤压膨化作用下形成了抗性淀粉^[64], 而 AM 含量与抗性淀粉含量成正相关^[21], 对淀粉酶产生了一定的阻碍作用, 导致饲料中的 AM 更不容易被消化, 进而影响动物消化酶的活性以及对淀粉的消化率。本试验中大口黑鲈肠道淀粉酶的活性与饲料中 AM/AP 呈极显著负相关性, 与淀粉表观消化率趋势相同, 说明饲料中 AM/AP 对大口黑鲈利用碳水化合物的能力有较大的影响, 与 Liu 等^[24]在暗纹东方鲀上的研究结果一致。随饲料中 AM/AP 增加, 脂肪消化率和肠道中脂肪酶活性呈降低趋势, 这可能与 AM-脂质复合物抵抗酶解, 减缓脂肪的消化吸收有关。

4 结论

本试验条件下, 饲料中 AM/AP 升高会降低膨化饲料的淀粉糊化度和膨化度。适宜的 AM/AP 可以提高肠道蛋白酶的活性, 增加大口黑鲈干物质和粗蛋白质表观消化率, 促进生长。综合大口黑鲈生长和营养物质表观消化率等结果, 饲料中 AM/AP 为 1.18~2.62 时效果较好。

参考文献: 略

原文刊登在《动物营养学报》, 网络首发时间: 2021-03-18 17:47:02

低鱼粉饲料中添加苏氨酸对三倍体虹鳟抗氧化能力、消化生理及肠道炎症因子基因表达的影响

王亚玲^{1,2} 王常安¹ 刘红柏¹ 韩世成¹ 陆绍霞¹ 张颖¹

(1.中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 哈尔滨 150070; 2.上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306)

摘要: 研究低鱼粉饲料中不同水平苏氨酸对三倍体虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*) 生长、抗氧化能力、消化生理及肠道炎症因子基因表达的影响, 以初始体质量 (18.42 ± 0.20) g 的三倍体虹鳟为研究对象, 在室内 200 L 流水水族箱中进行摄食生长实验 56 d。在基础饲料中添加 L-苏氨酸, 配制苏氨酸水平分别为 0.45% (对照)、0.76%、1.09%、1.29% 和 1.64% 的 5 种等氮等能饲料。将 450 尾三倍体虹鳟随机分为 5 组, 每组处理 3 个重复, 每个重复 30 尾鱼。结果表明, 当添加量为 1.09%、1.29% 和 1.64% 时, 血清超氧化物歧化酶(SOD)活力显著提高, 同时显著降低了丙二醛(MDA)的含量 ($P < 0.05$), 过氧化氢酶(CAT)在 1.29% 组含量最高, 相比对照组差异显著 ($P < 0.05$)。饲料中添加苏氨酸 (0.76%~1.64%) 时, 肠道脂肪酶 (LPS) 和胰蛋白酶的消化酶活性显著高于对照组 ($P < 0.05$), 但随着饲料苏氨酸水平达到 1.64% 时, 消化酶活性有所降低。1.09%、1.65% 组的肠道组织形态最佳, 绒毛发达, 排列整齐, 无融合和脱落现象。苏氨酸水平对肠道炎症因子 IL-2、IL-8、IL-10、IgM、TNF- α 和 PepT1 都有显著影响 ($P < 0.05$), 随着苏氨酸水平的增加, IL-2、IgM 和 PepT1 呈现先升高后降低的变化趋势, 在 1.29%、1.09% 组的表达量达到最高; IL-8 呈逐渐升高趋势; 而 IL-10 和 TNF- α 呈下降的变化趋势。研究结果表明, 低鱼粉饲料 (15%) 中添加适量水平的苏氨酸, 对提高三倍体虹鳟幼鱼生长、消化酶活性、促进肠道形态结构发育和增强免疫具有积极的作用。

关键词: 三倍体虹鳟; 苏氨酸; 免疫; 肠道组织结构

Effects of Dietary Threonine in Low Fish Meal Diet on Antioxidant Capacity, Digestive Physiology and Intestinal Inflammatory Factor Gene Expression of Triploid *Oncorhynchus mykiss*

WANG YaLing^{1,2} WANG ChangAn¹ LIU Hong-Bai¹ HAN ShiCheng¹ LU ShaoXia¹
ZHANG Ying¹

(1. Heilongjiang River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150070, China; 2. College of Fisheries and Life Science Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To study the effects of threonine in low fish meal diet on growth, antioxidant capacity, digestive physiology, and intestinal inflammatory cytokines gene expression of triploid *Oncorhynchus mykiss*. Fish with an initial body weight of (18.42 ± 0.20) g was used to the feeding trial for 56d. Five isonitrogenous and isoenergetic diets containing 0.45% (control), 0.76%, 1.09%, 1.29% and 1.64% threonine were formulated by adding L-threonine in the basal diet. A total of 450 triutplloid rainbow tro were randomly divided into 5 groups with triplicate groups of 30 fish each. Serum superoxide dismutase (SOD) significantly increased, and the content of malondialdehyde (MDA) was significantly decreased ($P < 0.05$). The activity of catalase (CAT) in 1.29% group was the highest, which was significantly different from that in control group ($P < 0.05$). The digestive enzyme activities of intestinal lipase (LPS) and trypsin in diets supplemented with threonine (0.76%-1.64%) were significantly higher than those in the control group ($P < 0.05$). However, when the dietary threonine level reached 1.64%, the activities of digestive enzymes decreased. The intestinal morphology of 1.09% and 1.65%, with well-developed villi, orderly arrangement, no fusion and shedding. IL-2, IL-8, IL-10, IgM, TNF- α and PepT1 had significant effects on the threonine levels ($P < 0.05$). With the increase of threonine levels, IL-2, IgM and PepT1 showed a trend of increase first and then decrease, and the expression levels of IL-2, IgM and PepT1 reached the highest in 1.29% and 1.09% groups. IL-8 showed a gradually increasing trend. IL-10 and TNF- α showed a

decrease trend. The low fish meal diet (15%) supplemented with appropriate level of threonine improve the growth, digestive enzyme activity, intestinal morphology and structure development and immune enhancement of juvenile triploid *Oncorhynchus mykiss*.

Key words: Triploid *Oncorhynchus mykiss*; Threonine; Immune; Intestinal tissue structure

在整个水产养殖业中，饲料生产商降低了几乎所有养殖鱼类饲料中的鱼粉含量，主要是为了应对 2007 年以来鱼粉价格的暴涨。在 2006—2007 年之前，饲料中的鱼粉提供大部分的膳食蛋白质，然而，鱼粉供不应求，饲料生产商开始用其他来源的蛋白质替代鱼粉蛋白，主要为植物蛋白浓缩物^[1]。但是，植物蛋白浓缩物的氨基酸组成不同于鱼粉蛋白。往往出现必需氨基酸缺乏或含量很低，引起饲料氨基酸不平衡，导致水生动物不能高效利用饲料蛋白质或氨基酸，影响机体的相关代谢^[2,3]。苏氨酸是哺乳动物以及鱼类机体不能合成的必需氨基酸，也是许多饲料原料的第二或第三限制性氨基酸。

鱼类易受氧化损伤，因为机体组织中不饱和脂肪酸含量高，易受氧自由基的攻击^[4]。超氧化物歧化酶作为主要的抗氧化酶，被认为是生物抗氧化的重要指标。丙二醛作为常用的膜脂过氧化指标，通过过氧化程度来间接反映机体细胞的受损情况^[5]。已有研究表明，饲料中添加苏氨酸可以显著的降低丙二醛的含量和提高超氧化物歧化酶的活性^[6]。肠道是水产动物重要的营养和免疫器官，但容易受到抗原、微生物、食物有毒元素等外来物的攻击^[7]。苏氨酸及代谢产物可以提高肠道消化酶活性，促进肠道形态结构的发育，进而提高鱼类的生长速度^[8]。目前，苏氨酸促进鱼类消化酶活性的研究较多，在一些鱼类中已经证实，但是关于苏氨酸对鱼类肠道免疫的研究较少，有报道称，最佳的苏氨酸水平可以调节促炎和抗炎细胞因子^[9]。对草鱼（*Ctenopharyngodon idellus*）的研究发现，苏氨酸缺乏组下调了促炎细胞因子 IL-8 和 TNF- α 的基因表达水平，表明苏氨酸缺乏加重了炎症反应；对团头鲂（*Megalobrama amblycephala*）的研究也有相似的发现，最佳的苏氨酸水平下调了肠道促炎细胞因子 IL-10 的基因表达^[10,11]。然而，关于这方面的研究还缺乏系统性，需要系统的研究苏氨酸与肠道免疫功能的关系，深入探讨苏氨酸在水产动物体内的分子机制。乃至世界养殖的主要冷水性鱼类，与二倍体相比，三倍体虹鳟具有生长速度快，饲料系数低，含肉率高等优点^[12,13]。快速发展的水产养殖业因养殖环境变化、饲料品质不佳等因素，也面临着巨大的挑战，感染细菌、病毒引发的疾病和饲料中植物蛋白的使用^[14,15]。然而关于低鱼粉饲料中添加苏氨酸对三倍体虹鳟肠道蛋白合成、炎症相关基因的报道较少。本研究中，以三倍体虹鳟为研究对象，在低鱼粉饲料中添加苏氨酸研究虹鳟血清抗氧化能力和肠道消化生理与炎症因子基因的表达能力，从消化酶活性和肠道炎症因子的表达来探讨苏氨酸抑

制虹鳟生长和消化的原因^[16-19]，旨在为优化三倍体虹鳟人工配合饲料提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

如表 1 所示，以半纯化饲料为基础饲料，蛋白源为鱼粉、豆粕和明胶，糖源为糊精，脂肪源为鱼油、豆油和磷脂，配制成粗蛋白水平为 41.5%，粗脂肪水平为 18.7% 的基础饲料。如表 2 所示，测量基础饲料中的氨基酸含量，除了苏氨酸以外各种氨基酸含量达到虹鳟鱼体中的含量^[20]，在饲料中分别添加不同水平的苏氨酸使 5 组试验中苏氨酸水平含量达到 0.45%、0.76%、1.09%、1.29%、1.64%，其中苏氨酸的增减用等量的甘氨酸代替。所有原料粉碎后经过 80 目筛后用鼓型混合机混合在一起，按照配比逐级混合均匀后经小型制粒机 HKJ-218（无锡同力粮机有限公司）加工成颗粒饲料制成制粒（直径为 3 mm），风干后将 其密封在真空包装袋中，置于-20 °C冰箱中保存备用。

表 1 基础饲料配方及营养水平（%）（风干基础）
Tab. 1 Ingredients and approximate composition of the test diets (air-dry basis, %)

项目 Items	饲料 Diets				
	G1	G2	G3	G4	G5
原料 Ingredients					
糊精 Dextrin	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
鱼粉 Fish meal	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
豆粕 Soybean meal	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00
复合氨基酸 Compound amino acids ¹⁾	13.68	13.68	13.68	13.68	13.68
大豆油 Soybean oil	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
明胶 Gelatin	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
鱼油 Fish oil	6.82	6.82	6.82	6.82	6.82
啤酒酵母 Beer yeast	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
大豆磷脂 Soybean phospholipid	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
维生素预混剂 Vitamin premix ²⁾	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
矿物质预混剂 Mineral premix ³⁾	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
微晶纤维素 Microcrystalline vitamin	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
苏氨酸 Threonine	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
甘氨酸 Glycine	1.00	0.75	0.50	0.25	0.00
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels ⁴⁾					
总能 Gross energy/(MJ/kg)	5.07	5.07	5.07	5.07	5.07
粗蛋白质 Crude protein	41.54	41.54	41.54	41.54	41.54
粗脂肪 Crude lipid	18.68	18.68	18.68	18.68	18.68

1) 复合氨基酸的组成 Composition of compound amino acids: 精氨酸 arginine 0.62%; 赖氨酸 lysine 2.13%; 苯丙氨酸 phenylalanine 0.90%; 组氨酸 histidine 0.46%; 缬氨酸 valine 1.72%; 亮氨酸 leucine 2.01%; 异亮氨酸 isoleucine 1.46%; 半胱氨酸 cysteine 0.15%; 蛋氨酸 methionine

0.66%；脯氨酸 proline 0.86%；天冬氨酸 aspartic acid 1.78%；酪氨酸 tyrosine 0.82%；丙氨酸 alanine 1.42%；谷氨酸 glutamic acid 3.63%；甘氨酸 glycine 0.72%。

2) 维生素预混剂为每千克饲料提供The vitamin premix provided the following per kg of diets:
VC 1 00 mg, VE 60 mg, VK₃ 5 mg, VA 15 000 IU, VD₃ 3 000 IU, VB₁ 15 mg, VB₂ 30 mg, VB₆ 15 mg, VB₁₂ 0.5 mg, 烟酸nicotinic acid 175 mg, 叶酸folic acid 5 mg, 肌醇inositol 1 000 mg, 生物素biotin 2.5 mg, 泛酸钙calcium pantothenate 50 mg。

3) 矿物质预混剂为每千克饲料提供The mineral premix provided the following per kg of diets:
MgSO₄ 7H₂O 2 000 mg, KCl 1 500 mg, FeSO₄ 7H₂O 1 000 mg, CuSO₄ 5H₂O 20 mg, MnSO₄ 4H₂O 100 mg, ZnSO₄ 7H₂O 150 mg, KI 3 mg, NaCl 500 mg, CoCl₂ 5 mg, Na₂SeO₃ 3 mg。

4) 营养水平为计算值。Nutrient levels were calculated values

表 2 基础饲料氨基酸组成 (%)

Tab. 2 Amino acid composition of the basal diets (air-dry basis, %)

氨基酸 Amino acids	G1	G2	G3	G4	G5
天门冬氨酸 Asp	4.42	4.42	4.43	3.92	4.2
苏氨酸 Thr	0.45	0.76	1.09	1.29	1.64
丝氨酸 Ser	2.56	2.51	2.47	2.45	2.4
谷氨酸 Glu	5.65	5.60	5.56	5.54	5.49
甘氨酸 Gly	3.47	3.42	3.38	3.36	3.31
丙氨酸 Ala	2.65	2.60	2.66	2.74	2.69
半胱氨酸 Cys	0.84	0.79	0.75	0.73	0.78
缬氨酸 Val	2.01	2.00	2.06	2.02	2.14
蛋氨酸 Met	0.83	0.80	0.86	0.86	0.97
异亮氨酸 Ile	1.46	1.49	1.6	1.58	1.62
亮氨酸 Leu	3.77	3.76	3.87	3.76	3.86
酪氨酸 Tyr	1.73	1.68	1.64	1.62	1.57
苯丙氨酸 Phe	1.85	1.91	2.05	2.04	2.06
赖氨酸 Lys	2.57	2.44	2.38	2.28	2.49
组氨酸 His	1.06	1.08	1.2	1.18	1.22
精氨酸 Arg	2.02	1.97	2	1.94	2.06
脯氨酸 Pro	1.77	1.79	1.83	1.81	1.91
必需氨基酸含量 EAA	16.02	16.21	17.11	16.95	18.06
氨基酸总量 TAA	23.09	22.81	22.72	22.17	22.35

1.2 实验鱼和饲养试验

三倍体虹鳟从中国水产科学研究院黑龙江水产研究所渤海冷水鱼试验站购买，开始实验前，挑选规格一致的健康三倍体虹鳟放入室内循环流水系统，投喂 2 周基础饲料，以适

应实验设施和条件，两周后开展养殖试验。

驯化期结束后，先饥饿 24 h，挑选平均质量为 (18.42 ± 0.02) g 的三倍体虹鳟随机分配到 200 L 的循环流水水族箱中，试验分 5 个处理组 (G1-G5)，每个处理 3 个重复，每个重复 30 尾，分别投喂 G1、G2、G3、G4、G5 的试验饲料。每天投喂 2 次 (09:00 和 16:00)，达饱食，养殖周期 56 d。试验用水为曝气控温后的自来水，水温 (15 ± 1) °C，溶氧 > 6.0 mg/L，氨氮含量 < 0.2 mg/L，pH 7.0~7.2，试验期间保持光照充足，每天记录投喂量，如有死鱼称重并记录数量。试验结束后，为减少对鱼的处理压力，禁食 24 h，称每缸鱼的总重，并分别称每尾鱼的体重和测体长。

1.3 样品采集

养殖试验结束后，虹鳟饥饿 24 h，分别从每个水族箱随机抽取 3 尾虹鳟，每个饲料组 9 尾，用 100 mg/L Ms-222 (间氨基苯甲酸乙酯甲硫酸盐) 麻醉，测体长，称量体重，放置冰盘上，尾静脉采血，在常温下静置 4 h，用冷冻离心机 3000 r/min 离心 15 min，取上清液，装入 1.5 mL 离心管中，用于检测血清抗氧化指标。每个处理组取 3 尾鱼，编好号后放置 -80 °C 超低冰箱中保存备用，用于体成分分析。

每个鱼缸随机取 7 尾鱼，用 100 mg/L Ms-222 (间氨基苯甲酸乙酯甲硫酸盐) 麻醉，在解剖之前，用 75% 的酒精对鱼体进行消毒，放置冰盘上迅速取出肠道，先取 2 尾鱼剔除肠道内多余的脂肪和内含物，迅速装入速冻管放入液氮中储存，随后在 -80 °C 冰箱中保存备用，用于 RNA 的提取及分子的检测。之后取 2 尾鱼，取出肠道，剔除肠道内多余的脂肪和内含物，用预冷生理盐水清洗肠道内容物，滤纸吸干水分，用于消化酶的检测。最后每个处理组取 3 尾鱼，解剖后取中肠 (幽门盲囊和后肠中间部分)，剔除内容物，放置用磷酸盐缓冲的 4% 的福尔马林缓冲溶液中用于肠道组织学观察。

1.3.1 生长性能的测定

生长性能指标计算公式如下：

成活率 (Survival rate, %) = $100 \times \text{终末实验鱼数量} / \text{初始试验鱼数量}$ ；

摄食率 (Feed intake, FI, %/d) = $100 \times \text{摄食饲料干重} \times 2 / [(\text{终末体重} + \text{初始体重}) \times \text{实验天数}]$

饲料效率 (Feed efficiency, FE, %) = $100 \times (\text{终末体重} - \text{初始体重}) / \text{摄食量}$

蛋白质沉积率 (Protein productive value, PPV, %) = $100 \times (\text{鱼体蛋白增量} / \text{摄入蛋白})$ 。

1.3.2 血清抗氧化酶活性的测定

取待测离心好的血清样品放置在 4 °C 解冻后备用。超氧化物歧化酶 (Superoxide

dismutase, SOD, 货号: A001-3-2)、过氧化氢酶 (Catalase assay kit, CAT, 货号: A007-2-1) 的活性及丙二醛 (Malondialdehyde, MDA, 货号: A003-1-2) 的含量严格按照南京建成生物工程有限公司试剂盒提供的说明书测定。

1.3.3 肠道消化酶活性的测定

取待测的肠道样品在 4°C 解冻后称重, 加入 0.86% 的预冷生理盐水, 加入的生理盐水是质量体积比的 1:9, 采用 FJ-200 高速分散组织匀浆机, 匀浆液 4000 r/min 离心 10 min, 取上清液备用。脂肪酶 (Lipase assay kit, LPS, 货号: A054-2-1)、淀粉酶 (Amylase Assay Kit, AMS, 货号: C016-1-1) 和胰蛋白酶 (货号: A080-2-2) 含量采用南京建成生物工程有限公司试剂盒测定。胰蛋白酶采用紫外比色法测定, 淀粉酶活性采用淀粉-碘比色法测定, 脂肪酶采用比色法测定, 组织蛋白的含量采用考马斯亮蓝法测定。酶活性单位用每克组织蛋白质的酶活性单位 (U/g prot) 表示。

1.3.4 组织切片观察

肠道组织切片: 每重复随机取 3 尾鱼的中肠固定于 Bouin's 液中。按常规组织切片制备程序, 进行水流冲洗、梯度乙醇脱水, 二甲苯中透明以及石蜡包埋。然后采用 KD 1508 切片机横向切片, 厚度为 6 μ m, 展片后采用 H-E 染色, 中性树胶封片, 具体方法参考林佳洁的报道^[21]。用显微镜 (Leica MD 4000B) 观察后拍片, 每组肠道切片观察 10 个以上。

1.3.5 RNA 提取和定量 RT-PCR

总 RNA 的提取: 取出采集的肠道组织样品, 加入适量的液氮, 在 -80°C 遇冷过的研钵中研磨至粉末状, 倒入遇冷过的 EP 管中, -80°C 保存备用。按照 Trizol 试剂盒中说明书的方法提取肠道组织中的总 RNA。

RNA 浓度的检测: 采用超微量紫外可见光分光光度计 (Thermo Scientific™ NanoDrop 8000) 检测总 RNA 浓度及纯度。

反转录及实时荧光定量 PCR: 按照 TaKaRa RR047A 试剂盒说明书将检测合格的 RNA 进行反转录为 cDNA 第一条链。采用 Applied Biosystems 公司 7500 实时荧光定量 PCR 操作系统, 检测三倍体虹鳟肠道待测基因的表达水平。荧光定量结果 $2^{-\Delta\Delta C_t}$ 方法处理数据^[22]。

引物的设计与合成: 利用 NCBI 网址及 Primer 5.0 软件设计引物 (表 3), 以 β -actin 为内参基因, 通过这些基因的扩增显示不同组之间的表达差异。

表 3 荧光定量引物序列 (%)		
Tab. 3 Amino acid composition of the basal diets (air-dry basis, %)		
基因	引物序列	引物效率
Genes	Primer sequences (5'—3')	Primer efficiency %
β-actin	F: GGACTTTGAGCAGGAGATGG	99.65
	R: ATGATGGAGTTGTAGGTGGTCT	
IL-2	F: GAAACCAATTCCCAGACTC	98
	R: TCCGTTGTGCTGTTCCT	
IL-8	F: GAATGTCAGCCAGCCTTGTC	92
	R: TCCAGACAAATCTCTGACCG	
IL-10	F: CGACTTTAAATCTCCATCGAC	96
	R: GCATTGGACGATCTTTTCTTC	
IgM	F: CAAACCGTGGAAGCTACAT	94
	R: AGACGGCTGTCAGATAIT	
TNF-α	F: GGGGACAACTGTGGACTGA	95
	R: GAAGTCTTGCCCTGCTCTG	
PepT1	F: CCTGTGAATCAACGCTGGT	96
	R: CACTGCCATAATGAACACG	

1.4 统计分析

采用统计软件 SPSS for Windows 23.0，将数据进行单因素方差分析和 Duncan’s 多重比较，数据用平均值±标准差（mean±SD）表示，P<0.05 表示组内数据差异性显著。

2 结果与分析

2.1 饲料中添加苏氨酸对三倍体虹鳟生长性能的影响

表 4 可以看出，各组间的成活率差异不显著（P>0.05），而终末体质量和饲料效率相比对照组显著增高（P<0.05），饲料效率在 G3 组最高；与对照组相比，摄食率和蛋白质沉积率随着苏氨酸水平的增加，显著降低（P<0.05），G4 组摄食率最低，G3 组的蛋白质沉积率最低。

表 4 饲料中添加苏氨酸对虹鳟鱼生长性能的影响					
Tab. 4 Effects of dietary threonine on growth performance of <i>O. mykiss</i> in various groups (n=3)					
项目 Items	组别 Groups				
	G1	G2	G3	G4	G5
初始体质量	18.69±0.15	18.42±0.37	18.32±0.15	18.43±0.21	18.47±0.16
Initial body weight/g					
终末体质量	49.51±1.06 ^a	52.89±0.93 ^b	52.82±0.32 ^b	53.99±0.60 ^b	53.40±1.12 ^b
Final body weight/g					
成活率	0.90±0.03	0.91±0.05	0.93±0.03	0.97±0.03	0.90±0.03
%					
摄食率	0.67±0.07 ^{ab}	0.74±0.17 ^b	0.66±0.10 ^{ab}	0.59±0.10 ^a	0.60±0.07 ^a
FI%/d					
饲料效率	85.47±4.26 ^a	86.97±5.95 ^{ab}	89.29±4.56 ^c	87.72±3.64 ^{bc}	86.96±5.37 ^{ab}
FE/%					
蛋白质沉积率	22.56±3.39 ^c	20.21±6.02 ^{bc}	16.60±3.99 ^a	17.19±3.31 ^{ab}	20.95±1.82 ^{bc}
PPV/%					
注：同行数据不同上标英文字母表示差异显著（P<0.05）；相同字母或无字母表示差异不显著（P>0.05）。下表同					
Note: In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference (P<0.05), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference (P>0.05). The same applies below					

2.2 饲料中添加苏氨酸对三倍体虹鳟血清抗氧化酶活性的影响

表 5 所示：随着饲料中苏氨酸水平的增加，虹鳟血清超氧化物歧化酶（SOD）活力明显升高（ $P<0.05$ ），与对照组（0%）相比，1.09%、1.29%组的值增加迅速。血清丙二醛（MDA）的含量随着饲料中苏氨酸水平的增加有所下降（ $P<0.05$ ），当苏氨酸添加量为 1.29%时，丙二醛含量下降显著（ $P<0.05$ ）。过氧化氢酶（CAT）在 1.29%组活性最高，差异性显著（ $P<0.05$ ）。

表 5 饲料中添加苏氨酸对虹鳟血清抗氧化酶活性的影响
Tab. 5 Effects of dietary threonine on serum antioxidant capacity in *O. mykiss*
in various groups ($n=3$; $\bar{x} \pm SD$)

指标 Index	组别 Groups				
	G1	G2	G3	G4	G5
超氧化物歧化酶SOD (U/mL)	88.69±3.26 ^a	98.00±4.48 ^a	113.64±14.62 ^b	116.72±4.09 ^b	101.85±10.16 ^b
过氧化氢酶CAT (U/mL)	9.42±0.22 ^a	10.34±0.37 ^b	10.70±0.08 ^b	11.80±0.30 ^c	11.25±0.25 ^c
丙二醛MDA (nmol/mL)	3.53±1.10 ^c	3.32±0.10 ^b	3.16±0.05 ^b	2.91±0.08 ^a	3.24±0.10 ^b

2.3 饲料中添加苏氨酸对虹鳟肠道消化生理的影响

2.3.1 饲料中添加苏氨酸对虹鳟肠道消化酶活性的影响

表 6 所示：各组间随着饲料中苏氨酸水平含量的增加，脂肪酶含量升高（ $P<0.05$ ），但随着苏氨酸的含量达到 1.64%时，脂肪酶活性有所下降。淀粉酶活性也随着苏氨酸含量的增加显著升高（ $P<0.05$ ），1.09%、1.29%组显著高于对照组，随着苏氨酸水平进一步的增加，淀粉酶活性有下降的变化趋势。相比对照组，1.09%、1.29%、1.64%组胰蛋白酶含量显著升高（ $P<0.05$ ），1.29%组活性最高。

表 6 饲料中添加苏氨酸对虹鳟肠道消化酶的影响
Tab. 6 Effects of dietary threonine on intestinal digestive enzyme in *O. mykiss* in various groups ($n=3$; $\bar{x} \pm SD$; %)

指标 Index	组别 Groups				
	G1	G2	G3	G4	G5
脂肪酶Lipase (U/gprot)	50.55±0.12 ^a	50.63±0.21 ^a	51.41±0.32 ^b	51.51±0.32 ^b	50.98±0.12 ^{ab}
胰蛋白酶Trypsin (U/mgprot)	544.95±11.48 ^a	594.18±12.43 ^b	632.81±19.88 ^c	671.76±11.50 ^c	615.28±24.24 ^{bc}
淀粉酶Amylase (U/gprot)	114.45±33.28 ^a	150.09±47.87 ^b	167.08±18.57 ^c	156.22±45.58 ^{bc}	134.51±33.48 ^{ab}

2.3.2 饲料中添加苏氨酸对三倍体虹鳟肠道组织形态的影响

表 7 所示：各组间随着饲料中苏氨酸水平含量的增加，绒毛宽度和肌层厚度升高（ $P<0.05$ ），但随着苏氨酸的含量达到 1.29% 时，绒毛宽度和肌层厚度有所下降。绒毛高度也随着苏氨酸含量的增加显著降低，在 G4 组达到最低值（ $P<0.05$ ）。

通过光学显微镜观察中肠形态的组织切片发现，投喂苏氨酸缺乏组，G1、G2 组（图版 A、B）的组织结构不够完整，组织微绒毛脱落，形态轮廓模糊，出现边缘缺刻；随着苏氨酸水平的增加，G3 组（图版 C）肠绒毛有少量脱落；G4、G5 组（图版 D、E）的肠道组织形态最佳，绒毛发达，排列整齐，无融合和脱落现象，杯状细胞增多，柱状上皮细胞整齐排列。

表 7 饲料中添加苏氨酸对虹鳟肠道形态的影响
Tab. 7 Effects of dietary threonine on intestinal morphology in *O. mykiss* in various groups (n=3;
 $\bar{x} \pm SD$; %)

指标 Indices	组别 Groups				
	G1	G2	G3	G4	G5
绒毛高度 Villus length	725.82±14.51 ^c	738.76±18.83 ^d	716.29±15.17 ^b	706.56±11.86 ^a	718.67±15.43 ^{bc}
绒毛宽度 Villus width	334.71±6.55 ^{ab}	332.07±5.43 ^{ab}	331.29±4.21 ^a	356.96±3.45 ^c	348.17±5.17 ^b
肌层厚度 Muscle thickness	225.90±4.36 ^a	232.98±4.76 ^b	249.76±5.89 ^c	238.52±3.32 ^{bc}	240.32±4.41 ^{bc}

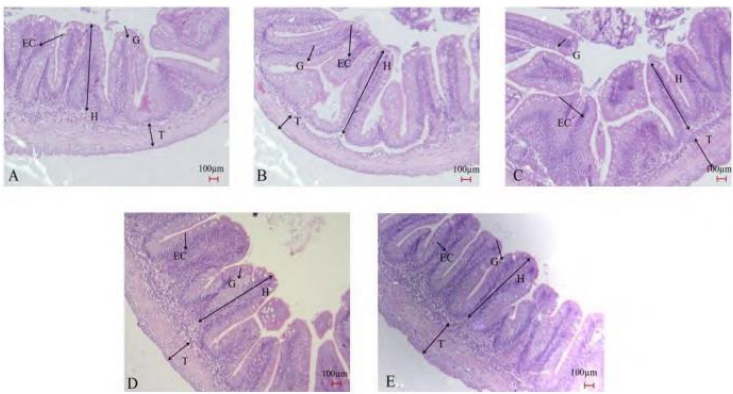


图 1 苏氨酸水平对三倍体虹鳟肠道组织形态的影响

Fig. 1 Effects of threonine level on intestinal tissue morphology of triploid *O. mykiss*

注：A 为 0.45% 的苏氨酸水平中肠组织 100×；B 为 0.76% 的苏氨酸水平中肠组织 100×；C 为 1.09% 的苏氨酸水平中肠组织 100×；D 为 1.29% 的苏氨酸水平中肠组织 100×；E 为 1.64% 的苏氨酸水平中肠组织 100×；（G：杯状细胞；EC：上皮细胞）。

Note: A was 0.45% threonine level in midgut tissue 100×; B was 0.76% threonine level in midgut tissue 100×; C was 1.09% threonine level in midgut tissue 100×; D was 1.29% threonine level in midgut tissue 100×; E was 1.64% threonine level in midgut tissue 100×; (G: Goblet cells; EC: Epithelial cells; H: Villi height; T: Muscle layer thickness).

2.4 饲料中添加苏氨酸对三倍体虹鳟肠道炎症因子和小肽转运基因表达量的变化

如图 2 所示，随着苏氨酸水平的增加，IgM 基因的相对表达量呈先升高后降低的变化趋势，在 1.29% 组达到最高值，与对照组相比，差异显著（P<0.05）；而 TNF-α 基因的相对表达量呈现降低的变化趋势，在 1.64% 组有最小值，差异显著（P<0.05）。

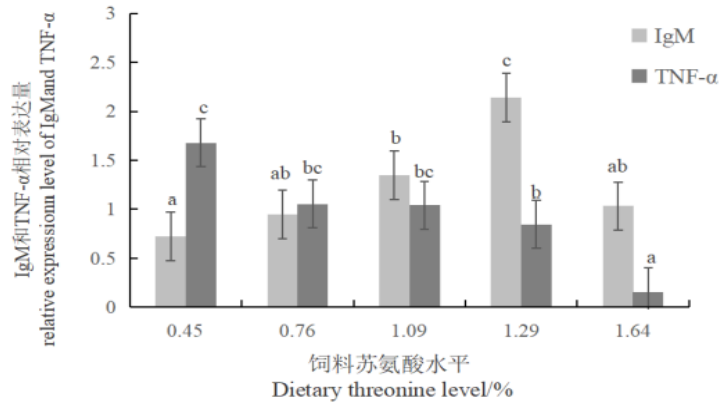


图 2 苏氨酸水平对三倍体虹鳟 IgM 和 TNF-α 基因表达量的影响

Fig. 2 Effects of threonine level on IgM and TNF-α gene expression in triploid *O. mykiss*

注: 图中不同英文字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 相同字母或无字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。下同
Note: Different English letters in the figure indicate significant difference ($P < 0.05$); The same letter or no letter

indicated no significant difference ($P > 0.05$). The following figure with.

如图 3 所示, 饲料中添加苏氨酸对 IL-2、IL-10 和 IL-8 表达量都有显著影响, 与对照组相比, 随着苏氨酸水平的增加, IL-2 和 IL-8 基因的相对表达量呈先升高后降低的变化趋势, 分别在 1.29%、1.64% 组达到最高值, 与对照组相比, 差异显著 ($P < 0.05$)。

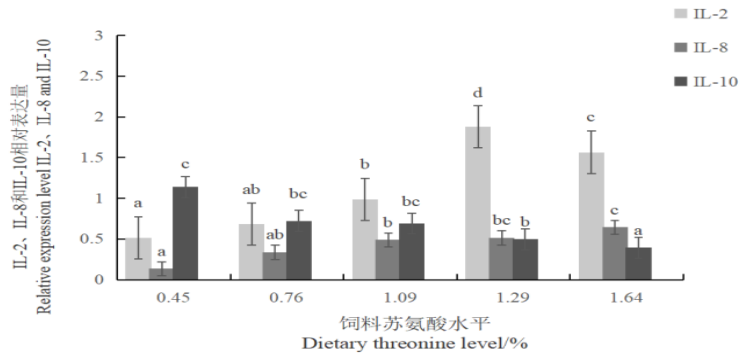


图 3 苏氨酸水平对三倍体虹鳟 IL-2、IL-8 和 IL-10 基因表达量的影响

Fig. 3 Effects of threonine level on IL-2、IL-8 and IL-10 gene expression in triploid *O. mykiss*

如图 4 所示, 随着苏氨酸水平的增加, PepT1 基因的相对表达量呈先升高后降低的变化趋势, 在 1.29% 组达到最高值, 与对照组相比, 差异显著 ($P < 0.05$)。

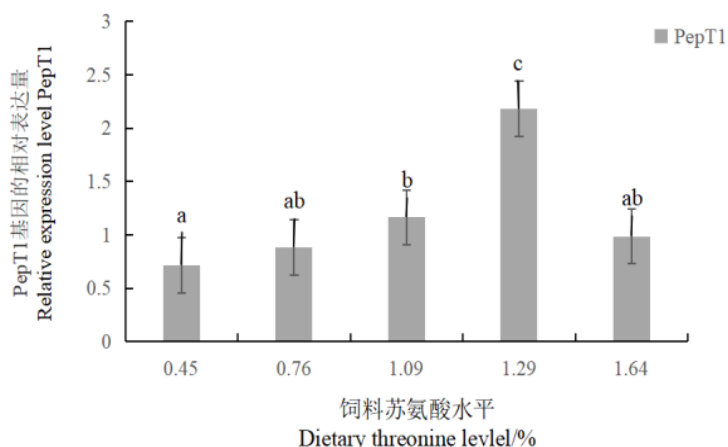


图 4 苏氨酸水平对三倍体虹鳟 PepT1 基因表达量的影响

Fig. 4 Effects of threonine level on PepT1 gene expression in triploid *O. mykiss*

3 讨论

3.1 饲料中添加苏氨酸对鱼类血清抗氧化酶活性的影响

前期研究表明,低鱼粉饲料中添加苏氨酸组的生长性能显著高于对照组^[19]。Habte-Tsion 等^[23]在幼龄团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)饲料中添加不同水平的苏氨酸,研究发现,适宜的苏氨酸水平可以显著的改善免疫反应,增强抗氧化酶活性,超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)和过氧化氢酶(CAT)的活性均随着饲料苏氨酸水平的增加而升高,当超过苏氨酸最佳含量范围 1.58%~2.08% 时,上升趋势减缓。本试验中,随着饲料中苏氨酸水平含量的增加,SOD 活性显著升高($P<0.05$),CAT 活性呈现先升高后降低的变化趋势,当苏氨酸水平为 1.29% 时,CAT 活性最高,随着苏氨酸含量的进一步增加,CAT 活性有所下降。在草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)的研究中也有相似的发现,添加适量的苏氨酸,增强了肝和肠的 SOD、CAT 酶活性,这表明苏氨酸水平可提高鱼类抗氧化酶活性^[8]。本试验中,苏氨酸缺乏组的 MDA 含量最高,最佳的苏氨酸水平显著降低了 MDA 含量($P<0.05$)。这表明,苏氨酸通过抑制鱼类的氧化损伤来保护机体,最佳的苏氨酸水平对虹鳟的氧化损伤具有保护作用。本试验同时测得 SOD 和 MDA 指标的变化,能更加充分的表明机体的抗氧化能力和受损程度,饲料中添加适量的苏氨酸可以调节机体的抗氧化状态,降低脂质过氧化反应对细胞的毒害作用,降低细胞中过氧化氢的浓度,使细胞免受毒害^[24-27]。

3.2 饲料中添加苏氨酸对鱼类肠道消化生理的影响

苏氨酸参与了肠的功能和维持^[28-30],动物机体的生长状况与消化酶活性存在正比例关系^[31]。对草鱼的研究发现,饲料中添加苏氨酸能显著提高草鱼肠内 α -淀粉酶、脂肪酶、碱

性磷酸酶、胰蛋白酶的活性^[8]。对幼建鲤 (*Cyprinus carpio var jia*) 的研究发现, 苏氨酸能显著提高幼建鲤肠道胰蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶的活力, 当苏氨酸含量分别达 1.5% 和 1.62% 时, 肠道的胰蛋白酶和脂肪酶活力最高, 苏氨酸含量与肠道脂肪酶和胰蛋白酶活力呈显著的二次相关关系^[30,32]。因此说明饲料中添加适量的苏氨酸水平有提高肠道消化酶活性和促进营养物质消化吸收的能力, 进而提高鱼体的生长发育。本试验中, 随着苏氨酸含量的增加, 脂肪酶活性显著提高 ($P<0.05$), 胰蛋白酶和淀粉酶活性随着苏氨酸含量的增加呈现先增加后降低的变化趋势。推测原因可能是, 试验鱼的种类和大小、基础饲料的组成 (纯化、半纯化 实用饲料等)、试验设计、养殖条件等多个原因造成^[33-35]。

有报道称, 在幼建鲤饲料中添加适宜水平的苏氨酸可以促进肠道的生长发育, 肠道的皱襞高度、肠长、肠长指数、肠体指数及肠道蛋白含量都有增加^[36]。对鲤鱼 (*Cyprinus carpio*) 肠上皮细胞进行体外培养, 研究发现添加适宜水平的苏氨酸能够促进肠道上皮细胞的增殖和分化^[37]。在草鱼中也有相似的发现, 生长后期草鱼的肠重、肠长、肠体指数和肠道蛋白都随着苏氨酸水平的增加显著提高, 表明苏氨酸对生长后期草鱼肠道的生长发育有着至关重要的作用, 但是对肠道相对长度没有显著影响, 与草鱼的研究不一致, 苏氨酸水平的变化可以提高幼建鲤肠道的相对长度, 可能与鱼的品种有关^[38]。本试验研究表明, 饲料中添加适宜水平的苏氨酸能提高三倍体虹鳟肠道的绒毛高度和肌层厚度, 投喂苏氨酸缺乏组的肠道组织微绒毛脱落, 随着苏氨酸含量的增加, 肠道组织结构完整, 绒毛发达。在陆生生物的研究中也有相似发现, 苏氨酸缺乏造成肠道结构破坏, 微绒毛脱落, 粘膜固有层松弛。肠道结构受损会直接影响肠道功能的发挥, 导致营养物质的消化吸收^[39-44]。可见, 苏氨酸在促进营养物质的消化吸收和保护肠道形态结构方面发挥着重要的作用。

3.3 饲料中添加苏氨酸对三倍体虹鳟肠道炎症因子和小肽转运基因的表达量的影响

小肽转运载体 **PepT1** 主要位于肠道上皮细胞, 它是一种完整的膜蛋白载体, 主要参与肠道内小肽的跨膜转运, 通过转运二肽和三肽为机体运输营养物质, 促进动物发育, 同时也参与炎症反应的免疫应答, 在炎症细胞因子通讯中发挥作用^[45,46]。本试验结果显示, 随着苏氨酸水平的增加, **PepT1** 呈先升高后降低的变化趋势, 在 1.29% 组为最高, 与对照组相比, 有显著差异。添加适宜水平的苏氨酸上调了 **PepT1** 基因的表达量, 促进肠道对营养物质的吸收。

苏氨酸是免疫球蛋白生成中的主要限制性氨基酸, 在机体的免疫系统组织、器官中发挥着重要的作用^[47]。苏氨酸缺乏时会抑制免疫球蛋白及 T、B 淋巴细胞的产生, 从而影

免疫功能^[48,49]。在鱼类中，肠道免疫反应的关键组成是炎症反应，该反应主要由细胞因子介导。IL-2 由 IL-1 β 刺激分泌，是 T 细胞生长因子，通过活化 T 细胞和巨噬细胞的表达促进免疫反应，并有效控制免疫应答^[50]。IL-8 和 TNF- α 是重要的促炎细胞因子。IL-8 在白细胞的趋化性和功能中具有重要作用，对恢复感染组织有一定作用。TNF- α 由 T 细胞和巨噬细胞产生，在炎症反应中刺激免疫细胞并介导免疫应答，具有杀伤或抑制肿瘤细胞的功效^[51]。在我们的研究中发现，饲料苏氨酸缺乏组上调了肠道肿瘤坏死因子 TNF- α 基因的表达，随着苏氨酸水平的增加，下调了 TNF- α 基因的表达，这表明最佳的苏氨酸水平预防或减轻了肠道炎症反应，而 IL-2、IL-8 和 IgM 基因的表达则相反。对草鱼幼鱼的研究也有相似的发现，与最佳苏氨酸补充组相比，苏氨酸缺乏组用嗜水气单胞菌攻击 14 d 后，抗肠炎的能力降低，肠 IgM 含量都显著降低；上调了肠道促炎细胞因子 TNF- α 和 IL-8 的 mRNA 水平^[52]。IL-10 是重要的抗炎因子，主要被用来抑制免疫反应的过度激活。本试验中，0.76%、1.09% 组上调了 IL-10 的表达，随着苏氨酸的进一步增加，下调了 IL-10 基因的表达。结果表明，苏氨酸水平显著影响三倍体虹鳟肠道炎症因子相关基因的表达，鱼体在投喂不同水平的苏氨酸时，苏氨酸能刺激 T 细胞和巨噬细胞的增殖，促进免疫反应，随着苏氨酸水平的增加，炎症因子在不同的浓度下达到峰值，说明苏氨酸能够作用于免疫防御系统，通过提高免疫因子的表达量，进而增强机体的免疫功能，保护机体免受损伤，减少死亡率。但是当苏氨酸水平过高时，对免疫反应有抑制作用，各种细胞因子也会适度表达来保护机体，而过度的免疫反应会导致炎症的产生。因此，高水平添加苏氨酸不利于机体内部的动态平衡。

4 结论

低鱼粉饲料（15%）中添加适量水平的苏氨酸，对提高三倍体虹鳟幼鱼生长、消化酶活性、促进肠道形态结构发育和增强鱼体免疫等方面都具有积极的作用。综合实验结果，建议在低鱼粉饲料中添加 1.09%~1.29% 的苏氨酸，其生长和免疫效果最佳。在前期研究的基础上，可以进一步探索，植物蛋白替代鱼粉，最适的苏氨酸添加量，旨在为优化三倍体虹鳟人工配合饲料提供理论依据。

参考文献：略

原文刊登在《水生生物学报》，网络首发时间：2022-03-08 09:43:55