



分类号 S963

学 号 2014113011

南京農業大學

硕 士 学 位 论 文

达氏鲟幼鱼饲料中适宜糖源和糖脂比研究

褚志鹏

指导教师 危起伟

学科门类 农学

一级学科 水产

二级学科 水产养殖

研究方向 水产动物营养与饲料

答辩日期 2017 年 5 月 26 日

**The Dietary Appropriate Carbohydrate Sources and
Carbohydrate to Lipid Level of Juvenile Dabry's Sturgeon
(*Acipenser Darayanus*)**

By

CHU ZHIPENG

A Thesis

Presented to Nanjing Agricultural University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Agronomy

in Aquaculture

Supervised by

Professor WEI QIWEI

Nanjing Agricultural University

Nanjing, China

June 2017

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者（需亲笔）签名：褚志鹏 2017年5月23日

学位论文授权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权南京农业大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密☐，在___年解密后适用本授权书。本学位论文属于不保密☒.

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者（需亲笔）签名：褚志鹏 2017年5月23日

导师（需亲笔）签名：



2017年5月23日

目 录

摘要.....	I
常用缩略语表.....	VII
绪论.....	VIII
第一章 文献综述.....	1
1 鱼类营养需求研究.....	1
2 鱼类糖营养需求研究.....	2
2.1 糖的种类及生理功能	2
2.2 鱼类对糖的消化和代谢	2
2.3 影响鱼类对糖类利用的因素.....	4
3 鱼类脂类营养需求研究.....	6
3.1 脂类的分类和生理功能	6
3.2 鱼类对脂类消化、吸收及合成.....	6
3.3 影响鱼类对脂类利用的因素.....	7
4 鲟鱼营养需求研究.....	9
4.1 鲟鱼蛋白质营养需求研究	9
4.2 鲟鱼脂类营养需求研究	9
4.3 鲟鱼糖营养需求研究	10
4.4 鲟鱼维生素和矿物质营养需求研究.....	10
5 研究的目的及意义.....	11
5.1 达氏鲟简介及研究现状	11
5.2 研究目的	11
6 研究技术路线	12
第二章 不同糖源对达氏鲟幼鱼生长、体成分及生理生化指标的影响	13
1 材料与方法.....	13
1.1 试验饲料	13
1.2 试验鱼及饲养管理	13
1.3 样品的采集与指标测定	15
1.4 计算公式及数据处理	15

2 结果与分析	16
2.1 不同糖源对达氏鲮幼鱼生长性能和饲料利用效率的影响.....	16
2.2 不同糖源对达氏鲮幼鱼形态学指标的影响.....	16
2.3 不同糖源对达氏鲮幼鱼体成分、肌成分、肝成分的影响.....	17
2.4 不同糖源对达氏鲮幼鱼肝指标的影响.....	18
2.5 不同糖源对达氏鲮幼鱼血清指标的影响.....	19
2.6 不同糖源对达氏鲮幼鱼胃和肠道消化酶活性的影响.....	19
2.7 不同糖源对达氏鲮幼鱼肝糖代谢关键酶活性的影响.....	21
3 讨论	21
3.1 不同糖源对达氏鲮幼鱼生长性能和饲料利用效率的影响.....	21
3.2 不同糖源对达氏鲮幼鱼形态学指标、体成分、肌成分及肝成分的影响	22
3.3 不同糖源对达氏鲮幼鱼肝及血清指标的影响.....	22
3.4 不同糖源对达氏鲮幼鱼胃和肠道消化酶活性的影响.....	23
3.5 不同糖源对达氏鲮幼鱼肝糖代谢关键酶活性的影响.....	23
4 小结	24
第三章 不同糖脂比对达氏鲮幼鱼生长、体成分及生理生化指标的影响	25
1 材料与方法	25
1.1 试验饲料	25
1.2 试验鱼及饲养管理	25
1.3 样品的采集与指标测定	25
1.4 计算公式及数据处理	25
2 结果与分析	26
2.1 不同糖脂比对达氏鲮幼鱼生长性能和饲料利用效率的影响.....	26
2.2 不同糖脂比对达氏鲮幼鱼形态学指标的影响.....	28
2.3 不同糖脂比对达氏鲮幼鱼全鱼成分、肌成分、肝成分的影响	28
2.4 不同糖脂比对达氏鲮幼鱼肝指标的影响.....	29
2.5 不同糖脂比对达氏鲮幼鱼血清指标的影响.....	30
2.6 不同糖脂比对达氏鲮幼鱼胃和肠道消化酶活性的影响.....	30
2.7 不同糖脂比对达氏鲮幼鱼肝糖代谢关键酶活性的影响.....	32
3 讨论	32
3.1 不同糖脂比对达氏鲮幼鱼生长性能和饲料利用效率的影响.....	32
3.2 不同糖脂比对达氏鲮幼鱼形态学指标的影响.....	33

3.3 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼全鱼成分、肌成分、肝成分的影响.....	33
3.4 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼肝及血清指标的影响.....	33
3.5 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼胃和肠道消化酶活性的影响.....	34
3.6 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼肝糖代谢关键酶活性的影响.....	34
4 小结	35
全文总结及展望.....	37
参考文献.....	39
致 谢.....	51
硕士期间发表的学术论文、申请专利及参与课题.....	53

达氏鲟幼鱼饲料中适宜糖源和糖脂比研究

摘要

本论文以达氏鲟幼鱼为研究对象,通过试验设计研究了饲料中不同糖源及糖脂比对达氏鲟幼鱼生长性能、体成分及生理生化指标的影响,旨在探讨适宜达氏鲟幼鱼生长的糖源及糖脂比,为达氏鲟的保育及饲料的配制提供参考依据。本论文分为以下两个部分:

1 不同糖源对达氏鲟幼鱼生长性能、体成分及生理生化指标的影响

本试验分别以糊精、小麦淀粉、玉米淀粉、 α -淀粉(预糊化玉米淀粉)、蔗糖、葡萄糖为糖源,配制6种等氮等能的半纯化饲料,投喂达氏鲟(*Acipenser dabryanus*)幼鱼($68.05 \text{ g} \pm 1.63 \text{ g}$)8周,研究饲料中糖源对达氏鲟幼鱼生长性能、体成分及生理生化指标的影响。结果发现糊精、小麦淀粉、玉米淀粉、 α -淀粉组试验鱼饲料效率和蛋白质效率显著高于蔗糖和葡萄糖组($P < 0.05$),玉米淀粉组试验鱼增重率、特定生长率和饲料效率最高。不同糖源对达氏鲟肥满度影响不显著($P > 0.05$),而对肝体比和脏体比均影响显著($P < 0.05$)。肝体比和脏体比最高的为葡萄糖组,最低的为小麦淀粉组。小麦淀粉组全鱼、肌肉和肝中粗蛋白含量最高,葡萄糖组全鱼和肌肉的粗蛋白含量最低且均显著低于其他各组($P < 0.05$)。糊精、蔗糖和葡萄糖组全鱼和肌肉粗脂肪显著高于其他各组($P < 0.05$)。 α -淀粉组肝糖原显著高于其他各组($P < 0.05$), α -淀粉组和葡萄糖组肌糖原显著高于其他各组($P < 0.05$)。肝和血液中甘油三酯和总胆固醇含量和肌体和血液中糖水平呈正相关。不同糖源对达氏鲟消化道消化酶和肝丙酮酸激酶、磷酸烯醇式丙酮酸激酶活性影响显著($P < 0.05$),对肝己糖激酶、磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶活性影响不显著($P > 0.05$)。研究结果表明,在饲料添加玉米淀粉作为糖源更有利于达氏鲟幼鱼生长。

2 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼生长性能、体成分及生理生化指标的影响

本试验探讨了饲料中不同糖脂比对达氏鲟幼鱼生长性能、体成分及生理生化指标的影响。试验共配制6种糖脂比分别为0.29、0.87、1.77、5.82、12.09的等氮等能饲料,投喂达氏鲟幼鱼($71.50 \text{ g} \pm 0.88 \text{ g}$)8周。试验结果表明饲料中不同糖脂比对达氏鲟幼鱼成活率和饲料效率影响不显著($P > 0.05$),对增重率、特定生长率、蛋白质效率、肥满度及肝体比影响显著($P < 0.05$)。增重率、特定生长率、肥满度及肝体比随

糖脂比升高先升高后降低。全鱼水分、全鱼粗脂肪、肌肉脂肪、肝粗蛋白及粗脂肪含量随糖脂比升高显著降低($P<0.05$),而肌糖原和肝糖原含量表现出相反趋势($P<0.05$)。饲料糖脂比对全鱼粗蛋白、全鱼灰分、肌肉水分及肝水分含量无显著影响($P>0.05$)。肝中谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性均随饲料中糖脂比升高呈先降低后升高趋势且受糖脂比影响差异显著($P<0.05$)。肝中甘油三酯和总胆固醇含量受糖脂比影响差异不显著($P>0.05$),但表现出降低趋势。不同糖脂比对胃蛋白酶、肠脂肪酶、肠淀粉酶、肝丙酮酸激酶和肝磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶活性均有显著性影响($P<0.05$),对己糖激酶和磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶活性影响差异不显著($P>0.05$)。丙酮酸激酶活性随糖脂比升高呈升高趋势,磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶活性随糖脂比升高而降低。将特定生长率进行回归分析,当糖脂比为 8.01 时达氏鲟幼鱼生长速度最快。由此可知,达氏鲟对饲料中糖耐受力较高,相对于脂肪达氏鲟幼鱼可以更好地利用饲料中的糖。

关键词: 达氏鲟; 糖源; 糖脂比; 生长性能; 生理生化

THE DIETARY APPROPRIATE CARBOHYDRATE
SOURCES AND CARBOHYDRATE TO LIPID LEVEL
OF JUVENILE DABRY'S STURGEON
(*ACIPENSER DARAYANUS*)

Abstract

A study was been designed to explore the effects of dietary carbohydrate source and carbohydrate-to-lipid ratio on growth performance, body composition, physiological and biochemical parameters of juvenile Dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus*). Based on the analysis of the study to obtain the appropriate carbohydrate source and carbohydrate-to-lipid ratio for conservation and feed recipe of Dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus*). Results of the present study are presented as follows:

1 Effects of different carbohydrate sources on growth performance, body composition, physiological and biochemical parameters of juvenile Dabry's sturgeon

An 8-week feeding trial was conducted to determine the effects of different carbohydrate sources on growth performance, body composition, physiological and biochemical parameters of juvenile Dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus*). Six isonitrogenous and isoenergetic semi-purified diets were prepared by dextrin, wheat starch, corn starch, α -starch, saccharose and glucose as carbohydrate sources to respectively compound. The average initial body weights of trial fish were 68.05 ± 1.63 g. The results indicated that the feed efficiency (FE) and protein efficiency ratio (PER) of the dextrin group, wheat group, starch group, corn starch group and α -starch group were significantly higher than the saccharose group and glucose group ($P < 0.05$). The fish which was fed the diets containing corn starch had the highest weight gain ratio (WGR), specific growth rate (SGR) and feed efficiency (FE). There was no significantly effect of different carbohydrate source groups on the condition factor (CF) ($P > 0.05$). However, hepatopancreas somatic index (HSI) and viscera somatic index (VSI) were significantly affected by different carbohydrate sources ($P < 0.05$). The highest HSI and VSI were the glucose group. The lowest HSI and VSI were the wheat starch group. The wheat starch group had the highest crude protein in whole body, muscle and hepar. The glucose group had the lowest crude

protein in whole body and muscle were significantly lower than the other groups ($P<0.05$). The crude lipid in whole body and muscle of the dextrin group, saccharosgroup and glucose group were significantly higher than the other groups ($P<0.05$). The hepatic glycogen of the α -starch group was significantly higher than the other groups ($P<0.05$). The muscle glycogen of α -starch group and glucose group were significantly higher than the other groups ($P<0.05$). The triglyceride (TG) and total cholesterol (T-CHO) in hepar and serum were positively correlated with the glucose content in body and serum. Different carbohydrate sources had significantly effect on the activity of the digestive enzyme of digestive tract and pyruvatekinase (PK), phosphoenolpyruvate carboxykinasewere (PEPCK) of hepar ($P<0.05$). However, the activity of hexokinase (HK) and phosphoenolpyruvate carboxylase (PEPC) of hepar were not significantly affected by dietary carbohydrate sources ($P>0.05$). The final trial results indicated that used corn starch as the carbohydrate sources was the best for juvenile Dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus*).

2 Effects of different carbohydrate-to-lipid ratios on growth performance, body composition, physiological and biochemical parameters of juvenile Dabry's sturgeon

An 8-week feeding trial was conducted to determine the effects of different carbohydrate-to-lipid ratios on growth performance, body composition, physiological and biochemical parameters of juvenile Dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus*). Six isonitrogenous and isoenergetic semi-purified diets were prepared by different carbohydrate-to-lipid (CHO:L) ratios (0.29,0.87,1.77,2.93,5.82,12.09). The average initial body weights of trial fish were $68.05 \text{ g} \pm 1.63 \text{ g}$. The results indicated that there were no significantly effect of different CHO:L ratios on survival rate (SR) and feed efficiency (FE) ($P>0.05$). The weight gain ratio (WGR), specific growth rate (SGR), protein efficiency ratio (PER), condition factor (CF) and hepatopancreas somaticindex (HSI) were significantly affected by different CHO:L ratios ($P<0.05$). The WGR, SGR, CF and HSI were increased first and then decreased as CHO:L ratios increased. The moisture in whole body, crude lipid in whole body, muscle and hepar, crude protein in hepar were increased significantly ($P<0.05$), however, the muscle glycogen and hepatic glycogen show the opposite trend ($P>0.05$). The activity of aspartate aminotransferase (AST) and alanine aminotrasferase (ALT) of hepar decreased first and then increased, and the effect was significant ($P<0.05$). There was no significant difference in triglyceride (TG) total cholesterol (T-CHO), the activity of hexokinase (HK) and phosphoenolpyruvate carboxylase (PEPC) of hepar ($P>$

0.05). The activity of pepsin, intestinal amylase, intestinal lipase, pyruvate kinase (PK) and phosphoenolpyruvate carboxykinase (PEPCK) of liver were affected by different CHO:L ratios ($P < 0.05$). The activity of PK increased as CHO:L ratios increased, however, the PEPCK showed the opposite trend. Based on broken-line regression analysis of SGR against dietary CHO:L ratios, a CHO:L of 8.01 was proved to be optimal for the growth of juvenile Dabry's sturgeon. These results demonstrated that the carbohydrate tolerance of Dabry's sturgeon is higher, and relative to the lipid Dabry's sturgeon can make better use of dietary carbohydrate.

KEY WORDS: *Acipenser dabryanus*; carbohydrate sources; carbohydrate-to-lipid ratio; growth performance; physiological and biochemical parameters

常用缩略语表

英文缩写	英文全称	中文名称
Abbreviation	English Name	Chinese Name
WGR	Weight gain rate	增重率
SR	Survival rate	成活率
SGR	Specific growth rate	特定生长率
PER	Protein efficiency ratio	蛋白质效率
FE	Feed efficiency	饲料效率
VSI	Viscerasomatic index	脏体指数
HSI	Hepatopancreassomatic index	肝体指数
CF	Condition factor	肥满度
TG	Triglyceride	甘油三酯
T-CHO	Total cholesterol	总胆固醇
ALT	Alanine aminotransferase	谷丙转氨酶
AST	Aspartate aminotransferase	谷草转氨酶
HK	Hexokinase	己糖激酶
PK	Pyruvatekinase	丙酮酸激酶
PEPCK	Phosphoenolpyruvate carboxykinasewere	磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶
PEPC	Phosphoenolpyruvate carboxylase	磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶

绪论

作为水产养殖大国，我国水产养殖产量在近三十年中增加了二十几倍^[1]。养殖产量的迅速增加依赖于营养与饲料的研究和技术进步。饲料在养殖中成本约为 60%-70%^[2]，水产动物营养与饲料研究在养殖中贡献率也达到了 40%^[3]。然而我国水产动物营养与饲料相关研究起步较晚，在现阶段仍存在饲料成本、饲料系数、废物排放率偏高等问题。加强水产动物营养与饲料研究，进一步完善我国水产动物营养需求参数平台，为企业商业饲料配方提供科学依据是发展水产养殖的必然选择。

饲料中的蛋白质、脂肪和糖类是鱼体维持各项生命活动所需能量的主要来源，三者通过一系列复杂的反应供给鱼体能量。在这三种营养物质中蛋白质占有最主要的部分，同脂肪及糖类相比较蛋白质更加容易被鱼体吸收利用，蛋白质的来源主要为动物、植物性蛋白质原料，其中尤以鱼粉更为适宜鱼体利用因此一直是鱼类饲料蛋白质的重要来源^[4]。近几十年来由于不良的气候因素、渔业资源不规范性的捕捞及海洋生态环境的破坏，鱼粉的资源极为匮乏，价格随之不断攀升^[5]。通过对鱼类饲料中适宜糖源及糖脂比的研究，减少饲料中蛋白质使用量并增加鱼体对蛋白质的利用效率，同时也是现阶段在渔业资源捕捞产量日益下降的情况下发展水产养殖的需要。

达氏鲟(*Acipenser dabryanus*)隶属于鲟形目(*Acipenseriformes*)、鲟科(*Acipenseridae*)、鲟属(*Acipenser*)，俗称长江鲟、沙腊子，是中国大陆特有的纯淡水定居性珍稀鱼类，主要分布于长江上游干支流及长江中游，曾经是长江上游的经济鱼类之一^[6]。

达氏鲟具有生长快、抗病力强、环境耐受力高等特点，对达氏鲟进行营养需求研究不仅可以为达氏鲟人工种群的建立和人工放流育苗提供基础保证也为今后达氏鲟成为新型的养殖对象后饲料配方作为参考依据。本试验通过在饲料中添加不同糖源和设计不同糖脂比研究对达氏鲟幼鱼生长性能、体组成和生理生化指标的影响，以确定一种或几种较为适宜达氏鲟幼鱼生长的糖源种类以及饲料中糖脂比，从而逐步完善达氏鲟的营养需求参数，为保护这一珍稀物种提供理论依据。

第一章 文献综述

1 鱼类营养需求研究

饲料是动物维持生命、生长和繁殖所需营养素的载体，饲料中营养素主要包括蛋白质、脂类、糖类、维生素和矿物质五类。鱼类营养和饲料学主要研究鱼类对饲料的摄取、消化吸收、代谢利用和废物排出等过程中营养素对鱼类生长发育、繁殖活动等的影

响，确定鱼类对各种营养素的定性和定量需求。^[7]
关于鱼类营养生理的研究已经有 100 多年历史，而有关鱼类营养需求及饲料利用的正式研究始于 20 世纪 20 年代的美国，随后欧洲、日本等发达国家也相继开展了有关研究。我国最早的渔用配合饲料研究开始于 1958 年，而直到 20 世纪 80 年代在国家政策的引导及产业的需

表 1-1 部分鱼类营养素需求量

Tab 1-1 Nutrient requirements of partial fish

种类	营养素	需求量	资料来源
species	nutrient	requirement	data resource
鲤 <i>Cyprinidae carp</i>	蛋白质	38%	Ogin and Satin(1970) ^[8]
虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	蛋白质	40%	Kim, et al (1990) ^[9]
石斑鱼 <i>Epinephelus malabaricus</i>	蛋白质	47.8%	Shiau and Lan (1996) ^[10]
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	蛋白质	22.77~27.66%	林鼎等 (1980) ^[11]
鲤 <i>Cyprinidae carp</i>	脂肪	5~8%	Watanabe T, et al (1975) ^[12]
石首鱼 <i>Atractoscion nobilis</i>	脂肪	15.3~19.4%	Lusm, er al (2009) ^[13]
青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	脂肪	6.5%	王道尊等 (1987) ^[14]
斑点叉尾鮰 <i>Ictalurus punctatus</i>	糖	25~30%	Wilson R P(1991) ^[15]
虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	糖	≤20%	NRC (1993) ^[16]
南方鲇 <i>Silurus meridionalis</i>	糖	12~18%	付世建, 谢小军 (2005) ^[17]
鲤 <i>Cyprinidae carp</i>	维生素 A	4000 IU/kg	Aoe, et al (1968) ^[18]
大西洋鲑 <i>Salmo salar</i>	维生素 E	60~100 mg/kg	Hamre K and Ø Lie (2008) ^[19]
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	维生素 D	1000 IU/kg	蒋明 (2007) ^[20]
奥利亚罗非鱼 <i>Oreochromis aureus</i>	钙	7 g/kg	Robinson(1987) ^[21]
大鳞大麻哈鱼 <i>Oncorhynchus tshawytscha</i>	钾	8 g/kg	Shearer(1988) ^[22]
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	磷	8.49 g/kg	梁键钧 (2012) ^[23]

2 鱼类糖营养需求研究

2.1 糖的种类及生理功能

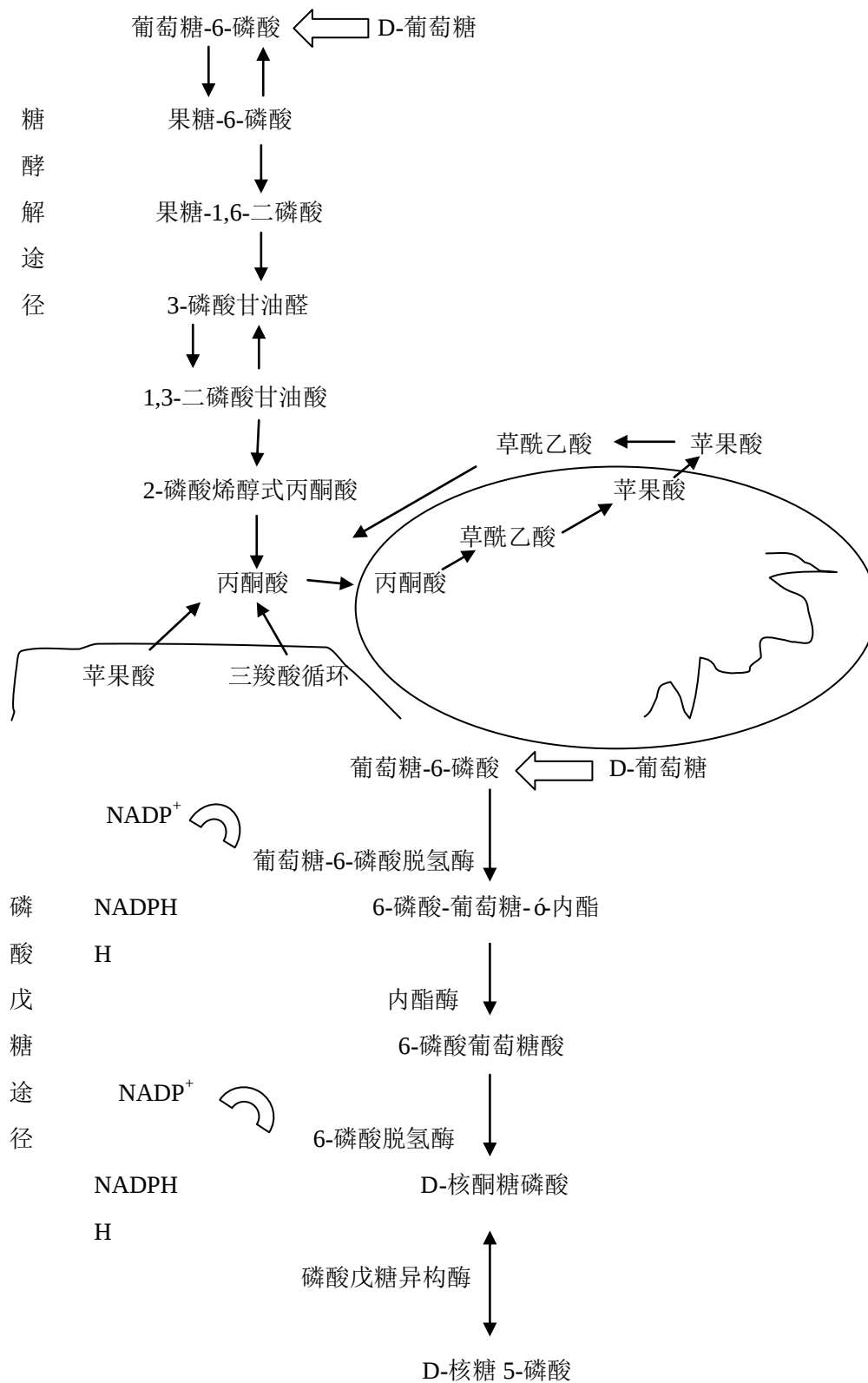
按照糖类的结构可分为单糖、低聚糖、多糖，按照生理功能糖类又可以分为可消化糖类（或称无氮浸出物）和粗纤维。可消化糖包括葡萄糖、蔗糖、淀粉、糊精等可以通过直接或降解为葡萄糖的形式被消化吸收的糖，进而参与细胞组织的构成，为各项生命活动提供所需能量，合成糖原、体脂，作为合成非必需氨基酸的碳架，降低蛋白质的分解功能活化氨基酸促进蛋白质合成^[7]。粗纤维包括纤维素、木质素等，一般不能被消化吸收，但对维持生命体的健康有重要意义。

2.2 鱼类对糖的消化和代谢

糖类是三大营养物质中最廉价的一种，在自然界中分布极为广泛。糖类不但可以参与鱼体细胞组织构成，为鱼体各项生命活动提供能量，还可以作为鱼体生长代谢过程中非必需氨基酸及核酸等代谢中介物合成的前体物^[24]。在饲料中添加适量的纤维素具有增强肠道蠕动、促进消化酶分泌的作用。鱼类肝脏中糖代谢主要过程如图 1.1^[25]。

相比陆生动物来说鱼类对于糖的利用能力低，同时不同的鱼类对于糖的利用能力也所有差别，草食性和杂食性鱼类对于糖的利用能力比肉食性鱼类要高^[26,27]。草鱼（*Ctenopharyngodon idellus*）饲料中适宜糖含量为 40%-50%，高首鲢（*Acipenser transmontanus*）饲料中适宜糖含量为 21%左右，鲑、鳟（*Oncorhynchus*）鱼则不超过 12%为宜^[7,28,29]。这可能是由于草食性及某些杂食性鱼类具有较肉食性鱼类更发达的肌胃或咽磨及更长的肠道，从而利于磨碎植物食物增加消化时间和吸收面积。另外草食性鱼类强酸性的胃环境及后肠盲肠中的微生物也可以促进其对植物食物的消化降解^[7]。

同大多数陆生动物一样，大多数鱼类缺乏分解纤维素和木质素等粗纤维的相关消化酶，只具有消化降解可消化糖的内源性消化酶^[7]。鱼类对于糖的吸收和利用主要通过糖酵解、三羧酸循环、磷酸戊糖途径及糖异生等过程实现，鱼体体内的糖代谢酶在这些过程中起到了重要作用，这些限速酶的基因表达和活性在决定鱼类对糖类吸收利用的同时也受到饲料中糖种类及水平的影响。糖酵解和糖异生是鱼类糖代谢的主要途径，其中糖酵解过程中主要的限速酶包括己糖激酶（HK）、丙酮酸羧激酶（PK）、6 磷酸果糖激酶-1（PFK）、葡萄糖激酶（GK）等；糖异生主要的限速酶包括丙酮酸羧化酶（PEPCase）、葡萄糖-6-磷酸酶（G6Pase）、磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶（PEPCK）。在鱼体肝中己糖激酶的活性要比鼠类低 10 倍左右，普遍认为，己糖激酶活性低从而限制了鱼的葡萄糖代谢的能力。Cowey 等^[29]、蔡春芳等^[31] 和 Borrebaek^[32] 有关虹鳟、

图 1.1 葡萄糖在鱼肝脏中的代谢^[25]Fig.1.1 The metabolism of glucose in fish liver^[25]

青鱼 (*Mylopharyngodon piceus*) 和河鲈 (*Perca fluviatilis*) 的研究表明, 饲料中糖水平增加丙酮酸羧激酶和葡萄糖激酶活性也随之升高。葡萄糖-6-磷酸酶是糖异生过程中第一个限速酶, Panserat 等^[33] 在虹鳟饲料中添加不同含量的淀粉未发现酶活性有显著差异。磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶是糖异生过程中的关键酶, Borrebaek 等^[32]。在对河鲈的研究中未发现饲料中不同的糖水平对其基因表达产生影响, 而 Panserat 等^[34] 在对鲤 (*Cyprinus carpio*) 的研究中发现高水平的糖含量可以抑制其基因表达。因此关于磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶现有的观点主要有两种, 一种即糖类并不能影响其基因表达, 另一种观点则认为过高的糖水平可以降低其 mRNA 水平^[35,36]。

2.3 影响鱼类对糖类利用的因素

鱼类在饲料中非蛋白能量物质不足时, 会分解体内蛋白质用以满足鱼体对能量的需求, 众多研究均证明了鱼类可以吸收饲料中的糖, 从而可以减少对蛋白质的分解, 起到节约蛋白的作用。鱼类对饲料中糖的利用受到众多因素影响, 其中主要的因素有鱼的种类、糖的含量、糖的种类、其他营养成分、温度及投喂频率等。

2.3.1 鱼的种类对糖类利用的影响

不同种类的鱼对糖的利用率有较大差异。一般来讲, 温水性和淡水性鱼类对糖的利用能力较冷水性和海水性鱼类强, 冷水性和海水性鱼类饲料中适宜糖添加量一般低于 20%, 已有试验证明在尖吻鲈 (*Lates calcarifer*)^[37]、虹鳟^[38]、比目鱼 (*Pleuronectiformes*)^[39]、大西洋鲑 (*Salmo salar*)^[40] 饲料中糖的添加量均不宜超过 20%; 而在关于斑点叉尾鲷 (*Ictalurus punctatus*)^[15]、鲤^[41]、草鱼^[42] 和罗非鱼 (*Oreochromis spp*)^[43] 的研究中表明饲料中适宜糖含量分别为 25%-30%、30%-40%、37%-56%和 40%。上文中草鱼^[7]、高首鲟^[28]、鲑鳟鱼^[29] 等研究表明食性的不同也是造成鱼类对糖利用率差异的原因之一。

2.3.2 糖的含量对鱼糖类利用的影响

饲料中不同糖含量也是影响鱼类对糖类及其他非糖物质利用率的重要原因。蔡春芳等^[44] 通过在饲料中分别添加含有 20%、40%糊精和葡萄糖投喂青鱼和鲫 (*Carassius auratus*), 研究表明摄食低糖的糊精组和葡萄糖组的青鱼和鲫增重率、饲料效率均高于高糖组试验鱼。周俊^[25] 分别用 0%-40% (每 10%为一个梯度) 的糊精和 α -淀粉投喂中华鲟 (*Acipenser sinensis*), 结果表明在添加 20%和 30%糊精的试验鱼特定生长率显著高于其他组而饵料系数显著低于其他组。

2.3.3 糖的种类对鱼糖类利用的影响

大量的研究表明鱼类对不同类型的糖类利用率也有不同。Buhler^[45] 比较了 8 种糖

源对大鳞大麻哈鱼 (*Oncorhynchus tshawytscha*) 生长的影响, 通过对大鳞大麻哈鱼分别投喂包含 20% 不同糖源的 8 种饲料, 研究发现随着糖分子量的增加试验鱼的增重率随之降低, 增重率最高的组为葡萄糖组、麦芽糖组和蔗糖组。Hung 等^[46] 用添加不同碳水化合物饲料投喂高首鲟幼鱼, 按能量保留率大小依次为: 葡萄糖=麦芽糖>糊精=生玉米淀粉=蔗糖>乳糖=果糖=纤维素。也有研究表明, 鱼类对大分子糖的利用率要高于小分子糖。Jiang 等^[47] 通过对施氏鲟投喂六种含量为 22% 的不同糖源的饲料, 结果表明增重率最高的是糊精组和 α -淀粉组 (716% 和 782%), 增重率最低为果糖 (333.2%), 特定生长率与增重率结果一致饵料系数则相反, 糖的表现消化率为果糖=葡萄糖>麦芽糖>糊精> α -淀粉>玉米淀粉。Deng 等^[48] 对高首鲟的研究结果也表明高首鲟对于大分子糖利用率更高。

2.3.4 其他营养成分对鱼糖类利用的影响

饲料中不同成分及其他物质含量对鱼类的糖利用率也有影响。Bergo 等^[49] 和 Legate 等^[50] 分别对虹鳟进行了研究, 结果均表明在饲料中添加较高含量的蛋白质时虹鳟对葡萄糖和蔗糖利用率更高。Buhler 和 Halver^[45] 关于斑点叉尾鲟的研究中表明当饲料中脂肪和淀粉提供的能值相同时, 斑点叉尾鲟的特定生长率最高。Morita 关于真鲷 (*pagrosomus major*) 的研究中, 在含有 10%、20%、30% 糊精的饲料中分别添加含量为 0%-12% (每 3% 为一个梯度) 的羧甲基纤维素, 结果表明添加羧甲基纤维素的试验组增重率显著提高, 随着糊精水平的增加适宜的羧甲基纤维素含量也随之增加。

2.3.5 温度对鱼糖类利用的影响

鱼类对糖的耐受量受到温度的影响, 高温条件下鱼类对糖的耐受量要高于低温条件。大西洋鲑在 12.5℃ 时对葡萄糖的耐受量、特定生长率、饲料效率均高于 2℃^[51]。在高温条件下糖水平对南方鲷的生长和饲料效率没有影响, 在低温时糖水平影响其生长^[52]。

2.3.6 投喂频率对鱼糖类利用的影响

研究表明鱼类对饲料中糖的利用率还受到投喂频率的影响。Murai 等^[53] 分别以葡萄糖、麦芽糖、糊精和淀粉作为鲤饲料中的糖源, 每种糖源饲料各按照 2 次(日)、4 次(日)、6 次(日) 投喂鲤 6 周。结果表明在投喂 2 次(日) 时淀粉组试验鱼生长性能最好, 而在投喂 4 次(日) 和 6 次(日) 试验组, 四种不同糖源饲料对鲤生长影响无显著差异。Tung 和 Shiau^[54] 关于罗非鱼投喂频率的研究也显示在 6 次(日) 时葡萄糖、糊精和淀粉对罗非鱼生长影响无显著差异, 且投喂 6 次(日) 试验鱼比 2 次(日) 试验鱼生长更快。

3 鱼类脂类营养需求研究

3.1 脂类的分类和生理功能

脂类是自然界广泛存在动物、植物组织中的一类脂溶性化合物的统称，按照其结构可以分为中性脂（油脂）和类脂质两类。油脂即中性脂是由一分子甘油和三分子脂肪酸组成的酯类物质，又名甘油三酯。脂类的性质主要由脂肪酸决定，脂肪酸根据结构分为饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸，其中饲料中鱼类需要的重要不饱和脂肪酸包括亚油酸、亚麻酸、花生四烯酸、二十五烯酸、二十二碳六烯酸等。类脂质也有很多种，常见的类脂质有固醇、磷脂、糖脂和蜡等。

同蛋白质一样鱼类饲料中脂肪源主要也来自动物、植物性油源。脂类是鱼类所必需的营养物质，在鱼类各项生命活动中具有重要的生理功能。脂类可以为鱼体提供生命活动所需能量，产能量高于蛋白质和糖类；磷脂和糖脂是构成细胞膜的重要成分，可以固定和保护内脏器官；脂类是脂溶性维生素的有机溶剂，维生素 A、D、E 等脂溶性维生素只有通过脂类的才可被吸收利用；脂类中部分不饱和脂肪酸是鱼体自身不能合成的，而这些脂肪酸又是鱼类生长、发育所必需的；部分固醇可以作为和维生素 and 激素的合成原料；饲料中适宜的脂含量可以减少鱼类对蛋白质的分解，节约饲料中的蛋白质。^[7]

3.2 鱼类对脂类消化、吸收及合成

通常最适宜鱼类脂肪酶的 pH 偏碱性，脂肪在酸性的胃环境中基本不被消化。鱼类消化脂肪的主要部位在小肠，油脂不能溶于水，通过与胆囊分泌的胆盐形成可溶于水的乳糜颗粒，然后在脂肪酶的作用下分解成可被鱼体吸收的脂肪酸、甘油三脂和甘油等混合物。鱼类吸收脂肪的主要部位在肠道，脂肪经过小肠的消化后，主要转化成可提供能量的中性脂肪，另外少部分转化成胆固醇和极性脂肪通过血液输送到各个器官组织。

对鱼类脂类合成研究表明，同哺乳动物一样鱼类也可以合成饱和脂肪酸 16:0 和 18:0。与哺乳动物不同，肝脏是鱼类脂肪合成的主要场所^[55,56]。通常认为除非饲料中已有 n-3 和 n-6 系列脂肪酸合成前体物质，否则鱼类自身不能够合成 n-3 和 n-6 系列脂肪酸，鱼类可以将 n-9、n-6 和 n-3 系列脂肪酸去饱和和延长碳链（如图 1.2）。

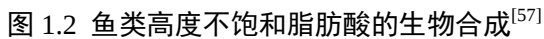


Fig.1.2 HUFA biosynthesis pathway in fish

鱼类脂质代谢是一个包括脂肪的合成、氧化、代谢和转运的复杂过程。整个过程主要在肝脏内通过转录因子和多种酶作用下完成,其中包括脂肪酸合成酶(FAS)、脂蛋白酯酶(LPL)、 $\Delta 6$ 脂肪酸去饱和酶($\Delta 6$ Fad)、碳链延长酶(elov1)、硬脂酰辅酶 A 脱氢酶(SCD)、过氧化物酶体增植物激活受体(PPARS)、脂肪酸转运蛋白(FABP)^[58,59,60,61]。Ruyter 等^[62] 在鱼体内发现 PPARS 并确定其对脂肪酸和过氧化物受体起作用。作为转录因子的受体,多条脂肪代谢通路相关基因均受到 PPARS 的调控^[63,64]。近年来,有关鱼类 PPARS 基因表达对脂肪代谢的影响研究也越来越多^[65,66]。

一般情况鱼类对饲料中脂类的需要量在 4%-18%之间^[67]。与鱼类对糖类利用相同, 鱼类对脂类的利用也受多种因素影响。其中主要因素包括鱼的种类、脂肪源、脂肪水

平、其他营养物质、温度、盐度等。

3.3.1 鱼的种类对脂类利用的影响

不同鱼类对脂类的利用有所不同, 鱼类的食性是决定不同种鱼类对脂类需求量的重要因素。同鱼类对糖类的利用能力相反, 草食性鱼类对脂类的利用率低于肉食性鱼类。雍文岳等^[68] 和 Du 等^[69] 对草鱼研究结果为饲料中适宜脂肪含量分别为 3.6%和 4%。段彪等^[70] 对齐口裂腹鱼的研究表明齐口裂腹鱼脂肪适宜需求量为 7.18%~8.21%。朱婷婷^[71] 对俄罗斯鲢的研究表明 6%~9%的脂肪更适于俄罗斯鲢生长。韩庆等^[72] 研究表明黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 适宜脂肪需求为 11.31%。刘匆等^[73] 通过对鲇 (*Silurus asotus Linnaeus*) 和南方鲇(*Silurus meridionalis*)的研究发现, 适宜鲇和南方鲇的脂肪含量分别为 7%~13%和 7%~10%。

3.3.2 脂肪源对鱼脂类利用的影响

不同脂肪中脂肪酸的类型和含量不同, 鱼类对不同脂肪酸的利用能力有差别, 因此不同的脂肪源也是造成鱼类对脂质利用能力不同的因素之一。鱼油通常被认为最适宜鱼体生长利用的脂肪源^[74], 在对鳗鲡 (*Anguilla japonica*)^[75]、虹鳟^[76]、异育银鲫 (*Carassius auratus gibelio*)^[77] 和鲤^[78] 等研究中均表明鱼油更有利于鱼体的生长。随着近年水产养殖的飞速发展, 行业对鱼油的需求量也大大增加, 鱼油短缺供不应求。关于在饲料中植物油或其他动物油替代鱼油的研究也越来越多。Huangch 等^[79] 的研究中表明罗非鱼利用豆油的能力与鱼油相近, 在对尖吻鲈 (*Lates calcarifer*)^[80] 的研究中也得到了相似的结果。在对鲇^[81] 的研究中发现在饲料中添加棕榈油作为脂肪源, 鲇的生长效率高于豆油、玉米油、棕榈油。

3.3.3 脂肪水平对鱼脂类利用的影响

脂肪可以为鱼体生命活动供能, 但饲料中过高的脂肪水平会降低鱼类的摄食率, 阻碍鱼体对其他营养物质的吸收利用, 使得鱼体生长速度变缓^[82,83]。研究发现饲料中脂肪水平高于 20%时大比目鱼 (*Psetta maxima*)^[84] 的增重率明显下降。Tainaka 等^[85] 发现过高的脂肪水平造成斑马鱼 (*Barchydanio rerio var*) 肝脏中脂肪累积过度形成脂肪肝影响斑马鱼生长及健康。王爱民等^[86] 通过对吉富罗非鱼投喂不同脂肪水平的饲料发现, 高脂饲料抑制了试验鱼的增重, 诱导肝脏中脂蛋白脂酶的基因表达, 使得肝脏与肌肉脂肪沉积。

3.3.4 其他营养物质对鱼脂类利用的影响

维生素 E 是细胞中的过氧化清除因子, 可以保护高度不饱和脂肪酸受到氧自由基的攻击^[87]。Bell 等^[88] 通过对大西洋鲑投喂四种添加不同维生素的饲料, 结果表明缺乏维生素 E 的试验鱼脂肪肝损伤严重。

作为新陈代谢的重要辅酶，矿物质是肌体必不可少的。已有研究证明锌和镁等都是高度不饱和脂肪酸合成的重要物质。

3.3.5 温度对鱼脂类利用的影响

作为影响鱼类生长和摄食的重要因子，过高或过低的水温都会抑制鱼类的生长和摄食。同时水温也是影响鱼类脂肪需求量的重要因素，普遍认为冷水性鱼类相比温水性鱼类对脂肪利用能力更高。许治冲^[89]通过设计三种温度下分别对松浦镜鲤（*Cyprinus carpio* L.）投喂不同脂肪含量的饲料，研究结果发现在 23 °C 和 30 °C 时松浦镜鲤对脂肪的需求量高于 6 °C，在对半滑舌鲷（*Cynoglossus semilaevis* Gunther）^[90]的研究中也有类似结果。

3.3.6 盐度对鱼脂类利用的影响

海水鱼相对淡水鱼普遍对脂肪的需求量要高，Sargent 等^[91]研究认为海水鱼中部分高度不饱和脂肪酸的酶活性较低，需要从食物中摄食更多的脂肪满足生长需求。Sheridan 等^[92]和 Li^[93]等将虹鳟和樱鳟（*Oncorhynchus masou*）自淡水转入海水后，鱼体多不饱和脂肪酸水平显著升高。

4 鲟鱼营养需求研究

4.1 鲟鱼蛋白质营养需求研究

鲟鱼对蛋白质的需求量要高于温水性鱼类，在对高首鲟^[94]、西伯利亚鲟^[95]、中华鲟^[96]、俄罗斯鲟^[97]和杂交鲟（西伯利亚鲟♀×俄罗斯鲟♂）^[98]的研究表明饲料中蛋白质含量在 38%~44% 时可以满足几种鲟鱼的生长需求，其需求量分别为 38.4%~43%、38%~42%、39.68%~44.64%、42%、34%~37%。

Stuart 和 Hung^[99]通过配制不同蛋白源的等氮饲料投喂高首鲟，最终试验结果表明添加混合蛋白（酪蛋白、小麦面筋、蛋白）和酪蛋白的两种饲料对高首鲟增重率、饲料效率、蛋白质效率等要高于添加其他蛋白源的饲料。刘伟^[100]用大豆浓缩蛋白替代中华鲟饲料中的鱼粉，大豆浓缩蛋白替代鱼粉蛋白比例分别为 0%、15%、30%、45%，试验结果表明随着大豆浓缩蛋白含量的增加中华鲟增重率、特定生长率和饲料效率均呈下降趋势，大豆浓缩蛋白替代鱼粉比例可以达到 30%。

4.2 鲟鱼脂类营养需求研究

鲟鱼对脂肪需求量的研究表明不同鲟鱼差异较大。Morre 和 Hung^[94]对高首鲟的研究表明，饲料中适宜高首鲟的脂肪含量为 9%。肖慧等^[96]对中华鲟的研究中发现中华鲟饲料中脂肪需求量为 9.06%。Guo 等^[101]在杂交鲟（西伯利亚鲟♀×俄罗斯鲟♂）的

研究中得出饲料中最适脂肪含量为 11%。邱岭泉和张永旺^[102]对俄罗斯鲟投喂不同猪油和豆油脂肪含量的饲料,得出俄罗斯鲟饲料适宜脂肪添加量为 12.65%~16.65%。侯俊利^[103]和 Moheesenin 等^[104]对施氏鲟和波斯鲟的研究表明,施氏鲟和波斯鲟在饲料脂肪含量为 17%和 25%时均可以较好生长。Hung 等^[105]使用高脂饲料投喂高首鲟,最终试验结果为饲料中脂肪添加量在 25.8%~35.7 时高首鲟生长最快。

Xu 等^[106]通过对高首鲟投喂分别添加混合油(玉米油、猪油和鳕肝油)、玉米油、猪油、鳕肝油、豆油、葵花籽油和亚麻籽油的饲料,结果表明不同饲料对高首鲟生长和饲料效率无显著影响。刘伟^[100]对中华鲟适宜脂肪源的研究表明饲料中添加鱼油和玉米油对中华鲟生长性能要优于大豆油、菜籽油、混合油和花生油。

4.3 鲟鱼糖营养需求研究

Hung 等^[46]等用添加不同碳水化合物的饲料投喂高首鲟幼鱼,按能量保留率大小依次为:葡萄糖=麦芽糖>糊精=生玉米淀粉=蔗糖>乳糖=果糖=纤维素;Mark 等^[107]的研究发现饲喂不同糖源的高首鲟在表观消化率、鱼体蛋白和脂肪水平均表现出显著差异,其中表观消化率为葡萄糖=半乳糖=麦芽糖>糊精>果糖=蔗糖>乳糖=玉米淀粉>纤维素;Lin 等^[108]研究了高首鲟和罗非鱼对葡萄糖和淀粉的利用率,结果表明高首鲟对糖的利用率显著高于罗非鱼;周俊^[25]对中华鲟幼鱼摄食不同糖源的研究结果为摄食葡萄糖、糊精、玉米淀粉、马铃薯淀粉、麦芽糖的幼鱼特定生长率以及蛋白质效率都高于果糖和蔗糖,同时饵料系数又低于果糖和蔗糖;Jiang 等^[47]通过对施氏鲟投喂六种含量为 22%的不同糖源的饲料,结果表明增重率最高的是糊精组和 α -淀粉组,增重率最低为果糖组,特定生长率和饵料系数与增重率结果一致,糖的表观消化率为果糖=葡萄糖>麦芽糖>糊精> α -淀粉>玉米淀粉;郭文英^[109]在对西伯利亚鲟的研究结果表明, α -淀粉、小麦淀粉、玉米淀粉三个处理组的西伯利亚鲟幼鱼的相对增重率和特定生长率均无显著差异,饲料效率和蛋白质效率也无显著差异。

4.4 鲟鱼维生素和矿物质营养需求研究

Moreau 等^[110]对西伯利亚鲟的研究发现其自身可以合成维生素 C,在饲料中不需要添加维生素 C。高强^[111]对中华鲟的研究结果表明,饲料中添加 100.2~108.8 mg/kg 的维生素 C 中华鲟生长效果最好。文华^[112]对施氏鲟的研究表明,饲料中适宜维生素 A、维生素 C 和维生素 E 含量分别为 923 IU/kg、110.4 mg/kg 和 187.4 mg/kg。

Hung^[113]对高首鲟的研究发现,饲料中添加 0.05~1.2 mg/kg 的硒对高首鲟生长性能无显著影响,但空白组试验鱼与添加 0.3 mg/kg、1.0 mg/kg 和 1.2 mg/kg 组试验鱼生长性能相比较差。Xu 等^[114]对西伯利亚鲟的研究结果表明,饲料中磷含量为 0.5%磷时

西伯利亚鲟增重率最高。文华^[112]对施氏鲟的研究表明,饲料中最适磷添加量为 0.98%。

5 研究的目的及意义

5.1 达氏鲟简介及研究现状

达氏鲟隶属于鲟形目、鲟科、鲟属,俗称沙腊子、长江鲟,是中国大陆特有的纯淡水定居性珍稀鱼类,主要分布于长江上游干支流及长江中游,曾经是长江上游的经济鱼类之一。达氏鲟外形粗长呈鱼雷形,自前端向后由粗壮变细长,横切面呈五边形。定居于江河中,江河浅水、泥沙底质、流速较缓的宽阔湾沱是其主要的栖息地。属杂食性鱼类,幼鱼以水生寡毛类、枝角类、水生昆虫幼虫等动物性食物为食,成鱼以摄食无脊椎底栖生物为主。为异速生长广温性鱼类。分为春季和秋季两种繁殖类型。^[6]

目前为止,关于达氏鲟的研究主要有种群生态^[6,115]、人工繁殖^[116,117]、早期发育^[118]、分子遗传^[119]、精子保存与精巢细胞培养^[120,121]等方面。有关达氏鲟饲料与营养的研究较少,仅见不同开口饵料对达氏鲟鱼苗生长的研究^[122],达氏鲟幼鱼对饲料中蛋白需求量的研究^[123],达氏鲟幼鱼对蛋白质和脂肪需要量的研究^[124]。

5.2 研究目的

作为长江上游干流和主要支流曾经的渔业捕捞对象之一,20 世纪 70 年代初,达氏鲟曾经占合江总产量的 4%~10%。此后,达氏鲟的资源量急剧下降,据统计,1982 年达氏鲟实行禁捕后,截至 2000 年,达氏鲟在上游仍有一定的误捕量,但葛洲坝下游自 1994 年后未发现过达氏鲟。^[125]

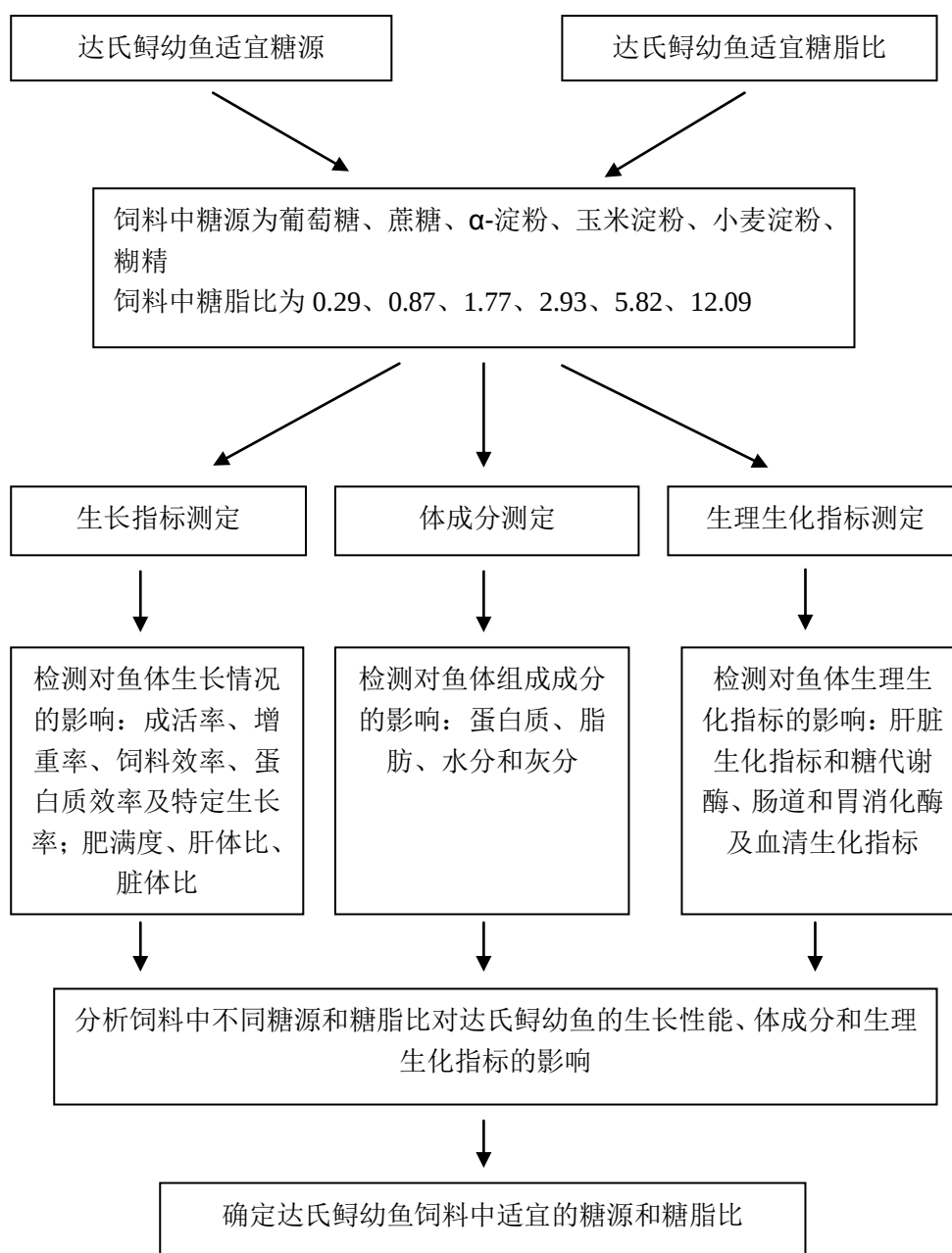
近 20 年来,由于葛洲坝工程的兴建以及过度捕捞、水环境污染等一系列原因,达氏鲟的资源极为稀少,被列为国家一级保护动物^[115,126,127]。为了挽救这一濒危物种,我国在鲟鱼繁殖、放流、养殖等方面做了大量富有成效的研究工作,然而在达氏鲟营养需求方面所做工作十分有限,其人工配合饲料通常使用鲑、鳟鱼类的饲料,因此对其营养需要进行研究具有必要性和迫切性。达氏鲟具有生长快、抗病力强、环境耐受力高等特点,对达氏鲟的营养需求开展研究,不但能为人工增殖放流提供适合野外生存的苗种,建立健康的达氏鲟人工群体,长期保存达氏鲟遗传资源,也可为今后达氏鲟成为新型养殖对象后饲料配方提供参考依据。现有研究已初步获得了达氏鲟蛋白质和脂肪需求量,针对达氏鲟进行糖源及糖脂比研究可以为完善达氏鲟营养需求基础数据,也符合当今形势下鱼粉和鱼油供应不足、价格偏高的现实状况。

糖类作为水产动物饲料中廉价的供能物质,在自然界分布极为广泛。糖类参与构成鱼体细胞组织,为鱼类生命活动提供能量,同时也可作为非必需氨基酸和核酸等代谢中介物合成的前体物来参与鱼体生长代谢过程^[24]。在鱼类饲料中添加适宜糖能够

起到降低饲料成本和节约蛋白质的作用，增强鱼体体质、提高鱼体抗病能力，还可以降低氮排放对养殖水体的污染，同时糖类作为天然的粘合剂，可以提高饲料稳定性，已经在水产配合饲料中被广泛应用。

本试验通过研究饲料中不同糖源和糖脂比对达氏鲟幼鱼生长性能、体组成和生理生化指标的影响，以确定适宜达氏鲟生长的糖源和糖脂比，从而逐步完善达氏鲟的营养需求参数，为保护这一珍稀物种提供理论依据。

6 研究技术路线



第二章 不同糖源对达氏鲟幼鱼生长、体成分及生理生化指标的影响

1 材料与方法

1.1 试验饲料

根据糖的基本分类以糊精、小麦淀粉、玉米淀粉、 α -淀粉（预糊化玉米淀粉）、蔗糖、葡萄糖为糖源，鱼粉、酪蛋白、明胶为蛋白源，鱼油为脂肪源，配制 6 种等氮等能的半纯化饲料。将饲料原料粉碎后经 60 目分级筛，按照配方精准称重混匀，用绞肉机制成直径为 2 mm 的圆柱状饲料，用电风扇吹干（水分约为 10%），最后用破碎机破碎为颗粒饲料，将饲料放置-20 °C 冰柜中冷藏备用。表 2-1 为试验饲料组成及营养水平。

1.2 试验鱼及饲养管理

试验鱼由中国水产科学院长江水产研究所荆州太湖中华鲟繁育基地提供的当年繁殖的达氏鲟子二代幼鱼。试验开始前将达氏鲟幼鱼放至直径 1.05 m，高 0.5 m 的圆柱形养殖桶驯化 2 周。试验鱼驯化结束后，停止投喂，在饥饿 24 h 后挑选规格一致、体格健壮的个体（初始体重为 $68.05 \text{ g} \pm 1.63 \text{ g}$ ），将试验鱼按照试验饲料分为 6 组，每组 3 个重复，每个重复 24 尾鱼放至养殖桶内，流水养殖，进水速度 2 L/min。采取表观饱食投喂，每天投喂 3 次（8:00 14:00 20:00）。投喂 1 h 后清污，收集残饵并记录投喂量、死鱼数量。试验周期为 8 周，每 2 周称重 1 次，根据实际体重及摄食情况调整投喂量。试验用水为充分曝气并沉淀过滤的地下水，养殖期间水温为 $(18.0 \pm 2.0) \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，溶氧为 $(7.6 \pm 0.6 \text{ mg/L})$ ，氨氮小于 0.05 mg/L，pH 为 7.4 ± 0.2 。

表 2-1 试验饲料组成及营养水平（干物质基础）

Tab. 2-1 Composition and nutrient levels of experimental diets %, DM

项目 items	糖源 carbohydrate sources					
	糊精 dextrin	小麦淀粉 wheat starch	玉米淀粉 corn starch	α -淀粉 α -starch	蔗糖 saccharose	葡萄糖 glucose
原料 ingredients						
鱼粉 fish meal	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
酪蛋白 casein	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
明胶 gelatin	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
鱼油 fish oil	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
微晶纤维素 microcrystalline cellulose	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
氯化胆碱 choline chloride	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
维生素预混料 ¹⁾ vitamin premix ¹⁾	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
矿物质预混料 ²⁾ cineral premix ²⁾	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
羧甲基纤维素钠CMC-Na	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
糖 carbohydrate	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00
合计 total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 nutrient levels						
干物质 dry matter	90.3	90.52	90.34	90.78	90.27	89.79
粗蛋白质 crude protein	42.84	42.75	42.01	42.28	42.16	42.71
粗脂肪 crude lipid	8.19	8.28	8.21	8.29	8.14	8.31
灰分 ash	8.90	8.85	8.94	8.82	8.94	8.94
总能 gross energy/(MJ/kg)	19.23	19.12	19.48	19.55	19.82	20.17

注：1) 维生素预混料 (mg/kg diet or IU/kg diet) :维生素 E, 100; 维生素 K₃, 40; 维生素 A, 5000 IU; 维生素 D, 2000 IU; 维生素 B₁, 50; 维生素 B₂, 200; 维生素 B₆, 50; 维生素 B₁₂, 0.5; 维生素 C, 325; 烟酸, 175; 叶酸, 5; 肌醇, 1000; 生物素, 2.5; 泛酸钙, 50.

2) 矿物质盐预混料(mg/kg diet): NaCl, 5000; Ca(H₂PO₄)₂, 15000; FeSO₄·7H₂O, 1000; ZnSO₄·7H₂O, 350 ;MnSO₄·4H₂O, 40; CuSO₄·5H₂O, 12; CoCl₂·6H₂O, 80; KIO₃, 5.

Note:1) Vitamin premix (mg/kg diet or IU/kg diet) : vitamin E, 100; vitamin K₃, 40; vitamin A, 5000 IU; vitamin D, 2000 IU; vitamin B₁, 50; vitamin B₂, 200; vitamin B₆, 50; vitamin B₁₂, 0.5; vitamin C, 325; nicotinic acid, 175; folic acid, 5; inositol, 1 000; biotin, 2.5; Calcium Pantothenate, 50.

2) Mineral premix (mg/kg diet): NaCl, 5000; Ca(H₂PO₄)₂, 15000; FeSO₄·7H₂O, 1000; ZnSO₄·7H₂O, 350; MnSO₄·4H₂O, 40; CuSO₄·5H₂O, 12; CoCl₂·6H₂O, 80; KIO₃, 5.

1.3 样品的采集与指标测定

养殖试验结束时,在鱼体饥饿 24 h 后,每个重复随机挑选 10 尾鱼测量体长并称重,用以计算肥满度。另每个重复随机挑选 4 尾鱼用 MSS-222 麻醉后,对其中 3 尾鱼进行尾静脉采血,3500 r/min 离心 10 min 后取血清放至-80 ℃冰箱备测血清生化指标。取内脏和肝称重,用以计算脏体比及肝体比,并将肝、胃、肠道进行分离后放置于 2 mL 离心管放至-80 ℃冰箱,用以检测各项酶活指标。取肝和背肌保存,用以测定肝成分、肌成分、肝糖原和肌糖原。另 1 尾鱼用于全鱼体成分的测定。

饲料、全鱼、肝及肌肉的水分、粗蛋白质、粗脂肪和灰分含量分别采用 105 ℃干燥法 (GB/T5009.3-2003)、凯氏定氮法 (GB/T5009.3-2003)、索氏抽提法 (GB/5009.6-2003)、550 ℃灼烧法测定(GB/5009.4-2003)。饲料中能量用氧氮式热量仪 (SDACM-4000,湖南三德科技股份有限公司)进行测定。血清生化指标采用 Sysmex 全自动生化分析仪 (Chemix-800) 测定。肝糖原、肌糖原、谷丙转氨酶、谷草转氨酶、甘油三酯、总胆固醇、胃蛋白酶、脂肪酶、淀粉酶、己糖激酶、丙酮酸激酶、磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶、磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶均采用南京建成生物工程研究所提供的试剂盒进行测定。

1.4 计算公式及数据处理

本研究中各参数的计算按以下公式进行:

$$\text{增重率(WGR,\%)} = (W_t - W_o) / W_o \times 100$$

$$\text{成活率 (SR,\%)} = N_t / N_o \times 100$$

$$\text{特定生长率(SGR,\%/d)} = (\ln W_t - \ln W_o) / t \times 100$$

$$\text{蛋白质效率(PER,\%)} = (W_t - W_o) / I_N \times 100$$

$$\text{饲料效率(FE,\%)} = (W_t - W_o) / I_T \times 100$$

$$\text{脏体指数(VSI,\%)} = W_v / W \times 100$$

$$\text{肝体指数(HSI,\%)} = W_h / W \times 100$$

$$\text{肥满度(CF)} = W / L^3 \times 100$$

式中, W_t 代表末体质量(g), W_o 代表初体质量(g), N_o 代表试验初鱼尾数, N_t 代表试验末鱼尾数, t 为试验天数(d), I_N 代表摄氏蛋白质干重(g), I_T 代表总摄氏饲料干重(g), W_v 代表鱼体内脏质量(g), W_h 代表鱼体肝质量(g), W 代表鱼体体重(g), L 代表鱼体体长(cm)。

所有数据经 Excel 2007 初步整理后,采用 SPSS 20.0 对数据进行单因素方差分析,采用 Duncan 氏多重比较分析组间的差异显著性,显著水平定为 $P < 0.05$ 。试验数据用

平均值±标准误(Mean±SE)表示。

2 结果与分析

2.1 不同糖源对达氏鲟幼鱼生长性能和饲料利用效率的影响

经过 8 周的饲养后,发现不同糖源对达氏鲟幼鱼成活率影响不显著 ($P>0.05$)。玉米淀粉组试验鱼的增重率、特定生长率和饲料效率最高(表 2-2),葡萄糖组试验鱼增重率和特定生长率显著低于其他各组 ($P<0.05$)。多糖组(糊精、小麦淀粉、玉米淀粉、 α -淀粉)试验鱼饲料效率和蛋白质效率显著高于双糖组(蔗糖)和单糖组(葡萄糖) ($P<0.05$)。

2.2 不同糖源对达氏鲟幼鱼形态学指标的影响

由表 2-3 可知,不同糖源对达氏鲟肥满度无显著影响 ($P>0.05$),而对肝体比和脏体比均有显著影响 ($P<0.05$)。其中葡萄糖组试验鱼的肝体比和脏体比均显著高于其他各组 ($P<0.05$),小麦淀粉、玉米淀粉、蔗糖组试验鱼的肝体比显著低于其他各组 ($P<0.05$),而小麦淀粉组试验鱼的脏体比显著低于 α -淀粉和葡萄糖组 ($P<0.05$),但与其他组差异不显著 ($P>0.05$)。

表 2-2 不同糖源对达氏鲟幼鱼生长性能和饲料利用效率的影响

Tab.2-2 Effects of different carbohydrate sources on growth performance and feed efficiency of juvenil

Acipenser dabryanus($n = 3$)

糖源	成活率	增重率	特定生长率	饲料效率	蛋白质效率
carbohydrate sources	SR/%	WGR/%	SGR/%/d	FE/%	PER/%
糊精 dextrin	100±0.00	193.60±5.38 ^a	1.92±0.08 ^a	63.65±4.09 ^a	148.62±5.51 ^a
小麦淀粉 wheat starch	98.48±1.52	188.99±3.80 ^a	1.89±0.06 ^a	58.60±0.52 ^a	136.9±0.73 ^a
玉米淀粉 corn starch	100±0.00	206.28±3.13 ^a	2.00±0.05 ^a	66.65±3.73 ^a	158.33±5.13 ^a
α -淀粉 α -starch	100±0.00	200.91±2.48 ^a	1.96±0.04 ^a	64.72±15.27 ^a	152.8±20.85 ^a
蔗糖 saccharose	98.48±1.52	182.05±4.38 ^a	1.85±0.07 ^a	46.2±3.28 ^b	109.4±4.50 ^b
葡萄糖 glucose	96.97±1.52	92.66±2.71 ^b	1.18±0.07 ^b	45.46±1.13 ^b	106.41±1.53 ^b

注: 同列不同糖源组数据肩标不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$), 肩标无字母或小写字母相同表示差异不显著($P>0.05$).

Note: Different small letter superscripts in the same column of different carbohydrate source group indicate significant effect($P<0.05$), while with no or the same small letter superscripts mean no significant difference($P>0.05$).

表 2-3 不同糖源对达氏鲟幼鱼形态学指标的影响

Tab.2-3 Effects of different carbohydrate sources on morphological indices of juvenil *Acipenser dabryanu*(n=9)

糖源	肥满度	肝体比	脏体比
carbohydrate sources	CF	HSI/%	VSI/%
糊精 dextrin	0.69±0.02	2.41±0.17 ^b	6.79±0.37 ^{bc}
小麦淀粉 wheat starch	0.68±0.01	1.42±0.11 ^c	6.41±0.40 ^c
玉米淀粉 corn starch	0.70±0.02	1.64±0.08 ^c	6.71±0.30 ^{bc}
α-淀粉 α-starch	0.69±0.02	2.32±0.11 ^b	7.42±0.23 ^b
蔗糖 saccharose	0.70±0.02	1.58±0.08 ^c	6.96±0.26 ^{bc}
葡萄糖 glucose	0.67±0.02	2.99±0.02 ^a	8.79±0.22 ^a

注：同列不同糖源组数据肩标不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)，肩标无字母或小写字母相同表示差异不显著($P>0.05$)。

Note: Different small letter superscripts in the same column of different carbohydrate source group indicate significant effect($P<0.05$), while with no or the same small letter superscripts mean no significant difference($P>0.05$).

2.3 不同糖源对达氏鲟幼鱼体成分、肌成分、肝成分的影响

由表 2-4 可知，不同糖源对达氏鲟全鱼、肌肉、肝的水分和肌肉的灰分含量影响均不显著 ($P>0.05$)，而对于全鱼、肌肉、肝的粗蛋白、粗脂肪和全鱼灰分含量均有显著影响 ($P<0.05$)，其中 6 个试验组中肌肉粗脂肪和肝粗蛋白含量均有显著差异 ($P<0.05$)。小麦淀粉组全鱼、肌肉和肝中粗蛋白含量最高，玉米淀粉组也表现出较高的粗蛋白含量；葡萄糖组全鱼和肌肉的粗蛋白含量最低且均显著低于其他各组 ($P<0.05$)。全鱼和肌肉粗脂肪含量最高的三组均为糊精、蔗糖和葡萄糖组且显著高于其他各组 ($P<0.05$)。不同糖源对达氏鲟肝糖原和肌糖原含量影响显著 ($P<0.05$)。其中肝糖原含量最高的为 α-淀粉和糊精组，α-淀粉组肝糖原含量约为最低的蔗糖和小麦淀粉组的 4 倍。葡萄糖和 α-淀粉组肌糖原含量显著高于其他各组 ($P<0.05$)，小麦淀粉和蔗糖组最低。

表 2-4 不同糖源对达氏鲢幼鱼全鱼成分、肌成分、肝成分的影响

Tab.2-4 Effects of different carbohydrate sources on compositions of whole body, muscle and hepar in
juvenil *Acipenser dabryanus*(n=9)

项目	糊精	小麦淀粉	玉米淀粉	α -淀粉	蔗糖	葡萄糖
items	dextrin	wheat starch	corn starch	α -starch	saccharose	glucose
全鱼 whole body (%)						
水分 moisture	80.54 $\pm$ 0.10	81.37 $\pm$ 0.13	81.02 $\pm$ 0.58	80.96 $\pm$ 1.11	80.69 $\pm$ 0.30	80.90 $\pm$ 0.43
粗蛋白 crude protein	11.62 $\pm$ 0.08 ^{bc}	12.10 $\pm$ 0.13 ^a	11.48 $\pm$ 0.04 ^c	11.92 $\pm$ 0.06 ^{ab}	11.91 $\pm$ 0.13 ^{ab}	10.47 $\pm$ 0.18 ^d
粗脂肪 crude lipid	4.38 $\pm$ 0.08 ^b	3.23 $\pm$ 0.06 ^d	3.61 $\pm$ 0.02 ^c	3.50 $\pm$ 0.01 ^{cd}	4.14 $\pm$ 0.11 ^b	4.96 $\pm$ 0.11 ^a
灰分 ash	2.19 $\pm$ 0.10 ^a	2.22 $\pm$ 0.34 ^a	2.27 $\pm$ 0.16 ^a	1.96 $\pm$ 0.30 ^b	2.27 $\pm$ 0.05 ^a	2.14 $\pm$ 0.25 ^a
肌肉 muscle (%)						
水分 moisture	79.86 $\pm$ 0.35	81.28 $\pm$ 0.61	80.96 $\pm$ 0.15	80.82 $\pm$ 0.78	81.10 $\pm$ 0.87	80.24 $\pm$ 0.89
粗蛋白 crude protein	14.68 $\pm$ 0.05 ^b	15.25 $\pm$ 0.12 ^a	15.13 $\pm$ 0.08 ^a	15.07 $\pm$ 0.02 ^a	14.70 $\pm$ 0.07 ^b	12.74 $\pm$ 0.03 ^c
粗脂肪 crude lipid	3.84 $\pm$ 0.07 ^b	2.72 $\pm$ 0.09 ^d	2.48 $\pm$ 0.02 ^e	2.46 $\pm$ 0.07 ^f	3.98 $\pm$ 0.02 ^a	3.58 $\pm$ 0.02 ^c
灰分 ash	0.95 $\pm$ 0.03	1.01 $\pm$ 0.01	1.03 $\pm$ 0.01	1.06 $\pm$ 0.01	0.93 $\pm$ 0.02	1.02 $\pm$ 0.01
肌糖原	1.46 $\pm$ 0.07 ^b	0.73 $\pm$ 0.02 ^c	1.38 $\pm$ 0.10 ^b	3.16 $\pm$ 0.32 ^a	1.16 $\pm$ 0.07 ^{bc}	3.35 $\pm$ 0.30 ^a
muscle glycogen/(mg.g ⁻¹)						
肝 hepar (%)						
水分 moisture	69.06 $\pm$ 0.53	71.18 $\pm$ 1.94	70.31 $\pm$ 0.24	72.43 $\pm$ 0.28	69.43 $\pm$ 1.62	71.12 $\pm$ 0.86
粗蛋白 crude protein	8.95 $\pm$ 0.07 ^e	13.07 $\pm$ 0.19 ^a	12.69 $\pm$ 0.19 ^a	9.51 $\pm$ 0.05 ^d	11.42 $\pm$ 0.10 ^b	9.98 $\pm$ 0.07 ^c
粗脂肪 crude lipid	10.41 $\pm$ 0.27 ^d	12.03 $\pm$ 0.63 ^{bc}	12.90 $\pm$ 0.17 ^{ab}	10.57 $\pm$ 0.16 ^d	13.76 $\pm$ 0.28 ^a	11.29 $\pm$ 0.08 ^{cd}
肝糖原	53.0 $\pm$ 3.61 ^b	16.8 $\pm$ 0.10 ^d	20.9 $\pm$ 2.26 ^d	61.7 $\pm$ 2.99 ^a	15.6 $\pm$ 1.64 ^d	40.9 $\pm$ 2.98 ^c
hepatic glycogen/(mg.g ⁻¹)						

注：同行不同糖源组数据肩标不同小写字母表示组间差异显著（ $P<0.05$ ），肩标无字母或小写字母相同表示差异不显著（ $P>0.05$ ）。

Note: Different small letter superscripts in the same line of different carbohydrate source group indicate significant effect($P<0.05$), while with no or the same small letter superscripts mean no significant difference($P>0.05$).

2.4 不同糖源对达氏鲢幼鱼肝指标的影响

由表 2-5 可知，葡萄糖组试验鱼肝谷丙转氨酶活性、甘油三酯含量和 α -淀粉组试验鱼谷草转氨酶活性、总胆固醇含量最高并显著高于其他各组（ $P<0.05$ ）。蔗糖和葡萄糖组试验鱼肝谷草转氨酶活性最低且显著低于其他各组（ $P<0.05$ ）。玉米淀粉组试

验鱼肝甘油三酯和总胆固醇含量均最低。

表 2-5 不同糖源对达氏鲟幼鱼肝指标的影响

Tab.2-5 Effects of different carbohydrate sources on hepatic indexes of juvenil *Acipenser*

<i>dabryanus</i> (n=9)				
糖源	谷丙转氨酶	谷草转氨酶	甘油三酯	总胆固醇
carbohydrate sources	AST/(U g ⁻¹)	ALT/(U g ⁻¹)	TG/(mmol g ⁻¹)	T-CHO(mmol g ⁻¹)
糊精 dextrin	80.28 ±2.78 ^d	63.06 ±3.83 ^{ab}	0.28 ±0.01 ^c	0.06 ±0.01 ^{bc}
小麦淀粉 wheat starch	98.72 ±4.02 ^c	57.54 ±1.22 ^a	0.26 ±0.02 ^c	0.05 ±0.00 ^c
玉米淀粉 corn starch	123.97 ±8.33 ^b	71.87 ±4.83 ^a	0.25 ±0.01 ^c	0.04 ±0.01 ^c
α-淀粉 α-starch	104.51 ±3.93 ^c	73.61 ±7.33 ^a	0.33 ±0.03 ^{bc}	0.11 ±0.01 ^a
蔗糖 saccharose	106.5 ±4.39 ^c	52.16 ±9.4 ^b	0.36 ±0.03 ^{ab}	0.08 ±0.01 ^b
葡萄糖 glucose	142.78 ±5.69 ^a	47.48 ±3.16 ^b	0.43 ±0.01 ^a	0.09 ±0.01 ^b

注：同列不同糖源组数据肩标不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)，肩标无字母或小写字母相同表示差异不显著($P>0.05$)。

Note: Different small letter superscripts in the same column of different carbohydrate source group indicate a significant effect($P<0.05$), while with no or the same small letter superscripts mean no significant difference($P>0.05$).

2.5 不同糖源对达氏鲟幼鱼血清指标的影响

在达氏鲟血清指标中，葡萄糖组试验鱼血清中葡萄糖、甘油三酯、总胆固醇含量最高，其中甘油三酯和总胆固醇含量显著高于其他各组（ $P<0.05$ ），小麦淀粉组则最低（表 2-6）。

2.6 不同糖源对达氏鲟幼鱼胃和肠道消化酶活性的影响

由表 2-7 可知，不同糖源对达氏鲟胃和肠道消化酶活性均有显著影响（ $P<0.05$ ）。其中小麦淀粉组试验鱼胃蛋白酶活性最高而肠脂肪酶和肠淀粉酶则最低。葡萄糖组试验鱼胃蛋白酶活性最低；糊精组试验鱼肠脂肪酶活性最高并显著高于小麦淀粉、蔗糖和葡萄糖组（ $P<0.05$ ）；肠淀粉酶活性最高的是 α-淀粉和糊精组并显著高于葡萄糖和小麦淀粉组（ $P<0.05$ ）。

表 2-6 不同糖源对达氏鲟幼鱼血清指标的影响

Tab.2-6 Effects of different carbohydrate sources on serum indexes of juvenil *Acipenser**dabryanus*(n=9);mmol/L

糖源	葡萄糖	甘油三酯	总胆固醇
carbohydrate sources	glucose	TG	T-CHO
糊精 dextrin	3.28±0.10 ^a	3.63±0.20 ^{bc}	1.18±0.05 ^b
小麦淀粉 wheat starch	2.48±0.13 ^c	3.31±0.09 ^c	0.92±0.07 ^b
玉米淀粉 corn starch	1.97±0.08 ^d	3.61±0.21 ^{bc}	1.00±0.06 ^b
α -淀粉 α -starch	2.85±0.09 ^b	4.04±0.17 ^b	1.17±0.06 ^b
蔗糖 saccharose	2.53±0.15 ^{bc}	3.55±0.16 ^{bc}	1.12±0.08 ^b
葡萄糖 glucose	3.49±0.12 ^a	4.70±0.37 ^a	1.91±0.19 ^a

注：同列不同糖源组数据肩标不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)，肩标无字母或小写字母相同表示差异不显著($P>0.05$)。

Note: Different small letter superscripts in the same column of different carbohydrate source group indicate significant effect($P<0.05$), while with no or the same small letter superscripts mean no significant difference($P>0.05$).

表 2-7 不同糖源对达氏鲟幼鱼胃和肠道消化酶活性的影响

Tab.2-7 Effects of different carbohydrate sources on digestive enzyme activities in stomach and

intestinal of juvenil *Acipenser dabryanus*(n=9)

糖源	胃蛋白酶	肠脂肪酶	肠淀粉酶
carbohydrate sources	pepsin/(U mg ⁻¹)	intestinal amylase/(U g ⁻¹)	intestinal lipase/(U g ⁻¹)
糊精 dextrin	0.81±0.05 ^b	14.51±0.72 ^a	196.52±13.10 ^a
小麦淀粉 wheat starch	1.00±0.05 ^a	8.91±0.32 ^c	156.81±8.05 ^b
玉米淀粉 corn starch	0.87±0.02 ^{ab}	12.76±1.07 ^{ab}	187.97±15.91 ^{ab}
α -淀粉 α -starch	0.99±0.08 ^a	12.20±1.35 ^{ab}	214.07±13.44 ^a
蔗糖 saccharose	0.83±0.02 ^b	9.66±0.61 ^c	174.87±9.28 ^{ab}
葡萄糖 glucose	0.73±0.05 ^b	10.17±0.64 ^{bc}	157.40±10.89 ^b

注：同列不同糖源组数据肩标不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)，肩标无字母或小写字母相同表示差异不显著($P>0.05$)。

Note: Different small letter superscripts in the same column of different carbohydrate source group indicate significant effect($P<0.05$), while with no or the same small letter superscripts mean no significant difference($P>0.05$).

2.7 不同糖源对达氏鲟幼鱼肝糖代谢关键酶活性的影响

由表 2-8 可知, 不同糖源对达氏鲟肝丙酮酸激酶、磷酸烯醇式丙酮酸激酶活性均有显著影响 ($P<0.05$), 而对肝己糖激酶、磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶活性影响不显著 ($P>0.05$)。α-淀粉组试验鱼肝己糖激酶、丙酮酸激酶活性最高而磷酸烯醇式丙酮酸激酶活性最低。小麦淀粉组试验鱼肝己糖激酶、蔗糖组肝丙酮酸激酶和磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶活性最低, 而小麦淀粉组试验鱼肝磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶则表现出最高的活性。

表 2-8 不同糖源对达氏鲟幼鱼肝糖代谢关键酶活性的影响

Tab.2-8 Effects of different carbohydrate sources on hepatic carbohydrate metabolic key enzyme activities of juvenil *Acipenser dabryanus*($n=9$)

糖源 carbohydrate sources	己糖激酶 HK/(U g ⁻¹)	丙酮酸激酶 PK/(U g ⁻¹)	磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶 PEPCK/(U mg ⁻¹)	磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶 PEPC/(U mg ⁻¹)
糊精 dextrin	44.57 ± 8.69	18.53 ± 1.99 ^a	8.54 ± 1.09 ^b	8.26 ± 1.34
小麦淀粉 wheat starch	33.01 ± 4.76	16.94 ± 1.92 ^a	10.22 ± 0.69 ^a	7.63 ± 1.53
玉米淀粉 corn starch	50.31 ± 10.53	16.32 ± 1.71 ^{ab}	9.83 ± 1.78 ^{ab}	7.98 ± 1.02
α-淀粉 α-starch	51.63 ± 8.50	18.62 ± 0.93 ^a	7.26 ± 1.06 ^c	8.47 ± 1.63
蔗糖 saccharose	46.26 ± 8.47	11.60 ± 1.75 ^b	9.20 ± 1.09 ^b	8.05 ± 2.31
葡萄糖 glucose	36.15 ± 6.48	11.71 ± 1.95 ^b	8.37 ± 1.30 ^b	8.03 ± 1.87

注: 同列不同糖源组数据肩标不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$), 肩标无字母或小写字母相同表示差异不显著($P>0.05$).

Note: Different small letter superscripts in the same column of different carbohydrate source group indicate significant effect($P<0.05$), while with no or the same small letter superscripts mean no significant difference($P>0.05$).

3 讨论

3.1 不同糖源对达氏鲟幼鱼生长性能和饲料利用效率的影响

本试验的结果发现多糖组(糊精、小麦淀粉、玉米淀粉、α-淀粉)和双糖组(蔗糖)增重率和特定生长率显著高于单糖组(葡萄糖), 多糖组饲料效率和蛋白质效率显著高于双糖组和单糖组。这表明达氏鲟幼鱼对多糖的利用优于单糖, 在设计达氏鲟幼鱼饲料配方时添加多糖类糖源有利于其更快地生长。这与鳕鱼(*Gadus morhua*)^[128]、军曹鱼(*Rachycentron canadum*)^[129]、团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)^[130]、青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)^[144]、中华鲟(*Acipenser sinensis*)^[25]、吉富罗非鱼

(*Oreochromis niloticus*)^[131] 和杂交鲢^[132] 等研究及预期结果相似。造成鱼类对大分子糖类的利用率高于小分子糖类的原因可能是,大分子糖被鱼类摄食后需要经过水解或磷酸解途径转化为葡萄糖后才能被吸收利用,而葡萄糖则可以被消化道直接吸收。葡萄糖吸收的过快、过多到达血液后造成高血糖引起负生理作用,从而使鱼类不能很好的利用糖类进而导致生长性能较差^[129]。但对石斑鱼(*Epinephelus malabaricus*)^[133]、金头鲷(*Sparus aurata*)^[134] 和草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)^[135] 的研究发现其对小分子糖的利用率要高于大分子糖,这可能是不同鱼类间存在差异。

3.2 不同糖源对达氏鲢幼鱼形态学指标、体成分、肌成分及肝成分的影响

研究表明肝体比会随着饲料中糖水平的升高而增大,肝中过高的肝糖原含量是造成肝体比增大的主要原因之一^[136],除了糖水平的升高会造成肝体比增大也有研究发现饲料中糖源的不同也会造成肝体比的差异^[130],而本试验中葡萄糖、糊精、 α -淀粉组肝体比和肝糖原的含量显著高于其他各组也证实了该观点。已有大量研究表明不同鱼类对不同糖类的利用率存在差异,本试验不同糖源对达氏鲢全鱼、肌肉的常规营养成分的差异主要表现在粗蛋白和粗脂肪上,葡萄糖组全鱼和肌肉粗蛋白含量均最低,同时葡萄糖、糊精、蔗糖组全鱼和肌肉粗脂肪含量显著高于其他3组,这与中华鲟^[25]和鲫鱼(*Carassius auratus gibelio*)^[137]的研究结果类似,而在真鲷(*Pagrosomus major*)^[138]和南方鲇(*Silurus meridionalis* Chen)^[139]的研究中发现淀粉组全鱼脂肪含量高于双糖和单糖组。葡萄糖、糊精组全鱼及肌肉粗脂肪含量偏高可能是由于鱼体肌糖原、肝糖原和血糖含量偏高促使糖酵解反应的进行,而糖酵解过程中生成的磷酸二羟丙酮可以还原为3-磷酸甘油以及丙酮酸彻底脱氢氧化生成的乙酰辅酶A都是脂肪合成的重要部分^[140]。但是在本试验有关糖酵解相关酶活性的结果中并未发现该两组代谢酶活性高于其他组,此外蔗糖组组织和血液中糖含量也没有显著高于其他组,因此有关粗脂肪含量偏高的原因还有待进一步探讨。葡萄糖组全鱼、肌肉和肝及糊精、 α -淀粉组肝粗蛋白含量偏低,Furuichi M等^[141]认为这是由于组织中葡萄糖含量偏高影响从而占据了消化道内壁大量吸收位点,从而影响鱼类对氨基酸的吸收,造成蛋白质沉积降低。根据本试验中肝糖原和肌糖原相对较低的几个试验组,在达氏鲢幼鱼养殖过程饲料中添加适量小麦淀粉、玉米淀粉、蔗糖更有利于鱼体蛋白质的沉积。

3.3 不同糖源对达氏鲢幼鱼肝及血清指标的影响

谷丙转氨酶和谷草转氨酶是目前为止研究发现的衡量肝功能的主要指标^[142],两种酶的活性过高或过低都标志着肝可能受到损伤。本试验中葡萄糖组谷丙转氨酶活性偏高而糊精组则偏低,葡萄糖和蔗糖组谷草转氨酶活性偏低。这可能是肝中糖原合成

过程加重了肝负担,与试验中的肝糖原的含量升高趋势一致。与肝糖原和肌糖原的结果相似,本试验中葡萄糖、 α -淀粉和糊精组血清中葡萄糖含量也相对高于其他三组,而肝中的甘油三酯、总胆固醇含量也相对较高,其中葡萄糖组肝中甘油三酯和血清中甘油三酯、总胆固醇含量显著高于其他各组。该结果与团头鲂^[130]、杂交鲟^[132]、和瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)^[143]等研究结果相似,而在军曹鱼^[129]、吉富罗非鱼^[131]中葡萄糖和糊精组血液中甘油三酯含量偏低,但从各组结果看血糖含量高的试验组相对应甘油三酯含量也较高。造成甘油三酯和总胆固醇升高的原因可能是由于肌体和血液中糖含量较高足以满足鱼体正常生命活动所需能量,进而使丙酮酸转变的乙酰辅酶 A 在三羧酸循环中更多的走向生物合成即作为脂类合成的起始物质^[140]。

3.4 不同糖源对达氏鲟幼鱼胃和肠道消化酶活性的影响

不同种类鱼在摄食不同饲料时可以分泌调节消化酶活性^[144]。本试验中饲料中不同糖源对达氏鲟胃蛋白酶、肠脂肪酶、肠淀粉酶均有显著影响。小麦淀粉和 α -淀粉组中胃蛋白酶活性最高,这与全鱼和肌肉中粗蛋白含量结果一致。糊精、玉米淀粉和 α -淀粉组肠脂肪酶和肠淀粉酶活性均高于其他各组,然而玉米淀粉和 α -淀粉组全鱼和肌肉中粗脂肪含量却低于糊精、葡萄糖组,这与本试验中肌体及血液中糖含量过高引发肝和血液中甘油三酯和总胆固醇含量升高的研究结果一致。

3.5 不同糖源对达氏鲟幼鱼肝糖代谢关键酶活性的影响

己糖激酶和丙酮酸激酶是糖酵解过程中两种关键酶,在鱼体肝中己糖激酶的活性要比鼠类低 10 倍左右,普遍认为,己糖激酶活性低从而限制了鱼的葡萄糖代谢的能力^[35]。本试验中玉米淀粉和 α -淀粉中己糖激酶活性相对较高,但己糖激酶活性在各组之间并未表现出显著差异,这与南方鲇^[139]和胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)^[145]中研究结果相似。王广宇等^[35]认为己糖激酶专一性差, K_m 值低,易饱和而失去活力,在鱼类中活性较低,因此改变饲料组成,己糖激酶的活性不发生变化。但在吉富罗非鱼^[131]和翘嘴红鲌(*Erythroculter ilishaeformis* Bleeker)^[146]的研究中发现不同饲料对鱼肝己糖激酶有显著影响,这种差异可能是因为鱼的种类不同造成。多糖组丙酮酸激酶活性显著高于双糖和单糖组,这可能是达氏鲟能够更好的利用饲料中多糖的原因之一,这与翘嘴红鲌^[146]和大黄鱼(*Larmichthys crocea* Richardson)^[147]的研究结果一致。磷酸烯醇式丙酮酸激酶是糖异生过程中的关键酶,有研究通过对大鼠投喂高糖饲料,结果表明磷酸烯醇式丙酮酸激酶活性及 mRNA 都快速降到一个很低的水平,并增加了血糖和胰岛素水平^[148]。本试验中肌体和血液中糖含量较高的葡萄糖、糊精和 α -淀粉组对应磷酸烯醇式丙酮酸激酶活性低于其他各组,这可能是由于肌体和血液中高含量的

糖使鱼体进行了负反馈调节, 该结果也在胭脂鱼^[145] 和翘嘴红鲌^[146] 中出现。磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶是催化糖异生产生的磷酸式丙酮酸生成草酰乙酸的限速酶, 在三羧酸循环的回补反应中有重要作用^[140]。上文中认为葡萄糖、糊精和 α -淀粉组全鱼和肌肉粗脂肪含量高于其他几组可能是三羧酸循环中将糖类转化为脂类, 但本试验中不同糖源对达氏鲢幼鱼肝磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶影响不显著, 有关磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶的研究还鲜有报道, 饲料中糖源种类的不同对其是否有显著影响还有待进一步讨论。

4 小结

本试验的结果表明, 达氏鲢幼鱼对多糖的利用要优于双糖和单糖组, 从试验鱼增重率、特定增长率、饲料效率指标来看, 玉米淀粉效果最好, 综合考量饲料成本及不同糖源对达氏鲢幼鱼生理生化指标的影响, 建议在对达氏鲢的饲养过程中添加玉米淀粉作为饲料中的糖源。

第三章 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼生长、体成分及生理生化指标的影响

1 材料与方法

1.1 试验饲料

以鱼粉、酪蛋白、明胶为蛋白源，鱼油为脂肪源， α -淀粉（预糊化玉米淀粉）为糖源，配制糖脂比分别为 0.29、0.87、1.77、2.93、5.82、12.09 的 6 种等氮等能的半纯化饲料。将饲料原料粉碎后经 60 目分级筛，按照配方精准称重混匀，用绞肉机制成直径为 2 mm 的圆柱状饲料，用电风扇吹干（水分约为 10%），最后用破碎机破碎为颗粒饲料，将饲料放置 -20 °C 冰柜中冷藏备用。表 3-1 为试验饲料组成及营养水平。

1.2 试验鱼及饲养管理

试验鱼由中国水产科学院长江水产研究所荆州太湖中华鲟繁育基地提供的当年繁殖的达氏鲟子二代幼鱼。试验开始前将达氏鲟幼鱼放至直径 1.05 m，高 0.5 m 的圆柱形养殖桶驯化 2 周。试验鱼驯化结束后，停止投喂，在饥饿 24 h 后挑选规格一致、体格健壮的个体（初始体重为 $71.50 \text{ g} \pm 0.88 \text{ g}$ ），将试验鱼按照试验饲料分为 6 组，每组 3 个重复，每个重复 24 尾鱼放至养殖桶内，流水养殖，进水速度 2 L/min。采取表观饱食投喂，每天投喂 3 次（8:00 14:00 20:00）。投喂 1 h 后清污，收集残饵并记录投喂量、死鱼数量。试验周期为 8 周，每 2 周称重 1 次，根据实际体重及摄食情况调整投喂量。试验用水为充分曝气并沉淀过滤的地下水，养殖期间水温为 $(18.0 \pm 2.0) \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，溶氧为 $(7.6 \pm 0.6 \text{ mg/L})$ ，氨氮小于 0.05 mg/L，H 为 7.4 ± 0.2 。

1.3 样品的采集与指标测定

样品的采集与指标测定同第二章 1.3。饲料中可消化糖含量采用 3,5-二硝基水杨酸法。

1.4 计算公式及数据处理

计算公式及数据处理同第二章 1.4。

表 3-1 试验饲料组成及营养水平（干物质基础）

Tab. 3-1 Composition and nutrient levels of experimental diets % , DM

项目 items	糖脂比 CHO: L					
	0.29	0.87	1.77	2.93	5.82	12.09
原料 ingredients						
鱼粉 fish meal	19	19	19	19	19	19
酪蛋白 casein	30	30	30	30	30	30
明胶 gelatin	5	5	5	5	5	5
鱼油 fish oil	14.5	12	9.5	7	4.5	2
微晶纤维素 microcrystalline cellulose	19.15	15.65	12.15	8.65	5.15	1.65
氯化胆碱 choline chloride	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
维生素预混料 ¹⁾ vitamin premix ¹⁾	1	1	1	1	1	1
矿物质预混料 ²⁾ cineral premix ²⁾	5	5	5	5	5	5
羧甲基纤维素钠CMC-Na	2	2	2	2	2	2
α -淀粉 α -starch	4	10	16	22	28	34
合计 total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 nutrient levels						
干物质 dry matter	89.50	89.21	90.58	90.38	89.61	90.19
粗蛋白质 crude protein	38.06	37.53	37.37	38.16	37.55	37.76
粗脂肪 crude lipid	12.11	10.23	8.03	6.68	4.20	2.47
可消化糖 digestible candy	3.48	8.92	14.25	19.58	24.46	29.87
灰分 ash	8.30	8.28	8.38	8.36	8.29	8.34
总能 gross energy/(MJ/kg)	18.76	18.80	19.06	18.73	19.50	19.02

注：1）维生素预混料（mg/kg diet or IU/kg diet）：维生素 E，100；维生素 K₃，40；维生素 A，5000 IU；维生素 D，2000 IU；维生素 B₁，50；维生素 B₂，200；维生素 B₆，50；维生素 B₁₂，0.5；维生素 C，325；烟酸，175；叶酸，5；肌醇，1000；生物素，2.5；泛酸钙，50。

2）矿物质盐预混料(mg/kg diet)：NaCl, 5000; Ca(H₂PO₄)₂, 15000; FeSO₄ 7H₂O, 1000; ZnSO₄ 7H₂O, 350 ;MnSO₄ 4H₂O, 40; CuSO₄ 5H₂O, 12; CoCl₂ 6H₂O, 80; KIO₃, 5.

Note:1) Vitamin premix (mg/kg diet or IU/kg diet) : vitamin E, 100; vitamin K₃, 40; vitamin A, 5000 IU;vitamin D, 2000 IU; vitamin B₁, 50; vitamin B₂, 200; vitamin B₆, 50; vitamin B₁₂, 0.5; vitamin C, 325; nicotinic acid, 175; folic acid, 5; inositol, 1 000;biotin, 2.5; Calcium Pantothenic acid, 50.

2) Mineral premix (mg/kg diet): NaCl, 5000; Ca(H₂PO₄)₂, 15000; FeSO₄ 7H₂O, 1000; ZnSO₄ 7H₂O, 350; MnSO₄ 4H₂O, 40; CuSO₄ 5H₂O, 12; CoCl₂ 6H₂O, 80; KIO₃, 5.

2 结果与分析

2.1 不同糖脂比对达氏鲢幼鱼生长性能和饲料利用效率的影响

由表 3-2 可知，不同糖脂比试验组中达氏鲢幼鱼成活率整体呈升高趋势但无显著

差异 ($P>0.05$)。饲料中不同糖脂比对达氏鲟幼鱼增重率影响显著 ($P<0.05$)，随着糖脂比的升高增重率先上升后降低，饲料效率、蛋白质效率与增重率趋势相同且受糖脂比影响差异显著 ($P<0.05$)。

表 3-2 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼生长性能和饲料利用效率的影响

Tab.3-2 Effects of different CHO:L on growth performance and feed efficiency of juvenil *Acipenser dabryanus*($n = 3$)

糖脂比	成活率	增重率	特定生长率	饲料效率	蛋白质效率
CHO:L	SR/%	WGR/%	SGR%/d	FE/%	PER/%
0.29	93.94 $\pm$ 1.52	75.73 $\pm$ 4.45 ^d	1.01 $\pm$ 0.04 ^d	57.65 $\pm$ 4.23 ^c	151.46 $\pm$ 11.11 ^c
0.87	93.93 $\pm$ 3.03	119.29 $\pm$ 17.38 ^c	1.39 $\pm$ 0.14 ^c	61.52 $\pm$ 0.62 ^{bc}	163.93 $\pm$ 1.65 ^{bc}
1.77	95.45 $\pm$ 0.00	142.14 $\pm$ 10.22 ^{bc}	1.58 $\pm$ 0.08 ^{bc}	66.26 $\pm$ 0.12 ^b	177.30 $\pm$ 0.32 ^b
2.93	93.94 $\pm$ 3.03	148.46 $\pm$ 6.80 ^{bc}	1.62 $\pm$ 0.05 ^{bc}	68.30 $\pm$ 4.08 ^b	179.00 $\pm$ 10.68 ^b
5.82	98.48 $\pm$ 1.52	192.87 $\pm$ 17.29 ^a	1.91 $\pm$ 0.11 ^a	87.09 $\pm$ 0.67 ^a	231.93 $\pm$ 1.79 ^a
12.09	100 $\pm$ 0.00	173.27 $\pm$ 2.86 ^{ab}	1.80 $\pm$ 0.02 ^{ab}	81.28 $\pm$ 0.98 ^a	215.26 $\pm$ 2.59 ^a

注：同列不同糖脂比组数据肩标不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)，肩标无字母或小写字母相同表示差异不显著($P>0.05$)。

Note: Different small letter superscripts in the same column of different CHO:L group indicate significant effect($P<0.05$), while with no or the same small letter superscripts mean no significant difference($P>0.05$).

如图 3-1 所示，经回归分析，饲料中糖脂比 (x) 和特定生长率 (y) 的方程为 $y=-0.0147x^2+0.2355x+1.0906$ ($R^2=0.9016$)，当饲料中糖脂比为 8.01 时，特定生长率最高，达氏鲟幼鱼生长最快。

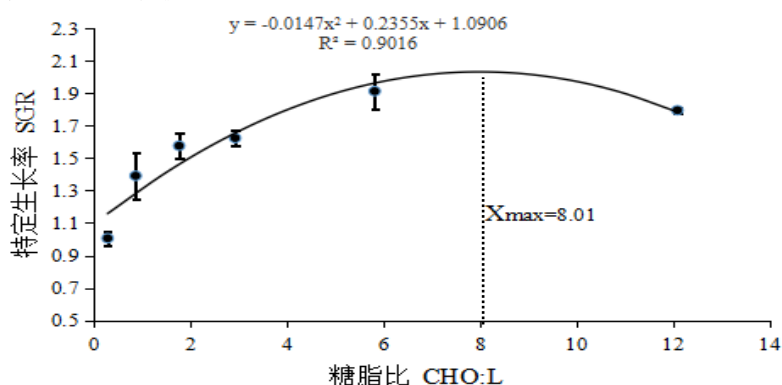


图 3.1 饲料糖脂比与达氏鲟幼鱼特定生长率的回归分析

Fig.3.1 Regression analysis between dietary CHO:L levels and specific growth rate of juvenile *Acipenser dabryanus*

2.2 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼形态学指标的影响

由表 3-3 可知, 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼肥满度及肝体比影响差异显著 ($P<0.05$), 对脏体比影响差异不显著 ($P>0.05$)。其中肥满度及肝体比均随糖脂比升高呈先升高后降低的趋势。

表 3-3 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼形态学指标的影响

Tab.3-3 Effects of different CHO:L on morphological indices of juvenil *Acipenser dabryanu*(n=9)

糖脂比 CHO:L	肥满度 CF	肝体比 HSI/%	脏体比 VSI/%
0.29	0.63 $\pm$ 0.02 ^c	1.60 $\pm$ 0.12 ^b	8.09 $\pm$ 0.41
0.87	0.68 $\pm$ 0.02 ^{bc}	1.84 $\pm$ 0.16 ^b	8.98 $\pm$ 0.36
1.77	0.68 $\pm$ 0.02 ^b	1.88 $\pm$ 0.15 ^b	8.40 $\pm$ 0.72
2.93	0.70 $\pm$ 0.01 ^{ab}	1.91 $\pm$ 0.05 ^b	8.38 $\pm$ 0.18
5.82	0.74 $\pm$ 0.04 ^a	3.07 $\pm$ 0.23 ^a	8.56 $\pm$ 0.40
12.09	0.70 $\pm$ 0.01 ^{ab}	3.04 $\pm$ 0.23 ^a	8.53 $\pm$ 0.40

注: 同列不同糖脂比组数据肩标不同小写字母表示组间差异显著 ($P<0.05$), 肩标无字母或小写字母相同表示差异不显著 ($P>0.05$)。

Note: Different small letter superscripts in the same column of different CHO:L group indicate significant effect ($P<0.05$), while with no or the same small letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$).

2.3 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼全鱼成分、肌成分、肝成分的影响

由表 3-4 可知, 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼全鱼水分和粗脂肪影响差异显著 ($P<0.05$), 对全鱼粗蛋白和灰分影响差异不显著 ($P>0.05$), 全鱼水分和粗脂肪含量随糖脂比升高而呈降低趋势。不同糖脂比对肌肉粗蛋白、粗脂肪和肌糖原含量影响差异性显著 ($P<0.05$), 对水分和灰分含量无显著性影响 ($P>0.05$), 肌肉粗脂肪含量随糖脂比升高呈降低趋势。不同糖脂比对肝粗蛋白、粗脂肪和肝糖原含量影响差异显著 ($P<0.05$), 对水分含量无显著性影响 ($P>0.05$), 肝中粗蛋白和粗脂肪含量随糖脂比升高呈降低趋势, 肝糖原含量趋势与之相反。

表 3-4 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼全鱼成分、肌成分、肝成分的影响

Tab.3-4 Effects of different CHO:L on compositions of whole body,muscle and hepar in juvenil

Acipenser dabryanus(n=9)

项目	糖脂比 CHO:L					
items	0.29	0.87	1.77	2.93	5.82	12.09
全鱼 whole body (%)						
水分 moisture	85.34±0.12 ^a	84.70±0.26 ^{ab}	83.92±0.87 ^{ab}	83.11±0.64 ^{bc}	81.81±0.45 ^c	81.81±0.30 ^c
粗蛋白 crude protein	9.63±0.07	10.07±0.12	10.69±0.02	11.30±0.08	11.32±0.10	11.66±0.31
粗脂肪 crude lipid	2.57±0.05 ^b	2.94±0.01 ^a	2.36±0.07 ^c	1.95±0.04 ^d	1.99±0.02 ^d	1.86±0.06 ^d
灰分 ash	2.35±0.01	1.86±0.02	2.08±0.03	1.84±0.02	1.95±0.02	1.98±0.05
肌肉 muscle (%)						
水分 moisture	81.79±0.70	81.74±1.21	81.73±1.00	81.67±0.33	80.75±0.30	80.55±0.42
粗蛋白 crude protein	13.61±0.07 ^c	14.6±0.08 ^a	14.33±0.06 ^b	14.30±0.05 ^b	14.24±0.01 ^b	14.26±0.07 ^b
粗脂肪 crude lipid	3.76±0.02 ^a	3.45±0.02 ^b	2.99±0.07 ^c	2.64±0.08 ^d	2.61±0.02 ^d	2.63±0.08 ^d
灰分 ash	0.95±0.00	0.98±0.01	1.03±0.01	1.00±0.04	1.05±0.01	0.99±0.05
肌糖原	1.32±0.05 ^d	1.78±0.06 ^c	1.69±0.07 ^{cd}	2.57±0.16 ^b	2.95±0.06 ^b	3.46±0.24 ^a
muscle glycogen/(mg.g ⁻¹)						
肝 hepar (%)						
水分 moisture	68.60±0.81	68.68±1.20	68.72±0.02	69.63±0.45	70.34±0.31	70.84±0.02
粗蛋白 crude protein	11.47±0.27 ^a	11.45±0.32 ^a	11.42±0.23 ^a	10.85±0.20 ^a	8.91±0.30 ^b	8.69±0.14 ^b
粗脂肪 crude lipid	15.16±0.29 ^a	14.35±0.00 ^{ab}	14.13±0.25 ^b	10.84±0.16 ^c	10.11±0.22 ^c	8.95±0.41 ^d
肝糖原	13.75±0.58 ^d	18.57±1.30 ^d	30.31±1.56 ^c	27.54±1.55 ^c	54.03±3.98 ^b	82.33±4.81 ^a
hepatic glycogen/(mg.g ⁻¹)						

注：同行不同糖脂比组数据肩标不同小写字母表示组间差异显著（ $P<0.05$ ），肩标无字母或小写字母相同表示差异不显著（ $P>0.05$ ）。

Note: Different small letter superscripts in the same line of different CHO:L group indicate significant effect($P<0.05$), while with no or the same small letter superscripts mean no significant difference($P>0.05$).

2.4 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼肝指标的影响

由表 3-5 可知，达氏鲟幼鱼肝中谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性均随饲料中糖脂比升高呈先降低后升高趋势且受糖脂比影响差异显著（ $P<0.05$ ）。肝中甘油三酯和总胆

固醇含量受糖脂比影响差异不显著 ($P>0.05$)，但表现出降低趋势。

表 3-5 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼肝指标的影响

Tab.3-5 Effects of different CHO:L on hepatic indexes of juvenil *Acipenser dabryanus*($n=9$)

糖脂比	谷丙转氨酶	谷草转氨酶	甘油三酯	总胆固醇
CHO: L	ALT/(U g ⁻¹)	AST/(U g ⁻¹)	TG/(mmol g ⁻¹)	T-CHO(mmol g ⁻¹)
0.29	143.09±3.60 ^a	74.45±4.38 ^a	0.39±0.06	0.13±0.02
0.87	110.45±9.56 ^b	66.86±5.91 ^{ab}	0.39±0.05	0.10±0.02
1.77	99.20±2.43 ^b	65.58±2.22 ^{ab}	0.38±0.08	0.09±0.03
2.93	92.23±8.56 ^b	54.97±5.73 ^b	0.37±0.05	0.08±0.01
5.82	103.61±7.48 ^b	59.92±4.06 ^b	0.36±0.06	0.07±0.02
12.09	104.90±13.30 ^b	66.23±3.50 ^{ab}	0.36±0.02	0.07±0.04

注：同列不同糖脂比组数据肩标不同小写字母表示组间差异显著 ($P<0.05$)，肩标无字母或小写字母相同表示差异不显著 ($P>0.05$)。

Note: Different small letter superscripts in the same column of different CHO:L group indicate a significant effect ($P<0.05$), while with no or the same small letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$).

2.5 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼血清指标的影响

由表 3-6 可知，不同糖脂比对达氏鲟幼鱼血清中葡萄糖和总胆固醇含量影响差异显著 ($P<0.05$)，对血清中甘油三酯含量影响不显著 ($P>0.05$)。血清中葡萄糖含量随糖脂比升高呈升高趋势，总胆固醇含量随糖脂比升高呈降低趋势。

2.6 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼胃和肠道消化酶活性的影响

由表 3-7 可知，不同糖脂比对达氏鲟幼鱼胃蛋白酶、肠脂肪酶和肠淀粉酶活性均有显著性影响 ($P<0.05$)。胃蛋白酶活性随糖脂比升高呈先升高后降低的趋势；肠脂肪酶活性随糖脂比升高呈降低趋势，肠淀粉酶活性则与之相反。

表 3-6 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼血清指标的影响

Tab.3-6 Effects of different CHO:L on serum indexes of juvenil *Acipenser dabryanus*($n=9$);mmol/L

糖脂比	葡萄糖	甘油三酯	总胆固醇
CHO:L	glucose	TG	T-CHO
0.29	1.48 $\pm$ 0.18 ^d	4.68 $\pm$ 1.04 ^a	1.39 $\pm$ 0.12
0.87	2.09 $\pm$ 0.11 ^c	4.30 $\pm$ 0.52 ^{ab}	1.38 $\pm$ 0.28
1.77	2.43 $\pm$ 0.21 ^{bc}	2.87 $\pm$ 0.29 ^{bc}	1.28 $\pm$ 0.11
2.93	2.59 $\pm$ 0.11 ^{abc}	2.87 $\pm$ 0.24 ^{bc}	0.98 $\pm$ 0.12
5.82	2.73 $\pm$ 0.17 ^{ab}	2.43 $\pm$ 0.09 ^c	0.93 $\pm$ 0.19
12.09	3.06 $\pm$ 0.30 ^a	2.32 $\pm$ 0.08 ^c	0.89 $\pm$ 0.06

注：同列不同糖脂比组数据肩标不同小写字母表示组间差异显著 ($P<0.05$)，肩标无字母或小写字母相同表示差异不显著 ($P>0.05$)。

Note: Different small letter superscripts in the same column of different CHO:L group indicate significant effect($P<0.05$), while with no or the same small letter superscripts mean no significant difference($P>0.05$).

表 3-7 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼胃和肠道消化酶活性的影响

Tab.3-7 Effects of different CHO:L on digestive enzyme activities in stomach and intestinal of juvenil

Acipenser dabryanus($n=9$)

糖脂比	胃蛋白酶	肠脂肪酶	肠淀粉酶
CHO: L	pepsin/(U mg ⁻¹)	intestinal amylase/(U g ⁻¹)	intestinal lipase/(U g ⁻¹)
0.29	1.23 $\pm$ 0.16 ^{ab}	19.66 $\pm$ 0.92 ^a	151.23 $\pm$ 30.52 ^c
0.87	1.90 $\pm$ 0.33 ^a	12.99 $\pm$ 1.14 ^b	184.64 $\pm$ 5.48 ^{bc}
1.77	1.90 $\pm$ 0.45 ^a	11.49 $\pm$ 1.46 ^b	187.84 $\pm$ 12.18 ^{bc}
2.93	0.88 $\pm$ 0.10 ^b	10.25 $\pm$ 3.85 ^b	219.52 $\pm$ 45.36 ^{abc}
5.82	0.61 $\pm$ 0.10 ^b	8.36 $\pm$ 1.45 ^b	318.36 $\pm$ 33.10 ^a
12.09	0.55 $\pm$ 0.04 ^b	7.23 $\pm$ 1.13 ^b	270.19 $\pm$ 49.66 ^{ab}

注：同列不同糖脂比组数据肩标不同小写字母表示组间差异显著 ($P<0.05$)，肩标无字母或小写字母相同表示差异不显著 ($P>0.05$)。

Note: Different small letter superscripts in the same column of different CHO:L group indicate significant effect($P<0.05$), while with no or the same small letter superscripts mean no significant difference($P>0.05$) .

2.7 不同糖脂比对达氏鲢幼鱼肝糖代谢关键酶活性的影响

由表 3-8 可知, 不同糖脂比对达氏鲢幼鱼肝中丙酮酸激酶和磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶活性影响差异显著 ($P<0.05$), 对己糖激酶和磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶活性影响差异不显著 ($P>0.05$)。丙酮酸激酶活性随糖脂比升高呈升高趋势, 磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶活性随糖脂比升高而降低。

表 3-8 不同糖脂比对达氏鲢幼鱼肝糖代谢关键酶活性的影响

Tab.3-8 Effects of different CHO:L on hepatic carbohydrate metabolic key enzyme activities of juvenil

<i>Acipenser dabryanus</i> (n=9)				
糖脂比	己糖激酶	丙酮酸激酶	磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶	磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶
CHO:L	HK/(U g ⁻¹)	PK/(U g ⁻¹)	PEPCK/(U mg ⁻¹)	PEPC/(U mg ⁻¹)
0.29	23.37±2.07	13.06±1.77 ^b	11.84±1.53 ^a	8.67±1.07
0.87	24.08±0.62	16.63±2.80 ^{ab}	10.84±1.02 ^b	8.31±0.78
1.77	31.90±5.46	19.16±3.67 ^{ab}	10.66±1.68 ^b	8.93±0.89
2.93	34.94±5.78	21.37±2.70 ^{ab}	9.94±0.63 ^b	9.85±1.12
5.82	37.00±4.18	20.80±1.30 ^{ab}	10.18±0.79 ^b	9.36±1.31
12.09	33.07±3.58	22.69±1.91 ^a	9.75±0.53 ^b	10.45±0.93

注: 同列不同糖脂比组数据肩标不同小写字母表示组间差异显著 ($P<0.05$), 肩标无字母或小写字母相同表示差异不显著 ($P>0.05$)。

Note: Different small letter superscripts in the same column of different CHO:L group indicate significant effect($P<0.05$), while with no or the same small letter superscripts mean no significant difference($P>0.05$).

3 讨论

3.1 不同糖脂比对达氏鲢幼鱼生长性能和饲料利用效率的影响

本试验中对达氏鲢幼鱼投喂 6 种不同糖脂比饲料 8 周后, 达氏鲢幼鱼增重率随糖脂比升高呈先上升后降低的趋势, 饲料效率和蛋白质效率在糖脂比过高和过低时也出现下降趋势, 三者均在糖脂比为 5.82 时达到最大值, 糖脂比为 5.82 和 12.09 两组试验鱼蛋白质效率显著高于其他四组。试验结果表明适宜的饲料中糖脂比可以更好地利用鱼体对糖类和脂肪的协同效应, 从而促进鱼体的生长、提高饲料利用率^[149]。在杂交胡子鲶(*Clarias macrocephalus*×*C. gariepinus*)^[150]、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[151]、长吻鮠(*Leiocassis longirostris* Gunther)^[152]、瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)^[143]、建鲤(*Cyprinus carpio* var. Jian)^[153]、胭脂鱼^[154]等研究中也有类似结果。

达氏鲟幼鱼特定生长率随糖脂比的升高先升高后降低,利用二次回归模型分析得出,最适宜达氏鲟幼鱼生长的糖脂比为 8.01。这一结果高于杂交胡子鲶^[150]、尼罗罗非鱼^[151]、长吻鮠^[152]、瓦氏黄颡鱼^[143]、建鲤^[153]、胭脂鱼^[154] 研究结果中适宜糖脂比。因此,达氏鲟可能比这些鱼类具有更高地糖耐受力。

3.2 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼形态学指标的影响

本试验中饲料中糖脂比对达氏鲟幼鱼肥满度及肝体比有显著影响且均呈先升高后降低趋势。在对尼罗罗非鱼^[151]、建鲤^[153]、黄颡鱼^[155] 的研究结果中肥满度并不随着糖脂比有升高趋势,这可能是达氏鲟对于糖类具有更好地利用能力;而在青鱼和鲫^[31]、杂交胡子鲶^[150]、尼罗罗非鱼^[151]、长吻鮠^[152]、建鲤^[153] 及黄颡鱼^[155] 的研究中肝体比均有随饲料中糖脂比升高而升高的趋势,这可能是由于饲料中糖含量的增加使肝中肝糖原含量升高进而造成肝体比增大^[39]。不同糖脂比对达氏鲟幼鱼脏体比无显著影响,该结果与瓦氏黄颡鱼^[143]、建鲤^[153]、黄颡鱼^[155] 研究结果相同。

3.3 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼全鱼成分、肌成分、肝成分的影响

大量研究表明饲料中脂肪含量是影响鱼体脂肪含量的重要因素,随着饲料中脂肪含量的升高鱼体脂肪沉积增加^[156]。本试验中随着糖脂比的升高饲料中脂肪含量降低,达氏鲟幼鱼全鱼、肌肉及肝脏脂肪含量均降低且差异性显著。类似的结果出现在杂交胡子鲶^[150]、尼罗罗非鱼^[151]、长吻鮠^[152]、瓦氏黄颡鱼^[143]、建鲤^[153] 的研究中。本试验中全鱼水分随糖脂比升高而降低,这与尼罗罗非鱼^[151] 和长吻鮠^[152] 中研究结果相同,但瓦氏黄颡鱼^[143] 和建鲤^[153] 的研究结果与之相反。

肝糖原在鱼体在应激时可以很容易被分解或合成,从而造成肝糖原含量的降低或升高^[157]。本试验中达氏鲟幼鱼肝糖原和肌糖原含量均随糖脂比升高而显著增加,这可能是饲料中较高的糖水平造成的鱼体应激反应,而肌糖原的升高表明达氏鲟可以将葡萄糖做为能源物质储存在肌肉中。

3.4 不同糖脂比对达氏鲟幼鱼肝及血清指标的影响

作为衡量肝功能的主要指标,本试验中不同糖脂比对达氏鲟幼鱼肝谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性影响差异显著。糖脂比为 0.29 时两种酶活性最高,然而该组试验鱼肝糖原含量最低且不同糖脂比对肝甘油三酯和总胆固醇含量无显著性影响,关于达氏鲟幼鱼肝功能是否受到损伤还有待进一步探究。

已有研究表明鱼类糖代谢酶适应性调节能力较差,鱼体在摄食高糖饲料时引起血糖含量持续偏高^[158]。本试验中血清中葡萄糖含量随糖脂比升高而升高与上文中肝糖原趋势相同,因此血清中葡萄糖的升高可能是造成肝糖原沉积的重要原因。血清中甘

油三酯和总胆固醇含量均随糖脂比的升高脂肪含量降低呈降低趋势，这可能是由于饲料中脂肪含量降低使鱼体消化吸收的游离脂肪酸减少，进而肝脏合成及转运到血液中甘油三酯和总胆固醇减少^[158]，同时表明达氏鲢体内脂肪沉积主要来自饲料中脂肪，这也与本试验中达氏鲢全鱼、肌肉和肝脏脂肪含量结果一致。类似的结果也出现在建鲤^[153]、瓦氏黄颡鱼^[143]、军曹鱼^[159]和黄鳍鲷(*Sparus latus*)^[160]中。

3.5 不同糖脂比对达氏鲢幼鱼胃和肠道消化酶活性的影响

消化酶活性是影响鱼体消化机能的重要指标，饲料中营养成分的不同影响消化酶的活性^[161]。向泉等对翘嘴红鲌^[162]和王爱民等^[163]对异育银鲫的研究发现饲料脂肪水平升高对蛋白酶活性有促进作用，当脂肪水平持续升高又对蛋白酶活性有抑制作用，本试验中胃蛋白酶活性随糖脂比升高呈先升高后降低的趋势，在糖脂比为 0.87 和 1.77 时活性最高。

不同鱼类的脂肪酶活性受饲料中脂肪水平影响有所差别。王丽娜^[155]在对黄颡鱼的研究中发现，黄颡鱼脂肪酶与饲料中脂肪水平呈正相关。刘襄河等^[164]对暗纹东方鲀及朱卫^[165]对点菜篮子鱼的研究结果表明脂肪酶活性随饲料脂肪水平升高呈先升高后降低的趋势。韩光明等^[166]对吉富罗非鱼的研究也认为高脂饲料对鱼脂肪酶活性产生抑制。本试验中达氏鲢肠道脂肪酶活性随饲料中糖脂比升高脂肪含量降低呈先降低趋势，这可能是试验中糖脂比为 0.29 时饲料中脂肪仍未达到抑制脂肪酶活性的含量。

本试验中达氏鲢肠道淀粉酶活性随糖脂比升高呈先上升后降低的趋势，这表明适宜的饲料糖含量可以促进肠道淀粉酶的合成和分泌，在糖脂比为 5.82 时肠道淀粉酶活性最高，这可能是达氏鲢肠道淀粉酶及对糖消化能力在饲料中糖水平尾 24.46% 时接近饱和。这一结果与瓦氏黄颡鱼^[155]、暗纹东方鲀^[164]的研究结果相似。

3.6 不同糖脂比对达氏鲢幼鱼肝糖代谢关键酶活性的影响

己糖激酶和丙酮酸激酶是催化糖酵解中葡萄糖磷酸化生成葡糖-6-磷酸和磷酸烯醇式丙酮酸生成丙酮酸过程的限速酶，两种限速酶参与的反应均为糖酵解过程中不可逆反应。本试验中肝己糖激酶和丙酮酸激酶活性均随饲料中糖含量的升高呈升高趋势，这说明饲料中糖含量的升高可以增加肝己糖激酶和丙酮酸激酶活性促进糖酵解过程从而增强达氏鲢对糖的利用能力。在青鱼和鲫^[31]、翘嘴红鲌^[146]、虹鳟^[167]、建鲤^[153]、大黄鱼^[168]的研究中也表明饲料中糖含量的升高可以增加己糖激酶和丙酮酸激酶活性。但在胭脂鱼^[145]、瓦氏黄颡鱼^[143]和暗纹东方鲀^[164]的研究中己糖激酶和丙酮酸激酶活性不随饲料糖含量升高而增加，这可能是因为不同鱼种类及饲料中糖含量的不同造成的。

磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶是糖异生过程丙酮酸羧化支路中完成丙酮酸生成磷酸烯醇式丙酮酸的限速酶。在胭脂鱼^[145]、翘嘴红鲌^[146]、暗纹东方鲀^[164]和吉富罗非鱼^[169]的研究中均发现随着饲料中糖含量增高磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶活性呈降低趋势,本试验研究结果与之相似,这可能是高糖饲料对鱼体糖异生过程产生抑制作用。磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶是催化糖异生产生的磷酸式丙酮酸生成草酰乙酸的限速酶,在三羧酸循环的回补反应中有重要作用^[140],本试验中磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶活性受糖脂比影响不显著,这与糖源试验中结果相似,关于饲料中成分对达氏鲟磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶活性是否有影响还有待进一步研究。

4 小结

本试验的结果表明,在饲料糖脂比为 5.82 和 12.09 两个试验组中达氏鲟幼鱼增重率和特定生长率显著高于其他各组,糖脂比为 5.82 的试验组达氏鲟幼鱼饲料效率最高,以特定生长率为评价指标经回归分析得出达氏鲟幼鱼生长最适宜的饲料糖脂比为 8.01。

全文总结及展望

全文总结

1、以生长性能为评价指标，玉米淀粉和 α -淀粉对达氏鲟幼鱼促生长作用最好，糊精、小麦淀粉和蔗糖次之，葡萄糖不利用达氏鲟幼鱼生长。糊精和葡萄糖组全鱼和肌肉中脂肪含量较高不利于达氏鲟鱼体蛋白质积累。蔗糖和葡萄糖组试验鱼肝受到损伤使达氏鲟幼鱼免疫能力降低。

2、试验表明饲料中适宜的糖脂比可以促进达氏鲟幼鱼的生长，饲料糖脂比为 5.82 试验组达氏鲟幼鱼增重率、特定生长率、饲料效率和蛋白质效率高于其他各组。糖脂比升高有利于达氏鲟幼鱼全鱼蛋白质含量增加。糖脂比对达氏鲟幼鱼糖代谢酶有显著影响，达氏鲟幼鱼可通过增强糖酵解及减弱糖异生等糖代谢过程来适应糖脂比升高。

展望

鲟鱼（*Acipenseriformes*）属世界性保护物种^[170]。近十几年来，在攻克亲鱼培育、全人工繁殖、幼鱼人工饲料驯化等关键性技术前提下，中国鲟鱼产业取得了快速发展。拉动市场需求加大人工养殖规模不仅不失为鲟鱼资源保护与利用的重要方法，也是商业性养殖的必然趋势。在养殖的过程中探索鲟鱼营养需求显得尤为重要，然而现有有关鲟鱼营养需求和饲料的研究仅限于部分幼鱼和商品鱼，缺乏系统的营养资料，对单一种类的研究也不够深入、系统。

通过本试验中获得的结论，参照对中华鲟^[25]、施氏鲟^[47]、高首鲟^[48]、杂交鲟^[132]等已有的研究发现多数结果表明大分子糖类更有利于鲟鱼的生长。同时本试验饲料中适宜达氏鲟生长的糖脂比明显高于其他鱼类。

将以上结果以及其他营养物质在今后的鲟鱼营养研究中进行更深入系统的研究，建立鲟鱼营养参数的公共平台，从而为鲟鱼饲料企业作为设计配方的科学依据，将为鲟鱼产业更好更快地发展提供保证。

参考文献

- [1] 农业部渔业渔政管理局.2016 中国渔业统计年鉴[M].北京: 中国农业出版社, 2016.
- [2] 陈人弼. 中国水产配合饲料工业发展现状与前景分析[J]. 中国饲料, 2012 (23): 43-45.
- [3] 解绶启, 张文兵, 韩冬, 等. 水产养殖动物营养与饲料工程发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2016, 18(3):29-36.
- [4] 林浩然.鱼类生理学[M].广州:广东高等教育出版社,2007:10-11.
- [5] Takeuchi T, Watanabe T, Ogino C. Optimum ratio of dietary energy to protein for carp[J]. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 1978, 45:983-987.
- [6] 四川省长江水产资源调查组著. 长江鲟鱼类生物学及人工繁殖[M]. 成都: 四川科学技术出版社,1988.
- [7] 麦康森.水产动物营养与饲料学[M].北京:中国农业出版社,2011:28-34.
- [8] Ogino C, Saito K. Protein nutrition in fish: The utilization of dietary protein by young carp [J]. Bull.Jap.Soc.Sci.Fisher.1970,38:250-254.
- [9] Kim K I, Kayes T B, Amundson C H. Purified diet development and re-evaluation of the dietary protein requirement of fingerling rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Aquaculture, 1990, 96(1):57-67.
- [10] Shiau S Y, Lan C W. Optimum dietary protein level and protein to energy ratio for growth of grouper (*Epinephelus malabaricus*) [J]. Aquaculture, 1996, 145:259-266.
- [11] 林鼎, 毛永庆, 蔡发盛. 鲢鱼 (*Ctenopharyngodon idellus*) 鱼种生长阶段蛋白质最适需要量的研究[J]. 水生生物学报, 1980, 4(2):207-212.
- [12] Watanabe T, Takeuchi T, Ogino C. Effect of dietary methyl linoleate and linolenate on growth of carp[J]. Nihon-suisan-gakkai-shi, 1975, 41(41):263-269.
- [13] Lusm L, Eduardo D, MariAteresa V, et al. Effect of dietary lipid levels on performance, body composition and fatty acid profile of juvenile white seabass, *Atractoscion nobilis* [J]. Aquaculture, 2009, 289(1-2):101-105.
- [14] 王道尊, 龚希章, 刘玉芳. 饲料中脂肪的含量对青鱼鱼种生长的影响[J]. 水产学报, 1987, 11(1):23-28.
- [15] Wilson R P. Channel catfish, *Ictalurus punctatus*. In: Wlson R R (Editor), Handbook of Nutrient Requirements of Finfish [M], CRC Press, Boca Raton,n, 1991, 35-53.
- [16] NRC (National Research Council). Nutrient Requirements of Fish [M]. Washington, DC: National Academy Press. 1993,124.

- [17] 付世建, 谢小军. 饲料碳水化合物水平对南方鲇生长的影响[J]. 水生生物学报, 2005, 29(4):393-398.
- [18] Aoe H, Masuda I, Mimura T, et al. Requirement of Young Carp for Vitamin A[J]. Nihon-suisan-gakkai-shi, 1968, 34(10):959-964.
- [19] Hamre K, Ø Lie. Minimum requirement of vitamin E for Atlantic salmon, *Salmo salar* L. at first feeding[J]. Aquaculture Research, 2008, 26(3):175-184.
- [20] 蒋明. 草鱼幼鱼对维生素 A、D 和 K 需要量的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.
- [21] Robinson E H, Labomascus D, Brown P B, et al. Dietary calcium and phosphorus requirements of *Oreochromis aureus*, reared in calcium-free water[J]. Aquaculture, 1987, 64(4):267-276.
- [22] Shearer K D. Dietary potassium requirement of juvenile chinook salmon[J]. Aquaculture, 1988, 73(1-4):119-129.
- [23] 梁键钧. 草鱼幼鱼的矿物质营养研究[D]. 广州: 中山大学, 2012.
- [24] 蔡春芳, 陈立侨. 鱼类对糖的利用评述[J]. 水生生物学报, 2006, 30(5):608-613.
- [25] 周俊. 糖对中华鲢幼鱼生长影响的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.
- [26] Wilson R P. Review: Utilization of dietary carbohydrate by fish[J]. Aquaculture, 1994, 124(1-4): 67-80.
- [27] Vielma J, Koskela J, Ruohonen K, et al. Optimal diet composition or European white fish (*Coregonus lavaretus*): carbohydrate stress and immune parameter responses[J]. Aquaculture, 2003, 225(1): 3-16.
- [28] Fynn-Aikins K, Hung S S O, Liu W, et al. Growth, Lipogenesis and liver composition of juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) fed different carbohydrate levels of D-Glucose[J]. Aquaculture, 1992, 105(1):61-72.
- [29] Phillips, A.M.Jr, Tunison, A.V. & Brockway, R. Utilization of carbohydrates by trout. Fish[J]. Res. Bull. 1948, 11, 3-44.
- [30] Cowey C B, Knox D, Walton M J, et al. The regulation of gluconeogenesis by diet and insulin in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). [J]. British Journal of Nutrition, 1977, 38(3):463-470.
- [31] 蔡春芳. 青鱼(*Mylopharyngodon piceus* Richardson)和鲫(*Carassius auratus*)对饲料糖的利用及其代谢机制的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2004.
- [32] Borrebaek B, Christophersen B. Hepatic glucose phosphorylating activities in perch (*Perca fluviatilis*) after different dietary treatments. [J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part B Biochemistry & Molecular Biology, 2000, 125(3):387.
- [33] Panserat S, Médale F, Bréque J, et al. Lack of significant long-term effect of dietary carbohydrates on hepatic glucose-6-phosphatase expression in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Journal

- of Nutritional Biochemistry, 2000, 11(1):22-29.
- [34] Panserat S, Plagnesjuan E, Kaushik S. Gluconeogenic enzyme gene expression is decreased by dietary carbohydrates in common carp (*Cyprinus carpio*) and gilthead seabream (*Sparus aurata*).[J]. Biochimica et biophysica acta, 2002, 1579(1):35.
- [35] 王广宇, 刘波, 谢骏, 等. 鱼类糖代谢几种关键酶的研究进展[J]. 上海海洋大学学报, 2008, 17(3):377-383.
- [36] 蔡春芳, 陈立侨. 鱼类对糖的代谢[J]. 水生生物学报, 2008, 32(4):592-597.
- [37] Boonyaratpalin M. Asian sea bass, *Lates calcarifer*. In: R.P. Wilson (Editor), Handbook of Nutrient Requirements of Finfish [M], CRC Press, Boca Raton, FL, 1991, pp. 5-11.
- [38] National Research Council (U.S.). Subcommittee on Coldwater Fish Nutrition. Nutrient requirements of coldwater fishes[J]. 1981.
- [39] Cowey C B, Adron J W, Brown D A. Studies on the nutrition of marine flatfish. The metabolism of glucose by plaice (*Pleuronectes platessa*) and the effect of dietary energy source on protein utilization in plaice.[J]. British Journal of Nutrition, 1975, 33(2):219.
- [40] Helland S, Storebakken T, Grisdale H B, et al. Atlantic salmon, *Salmo solar*. In: R.P. Wilson (Editor), Handbook of Nutrient Requirements of Finfish [M], CRC Press, Boca Raton, FL, 1991, pp. 13-22.
- [41] Satoh S. Common carp, *Cyprinus carpio*. In: Wilson R P. (Editor), Handbook of Nutrient Requirements of Finfish [M], CRC Press, Boca Raton, FL, 1991, pp. 55-67.
- [42] Lin D. Grass carp, *Ctenophuryngodon ideilu*. In: Wilson R P. (Editor), Handbook of Nutrient Requirements of Finfish [M], CRC Press, Boca Raton, FL, 1991, pp. 89-96.
- [43] Luquet P. Tilapia, *Oreochromis* spp. In: Wilson R P. (Editor), Handbook of Nutrient Requirements of Finfish [M], CRC Press, Boca Raton, FL, 1991, pp. 169-179.
- [44] 蔡春芳, 王永玲, 陈立侨, 等. 饲料糖种类和水平对青鱼、鲫生长和体成分的影响[J]. 中国水产科学, 2006, 13(3):452-459.
- [45] Buhler D R. Nutrition of salmonoid fishes. 9. Carbohydrate requirements of Chinook salmon.[J]. Journal of Nutrition, 1961.
- [46] Hung S S, Fynnaikins F K, Lutes P B, et al. Ability of juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) to utilize different carbohydrate sources.[J]. Journal of Nutrition, 1989, 119(5):727.
- [47] Jiang M, Liu W, Wen H, et al. Effect of dietary carbohydrate sources on the growth performance, feed utilization, muscle composition, postprandial glycemic and glycogen response of Amur sturgeon, *Acipenser schrenckii* Brandt, 1869[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2015, 30(6):1613-1619.

- [48] Deng D F, Hemre G I, Trond S, et al. Utilization of diets with hydrolyzed potato starch, or glucose by juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*), as affected by Maillard reaction during feed processing[J]. Aquaculture, 2005, 248: 103-109.
- [49] Bergot F. Carbohydrate in rainbow trout diets: Effects of the level and source of carbohydrate and the number of meals on growth and body composition[J]. Aquaculture, 1979, 18(2):157-167.
- [50] Legate N J, Bonen A, Moon T W. Glucose tolerance and peripheral glucose utilization in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), American eel (*Anguilla rostrata*), and black bullhead catfish (*Ameiurus melas*).[J]. General & Comparative Endocrinology, 2001, 122(1):48-59.
- [51] Hemre G I, Hansen T. Utilisation of different dietary starch sources and tolerance to glucose loading in Atlantic salmon (*Salmo salar*), during parr- smolt transformation.[J]. Aquaculture, 1998, 161(1-4):145-157.
- [52] 罗毅平. 肉食性鱼类南方鲇对饲料碳水化合物营养胁迫的生理生态学反应[D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- [53] Murai T, Akiyama T, Nose T. Effects of glucose chain length of various carbohydrates and frequency of feeding on their utilization by fingerling carp.[J]. Nihon-suisan-gakkai-shi, 1983, 49(10):1607-1611.
- [54] Tung P H, Shiau S Y. Effects of meal frequency on growth performance of hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. aureus*, fed different carbohydrate diets[J]. Aquaculture, 1991, 92(4):343-350.
- [55] 程汉良, 夏德全, 吴婷婷. 鱼类脂类代谢调控与脂肪肝[J]. 动物营养学报, 2006, 18(4):294-298.
- [56] Leng X J, X. F. W U, Tian J, et al. Molecular cloning of fatty acid synthase from grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) and the regulation of its expression by dietary fat level[J]. Aquaculture Nutrition, 2012, 18(5):551-558.
- [57] Cook H W, McMaster R C R. Fatty acid desaturation and chain elongation in eukaryotes[M]. Vance JE, Vance D E. Biochemistry of Lipids, Lipoproteins and Membranes. 4th ed. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- [58] Jakobsson A, Westerberg R, Jacobsson A. Fatty acid elongases in mammals: Their regulation and roles in metabolism[J]. Progress in Lipid Research, 2006, 45(3):237-249.
- [59] Zhang D, Lu K, Dong Z, et al. The Effect of Exposure to a High-Fat Diet on MicroRNA Expression in the Liver of Blunt Snout Bream (*Megalobrama amblycephala*)[J]. Plos One, 2014, 9(5):e96132.
- [60] Zheng J L, Luo Z, Zhuo M Q, et al. Dietary L-carnitine supplementation increases lipid deposition in the liver and muscle of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) through changes in lipid metabolism.[J]. British Journal of Nutrition, 2014, 112(5):698-708.

- [61] Lu K L, Xu W N, Wang L N, et al. Hepatic β -Oxidation and Regulation of Carnitine Palmitoyltransferase (CPT) I in Blunt Snout Bream *Megalobrama amblycephala* Fed a High Fat Diet[J]. Plos One, 2014, 9(3):e93135.
- [62] Ruyter B, Andersen O, Dehli A, et al. Peroxisome proliferator activated receptors in Atlantic salmon (*Salmo salar*): effects on PPAR transcription and acyl-CoA oxidase activity in hepatocytes by peroxisome proliferators and fatty acids.[J]. Biochimica Et Biophysica Acta, 1997, 1348(3):331-338.
- [63] Qi C, Zhu Y, Reddy J K, et al. Peroxisome proliferator-activated receptors, coactivators, and downstream targets[J]. Cell Biochemistry and Biophysics, 2000, 32 Spring(1):187.
- [64] Kliewer S A, Xu H E, Lambert M H, et al. Peroxisome proliferator-activated receptors: from genes to physiology.[J]. Recent Prog Horm Res, 2001, 56(1):239.
- [65] Ji H, Li J, Liu P. Regulation of growth performance and lipid metabolism by dietary n-3 highly unsaturated fatty acids in juvenile grass carp, *Ctenopharyngodon idellus*. [J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part B, 2011, 159(1):49-56.
- [66] Lu K L, Xu W N, Li X F, et al. Hepatic triacylglycerol secretion, lipid transport and tissue lipid uptake in blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*) fed high-fat diet[J]. Aquaculture, 2013, s 408–409(9):160-168.
- [67] 王庆萍, 方春林. 鱼类脂肪需求研究概述[J]. 江西水产科技, 2010(4):7-9.
- [68] 雍文岳, 黄忠志, 廖朝兴, 等. 饲料中脂肪含量对草鱼生长的影响[J]. 淡水渔业, 1985(6):11-14.
- [69] Du Z Y, Liu Y J, Tian L X, et al. Effect of dietary lipid level on growth, feed utilization and body composition by juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). [J]. Aquaculture Nutrition, 2005, 11(2):139-146.
- [70] 段彪, 向泉, 周兴华, 等. 齐口裂腹鱼饲料中适宜脂肪需要量的研究[J]. 动物营养学报, 2007, 19(3):232-236.
- [71] 朱婷婷. 俄罗斯鲟幼鱼适宜饲料脂肪源和脂肪水平的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [72] 韩庆, 田宗城, 夏维福, 等. 黄颡鱼饲料脂肪的最适含量[J]. 水产科学, 2005, 24(7):8-11.
- [73] 刘匆. 南方鲇和鲶的蛋白质、脂肪营养生理研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [74] 张红娟, 陈秀玲, 张瑞玲, 等. 海水鱼对脂肪的需求及脂肪源替代研究进展[J]. 水产科学, 2015, 34(2):122-127.
- [75] 赵文. 日本鳗鲡的营养研究进展[J]. 饲料博览, 1996(6):36-37.
- [76] Turchini G M, Mentasti T, Froyland L, et al. Effects of alternative dietary lipid sources on performance, tissue chemical composition, mitochondrial fatty acid oxidation capabilities and

- sensory characteristics in brown trout (*Salmo trutta L.*).[J]. Aquaculture, 2003, 225(1–4):251-267.
- [77] 王煜恒, 王爱民, 刘文斌, 等. 不同脂肪源对异育银鲫鱼种生长、消化率及体成分的影响[J]. 水产学报, 2010, 34(9):1439-1446.
- [78] 潘瑜, 毛述宏, 关勇, 等. 饲料中不同脂肪源对鲤鱼生长性能、脂质代谢和抗氧化能力的影响[J]. 动物营养学报, 2012, 24(7):1368-1375.
- [79] Huang C H, Huangb M C, Houb P C. Effect of dietary lipids on fatty acid composition and lipid peroxidation in sarcoplasmic reticulum of hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* x *O-aureus*[J]. Comparative Biochemistry & Physiology B Comparative Biochemistry, 1998, 120(2):331-336.
- [80] Raso S, Anderson T A. Effect of dietary fish oil replacement on growth and carcass proximate composition of juvenile barramundi, (*Lates calcarifer*).[J]. Aquaculture Research, 2003, 34(10):813-819.
- [81] Ng W K, Tee M C, Boey P L. Evaluation of crude palm oil and refined palm olein as dietary lipids in pelleted feeds for a tropical bagrid catfish *Mystus nemurus* (Cuvier & Valenciennes).[J]. Aquaculture Research, 2000, 31(31):337-347.
- [82] Daniels W H, Robinson E H. Protein and energy requirements of juvenile red drum (*Sciaenops ocellatus*) [J]. Aquaculture, 1986, 53(3):243-252.
- [83] Ellis S C, Reigh R C. Effects of dietary lipid and carbohydrate levels on growth and body composition of juvenile red drum, *Sciaenops ocellatus*[J]. Aquaculture, 1991, 97(4):383-394.
- [84] Regost C, Arzel J, Cardinal M, et al. Dietary lipid level, hepatic lipogenesis and flesh quality in turbot (*Psetta maxima*).[J]. Aquaculture, 2001, 193(3–4):291-309.
- [85] Tainaka T, Shimada Y, Kuroyanagi J, et al. Transcriptome analysis of anti-fatty liver action by Campari tomato using a zebrafish diet-induced obesity model[J]. Nutrition & Metabolism, 2011, 8(1):88.
- [86] 王爱民, 杨文平, 於叶兵, 等. 不同脂肪含量饲料对吉富罗非鱼鱼种生长性能、脂蛋白脂酶活性及其基因表达的影响[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(2):96-102.
- [87] 谢帝芝, 王树启, 游翠红, 等. 鱼类高度不饱和脂肪酸合成的影响因素及其机理[J]. 中国水产科学, 2013, 20(2):456-466.
- [88] Bell J G, Mcevoy J, Tocher D R, et al. Depletion of α -tocopherol and astaxanthin in Atlantic salmon (*Salmo salar*) affects autoxidative defense and fatty acid metabolism.[J]. Journal of Nutrition, 2000, 130(7):1800-1808.
- [89] 许治冲. 不同温度下松浦镜鲤幼鱼脂肪需求量的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- [90] 房景辉, 田相利, 董双林, 等. 温度对半滑舌鳎的生长、生化组成和能量收支的影响[J]. 中国海洋大学学报自然科学版, 2010, 40(1):25-30.

- [91] Sargent J R, Henderson R J, Tocher D R. The lipids[J]. Elsevier, 2002.
- [92] Sheridan M A, Allen W V, Kerstetter T H. Changes in the fatty acid composition of steelhead trout(*Salmo gairdnerii* Richardson) associated with parr-smolt transformation[J]. Comparative Biochemistry & Physiology B Comparative Biochemistry, 1985, 80(4):671-676.
- [93] Li H O, Yamada J. Changes of the fatty acid composition in smolts of masu salmon (*Oncorhynchus masou*), associated with desmoltification and sea-water transfer[J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part A Physiology, 1992, 103(1):221-226.
- [94] Moore B J, Hung S S O, Medrano J F. Protein requirement of hatchery-produced juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*)[J]. Aquaculture, 1989, 71(3):235-245.
- [95] Kaushik S J, Breque J, Blanc D. Requirements for protein and essential amino acids and their utilization by Siberian sturgeon (*Acipenser baeri*) [A].Williot P. Proceeding of the First International Symposium on the Sturgeon[C]. Cemagref France, 1991:25-39.
- [96] 肖慧, 王京树, 文志豪. 中华鲟幼鱼饲料营养素适宜含量的研究[J]. 中国水产科学, 1999, 6(4):33-38.
- [97] 邢西谋. 饲料蛋白质水平对俄罗斯鲟幼鲟生长的影响[J]. 淡水渔业, 2003, 33(4):14-16.
- [98] Guo Z, Zhu X, Liu J, et al. Effects of dietary protein level on growth performance, nitrogen and energy budget of juvenile hybrid sturgeon, *Acipenser baerii* ♀×*A. gueldenstaedtii* ♂[J]. Aquaculture, 2012, 338–341:89-95.
- [99] Stuart J S, Hung S S O. Growth of juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) fed different proteins[J]. Aquaculture, 1989, 76(3–4):303-316.
- [100] 刘伟. 中华鲟幼鱼饲料中适宜替代鱼粉蛋白源和脂肪源研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [101] Guo Z, Zhu X, Liu J, et al. Dietary lipid requirement of juvenile hybrid sturgeon, *Acipenser baerii*♀×*A.gueldenstaedtii*♂[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2011, 27(2):743-748.
- [102] 邱岭泉, 张永旺. 饲料中添加不同含量脂肪对俄罗斯鲟(*Acipenser gredlenstedti* Brandt)稚鱼生长的影响[J]. 水产学杂志, 2001, 14(2):57-60.
- [103] 侯俊利. 施氏鲟(*Acipenser schrenckii*)幼鱼对盐度的适应性及其脂肪营养需求研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2006.
- [104] Mohseni M, Sajjadi M, Pourkazemi M. Growth performance and body composition of sub-yearling Persian sturgeon, (*Acipenser persicus*, Borodin, 1897), fed different dietary protein and lipid levels[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2007, 23(3):204-208.
- [105] Hung S S O, Storebakken T, Cui Y, et al. High - energy diets for white sturgeon, *Acipenser transmontanus* Richardson[J]. Aquaculture Nutrition, 2003, 3(4):281-286.
- [106] Xu R, Hung S S, German J B. White sturgeon tissue fatty acid compositions are affected by dietary

- lipids.[J]. Journal of Nutrition, 1993, 123(10):1685-1692.
- [107] Mark A. Herold, Silas S. O. Hung, Kofi Fynn-Aikins. Apparent Digestibility Coefficients of Carbohydrates for White Sturgeon[J]. North American Journal of Aquaculture, 1995, 57(2):137-140.
- [108] Lin J H, Cui Y, Hung S S O, et al. Effect of feeding strategy and carbohydrate source on carbohydrate utilization by white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) and hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus*, X *O. aureus*) [J]. Aquaculture, 1997, 148(2-3):201-211.
- [109] 郭文英. α-淀粉水平及不同淀粉类型对西伯利亚鲟幼鱼摄食生长和能量收支的影响[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2010.
- [110] Moreau R, Kaushik S J, Dabrowski K. Ascorbic acid status as affected by dietary treatment in the Siberian sturgeon (*Acipenser baeri* Brandt): tissue concentration, mobilisation and L-gulonolactone oxidase activity.[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 1996, 15(5):431-438.
- [111] 高强. 两种鲟鱼幼鱼维生素 A、C 和 E 营养需要研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005.
- [112] 文华. 施氏鲟幼鱼对饲料中部分营养素的需求与利用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [113] Hung Silas S O, Deng Dong- Fang. Sturgeon, *Acipenser* spp. Webster C D, Lim C E. (ed.) Nutrient Requirements and Feeding of Finfish for Aquaculture[M]. CABI Publishing, 2002: 344-357.
- [114] Xu Q Y, Xu H, Wang C, et al. Studies on dietary phosphorus requirement of juvenile Siberian sturgeon *Acipenser baerii* [J]. Journal of Applied Ichthyology, 2011, 27(2):709-714.
- [115] Zhang H, Wei Q W, Du H, et al. Present status and risk for extinction of the Dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus*) in the Yangtze River watershed: a concern for intensified rehabilitation needs[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2011, 27(2):181-185.
- [116] 刘涛. 达氏鲟子二代全人工繁殖首获成功[J]. 水产科技情报, 2007, 34(3): 139.
- [117] 龚全, 刘亚, 杜军, 等. 达氏鲟全人工繁殖技术研究[J]. 西南农业学报, 2013, 26(4):1710-1714.
- [118] 史玲玲, 危起伟, 柴毅, 等. 达氏鲟视网膜早期发育及其相关机能[J]. 中国水产科学, 2013, 20(5): 958-967.
- [119] Zhang S H, Luo H, Du H, et al. Isolation and characterization of twenty-six microsatelliteloci for the tetraploid fish Dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus*) [J]. Conserv Genet Resour, 2013, 5(2): 409-412.
- [120] 陈春娜, 黄颖颖, 陈先均, 等. 达氏鲟精子的主要生物学特性[J]. 动物学杂志, 2015, 50(1):75-87.
- [121] 颌璇, 厉萍, 席萌丹, 等. 达氏鲟精巢细胞消化分离和超低温冷冻保存[J]. 淡水渔业, 2016, 46(5):19-24.
- [122] 龚全, 刘亚, 赖见生, 等. 不同开口饵料对达氏鲟鱼苗生长的影响[J]. 西南农业学报, 2015,

- 28(5): 2297-2300.
- [123] 李庆飞, 王京, 杨元金, 等. 达氏鲟幼鱼对饲料中蛋白需求量的研究[A]. 三峡地区特色渔业发展论坛论文集[C]. 重庆: [s.n.], 2012: 173-180.
- [124] 张磊. 达氏鲟幼鱼对蛋白质和脂肪需要量的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [125] 陈细华. 鲟形目鱼类生物学与资源现状[M]. 青岛: 海洋出版社, 2007.
- [126] Zhuang P, Ke F, Wei Q W, et al. Biology and life history of Dabry's sturgeon, *Acipenser dabryanus*, in the Yangtze River[J]. Environ Biol Fish, 1996, 48(1-4): 257-264.
- [127] 乐佩, 陈宜瑜. 中国濒危动物红皮书(鱼类)[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 170-171.
- [128] Rosenlund G, Karlsen Ø, Tveit K, et al. Effect of feed composition and feeding frequency on growth, feed utilization and nutrient retention in juvenile Atlantic cod, *Gadus morhua* L[J]. Aquacult Nutr, 2004, 10(6): 371-378.
- [129] Cui X J, Zhou Q C, Liang H O, et al. Effects of dietary carbohydrate sources on the growth performance and hepatic carbohydrate metabolic enzyme activities of juvenile cobia (*Rachycentron canadum* Linnaeus.)[J]. Aquac Res, 2010, 42(1):99-107.
- [130] Ren M C, Habte-Tsion H, Xie J, et al. Effects of dietary carbohydrate source on growth performance diet digestibility and liver glucose enzyme activity in blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala*[J]. Aquaculture, 2015, 438: 75-81.
- [131] 吴彬, 彭淇, 陈斌, 等. 日粮中不同糖源对吉富罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 稚鱼养殖效果与机理研究[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(4): 1050-1055.
- [132] 宋娇, 姜海波, 姜志强, 等. 饲料中不同糖源对杂交鲟幼鱼生长性能、血清生化指标和肌肉营养成分的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2016, 31(1): 58-63.
- [133] Shiau S Y, Lib Y H. Carbohydrate utilization and its protein-sparing effect in diets for grouper (*Epinephelus malabaricus*) [J]. Anim Sci, 2001, 73(2): 299-304.
- [134] Enes P, Panserat S, Kaushik S, et al. Growth performance and metabolic utilization of diets with native and waxy maize starch by gilthead sea bream (*Sparus aurata*) juveniles[J]. Aquaculture, 2008, 274(1): 101-108.
- [135] 田丽霞, 刘永坚, 刘栋辉, 等. 葡萄糖和玉米淀粉对草鱼生长和肠系膜脂肪沉积的影响[J]. 水产学报, 2000, 24(5): 438-441.
- [136] Rawles S D, Gatlin III D M. Carbohydrate utilization in striped bass (*Morone saxatilis*) and sunshine bass (*M. chrysops*♀×*M. saxatilis*♂)[J]. Aquaculture, 1998, 161(1-4): 201-212.
- [137] Tan Q, Xie S, Zhu X, et al. Effect of dietary carbohydrate sources on growth performance and utilization for gibel carp (*Carassius auratus gibelio*) and Chinese longsnout catfish (*Leiocassis longirostris* Günther)[J]. Aquac Nutr, 2006, 12(1): 61-70.

- [138] Furuichi M, Yone Y. Availability of carbohydrate in nutrition of carp and red seabream[J]. Nippon Suisan Gakk, 1982, 48(7): 945-948.
- [139] 林小值, 罗毅平, 谢小军. 饲料中碳水化合物水平对南方鲇幼鱼餐后糖酵解酶活性及血糖浓度的影响[J]. 水生生物学报, 2006, 30(3): 305-310.
- [140] 王金胜, 王冬梅, 吕淑霞. 生物化学[M].北京: 科技出版社, 2011: 214-258.
- [141] Furuichi M, Yone Y. Changes in activities of hepatic-enzymes related to carbohydrate metabolism of fishes in glucose and insulin-glucose tolerance-tests[J]. Bull Jap Soc Sci Fish, 1982, 48(3): 463-466.
- [142] Gianni E G, Testa R, Savarino V. Liver enzyme alteration: A guide for clinicians[J]. Can Med Assoc J, 2005, 172(2): 367-379.
- [143] 张世亮. 饲料中糖结构、糖水平及糖脂比对瓦氏黄颡鱼幼鱼生长及糖代谢的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [144] Moro G V, Camilo R Y, Moraes G, et al. Dietary non-protein energy sources: growth, digestive enzyme activities and nutrient utilization by the catfish jundiá, *Rhamdia quelen*[J]. Aquac Res, 2010, 41(3): 394-400.
- [145] 张颂, 蒋明, 文华, 等. 饲料碳、脂比例对胭脂鱼幼鱼生长及糖代谢的影响[J]. 华南农业大学学报, 2014(3):1-7.
- [146] 戈贤平, 刘波, 谢骏, 等. 饲料中不同碳水化合物水平对翘嘴红鲌生长及血液指标和糖代谢酶的影响[J]. 南京农业大学学报, 2007, 30(3):88-93.
- [147] 李弋, 周飘苹, 邱红, 等. 饲料中糖源对大黄鱼生长性能及消化酶、糖代谢关键酶活性的影响[J]. 动物营养学报, 2015, 27(11): 3438-3447.
- [148] Girard J, Perdereau D, Narkewicz M, et al. Hormonal regulation of liver phosphoenolpyruvate carboxykinase and glucokinase gene expression at weaning in the rat[J]. Biochimie, 1991, 73(1): 71-76.
- [149] Erfanullah, Jafri A K. Effect of dietary carbohydrate-to-lipid ratio on growth and body composition of walking catfish (*Clarias batrachus*)[J]. Aquaculture, 1998, 161(1-4):159-168.
- [150] Jantrarotai W, Sitasit P, Rajchapakdee S. The optimum carbohydrate to lipid ratio in hybrid *Clarias* catfish (*Clarias macrocephalus* × *C. gariepinus*) diets containing raw broken rice[J]. Aquaculture, 1994, 127(1):61-68.
- [151] Ali A, Al-Asgah N A. Effect of feeding different carbohydrate to lipid ratios on the growth performance and body composition of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings[J]. Animal, 2001, 50(1):91-100.
- [152] Tan Q, Xie S, Zhu X, et al. Effect of dietary carbohydrate-to-lipid ratios on growth and feed

- utilization in Chinese longsnout catfish (*Leiocassis longirostris* Günther)[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2007, 23(5):605-610.
- [153] 李贵锋. 不同蛋能比和糖脂比对建鲤幼鱼生长性能、体组成、消化及代谢酶活性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [154] 张颂. 胭脂鱼幼鱼饲料中适宜碳脂比、糖源和脂肪源的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [155] 王丽娜. 饲料糖脂比及蛋白水平对黄颡鱼幼鱼生长、免疫及代谢的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- [156] Martino R C, Cyrino J E P, Portz L, et al. Effect of dietary lipid level on nutritional performance of the surubim, *Pseudoplatystoma coruscans*[J]. Aquaculture, 2002, 209(1–4):209-218.
- [157] Christiansen D C, Klungsøyr L. Metabolic utilization of nutrients and the effects of insulin in fish.[J]. Comparative Biochemistry & Physiology B Comparative Biochemistry, 1987, 88(3):701-11.
- [158] Panserat S, Capilla E, Gutierrez J, et al. Glucokinase is highly induced and glucose-6-phosphatase poorly repressed in liver of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) by a single meal with glucose[J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part B Biochemistry & Molecular Biology, 2001, 128(2):275-283.
- [159] Wang J T, Liu Y J, Tian L X, et al. Effect of dietary lipid level on growth performance, lipid deposition, hepatic lipogenesis in juvenile cobia (*Rachycentron canadum*) [J]. Aquaculture, 2005, 249(1–4):439-447.
- [160] Yh H U, Liu Y J, Tian L X, et al. Optimal dietary carbohydrate to lipid ratio for juvenile yellowfin seabream (*Sparus latus*) [J]. Aquaculture Nutrition, 2007, 13(4):291–297.
- [161] Giri S S, Sahoo S K, Sahu A K, et al. Effect of dietary protein level on growth, survival, feed utilisation and body composition of hybrid *Clarias* catfish (*Clarias batrachus* X *clarias gariepinus*).[J]. Animal Feed Science & Technology, 2003, 104(1–4):169-178.
- [162] 向泉, 周兴华, 陈建, 等. 饲料中脂肪含量对翘嘴红鲌幼鱼消化酶活性的影响[J]. 北京水产, 2008(5):35-38.
- [163] 王爱民, 吕富, 杨文平, 等. 饲料脂肪水平对异育银鲫生长性能、体脂沉积、肌肉成分及消化酶活性的影响[J]. 动物营养学报, 2010, 22(3):625-633.
- [164] 刘襄河, 叶超霞, 沈碧端, 等. 饲料中糖/脂肪比对暗纹东方鲀幼鱼生长、血液指标、肝代谢酶活性及 PEPCK 基因表达的影响[J]. 水产学报, 2014, 38(8):1149-1158.
- [165] 朱卫. 饲料脂肪水平对点篮子鱼生长性能、营养成分及消化酶活性的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2013.
- [166] 韩光明, 王爱民, 徐跑, 等. 饲料中脂肪水平对吉富罗非鱼幼鱼成活率、肌肉成分及消化酶活

- 性的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(4):469-474.
- [167] Panserat S, Médale F, Blin C, et al. Hepatic glucokinase is induced by dietary carbohydrates in rainbow trout, gilthead seabream, and common carp[J]. *American Journal of Physiology Regulatory Integrative & Comparative Physiology*, 2000, 278(5):R1164.
- [168] 王猛强, 黄文文, 周飘苹, 等. 不同蛋白质和小麦淀粉水平对大黄鱼生长性能、糖酵解和糖异生关键酶活性的影响[J]. *水产学报*, 2015, 39(11):1690-1701.
- [169] 杨丽萍, 郑文佳, 秦超彬, 等. 饲料糖脂比对吉富罗非鱼生长、血液指标和肝脏糖代谢关键酶活性及基因表达的影响[J]. *水产学报*, 2016, 40(9):1376-1386.
- [170] 谢忠明, 孙大江, 王京树, 等. 鲟鱼养殖技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.

致 谢

无数次幻想过在执笔写下论文致谢的时候会是怎样的心情，此时终于到了为研究生生活划上句号的时刻。本以为的波澜不惊也终究是想想而已，心中的思绪万千，不由得百感交集。三年里发生的事情历历在目仿佛昨日，第一次在炎热的武汉半夜热醒、第一次出差在陕西大山里的震撼都已成为过去也成为生命中深深的印记。三年里有痛苦有快乐，有很多人需要感谢！

首先对我的导师尊敬的危起伟研究员表示最真诚的感谢。您不但是我硕士期间学业上的导师也是今后的人生导师。在我研究方向的拟定、试验设计及实施和论文的撰写修改中倾注了您大量心血。您实事求是的治学态度、渊博的学识和兢兢业业的工作精神都对我影响深远。您对于学生自主学习能力的培养，对学生科研想法的支持，为学生实验创造条件的同时还使我们在出差中开阔了眼界、增长了见识，让我们在求学期间各方面素质都得到了提高都将会在我们未来的人生中受益匪浅。依然记得您给我们上的研究生第一课，如慈父般的教诲也将终生铭记。

还要感谢杜浩副研究员在我试验、论文修改及学习工作等各个方面的建议及帮助。同时感谢张辉研究员、王成友副研究员、厉萍副研究员、吴金明助理研究员、张书环助理研究员、冷小茜助理研究员在试验上的建议及出差中的照顾。感谢刘志刚工程师、沈丽助理研究员、周琼女士、郭霞女士在日常生活和财务报账等方面提供的便利。

感谢农业部中华鲟保育和增殖放流中心的乔新美老师、熊伟老师、罗江师兄、吴金平师兄、陈华蓉师姐在投喂试验中的指导和帮助以及生活上的照顾。感谢李远、胡超等几位师傅在养殖期间技术上的支持。感谢王科兵、王后健、夏名义三位师傅在交通上给予的便利。

感谢长江水产研究所水产营养与饲料课题组文华研究员、刘伟助理研究员、武文一师兄、张志强师兄、许霄霄对试验设计及实施、仪器使用给予的建议、指导及提供的便利。感谢陕西省水产研究所陆斌主任、李平工程师在陕西山中出差生活上给予的帮助。

感谢华中农业大学邵俭师兄、谢晓师兄、霍来江师兄、张磊师兄、杨焕超师兄、同门颀江、向浩师弟、李飞扬师弟、肖新平师妹，西南大学梁志强师兄、蔺丹清师姐、李君轶师兄、辛苗苗师姐、颀璇师姐、同门邸军、万玉芳师妹，中国科学院水生生物研究所叶欢师兄、杨晓鸽师姐、席萌丹师姐、郭威师兄、同门黄君、杨俊琳师弟，上海海洋大学王旭歌师姐、陈亮、王亚龙、全爽师妹，南京农业大学汪珂师姐在试验和

生活中对我的建议和关心。特别感谢邵俭师兄、张磊师兄、同门颀江、邸军在出差和试验的过程中给予的极大帮助。

感谢南京农业大学无锡渔业学院的胡彬、赵振新、梁化亮、栾学斌、程大川、吕浩、喻文娟、张圆琴、翟明丽、陈倩、杨思雨等同学在学习上的帮助。

感谢女友高敏，在最美好的年纪遇到你是我的幸运。

感谢我的父母，感谢你们二十七年来养育之恩，没有你们的教导、支持我不可能走完这二十年的求学路。

最后还要感谢南京农业大学及长江水产研究所给了我三年研究生学习的机会和平台。

本研究得到了公益性行业(农业)科研专项(No.201203086)和国家重点基础研究计划(973 计划) (No.2015CB150702)的支持，在此表示感谢。

褚志鹏

2017 年 3 月 23 于武汉

硕士期间发表的学术论文、申请专利及参与课题

发表的学术论文

- 1、褚志鹏，危起伟，杜浩，刘伟，张磊，颀江，邸军.不同糖源对达氏鲟幼鱼生长、体成分及生理生化指标的影响，中国水产科学，2017,24（2）：284-294.
(对应论文第二章)
- 2、张磊，危起伟，张书环，颀江，褚志鹏，魏开建，文华，蒋明.饲料蛋白水平对达氏鲟幼鱼生长性能、体组成、消化酶活性以及血液生化指标的影响,淡水渔业，2016,46（6）：26-37.
- 3、Shao J, Luo W, Wei Q W, Wang F, Guo W, Ye H, Chu Z P, Wu J M, Zhang S H, Wang C Y. Assignment of parentage by microsatellite analysis in *Brachymystax lenok tsinlingensis*, an endangered fish. Aquatic Biology, 2016, accept.

申请专利

- 1、发明创造名称：人工调控实现达氏鲟自然交配产卵的方法；发明人：杜浩，危起伟，罗江，冷小茜，褚志鹏，周琼；申请号：20160424292.0（已授权）

参与课题

- 1、中华鲟性腺发育关键营养物质体内转化的生理基础(973 计划)（No.2015CB150702）；
- 2、珍稀水生生物繁育与物种保护技术研究（公益性行业(农业)科研专项）
(No.201203086)；
- 3、中华鲟自然繁殖及早期胚胎发育河床质适合度研究(国家自然科学基金)(No.31202003)；
- 4、中华鲟自然繁殖调查（2014、2015（2015 年中华鲟当年产卵场调查（石首至阳逻江段）
No.SXSN/4046）、2016）