

华中农业大学

HUAZHONG AGRICULTURAL UNIVERSITY

硕士学位论文

MASTER'S DEGREE DISSERTATION

达氏鲟幼鱼对蛋白质和脂肪需要量的研究

STUDY ON DIETARY OF PROTEIN AND LIPID
REQUIREMENT IN JUVENILE DABRY'S STURGEON
(*ACIPENSER DABRYANUS*)

研究生: 张磊

CANDIDATE: ZHANG LEI

导师: 魏开建 副教授

SUPERVISOR: ASSOCIATE PROFESSOR WEI KAIJIAN

专业: 水产养殖学

MAJOR: AQUACULTURE

研究方向: 水产动物营养与饲料

FIELD: AQUATIC ANIMAL NUTRITION AND FEED

中国 武汉

WUHAN, CHINA

二〇一六年六月

JUNE, 2016

分类号

密级

华中农业大学硕士学位论文

达氏鲟幼鱼对蛋白质和脂肪需要量的研究

**Study on dietary of protein and lipid requirement in juvenile
Dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus*)**

研 究 生：张磊

学 号：2013308110021

指 导 教 师：魏开建 副教授

危起伟 研究员

指 导 小 组：张书环 助理研究员

文华 研究员

谭青松 副教授

专业：水产养殖学

研究方向：水产动物营养与饲料

获得学位名称：农学硕士

获得学位时间：2016年6月

华中农业大学水产学院

二〇一六年六月

华中农业大学学位论文独创性声明及使用授权书

学位论文是否保密	否	如需保密，解密时间	年 月 日
----------	---	-----------	-------

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得华中农业大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料，指导教师对此进行了审定。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明，并表示了谢意。

研究生签名：

张磊

时间：

2016 年 6 月 13 日

学位论文使用授权书

本人完全了解华中农业大学关于保存、使用学位论文的规定，即学生必须按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保留提交论文的印刷版和电子版，并提供目录检索和阅览服务，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。本人同意华中农业大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容，为存在馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献传递和交换服务，同时本人保留在其他媒体发表论文的权力。

注：保密学位论文（即涉及技术秘密、商业秘密或申请专利等潜在需要提交保密的论文）在解密后适用于本授权书。

学位论文作者签名：

张磊

导师签名：

魏升建

签名日期：2016 年 6 月 13 日

签名日期：2016 年 6 月 13 日

注：请将本表直接装订在学位论文的扉页和目录之间

目 录

摘要	i
Abstract	iii
缩略语表	v
第 1 章 文献综述	1
1.1 达氏鲟简介	1
1.1.1 外部形态特征	1
1.1.2 生活习性	1
1.1.3 地理分布和资源现状	2
1.1.4 食性与生长	2
1.1.5 繁殖生物学	2
1.1.6 达氏鲟物种保护现状及面临的问题	2
1.2 鲟鱼的营养与饲料研究现状	3
1.2.1 蛋白质和氨基酸的营养需求	3
1.2.2 能量与能量代谢	4
1.2.3 脂类的营养需求	5
1.2.4 碳水化合物营养	5
1.2.5 维生素和矿物质营养	6
1.3 本研究的目的及意义	7
第 2 章 达氏鲟幼鱼对饲料中蛋白质的需要量	8
2.1 材料与方法	8
2.1.1 试验饲料	8
2.1.2 试验用鱼与饲养管理	9
2.2 样品的采集与分析	10
2.2.1 样品的采集	10
2.2.2 样品的测定	10
2.2.3 生长指标的计算	12
2.3 数据统计分析	12
2.4 结果	13
2.4.1 不同饲料蛋白水平对达氏鲟幼鱼生长性能的影响	13
2.4.2 不同饲料蛋白水平对达氏鲟幼鱼血液指标的影响	15
2.4.3 不同饲料蛋白水平对达氏鲟幼鱼组织消化酶活力的影响	16
2.4.4 不同饲料蛋白水平对达氏鲟幼鱼体成分的影响	17
2.5 讨论	18
2.5.1 不同饲料蛋白质水平对达氏鲟幼鱼生长性能的影响	18
2.5.2 不同饲料蛋白质水平对达氏鲟幼鱼血液指标的影响	19
2.5.3 不同饲料蛋白质水平对达氏鲟幼鱼组织消化酶活力的影响	19
2.5.4 不同饲料蛋白质水平对达氏鲟幼鱼体成分的影响	20
2.6 结论	21
第 3 章 达氏鲟幼鱼对饲料中脂肪的需要量	22
3.1 材料与方法	22
3.1.1 试验饲料	22

3.1.2 试验用鱼与饲养管理.....	23
3.2 样品的采集与分析.....	23
3.3 数据统计分析.....	24
3.4 结果.....	24
3.4.1 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼生长性能的影响.....	24
3.4.2 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼血液指标的影响.....	27
3.4.3 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼组织消化酶活力的影响.....	27
3.4.4 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼体成分的影响.....	28
3.5 讨论.....	29
3.5.1 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼生长的影响.....	29
3.5.2 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼血液指标的影响.....	30
3.5.3 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼组织消化酶活力的影响.....	30
3.5.4 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼体成分的影响.....	31
3.6 结论.....	32
参考文献.....	33
附录 I 攻读学位期间发表的论文.....	43
附录 II 攻读学位期间参加的学术会议及科学实践.....	44
致谢.....	45

摘要

本试验以达氏鲟幼鱼为研究对象,研究不同水平的饲料蛋白质和脂肪对达氏鲟幼鱼生长性能、消化酶、血液指标以及体成分的影响,来确定达氏鲟幼鱼对蛋白质和脂肪的需要量。主要结果如下:

1.达氏鲟幼鱼对饲料中蛋白质的需要量

为了估计达氏鲟幼鱼适宜的饲料蛋白质水平,在室内流水系统(圆形水泥养殖池规格:6300L)中进行了为期8周的养殖试验。试验选取初始平均体重为 400.68 ± 8.55 g的健康达氏鲟幼鱼450尾,平均分为5组,每组三个重复,每个重复30尾鱼,分别饲喂蛋白质水平为30.83%、34.31%、39.54%、45.58%、50.76%的五种等脂等能饲料。试验期间,水流量为6 L/min,水温 24.0 ± 1.0 °C,溶氧大于6.0 mg/L,氨氮小于0.02 mg/L。结果显示,增重率随饲料蛋白水平的升高呈现先升高后降低的趋势,39.54%蛋白组增重率最高,但与45.58%蛋白组差异不显著,但显著高于其他试验组。饲料系数正好相反,随饲料蛋白水平的升高呈先下降后上升的趋势,39.54%蛋白组饲料系数最低,与34.31%和45.58%组差异不显著,但显著高于30.83%和50.76%的组。蛋白质效率随饲料蛋白水平的增加呈先平缓后下降的趋势,蛋白质效率在饲料蛋白为39.54%~50.76%时,差异显著,饲料蛋白为30.83%~39.54%时,则无显著差异。肝体比和脏体比受饲料蛋白水平影响较为显著,且随饲料蛋白含量的增加而降低。各试验组间甘油三酯和总胆固醇含量无显著差异,谷丙转氨酶和谷草转氨酶活力在饲料蛋白水平为50.76%时显著高于其他试验组。本试验中胃蛋白酶活力与饲料蛋白水平呈正相关关系,淀粉酶活力与饲料蛋白水平呈负相关关系,脂肪酶在各试验组无显著差异。饲料蛋白水平能显著影响鱼体的蛋白和脂肪含量,且饲料蛋白越高,二者含量越高。经二次回归分析,得出达氏鲟幼鱼饲料中适宜的蛋白水平为41.55%~43.17%。

2.达氏鲟幼鱼对饲料中脂肪的需要量

为了估计达氏鲟幼鱼适宜的饲料脂肪水平,在室内流水系统(圆形水泥养殖池规格:6300L)中进行了为期8周的养殖试验。试验选取初始平均体重为

417.54±5.23 g 的健康达氏鲟幼鱼 450 尾，平均分为 5 个试验组，每组 3 个重复，每个试验单元 30 尾鱼，分别饲喂脂肪水平为 4.87 %、7.23 %、9.63 %、12.07 %、14.04 % 的五种等氮不等能饲料。试验期间，水流量为 6 L/min，水温 24.0±1.0 °C，溶氧大于 6.0 mg/L，氨氮小于 0.02 mg/L。结果显示，达氏鲟幼鱼增重率和蛋白质效率随饲料脂肪水平的升高呈先上升后下降的趋势，在饲料脂肪水平为 9.63 % 时最高，且显著高于其他试验组。饲料系数正好相反，随饲料脂肪水平的升高呈先下降后上升的趋势，在饲料脂肪水平为 9.63 % 时最低，且显著低于其他试验组。各试验组间肥满度无明显差异。低脂肪组（4.87 %、7.23 %）的肝体比和脏体比要显著低于其他脂肪组（9.63 %、12.07 %、14.04 %）。血浆总胆固醇和甘油三酯的含量随饲料脂肪水平的升高呈现升高的趋势。谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性随饲料脂肪水平的升高而升高。鱼体水分含量与饲料脂肪水平呈负相关关系，鱼体脂肪含量与饲料脂肪水平呈正相关关系，鱼体蛋白和灰分不受饲料脂肪水平的影响。经二次回归分析，得出达氏鲟幼鱼饲料中适宜的脂肪水平为 9.99 %~10.56 %。

关键词：达氏鲟；蛋白水平；脂肪水平；生长性能；消化酶；血液指标；体成分

Abstract

This study was conducted to research the effects of dietary protein and lipid levels on growth performance, digestive enzyme activities, blood biochemical parameters and body composition of juvenile Dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus*), so as to estimate the optimal dietary protein level for juvenile Dabry's sturgeon. Results are as follows:

An 8-week growth trial was conducted to estimate the optimal dietary protein level for juvenile Dabry's sturgeon (average initial weight was 400.68 ± 8.55 g). Five isoenergetic diets were formulated to contain five levels of crude protein (30.83 %、34.31 %、39.54 %、45.58 %、50.76 %) and each diet was fed to triplicate groups of thirty fish in fifteen concretetanks. The flow rate was 6 L/min. The water temperature was 24.0 ± 1.0 °C, dissolved oxygen concentration was over 6.0 mg/L, ammonia-nitrogen concentration was less than 0.02 mg/L during the trial. The results showed that Specific growth rate (SGR) increased firstly and then decreased with the increasing of dietary protein level. Feed conversion rate (FCR) was on the contrary, which showed decreased firstly and then increased with the increasing of dietary protein level. Protein efficiency ratio (PER) showed a tendency of indifference firstly then decreasing with increasing of dietary protein level. Viscerosomatic index and Hepatosomatic index decreased significantly with the increasing of dietary protein level. The concent of plasma triglyceride (TG) and total cholesterol (T-CHO) showed no significant difference. The activities of ALT and AST which fed 50.76 % dietary protein level showed significantly higher value than other group. The experiment showed that the dietary peotein level has a positive correlation with pepsase activities and a negative correlation with amylase activities, while there is no significant difference with lipase activities. The content of crude protein and lipid in the whole body and dorsal muscle increased with the increasing of dietary protein level.

Second - order regression analysis showed that the appropriate dietary protein requirement of juvenile Dabry's sturgeon is on a scale of 41.55 % to 43.17 %.

An 8-week growth trial was conducted to estimate the optimal dietary protein level for juvenile Dabry's sturgeon (average initial weight was 417.54 ± 5.23 g). Five isonitrogenous diets were formulated to contain five levels of crude lipid (4.87 %、7.23 %、9.63 %、12.07 %、14.04 %) and each diet was fed to triplicate groups of thirty fish in fifteen concrete tanks. The flow rate was 6 L/min. The water temperature was 24.0 ± 1.0 °C, dissolved oxygen concentration was over 6.0 mg/L, ammonia-nitrogen concentration was less than 0.02 mg/L during the trial. The results showed that Specific growth rate (SGR) and Protein efficiency ratio (PER) increased significantly with dietary lipid level from 4.87 % to 9.63 % ($P < 0.05$) and then decreased significantly ($P < 0.05$). Feed conversion rate (FCR) decreased significantly when the dietary lipid level increased to 9.63 % ($P < 0.05$) and then increased significantly ($P < 0.05$). Condition factor (CF) showed no significant difference ($P > 0.05$). Hepatosomatic index (HSI) and viscerosomatic index (VSI) showed slightly increase with the increasing of dietary lipid level. The content of plasma triglyceride (TG) and total cholesterol (T-CHO) increased slightly with the increasing of dietary lipid level. The activities of ALT and AST raised as the dietary lipid level increase, and the group fed 14.04 % lipid diet showed significantly highest value. The content of moisture in the whole body decreased significantly with increasing dietary lipid level ($P < 0.05$). The whole body crude lipid content is the exact opposite. The crude protein and ash of the whole body and dorsal muscle seemed to keep at constant levels between diets ($P > 0.05$). Second-order regression analysis showed that the appropriate dietary lipid requirement of juvenile Dabry's sturgeon is on a scale of 9.99 % to 10.56 %.

Key words : Dabry's sturgeon; protein level; lipid level; growth performance; digestive enzyme; blood indexes; body composition

缩略语表

缩略语	英文名称	中文名称
Abbreviation	English Name	Chinese Name
IBW	Initial Body Weight	初始体重
FBW	Final Body Weight	终末体重
SR	Survival Rate	存活率
WGR	Weight Gain Rate	增重率
FCR	Feed Conversion Rate	饲料系数
PER	Protein Retention Efficiency	蛋白质效率
CF	Condition Factor	肥满度
HSI	Hepatosomatic Index	肝体比
VSI	Viscerosomatic Index	脏体比
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

第 1 章 文献综述

1.1 达氏鲟简介

达氏鲟 (*Acipenser dabryanus*) 隶属于鲟形目 (*Acipenseriformes*)、鲟科 (*Acipenseridae*)、鲟属 (*Acipenser* Linnaeus), 俗称长江鲟、沙腊子, 是我国特有的纯淡水定居性珍稀鱼类, 为国家一级重点保护动物, 主要分布于长江上游干支流及长江中游。

1.1.1 外部形态特征

达氏鲟外形粗长呈鱼雷形, 前段粗壮, 向后渐细, 横切面呈五边形。腹面平扁, 尿殖孔以后较细, 横切面呈椭圆形。幼鱼身体细长呈长梭形, 吻部尖长, 微向上翘。体色在侧骨板以上为灰黑色或灰褐色, 侧骨板至腹骨板之间为乳白色, 腹部黄白色或乳白色, 体色在不同个体间变化较小。头部略呈圆锥形, 侧面呈楔形, 腹面平扁。触须 2 对。口下位, 横裂, 口角和下颌外侧有唇褶。吻部发达, 布有陷器。眼位于头部两侧, 稍偏体轴的上方, 眼的横轴稍大于纵轴, 微呈椭圆形, 无上、下眼睑和瞬膜。躯干部具 5 行骨板, 背骨板 1 行, 位于体背中央; 侧骨板 2 行, 位于躯干两侧; 腹面骨板 2 行, 位于躯干部腹面的两侧。背骨板呈菱形, 具棱和刺, 锋利如刀矛, 是 5 行骨板中最大者, 通常 9~11 枚, 背鳍之后还有 1~2 枚。侧骨板呈三角形, 具有棱和刺, 是 5 行骨板中最小者, 通常 29~36 枚。腹骨板形较大, 似斜的菱形, 有棱和刺, 通常 9~13 枚。位于尾部腹面臀鳍前的骨板为臀前骨板, 1~2 枚, 臀鳍后的为臀后骨板, 通常为 2 枚。存在退化的泄殖腔, 肛门、尿殖孔均开口于泄殖腔, 这是与中华鲟的区别。尾部细而较短, 具 4 行骨板, 背骨板和侧面骨板是躯干部同行骨板的延续, 腹骨板在腹鳍前终止, 腹面仅有 1 行骨板。尾鳍为歪形尾, 上叶长于下叶 (四川省长江水产资源调查组 1988)。

1.1.2 生活习性

达氏鲟为江河定居性鱼类, 主要栖息在江水较浅、流速较缓、泥沙底质的宽

阔湾沱，一般距离河岸 10~20 m，水深 8~10 m，流速为 1 m/s 左右，有较多的腐殖质和底栖生物。每年 6~8 月的涨水季节，幼鱼进入长江上游各大支流进行索饵洄游，8~9 月回到深水处越冬。

1.1.3 地理分布和资源现状

达氏鲟主要分布于金沙江下游和长江上游，在长江上游的各大支流也有分布，如嘉陵江及其支流渠江以及沱江等支流的下游也可捕到，长江中游的沙市以上江段也有分布，尤以四川境内为多。历史上达氏鲟曾是长江上游重要的经济鱼类之一（四川省长江水产资源调查组著 1988）。20 世纪后期，由于兴修水利，过度捕捞等原因，导致其生态环境急剧变迁，达氏鲟野生种群资源日趋减少，达氏鲟的分布区逐渐缩小，1988 年达氏鲟被列为国家一级保护动物，1996 年被列为 IUCN 红色目录极危种(CR)，1997 年被列入国际濒危动植物种贸易公约(CITES) 附录 II 保护物种（乐佩琦和陈宜瑜 1998）。自 2000 年开始，长江上游也再无达氏鲟自然繁殖记录（Zhang et al 2011）。

1.1.4 食性与生长

达氏鲟属杂食性鱼类，幼鱼以动物性食物为主，常见的有水生寡毛类、水生昆虫幼虫、枝角类、桡足类等，成鱼以底栖无脊椎动物为主，也摄食水生植物、碎屑、藻类、小鱼等。达氏鲟为异速生长类型，生长速度最快期为 2~3 龄，4 龄后生长开始缓慢，最大全长为 130 cm，体重为 22 kg。达氏鲟为广温性鱼类，在 16~32 °C 均可摄食生长，适宜生长温度为 18~25 °C，当水温超过 28 °C 时，达氏鲟生长缓慢且容易死亡。

1.1.5 繁殖生物学

达氏鲟繁殖有春季（3~4 月）和秋季（11~12 月）两种繁殖类型（四川省长江水产资源调查组著 1988）。达氏鲟雄性最小性成熟年龄为 4 龄，体长 80~102 cm；雌性最小性成熟年龄为 6 龄，体长 90~110 cm；成熟群体体重为 6~16 kg。

1.1.6 达氏鲟物种保护现状及面临的问题

通过保护监管，禁止捕捞以及误捕救护等方面的工作，达氏鲟的天然留存资

源得到了一定的保障，在加上近几年的增殖放流，达氏鲟的资源量有所回升。然而通过近几年的监测结果发现，达氏鲟自然繁殖发生已经停止，达氏鲟野生亲本已很少见。值得庆幸的是，四川省长江水产资源调查组在 1976 年 3 月于长江上游对达氏鲟进行催产试验并取得成功。之后中国水产科学研究院长江水产研究所等单位也在达氏鲟全人工繁殖技术上实现了突破，这在一定程度上缓解了达氏鲟资源的衰退，但由于野生亲本的数量有限，人工繁殖的子代遗传多样性得不到保障。但作为濒危鱼类，通过用人工繁殖的子代来进行放流是减缓其资源衰退的必要途径。因此，如何有效管理和利用现有蓄养野生群体和养殖群体，提高人工繁殖群体的质量就显得极为重要。对达氏鲟营养需求进行研究，对达氏鲟资源的保护和延续具有重要意义。

1.2 鲟鱼的营养与饲料研究现状

1.2.1 蛋白质和氨基酸的营养需求

蛋白质对鱼体维持正常的生命活动具有重要意义。作为肉食性鱼类，鲟鱼的蛋白质需求高于其他鱼类。有关鲟鱼饲料蛋白质需求量的研究因鱼体规格和试验条件的不同而呈现不同的结果。波斯鲟的饲料蛋白质需要量为 40 %，中华鲟为 39.68 %~44.64 %（Mohseni et al 2013；肖慧等 1999）。

Medale 等（1995）对西伯利亚鲟的蛋白质需要量进行了研究，得出其适宜的饲料蛋白添加量为 300 g/kg 体重。Kaushik（1991）对初始体重为 20 g 的西伯利亚鲟进行研究，得出其蛋白需要量为 40 ± 2 %。Stuart 和 Hung（1989）配制不同蛋白源的等氮饲料饲喂高首鲟幼鱼（重 15.6 ± 0.3 g）8 周，结合增重率、饲料系数、蛋白质效率和能量积累率等指标，得出蛋白质投喂效果为：混合蛋白（酪蛋白:小麦面筋:蛋白=62: 30: 8）=酪蛋白>脱脂虾粉>脱脂鲟鱼粉>大豆浓缩物>鸡蛋蛋白粉>明胶>脱脂玉米蛋白粉，投喂以明胶和脱脂玉米蛋白粉为蛋白源的饲料时，发现试验鱼体重出现减小的情况。Moore 等（1988）用混合蛋白配置饲料，采用梯度法（20.0 %~52.7 %）饲喂高首鲟幼鱼（145 g~300 g），得出其蛋白质需要量为 38.4 %~43.0 %。安瑞永等（2005）饲喂史氏鲟幼鱼四种不同蛋白水平（41 %、36 %、32 %、28 %）的饲料，通过比较各组的蛋白质效率和生长速度，得出史氏鲟适宜的饲料蛋白水平为 28 %。邢西谋（2003）用梯度法（蛋白含量

36 %、39 %、42 %、45 %、48 %) 对俄罗斯鲟进行了研究, 以增重率、增重率以及饲料转换率为判定指标, 得出俄罗斯鲟适宜的饲料蛋白含量为 42 %。

蛋白质只有经过体内消化酶分解为氨基酸才能被机体利用。所以, 只有饲料中添加充足且平衡的必需氨基酸, 才能使鱼类能够快速健康的生长。迄今为止, 关于鲟鱼直接的氨基酸需求的研究较少, 多为从其不同组织的氨基酸组成和含量来探究其需要量。因为大量研究显示, 鱼类必需氨基酸的需要量与鱼体中必需氨基酸的含量近似。Ng 等 (1996) 用结晶氨基酸配制饲料饲喂高首鲟, 结果发现高首鲟生长较为缓慢, 究其原因可能为用结晶氨基酸配制的饲料适口性差, 导致鱼类饲料摄入量减少, 从而造成鱼体氨基酸合成下降, 影响鱼类生长。Ng 等 (1994) 从高首鲟体成分入手, 分别对其全鱼、肌肉、卵等组织的氨基酸成分进行了分析, 结果显示这三种组织之间的氨基酸组成显著不同, 但在不同规格 (19.5±0.4 g, 57.8±0.9 g, 179.5±0.3 g, 535.4±9.7 g) 的高首鲟中, 其全鱼的氨基酸组成类似。

1.2.2 能量与能量代谢

关于鲟鱼能量需求等方面的研究较少。Medale 等 (1991) 分别用两种饲料 (12.5 % 脂肪, 20 % 糊化淀粉; 21.8 % 脂肪, 9.9 % 粗淀粉) 饲喂西伯利亚鲟, 结果显示, 饲料脂肪水平对蛋白质消化率无影响, 但随饲料脂肪水平的升高, 脂肪消化率降低, 因而造成总能的消化率降低。Mohseni 等 (2013) 通过研究得出, 波斯鲟适宜的蛋白能量比为 22.0 mg/KJ。温小波等 (2003) 对中华鲟的研究得出中华鲟适宜的蛋白能量比为 21.85~30.05 ng/J。Medale 等 (1991) 在水温 18℃ 条件下, 使用鲤鱼饲料 (蛋白质 50 %, 脂肪 11 %, 干物质 21.5 %) 研究 3 种不同鱼龄西伯利亚鲟能量利用情况。结果发现, 西伯利亚鲟日采食量与体质量的比率随着鱼的增长而下降。3 月龄和 10 月龄的鲟鱼主要以蛋白质的形式存储能量, 24 月龄鲟鱼主要以脂肪形式储存能量, 所以年长的鲟较年幼的鲟能量保留要多些。Cui 等 (1996) 研究了三种规格的高首鲟幼鱼 (2.4 g, 11.1 g 和 22.5 g) 在投喂活蠕虫的能量分配情况, 在日投饵率 2 % 至饱食水平下, 粪能损失占总能的 3.2 %~5.2 %, 排泄能 (7.9 %~2.2 %) 随饲料水平的提高而降低, 代谢耗能减少而生长能增加; 在饱食水平下, 平均有 35.1 % 的代谢能用于生长, 代谢耗能占代谢能的 64.9 %。

1.2.3 脂类的营养需求

脂类为鱼类活动提供能量，同时为生长发育提供必需脂肪酸。它不仅具有蛋白质节约效应，而且它还是一些脂溶性维生素的载体。适量的脂类可以提高鱼类生长速率，提高饲料利用率。但是当饲料中脂肪添加量不足时，鱼体由于能量的需要，会导致通过分解蛋白质来功能，从而会影响鱼体的正常生长和发育，同时由于脂肪也是一些脂溶性维生素的载体，故饲料脂肪不足也会造成鱼体脂溶性维生素的缺乏。当饲料脂肪添加量过高时，会造成鱼体内脂肪堆积，影响鱼肉品质，同时会造成鱼体代谢功能障碍，增加鱼类疾病的发生几率，尤其是肝脏病变，过高的脂肪也容易造成饲料氧化变质，不利于饲料的储存于加工（Chou & Shiau 1996； Du et al 2005； 王爱民等 2010； 张海涛等 2004）。

肖慧等（1999）对中华鲟进行研究得出，中华鲟幼鱼适宜的饲料脂肪添加量为 9 %。肖懿哲和陈月忠（2001）对施氏鲟进行研究得出其适宜脂肪添加量为 7.5 %。邱岭泉等（2001）在饲料中添加不同含量的猪油和豆油，以生长性能和饲料利用率为判定指标，得出俄罗斯鲟饲料脂肪的适宜添加量为 12.65 %~16.65 %（邱岭泉等 2001）。Hung 等（1997）对初始体重为 110 g 的高首鲟投喂脂肪含量分别为 25.8 %，30.4 %，35.7 %和 40.2 %的饲料 8 周，结果显示饲料脂肪水平在 25.8 %~35.7 %时高首鲟的生长速率及饲料利用率较高，这说明高首鲟对 35.7 % 的高脂肪饲料也能有效利用。

Xu 等（1996）饲喂高首鲟 8 种不同脂肪源的饲料 8 周，得出其组织的脂肪酸组成受饲料中脂肪酸组成影响，且组织甘油三酯和磷脂的脂肪酸组成受饲料脂肪影响显著。鲟鱼体内 DHA（二十二碳六烯酸）和 EPA（二十碳五烯酸）含量较高，且二者受饲料中相应物质含量的影响较为显著。有研究显示，饲料脂肪源对鲟鱼组织脂肪酸有显著影响，并且 n-3 和 n-6 系列脂肪酸对鲟鱼尤为重要（Agnisola & McKenzie 1996； Deng et al 1998； McKenzie et al 1997）。

1.2.4 碳水化合物营养

糖类对鱼类来说是除脂类外另一个重要的能量来源，并且其相比蛋白和脂肪更为廉价。鲟鱼为肉食性鱼类，其对糖类的利用率较为低下。Hung（1991a, 1991b）用 7 种不同糖源（添加量为 27.2 %）配制的饲料饲喂高首鲟 8 周，结果显示糖的

利用率次序为：葡萄糖=麦芽糖>蔗糖=糊精=生玉米淀粉>乳糖=果糖=纤维素，且饲喂葡萄糖和麦芽糖的试验组，鱼体脂肪含量较高，血浆甘油三酯和总胆固醇含量也显著高于其他组，脂肪酶活性也较高。由于高首鲟体内蔗糖酶和乳糖酶活性较低，所以其对蔗糖和乳糖的利用率低下。蒋明等（2014）饲喂施氏鲟六种不同糖源的饲料 8 周，结果显示施氏鲟对糖的利用次序为：糊精> α -淀粉>玉米淀粉>葡萄糖>麦芽糖>果糖，且饲喂糊精和 α -淀粉的试验组表现出更好的生长速率。Lin 等（1997）分别在高首鲟饲料中添加 30 % 的淀粉和葡萄糖时，淀粉处理组高首鲟的增重率、饲料效率和蛋白质效率都高于葡萄糖处理组，同时证明高首鲟比奥尼罗非鱼能更好的利用碳水化合物。

1.2.5 维生素和矿物质营养

目前，针对鲟鱼维生素和矿物质需要量的研究相对缺乏，大多集中于维生素 C，胆碱，维生素 A 和维生素 E 这四种维生素以及硒和磷这两种矿物质。维生素 C 的适宜添加量因鱼种类而异。Hung 等（1991b）对高首鲟的研究显示，其维生素需要量为 0.4 %~0.6 %。邢浩春（2005）采用梯度法（0 mg/kg、15 mg/kg、30 mg/kg、45 mg/kg、60 mg/kg、75 mg/kg）研究了维生素 B₆ 对史氏鲟的影响，发现维生素 B₆ 能够促进史氏鲟的生长，并且得出史氏鲟适宜的饲料维生素 B₆ 添加量为 45~60 mg/kg。Hung（1989）采用 2×4 双因子（卵磷脂和胆碱）试验对高首鲟进行研究，结果发现，饲料中添加胆碱的试验组生长快于添加卵磷脂的试验组，这表示胆碱能促进鲟鱼的生长发育，并得出饲料中胆碱的最适添加量为 0.17 %~0.32 %。刘伟等（2007）配制了胆碱含量不同的 7 种饲料，饲喂中华鲟幼鱼 8 周，发现胆碱能够促进中华鲟生长，提高饲料的利用效率，并得出中华鲟适宜的饲料胆碱添加量为 1656 mg/kg。Agrady 等（1993）对纳氏鲟的研究指出维生素 E 能促进鱼体生长，促进 n-3 脂肪酸的沉积。Fontagn 等（2006）对西伯利亚鲟的研究指出维生素 A 可以缓解氧化脂肪对鱼体的负面影响。王连生等（2015）研究了维生素 K₃ 对西伯利亚鲟的影响，通过向饲料中添加 6 种不同含量维生素 K₃，饲喂西伯利亚鲟幼鱼 8 周后，发现各组生长情况无显著差异。Tashjian 等（2006）对高首鲟的研究得出高首鲟饲料中硒的最高限量为 10~20 $\mu\text{g/g}$ 。文华（2008）通过对施氏鲟投喂 6 种不同磷含量的饲料，以生长性能、体成分等为判定指标，得出施氏鲟饲料磷适宜添加量为 0.88 %。

1.3 本研究的目及意义

达氏鲟是国家一级保护动物，是长江珍稀濒危鱼类的典型代表，它在我国的生物多样性保护方面具有稀有性、代表性和典型性。由于达氏鲟生态环境急剧变迁，自然资源日趋减少，所以建立人工种群，用以放养补充自然种群就成为维持这一物种延续的主要途径（Du et al 2014）。为了挽救这一珍稀物种，我国对其繁殖、放流以及养殖方面做了许多卓有成效的工作，但在其营养需求方面鲜有报道，而在达氏鲟人工养殖过程中通常采用鲑、鳟类饲料，这些饲料并不能完全满足和适合达氏鲟的需要，因此，对达氏鲟蛋白质和脂肪营养进行研究具有必要性和迫切性。本研究旨在探讨达氏鲟对饲料蛋白质和脂肪的需要量，为其营养学研究提供基础数据，也为其配合饲料的开发提供关键资料，从而为人工增殖放流提供健康适合野外生存的苗种，同时建立健康的达氏鲟人工群体，长期保存其遗传资源。

第 2 章 达氏鲟幼鱼对饲料中蛋白质的需要量

蛋白质是生命的物质基础，对维持生命体生命活动具有重要意义。蛋白质有多种结构性和功能性作用。比如肌动蛋白和微管蛋白，维持生物组成成分的刚性和柔性。胶原蛋白和弹性蛋白是链接组织如软骨的关键成分。其他蛋白质如肌球蛋白可通过收缩肌肉产生机械力。许多蛋白质是酶类，催化生物化学反应，或作为转运者介导分子进出细胞。一些蛋白质在细胞信号传递、免疫反应、细胞粘附、功能的细胞周期等活动中发挥重要作用。蛋白质是组成机体每一类型细胞必需成分。处于生长期的动物，体内蛋白质合成大于分解，结果导致蛋白质沉积。蛋白质沉积是鱼体增重的决定性因素。饲料蛋白是饲料成分中成本最高的组分，研究鱼类适宜的饲料蛋白添加量，不仅能够使鱼类更好的生长，提高蛋白质效率，也能优化饲料配方，降低饲养成本。

本试验通过饲喂 5 种不同蛋白水平的饲料，从生长性能、消化酶活性，血液指标和体成分进行分析，研究达氏鲟幼鱼对饲料中蛋白质的需要量，为达氏鲟饲料的研究和开发提供依据。

2.1 材料与方法

2.1.1 试验饲料

试验饲料以鱼粉为蛋白源，鱼油为脂肪源，配置粗蛋白含量分别为 30.83 %、34.31 %、39.54 %、45.58 %、50.76 %，粗脂肪含量为 10 % 的五种等脂等能饲料，饲料组成及营养成分含量见表 2-1。先将各种饲料原料进行粉碎，使之能全部通过 0.45 mm 的分析筛，然后将各原料按比例加入逐级混合，待充分混合均匀后再加入鱼油和水，然后用绞肉机制成直径 4 mm 的颗粒，风干，然后置于-20℃冰箱备用。

表 2-1 试验饲料组成及营养水平

Table 2-1 Formulation and chemical composition of the experimental diets

成分 Ingredients	饲料蛋白水平 Dietary protein level (%)				
	30.83	34.31	39.54	45.58	50.76
鱼粉	51	58	66	74	81
鱼油	8.6	8	7.4	6.3	5.7
α -淀粉	25	19	14	9	4
氯化胆碱	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
复合维生素 ¹	1	1	1	1	1
复合矿物质盐 ²	5	5	5	5	5
羧甲基纤维素钠	2	2	2	2	2
微晶纤维素	7.15	6.75	4.35	2.45	1.05
饲料营养成分					
干物质	94.81	90.92	91.16	91.29	89.55
粗蛋白	30.83	34.31	39.54	45.58	50.76
粗脂肪	9.11	9.25	9.46	9.89	10.07
灰分	10.79	11.63	12.74	14.34	15.03
总能 (kJ/g)	17.67	17.02	17.08	17.78	17.62
氮能比 (mg/kJ)	1.74	2.02	2.28	2.62	2.98

¹复合维生素 (mg/kg diet or IU/kg diet) : 维生素 E, 100; 维生素 K₃, 40; 维生素 A, 5000IU; 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复合矿物质盐 (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; AlCl₃ · 6H₂O, 15; Na₂SeO₃, 6; KIO₃, 5.

¹Vitamin premix (mg/kg diet or IU/kg diet) : vitamin E, 100; vitamin K₃, 40; vitamin A, 5000IU; vitamin D, 2000IU; vitamin B₁, 50; vitamin B₂, 200; vitamin B₆, 50; vitamin B₁₂, 0.5; vitamin C, 325; nicotinic acid, 175; folic acid, 5; inositol, 1000; biotin, 2.5; Ca - pantothenate, 50

²Minerals 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; AlCl₃ · 6H₂O, 15; Na₂SeO₃, 6; KIO₃, 5.

2.1.2 试验用鱼与饲养管理

达氏鲟幼鱼由中国水产科学院长江水产研究所中华鲟增殖、保育与放流基地提供, 初始体重为 400.68±8.55 g。试验开始前将试验鱼驯养两周, 使其适应试验条件。

驯养结束后, 将鱼随机分配到 15 个圆形水泥养殖池中 (6300L), 每池 30

尾，每 3 个养殖池饲喂一种试验饲料。养殖用水为地下水，流量为 6 L/min，水温 24.0 ± 1.0 °C，溶氧大于 6.0 mg/L，氨氮小于 0.02 mg/L。投喂量为鱼体重的 2%~3%，每天投喂三次（8:00，14:30，21:00）。每次投喂 45 min 后将未被摄入的饲料捞出，烘干，称重，以便计算摄食量。每两周称量一次鱼体重并清洁养鱼池。试验期间观察并记录死鱼情况。

2.2 样品的采集与分析

2.2.1 样品的采集

试验结束时，对鱼饥饿 24 h，然后进行称重并记录。计算饲料系数、增重率和蛋白质效率。每池随机取 3 尾鱼称重，测量体长，尾静脉取血，3000 r/min，4 °C 离心 10 min，分离得血浆，置于-80 °C 冰箱备测酶活。然后取内脏并称重，计算脏体比，分离出肝脏并称重，计算肝体比。分离胃、肠、肝脏置于-80 °C 冰箱，备测酶活。取背肌置于-20 °C 冰箱，备测肌肉常规营养成分。另每池取 2 尾鱼置于-20 °C 冰箱，备测全鱼常规营养成分。

2.2.2 样品的测定

饲料、肌肉以及全鱼的水分、粗蛋白、粗脂肪和粗灰分分别按照 GB/T 5009.3-2003，GB/T 5009.5-2003，GB/T 5009.6-2003，GB/T 5009.4-2003 的方法测定，能量用氧弹式热量计进行测定。

血浆生化指标以及组织酶活均采用南京建成生物工程研究所相应的试剂盒进行测定。

2.2.2.1 样品中粗蛋白含量的测定

(1) 原理

凯氏定氮法测定试样中含氮量，即在催化剂的作用下，用硫酸破坏有机物，使含氮物转化成硫酸铵。加入强碱使其逸出，用硼酸吸收后再以盐酸标准溶液滴定，测出氮含量，将结果乘以换算系数 6.25，计算出粗蛋白含量。

(2) 计算公式

$$\text{粗蛋白质 (\%)} = (V_2 - V_1) \times C \times 0.0140 \times 6.25 / m$$

式中：

VI—样品消耗硫酸或盐酸标准液的体积，mL；

V2—试剂空白消耗硫酸或盐酸标准液的体积，mL；

C—盐酸标准溶液的当量浓度，mol/L；

0.0140—1N 盐酸标准溶液 1mL 相当于氮克数；

M—样品的质量，g；

2.2.2.2 样品中粗脂肪含量测定

(1) 原理：在索氏脂肪抽提器中用石油醚提取试样，计算绝干试样的损失减重。

(2) 试剂：石油醚，分析纯。

(3) 测定

索氏抽提器应干燥无水。将所用脱脂滤纸折叠成密封包状，然后将滤纸包和所用棉线在 105℃烘箱中干燥 30 min，取出置于干燥器中冷却 30 min，称重，再烘 30 min，同样冷却称重，两次称重之差小于 0.0008 g 为恒重。称取样品 2~10 g（所用样品均为测过水分后的干物质重，粉碎过 40 目标标准筛），精确至 0.0001 g，用铅笔在滤纸包上写明编号。将滤纸包用棉线捆好，放入 105℃烘箱中烘干 3 h，置于干燥器中冷却 30 min 后称重，再烘 30 min，同样冷却称重，直至恒重。将恒重的样品放入浸提管中，安置好抽提装置，注入石油醚以蒸馏时能够循环为好。加热水浴锅，提取 6~8 h。

取出滤纸包，置于通风橱中约 20 min（包上的石油醚大部分挥发完），放入 105℃烘箱中烘干 1 h，干燥器中冷却 30 min 称重，再烘 30 min，同样冷却称重，至两次重量之差小于 0.001 g 为恒重。每个样品作三个平行，回收石油醚。

(4) 计算公式

$$\text{粗脂肪}(\%) = (W_3 - W_4) / (W_2 - W_1) \times 100\%$$

式中： W_1 为已恒重的滤纸重，g； W_2 为已恒重滤纸重+样品重，g； W_3 为已恒重滤纸重+绝干样品重； W_4 为已恒重滤纸重+抽提后样品重，g

2.2.2.3 样品中水分和粗灰分的测定

(1) 水分含量：105℃烘箱中烘干；

(2) 粗灰分含量：600℃马福炉中灼烧（GB 6438-92）。

2.2.2.4 消化酶活力的测定：

(1) 组织匀浆蛋白含量：采用考马斯亮兰法测定（南京建成生物工程研究所提供）。

(2) 蛋白酶活性测定

采用试剂盒测定（南京建成生物工程研究所提供），每毫克组织蛋白 37℃ 每分钟分解生成 1 μg 氨基酸相当于 1 个酶活力单位。

(3) 淀粉酶活性测定

采用试剂盒测定（南京建成生物工程研究所提供），组织中每毫克蛋白在 37℃ 与底物作用 30 min，水解 10 mg 淀粉定义为 1 个淀粉酶活力。

(4) 脂肪酶活性测定

采用试剂盒测定（南京建成生物工程研究所提供），在 37℃ 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 底物为一个酶活力单位。

2.2.2.5 血浆中生化指标测定：

(1) 谷丙转氨酶和谷草转氨酶：

采用试剂盒测定（南京建成生物工程研究所提供）。卡门氏单位定义：1 mL 血浆，反应液总容量 3 mL，340 nm 波长，1 mL 光径，25℃，1 min 内所生成的丙酮酸，使 NADH 氧化成 NAD⁺而引起吸光度每下降 0.001 为一个卡门氏单位。

(2) 血浆甘油三脂：试剂盒测定（南京建成生物工程研究所提供）；

(3) 血浆总胆固醇：试剂盒测定（南京建成生物工程研究所提供）。

2.2.3 生长指标的计算

存活率 (SR, %) = 100 × 终末尾数 / 初始尾数；

摄食率 (FI, % day⁻¹) = 100 × 总投喂量 / [饲养天数 × (末重 + 初重) / 2]

增重率 (WGR) = 100 × (末重 - 初重) / 初重；

饲料系数 (FCR) = 摄食饲料总重量 / (末重 - 初重)；

蛋白质效率 (PER) = 体重增加量 / 蛋白摄入量；

肥满度 (CF, %) = 100 × (体重, g) / (体长, cm)³；

脏体比 (VSI, %) = 100 × 内脏重 / 体重；

肝体比 (HIS, %) = 100 × 肝重 / 体重

2.3 数据统计分析

各测定指标均以平均值±标准误表示。试验数据采用 One-Way ANOVA 和 Duncan 多重比较分析, $P < 0.05$ 即认为有显著性差异。所有统计分析均采用 SPSS 22.0 软件。

2.4 结果

2.4.1 不同饲料蛋白水平对达氏鲟幼鱼生长性能的影响

如表 2-2, 试验期间未发现死鱼, 各试验组存活率皆为 100 %。摄食率随饲料蛋白水平的升高而升高。增重率随饲料蛋白水平升高而呈现先上升后下降的趋势, 且在饲料蛋白水平为 39.54 % 时达到最大值, 并显著高于 30.83 %、34.31 % 和 50.76 % 的试验组 ($P < 0.05$), 与 45.58 % 试验组无显著差异 ($P > 0.05$)。饲料系数的趋势正好相反, 呈现先下降后上升的趋势, 且在 39.54 % 时值最小, 并显著低于其他试验组 ($P < 0.05$)。蛋白质效率随饲料蛋白水平升高总体呈现先平稳后下降的趋势。各试验组间肥满度无显著差异 ($P > 0.05$)。各试验组的脏体比和肝体比均随饲料蛋白水平的升高总体呈现下降的趋势。

经二项式回归分析, 增重率 (y) 和饲料蛋白水平 (x) 的方程为 $y = -0.4208x^2 + 36.332x - 672.77$ ($R^2 = 0.9324$), 即当饲料蛋白水平为 43.17 % 时, 增重率最高 (如图 3-1)。

饲料系数 (y) 和饲料蛋白水平 (x) 的方程为 $y = 0.0037x^2 - 0.3075x + 7.9055$ ($R^2 = 0.8692$), 即当饲料蛋白水平为 41.55 % 时, 饲料系数最低 (如图 3-2)。

表 2-2 不同蛋白水平对达氏鲟幼鱼生长和饲料利用率的影响

Table 2-2 Effect of dietary protein level on growth performance and feed utilization of juvenile Dabry's sturgeon

指标 Index	饲料蛋白水平 Dietary protein level (%)				
	30.83	34.31	39.54	45.58	50.76
初始体重 (g)	402±13.82	400±9.11	400±8.68	400±4.90	403±6.25
终末体重 (g)	568.23±10.85 ^a	749.51±19.34 ^b	815.21±7.13 ^d	813.31±4.01 ^{cd}	779.85±3.46 ^{bc}
存活率 (%)	100	100	100	100	100
摄食率 (%)	1.25±0.01 ^a	1.79±0.02 ^b	1.83±0.01 ^b	1.93±0.02 ^c	2.02±0.02 ^d
增重率 (%)	41.07±1.31 ^a	87.63±3.54 ^b	104.22±1.58 ^d	103.76±1.59 ^d	93.77±1.88 ^c
饲料系数	2.03±0.09 ^c	1.69±0.06 ^{ab}	1.49±0.01 ^a	1.62±0.01 ^{ab}	1.78±0.01 ^b
蛋白质效率	1.64±0.07 ^c	1.69±0.06 ^c	1.66±0.02 ^c	1.36±0.01 ^b	1.12±0.01 ^a
肥满度 (%)	0.69±0.02	0.70±0.02	0.70±0.02	0.69±0.02	0.66±0.02
肝体比 (%)	8.92±0.78 ^c	8.37±0.26 ^{bc}	7.34±0.33 ^{ab}	6.71±0.32 ^a	6.47±0.19 ^a
脏体比 (%)	3.26±0.39 ^b	2.80±0.17 ^{ab}	2.76±0.18 ^{ab}	2.49±0.12 ^a	2.17±0.06 ^a

注：数据表示为平均值±标准误 (n=3)，同行上标不同字母者存在显著差异 (P < 0.05)。

Note: Values are the mean ±SE of triplicates. Means in the same row with different superscripts are significantly different (P < 0.05).

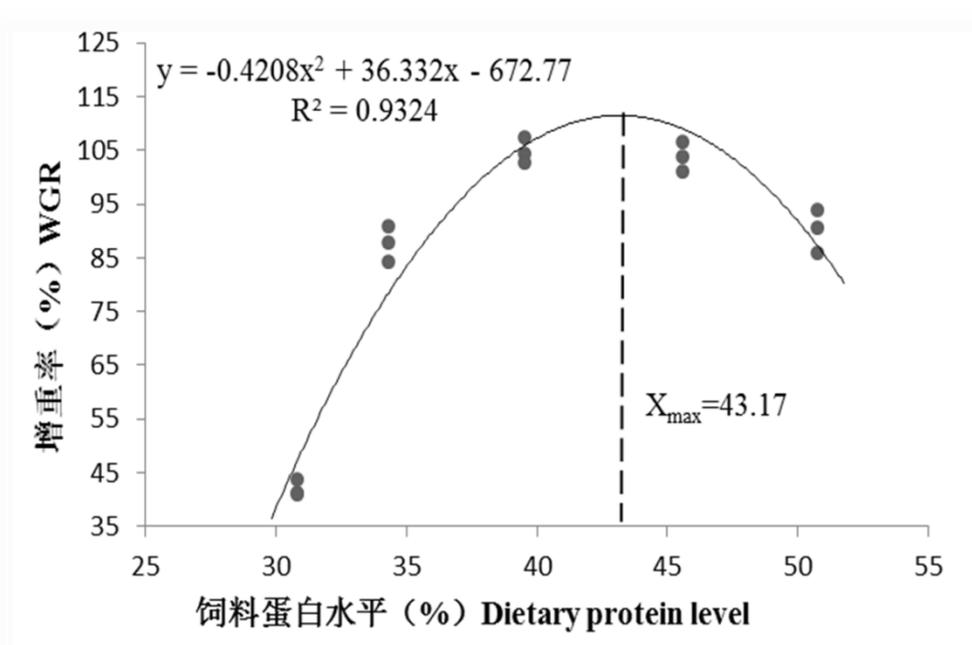


图 2-1 饲料蛋白水平与增重率的二次回归分析

Fig. 2-1 Second-order regression analysis between weight gain rate (WGR) and dietary crude protein level

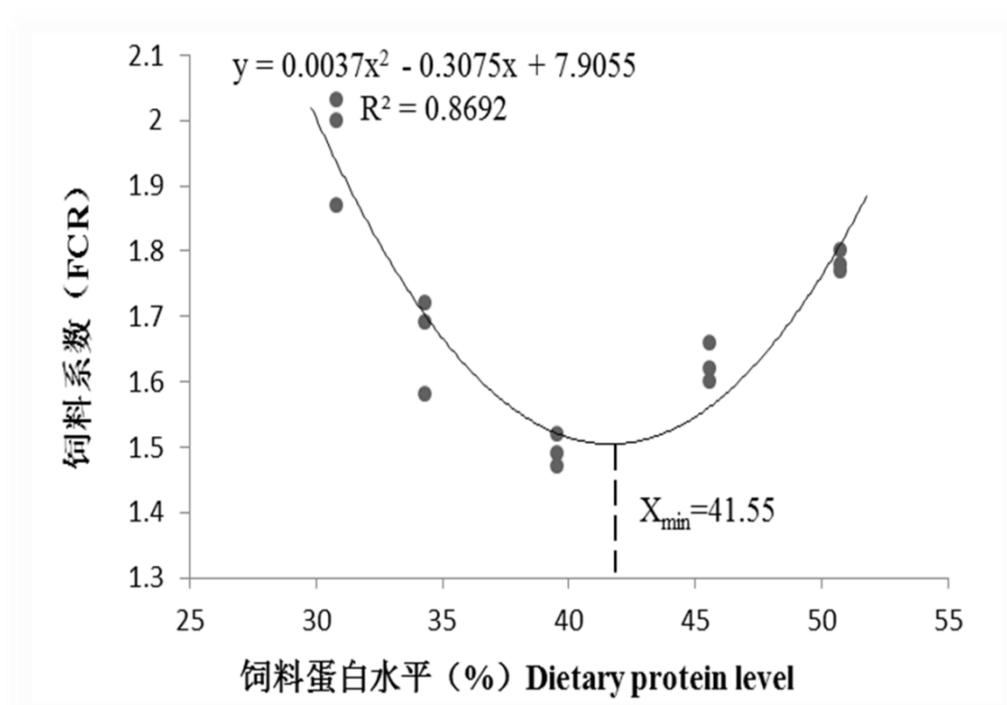


图 2-2 饲料蛋白水平与饲料系数的二次回归分析

Fig. 2-2 Second-order regression analysis between feed conversion rate (FCR) and dietary crude protein level

2.4.2 不同饲料蛋白水平对达氏鲟幼鱼血液指标的影响

如表 2-3, 血浆甘油三酯和总胆固醇含量在各试验组间无显著差异。谷丙转氨酶活力随饲料蛋白含量的增加而呈现上升的趋势。谷草转氨酶并未随饲料蛋白水平呈现规律性变化。饲料蛋白水平为 50.76 % 的试验组其谷丙转氨酶和谷草转氨酶活力显著高于其他试验组 ($P < 0.05$)。

表 3-3 不同饲料蛋白水平对达氏鲟幼鱼血液指标的影响

Table 3-3 Effect of dietary protein level on blood index of juvenile Dabry's sturgeon

指标 Index	饲料蛋白水平 Dietary protein level (%)				
	30.83	34.31	39.54	45.58	50.76
谷丙转氨酶 ALT(U/L)	42.60±1.68 ^a	45.72±1.11 ^a	55.00±2.24 ^b	59.32±2.23 ^b	67.67±1.63 ^c
谷草转氨酶 AST(U/L)	138.79±14.08 ^{ab}	151.64±11.99 ^{bc}	107.00±5.05 ^a	123.41±3.20 ^{ab}	180.27±8.35 ^c
甘油三酯 TG(mmol/L)	3.10±0.09	2.31±0.31	4.31±1.09	3.44±1.24	4.62±1.00
总胆固醇 T - CHO(mmol/L)	2.12±0.92	2.55±0.17	3.55±0.32	2.85±0.49	4.63±1.28

注：数据表示为平均值±标准误（n=3），同行上标不同字母者存在显著差异（ $P < 0.05$ ）。

Note: Values are the mean ±SE of triplicates. Means in the same row with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$).

2.4.3 不同饲料蛋白水平对达氏鲟幼鱼组织消化酶活力的影响

如表 2-4，胃蛋白酶活力随饲料蛋白水平的升高而显著升高（ $P < 0.05$ ），且在饲料蛋白水平为 50.76 % 时最大并显著高于其他试验组。淀粉酶活力正好相反，随饲料蛋白水平的升高呈显著性下降的趋势（ $P < 0.05$ ），且饲料蛋白水平为 30.83 % 的组显著高于 50.76 % 的组。脂肪酶活力在各试验组间差异不明显（ $P > 0.05$ ）。

表 2-4 不同饲料蛋白水平对达氏鲟幼鱼消化酶活力的影响

Table 4 Effect of dietary protein level on digestive enzyme activities of juvenile Dabry's sturgeon

指标 Index	饲料蛋白水平 Dietary protein level (%)				
	30.83	34.31	39.54	45.58	50.76
胃蛋白酶 (U/mg)	6.51±0.21 ^a	6.45±0.07 ^a	8.76±0.04 ^b	8.87±0.20 ^b	9.36±0.06 ^c
脂肪酶 (U/g)	4.03±2.44	4.40±0.50	3.68±0.50	4.22±1.00	3.73±1.00
淀粉酶 (U/mg)	58.43±5.93 ^b	44.44±12.30 ^{ab}	33.51±4.48 ^a	36.33±1.00 ^{ab}	26.12±2.25 ^a

注: 数据表示为平均值±标准误 (n=3), 同行上标不同字母者存在显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: Values are the mean ±SE of triplicates. Means in the same row with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$).

2.4.4 不同饲料蛋白水平对达氏鲟幼鱼体成分的影响

如表 2-5, 全鱼和肌肉的水分随饲料蛋白水平的升高而呈下降的趋势。各试验组间全鱼的粗蛋白含量无显著差异。肌肉粗蛋白含量随饲料蛋白水平的升高显著升高 ($P < 0.05$)。各试验组全鱼和肌肉灰分含量随饲料蛋白水平的上升并未出现显著性差异。各试验组间全鱼和肌肉粗脂肪含量随饲料蛋白水平的升高呈现显著性上升的趋势 ($P < 0.05$)。

表 2-5 不同饲料蛋白水平对达氏鲟幼鱼体成分的影响

Table 2-5 Effect of dietary protein level on whole body and dorsal muscle composition of juvenile

Dabry's sturgeon				
饲料蛋白水平 (%)	水分 Moisture	粗蛋白 Crude protein	粗脂肪 Crude lipid	灰分 Ash
全鱼成分				
初始	76.46±0.53	12.18±0.14	4.05±0.03	2.56±0.04
30.83	78.07±0.69 ^c	12.78±1.02	4.35±0.03 ^a	2.69±0.44
34.31	74.89±0.83 ^{ab}	13.71±0.17	7.95±0.10 ^b	2.62±0.10
39.54	75.28±0.39 ^b	12.68±1.38	8.28±0.02 ^c	2.37±0.21
45.58	75.04±0.50 ^{ab}	13.68±0.38	8.88±0.01 ^d	2.46±0.01
50.76	72.95±0.50 ^a	15.73±4.04	9.84±0.05 ^e	2.42±0.10
肌肉成分				
30.83	77.76±0.99 ^b	15.99±0.35 ^a	2.05±0.41 ^a	1.24±0.22
34.31	76.90±0.68 ^{ab}	17.97±0.19 ^b	2.51±0.07 ^{ab}	1.29±0.04
39.54	77.26±0.29 ^{ab}	19.92±0.02 ^c	2.80±0.07 ^{ab}	1.42±0.01
45.58	75.33±0.32 ^a	20.01±0.04 ^c	3.25±0.08 ^{bc}	1.37±0.02
50.76	75.48±0.10 ^a	23.81±0.44 ^d	3.68±0.36 ^c	1.41±0.13

注：数据表示为平均值±标准误（n=3），同行上标不同字母者存在显著差异（ $P < 0.05$ ）。

Note: Values are the mean ±SE of triplicates. Means in the same row with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$).

2.5 讨论

2.5.1 不同饲料蛋白质水平对达氏鲟幼鱼生长性能的影响

本试验通过对增重率、饲料系数与饲料蛋白水平的二次回归分析得出，达氏鲟幼鱼的蛋白质需要量为 41.55 %~43.17 %。此结果与其他鲟鱼基本相同。如中华鲟蛋白质需求量为 39.68 %~44.64 %，高首鲟为 40 %，波斯鲟为 40 %，杂交鲟（西伯利亚鲟♀×俄罗斯鲟♂）为 34 %~37 %（肖慧等 1999；Moore et al 1988；Mohseni et al 2007；Guo et al 2012）。细微的差异可能是由于蛋白源、饲料配方、试验条件、鱼种类和规格的不同所引起的。许多研究表明，当饲料蛋白水平升高到某一水平时，鱼类生长是随饲料蛋白水平的增长而加快的，但当高于这一水平时后，鱼类生长速度趋于平缓甚至呈现降低的趋势（Kim & Lee 2009；Ng et al 2001）。造成这种现象的原因可能是过高的饲料蛋白会使鱼体将更多的蛋白用于分解供能，加重鱼体的代谢负担。有研究显示，蛋白质效率会随着饲料蛋白水平

的升高而降低（张文兵等 2000）。本试验中，饲料蛋白水平在 30.83 %~39.54 % 时，蛋白质效率并无显著差异（ $P > 0.05$ ），但当饲料蛋白水平从 39.54 % 增加到 50.76 % 时，蛋白质效率显著下降（ $P < 0.05$ ），此与上述结果类似。关于饲料蛋白水平对摄食率的影响，不同的研究对象，研究结果不尽相同，如 Guo 等（2012）对杂交鲟（西伯利亚鲟♀ × 俄罗斯鲟♂）的研究以及 Lee 等（2001）对马苏大马哈鱼的研究均显示摄食率随饲料蛋白水平的升高而降低；但 Tibbetts 等（2000）在对美洲鳗鲡的研究中则发现，摄食率随饲料蛋白水平的升高而升高。本实验中，达氏鲟的摄食率随饲料蛋白水平的升高而升高，具体原因，还有待进一步研究。

2.5.2 不同饲料蛋白质水平对达氏鲟幼鱼血液指标的影响

蛋白质在鱼体内进一步代谢和转换主要是通过转氨基和脱氨基作用，而在此过程中转氨酶起重要作用，其中最主要的转氨酶是谷丙转氨酶和谷草转氨酶。林仕梅等（2001）在对中华绒螯蟹的研究中发现，饲料蛋白水平能够显著影响谷丙转氨酶和谷草转氨酶的活性，并且其活性随饲料蛋白水平的升高而升高。在本试验中，饲料蛋白水平在 50.76 % 时，这两种酶活力都显著高于其他处理组，与上述情况有所接近，但谷草转氨酶活力的变化并未与饲料蛋白水平变化呈现趋势性，具体原因还有待进一步研究。大量研究表明，血脂的水平反映了机体的新陈代谢和生理状况。甘油三酯和胆固醇水平是血脂的重要指标，二者皆由肝脏进行合成，因此血液中二者的含量变化通常能够反映肝脏的脂肪代谢情况（程汉良等 2006）。本试验中各试验组间血浆甘油三酯和总胆固醇的含量无显著差异，该结果与欧洲鳊类似（Mohseni et al 2014），其原因可能是各试验组饲料脂肪水平相近造成的。

2.5.3 不同饲料蛋白质水平对达氏鲟幼鱼组织消化酶活力的影响

有研究表明，鱼体蛋白酶活性受饲料蛋白水平的影响，且在一定的范围内，二者呈正相关。例如，王吉桥等（2008）对花鲢进行了研究，发现当饲料蛋白水平由 25 % 增加到 43 % 时，肠道蛋白酶活性也随之增加；黄耀桐和刘永坚（1988）对草鱼进行研究，结果表明当饲料蛋白水平从 32 % 增加到 40 % 时，蛋白酶活性也随之增加；对胡子鲶和鲤的研究也出现相同的结果（Kawai & Ikeda 1973a, 1973b）。本试验与之类似，达氏鲟幼鱼胃蛋白酶活力随饲料蛋白水平的增加而增加，且饲料蛋白水平为 50.76 % 的试验组胃蛋白酶活力显著高于其他试验组。这

说明, 达氏鲟可以通过改变蛋白酶活性来适应饲料蛋白的变化, 从而更好的利用饲料中的蛋白质, 这是对饲料蛋白变化的一种适应和应答。本试验中各试验组间脂肪酶活力无显著差异, 受饲料蛋白水平的影响不大, 这与宝石鲈、黄姑鱼、瓦氏黄颡鱼、印度野鲮以及翘嘴红鲌等的研究类似(王兰明等 2008; 孙翰昌等 2010; 钱曦等 2007; 鲁琼等 2015; Debnath et al 2007)。有研究指出, 脂肪酶的活性与其所摄食的饲料种类尤其是饲料脂肪有关, 本试验各处理组脂肪含量差别不大, 这可能是造成各处理组间脂肪酶活性差异不显著的原因。关于饲料蛋白水平对鱼类淀粉酶的影响, 在不同鱼类中结果不尽相同。有研究表明, 鱼类淀粉酶活力随饲料蛋白水平的升高呈现规律性变化, 如虹鳟, 其淀粉酶活力随饲料蛋白水平的升高而升高 (Kawai and Ikeda 1973b); 刺鲃、瓦氏黄颡鱼以及大鳞鲃则随饲料蛋白水平的升高而降低(王常安等 2012; 孙翰昌等 2010; 吕耀平等 2009); 黑鲟、蒙古鲌随饲料蛋白水平的升高而呈现先升高后降低的趋势(卓立应 2006; 方桂萍 2014)。但也有研究认为, 淀粉酶活力与饲料中淀粉的含量有关(林建斌等 2008; 李金秋等 2005)。本试验中随着饲料蛋白水平的升高, 但同时饲料中淀粉含量下降, 肠道淀粉酶活力呈现下降的趋势, 因此, 不能确定达氏鲟淀粉酶活力与饲料蛋白水平之间的关系。

2.5.4 不同饲料蛋白质水平对达氏鲟幼鱼体成分的影响

本试验结果显示, 鱼体及肌肉水分与饲料蛋白水平成负相关关系, 丁立云等在星斑川蝶幼鱼的研究中也出现了类似结果, 但同样有研究发现饲料蛋白水平对鱼体水分无显著影响或呈正相关关系, 如金鲳鱼、细点牙鲷和黄颡鱼其鱼体水分随饲料蛋白水平的增加而增加 (Wang et al 2013; Skalli et al 2004; Kim and Lee 2005); 丁鲃、宝石鲈鱼体含水量受饲料蛋白水平影响不大(邵庆均等 2004; González-Rodríguez et al 2014)。本试验中, 鱼体脂肪含量与饲料蛋白水平呈正相关关系, 此结果与河豚相关的研究类似(El - Dakar et al 2011), 但许多研究显示鱼体脂肪含量与饲料蛋白水平呈负相关关系, 如蒙古鲌(方桂萍 2014)、紫红笛鲷(Abbas and Siddiqui 2013)、刺鲃等, 有学者认为随着饲料蛋白含量的增加, 过多的蛋白质会转变成脂肪沉积在鱼体内(Abbas and Siddiqui 2013; 方桂萍 2014; 吕耀平等 2009); 但也有学者认为低蛋白饲料中的碳水化合物含量较高, 造成体内脂肪合成量增加。对银鲈和光倒刺鲃的研究发现, 当饲喂蛋白质水平较

高的饲料时, 鱼体蛋白含量也随之升高, 本试验结果与之类似 (Shyong et al 1998; Yang et al 2003)。一般情况下, 当饲料蛋白含量升高时, 意味着有更多的蛋白质被摄食并消化吸收, 构成鱼体的结构蛋白。但也有研究发现鱼体蛋白质含量不受饲料蛋白水平影响, 在亚洲鲈和尼罗罗非鱼的研究中就出现了这种结果 (Williams et al 2003; 杨弘等 2012)。本试验中各试验组间全鱼和肌肉灰分无显著差异, 此与宝石鲈、波斯鲟、欧洲鳊、杂交鲟 (西伯利亚鲟♀×俄罗斯鲟♂) 等的研究结果类似 (王兰明等 2008; Mohseni et al 2007; Mohseni et al 2014; Guo et al 2012)。试验中, 为了减少能量对试验的影响, 通常会选择糖类来平衡能量, 这就造成低蛋白组糖类含量较高蛋白组要高, 而过量的糖会在脏体进行转化沉积, 这也许就是低蛋白组的肝体比和脏体比显著高于高蛋白组的原因 (杨磊 2011)。

2.6 结论

适宜的饲料蛋白水平能够促进达氏鲟幼鱼的生长, 提高饲料利用效率, 但过高的饲料蛋白水平其促生长效果降低, 并且会增加养殖成本。在本试验条件下, 综合考虑饲料蛋白水平对达氏鲟幼鱼生长指标、血液生化指标、消化酶活性及鱼体成分的影响, 估算出平均体重 400.68 ± 8.55 g 的达氏鲟幼鱼的饲料蛋白质需要量为 41.55 %~43.17 %。

第 3 章 达氏鲟幼鱼对饲料中脂肪的需要量

脂肪对鱼类生长发育具有重要的意义。脂肪是鱼体组织细胞重要的组成成分，鱼体细胞含有 1%~2% 的脂类物质，用于代谢功能和保持细胞膜的结构完整性；脂肪是主要的能源物质，含有很高的能量，虽然蛋白质和糖类均可以供能，但肉食鱼类对糖类的利用率很低，用蛋白供能又很浪费，所以供能主要还是以脂肪为主。脂肪供能有利于脂溶性维生素的吸收和利用，例如鱼类需要的维生素 A、维生素 D、维生素 E、维生素 K 都需要溶于脂类才能被吸收利用。脂肪也是脂肪酸的来源，它能够给鱼类提供生长发育重要的必需脂肪酸。另外，脂肪还具有蛋白节约效应，脂肪的加入提高了饲料的代谢能，可以减少蛋白分解功能的量，使之能更多的用于生长，从而达到节约蛋白的作用。

本试验通过饲喂 5 种不同脂肪水平的饲料，从其达氏鲟幼鱼生长性能、消化酶活性、血液指标以及体成分的影响来研究达氏鲟幼鱼的脂肪需要量，为达氏鲟饲料的研究和开发提供依据。

3.1 材料与方方法

3.1.1 试验饲料

试验饲料以鱼粉为蛋白源，鱼油为脂肪源，配置粗脂肪含量分别为 4.87%、7.23%、9.63%、12.07%、14.04%，粗蛋白含量为 43% 的五种等氮不等能饲料，饲料组成及营养成分含量见表 3-1。先将各种饲料原料进行粉碎，使之能全部通过 0.45 mm 的分析筛，然后将各原料按比例加入逐级混合，待充分混合均匀后再加入鱼油和水，然后用绞肉机制成直径 4 mm 的颗粒，风干，然后置于-20℃冰箱备用。

表 3-1 试验饲料组成及营养水平

Table 3-1 Formulation and chemical composition of the experimental diets

成分 Ingredients	饲料脂肪水平 Dietary lipid level (%)				
	4.87	7.23	9.63	12.07	14.04
鱼粉	69	69	69	69	69
鱼油	0	3.5	5.5	8.5	10.5
α -淀粉	10	10	10	10	10
氯化胆碱	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
复合维生素 ¹	1	1	1	1	1
复合矿物质盐 ²	5	5	5	5	5
羧甲基纤维素钠	2	2	2	2	2
微晶纤维素	12.75	9.25	7.25	4.25	2.25
饲料营养成分					
干物质	87.64	91.46	89.81	93.04	90.99
粗蛋白	43.23	42.92	43.27	42.21	43.44
粗脂肪	4.87	7.23	9.63	12.07	14.04
灰分	13.10	13.86	13.74	14.22	13.64
总能 (kJ/g)	16.63	17.35	17.67	18.84	19.09
氮能比 (mg/kJ)	2.60	2.47	2.45	2.23	2.25

¹复合维生素 (mg/kg diet or IU/kg diet) : 维生素 E, 100; 维生素 K₃, 40; 维生素 A, 5000IU; 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复合矿物质盐 (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; AlCl₃ · 6H₂O, 15; Na₂SeO₃, 6; KIO₃, 5.

¹Vitamin premix (mg/kg diet or IU/kg diet) : vitamin E, 100; vitamin K₃, 40; vitamin A, 5000IU; vitamin D, 2000IU; vitamin B₁, 50; vitamin B₂, 200; vitamin B₆, 50; vitamin B₁₂, 0.5; vitamin C, 325; nicotinic acid, 175; folic acid, 5; inositol, 1000; biotin, 2.5; Ca - pantothenate, 50

²Minerals 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; AlCl₃ · 6H₂O, 15; Na₂SeO₃, 6; KIO₃, 5.

3.1.2 试验用鱼与饲养管理

试验用鱼初始体重为 417.54±5.23 g, 其余同第二章 2.1.2。

3.2 样品的采集与分析

同第二章 2.2。

3.3 数据统计分析

同第二章 2.3。

3.4 结果

3.4.1 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼生长性能的影响

如表 3-2，试验期间各试验组均未发现死鱼，存活率为 100 %。达氏鲟幼鱼的增重率、摄食率和蛋白质效率均随着饲料脂肪水平提高而呈现明显的先上升后下降的趋势，且在饲料脂肪水平为 9.63 % 时达到最大值，并显著高于其他试验组 ($P < 0.05$)。饲料系数恰好相反，呈现明显的先降低后升高的趋势，在 9.63 % 时值最小，并显著低于其他试验组 ($P < 0.05$)。肥满度呈现先下降后上升的趋势，但不同试验组之间差异不显著 ($P > 0.05$)。肝体比和脏体比随饲料脂肪水平的升高而升高，饲料脂肪水平为 4.87 % 和 7.23 % 的试验组要显著低于其他试验组 ($P < 0.05$)，剩余三组之间无明显差异。

根据数据统计分析，增重率 (y) 和饲料脂肪水平 (x) 的二次曲线回归方程为 $y = -0.8258x^2 + 17.441x - 8.8038$ ($R^2 = 0.8457$)，当脂肪水平为 10.56 % 时，增重率最大 (如图 3-1)。

饲料系数 (y) 和饲料脂肪水平 (x) 的二次回归方程为 $y = 0.0189x^2 - 0.3796x + 3.5878$ ($R^2 = 0.8617$)，当饲料脂肪水平为 10.04 % 时，饲料系数最低 (如图 3-2)。

蛋白质效率和饲料脂肪水平的二次回归方程为 $y = -0.012x^2 + 0.2398x + 0.1345$ ($R^2 = 0.8349$)，当饲料脂肪水平为 9.99 % 时，蛋白质效率最高 (如图 3-3)。

表 3-2 不同脂肪水平对达氏鲟幼鱼生长和饲料利用率的影响

Table 3-2 Effect of dietary lipid level on growth performance and feed utilization of juvenile

Dabry's sturgeon

指标 Index	饲料脂肪水平 Dietary lipid level (%)				
	4.87	7.23	9.63	12.07	14.04
初始体重 (g)	415.39±7.34	417.74±7.60	420.09±8.22	419.04±8.33	412.29±8.62
终末体重 (g)	642.91±27.33 ^a	719.14±4.93 ^c	773.45±2.33 ^e	754.43±11.97 ^d	713.74±2.97 ^b
存活率 (%)	100	100	100	100	100
摄食率 (%)	1.69±0.05 ^a	1.74±0.01 ^b	1.89±0.01 ^e	1.87±0.02 ^d	1.81±0.01 ^c
增重率 (%)	55.33±11.08 ^a	72.48±1.29 ^b	84.37±1.06 ^d	80.77±2.49 ^c	73.08±2.54 ^b
饲料系数	2.20±0.45 ^d	1.83±0.03 ^b	1.76±0.01 ^a	1.84±0.07 ^b	1.95±0.01 ^c
蛋白质效率	1.04±0.19 ^a	1.26±0.02 ^c	1.31±0.01 ^d	1.26±0.04 ^c	1.18±0.01 ^b
肥满度 (%)	0.70±0.01	0.64±0.02	0.65±0.02	0.66±0.01	0.80±0.10
肝体比 (%)	5.92±0.33 ^a	6.06±0.23 ^a	6.79±0.22 ^b	6.95±0.20 ^b	7.00±0.21 ^b
脏体比 (%)	2.05±0.09 ^a	1.98±0.10 ^a	2.41±0.12 ^b	2.49±0.10 ^b	2.45±0.12 ^b

注: 数据表示为平均值±标准误 (n=3), 同行上标不同字母者存在显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: Values are the mean ±SE of triplicates. Means in the same row with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$).

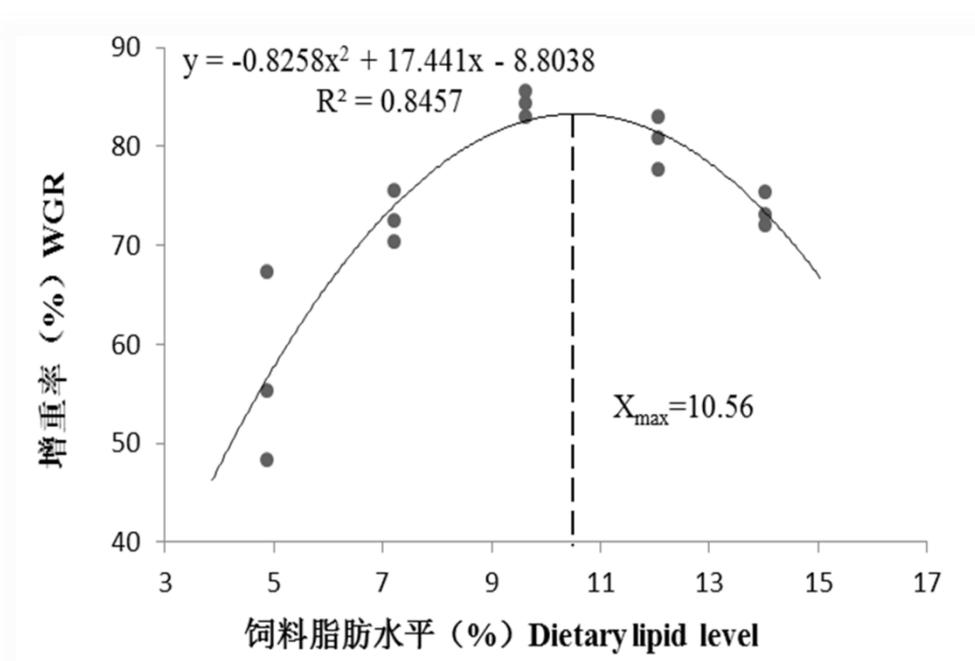


图 3-1 饲料脂肪水平与增重率的二次回归分析

Fig. 3-1 Second-order regression analysis between weight gain rate (WGR) and dietary crude lipid level

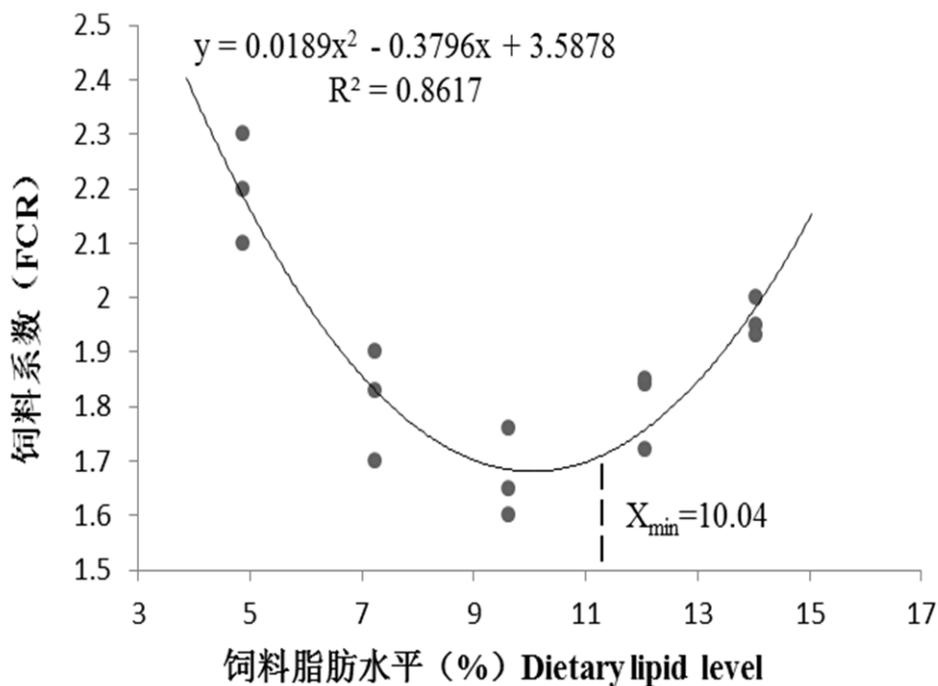


图 3-2 饲料脂肪水平与饲料系数的二次回归分析

Fig. 3-2 Second-order regression analysis between feed conversion rate (FCR) and dietary crude lipid level

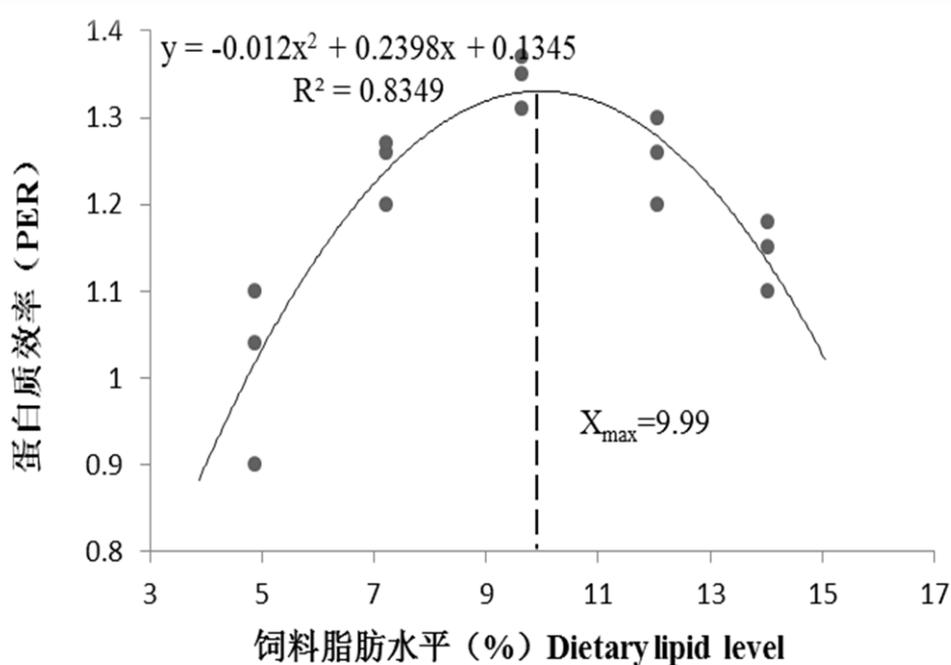


图 3-3 饲料脂肪水平与蛋白质效率的二次回归分析

Fig. 3-3 Second-order regression analysis between protein efficiency ratio (PER) and dietary crude lipid level

3.4.2 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼血液指标的影响

如表 3-3, 血浆甘油三酯 (TG) 和总胆固醇 (T-CHO) 的含量均随着饲料脂肪水平的升高而升高, 且饲料脂肪水平为 12.07 % 和 14.04 % 的试验组含量显著高于 4.87 % 的试验组 ($P < 0.05$)。血浆谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性随着饲料脂肪水平的升高呈现上升的趋势, 且在饲料脂肪水平为 14.04 % 时值最大, 显著高于其他试验组 ($P < 0.05$)。

表 3-3 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼血液指标的影响

Table 3-3 Effect of dietary lipid level on plasma chemistry of juvenile Dabry's sturgeon

指标 Index	饲料脂肪水平 Dietary lipid level (%)				
	4.87	7.23	9.63	12.07	14.04
谷丙转氨酶 ALT(U/L)	46.99±3.42 ^a	53.27±4.16 ^{ab}	49.99±13.43 ^a	67.71±3.65 ^{ab}	84.62±4.11 ^c
谷草转氨酶 AST(U/L)	132.57±8.62 ^a	146.19±8.54 ^{ab}	160.61±6.01 ^{ab}	165.15±11.40 ^b	203.18±13.67 ^c
甘油三酯 TG(mmol/L)	1.59±0.30 ^a	1.95±0.36 ^{ab}	2.22±0.31 ^{ab}	2.60±0.30 ^b	2.82±0.06 ^b
总胆固醇 T- CHO(mmol/L)	1.49±0.14 ^a	2.05±0.38 ^{ab}	2.18±0.26 ^{ab}	2.65±0.09 ^b	2.67±0.18 ^b

注: 数据表示为平均值±标准误 (n=3), 同行上标不同字母者存在显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: Values are the mean ±SE of triplicates. Means in the same row with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$).

3.4.3 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼组织消化酶活力的影响

如表 3-4, 胃蛋白酶活力随饲料脂肪水平的升高呈现先上升后下降的趋势, 但各试验组间无显著差异。脂肪酶活性与饲料脂肪含量的增加呈现先上升后平缓的变化趋势。在饲料脂肪水平从 4.87 % 到 12.07 %, 脂肪酶活力呈显著性升高 ($P < 0.05$), 饲料脂肪水平高于 12.07 % 时, 则无显著差异 ($P > 0.05$)。淀粉酶活性随饲料脂肪含量的增加呈现先上升后下降的趋势, 且在饲料脂肪水平为 12.07 % 时活性最高并显著高于其他试验组 ($P < 0.05$)。

表 3-4 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼消化酶活力的影响

Table 3 - 4 Effect of dietary lipid level on digestive enzyme activities of juvenile Dabry's sturgeon

指标 Index	饲料脂肪水平 Dietary lipid level (%)				
	4.87	7.23	9.63	12.07	14.04
胃蛋白酶 (U/mg)	6.48±0.30	7.21±0.10	7.54±0.35	6.70±0.17	6.28±0.50
脂肪酶 (U/g)	2.16±0.80 ^a	5.26±0.69 ^b	9.80±0.58 ^c	13.99±0.70 ^d	14.28±0.39 ^d
淀粉酶 (U/mg)	44.11±1.70 ^a	71.5±0.35 ^{bc}	76.99±13.48 ^{bc}	92.48±1.45 ^c	62.57±5.15 ^{ab}

注: 数据表示为平均值±标准误 (n=3), 同行上标不同字母者存在显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: Values are the mean ±SE of triplicates. Means in the same row with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$).

3.4.4 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼体成分的影响

如表 3 - 5, 全鱼及肌肉水分随饲料脂肪水平的升高而呈现下降的趋势。随着饲料脂肪水平的升高全鱼及肌肉的粗脂肪含量也显著提高 ($P < 0.05$)。全鱼粗灰分含量随饲料脂肪水平的提高呈现下降的趋势, 且在饲料脂肪水平为 4.87 % 时, 其含量显著高于其他试验组 ($P < 0.05$)。肌肉粗灰分含量则呈现先上升后下降的趋势, 且在饲料脂肪水平为 12.07 % 时值最大。全鱼及肌肉的粗蛋白含量在各试验组之间无明显差异。

表 3-5 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼体成分的影响

Table 3-5 Effect of dietary lipid level on whole body and dorsal muscle composition of juvenile

Dabry's sturgeon				
饲料脂肪水平 Dietary lipid level (%)	水分 Moisture	粗蛋白 Crude protein	粗脂肪 Crude lipid	灰分 Ash
全鱼成分				
初始	76.46±0.53	12.18±0.14	4.05±0.03	3.16±0.04
4.87	77.59±0.45 ^a	14.13±0.49	5.59±0.01 ^a	3.14±0.03 ^a
7.23	76.14±0.34 ^a	15.16±0.30	6.38±0.05 ^b	2.30±0.01 ^b
9.63	73.16±0.60 ^b	14.29±0.01	8.84±0.01 ^c	2.22±0.06 ^b
12.07	72.95±0.29 ^{bc}	14.83±0.13	8.92±0.08 ^c	2.12±0.08 ^b
14.04	71.09±0.79 ^c	14.32±0.46	10.86±0.12 ^d	2.24±0.14 ^b
肌肉成分				
4.87	77.99±0.03 ^{bc}	16.87±0.15	1.56±0.05 ^a	1.14±0.01 ^{ab}
7.23	77.39±0.23 ^{ab}	16.92±0.06	1.62±0.20 ^a	1.15±0.02 ^{ab}
9.63	77.32±0.10 ^{ab}	17.35±0.14	2.12±0.34 ^{ab}	1.19±0.02 ^{bc}
12.07	78.68±0.01 ^c	17.09±0.14	2.74±0.01 ^{bc}	1.22±0.01 ^c
14.04	76.30±0.69 ^a	16.88±0.13	3.26±0.47 ^c	1.12±0.01 ^a

注: 数据表示为平均值±标准误 (n=3), 同行上标不同字母者存在显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: Values are the mean ±SE of triplicates. Means in the same row with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$).

3.5 讨论

3.5.1 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼生长的影响

本试验通过分别对增重率、饲料系数以及蛋白质效率与饲料蛋白水平的二次回归分析, 得出达氏鲟幼鱼适合的脂肪需要量范围为 9.99%~10.56%。这个结果与其他鲟鱼略有不同, 如中华鲟脂肪需要量为 9.1%, 高首鲟为 17%, 杂交鲟(西伯利亚鲟♀×俄罗斯鲟♂)为 11.1% (肖慧等 1999; Gawlicka et al 2002; Guo et al 2011)。

许多研究表明, 饲料中适量的脂肪含量能够促进鱼体的生长, 节约蛋白, 提高饲料利用率 (Vergara et al 1996, 1999); 但饲料脂肪过低和过高都不利于鱼类生长。当饲料脂肪过低时, 会造成鱼类因能量摄入不足, 转而分解蛋白质来功能, 满足机体需要 (王贵英等 2003; 郑珂珂等 2010); 当饲料脂肪过高时, 则会造

成鱼类摄食率下降,并且降低对营养物质的消化吸收能力,加重鱼体脂肪的堆积,严重的会造成内脏尤其是肝脏功能的损伤(张春暖等 2012;段彪等 2007;池作授等 2010;陈建明等 2007;Chou et al 2001;Lee et al 2002)。在本试验中,当饲料脂肪水平从 4.87 %升高到 9.63 %时,达氏鲟的增重率和蛋白质效率都是增加的,饲料系数在下降;当饲料脂肪水平高于 9.63 %时,达氏鲟的特性生长率和蛋白质效率都呈下降趋势,饲料系数开始上升,摄食率降低,这种情况验证了以上的观点。

3.5.2 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼血液指标的影响

血液指标通常会从侧面反映出鱼类的健康状况。大量研究表明,血脂的含量能够反映机体的新陈代谢和生理状况。甘油三酯和胆固醇水平是血脂的重要指标,二者皆由肝脏进行合成,因此血液中二者的含量变化通常能够反映肝脏的脂肪代谢情况(程汉良等 2006)。Ding 等(2010)认为胆固醇和甘油三酯含量升高表明动物内生脂肪转运活跃,是脂肪运输系统对高脂饲料的应答反应。本试验中,试验鱼血浆的甘油三酯和总胆固醇含量随饲料脂肪水平的升高而增加,且二者变化趋势类似。一般情况下,血浆内二者的含量都很低。但当肝脏发生损伤和病变时,其含量就会升高,因此,谷丙转氨酶和谷草转氨酶通常作为反映鱼类肝功能的重要指标。在本研究中,当饲料脂肪水平达到 14.04 %时,这二者含量明显高于其他试验组,所以可能这一试验组的鱼由于较高的饲料脂肪水平,其肝脏发生病变。

3.5.3 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼组织消化酶活力的影响

有研究指出,饲料脂肪水平对吉富罗非鱼胃及肠道的蛋白酶活力无显著影响(韩光明等 2010)。本试验中蛋白酶活力与之类似,受饲料脂肪水平影响不显著。但也有研究认为饲料脂肪水平对蛋白酶活力有显著影响。如在白甲鱼和胭脂鱼的研究发现,肠道蛋白酶随饲料脂肪水平的升高呈下降的趋势(邹陈海等 2013;王朝明等 2010);翘嘴红鲌则随饲料脂肪水平呈现先上升后下降的趋势(向泉等 2008)。这些研究表明,饲料脂肪水平对蛋白酶活力的影响因鱼种类、生长阶段、饲料组成以及试验环境条件等而异。

脂肪酶活性与饲料脂肪水平的关系因鱼而异。王重刚等(1998)对真鲷的研

研究发现脂肪酶活性与饲料脂肪水平呈负相关关系。章龙珍等（2014）在奥罗罗非鱼和点篮子鱼的研究中则发现脂肪酶活性随饲料脂肪水平的升高呈现先上升后下降的趋势。本试验中鱼类脂肪酶活性随饲料脂肪水平的增加而增加，与斜带石斑鱼、日本鲈、褐菖鲉等的结果类似（岳彦峰等 2012；Luo et al 2010；董晓慧等 2015）。这表明达氏鲟会通过提高脂肪酶活性来提高对高脂肪水平饲料的消化吸收。

本试验中淀粉酶活性随饲料脂肪水平呈现先上升后下降的趋势，与翘嘴红鲌的研究类似（向泉等 2008）。但有研究指出，饲料脂肪水平高时会降低金头鲷消化液分泌量和淀粉酶活性（Fountoulaki et al 2005）。许多研究发现淀粉酶活力受饲料脂肪水平影响不显著，如胭脂鱼、黑尾近红鲌、鳮鱼等（赵巧娥 2011；王朝明等 2010；李伟东 2014）。但也有学者指出淀粉酶活力受饲料淀粉含量影响，淀粉含量越高，淀粉酶活力越大。因此，对于饲料脂肪水平是否影响淀粉酶活性仍然需要进一步研究。

3.5.4 不同饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼体成分的影响

研究表明，饲料脂肪水平能够显著影响鱼体脂肪含量。鱼类可以将饲料中多余的脂肪储存在身体中。这在罗非鱼、团头鲂、尖吻鲈、花鲢、金头鲷以及樱鲮等鱼身上得到验证（Ai et al 2008；Vergara et al 1999；Kim et al 2012；Williams et al 2003；Lee and Kim 2001；Li et al 2010）。另外，大量研究表明，随着饲料脂肪水平的升高，内脏的脂肪堆积也随之增加。在本试验中，当饲料脂肪水平从 9.63 % 升到 14.04 % 时，各试验组的肝体比和脏体比均有小幅上涨，但彼此之间无明显差异。这表明达氏鲟可能具有较好的将内脏多余的脂肪向周围组织运输的能力，这和高首鲟、波斯鲟以及杂交鲟（西伯利亚鲟♀ × 俄罗斯鲟♂）等的研究类似（Gawlicka et al 2002；Hung et al 1997；Guo et al 2011；Mohseni et al 2007）。本试验中鱼体和肌肉蛋白含量受饲料脂肪水平影响不显著，与胭脂鱼、赤眼鲮、异育银鲫等的研究类似（郑惠芳等 2009；王爱民等 2010；王朝明等 2010）。饲料脂肪水平对鱼体水分和灰分的影响因鱼而异，如大西洋比目鱼，其鱼体水分和灰分含量不受饲料脂肪水平的影响（Martins et al 2007）；Lopez 等（2009）对有名锤形石首鱼的研究显示，鱼体水分随饲料脂肪水平的升高而降低，灰分则正好相反，随饲料脂肪水平的升高而升高。

3.6 结论

适宜的饲料脂肪水平可以促进达氏鲟幼鱼的生长，提高饲料利用效率，增强鱼体免疫力，但过高的饲料脂肪水平则会抑制鱼体生长，加重鱼体肝脏负担甚至引起病变。在本试验条件下，综合考虑饲料脂肪水平对达氏鲟幼鱼生长指标，血液生化指标，消化酶活性及鱼体成分的影响，得出平均体重为 417.54 ± 5.23 g 的达氏鲟幼鱼的脂肪需要量为 9.99 %~10.56 %。

参考文献

1. 安瑞永, 李同庆, 邢浩春, 杜利强. 饲料蛋白水平对史氏鲟幼鱼鱼体生化组成的影响. 中国动物学会北方七省市动物学会学术研讨会论文集. 中国动物学会北方七省市动物学会学术研讨会. 太原, 2005, 6
2. 陈建明, 叶金云, 沈斌乾, 潘茜, 王友慧. 花鲢饲料中脂肪适宜水平的研究. 饲料工业, 2007, 18: 20-22
3. 程汉良, 夏德全, 吴婷婷. 鱼类脂类代谢调控与脂肪肝. 动物营养学报, 2006, 4: 294 - 298
4. 池作授, 耿旭, 郭云学, 董晓慧, 黄翔鹤, 王辉, 陈刚, 李瑞伟. 奥尼罗非鱼仔稚鱼饲料中适宜脂肪水平的研究. 中国饲料, 2010, 20: 32 - 36
5. 丁立云, 张利民, 王际英, 孙丽慧, 帅继祥, 崔立娇, 孙永智. 饲料蛋白水平对星斑川鲮幼鱼生长、体组成及血浆生化指标的影响. 中国水产科学, 2010, 6: 1285 - 1292
6. 董晓慧, 杨俊江, 谭北平, 杨奇慧, 迟淑艳, 刘泓宇. 幼鱼和养成阶段斜带石斑鱼对饲料中脂肪的需要量. 动物营养学报, 2015, 1: 133 - 146
7. 段彪, 向泉, 周兴华, 郑宗林, 吴青. 齐口裂腹鱼饲料中适宜脂肪需要量的研究. 动物营养学报, 2007, 3: 232 - 236
8. 方桂萍. 蛋白质水平对蒙古鲌生长、体成分及消化酶活性的影响. [硕士学位论文]. 福州: 福建农林大学图书馆, 2014
9. 韩光明, 王爱民, 徐跑, 罗前明, 孙雪. 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. 上海海洋大学学报, 2010, 4: 469 - 474
10. 黄耀桐, 刘永坚. 草鱼肠道肝胰脏蛋白酶活性初步研究. 水生生物学报, 1988, 4: 328 - 334
11. 乐佩琦, 陈宜瑜. 中国濒危动物红皮书 鱼类. 北京: 科学出版社. 1998 247 p
12. 李金秋, 林建斌, 朱庆国, 马燕梅, 梅景良, 邱曼丽. 不同能量蛋白比饲料对牙鲈体内消化酶活性的影响. 集美大学学报(自然科学版), 2005, 4: 296 - 299

13. 李伟东. 饲料脂肪水平对黑尾近红鲌生长性能、鱼体成分及消化酶活性的影响. [硕士学位论文]. 武汉: 武汉轻工大学图书馆, 2014
14. 林建斌, 李金秋, 王剑锋, 朱庆国, 宋国华. 不同能量蛋白质比饲料对点带石斑鱼幼鱼体内消化酶活性的影响. 中国饲料, 2008, 14: 33 - 35
15. 林仕梅, 罗莉, 叶元土, 尹恒, 周继术. 饲料蛋白能量比、非植酸磷水平对中华绒螯蟹氮、磷排泄和转氨酶活力的影响. 中国水产科学, 2001, 4: 62 - 66
16. 刘伟, 文华, 周俊, 罗晓松. 氯化胆碱对中华鲟幼鱼生长和生理指标的影响. 水利渔业, 2007, 3: 91 - 93
17. 鲁琼, 王立改, 楼宝, 詹炜, 陈睿毅, 罗胜玉, 刘佳节, 王肇霖. 饲料蛋白质水平对黄姑鱼幼鱼生长性能、体组成和消化酶活性的影响. 动物营养学报, 2015, 12: 3763 - 3771
18. 吕耀平, 陈建明, 叶金云, 黄旭雄, 劳沈颖, 沈斌乾, 姚子亮, 郭建林, 叶丽平. 饲料蛋白质水平对刺鲃幼鱼的生长、胴体营养组成及消化酶活性的影响. 农业生物技术学报, 2009, 2: 276 - 281
19. 钱曦, 王桂芹, 周洪琪, 陈建明, 叶金云, 潘茜, 王友慧. 饲料蛋白水平及豆粕替代鱼粉比例对翘嘴红鲌消化酶活性的影响. 动物营养学报, 2007, 2: 182 - 187
20. 邱岭泉, 曲秋芝, 张永旺. 饲料中添加不同含量脂肪对俄罗斯鲟稚鱼生长的影响. 水产学杂志, 2001, 2: 57 - 60
21. 邵庆均, 苏小凤, 许梓荣, 舒妙安. 饲料蛋白水平对宝石鲈生长和体组成影响研究. 水生生物学报, 2004, 4: 367 - 373
22. 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研究. 成都: 四川科学技术出版社, 1988
23. 孙翰昌, 徐敬明, 庞敏. 饲料蛋白水平对瓦氏黄颡鱼消化酶活性的影响. 水生生态学杂志, 2010, 2: 84 - 88
24. 王爱民, 吕富, 杨文平, 於叶兵, 韩光明, 王春维, 吴灵英, 刘文斌, 王恬. 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. 动物营养学报, 2010, 3: 625 - 633

25. 王常安, 徐奇友, 徐伟, 许红, 赵志刚, 罗亮, 苗建发, 王洋. 饲料蛋白质水平对大鳞鲃幼鱼消化酶活性的影响. 天津农学院学报, 2012, 3: 26 - 31
26. 王朝明, 罗莉, 张桂众, 尚卫敏, 贾思超, 丛潇飞, 颜忠, 刘本祥. 饲料脂肪水平对胭脂鱼生长性能、肠道消化酶活性和脂肪代谢的影响. 动物营养学报, 2010, 4: 969 - 976
27. 王贵英, 曾可为, 郑翠华, 李清. 饲料脂肪水平对鳊鱼生长的影响研究. 淡水渔业, 2003, 2: 11 - 12
28. 王兰明, 宋理平, 朱永安, 师吉华, 马国红, 王爱英. 饲料蛋白水平对宝石鲈增重和体成分的影响. 淡水渔业, 2008, 4: 76 - 79
29. 王连生, 许红, 王洋, 王常安, 李晋南, 赵志刚, 罗亮, 都雪, 徐奇友. 维生素 K3 对西伯利亚鲟生长和抗氧化功能的影响. 大连海洋大学学报, 2015, 6: 641 - 646
30. 王重刚, 陈品健, 顾勇, 陆浩. 不同饵料对真鲷稚鱼消化酶活性的影响. 海洋学报 (中文版), 1998, 4: 103 - 106
31. 温小波, 库天梅, 罗静波. 中华鲟配合饲料适宜蛋白质含量及最佳蛋白能量比研究. 海洋科学, 2003, 4: 38 - 43
32. 文华, 严安生, 高强, 刘伟, 危起伟. 史氏鲟幼鲟对饲料中磷的需要量. 水产学报, 2008, 2: 242 - 248
33. 向泉, 周兴华, 陈建, 段彪. 饲料中脂肪含量对翘嘴红鲌幼鱼消化酶活性的影响. 北京水产, 2008, 5: 35 - 38
34. 肖慧, 王京树, 文志豪, 鲁雪豹, 刘海. 中华鲟幼鱼饲料营养素适宜含量的研究. 中国水产科学, 1999, 4: 33 - 38
35. 肖懿哲, 陈月忠. 饲料脂肪含量对施氏鲟生长及其肝脏脂质组成的影响. 台湾海峡, 2001, 3: 376 - 380
36. 邢浩春. 维生素 B₆ 对史氏鲟幼鱼摄食生长及能量收支的影响. [硕士学位论文]. 石家庄: 河北师范大学图书馆, 2005
37. 邢西谋. 饲料蛋白质水平对俄罗斯鲟幼鲟生长的影响. 淡水渔业, 2003, 4: 14 - 16
38. 杨弘, 徐起群, 乐贻荣, 祝璟琳, 肖炜, 李大宇, 邹芝英. 饲料蛋白质水平

- 对尼罗罗非鱼幼鱼生长性能、体组成、血液学指标和肝脏非特异性免疫指标的影响. 动物营养学报, 2012, 12: 2384 - 2392
39. 杨磊. 蛋白质水平对鳃幼鱼生长、消化和蛋白质代谢的影响. [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学图书馆, 2011
40. 岳彦峰, 彭士明, 施兆鸿, 李云航, 孙鹏, 尹飞, 王建钢. 饲料脂肪水平对褐菖鲉生长、肠道消化酶及主要脂代谢酶活力的影响. 南方水产科学, 2012, 6: 50 - 56
41. 张春暖, 王爱民, 刘文斌, 杨文平, 於叶兵, 齐志涛, 张微微, 王莹. 饲料脂肪水平对梭鱼生长、营养物质消化及体组成的影响. 江苏农业学报, 2012, 5: 1088 - 1095
42. 张海涛, 李国立, 孙翠慈, 王安利. 营养素对鱼类脂肪肝病变的影响. 海洋通报, 2004, 1: 82 - 89
43. 张文兵, 谢小军, 付世建, 曹振东. 南方鲇的营养学研究: 饲料的最适蛋白质含量. 水生生物学报, 2000, 6: 603 - 609
44. 章龙珍, 朱卫, 王好, 刘鉴毅, 宋超, 赵峰, 张涛, 杨刚. 饲料脂肪水平对点篮子鱼消化酶活性和血液主要生化指标的影响. 海洋渔业, 2014, 2: 170 - 176
45. 赵巧娥. 饲料脂肪水平对鳃幼鱼生长、血液生化指标及消化生理的影响. [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学图书馆, 2011
46. 郑惠芳, 夏中生, 林岗, 李秀珍, 徐开望, 张世举. 饲料蛋白质和脂肪水平对赤眼鲟生长和鱼体营养成分的影响. 淡水渔业, 2009, 2: 42 - 47
47. 郑珂珂, 朱晓鸣, 韩冬, 杨云霞, 雷武, 解绶启. 饲料脂肪水平对瓦氏黄颡鱼生长及脂蛋白脂酶基因表达的影响. 水生生物学报, 2010, 4: 815 - 821
48. 卓立应. 饲料蛋白能量比对黑鲷幼鱼生长和体组成的影响. [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学图书馆, 2006
49. 邹陈海, 向泉, 王天值, 黄辉, 杨绍卿, 张建中. 饲料脂肪水平对白甲鱼幼鱼消化酶活性的影响. 渔业现代化, 2013, 2: 39 - 44
50. Abbas G, Siddiqui P J. The effects of varying dietary protein level on growth, feed conversion, body composition and apparent digestibility coefficient of juvenile mangrove red snapper, *Lutjanus argentimaculatus* (Forsskal 1775). *Aquac Res*

- 2013, 44, 807–818
51. Agnisola C, McKenzie D J. Cardiac performance in relation to oxygen supply varies with dietary lipid composition in sturgeon. *Am J Physiol* 1996, 271, 417–425
 52. Ai Q H, Zhao J Z, Mai K S, Xu W, Tan B P, Ma H M, Liufu Z G. Optimal dietary lipid level for large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) larvae. *Aquacult Nutr* 2008, 14, 8
 53. Chou B S, Shiau S Y. Optimal dietary lipid level for growth of juvenile hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus*. *Aquaculture*, 1996, 143, 185–195
 54. Chou R L, Su M S, Chen H Y. Optimal dietary protein and lipid levels for juvenile cobia (*Rachycentron canadum*). *Aquaculture*, 2001, 193, 81–89
 55. Deng D F, Hung S S O, Conklin D E, C. Lipids and Fatty Acids – White sturgeon (*Acipenser transmontanus*) require both n–3 and n–6 fatty acids. *Aquaculture*, 1998, 333–335
 56. Debnath D, Pal A, Sahu N, Yengkokpam S, Baruah K, Choudhury D, Venkateswarlu G. Digestive enzymes and metabolic profile of *Labeo rohita* fingerlings fed diets with different crude protein levels. *Comp Biochem Phys B* 2007, 146, 107–114
 57. Ding L, Zhang L, Wang J, Ma J, Meng X, Duan P, Sun L, Sun Y. Effect of dietary lipid level on the growth performance, feed utilization, body composition and blood chemistry of juvenile starry flounder (*Platichthys stellatus*). *Aquac Res* 2010, 41, 1470–1478
 58. Du H, Wei Q W, Xie X, Shi L L, Wu J M, Qiao X M, Liu Z G. Improving swimming capacity of juvenile Dabry's sturgeon, (*Acipenser dabryanus* Dumeril, 1869) in current-enriched culture tanks. *J Appl Ichthyol* 2014, 30, 1445–1450
 59. Du Z Y, Liu Y J, Tian L X, Wang J T, Wang Y, Liang G Y. Effect of dietary lipid level on growth, feed utilization and body composition by juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *Aquacult Nutr* 2005, 11, 139–146
 60. El Dakar A Y, Shalaby S M, Saoud I P. Dietary protein requirement of juvenile

- marbled spinefoot rabbitfish *Siganus rivulatus*. *Aquac Res* 2011, 42, 1050–1055
61. Fontagne S, Bazin D, Breque J, Vachot C, Bernarde C, Rouault T, Bergot P. Effects of dietary oxidized lipid and vitamin A on the early development and antioxidant status of Siberian sturgeon (*Acipenser baeri*) larvae. *Aquaculture*, 2006, 257, 400–411
 62. Fountoulaki E, Alexis M N, Nengas I, Venou B. Effect of diet composition on nutrient digestibility and digestive enzyme levels of gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.). *Aquac Res* 2005, 36, 1243–1251
 63. Gawlicka A, Herold M A, Barrows F T, de la Noue F T, Hung S S O. Effects of dietary lipids on growth, fatty acid composition, intestinal absorption and hepatic storage in white sturgeon (*Acipenser transmontanus* R.) larvae. *J Appl Ichthyol* 2002, 18, 673–681
 64. González-Rodríguez Á, Celada J D, Carral J M, Sáez-Royuela M, Fuertes J B. Evaluation of a practical diet for juvenile tench (*Tinca tinca* L.) and substitution possibilities of fish meal by feather meal. *Anim Feed Sci Tech* 2014, 187, 61–67
 65. Guo Z, Zhu X, Liu J, Han D, Yang Y, Lan Z, Xie S. Effects of dietary protein level on growth performance, nitrogen and energy budget of juvenile hybrid sturgeon, *Acipenser baerii* ♀×*A. gueldenstaedtii* ♂. *Aquaculture*, 2012, 338–341, 89–95
 66. Guo Z, Zhu X, Liu J, Han D, Yang Y, Xie S, Lan Z. Dietary lipid requirement of juvenile hybrid sturgeon, *Acipenser baerii*♀×*A. gueldenstaedtii*♂. *J Appl Ichthyol* 2011, 27, 743–748
 67. Hung S S O, Storebakken T, Cui Y, Tian L, Einen O. High-energy diets for white sturgeon, *Acipenser transmontanus* Richardson. *Aquacult Nutr* 1997, 3, 281–286
 68. Hung S S O. Choline requirement of hatchery-produced juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*). *Aquaculture*, 1989, 78, 183–194
 69. Jiang M, Liu W, Wen H, Huang F, Wu F, Tian J, Yang C G, Wang W M, Wei Q W. 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 Appl Ichthyol* 2014, 30, 1613–1619
 70. Kawai S, Ikeda S. Studies on digestive enzymes of fishes. 4. Development of

- digestive enzymes of carp and black sea bream after hatching. *Bull Jap Soc Sci Fish* 1973a, 39, 877–881
71. Kawai S I, Ikeda S. Studies on digestive enzymes of fishes. 3. Development of digestive enzymes of rainbow-trout after hatching and effect of dietary change on activities of digestive enzymes in juvenile stage. *Bull Jap Soc Sci Fish* 1973b, 39, 819–823
72. Kim K D, Lim S G, Kang Y J, Kim K W, Son M H. Effects of Dietary Protein and Lipid Levels on Growth and Body Composition of Juvenile Far Eastern Catfish *Silurus asotus*. *Asian Austral J Anim* 2012, 25, 369–374
73. Kim L O, Lee S M. Effects of the dietary protein and lipid levels on growth and body composition of bagrid catfish, *Pseudobagrus fulvidraco*. *Aquaculture*, 2005, 243, 323–329
74. Kim S S, Lee K J. Dietary protein requirement of juvenile tiger puffer (*Takifugu rubripes*). *Aquaculture*, 2009, 287, 219–222
75. Lee S M, Jeon I G, Lee J Y. Effects of digestible protein and lipid levels in practical diets on growth, protein utilization and body composition of juvenile rockfish (*Sebastes schlegeli*). *Aquaculture*, 2002, 211, 227–239
76. Lee S M, Kim K D. Effects of dietary protein and energy levels on the growth, protein utilization and body composition of juvenile masu salmon (*Oncorhynchus masou* Brevoort). *Aquac Res* 2001, 32, 39–45
77. Li X f, Liu W b, Jiang Y y, Zhu H, Ge X p. Effects of dietary protein and lipid levels in practical diets on growth performance and body composition of blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*) fingerlings. *Aquaculture*, 2010, 303, 65–70
78. Lopez L M, Durazo E, Viana M T, Drawbridge M, Bureau D P. Effect of dietary lipid levels on performance, body composition and fatty acid profile of juvenile white seabass, *Atractoscion nobilis*. *Aquaculture*, 2009, 289, 101–105
79. Luo G, Xu J, Teng Y, Ding C, Yan B. Effects of dietary lipid levels on the growth, digestive enzyme, feed utilization and fatty acid composition of Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicus* L.) reared in freshwater. *Aquac Res* 2010, 41, 210–219

80. Médale F, Blanc D, Kaushik S J. Studies on the nutrition of Siberian sturgeon, *Acipenser baeri*. II. Utilization of dietary non-protein energy by sturgeon. *Aquaculture*, 1991, 93, 143–154
81. Martins D A, Valente L M P, Lall S P. Effects of dietary lipid level on growth and lipid utilization by juvenile Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*, L.). *Aquaculture*, 2007, 263, 150–158
82. McKenzie D J, Piraccini G, Papini N, Galli C, Bronzi P, Bolis C G, Taylor E W. Oxygen consumption and ventilatory reflex responses are influenced by dietary lipids in sturgeon. *Fish Physiol Biochem* 1997, 16, 365–379
83. Mohseni M, Pourali H R, Kazemi R, Bai S C. Evaluation of the optimum dietary protein level for the maximum growth of juvenile beluga (*Huso huso* L.1758). *Aquac Res* 2014, 45, 1832–1841
84. Mohseni M, Pourkazemi M, Hosseni M R, Hassani M H S, Bai S C. Effects of the dietary protein levels and the protein to energy ratio in sub-yearling Persian sturgeon, *Acipenser persicus* (Borodin). *Aquac Res* 2013, 44, 378–387
85. 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 Appl Ichthyol* 2007, 23, 204–208
86. Moore B J, Hung S S O, Medrano, J. F. Protein requirement of hatchery-produced juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*). *Aquaculture*, 1988, 71, 235–245
87. 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. *Fish Physiol Biochem* 1996, 15, 431–438
88. Ng W K, Hung S S O. Amino acid composition of whole body, egg and selected tissues of white sturgeon (*Acipenser transmontanus*). *Aquaculture*, 1994, 126, 329–339
89. Ng W K, Hung S S O, Herold M A. Poor utilization of dietary free amino acids by

- white sturgeon. *Fish Physiol Biochem* 1996, 15, 131–142
90. Ng W K, Soon S C, Hashim R. The dietary protein requirement of a bagrid catfish, *Mystus nemurus* (Cuvier, Valenciennes), determined using semipurified diets of varying protein level. *Aquacult Nutr* 2001, 7, 45–51
91. Shyong W J, Huang C H, Chen H C. Effects of dietary protein concentration on growth and muscle composition of juvenile *Zacco barbata*. *Aquaculture*, 1998, 167, 35–42
92. Skalli A, Hidalgo M, Abellán E, Arizcun M, Cardenete G. Effects of the dietary protein/lipid ratio on growth and nutrient utilization in common dentex (*Dentex dentex* L.) at different growth stages. *Aquaculture*, 2004, 235, 1–11
93. Stuart J S, Hung S S O. Growth of juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) fed different proteins. *Aquaculture*, 1989, 76, 303–316
94. Tashjian D H, Teh S J, Sogomonyan A, Hung S S O. 2006. Bioaccumulation and chronic toxicity of dietary L-selenomethionine in juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*). *Aquat Toxicol* 2006, 79, 401–409
95. Tibbetts S M, Lall S P, Anderson D M. Dietary protein requirement of juvenile American eel (*Anguilla rostrata*) fed practical diets. *Aquaculture*, 2000, 186, 145–155
96. Vergara J M, Robain L, Izquierdo M, Higuera M D L. Protein Sparing Effect of Lipids in Diets for Fingerlings of Gilthead Sea Bream. *Fisheries Sci* 1996, 62, 624–628
97. Vergara J M, López-Calero G, Robaina L, Caballero M J, Montero D, Izquierdo M S, Aksnes A. Growth, feed utilization and body lipid content of gilthead seabream (*Sparus aurata*) fed increasing lipid levels and fish meals of different quality. *Aquaculture*, 1999, 179, 35–44
98. Wang F, Han H, Wang Y, Ma X. Growth, feed utilization and body composition of juvenile golden pompano (*Trachinotus ovatus*) fed at different dietary protein and lipid levels. *Aquacult Nutr* 2013, 19, 360–367
99. Williams K C, Barlow C G, Rodgers L, Hockings I, Agcopra C, Ruscoe I. Asian seabass (*Lates calcarifer*) perform well when fed pelleted diets high in protein and

- lipid. *Aquaculture*, 2003, 225, 191–206
100. Yang S D, Lin T S, Liou C H, Peng H K. Influence of dietary protein levels on growth performance, carcass composition and liver lipid classes of juvenile *Spinibarbus hollandi* (Oshima). *Aquac Res* 2003, 34, 661–666
101. Zhang H, Wei Q W, Du H, Li L X. 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 Appl Ichthyol* 2011, 27, 181–185

附录 I 攻读学位期间发表的论文

1. 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. (接收待发表)
2. Zhang Lei, Zhang Shu Huan, Xie Jiang, Chu Zhi Peng, Wei Qi Wei, Wei Kai Jian. Effects of Dietary Lipid Levels on Growth Performance, Blood Biochemical Parameters and Body Composition of Juvenile Dabry's Sturgeon (*Acipenser dabryanus*). Journal of the World Aquaculture Society. (under review)

附录 II 攻读学位期间参加的学术会议及科学实践

1. 2016.1, 濒危水生动物保护学术交流会, 武汉: 长江水产研究所
2. 2013.10~2013.11、2014.10~2014.12、2015.10~2015.12 葛洲坝下中华鲟野生资源调查
3. 2014.5、2015.5, 达氏鲟全人工繁殖, 荆州: 太湖中华鲟保育和增殖放流中心, 摄像、亲鱼体检、卵苗观察鉴定取样

致谢

时光荏苒，3年的研究生生活也接近了尾声，曾无数次的期盼快点毕业，但真到了要离开的时候，心中却又难以割舍。这三年的经历教会了我很多，也让我结识了許多人，让我时刻心存感恩。

首先，向我的两位导师魏开建副教授、危起伟研究员表示由衷的感谢。本论文从课题选择、试验设计、数据处理以及后期的论文撰写和修改都倾注了两位导师的心血和汗水。同时两位导师温文儒雅的人格魅力，实事求是的科学态度也让我获益良多，对我今后的工作学习有很大的帮助。

感谢长江水产研究所荆州太湖中华鲟保育和增殖放流中心的老师和职工们。感谢乔新美老师，熊伟老师在我试验期间给予的关心和帮助。感谢罗江、吴金平、陈华蓉、肖娇在试验方面的鼎力帮助。感谢李远、胡超在养殖技术上的指导。感谢胡志华、王后健、孙勇虎三位师傅在交通方面的支持。

感谢长江所杜浩副研究员、张辉副研究员、厉萍副研究员、王成友副研究员、吴金明助理研究员、张书环助理研究员、沈丽助理研究员、甘芳助理研究员、刘志刚工程师在试验上的无私建议和指导。感谢周琼女士在财务和日常生活中的帮助。

感谢长江所水产动物营养与饲料课题组文华研究员、吴凡、杨长庚、蒋明、刘伟、田娟对试验的指导。

感谢郭向召师兄、郭闪闪师姐、徐艳师姐、盐若今师姐、王丹丹师姐、王路平师兄，同门张伯池、郑欢、张晓婷，师弟胡涛、王凯伦、徐雷在试验和生活中对我的帮助。

感谢长江所孙庆亮师兄、刘猛师兄、李伟师兄、梁志强师兄、李雷师兄、邵俭师兄、成为为师姐、叶欢师兄、任泷师兄、谢晓师兄、杨晓鸽师姐、蔺丹青师姐、汪珂师姐、辛苗苗师姐、席梦丹师姐、霍来江师兄、李君轶师兄对我试验设计及论文修改的建议和帮助，以及日常生活的关心和帮助。感谢同门杨焕超、郭威、颀璇，师弟颀江、褚志鹏、邸军，师妹黄君在试验和生活中对我的帮助。

感谢同班同学张豹、石西、张晋、房进广、黄松钱、黄翠红、赖瑞芳、金洁南、吴凡、党垚、苏玉晶在我遇到困难时对我的帮助与支持，以及在生活上的关

心。

感谢女友张晓倩在我心情低落时给予的理解和关心，认识你是我这辈子最大的幸运。

本研究得到了国家重点基础研究发展计划（973 计划）：中华鲟性腺发育关键营养物质体内转化的生理基础（No.2015CB150702）的支持，在此表示感谢。

最后特别感谢我的父母，感谢你们对我多年来的养育之恩，是你们多年来的支持与帮助让我能够不断成长，不断进步，无论遇到多大困哪，你们都是我坚实的后盾，谢谢你们！