

四川大學

硕士学位论文

题目 西江流域养殖鱼类受总溶解气体过饱和影响

实验研究

作者 秦雨农 完成日期 2023年05月

培养单位 四川大學

指导教师 梁瑞峰 副研究员

专 业 水力学及河流动力学

研究方向 环境与生态水力学

授予学位日期 年 月 日

分类号_____ 密级_____

UDC 注 _____

学 位 论 文

题目 _____ 西江流域养殖鱼类受总溶解气体过饱和影响实验研究

作者 _____ 秦雨农

单位 _____ 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室

地址 _____ 四川省成都市一环路南一段 24 号

指导教师姓名 _____ 梁瑞峰 职务 _____ 职称 _____ 副研究员 学位 _____ 博士

指导教师姓名 _____ 职务 _____ 职称 _____ 学位 _____

申请学位级别 _____ 硕士 专业名称 _____ 水力学及河流动力学

论文提交日期 _____ 2023 年 5 月 论文答辩日期 _____ 2023 年 5 月

学位授予单位 _____ 四川大学 学位授予日期 _____

答辩委员会主席 _____

评 阅 人 _____

2023 年 5 月

西江流域养殖鱼类受总溶解气体过饱和影响实验研究¹

水力学及河流动力学 专业

硕士研究生 秦雨农 导师 梁瑞峰 副研究员

摘要

伴随着水电项目的不断开发,高坝泄洪导致下游河道出现总溶解气体(Total Dissolved Gas, 简称TDG)过饱和现象所引发的生态环境问题已日益突出,天然河道中的TDG过饱和会使得生存在河流中的鱼类患上气泡病(Gas Bubble Disease, 简称GBD),严重时甚至导致其死亡。在我国,许多学者对长江上游TDG过饱和对鱼类的胁迫影响开展了一系列的研究,但是有关珠江水系TDG过饱和研究较少。由于在不同流域中,TDG生成与释放规律以及鱼类对TDG过饱和的耐受性均存在差异,因此研究珠江上游西江流域高坝泄洪导致下游河道TDG过饱和对鱼类胁迫影响具有重要意义。

本文以西江流域大藤峡水电站为研究基础,采用西江流域养殖鱼类草鱼、鲢鱼以及鳊鱼作为研究对象,通过原型观测试验,研究西江流域养殖鱼类暴露在TDG过饱和水体中不同补偿水深下的存活规律;鱼类受TDG过饱和胁迫下游泳能力变化规律;鱼类受TDG过饱和胁迫下气泡病的形成与发展规律。根据野外原型观测实验的结果,进一步开展室内试验,研究了鲢鱼在受自身水深特性影响下利用补偿水深回避TDG过饱和胁迫的行为规律。本文研究成果可为高坝泄洪下TDG过饱和对鱼类影响研究提供基础数据,为研究鱼类利用补偿水深回避TDG过饱和提供补充材料。本文主要研究成果如下:

(1)养殖鱼类草鱼、鲢鱼以及鳊鱼在在野外环境中受到TDG过饱和胁迫时,在不同水深层工况下的存活率存在显著性差异。草鱼、鲢鱼在表层网箱实验组

¹本文得到国家自然科学基金项目:“长江经济带小水电河流生态系统完整性评估监测与修复(项目编号:U2240212)”、国家重点研发项目:“川滇生态屏障区生态环境综合科学考察与数据库建设(课题3:水系统与水资源利用时空格局与动态变化数据系统)(课题编号:2022FY100203)”和自然科学基金面上项目“高坝工程泄水总溶解气体过饱和环境中的鱼类行为规律(项目编号:52179075)”资助。

和平行组的生存率均显著低于连通网箱0-3m实验组和平行组 ($p < 0.05$)，鲢鱼在表层网箱实验组与平行组的生存率显著低于连通网箱0-3m平行组 ($p < 0.05$)，与连通网箱0-3m实验组之间不存在显著性差异 ($p > 0.05$)，表明补偿水深对鱼类回避TDG过饱和有积极影响。鲢鱼在分层网箱2-3m水深工况下两组平行样的生存率显著低于连通网箱0-3m工况 ($p < 0.05$)，而草鱼平行组和鲢鱼平行组在分层网箱2-3m水深工况下的生存率与连通网箱0-3m水深工况之间不存在显著性差异 ($p > 0.05$)。这一差异是由于不同鱼类的喜好水深不同所导致的。

(2) 养殖鱼类草鱼、鲢鱼以及鲮鱼在野外环境中受到TDG过饱和胁迫会患气泡病。通过建立针对鱼鳍的气泡病严重程度评分标准，本文发现在草鱼受TDG过饱和胁迫下的气泡病形成阶段，胁迫4-11天后试验鱼类气泡病得分显著高于胁迫1-3天后试验鱼类气泡病得分 ($p < 0.05$)。在草鱼受过饱和胁迫下的气泡病恢复阶段，恢复1-3天后试验鱼类气泡病得分没有显著性差异 ($p > 0.05$)，但显著高于恢复4-8天后试验鱼类气泡病得分 ($p < 0.05$)。结果反映了养殖鱼类在短期暴露在TDG过饱和环境下也易患气泡病，并且其气泡病的症状会随胁迫时间的增加而加剧。在TDG过饱和胁迫时间不超过11天的条件下，气泡病症状会随恢复时间的增加而有所减轻。

(3) 在TDG过饱和对草鱼游泳能力影响实验中，通过单因素方差分析后发现试验草鱼的绝对游泳速度 U_{crit-a} 和相对游泳速度 U_{crit-r} 在不同TDG过饱和胁迫时间下没有显著性差异 ($p > 0.05$)。这说明在本试验中，随着TDG过饱和胁迫时间的延长，试验草鱼的临界游泳能力变化不显著。

(4) 在鲢鱼水深适应性室内试验中，TDG饱和度为120%、115%以及110%的过饱和水体中试验鱼所处的平均水深均大于TDG饱和度为100%清水水体试验鱼所处的平均水深。因此可以认为试验鱼类在受到TDG过饱和胁迫下有往更深的水深层游动的趋势，但是鱼类利用补偿水深回避TDG过饱和胁迫的能力还受到自身喜好水深的影响。相较于1-2m和2-3m的水深层，0-1m水深层可以认为是鲢鱼的喜好水深区域。

关键词：养殖鱼类；TDG过饱和；气泡病；游泳能力；补偿水深

Experimental research on the effect of TDG supersaturation on cultured fish in xijiang river basin

Major: Hydraulics and River Dynamics

Postgraduate: **Supervisor:**

Abstract

With the development of hydropower projects, Total Dissolved Gas (TDG) supersaturation phenomena in the downstream rivers caused by high dam discharge have become increasingly prominent ecological and environmental problems. TDG supersaturation in natural river channels can cause Gas Bubble Disease (GBD) in fish living in the river and it can even lead to death in severe cases. In our country, many scholars have conducted a series of researches on the influence of TDG on fish in the upper reaches of Yangtze River. However, there are few researches on TDG supersaturation in the Pearl River System. Since there were differences in the generation and release of TDG and the tolerance of fish to TDG supersaturation in different basin. It is of great significance to study the effect of TDG supersaturation on fish stress caused by high dam discharge in the pearl river basin.

This paper is based on Datexia hydropower station in xijiang river basin, grass carp, silver carp and dace cultured in xijiang river basin were taken as the research object. The development of tolerance, swimming ability, gas bubble disease of grass carp, silver carp and dace under supersaturated TDG stress in xijiang river basin was investigated through prototype observation experiment. According to the results of field prototype observation experiment, further laboratory experiment was carried out to study the distribution of suitable water depth of silver carp, observe their vertical avoidance ability under TDG supersaturation, and explore the fish behavior rule under the influence of multiple factors of suitable water depth and TDG

supersaturation. The research results of this paper can provide basic data for the study of the effect of TDG supersaturation on fish in high dam discharge, and provide supplementary materials for the study of fish avoiding TDG supersaturation by compensating water depth. The main research results of this paper are as follows:

(1) There were significant differences in the survival rates of grass carp, silver carp and dace under TDG supersaturation stress under different water depths. The survival rates of grass carp and silver carp in surface cage experimental group and parallel group were significantly lower than those in connected cage 0-3m experimental group and parallel group ($p<0.05$). The survival rate of dace in surface cage experimental group and parallel group was significantly lower than that in connected cage 0-3m parallel group ($p<0.05$), and no significant difference was found between the connected cage 0-3m group ($p>0.05$), which indicates that the compensated water depth has a positive effect on fish avoiding TDG supersaturation. The survival rate of silver carp with 2-3m water depth was significantly lower than that with 0-3m water depth ($p<0.05$), while dace parallel group and grass carp parallel group have no significant difference in survival rate between 2-3m water depth and 0-3m water depth ($p>0.05$). This difference may be due to the different water depth preferences of different fish species.

(2) Grass carp, silver carp and dace may suffer from gas bubble disease under TDG supersaturation in wild environment. By establishing a rating scale for the severity of gas bubble disease in fins, it was found that there was no significant difference in the bubble disease scores of fish after 4 days, 6 days and 9 days of TDG supersaturation stress ($p>0.05$), but significantly higher than other time periods ($p<0.05$). There was no significant difference in fish bubble disease scores after 5 days, 7 days, 8 days, 10 days and 11 days of stress ($p>0.05$), but significantly higher than fish bubble disease scores after 1 day, 2 days and 3 days of stress ($p<0.05$). There was no significant difference in fish bubble disease scores after 2 days, 3 days of stress ($p>0.05$), but significantly higher than fish bubble disease scores after 1 day of stress ($p<0.05$). In the periods of recovery satage of gas bubble disease, it was found that there was no significant difference in fish bubble disease scores after 1, 2 and 3

days of recovery ($p>0.05$), but significantly higher than other time periods ($p<0.05$). And there was no significant difference in fish bubble disease scores after 4, 5, 6, 7 and 8 days of recovery ($p>0.05$). The results showed that the cultured fish are susceptible to gas bubble disease after short-term exposure to TDG supersaturation and symptoms of gas bubble disease will worsen with the increase of stress time. Under the condition of TDG supersaturation stress for no more than 11 days, the symptoms of bubble sickness will be alleviated with the increase of recovery time

(3) In the experiment on the influence of TDG supersaturation on the swimming ability of grass carp, it was found that the absolute swimming speed $U_{\text{crit-a}}$ and relative swimming speed $U_{\text{crit-r}}$ had no significant difference under different TDG supruration stress time by ANOVA analysis ($p>0.05$). The result indicates that the critical swimming ability of grass carp did not change significantly with the prolongation of TDG supersaturation stress time in this experiment.

(4) In the laboratory test of water depth adaptability of silver carp, the average water depth of test fish in supersaturated water with TDG saturation of 120%, 115% and 110% is greater than that of test fish in clear water with TDG saturation of 100%. The result shows that the test fish tend to swim in deeper water under the stress of TDG supersaturation, indicating that the test fish have the ability to avoid TDG supersaturation by using the compensated water depth. Meanwhile, the ability of fish to avoid TDG supersaturation stress by using compensated water depth is also affected by their preference of water depth. Compared with 1-2m and 2-3m water depth, 0-1m water depth can be considered as the preferred water depth area of silver carp.

Key Words: cultured fish; TDG supersaturation; Gas Bubble Disease; swimming ability; compensated water depth

目 录

1 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 河流 TDG 过饱和对鱼类的影响研究	2
1.3 鱼类受 TDG 过饱和胁迫耐受性研究	4
1.3.1 鱼类气泡病特征.....	4
1.3.2 鱼类对 TDG 过饱和的耐受能力	5
1.4 鱼类受 TDG 过饱和胁迫后游泳能力变化研究.....	7
1.4.1 鱼类游泳能力介绍.....	7
1.4.2 TDG 过饱和对鱼类游泳能力影响	8
1.4.3 影响鱼类游泳行为的其他外界因子.....	9
1.5 鱼类回避 TDG 过饱和研究	10
1.5.1 鱼类的水平回避能力.....	11
1.5.2 鱼类的垂向回避能力.....	11
1.6 本文主要工作.....	12
1.6.1 研究内容.....	12
1.6.2 技术路线.....	13
2 鱼类受 TDG 过饱和胁迫耐受性研究	15
2.1 鱼类不同补偿水深存活率观测试验	15
2.1.1 试验地点与观测时间.....	15
2.1.2 试验材料.....	17
2.1.3 试验方法.....	22
2.2 试验结果分析.....	24
2.2.1 实验期间泄洪数据分析.....	24
2.2.2 实验背景值分析.....	25
2.2.3 TDG 过饱和胁迫下不同补偿水深实验结果	28
2.2.4 试验鱼不同补偿水深生存率分析.....	33
2.3 讨论.....	39
2.4 小结.....	40
3 草鱼受 TDG 过饱和胁迫患气泡病研究	43
3.1 材料与方法.....	43
3.1.1 试验对象.....	43
3.1.2 试验方法.....	44
3.2 气泡病症状观测实验结果	45
3.2.1 气泡病形成阶段实验结果分析.....	45

3.2.2 气泡病恢复阶段结果分析.....	54
3.3 讨论.....	56
3.4 小结.....	57
4 TDG 过饱和对草鱼游泳能力影响研究.....	59
4.1 材料与方法.....	59
4.1.1 实验地点.....	59
4.1.2 试验材料.....	60
4.1.3 试验方案.....	61
4.2 TDG 过饱和和游泳能力实验结果.....	63
4.2.1 实验背景值分析.....	63
4.2.2 TDG 过饱和胁迫下不同工况实验结果.....	66
4.3 讨论.....	68
4.3.1 TDG 饱和度对试验鱼类游泳能力影响讨论.....	68
4.3.2 其他因素对试验鱼类游泳能力影响讨论.....	70
4.4 小结.....	70
5 鲢鱼水深适应性室内试验研究.....	73
5.1 材料与方法.....	73
5.1.1 试验材料.....	73
5.1.2 试验方案.....	75
5.1.3 数据分析.....	76
5.2 试验结果.....	77
5.2.1 试验鱼在 100%TDG 饱和度水体垂向回避能力.....	77
5.2.2 试验鱼在 110%TDG 饱和度水体垂向回避能力.....	78
5.2.3 试验鱼在 115%TDG 饱和度水体垂向回避能力.....	80
5.2.4 试验鱼在 120%TDG 饱和度水体垂向回避能力.....	82
5.3 讨论.....	84
5.4 小结.....	85
6 结论与展望.....	87
6.1 主要结论.....	87
6.2 创新点.....	88
6.3 研究展望.....	88
7 参考文献.....	91
本文主要符号表.....	103

1 绪论

1.1 研究背景及意义

为满足我国绿色能源的发展需求，水利工程的修建在我国各个流域陆续展开，高水头大流量的水利工程在带来能源效益的同时，也对环境造成了许多负面影响^[1-3]。大坝下泄洪水时，空气中大量气体被卷吸进下泄水流中并随之进入坝下消能池或水垫塘中。在巨大的水压力的作用下，水体对气体的溶解能力增大，从而大量气体在消能池内溶解于水体中。水流流出消能池进入下游河道后，随着下游河道内水压力的减小，气体在水中的溶解度降低，然而过量的溶解气体很难在短时间内完全释放回到大气，从而导致了下游河道的总溶解气体（Total Dissolved Gas，简称TDG）过饱和^[4-6]。三峡水利工程泄洪产生的TDG过饱和和水体饱和度经过656km后仅降低26%，二滩水利工程站坝下TDG过饱和水流经过99.5km后饱和度降低了6.3%，均表明了水利工程泄洪导致的下游河道TDG过饱和现象将会在较长的时间和空间内存在^[7-9]。

天然河道中的TDG过饱和会使得生存在河流中的鱼类患上气泡病（Gas Bubble Disease，简称GBD），而气泡病是导致鱼类在过饱和水体中死亡的主要因素之一^[10,11]。TDG过饱和现象在美国和加拿大的哥伦比亚河水系以及中国的珠江和长江水系都有观察到^[6,7-9,12-14]。上世纪六十年代起，美国Columbia流域以及Snake流域因大坝泄洪导致的TDG过饱和造成鱼类患上气泡病并引发鱼类和其他水生生物死亡的问题受到长期广泛的关注^[15-19]。在中国，研究人员发现三峡、葛洲坝、新安江等水库在汛期泄水期间，下游河道均出现鱼类因TDG过饱和而患上气泡病进而导致死亡的事件^[20-23]。2014年，溪洛渡水电站泄洪期间，过饱和TDG使下游向家坝水库库区出现超过40t的鱼类死亡，引发了社会的高度关注^[24]。近年来，TDG过饱和对水环境造成的严重负面影响在欧洲也受到关注，如挪威的Vetlefjordselva河和Otra河^[25]。在我国，许多学者对长江上游TDG过饱和和对鱼类的胁迫影响开展了一系列的研究，但是对珠江水系的相关研究较少^[26]。此外，国内现有研究大多依据室外实验，虽然近几年对TDG过饱和和对鱼类影响的野外研究占比逐渐上升，但就总体而言依然有所欠缺，在工程实际泄洪方式下，不同鱼类对TDG过饱和耐受性的差异也亟待研究。另一方面，目前关于减

缓下游河道TDG过饱和对鱼类胁迫影响的工程措施研究较少^[27]。

珠江，发源于云南省曲靖市乌蒙山余脉的马雄山东麓，流经云南、贵州、广西、广东、湖南、江西6个省（区）和越南的北部，并在下游三角洲漫流成网河区^[28]。珠江的长度和流域面积在我国仅次于长江、黄河，总流域面积为 $45.369 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[28]。珠江流域内鱼类物种多样性丰富，共计有纯淡水鱼类468种，隶属5目23科^[29]。其中鲤科（Cyprinidae）鱼类266种，占总种数56.84%，在总种类中占有明显优势^[30]。

草鱼和鲢鱼都属于四大家鱼，草鱼属鲤科，草鱼属鱼类，属于中下层鱼类，成鱼以水草作为主要食物^[31]。鲢鱼属鲤科，鲢属鱼类，属于表层鱼类，幼鱼期以浮游动物为食，成鱼则主要摄取浮游植物^[32]。鳊鱼属鲤科鱼类，属于中下层鱼类，栖息于水温较高的河流中，主要摄取岩石上的藻类或腐屑为食^[33]。在珠江流域，草鱼、鲢鱼和鳊鱼都是重要的经济鱼类，是江河和池塘养殖的主要对象^[34-35]。为保护珠江上游西江流域鱼类资源的健康发展，有必要开展野外原位观测试验，研究大坝泄洪期间草鱼、鲢鱼和鳊鱼这三种主要网箱养殖对象受到TDG过饱和胁迫的影响，以及鱼类利用补偿水深回避TDG过饱和影响规律，为优化泄洪期的生态调度提供参考^[36-37]。

因此，为探究西江流域高坝泄洪产生的总溶解气体过饱和对鱼类的影响规律，本实验以大藤峡水电站为研究基础，结合原型观测与室内试验，探索草鱼、鲢鱼以及鳊鱼在受TDG过饱和胁迫下在不同补偿水深下的生存规律；草鱼在受TDG过饱和胁迫下气泡病发展规律和游泳能力变化规律，为生态环境友好型工程的建设与河流水生生态修复提供参考。

1.2 河流 TDG 过饱和对鱼类的影响研究

随着水电站泄洪，TDG过饱和的影响被认为是威胁下游河流原生鱼类生存的潜在负面环境问题^[11]。在泄洪过程中，大坝溢出的水将空气困在水池中，从而产生TDG过饱和^[38]。下游河流的TDG水平取决于大坝运行模式、水流湍流、水深和河流横向混合等多种因素^[39]。由于TDG过饱和对鱼类的胁迫作用，评估大坝泄洪对下游河流的生态影响具有重要意义，以往的研究发现，TDG过饱和对鱼卵、幼鱼和成鱼等不同阶段的生命都有不利影响^[40]。

2011年，美国哥伦比亚河流量暴涨，导致河流中TDG饱和度上升，远远超

过了为防止对水生生物造成有害影响而实施的120%TDG饱和度的监管上限,有学者发现在TDG饱和度升高期间释放的实验幼鱼(最大TDG饱和度达到134%)在下游河流和羽流中的生存概率显著低于120%时释放的实验幼鱼^[13]。相较于室内环境,在自然环境中,GBD导致的直接死亡率可能会降低,因为溶解在水中的气体可以移动到更深的水中,那里的压力使气体保持在溶液中,并可以迁移到溢洪道下游,随着河流与大气恢复平衡,TDG饱和度下降^[41]。

冯镜洁(2014)等在中国长江、岷江、雅砻江、金沙江、澜沧江、大渡河流域的大坝下游溢流期间进行了一系列过饱和TDG耗散的野外观测。观测数据表明过饱和TDG消散缓慢,以至于在溢洪道下游数十至数百公里处仍能观察到其影响,在三峡大坝下游600多公里处,观测到TDG饱和度超过110%^[7-9]。一般来说,大型河流或水库的耗散系数明显小于小型河流,研究表明流速和深度是影响过饱和TDG耗散的关键因素^[8]。

Evan Arntzen等认为地表水与潜流区的相互作用直接通过物理混合的方式影响潜流区内的TDG饱和度,通过间接改变水的化学性质从而改变气体的溶解度以此来影响地表河流TDG的饱和度^[42]。河流湿地覆盖水产养殖、沼泽等多种多样的水生生态系统,具有较高的碳汇潜力和较高的养分能力^[43]。在热带淡水中,河流、湖泊和水库中的二氧化碳分压通常很高,从而产生TDG过饱和,但此类生态系统由于其高流动性,更能发挥有效的碳汇作用,可以通过生物扰动调节生物隔离过程,将营养物质从底层运输到上表面,从而维持整个河流生态系统的稳定^[43]。

鱼类对河流TDG过饱和的耐受性取决于河流中TDG饱和度水平、鱼类受TDG过饱和胁迫时间以及河流中水深、水温、溶解氧浓度等因素,并与鱼类个体的生命阶段有关^[27]。由于受到流量和流速等因素的影响,河流中过饱和的TDG不能远距离有效释放,并且TDG过饱和程度与静水压力有关,当水中TDG饱和度一定时,TDG饱和度水平随水深的增加而降低^[44]。美国环境保护署(EPA)认识到TDG过饱和对鱼类的影响,制定了115%的TDG饱和度标准。但是许多大坝下游的TDG饱和度可以达到140%,一些水头差较大的发电厂的下游河道中的TDG饱和度甚至达到了180%,尤其是在淡水流动期间^[25]。

1.3 鱼类受 TDG 过饱和胁迫耐受性研究

1.3.1 鱼类气泡病特征

1.3.1.1 气泡病的致死机理

气泡病 (Gas Bubble Disease, 简称GBD) 症状作为鱼类受TDG过饱和胁迫影响最直观的体表损伤表现, 是导致鱼类在过饱和水体中死亡的主要因素之一^[10]。早在1901年就有文献记录TDG过饱和对鱼类的影响, 已有研究表明, 气泡病是因为水中溶解气体 (N_2 、 O_2 、 CO_2 等气体) 分压总和超过大气压, 由于TDG过饱和水体进入鱼体内部后, 在受到压力或温度的作用下, 水体中的过溶解气体以气泡的形式析出, 并附着于鱼的头部、鳃盖、眼球四周和各个鱼鳍上, 从而对鱼的视觉系统、消化系统、呼吸系统以及血液循环造成不可逆的损伤, 影响心血管和其他器官组织供血复氧, 最终导致鱼类死亡^[45-48]。

1.3.1.2 气泡病的症状表现

气泡病的外部症状主要体现在头部、鳃盖、眼球四周、角膜、背鳍、尾鳍、腹鳍、胸鳍以及臀鳍等处附着有大量气泡^[49]。倘若气泡聚集在眼球内部或者眼球后方, 会造成鱼类眼球凸出或肿胀; 若气泡聚集在鳃丝处, 会导致鱼鳃处血管堵塞并对鱼类的呼吸功能造成影响; 若气泡大量聚集在鱼体内并且损伤鱼鳔, 则会导致鱼类身体失去平衡从而不能正常游动^[50]。气泡病内部症状的主要反映在鱼类酶活性和血液生理指标异常, 视网神经损伤以及眼球病变, 组织器官气肿衰竭和心血管栓塞等^[51]。Bouck (1980) 发现当水体中补偿压力不足时, 溶解气体会阻塞鱼体内血管或撕裂组织, 并可能导致死亡^[51]。Pauley和Nakatani (1967) 观察到患气泡病鱼类的口腔出现肿胀症状, 并且肾脏、肝脏和肠道均受到一定程度的损伤^[52]; Speare (1990) 也指出TDG过饱和水体会引起鱼类的组织病变, 出现例如眼球缺血性坏死, 视网膜动静脉血管损伤导致形成血栓等症状^[53]; Newcomb (1974) 发现TDG过饱和水体导致鱼类血液生理指标的异常^[54]。Bouck (1980) 根据鱼类受到TDG过饱和胁迫的时间将气泡病发展的分为三个阶段^[51]:

(1) 缓慢影响期: 此阶段受影响鱼类开始表现出回避反应。随时间推移, 鱼体内微小的气泡聚集并逐渐开始析出, 形成气体栓塞和气泡囊肿并导致局部缺血和缺氧。这些症状会限制鱼类活动, 但并未达到威胁生命的程度。

(2) 快速反应期: 这一阶段鱼类开始出现死亡, 随着气体栓塞和气泡囊肿

持续发展并蔓延至其他器官组织，鱼类的生理功能受到严重影响，发病率显著提升。

(3)致命损伤期：栓塞在心血管等系统中产生各种功能障碍，气泡破灭后，体表组织坏死且易感染，多处器官组织发生病变并最终导致鱼类个体死亡。

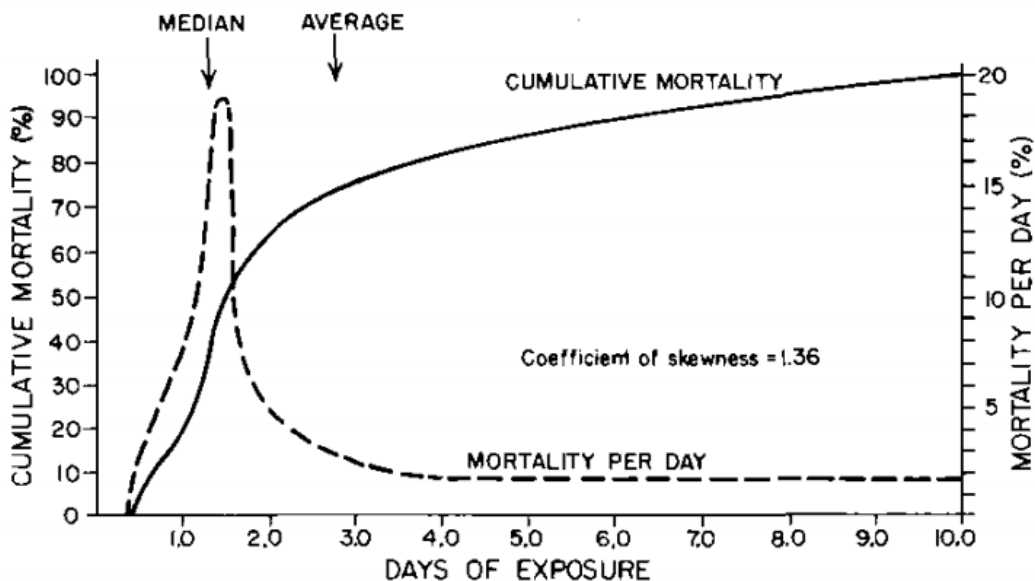


图 1-1 硬头鳊累计死亡率随 TDG 过饱和胁迫时间的变化关系（引自 Bouck 1980）

Bouck (1980) 发现死亡率在达到峰值之前与暴露时间的对数近似呈对数关系，这一高峰大约发生在死亡率的中位数，如图1-1所示。因此，死亡率到中位数的时间提供了一个很好的衡量中心趋势的方法^[51]。

四川大学针对长江上游特有鱼类通过实验室实验开展了大量TDG过饱和对鱼类的胁迫影响研究，发现了典型气泡病症状在岩原鲤、胭脂鱼、齐口裂腹鱼和长薄鳅等鱼类身体上均有表现^[27,36,37,50,55-58]。

1.3.2 鱼类对 TDG 过饱和的耐受能力

鱼类在过饱和水体中的死亡现象是其气泡病发展的最终结果，鱼类的气泡病还可能导致其受其他疾病的二次感染，最终出现死亡，因此，鱼类患气泡病的严重程度取决于其对TDG过饱和的耐受能力^[59]。已有研究表明，鱼类对TDG过饱和的耐受能力会因鱼类种类、生长发育阶段、身体尺寸、行为能力、所处水下深度、TDG饱和度、水深、暴露时间、水温等因素的不同而有所区别^[60]。

Shrimpton等（1990）研究了鱼类气泡病从发生到致死的全过程，通过分析气泡病症状与鱼鳔压强、鱼体表气泡形态、鱼体长度、鱼血液pH值、鱼血液中溶解氧及二茶酚胺含量与水体TDG饱和度、水体氧气压强、水深间的关系，建立了鱼类气泡病症状与TDG饱和度之间的预测模型^[61,62]。

Ebel等（1973）和Dawley等（1975）发现银大马哈鱼幼鱼和硬头鲑的死亡率在不同TDG饱和度下存在显著性差异^[59,63]。Backman等（2002）利用回归分析的方法对比了大鳞大马哈鱼、红大马哈鱼和硬头鲑在汛期通过Bonneville大坝时患气泡病的比例，发现大鳞大马哈鱼、红大马哈鱼和硬头鲑在相同TDG饱和度的条件下气泡患病率存在显著性差异^[64]。Beeman等（2003）发现在Columbia流域内5种不同鱼类在相同TDC饱和度条件下的半数死亡时间（LT₅₀）存在显著性差异^[65]。

鱼类对TDG过饱和水体的耐受能力会因为个体生长发育阶段的不同而有所差异^[27]。过去有研究表明鱼卵和刚孵化的仔鱼在TDG饱和度高的水体中耐受能力较强^[36,66,67]。Meekin等（1974）通过实验发现绝大多数鱼卵受到TDG过饱和胁迫后产生气泡病的现象出现较少，而硬头鲑鱼卵在112%的TDG饱和度水平下出现了较高的死亡率^[68]。多数研究认为，鱼类在由鱼卵阶段至幼鱼阶段的生长过程中，耐受性与发育时间呈负相关关系，而幼鱼阶段之后其耐受性逐渐升高，鱼类对TDG过饱和胁迫耐受能力最强的时候往往出现在成鱼阶段^[10]。但部分研究也表明并非所有鱼类都遵循此规律，例如Bohl（1997）发现刚孵出的大马哈鱼仔鱼的鳃结构、骨骼发育、血管及神经系统在TDG饱和度为102%的水体中遭到了严重损害，而大马哈鱼成鱼在TDG饱和度达到116%时才开始出现死亡^[69]。Rucker（1974）发现在112%TDG饱和度的水体中，体型较大的大马哈鱼半数死亡时间显著小于体型较小的大马哈鱼半数死亡时间^[70]。并且在TDG过饱和水体中，体长约为100mm的大鳞大马哈鱼的死亡率也高于体长为40mm的大鳞大马哈鱼个体^[68]。

鱼类在TDG过饱和胁迫下的耐受能力还受到水温、含沙量等因素的影响。气体在水中的溶解度会随水体温度的改变而发生改变，从而改变了水体中的TDG饱和度，进而影响鱼类在TDG过饱和胁迫下的耐受能力。Smiley等（2011）发现在水体TDG饱和度为122%的胁迫条件下，石斑鱼在温度为23℃时的死亡率比18℃时高出5%^[71]。而在不同的TDG饱和度下，齐口裂腹鱼对水温的反应不同，

在水体TDG饱和度为135%、140%时，齐口裂腹鱼在16℃的水温下存活率最高，在水体TDG饱和度为130%时，死亡速度与温度呈正相关关系，在水体TDG饱和度为120%时，水温的影响较小^[57]。张亦然等（2014）发现在同一TDG饱和度条件下，含沙量越高齐口裂腹鱼的死亡率越高^[72]。在天然河道中鱼类在过饱和水体中的致死规律往往和室内实验有所不同，目前，关于鱼类受TDG过饱和胁迫的影响主要来自于室内实验阶段，而天然河道中鱼类受TDG过饱和胁迫的影响则需要开展进一步的野外试验研究。

由于水体对气体的溶解能力与水深呈正相关关系，因此水深也会影响鱼类在TDG过饱和胁迫下的耐受能力。Knittel研究表明水深每增加1m，鱼类所感知到的TDG饱和度就减小9.7%^[73,74]。

TDG过饱和对鱼类影响的研究在我国起步较晚，四川大学开展了大量长江上游特有鱼类受TDG过饱和胁迫耐受性室内试验研究。试验结果发现胭脂鱼、岩原鲤和齐口裂腹鱼幼鱼对TDG过饱和和水体耐受能力存在差异^[50,55,75]。目前，国内有关鱼类受TDG过饱和胁迫下的影响研究主要是针对长江上游特有鱼类受TDG过饱和胁迫下的影响研究，并且集中在规格较为接近的一龄幼鱼，对于处在其他生命阶段的鱼类还缺乏相关资料。

1.4 鱼类受TDG过饱和胁迫后游泳能力变化研究

1.4.1 鱼类游泳能力介绍

鱼长时间生活在TDG过饱和水体中会出现气泡病（GBD）现象，GBD引起的病变可引起鱼类的多种生理损伤，如行为异常和游泳能力失衡^[76-80]。鱼类的游泳能力是鱼类赖以繁殖、躲避危险、捕食等维持生命的重要行为^[81-84]。

鱼类的游泳行为可分为持续式游动行为、突进式游动行为和临界式游动行为^[82]。持续游动下的游泳速度是鱼能够长时间保持的速度，这是为有氧运动提供能量的速度^[85]；突进式游泳行为下的突进游泳速度则反映了鱼类能够达到的最大游泳速度，并且只能保持很短的时间^[86]；临界式游动行为下的临界游泳速度是持续游泳的一种特殊类型，它可以反映鱼类的最大有氧游泳能力，过去的研究中常使用临界游泳速度来反映鱼类的游泳能力，并将其作为评价鱼类对盐度、温度、溶解氧水平等各种外部环境变化反应的重要指标^[87-90]。

鱼类的游泳速度是评价鱼类游泳能力的重要指示因子^[91]。不同学者根据不

同的分类依据定义了许多游泳速度，例如表1-1则是将对水流流态的反应特征作为分类依据。

表 1-1 鱼类游泳能力分类表

分类依据	分类标准	代表游泳速度	特征
对水流流态的 反应特征	克流能力	临界游泳速度 (Critical swimming speed)	指鱼在一定时间步长和流速增长规律下，所能达到的最大游泳速度 ^[87]
		突进游泳速度 (Burst swimming speed)	鱼类在躲避危险、捕食及其他应激运动时，所能达到的最大流速，但持续时间较短
	趋流特性	感应游泳速度 (Induced swimming speed)	鱼类刚刚能够产生趋流反应的流速值，通常以鱼类游动方向的改变为指标，是鱼道设计和增殖放流的最小流速 ^[90]

1.4.2 TDG 过饱和对鱼类游泳能力影响

过去几十年来，国内外学者开展了一系列TDG过饱和对鱼类游泳能力影响的试验。大多数结果显示，TDG过饱和对鱼类游泳能力的影响主要取决于TDG饱和度大小、受胁迫时间以及鱼类种类、生长发育阶段等因素^[26,27,90,92]。

Schiewe (1974) 研究发现，幼支努克鲑鱼 (*Juvenile chinook salmon*) 暴露在TDG饱和度在106%~120%的水体中会导致其游泳能力下降^[93]。Dawley和Ebel (1975) 发现硬头鳟在受TDG过饱和胁迫下的临界游泳速度与未受TDG过饱和胁迫下的试验鱼存在显著性差异^[59]。而Gunnarsli (2008) 发现大西洋鳕幼鱼 (*Gadus morhua L.*) 在低饱和度的TDG过饱和水体胁迫下，其临界游泳速度与未受TDG过饱和胁迫下的试验鱼不存在显著性差异^[94]。

在国内，许多学者对长江上游特有鱼类游泳能力受TDG过饱和影响开展了有关研究，Wang (2017) 发现岩原鲤和齐口裂腹鱼在受到TDG饱和度为129%—131%过饱和水体短时间胁迫后，其临界游泳速度显著性降低^[95]；冀前锋 (2022) 在室内试验中发现鲢鱼在受TDG饱和度分别为110%、120%以及130%的水体中胁迫6天后，其临界游泳速度出现了一定程度的降低^[96]。袁嫫 (2018) 在开展鱼

类游能力恢复实验后发现在经历120%低TDG过饱和饱和度水体的短时间胁迫后，长薄鳅和齐口裂腹鱼的游泳能力在清水中均能够得到恢复^[92]。

近年来，大量水利工程修建导致的下游高TDG对生态环境带来的影响引起了人们的关注。研究TDG过饱和对鱼类游泳能力的影响对坝下游例如鱼道、升鱼机、集鱼平台、仿自然通道等过鱼设施的修建具有重要参考价值^[97]。

1.4.3 影响鱼类游泳行为的其他外界因子

过去一个世纪以来，水利工程的修建对河流生态系统造成了不可逆转的破坏^[1-3]。水生生态环境的改变不仅导致鱼类栖息地环境发生改变，还对鱼类原有生命活动造成影响，例如其游泳行为等。流量过程的改变导致鱼类“三场”的面积以及流速发生变化，不仅使鱼类可利用栖息地面积急剧减少，还会影响鱼类对流场的判断^[90]。

研究表明，鱼类游泳速度取决于生理、外部环境等因素，包括鱼类形态、水温、盐度和PH、水流流态等，具体如下：

1.4.3.1 水温

水温作为水生态系统中的重要控制因子，它对鱼类等水生生物的繁殖、捕食、生长发育、迁徙等行为方式都有着重要影响^[98-100]。水温对鱼类的影响主要分为长期温度驯化和短期急性暴露^[101]。长期温度驯化是指鱼类在实验室条件下在较长时间内被某一特定温度所驯化；短期急性暴露则是指鱼类所处水温在短时间内发生变化。Brett（1967）研究发现不同种类的鱼在不同生理过程所需的最适温度不同，并且水中溶解氧浓度也会随着水温的变化而发生改变，一旦水温超过鱼类最佳范围后，鱼类体内酶的活性也会随之降低，鱼类心肺系统功能和氧气利用率都会受到影响^[102-103]。在其最适宜温度时，鱼类的临界游泳速度达到最大，当水温小于鱼类最适宜温度时，鱼类游泳能力与水温呈正相关关系，当水温大于鱼类最适宜温度时，鱼类游泳能力随温度增加而减弱^[102-103]。

1.4.3.2 流速以及水流形态

趋流特性和克流能力是目前最常用的鱼类游泳能力表征指标^[104]。趋流特性河克流能力分别代表鱼类对水流的趋向性和克服能力。通常用感应游泳速度（induced swimming speed）来反映鱼类能感受到的最小水流流速，而突进游泳

速度（burst swimming speed）则用来表示鱼类能够克服的最大水流流速^[97]。

由于过鱼设施内水流的紊动能、雷诺剪应力以及流速都会对鱼类上溯洄游造成影响^[105]。因此为了提高过鱼对象的过鱼效率，过鱼设施的进口处的流速通常需要大于所有过鱼对象中的最大感应游泳速度并且小于所有过鱼对象中的最小突进游泳速度^[97]。并且在天然河流中，由于更高的雷诺数、河床和水中各种障碍物之间的相互作用、复杂的河道地形会形成各种尺寸和方向的涡流，均会对鱼类的游泳速度造成影响^[106]。

1.4.3.3 鱼类形态

鱼类的体长与其游泳速度存在一定的相关关系^[107]。体型较大的鱼通常拥有较高的游泳速度。这是因为鱼类在幼鱼时期由于侧线系统发育不成熟，对流速感应迟钝，当鱼类发育成熟后，其侧线系统发育完好，能够敏锐感知到周围刺激，从而做出快速反应^[108]。

1.4.3.4 其他因素

镉、铜等重金属在水中的沉积会降低鱼类体内一些酶的活性，从而影响耗氧率进而降低鱼类的游泳能力^[109,110]。水中的悬浮固体颗粒能够抑制鱼在游动过程中体表边界层中紊流波动，减小摩擦力，因此在一定范围内，随着浊度的增加，鱼类的游泳能力会相应提高^[111]。

1.5 鱼类回避 TDG 过饱和研究

鱼类具有趋利避害的天性，鱼类能够通过改变自身的游动方向来躲避水中的有害化学物质^[112]。不同的鱼类在面对TDG过饱和的胁迫危害时会表现出不同的回避能力，Meekin（1974）研究发现在同一饱和度的TDG过饱和水体中，大鳞大马哈鱼和银鲑鱼感知TDG过饱和水体的能力存在显著性差异^[68]，而Blahm（1976）发现在高饱和度的TDG过饱和水体中，硬头鳟感知TDG过饱和水体的能力较弱^[113]。此外，鱼类在不同TDG饱和度的水体中的回避能力也具有一定差异，大马哈鱼和虹鳟在TDG饱和度高于140%时表现出明显的回避行为，但TDG饱和度低于120%时TDG饱和度的水体中却没有表现出有效的回避行为^[114,115]。此外，袁嫫（2018）在室内试验中发现齐口裂腹鱼的集群回避现象还与水流流速有关，在静水试验条件下成年齐口裂腹鱼未表现出完全回避现象，而在吸引水

流流速为0.06m/s时, 实验鱼的集体回避现象显著^[92]。

目前普遍将鱼类对TDG过饱和的感应回避能力分为其在水平方向上的感知与回避能力以及在垂向上利用补偿水深的能力^[27]。

1.5.1 鱼类的水平回避能力

在不同的TDG饱和度的条件下, 鱼类的水平回避作用不尽相同。黄翔(2010)以及陈世超(2013)在胭脂鱼和岩原鲤的水平回避试验中发现, 在高饱和度的条件下, 两种鱼类表现出较强的回避能力, 而在饱和度低于125%以下时, 回避性能则较弱, 两种鱼之间的回避能力也存在一定差异, 胭脂鱼较弱, 而岩原鲤则回避能力较好^[37,50]。

Stevens等(1980)发现在TDG饱和度在125-145%的条件下, 银大麻哈鱼、红大麻哈鱼和大鳞大马哈鱼出现较显著的回避行为, 而在115%的TDG过饱和水体中未出现较明显的回避能力^[116]。

王远铭(2017)在室内试验中发现, 当水体中的TDG饱和度为130%以上时, 岩原鲤在水中会表现出较强的水平回避能力, 而当水体中的TDG饱和度低于130%时, 岩原鲤的水平回避能力则不再明显^[27]。此外, 一龄齐口裂腹鱼在TDG饱和度大于等于140%的水体中表现出水平回避能力, 而在TDG饱和度低于130%时没有表现出明显的回避能力^[27]。

1.5.2 鱼类的垂向回避能力

鱼类的垂向回避能力主要体现在鱼类利用补偿水深的影响来回避TDG过饱和的胁迫^[41]。Weitkamp(2003)通过实验发现, 试验鱼在表层和深水区的死亡率存在显著性差异^[117,118]。Knittel(1980)研究发现, 在不同饱和度的TDG过饱和水体中, 硬头鳟的死亡率在不同水深层之间存在显著性差异, 并且在同一饱和度的TDG过饱和水体中, 表层水体中的鱼类死亡率较高, 并且水深越深, 实验鱼死亡率达到50%时所需的暴露时间越长^[73]。Antcliffe(1980)通过实验发现, 在饱和度为130%的TDG过饱和水体中, 当硬头鳟处在3m以下的水深时, 死亡率出现降低^[119]。Dawley(1976)在针对大鳞大麻哈幼鱼的研究中也发现, TDG过饱和对大鳞大麻哈幼鱼的影响随着水深的增加逐渐减小^[63,120]。Weitkamp等(2003)统计发现鲑鱼种群具有一定的垂向回避能力^[117]。Knittel等(1980)研究发现, 鱼类在TDG过饱和水体中的GBD发病率与补偿水深呈负相关关系^[73],

在同一饱和度的TDG过饱和水体中，表层水体中实验鱼出现GBD现象的比例较高，而深水层水体中实验鱼出现GBD现象的比例则较低^[73]。

四川大学开展了一系列长江上游特有鱼种对TDG过饱和的垂向回避能力研究发现，在高饱和度的TDG过饱和水体中，岩原鲤、胭脂鱼以及齐口裂腹鱼的存活率会随水深的增加而逐渐增加^[27,37,50,55,56]。

1.6 本文主要工作

1.6.1 研究内容

随着中国水电行业的不断发展以及国家对生态环境的重视，大坝泄洪产生的TDG过饱和水体对鱼类的影响是目前亟待解决的问题。但在以往的研究中，研究区域主要集中在长江中上游，对国内其他流域研究较少，缺乏系统性规律的整理。此外，补偿水深与鱼类在受TDG过饱和胁迫下的存活率的关系、鱼类患气泡病的发展规律等还亟待研究。

本文拟采用西江流域养殖鱼类草鱼、鲢鱼以及鳊鱼作为研究对象，通过野外原型观测实验研究西江流域养殖鱼类暴露在TDG过饱和水体中不同补偿水深下的存活规律；鱼类受TDG过饱和胁迫下游泳能力变化规律；气泡病的形成与发展规律，根据野外原型观测实验的结果，进一步开展室内试验，为西江流域鱼类保护提供参考。

本论文主要研究内容和工作包括：

(1) 通过开展现场试验，分析在大藤峡水利工程泄洪过程中，草鱼、鲢鱼和鳊鱼暴露在TDG过饱和水体中不同补偿水深下的生存规律；

(2) 通过开展现场试验，分析在大藤峡水利工程泄洪过程中，草鱼幼鱼受TDG过饱和胁迫下游泳能力变化规律；

(3) 通过开展现场试验，分析在大藤峡水利工程泄洪过程中，草鱼成鱼受TDG过饱和胁迫下的气泡病的形成与发展规律；

(4) 在现场试验的基础上进一步开展室内试验，研究鲢幼鱼的适宜水深分布，观察其在TDG过饱和胁迫下的垂向回避能力，探寻适宜水深与TDG过饱和胁迫多因素影响下鲢鱼的行为规律。

1.6.2 技术路线

根据本章1.6.1中提到的研究内容和研究方法，本研究的技术路线如图1-2所示。

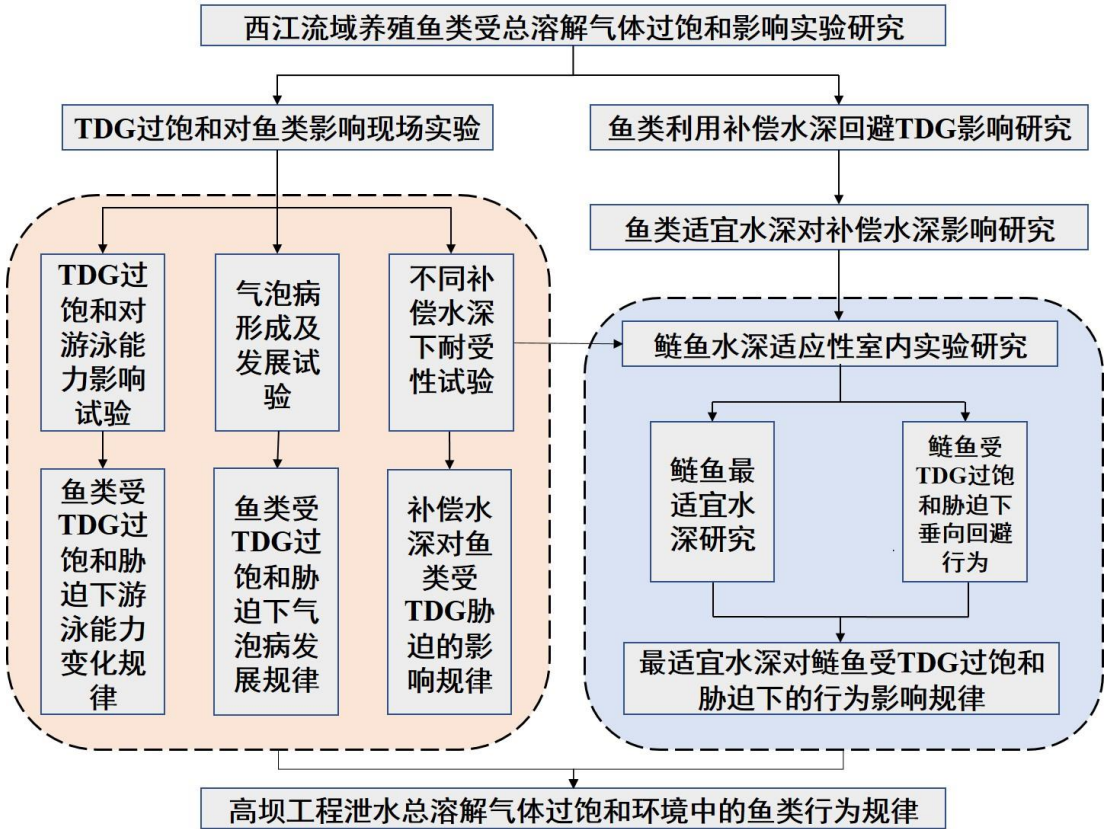


图 1-2 本文研究路线

2 鱼类受 TDG 过饱和胁迫耐受性研究

国内外许多学者对鱼类受TDG过饱和胁迫的耐受性开展了大量室内与室外实验,但对于实验鱼类在不同补偿水深下受TDG过饱和胁迫的耐受性研究较少,本论文在西江流域开展实验鱼类受TDG过饱和胁迫时在不同补偿水深下耐受性的室外原型观测实验。

2.1 鱼类不同补偿水深存活率观测试验

2.1.1 试验地点与观测时间

鱼类受TDG过饱和胁迫影响现场观测试验平台位于广西壮族自治区贵港市西江中游上段桂平市江口镇境内,距下游平南县城约21.4km,距上游桂平市区约27.3km。试验平台位于大藤峡水电站下游江口镇鱼嘴回水区(N 23° 34.700', E 110° 12.099'),距离大藤峡水电站坝址34.7km,试验平台近景如图2-1所示。



图 2-1 江口镇试验平台

现场试验主要通过在大藤峡水电站下泄流量期间监测TDG饱和度等外部环境指标,并设置相应试验工况观察试验鱼受TDG过饱和胁迫的影响。

大藤峡水利枢纽工程的主要任务为防洪、航运、发电、补水压咸和灌溉。大藤峡水电站坝址位于广西桂平市黔江彩虹桥上游6.6km的峡谷出口处,库区现场照片如图2-2所示。大藤峡坝址及现场试验点位置见图2-3。



图 2-2 大藤峡水电站库区图

为研究大藤峡水电站泄洪下,引起下游总溶解气体过饱和对鱼类的影响,现场试验于2022年7月1日展开,持续到7月15日结束。

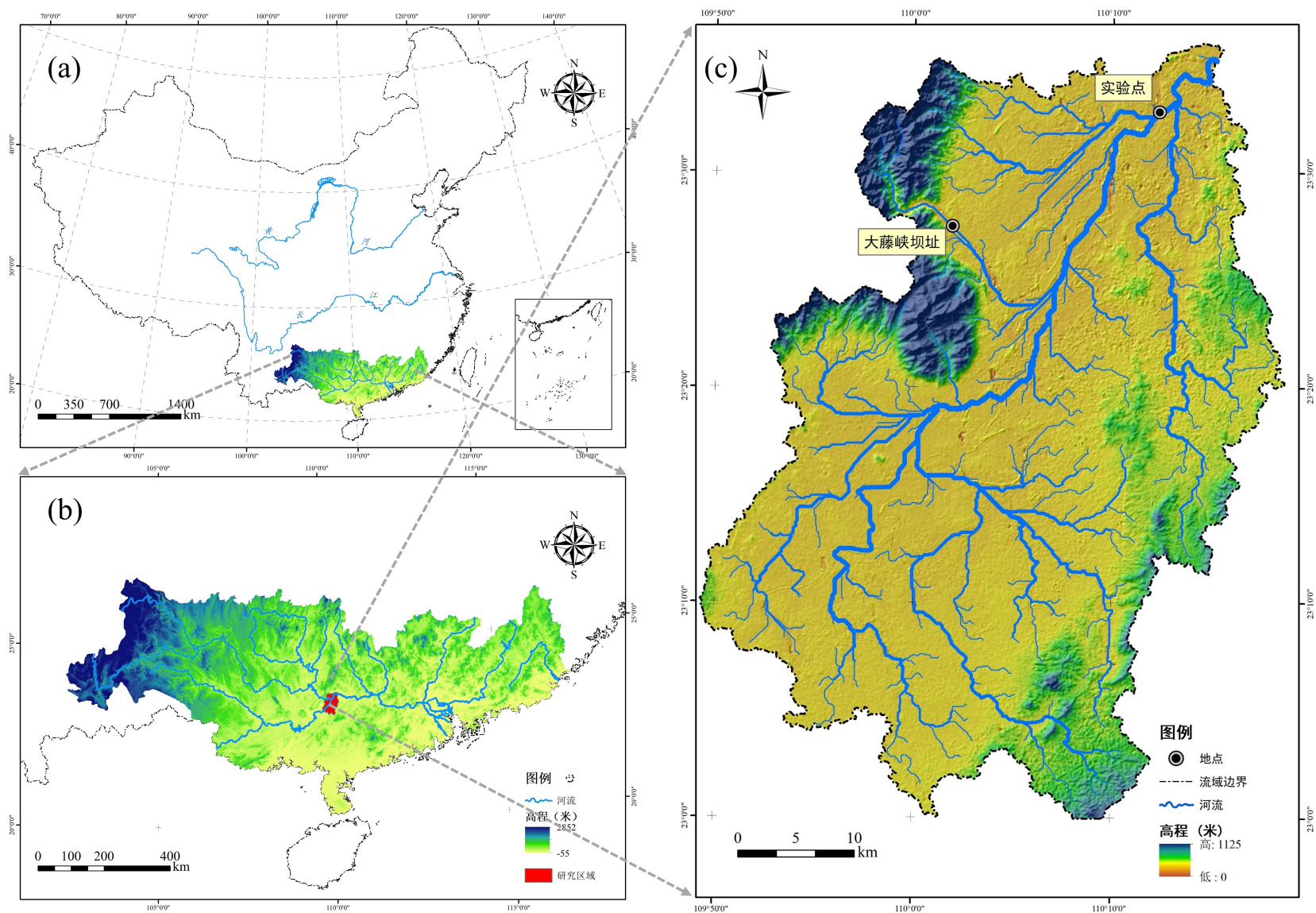


图 2-3 TDG 过饱和对鱼类影响现场试验位置示意图

2.1.2 试验材料

2.1.2.1 试验对象

草鱼（英文名：**Grass carp**），属鲤科，雅罗鱼亚科，草鱼属鱼类。体呈茶黄色，背部色深，呈青灰色，腹部灰白色，腹鳍呈浅黄色，胸鳍色较浅，其余各鳍呈浅灰色。草鱼是一种大型鱼类，在养殖生产方面具有重要价值，其往往栖息于水体中下层，性活泼，游泳迅速，成鱼以水草为主要食物。

鲢鱼（英文名：**Silvercarp**），属鲤科，鲢亚科，鲢属鱼类。身体两侧及腹部呈银白色，背部灰黑略带黄色。背鳍、臀鳍、胸鳍和腹鳍颜色较浅，呈灰白色，尾鳍边缘略带黑色。喜生活在水体的中上层，性活泼，生长快，幼鱼期以浮游动物为食，成鱼则主要摄取浮游植物。是一种典型的浮游生物食性的鱼类。

鲮鱼（英文名：**dace**），属鲤科，野鲮亚科鱼类，栖于南方水温较高的河流内，是我国华南淡水主要养殖鱼种之一。性怕冷，其生活环境多为溪河的急流江段，为底栖鱼类，栖息于水温较高的江河中的中下层，偶尔进入静水水体中。主要摄取岩石上的藻类或腐屑为食。



图 2-4 试验鱼照片
(a) 草鱼；(b) 鲢鱼；(c) 鲮鱼

三种试验鱼草鱼、鲢鱼以及鲮鱼均在江口镇当地鱼苗养殖场购得，为减缓转移试验鱼时可能对试验鱼所造成的伤害，需恢复和驯养1-2天后，才正式开始鱼类受TDG过饱和胁迫耐受性试验。在试验前将试验鱼类放至鱼塘暂养1-2天，暂养地点如图2-5所示，试验鱼身长体重参数参数见表2-1所示，暂养地背景参数见表2-2。

表 2-1 耐受性观测试验鱼的身长体重参数

草鱼		鲢鱼		鳊鱼	
体长(cm)	体重(g)	体长(cm)	体重(g)	体长(cm)	体重(g)
8.31±1.08	10.15±4.78	13.1±1.06	35.00±9.39	4.45±0.51	1.71±0.32

注：体重、体长表示为 Mean±SD。



图 2-5 试验鱼类暂养地位置示意图

表 2-2 试验鱼类暂养地背景参数表

6月29日			6月30日		
DO (mg/L)	TDG (%)	水温 (°C)	DO (mg/L)	TDG (%)	水温 (°C)
7.53	103	29.2	6.87	100	26.4

2.1.2.2 试验装置

(1) 实验采用实验室自主研发的鱼类耐受性及补偿水深利用实验装置。装置主体为钢架结构（长360cm，宽100cm，高60cm），试验网箱分为分层组和连通组以及没有补偿水深影响的表层网箱，通过对比表层网箱、分层网箱以及连通网箱内实验鱼类的死亡数量来观察补偿水深对鱼类回避TDG过饱和的作用。

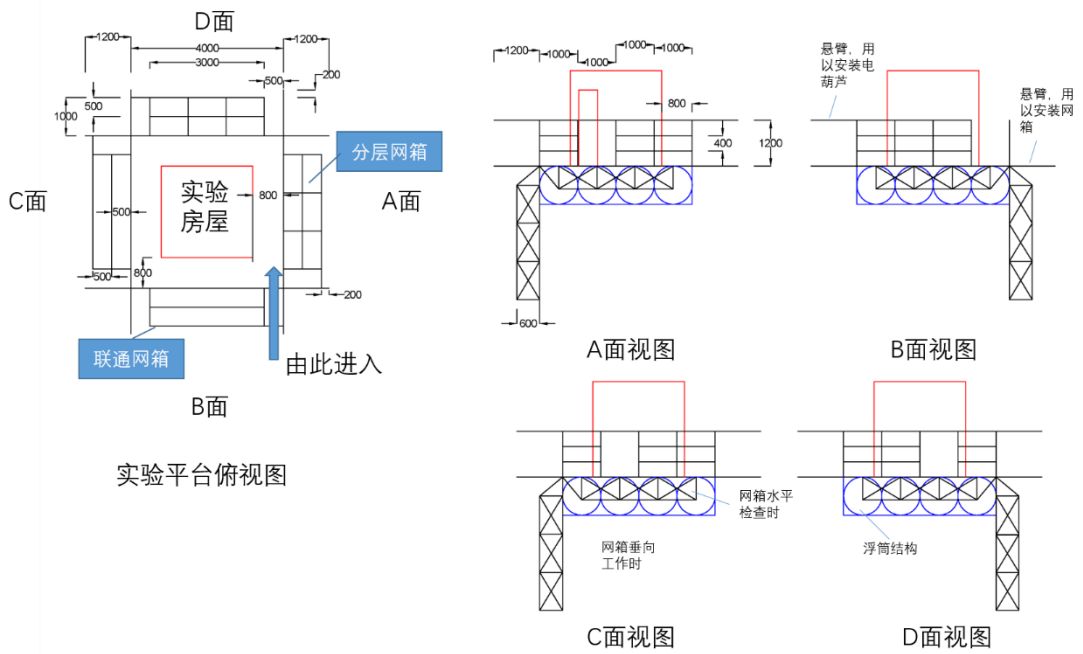
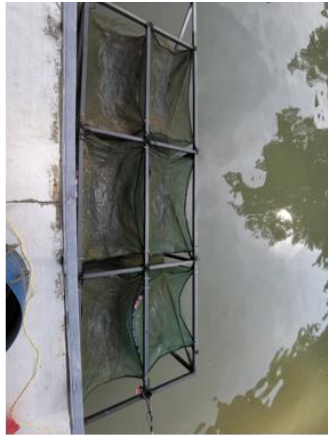


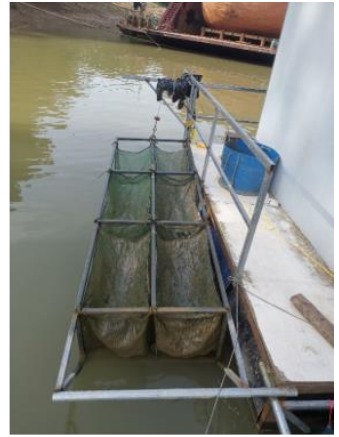
图 2-6 鱼类耐受性及补偿水深利用实验装置三视图



(a) 装置外部钢架



(b) 装置内部网箱



(c) 分层网箱



(d) 连通网箱



(e) 表层网箱



(f) 表层网箱

图 2-7 鱼类耐受性及补偿水深作用实验装置细部照片



(a) 试验平台远景图



(b) 试验平台近景图

图 2-8 鱼类受 TDG 过饱和胁迫耐受性实验装置图

2.1.2.3 试验仪器

现场试验中,通过PT4压力测定仪监测水体TDG饱和度。通过YSIPRO20i溶氧仪记录水体溶解氧浓度、溶解氧饱和度、当地大气压。通过浊度仪测量实验点处的浊度,通过流速仪测量实验点处的流速大小,通过ZDR测定实验地点的水温。通过直尺测量实验鱼长度,通过电子秤测量实验鱼体重,并通过显微镜观察鱼类气泡病现象,实验器材如图2-9所示,具体参数见表2-3。

表 2-3 过饱和气体观测和鱼类影响试验的仪器和设备主要规格指标

仪器名称	参数	测量范围	分辨率	准确度
PointFour TGP 测定仪	TDG	0%~200%	1%	±2%
	温度	-20~40℃	0.1℃	±0.20℃
PT4 YSI PRO20i 溶氧仪	DO	0~20mg/L	0.001mg/L	±0.1 mg/L
	温度	-5~50℃	0.01℃	±0.05℃
浊度仪	浊度仪	0~1000NTU	0.1NTU	±2%
斯德克电波流速仪	流速	0.0~18.0m/s	0.01m/s	±0.03m/s
电子显微镜	放大倍数	40~400X	40X	-
电子秤	质量	0~100g	0.01g	±0.01g
钢尺	长度	0-500cm	0.1cm	±0.1cm



(a) PT4 TGP 压力测定仪



(b) PT4 YSI PRO20i 溶氧仪



(c) 油度仪



(d) 流速仪



(e) 显微镜



(f) ZDR水温测定仪

图 2-9 鱼类受 TDG 过饱和胁迫耐受性实验主要观测仪器照片

2.1.3 试验方法

2.1.3.1 试验工况设置

(1) 分层网箱试验

鱼类受TDG过饱和和分层网箱试验于2022年7月1日中午12时47分展开，试验以草鱼、鲢鱼以及鳊鱼为观测对象，三种实验鱼的投放时间分别为2022年的7月

1日、7月2日和7月6日上午10点。该实验利用网布将鱼苗分隔在0~1m、1~2m和2~3m等3种水深的水体中，各水深均设置2组平行实验组，具体工况见表2-4。

表 2-4 分层网箱试验工况表

试验点	试验时间	试验鱼	网箱深度	平行样	鱼苗数量	
大藤峡水 电站下游 34.7km	2022年7 月1日至 7月13日	草鱼	0-1m	2	20	
			1-2m	2	20	
			2-3m	2	20	
		鲢鱼	0-1m	2	20	
			1-2m	2	20	
			2-3m	2	20	
			鳊鱼	0-1m	2	20
				1-2m	2	20
				2-3m	2	20

(2) 连通网箱试验

鱼类受TDG过饱和连通网箱试验于2022年7月1日展开，试验以草鱼、鲢鱼以及鳊鱼为观测对象，设置2组平行实验组，网箱深度为0-3m。具体工况见表2-5。

表 2-5 连通网箱试验工况表

试验点	试验时间	试验鱼	网箱深度	平行样	鱼苗数量
大藤峡水 电站下游 34.7km	2022年7 月1日至 7月13日	草鱼	0-3m	2	20
		鲢鱼	0-3m	2	20
		鳊鱼	0-3m	2	20

(3) 表层网箱试验

鱼类受TDG过饱和表层网箱试验于2022年7月1日展开，试验以草鱼、鲢鱼以及鳊鱼为观测对象，设置2组平行实验组，网箱深度为0-0.5m，具体工况见表2-6。

表 2-6 表层网箱试验工况表

试验点	试验时间	试验鱼	网箱深度	平行样	鱼苗数量
		草鱼	0-0.5m	2	20
大藤峡水 电站下游 34.7km	2022 年 7 月 1 日至 7 月 13 日	鲢鱼	0-0.5m	2	20
		鳊鱼	0-0.5m	2	20

2.1.3.2 试验鱼观测方法

在试验过程中连续监测TDG饱和度、DO浓度、水温、浊度以及水流速度五个指标作为外部环境指标，其中TDG饱和度、浊度、流速每隔4小时记录一次，DO浓度和水温每隔1小时记录一次。试验期间内每隔4小时分水层记录试验鱼存活情况，并记录试验鱼的死亡时间、体重与体长。

2.1.3.3 数据分析方法

(1) 死亡率

试验鱼的死亡率计算方法见公式(2-1):

$$P_i = \frac{n_i}{N_i} \times 100\% \quad (2-1)$$

式中， P 为实验鱼死亡率， n 为该组实验死亡鱼数量， N 为该组实验鱼总数。

本章将通过生存分析方法来对试验鱼类在不同补偿水深实验结果进行分析。生存分析是一种将生存时间和生存结果综合起来对数据进行分析的统计方法。本章采用生存分析获取不同工况实验组和平行组之间的差异显著性 ($p < 0.05$)。

2.2 试验结果分析

2.2.1 实验期间泄洪数据分析

2022年7月份试验期大藤峡水电站按照正常调度开展，持续泄洪试验观测时间为2022年7月1日9时至7月13日18时，共历时297h。在观测期间，出库流量最大值为14690m³/s，最小值为4340m³/s，平均值为8518.43m³/s。水位最高达到47.68m，最低为45.05m，水位平均值为47.24m。发电流量最大为2650m³/s，最小

值为 $1320\text{m}^3/\text{s}$ ，平均值为 $2328.69\text{m}^3/\text{s}$ 。溢流量最大为 $12700\text{m}^3/\text{s}$ ，最小为 $1980\text{m}^3/\text{s}$ ，平均值为 $6189.74\text{m}^3/\text{s}$ 。

2.2.2 实验背景值分析

(1) TDG饱和度和下泄流量分析

在2022年7月1日至7月13日的实验期间，TDG饱和度情况和总出流变化情况如图2-10所示。实验期间，TDG饱和度最大值为125.22%，最小值为111.22%。最高饱和度出现在7月2日晚20:46分，距离观测时间开始约35h。在实验期间，TDG饱和度呈现波动变化，在实验开始后的0~60h、89~95h、173~174h时间段里，TDG饱和度均处在120%以上，而在实验的其他时间段里，TDG饱和度则处在120%以下。

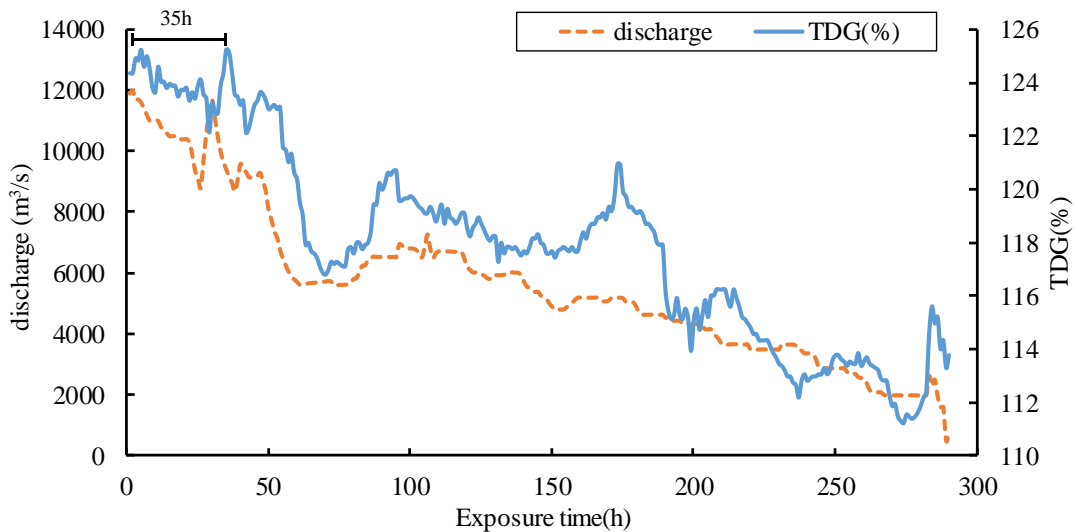


图 2-10 实验期间实验点 TDG 饱和度和流量变化过程图

根据实验期间同时段观测得到的TDG饱和度和下泄流量数据，整理分析得到二者之间的相关关系图，如图2-11所示。由图2-11可知，下泄流量与TDG饱和度之间的相关系数为0.8735，这表明下泄流量与TDG饱和度之间存在着较强的相关关系。

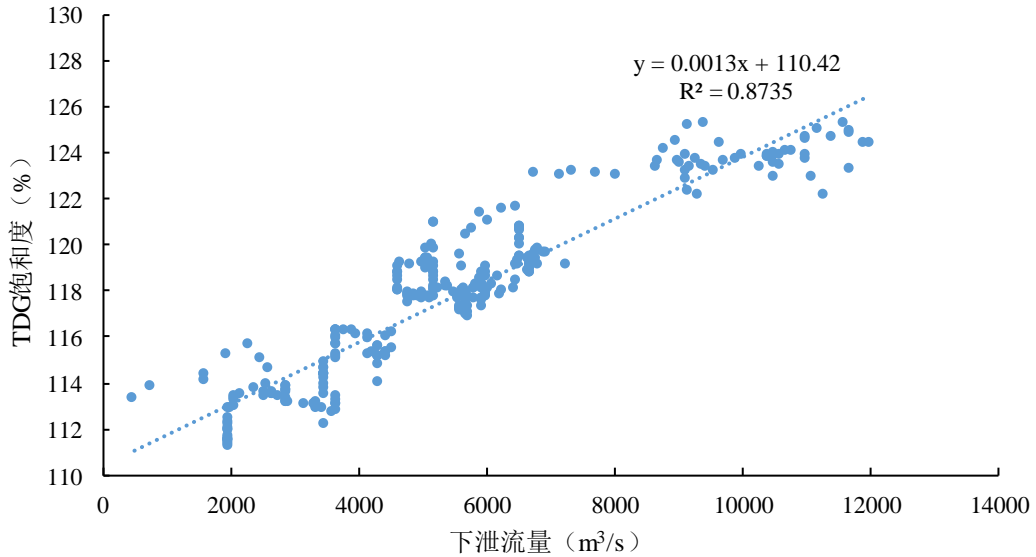


图 2-11 实验期间下泄流量与 TDG 饱和度之间的相关关系图

(2) 溶解氧与TDG饱和度相关分析

在实验开始35h后进行溶解氧的连续读数，试验过程中每隔一小时读取实验点的溶解氧值，从而获得实验点溶解氧的变化情况，实验期间溶解氧最大值为9.29mg/L，最小值为7.6mg/L。

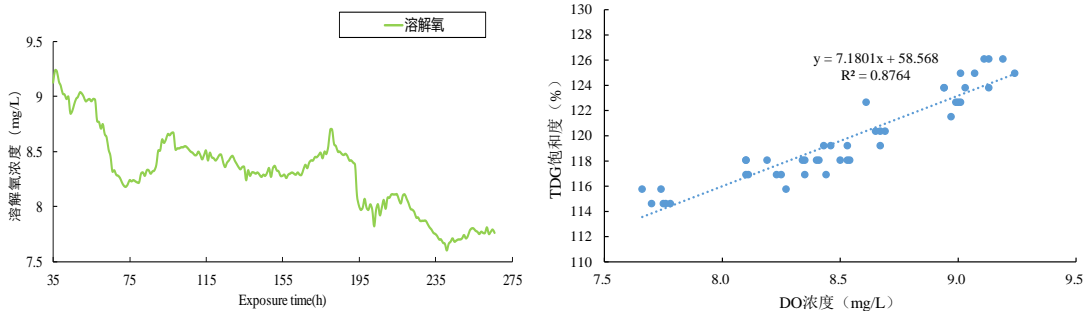


图 2-12 实验期间实验点溶解氧浓度和 TDG 饱和度变化过程图

根据实验期间同时段观测得到的TDG饱和度与DO浓度数据，整理分析得到二者之间的相关关系图，如图2-12。由图可知，TDG饱和度与DO浓度之间的相关系数为0.8764，这表明大藤峡水利枢纽工程泄水生成的TDG与DO浓度之间存在着较强的相关关系。

(3) 水温变化分析

试验过程中实验点水温维持在24~28℃,如图2-13所示,水温最大值为28.2℃,水温最小值为25.3℃。在实验期间,环境水温总体上呈现逐渐上升的趋势。

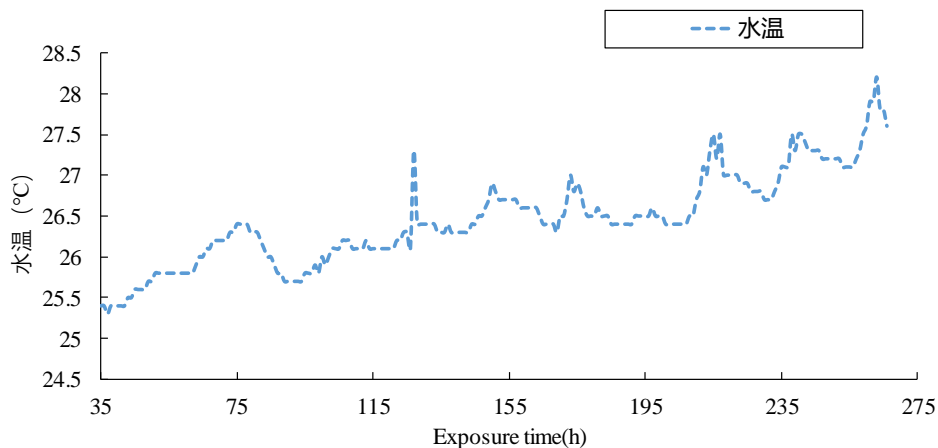


图 2-13 实验期间实验点水温随时间变化图

(4) 流速与浊度变化分析

在2022年7月2日至7月13日的实验期间,每天上午以及下午两个时间段读取实验点位置的流速和浊度大小,每次读取3个数并取其平均值,从而获得实验点流速和浊度的变化情况。实验期间流速最大值为0.091m/s,最小值为0.025m/s,浊度最大值为319NTU,最小值为81NTU。流速和浊度的变化如图2-14所示。总体上看,实验点流速变化较小,浊度除7月8日外(当日下雨)总体变化较小。

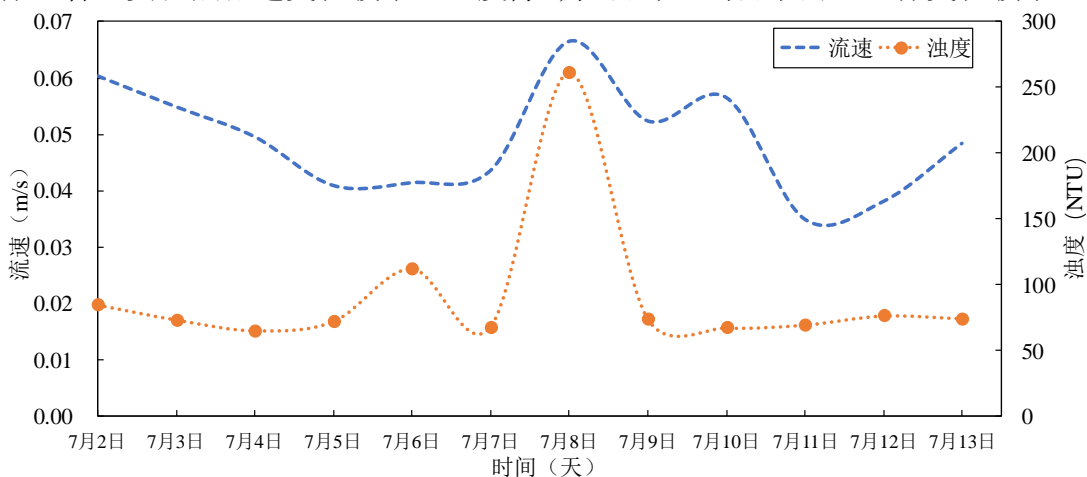


图 2-14 实验期间实验点流速和浊度随时间变化图

2.2.3 TDG 过饱和胁迫下不同补偿水深实验结果

2.2.3.1 表层网箱试验鱼类实验结果

试验统计了不同水深层各试验鱼的死亡数量，统计结果显示，处于表层网箱的草鱼实验组和平行组的最终死亡率分别为60%和100%，处于表层网箱的鲢鱼实验组和平行组的最终死亡率分别为50%和85%，处于表层网箱的鳊鱼实验组和平行组的最终死亡率分别为40%和20%，不同种类实验鱼死亡的数量伴随TDG饱和度的变化如图2-15~图2-17所示。

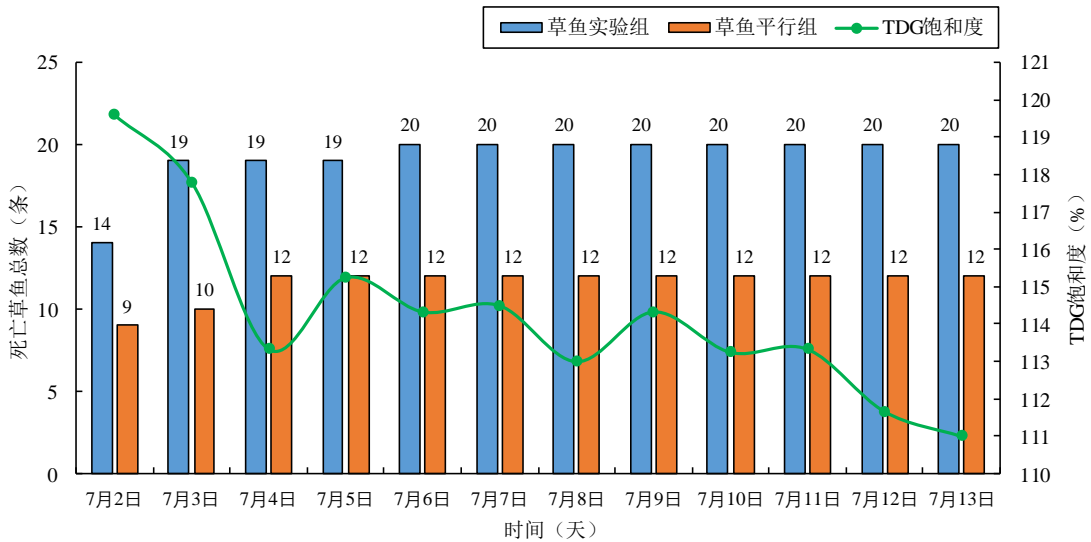


图 2-15 草鱼表层网箱死亡鱼类数量及 TDG 饱和度随时间变化图

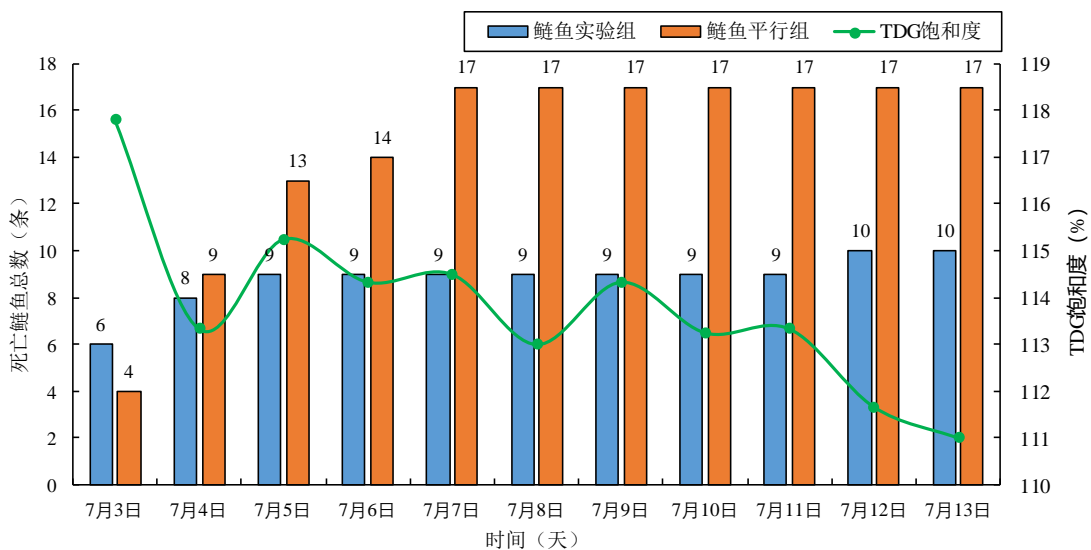


图 2-16 鲢鱼表层网箱死亡鱼类数量及 TDG 饱和度随时间变化图

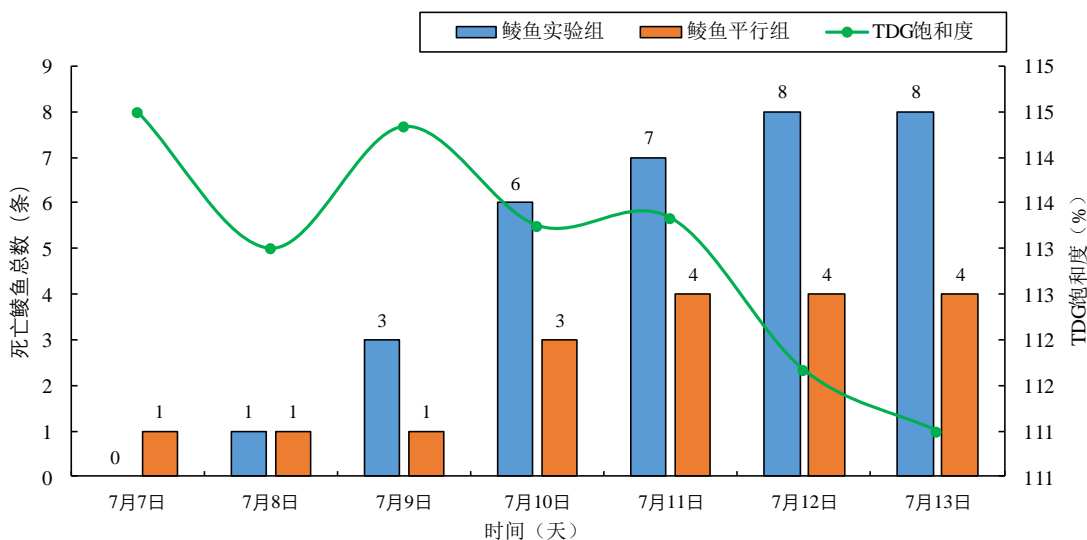


图 2-17 鲢鱼表层网箱死亡鱼类数量及 TDG 饱和度随时间变化图

2.2.3.2 分层和连通网箱试验鱼类死亡结果

处于0-1m网箱的草鱼实验组和平行组的最终死亡率分别为0%和0%，处于1-2m网箱的草鱼实验组和平行组的最终死亡率分别为10%和0%，处于2-3m网箱的草鱼实验组和平行组的最终死亡率分别为40%和5%，处于0-3m网箱的草鱼实验组和平行组的最终死亡率分别为5%和0%，不同水深下实验草鱼死亡的数量伴随TDG饱和度的变化如图2-18~图2-19所示。

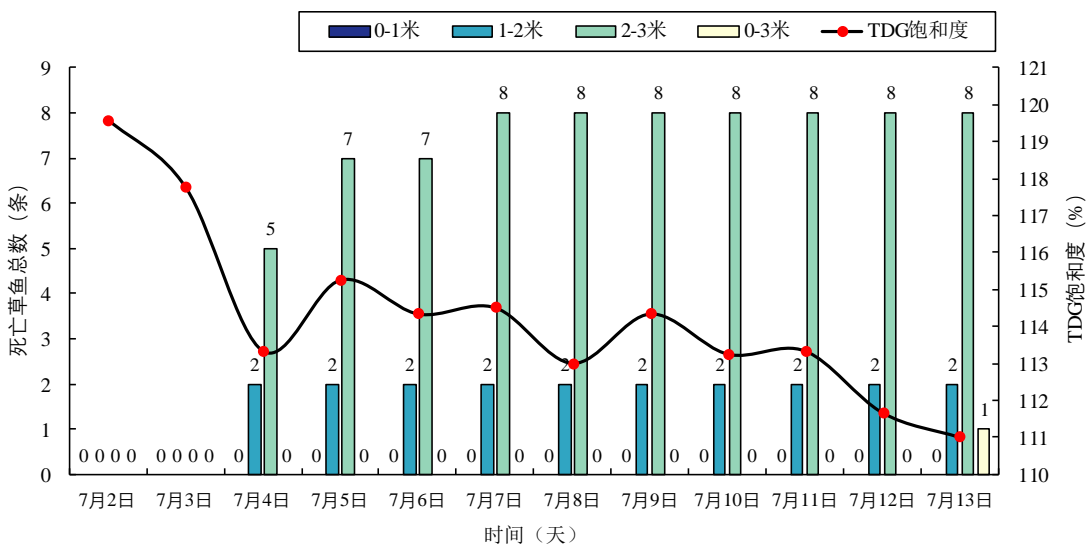


图 2-18 草鱼分层和连通网箱实验组死亡鱼类数量随时间变化图

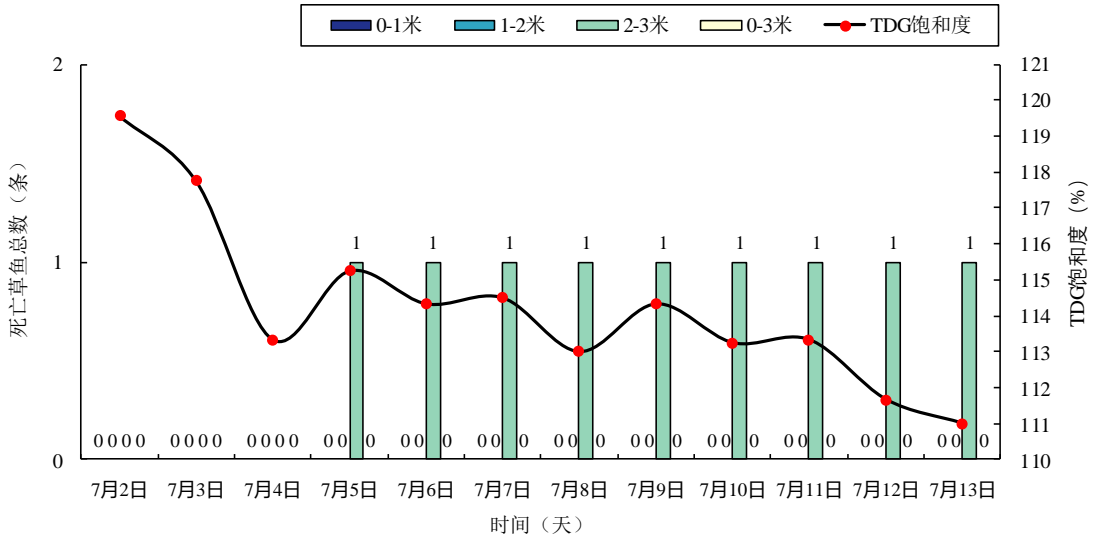


图 2-19 草鱼分层和连通网箱平行组死亡鱼类数量随时间变化图

处于0-1m网箱的鲢鱼实验组和平行组的最终死亡率分别为50%和30%，处于1-2m网箱的鲢鱼实验组和平行组的最终死亡率分别为35%和20%，处于2-3m网箱的鲢鱼实验组和平行组的最终死亡率分别为100%和70%，处于0-3m网箱的鲢鱼实验组和平行组的最终死亡率分别为10%和15%，不同水深下实验鲢鱼死亡的数量伴随TDG饱和度的变化如图2-20~图2-21所示。

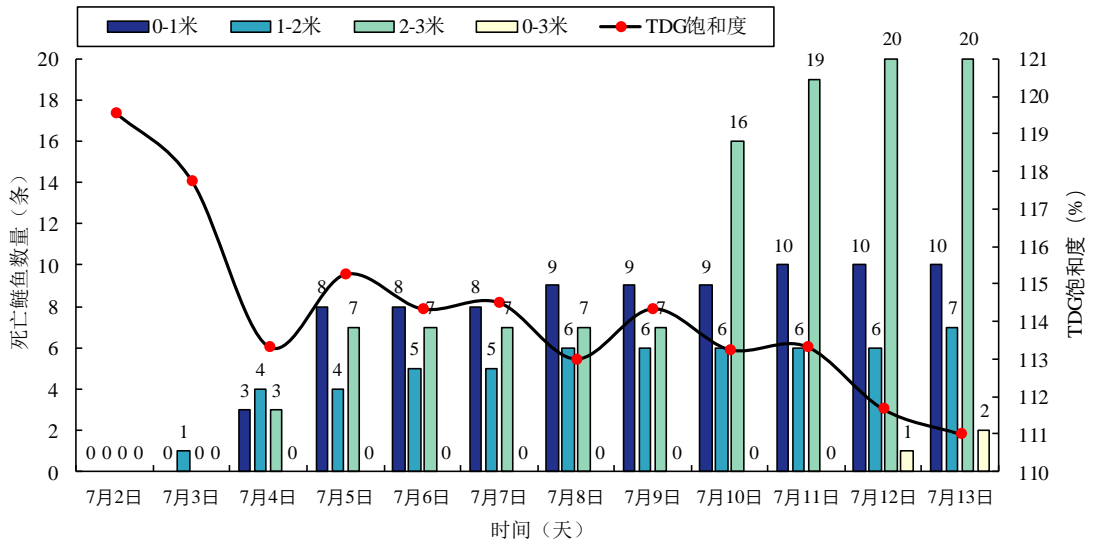


图 2-20 鲢鱼分层和连通网箱实验组死亡鱼类数量随时间变化图

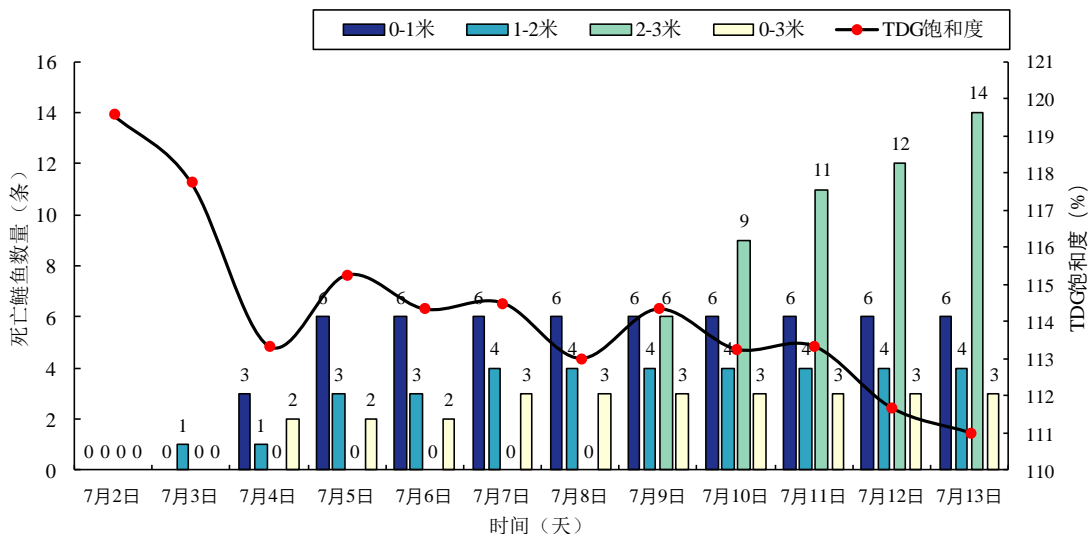


图 2-21 鲢鱼分层和连通网箱平行组死亡鱼类数量随时间变化图

处于0-1m网箱的鲢鱼实验组和平行组的最终死亡率分别为25%和20%，处于1-2m网箱的鲢鱼实验组和平行组的最终死亡率分别为35%和15%，处于2-3m网箱的鲢鱼实验组和平行组的最终死亡率分别为25%和15%，处于0-3m网箱的鲢鱼实验组和平行组的最终死亡率分别为25%和0%，不同水深下实验鲢鱼死亡的数量伴随TDG饱和度的变化如图2-22~图2-23所示。

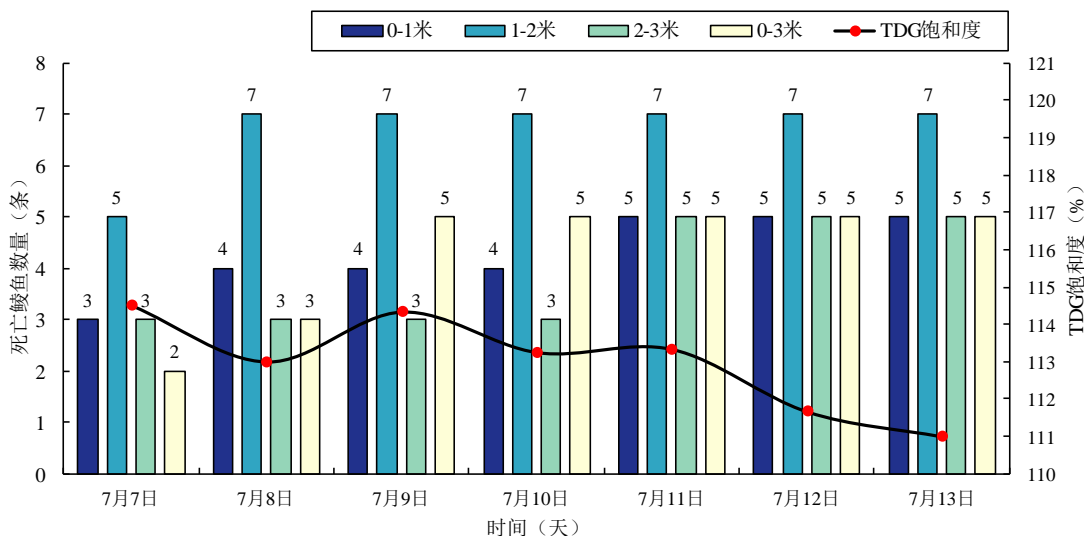


图 2-22 鲢鱼分层和连通网箱实验组死亡鱼类数量随时间变化图

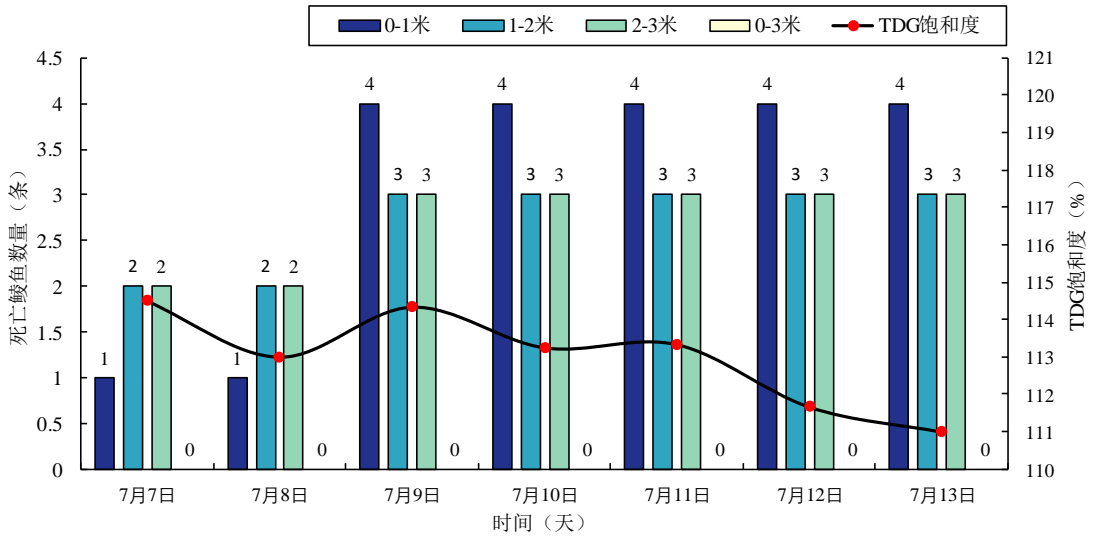


图 2-23 鲢鱼分层和连通网箱平行组死亡鱼类数量随时间变化图

(3) 不同补偿水深实验结果

将不同实验鱼类实验组与平行组的死亡率取算术平均数，最后得到不同水深层各试验鱼的最终死亡率统计结果如图2-24所示。试验结果表明，随着补偿水深的增加，草鱼和鲢鱼在受TDG过饱和胁迫下的死亡率有所降低。而对于鲢鱼而言，当补偿水深小于2m时，随着补偿水深的增加，其受TDG过饱和胁迫下的死亡率降低，而当补偿水深大于2m时，其受TDG过饱和胁迫下的死亡率升高。此外，三种试验鱼类在0-3m连通网箱下的存活率均显著高于在表层网箱下的存活率。

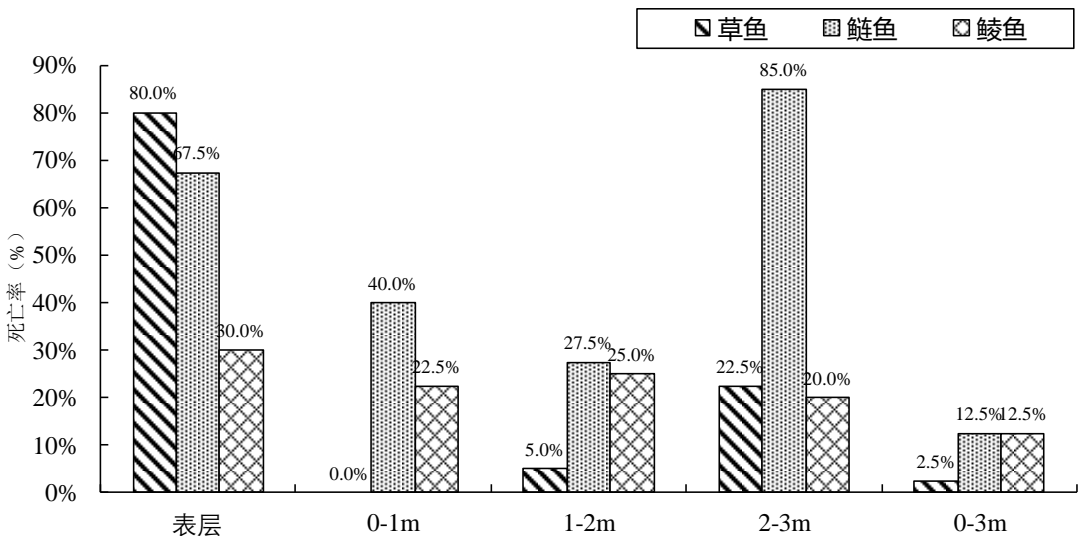


图 2-24 不同水深层各试验鱼的最终死亡率统计结果

2.2.4 试验鱼不同补偿水深生存率分析

通过对三种试验鱼类进行生存分析，得到三种试验鱼类不同工况下实验组及平行组的生存函数曲线如图2-25~图2-27所示。

Kaplan-Meier生存曲线中可看到，草鱼实验组和平行组中，表层网箱工况死亡速率最大，而连通网箱工况死亡速率最小。鲢鱼实验组和平行组中，分层网箱2-3米水深层工况和表层网箱工况死亡速率最大，连通网箱工况死亡速率最小。鲮鱼实验组和平行组中，表层网箱工况死亡速率最大，而连通网箱工况死亡速率最小。表明补偿水深对鱼类回避TDG过饱和有积极影响。

通过对比三种试验鱼类不同工况下实验组及平行组之间的差异性如表2-7~表2-9。可以发现，除草鱼表层网箱工况 ($p=0.00$)、草鱼分层网箱2-3m水深层工况 ($p=0.01$)、鲢鱼分层网箱2-3m水深层工况 ($p=0.00$)、鲮鱼连通网箱工况 ($p=0.02$) 外，其他工况下平行样之间差异不显著 ($p>0.05$)。

表2-7结果显示，草鱼在表层网箱实验组与平行组的生存率显著低于分层网箱各水深层实验组和平行组、连通网箱0-3m实验组和平行组 ($p<0.05$)。在分层网箱工况下，草鱼在0-1m水深层实验组和平行组的存活率与1-2m水深层实验组和平行组之间不存在显著性差异 ($p>0.05$)，显著高于2-3m水深层实验组和平行组 ($p<0.05$)。草鱼在1-2m水深层实验组和平行组的存活率与0-1m水深层实验组和平行组、2-3m水深层平行组均不存在显著性差异 ($p>0.05$)，显著高于2-3m水深层实验组 ($p<0.05$)。草鱼在连通网箱0-3m实验组和平行组的存活率显著高于表层网箱实验组和平行组、分层网箱2-3m水深层实验组 ($p<0.05$)，与分层网箱0-1m水深层实验组和平行组、1-2m水深层实验组和平行组、2-3m水深层平行组之间不存在显著性差异 ($p>0.05$)。

表2-8结果显示，鲢鱼在表层网箱实验组的生存率显著低于分层网箱1-2m水深层平行组、分层网箱2-3m水深层实验组、连通网箱0-3m实验组和平行组 ($p<0.05$)，而与分层网箱0-1m水深层实验组和平行组、分层网箱1-2m水深层实验组、分层网箱2-3m水深层平行组之间不存在显著性差异 ($p>0.05$)。鲢鱼在表层网箱平行组的生存率显著低于分层网箱0-1m水深层平行组、分层网箱1-2m水深层实验组和平行组、分层网箱2-3m水深层平行组、连通网箱0-3m实验组和平行组 ($p<0.05$)，与分层网箱0-1m水深层实验组、分层网箱2-3m水深层实验组之间不存在显著性差异 ($p>0.05$)。在分层网箱工况下，鲢鱼在0-1m水深层实验

组和平行组的存活率显著高于2-3m水深层实验组 ($p<0.05$)，与1-2m水深层实验组和平行组、2-3m水深层平行组之间不存在显著性差异 ($p>0.05$)。鲢鱼在1-2m水深层实验组的存活率显著高于2-3m水深层实验组 ($p<0.05$)，与0-1m水深层实验组和平行组、2-3m水深层平行组之间不存在显著性差异 ($p>0.05$)。鲢鱼在1-2m水深层平行组的存活率显著高于2-3m水深层实验组和平行组 ($p<0.05$)，与0-1m水深层实验组和平行组之间不存在显著性差异 ($p>0.05$)。鲢鱼在连通网箱0-3m实验组和平行组的存活率显著高于表层网箱实验组和平行组、分层网箱0-1m水深层实验组、分层网箱2-3m水深层实验组和平行组 ($p<0.05$)，与分层网箱0-1m水深层平行组、分层网箱1-2m水深层实验组和平行组之间不存在显著性差异 ($p>0.05$)。

表2-9结果显示，鲢鱼在表层网箱实验组与平行组的生存率显著低于连通网箱0-3m平行组 ($p<0.05$)，与分层网箱各水深层实验组和平行组、连通网箱0-3m实验组之间不存在显著性差异 ($p>0.05$)。在分层网箱工况下，鲢鱼在0-1m水深层实验组和平行组的存活率与1-2m水深层实验组和平行组、2-3m水深层实验组和平行组之间不存在显著性差异 ($p>0.05$)。鲢鱼在1-2m水深层实验组和平行组的存活率与0-1m水深层实验组和平行组、2-3m水深层实验组和平行组之间不存在显著性差异 ($p>0.05$)。鲢鱼在连通网箱0-3m实验组的存活率与表层网箱实验组和平行组、分层网箱各水深层实验组和平行组之间不存在显著性差异 ($p>0.05$)。鲢鱼在连通网箱0-3m平行组的存活率显著高于表层网箱实验组和平行组、分层网箱0-1m实验组和平行组、分层网箱1-2m实验组、分层网箱2-3m实验组 ($p<0.05$)，与分层网箱1-2m平行组、分层网箱2-3m平行组之间不存在显著性差异 ($p>0.05$)。

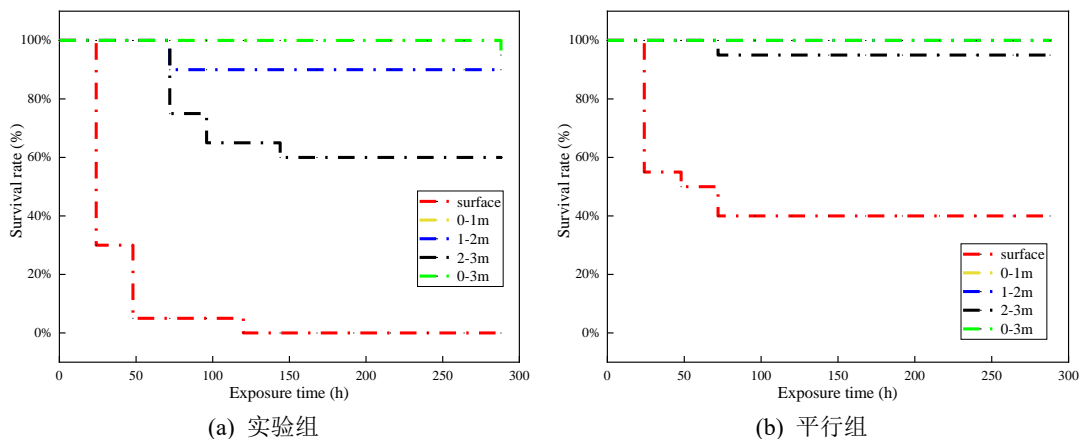


图 2-25 实验组以及平行组草鱼在不同补偿水深下生存函数曲线

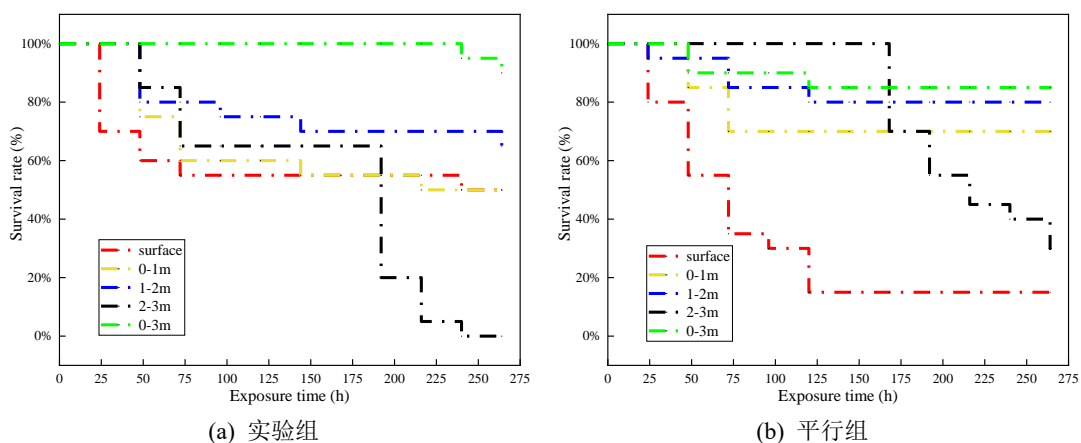


图 2-26 实验组以及平行组鲢鱼在不同补偿水深下生存函数曲线

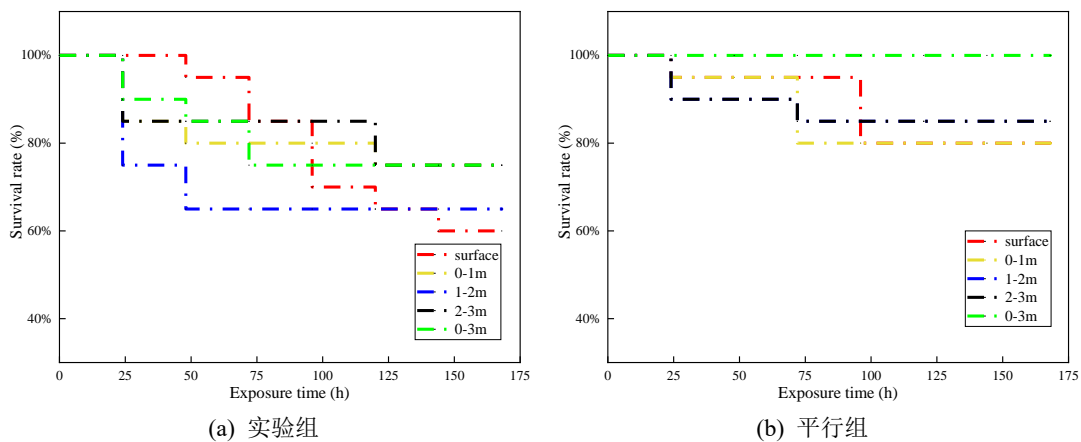


图 2-27 实验组以及平行组鲢鱼在不同补偿水深下生存函数曲线

表 2-7 草鱼生存分析结果表

实验组	草鱼表层-a		草鱼表层-b		草鱼 0-1m-a		草鱼 0-1m-b		草鱼 1-2m-a		草鱼 1-2m-b		草鱼 2-3m-a		草鱼 2-3m-b		草鱼 0-3m-a		草鱼 0-3m-b	
	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p
草鱼表层-a			10.24	0.00	44.56	0.00	44.56	0.00	42.78	0.00	44.56	0.00	40.71	0.00	44.56	0.00	44.56	0.00	44.56	0.00
草鱼表层-b	10.24	0.00			17.16	0.00	17.16	0.00	12.00	0.00	17.16	0.00	3.56	0.06	14.47	0.00	14.47	0.00	17.16	0.00
草鱼 0-1m-a	44.56	0.00	17.16	0.00			0.00	1.00	2.05	0.15	0.00	1.00	9.83	0.00	1.00	.031	1.00	0.32	0.00	1.00
草鱼 0-1m-b	44.56	0.00	17.16	0.00	0.00	1.00			2.05	0.15	0.00	1.00	9.83	0.00	1.00	.031	1.00	0.32	0.00	1.00
草鱼 1-2m-a	42.78	0.00	12.00	0.00	2.05	0.15	2.05	0.15			2.05	0.15	4.56	0.03	0.38	0.54	0.38	0.54	2.05	0.15
草鱼 1-2m-b	44.56	0.00	17.16	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	2.05	0.15			9.83	0.00	1.00	.031	1.00	0.32	1.00	1.00
草鱼 2-3m-a	40.71	0.00	3.56	0.06	9.83	0.00	9.83	0.00	4.56	0.03	9.83	0.00			7.06	0.01	7.25	0.01	9.83	0.00
草鱼 2-3m-b	44.56	0.00	14.47	0.00	1.00	.031	1.00	.031	0.38	0.54	1.00	.031	7.06	0.01			0.00	0.99	1.00	0.32
草鱼 0-3m-a	44.56	0.00	14.47	0.00	1.00	0.32	1.00	0.32	0.38	0.54	1.00	0.32	7.25	0.01	0.00	0.99			1.00	0.32
草鱼 0-3m-b	44.56	0.00	17.16	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	2.05	0.15	1.00	1.00	9.83	0.00	1.00	0.32	1.00	0.32		

$p < 0.05$ 表明两组之间存在显著性差异

表 2-8 鲢鱼生存分析结果表

实验组	鲢鱼表层-a		鲢鱼表层-b		鲢鱼 0-1m-a		鲢鱼 0-1m-b		鲢鱼 1-2m-a		鲢鱼 1-2m-b		鲢鱼 2-3m-a		鲢鱼 2-3m-b		鲢鱼 0-3m-a		鲢鱼 0-3m-b	
	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p
鲢鱼表层-a			0.30	0.58	0.21	0.65	2.32	0.13	0.31	0.25	4.40	0.04	5.07	0.02	0.14	0.71	8.41	0.00	6.02	0.01
鲢鱼表层-b	0.30	0.58			1.96	0.16	4.55	0.03	4.09	0.04	7.69	0.01	0.00	0.99	3.95	0.04	14.39	0.00	9.46	0.00
鲢鱼 0-1m-a	0.21	0.65	1.96	0.16			1.30	0.25	0.66	0.42	3.70	0.06	6.53	0.01	0.11	0.74	8.43	0.00	5.07	0.02
鲢鱼 0-1m-b	2.32	0.13	4.55	0.03	1.30	0.25			0.11	0.74	0.57	0.45	14.77	0.00	3.30	0.07	2.75	0.10	1.24	0.27
鲢鱼 1-2m-a	0.31	0.25	4.09	0.04	0.66	0.42	0.11	0.74			1.06	0.30	11.22	0.00	1.85	0.17	4.01	0.04	2.08	0.15
鲢鱼 1-2m-b	4.40	0.04	7.69	0.01	3.70	0.06	0.57	0.45	1.06	0.30			21.93	0.00	7.06	0.01	0.92	0.34	0.16	0.69
鲢鱼 2-3m-a	5.07	0.02	0.00	0.99	6.53	0.01	14.77	0.00	11.22	0.00	21.93	0.00			9.01	0.00	42.37	0.00	25.91	0.00
鲢鱼 2-3m-b	0.14	0.71	3.95	0.05	0.11	0.74	3.30	0.07	1.85	0.17	7.06	0.01	9.01	0.00			16.63	0.00	9.76	0.00
鲢鱼 0-3m-a	8.41	0.00	14.39	0.00	8.43	0.00	2.75	0.10	4.01	0.04	0.92	0.34	42.37	0.00	16.63	0.00			0.29	0.59
鲢鱼 0-3m-b	6.02	0.01	9.46	0.00	5.07	0.02	1.24	0.27	2.08	0.15	0.16	0.69	25.91	0.00	9.76	0.00	0.29	0.59		

$p < 0.05$ 表明两组之间存在显著性差异

表 2-9 鲮鱼生存分析结果表

实验组	鲮鱼表层-a		鲮鱼表层-b		鲮鱼 0-1m-a		鲮鱼 0-1m-b		鲮鱼 1-2m-a		鲮鱼 1-2m-b		鲮鱼 2-3m-a		鲮鱼 2-3m-b		鲮鱼 0-3m-a		鲮鱼 0-3m-b	
	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p	χ^2	p
鲮鱼表层-a			1.84	0.18	0.62	0.43	1.46	0.23	0.00	0.95	2.46	0.12	0.81	0.37	2.46	0.12	0.55	0.46	9.81	0.00
鲮鱼表层-b	1.84	0.18			0.19	0.66	0.01	0.94	1.40	0.24	0.11	0.74	0.15	0.70	0.11	0.74	0.24	0.63	4.34	0.04
鲮鱼 0-1m-a	0.62	0.43	0.19	0.66			0.20	0.65	0.51	0.48	0.60	0.44	0.00	0.98	0.60	0.44	0.00	0.98	5.59	0.02
鲮鱼 0-1m-b	1.46	0.23	0.01	0.94	0.20	0.65			1.46	0.23	0.12	0.73	0.15	0.70	0.12	0.73	0.21	0.65	4.33	0.04
鲮鱼 1-2m-a	0.00	0.95	1.40	0.24	0.51	0.48	1.46	0.23			2.14	0.14	0.55	0.46	2.14	0.14	0.61	0.44	8.31	0.00
鲮鱼 1-2m-b	2.46	0.12	0.11	0.74	0.60	0.44	0.12	0.73	2.14	0.14			0.55	0.46	0.00	1.00	0.58	0.45	3.16	0.08
鲮鱼 2-3m-a	0.81	0.37	0.15	0.70	0.00	0.98	0.15	0.70	0.55	0.46	0.55	0.46			0.55	0.46	0.00	0.98	5.58	0.02
鲮鱼 2-3m-b	2.46	0.12	0.11	0.74	0.60	0.44	0.12	0.73	2.14	0.14	0.00	1.00	0.55	0.46			0.58	0.45	3.16	0.08
鲮鱼 0-3m-a	0.55	0.46	0.24	0.63	0.00	0.98	0.21	0.65	0.61	0.44	0.58	0.45	0.00	0.98	0.58	0.45			5.58	0.02
鲮鱼 0-3m-b	9.81	0.00	4.34	0.04	5.59	0.02	4.33	0.04	8.31	0.00	3.16	0.08	5.58	0.02	3.16	0.08	5.58	0.02		

$p < 0.05$ 表明两组之间存在显著性差异

2.3 讨论

在本次鱼类耐受性观察试验中，除草鱼表层试验组、鲢鱼表层试验组以及鲢鱼实验组和对照组中的2-3m水深层达到半数死亡之外，其他试验工况都未出现半数实验鱼类死亡的情况，故本次试验采用实验鱼类的死亡率取代半致死时间来表征实验结果^[26,121,122]。

对此前针对长江上游不同鱼类受TDG胁迫的半致死时间的研究进行总结后发现，鱼的种类、体格以及水温均对鱼类受TDG胁迫的半致死时间（死亡率）具有一定的影响^[26,37,55,75,123,124]。长江流域不同鱼类受TDG胁迫的半致死时间的相应参数见表2-10所示。

表 2-10 长江流域不同鱼类受 TDG 胁迫的半致死时间 (h)

种类	体长 (cm)	体重 (g)	水温 (°C)	TDG 饱和度下半致死时间	
				120%	125%
齐口裂腹鱼	5.6-14	3.1-50	12-24	10.7-90.1	9.5-16.75
胭脂鱼	8.3-11.4	14.3-16.9	20		12.36-34.37
岩原鲤	5.2-9.5	2.42-15.8	20-25	17.9-18.4	6.5-14.9
长薄鳅	5.6	0.45	12.2±0.2	152.81	
达氏鲟	13.4±0.7	7.1±1.2	22-24		4.47
鲢鱼	8.24±0.2	6.52±0.4	25±2		

通过上表以及本试验结果可以看出，不同种类以及不同体型的鱼类受TDG过饱和的耐受性不尽相同。Deng研究了鳙鱼（俗称花鲢）在TDG饱和度在125%、130%、135%、140%的耐受性，采用了大（4.5-6.1cm，1.00-1.36g），小（2.0-2.8cm，0.11-0.2g）两种规格的实验鱼，最终结果表明，较小的鳙鱼的半致死时间小于（相同时间下死亡率大于）稍大的鳙鱼，说明鳙鱼受TDG过饱和的耐受性与鱼的体型呈正相关关系^[125]。Ji在进行鲢鱼受TDG过饱和胁迫的耐受性室内研究后认为，随着鲢鱼的生长，其比表面积减小，TDG过饱和和水体析出气泡附着在鱼体表面，对鱼的影响程度也随之减小，这可能是造成鲢鱼体型越大、半致死时间越长（死亡率越小）的原因^[26]。此外，由于鱼属于变温动物，若水温处在鱼类的适宜区间内，则鱼类体内的酶活性也会处在最佳状态，抵御外界威胁的能力较强，使其半致死时间变长（死亡率变小），所以水温的差异可能是造成同一种鱼类不同半致死时间和死亡率的原因^[126,127]。

此外,本次试验中,对比本实验三种试验鱼类的死亡规律后发现,鲢鱼在分层网箱2-3m水深工况下两组平行样的生存率均显著低于连通网箱0-3m工况($p<0.05$),而草鱼平行组和鲢鱼平行组在分层网箱2-3m水深工况下的生存率与连通网箱0-3m水深工况之间不存在显著性差异($p>0.05$)。这一反常现象可能是由于不同鱼类的喜好水深不同所导致的。

具体而言,鲢鱼通常被认为是一种中上层鱼类,其通常生活在水体表层,2-3m的水深层是其不常活动的区域,尽管补偿水深对鱼类回避TDG过饱和有积极影响,但人为将试验鱼束缚在其不适宜的水深层区域也可能会导致其死亡。此外,草鱼和鲢鱼均为底栖鱼类,常生活在水体中的中下层,2~3m水深对其影响较小,而0~1m的水深则可能增大其死亡率,但本实验更多的关注于不同补偿水深下TDG过饱和的致死影响,对试验鱼类自身适宜水深考虑较少,这可能也是导致本实验试验鱼类死亡率较高的原因。

2.4 小结

对比本实验三种试验鱼类的死亡规律后,得到结论如下:

(1)草鱼在表层网箱实验组与平行组的生存率显著低于分层网箱各水深层实验组和平行组、连通网箱0-3m实验组和平行组($p<0.05$)。鲢鱼在表层网箱实验组的生存率显著低于分层网箱1-2m水深层平行组、分层网箱2-3m水深层实验组、连通网箱0-3m实验组和平行组($p<0.05$),而与分层网箱0-1m水深层实验组和平行组、分层网箱1-2m水深层实验组、分层网箱2-3m水深层平行组之间不存在显著性差异($p>0.05$)。鲢鱼在表层网箱平行组的生存率显著低于分层网箱0-1m水深层平行组、分层网箱1-2m水深层实验组和平行组、分层网箱2-3m水深层平行组、连通网箱0-3m实验组和平行组($p<0.05$),与分层网箱0-1m水深层实验组、分层网箱2-3m水深层实验组之间不存在显著性差异($p>0.05$)。鲢鱼在表层网箱实验组与平行组的生存率显著低于连通网箱0-3m平行组($p<0.05$),与分层网箱各水深层实验组和平行组、连通网箱0-3m实验组之间不存在显著性差异($p>0.05$)。表明补偿水深对鱼类回避TDG过饱和有积极影响。

(2)在分层网箱工况下,草鱼在0-1m水深层实验组和平行组的存活率与1-2m水深层实验组和平行组之间不存在显著性差异($p>0.05$),显著高于2-3m水深层实验组和平行组($p<0.05$)。草鱼在1-2m水深层实验组和平行组的存活率与

0-1m水深层实验组和平行组、2-3m水深层平行组均不存在显著性差异($p>0.05$), 显著高于2-3m水深层实验组($p<0.05$)。鲢鱼在0-1m水深层实验组和平行组的存活率显著高于2-3m水深层实验组($p<0.05$), 与1-2m水深层实验组和平行组、2-3m水深层平行组之间不存在显著性差异($p>0.05$)。鲢鱼在1-2m水深层实验组的存活率显著高于2-3m水深层实验组($p<0.05$), 与0-1m水深层实验组和平行组、2-3m水深层平行组之间不存在显著性差异($p>0.05$)。鲢鱼在1-2m水深层平行组的存活率显著高于2-3m水深层实验组和平行组($p<0.05$), 与0-1m水深层实验组和平行组之间不存在显著性差异($p>0.05$)。鲢鱼在0-1m水深层实验组和平行组的存活率与1-2m水深层实验组和平行组、2-3m水深层实验组和平行组之间不存在显著性差异($p>0.05$)。鲢鱼在1-2m水深层实验组和平行组的存活率与0-1m水深层实验组和平行组、2-3m水深层实验组和平行组之间不存在显著性差异($p>0.05$)。

(3) 草鱼在连通网箱0-3m实验组和平行组的存活率显著高于表层网箱实验组和平行组、分层网箱2-3m水深层实验组($p<0.05$), 与分层网箱0-1m水深层实验组和平行组、1-2m水深层实验组和平行组、2-3m水深层平行组之间不存在显著性差异($p>0.05$)。鲢鱼在连通网箱0-3m实验组和平行组的存活率显著高于表层网箱实验组和平行组、分层网箱0-1m水深层实验组、分层网箱2-3m水深层实验组和平行组($p<0.05$), 与分层网箱0-1m水深层平行组、分层网箱1-2m水深层实验组和平行组之间不存在显著性差异($p>0.05$)。鲢鱼在连通网箱0-3m实验组的存活率与表层网箱实验组和平行组、分层网箱各水深层实验组和平行组之间不存在显著性差异($p>0.05$)。鲢鱼在连通网箱0-3m平行组的存活率显著高于表层网箱实验组和平行组、分层网箱0-1m实验组和平行组、分层网箱1-2m实验组、分层网箱2-3m实验组($p<0.05$), 与分层网箱1-2m平行组、分层网箱2-3m平行组之间不存在显著性差异($p>0.05$)。

(4) 鲢鱼在分层网箱2-3m水深工况下两组平行样的生存率均显著低于连通网箱0-3m工况($p<0.05$), 而草鱼平行组和鲢鱼平行组在分层网箱2-3m水深工况下的生存率与连通网箱0-3m水深工况之间不存在显著性差异($p>0.05$)。这一差异可能是由于不同鱼类的喜好水深不同所导致的。具体而言, 鲢鱼通常被认为是一种中上层鱼类, 其通常生活在水体表层, 2-3m的水深层是其不常活动的区域, 尽管补偿水深对鱼类回避TDG过饱和有积极影响, 但人为将试验鱼束缚

在其不适宜的水深层区域也可能会导致其死亡。本文第五章将在第二章研究结论的基础开展室内试验，研究鲢鱼的适宜水深分布，探寻适宜水深与TDG过饱和胁迫多因素影响下鲢鱼的行为规律。

3 草鱼受 TDG 过饱和胁迫患气泡病研究

近几年来,许多学者开展了关于TDG过饱和对鱼类耐受性影响方面的研究,得到了一些TDG过饱和胁迫后鱼类耐受性规律,但是目前研究主要关注鱼类受TDG过饱和胁迫的死亡率及半致死时间,而对鱼类受气泡病的影响缺乏有效手段量化。本章在西江流域开展草鱼受TDG过饱和胁迫患气泡病研究实验,将对草鱼受TDG胁迫下气泡病形成与发展规律做出量化分析。

3.1 材料与方法

3.1.1 试验对象

本试验在鱼类耐受性观测试验的基础上开展,试验对象有两类。第一类是草鱼、鲢鱼以及鳊鱼,与进行鱼类耐受性观测试验的草鱼、鲢鱼以及鳊鱼鱼苗为同一批鱼类,试验鱼类特征见2.1.2.1节,分别放置于0-1m, 1-2m, 2-3m的分层网箱、0-3m的连通网箱以及没有补偿水深的表层网箱。

第二类为10条草鱼成鱼,放置于最表层网箱,其体重体长特征见表3-1所示。试验开始时间为7月2日,将10条草鱼成鱼放入表层渔网中,共设置5个实验组,每组放入体型稍有差异的草鱼成鱼2条(为了便于观测时区分)7月3日~7月13日为草鱼成鱼受TDG胁迫出血及气泡病发展观测试验。7月13日将成鱼转移至暂养地鱼塘,观察实验鱼在鱼塘中的恢复情况,7月14日~7月21日为出血及气泡病恢复观测试验。

表 3-1 草鱼受 TDG 过饱和胁迫患气泡病研究身长体重参数表

	编号	体长 (cm)	全长 (cm)	体重 (g)
草鱼-组 1	1 号	23.1	25.3	235
	2 号		7 月 15 日于鱼塘中遗失	
草鱼-组 2	3 号	22.5	24.8	184
	4 号		7 月 15 日于鱼塘中遗失	
草鱼-组 3	5 号	22.8	24.8	214
	6 号	17.2	18.9	152
草鱼-组 4	7 号	21.8	23.6	181
	8 号	19.8	21.4	165
草鱼-组 5	9 号	20.4	21.9	174
	10 号	18.6	20.2	162

3.1.2 试验方法

本试验与鱼类耐受性观测试验同时开展，在鱼类耐受性观测试验期间，定期将试验网箱拉出水面，分水层记录试验鱼存活情况，并记录试验鱼的死亡时间、体重与体长。对于第二类实验鱼，在其受到TDG过饱和胁迫期间（2022年7月3日至2022年7月13日），每天分两次观察实验鱼类气泡病特征，记录下实验鱼类患气泡病严重程度并进行评分（评分标准见表3-2）。当水体中TDG饱和度有所降低后，我们将第二类实验鱼类从实验场地转移至暂养鱼塘进行气泡病发展研究实验，试验于2022年7月13日晚展开，持续到7月21日结束，在此期间，每天分两次观察实验鱼类气泡病特征并记录分数。

对于第一类实验鱼类，本试验主要观察其死亡后身体特征及其气泡病症状。对于第二类实验鱼类，本试验将重点观察进行鱼类耐受性观测试验的草鱼成鱼的GBD外部症状，和实验成鱼在暂养地鱼塘的气泡病恢复情况，必要时对GBD症状较突出的试验鱼进行解剖，并借助显微镜观察其细部气泡病症状。

对于实验鱼患气泡病的严重程度，我们对每一鱼鳍进行相应的评分来进行表示，具体评分标准如表3-2所示，由此将实验鱼各个鱼鳍得分进行累加得到最终得分。

表 3-2 气泡病严重程度评分标准（针对某一类鱼鳍）

症状（针对某一类鱼鳍）	得分
无症状	0
少量出血或少量气泡	1
少量出血且少量气泡，大量出血或大量气泡	2
大量出血且少量气泡，少量出血且大量气泡	3
大量出血且大量气泡	4



图 3-1 气泡病形成以及发展实验现场图

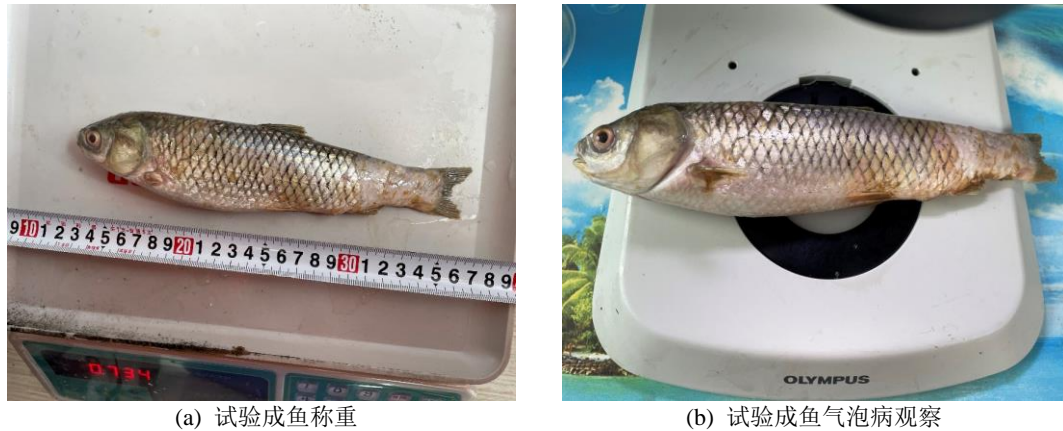


图 3-2 试验成鱼气泡病形成及发展研究试验图

3.2 气泡病症状观测实验结果

3.2.1 气泡病形成阶段实验结果分析

在此次开展的现场试验中，观察记录了草鱼（幼鱼）、鲢鱼、鳊鱼以及草鱼成鱼的典型气泡病症状，如图3-3所示。结果表明试验鱼类胸鳍、腹鳍、背鳍、臀鳍和尾鳍均有气泡病的症状，并伴有出血和眼球突出等症状。

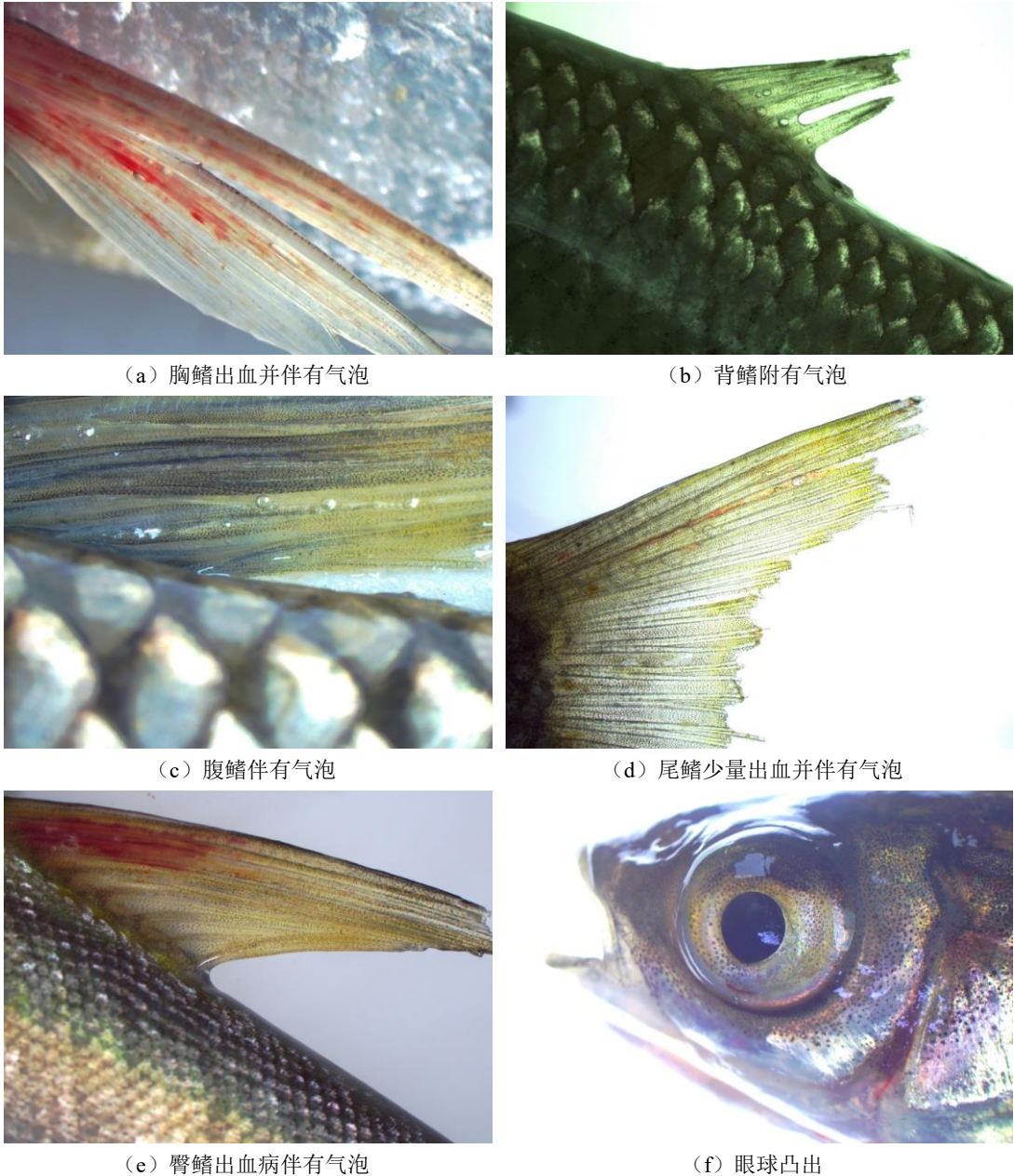


图 3-3 试验鱼类典型气泡病症状

从2022年7月3日至7月21日，我们对10条草鱼成鱼进行了气泡病形成及发展研究实验。其中7月3日至7月13日为实验鱼类受过饱和胁迫下的气泡病形成阶段，7月14日至21日为实验鱼在暂养场地的气泡病恢复阶段。

在实验鱼类受过饱和胁迫下的气泡病形成阶段，一共死亡3条实验鱼，分别为5号试验鱼、3号试验鱼和9号试验鱼，死亡时间依次为7月6日（受过饱和胁迫

3天)、7月7日(受过饱和胁迫4天)、7月8日(受过饱和胁迫5天)。3条死亡鱼类气泡病特征随时间变化表如表3-3~表3-5所示。其他试验鱼类气泡病特征随时间变化表如表3-6~表3-12所示。

表 3-3 5 号试验鱼气泡病特征随时间变化统计表

时间	尾鳍		臀鳍		腹鳍		胸鳍		背鳍	
	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分
7月3日							少量出血且伴有少量气泡	2		
7月4日			少量出血	1			大量出血	2		
7月5日	少量出血	1	少量出血且伴有少量气泡	2			大量出血且伴有少量气泡	3		
7月6日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	大量出血且伴有少量气泡	3	少量气泡	1

表 3-4 3 号试验鱼气泡病特征随时间变化统计表

时间	尾鳍		臀鳍		腹鳍		胸鳍		背鳍	
	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分
7月3日							少量出血且伴有少量气泡	2		
7月4日			少量出血	1			少量出血	1		
7月5日	少量出血	1	少量出血	1			少量出血且伴有少量气泡	2		
7月6日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月7日	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1

表 3-5 9 号试验鱼气泡病特征随时间变化统计表

时间	尾鳍		臀鳍		腹鳍		胸鳍		背鳍	
	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分
7月3日							少量出血	1		
7月4日	少量出血	1	大量出血	2			少量出血	1		
7月5日	少量出血	1	大量出血	2			少量出血	1		
7月6日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月7日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月8日	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1

3 草鱼受 TDG 过饱和胁迫患气泡病研究

表 3-6 1 号试验鱼气泡病特征随时间变化统计表

时间	尾鳍		臀鳍		腹鳍		胸鳍		背鳍	
	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分
7月3日							少量出血	1		
7月4日			少量出血	1			少量出血	1		
7月5日	少量出血	1	少量出血	1			少量出血且伴有少量气泡	2		
7月6日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月7日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量出血	1	少量气泡	1
7月8日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月9日	大量出血且伴有少量气泡	3	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月10日	大量出血且伴有少量气泡	3	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月11日	大量出血且伴有少量气泡	3	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月12日	大量出血且伴有少量气泡	3	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1	大量气泡	2
7月13日	大量出血且伴有少量气泡	3	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1

表 3-7 2 号试验鱼气泡病特征随时间变化统计表

时间	尾鳍		臀鳍		腹鳍		胸鳍		背鳍	
	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分
7月3日							少量出血	1		
7月4日			少量出血	1			少量出血	1		
7月5日	少量出血	1	少量出血	1			少量出血	1	少量气泡	1
7月6日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月7日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月8日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月9日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月10日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月11日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月12日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月13日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1

表 3-8 4 号试验鱼气泡病特征随时间变化统计表

时间	尾鳍		臀鳍		腹鳍		胸鳍		背鳍	
	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分
7月3日							少量出血且伴有少量气泡	2		
7月4日			少量出血	1			少量出血	1		
7月5日	少量出血	1	少量出血	1			少量出血	1		
7月6日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1
7月7日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1
7月8日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月9日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1
7月10日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月11日	少量出血且伴有大量气泡	3	少量气泡	1	大量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1
7月12日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1
7月13日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1

表 3-9 6 号试验鱼气泡病特征随时间变化统计表

时间	尾鳍		臀鳍		腹鳍		胸鳍		背鳍	
	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分
7月3日							少量出血且伴有少量气泡	2		
7月4日			少量出血	1			少量出血	1		
7月5日			少量出血	1			少量出血	1		
7月6日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1
7月7日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1
7月8日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月9日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1
7月10日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1
7月11日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1
7月12日	大量出血且伴有少量气泡	3	少量气泡	1	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月13日	大量出血且伴有少量气泡	3	少量气泡	1	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1

3 草鱼受 TDG 过饱和胁迫患气泡病研究

表 3-10 7 号试验鱼气泡病特征随时间变化统计表

时间	尾鳍		臀鳍		腹鳍		胸鳍		背鳍	
	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分
7月3日							少量出血	1		
7月4日	少量出血	1	少量出血	1			少量出血	1		
7月5日	少量出血	1	少量出血	1			少量出血且伴有少量气泡	2		
7月6日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月7日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月8日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	大量出血且伴有少量气泡	3	少量气泡	1
7月9日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月10日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月11日	少量出血且伴有大量气泡	3	大量气泡	2	少量气泡	1	少量出血且伴有大量气泡	3	大量气泡	2
7月12日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1
7月13日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1

表 3-11 8 号试验鱼气泡病特征随时间变化统计表

时间	尾鳍		臀鳍		腹鳍		胸鳍		背鳍	
	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分
7月3日							少量出血	1		
7月4日	少量出血	1	少量出血	1			少量出血	1		
7月5日	少量出血且伴有少量气泡	2					少量出血	1		
7月6日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月7日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	大量出血且伴有少量气泡	3	少量气泡	1
7月8日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	大量出血且伴有少量气泡	3	少量气泡	1
7月9日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月10日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月11日	少量出血且伴有大量气泡	3	大量气泡	2	大量气泡	2	大量气泡	2	大量气泡	2
7月12日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	大量出血且伴有少量气泡	3	少量气泡	1
7月13日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1

表 3-12 10 号试验鱼气泡病特征随时间变化统计表

时间	尾鳍		臀鳍		腹鳍		胸鳍		背鳍	
	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分	症状	得分
7月3日							少量出血	1		
7月4日	少量出血	1	少量出血	1			少量出血	1		
7月5日	少量出血	1	少量出血	1			少量出血	1		
7月6日	大量出血且伴有少量气泡	3	大量出血且伴有少量气泡	3	少量出血且伴有少量气泡	2	大量出血且伴有少量气泡	3	大量气泡	2
7月7日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1
7月8日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	少量出血且伴有少量气泡	2	大量出血且伴有少量气泡	3	少量气泡	1
7月9日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1
7月10日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1
7月11日	大量出血且伴有少量气泡	3	大量气泡	2	大量气泡	2	大量气泡	2	大量气泡	2
7月12日	大量气泡	2	少量气泡	1	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1
7月13日	少量出血且伴有少量气泡	2	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1	少量气泡	1

在实验鱼类受过饱和胁迫下的气泡病形成阶段结束后，所有试验鱼类的最终得分见表3-13所示。

表 3-13 实验鱼类受过饱和胁迫下的气泡病形成阶段最终得分表

试验鱼类		最终得分	备注
草鱼-组 1	1 号	8	试验结束后存活
草鱼-组 1	2 号	6	试验结束后存活
草鱼-组 2	3 号	5	受胁迫 4 天后死亡
草鱼-组 2	4 号	7	试验结束后存活
草鱼-组 3	5 号	9	受胁迫 3 天后死亡
草鱼-组 3	6 号	8	试验结束后存活
草鱼-组 4	7 号	6	试验结束后存活
草鱼-组 4	8 号	7	试验结束后存活
草鱼-组 5	9 号	5	受胁迫 5 天后死亡
草鱼-组 5	10 号	6	试验结束后存活

对不同胁迫时间试验鱼类气泡病得分做单因素方差分析，如表3-14。结果显示随胁迫时间的增加试验鱼类气泡病得分差异极显著($p < 0.05$, $F = 37.299$, $df = 10$)。事后比较见图3-4。单因素方差分析结果显示胁迫4天、胁迫6天、胁迫9天后试验鱼类气泡病得分没有显著性差异($p > 0.05$)，但显著高于其他时间段($p < 0.05$)。胁迫5天、胁迫7天、胁迫8天、胁迫10天、胁迫11天后试验鱼类气泡病得分没有显著性差异($p > 0.05$)，显著高于胁迫1天、胁迫2天、胁迫3天后试验鱼类气泡病得分($p < 0.05$)。胁迫2天、胁迫3天后试验鱼类气泡病得分没有显著性差异($p > 0.05$)，显著高于胁迫1天后试验鱼类气泡病得分($p < 0.05$)。

表 3-14 各胁迫时间下气泡病得分方差分析结果

			平方和	自由度	均方	F	显著性
组合			606.710	10	60.671	37.299	0.000
组间	线性项	对比	312.123	1	312.123	191.883	0.000
		偏差	249.148	9	27.683	17.019	0.000
组内			131.757	81	1.627		
总计			738.467	91			

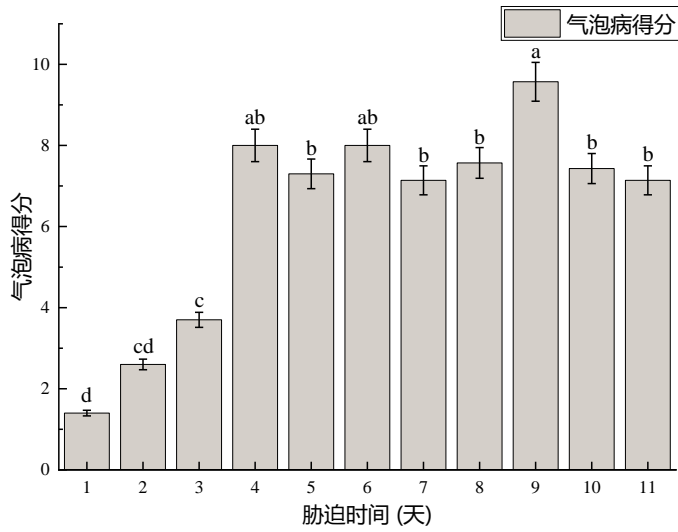
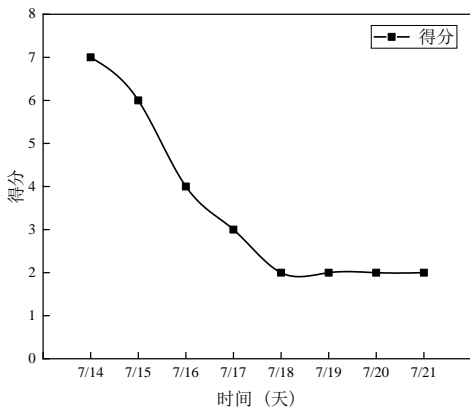


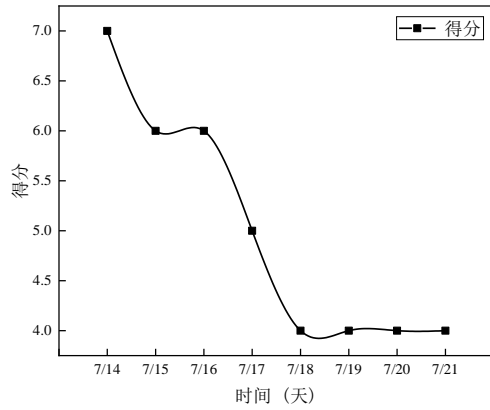
图 3-4 不同胁迫时间下气泡病得分差异性检验

3.2.2 气泡病恢复阶段结果分析

在7月14日至21日，进行了实验草鱼成鱼进行的气泡病恢复实验。各实验鱼在气泡病恢复阶段气泡病得分随时间变化如图3-5所示。



(a) 1号试验鱼



(b) 6号试验鱼

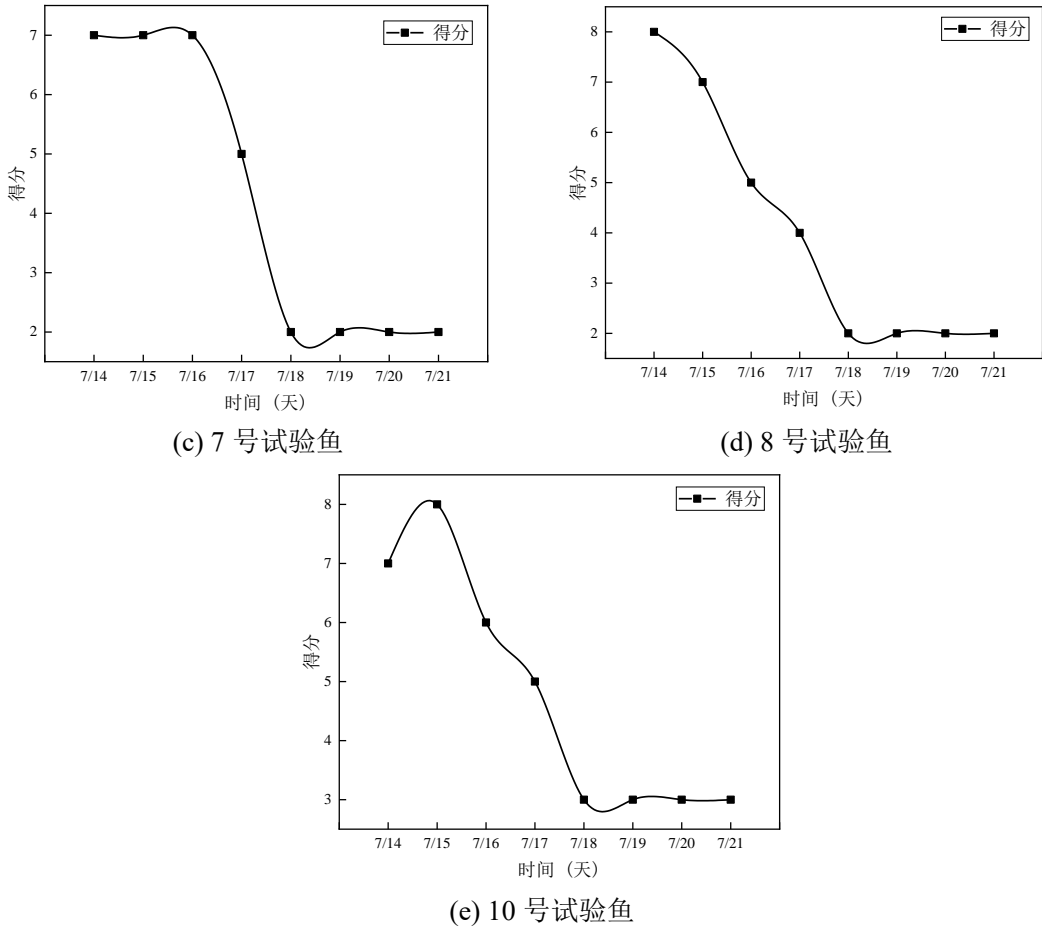


图 3-5 气泡病恢复阶段实验鱼类气泡病得分随时间变化图

表 3-15 各恢复时间下气泡病得分方差分析结果

			平方和	自由度	均方	F	显著性
组间	组合		122.967	5	24.593	32.078	0.000
	线性项	对比	106.426	1	106.426	138.816	0.000
		偏差	16.541	4	4.135	5.394	0.003
组内			18.400	24	0.767		
总计			141.367	29			

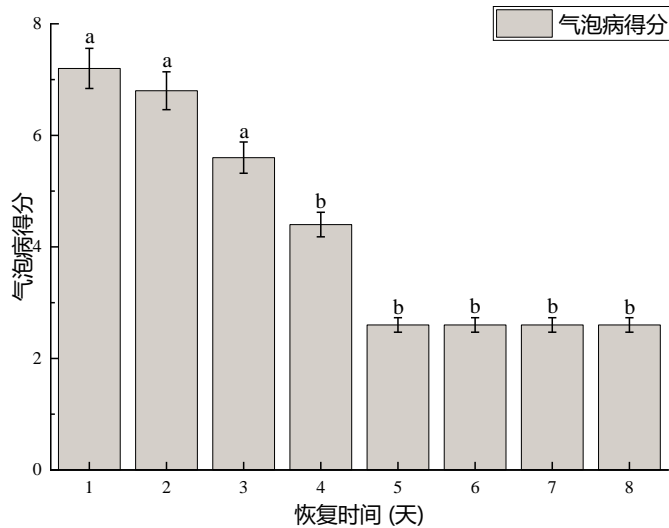


图 3-6 不同恢复时间下气泡病得分差异性检验

对不同恢复时间试验鱼类气泡病得分做单因素方差分析，如表3-15所示。结果显示随恢复时间的增加试验鱼类气泡病得分差异极显著 ($p < 0.05$, $F = 37.299$, $df = 10$)。事后比较见图3-6。单因素方差分析结果显示恢复1天、恢复2天、恢复3天后试验鱼类气泡病得分没有显著性差异 ($p > 0.05$)，但显著高于其他时间段 ($p < 0.05$)。恢复4天、胁迫5天、胁迫6天、胁迫7天、胁迫8天后试验鱼类气泡病得分没有显著性差异 ($p > 0.05$)，显著低于胁迫1、2、3天后试验鱼类气泡病得分 ($p < 0.05$)。

3.3 讨论

根据袁嫒等实验室条件下描述的长江上游鱼类受TDG过饱和胁迫后GBD现象特征，鱼类背鳍、尾鳍附着气泡与出血为常见现象，眼球突出以及皮下组织出现气泡的现象发生概率较小^[92]。在此次开展的现场试验中，观察记录了草鱼（幼鱼）、鲢鱼、鳊鱼以及草鱼成鱼的典型气泡病症状，结果表明草鱼成鱼胸鳍、腹鳍、背鳍、臀鳍和尾鳍均有气泡病的症状，并伴有出血和眼球突出等症状。

根据鱼类气泡病的特征对TDG过饱和对鱼类的胁迫进行分类，可分为急性胁迫与慢性胁迫，急性胁迫通常导致鱼类短时间内出现心血管系统栓塞等内部病变，而慢性胁迫通常会使得鱼类在较长时间的胁迫中出现组织或器官析出气泡而死亡。Alderdice将TDG过饱和小于116%视为对鲑鱼卵的慢性胁迫，而将

TDG过饱和大于117%视为对鲑鱼卵的急性胁迫。此外亦有将TDG饱和度在105%-125%视为慢性胁迫，而TDG饱和度在125%-140%时视为急性胁迫^[66]。在本试验中，试验地点TDG饱和度最大值为125.22%，最小值为111.22%，其中最大值出现在7月2日，此后TDG饱和度逐渐减小，因此总体上可认为在本试验中鱼类所受TDG过饱和胁迫为慢性胁迫。

3.4 小结

本章通过在西江流域开展实验鱼类受TDG过饱和胁迫时在不同补偿水深下耐受性的室外原型观测实验以及实验鱼气泡病形成及发展研究试验，并对比其他相关研究可得出以下结论：

(1) 在实验鱼类受过饱和胁迫下的气泡病形成阶段，单因素方差分析结果显示胁迫4天、胁迫6天、胁迫9天后试验鱼类气泡病得分没有显著性差异 ($p>0.05$)，但显著高于其他时间段 ($p<0.05$)。胁迫5天、胁迫7天、胁迫8天、胁迫10天、胁迫11天后试验鱼类气泡病得分没有显著性差异 ($p>0.05$)，显著高于胁迫1天、胁迫2天、胁迫3天后试验鱼类气泡病得分 ($p<0.05$)。胁迫2天、胁迫3天后试验鱼类气泡病得分没有显著性差异 ($p>0.05$)，显著高于胁迫1天后试验鱼类气泡病得分 ($p<0.05$)。

(2) 在实验鱼类受过饱和胁迫下的气泡病恢复阶段，单因素方差分析结果显示恢复1天、恢复2天、恢复3天后试验鱼类气泡病得分没有显著性差异 ($p>0.05$)，但显著高于其他时间段 ($p<0.05$)。恢复4天、胁迫5天、胁迫6天、胁迫7天、胁迫8天后试验鱼类气泡病得分没有显著性差异 ($p>0.05$)，显著低于胁迫1、2、3天后试验鱼类气泡病得分 ($p<0.05$)。

结果反映了养殖鱼类在短期暴露在TDG过饱和环境下也易患气泡病，并且其气泡病的症状会随胁迫时间的增加而加剧。在TDG过饱和胁迫时间不超过11天的条件下，气泡病症状会随恢复时间的增加而有所减轻。

4 TDG 过饱和对草鱼游泳能力影响研究

近几年来,许多学者开展了关于TDG过饱和对鱼类游泳能力影响方面的研究,得到了一些TDG过饱和胁迫后鱼类游泳速度的变化规律,但是研究内容主要是长江上游高坝泄洪产生的TDG过饱和对长江上游特有鱼类的影响,对其他流域研究较少。本论文在西江流域开展养殖鱼类受TDG过饱和胁迫时游泳能力变化室外原型观测实验,对TDG过饱和影响鱼类游泳能力的研究进行了内容的补充。

4.1 材料与方法

4.1.1 实验地点

TDG过饱和对草鱼游泳能力影响研究实验在鱼类受TDG过饱和胁迫耐受性实验以及草鱼受TDG过饱和胁迫患气泡病研究的基础上开展,试验鱼类受TDG胁迫工况设置与2.1.3.1节中表层网箱试验工况相同。为减小实验鱼类在运输途中所受影响以及人为干扰,游泳能力测试试验设置于试验平台岸边一户居民家中庭院进行,如图4-1所示。



图 4-1 鱼类游泳能力测试现场照片

4.1.2 试验材料

4.1.2.1 试验对象

试验鱼样本采集于2022年7月上旬，均在江口镇当地鱼苗养殖场购得，为减缓转移试验鱼时可能对试验鱼所造成的伤害，需恢复和暂养1-2天后，才正式开始TDG过饱和对草鱼游泳能力影响试验。暂养期间水体中的溶解氧保持在5.01~11.12mg/L，水温变化范围为32.5~36.0℃，浊度变化范围为55.1~88.9NTU，试验鱼体长以及体重规格如表4-1所示。

表 4-1 各工况条件下草鱼试验鱼规格表

组别	体长 cm	体重 g
组 1	8.18 ± 0.66	9.78 ± 0.91
组 2	7.70 ± 0.53	8.90 ± 2.35
组 3	8.24 ± 0.60	10.98 ± 2.95
组 4	7.76 ± 0.71	8.96 ± 2.19
组 5	8.02 ± 0.64	9.64 ± 1.62
组 6	7.94 ± 0.74	9.26 ± 3.07
组 7	7.34 ± 0.84	7.60 ± 2.78
组 8	8.18 ± 0.66	9.92 ± 2.59

注：体重、体长表示为 Mean±SD。

4.1.2.2 试验装置

鱼类游泳能力测定装置，采用丹麦Loligo System公司生产的中型游泳水槽（SW10800），水槽密封部位体积30L，测试区域规格55cm×14cm×14cm，仪器外观如图4-2所示。游泳水槽通过电动机转动使水体流动，可通过调节变频器而改变测试区域内的流速大小，同时变频器连接稳压器，以及测试区域左侧的蜂窝状稳流装置，用以产生均匀恒定的流场。

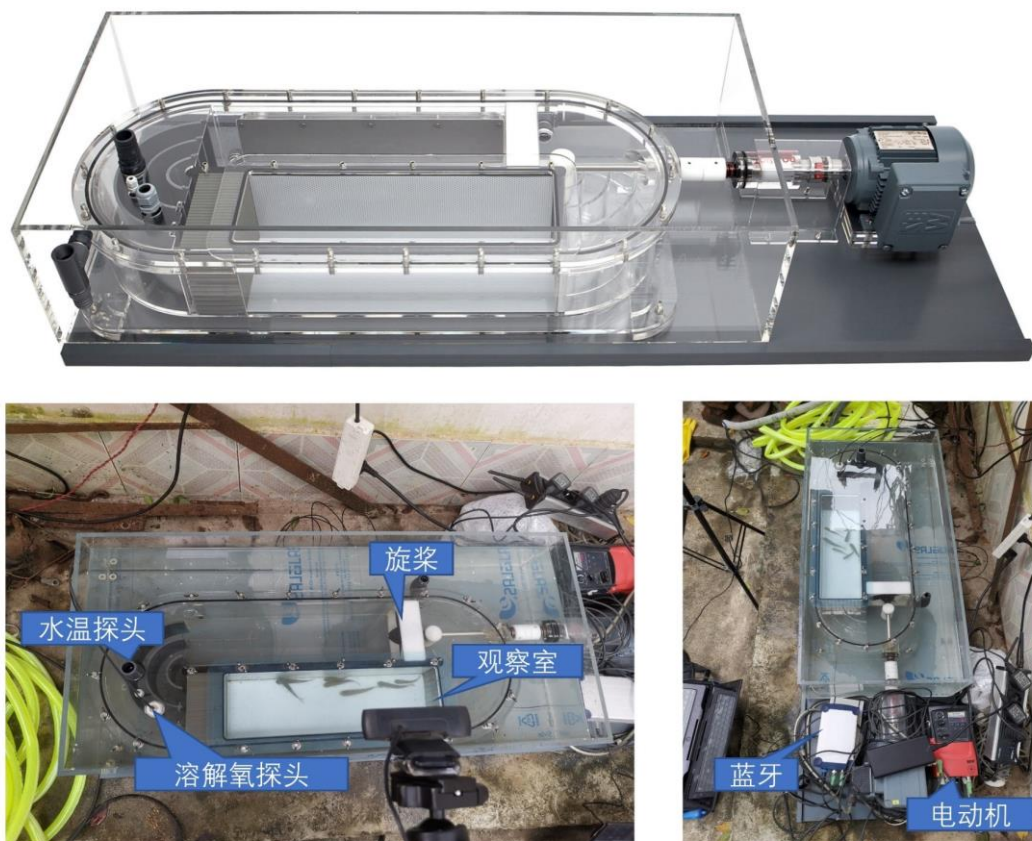


图 4-2 游泳能力试验设备外观图

在仪器进水端设置有溶解氧探头和水温探头，用于记录实验期间水温及溶解氧浓度变化。仪器参数如表4-2所示。

表 4-2 游泳能力试验仪器精度参数

仪器	参数	量程	分辨率	精度
荧光法溶氧仪	DO (mg/L)	0-45 mg/L	0.01 mg/L	15ppb
	DO (%)	0-100%	0.01%	0.15%
电子秤	体重 (g)	0-500g	0.01g	0.05g
直尺	长度 (cm)	0-20cm	0.1cm	±0.1cm

4.1.3 试验方案

4.1.3.1 工况设置

TDG过饱和对试验鱼游泳能力影响现场试验开始于2022年7月6日上午9时，

结束于7月12日，试验共进行7天，一共168h。在试验期间，测得试验点现场TDG饱和度为111.0%~115.3%，并且TDG饱和度随时间推移呈现逐渐降低的趋势。

一共选取100条健康的试验草鱼放置在试验点的2个表层网箱中，分为实验组和对照组，各50条（表层网箱设置见2.1.3.1节介绍）。在实验前取5条未经TDG过饱和胁迫的实验鱼测试其临界游泳速度作为空白对照。

在试验期间于每日上午从实验组网箱中取5条试验鱼，测试其临界游泳速度。依据试验鱼类受到TDG过饱和胁迫的时间一共设置8种工况，试验工况安排见表4-3。同时观察对照组试验鱼类死亡情况。

表 4-3 临界游泳速度测定试验工况设置表

组别	日期	工况	总共历时 (h)	数量 (条) 草鱼
组 1	7 月 5 日	未受胁迫	0	5
组 2	7 月 6 日	胁迫 1 天	24	5
组 3	7 月 7 日	胁迫 2 天	48	5
组 4	7 月 8 日	胁迫 3 天	72	5
组 5	7 月 9 日	胁迫 4 天	96	5
组 6	7 月 10 日	胁迫 5 天	120	5
组 7	7 月 11 日	胁迫 6 天	144	5
组 8	7 月 12 日	胁迫 7 天	168	5

4.1.3.2 鱼类游泳速度的测定

试验鱼类在丹麦Loligo System公司生产的中型游泳水槽（SW10800）中进行游泳能力测试，在长1.07 m×宽0.5 m×高0.265 m的仪器中测量其临界游泳速度。在整个试验进行时，用数码相机记录整个试验过程。

测量临界游泳速度采用递增流速法，试验开始前，检查装置内的溶氧水平及温度条件，逐步转动电机排除试验装置内多余气泡，并将试验鱼置于仪器内的测试区域，将仪器进行密封处理。将仪器内水流速度调整至5cm/s的低流速20分钟，以消除试验鱼类转移过程中造成的应激反应。

在临界游泳速度测试开始时，将流速设置为估计值的20%（通常为2BL/s，BL代表Body Length，体长），在测试过程中，流速每20分钟增加10cm/s，当测试水槽内所有试验鱼类因游泳疲劳而贴网后结束试验。在试验结束后记录所有

试验鱼的体长、体重以及测试水槽内的水温和溶解氧，临界游泳速度计算公式如下：

$$U_{crit} = v_2 + \frac{t_2}{\Delta t_2} \Delta v_2 \quad (4-1)$$

式中： Δt_2 为各流速下的持续时间（本试验中取20min）；

t_2 为在该流速下试验鱼持续时间（min）；

Δv_2 为速度增量（本试验中取10cm/s）；

v_2 为试验鱼能够完成 Δt_2 的最大游泳速度（cm/s）。

为消除体长对试验鱼游泳速度的影响，本次试验还采用相对临界游泳速度值来描述目标鱼的游泳能力，相对临界游泳速度 U_{crit-r} 等于鱼的绝对游泳速度 U_{crit-a} 除以体长（Body Length）。在每次试验前，测量水槽内溶解氧浓度，若浓度低于7mg/L，则在试验前用水泵对开放水槽以及密封水槽内的水体进行交换。

4.1.3.3 数据分析

试验数据通过单因素方差分析方法（one-way ANOVA）分析不同TDG过饱和和胁迫时间下，实验鱼临界游泳速度差异的显著性，并利用最小显著差数法（LSD）进行两两比较。显著水平为 $p < 0.05$ ，极显著水平为 $p < 0.01$ 。

4.2 TDG 过饱和和游泳能力实验结果

4.2.1 实验背景值分析

（1）大藤峡下泄流量与下游水位分析

在2022年7月5日至7月12日的实验期间，大藤峡下泄流量最大值为9347.08m³/s，出现在试验鱼受TDG过饱和胁迫第24小时，最小值为6022.5m³/s，出现在试验鱼受TDG过饱和胁迫第168小时。下游水位最低为47.44m，最高为47.53m。试验点最高TDG饱和度出现在7月5日，为115.3%，最低TDG饱和度出现在7月12日，为111.7%。

（2）其他影响因素变化分析

在游泳能力试验期间，水温变化范围在25.7℃~27.5℃之间。溶解氧浓度变化范围在7.6~8.7mg/L之间。试验点流速变化范围在0.03~0.07m/s之间。试验点浊度变化范围在67.00~261.33NTU之间。

由图4-3及图4-4可知，TDG过饱和对实验鱼游泳能力影响实验期间TDG饱

和度与下泄流量、溶解氧浓度均存在正相关关系。其他背景值随时间变化见图 4-5所示。

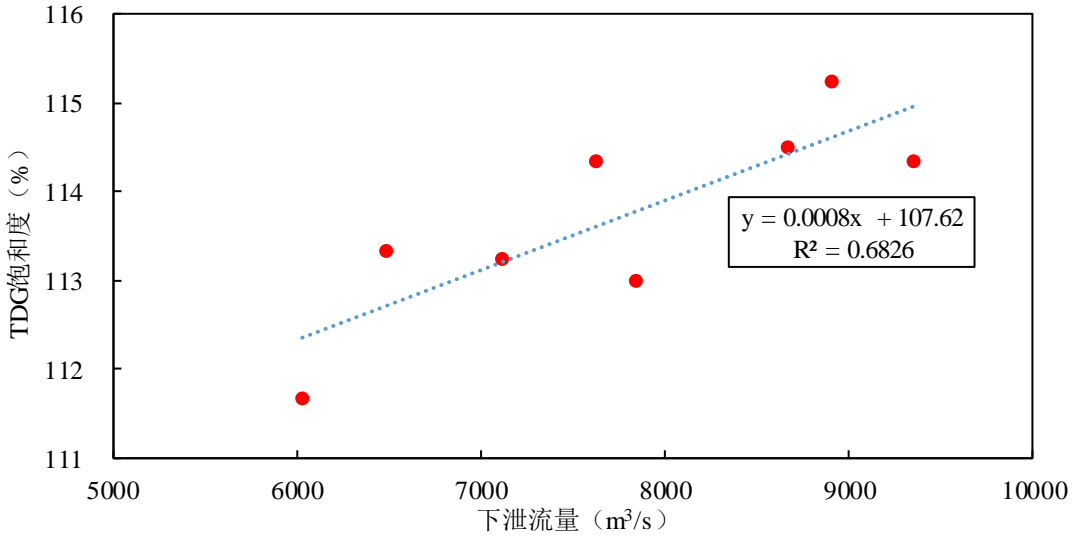


图 4-3 实验期间下泄流量与 TGD 饱和度之间的相关关系图

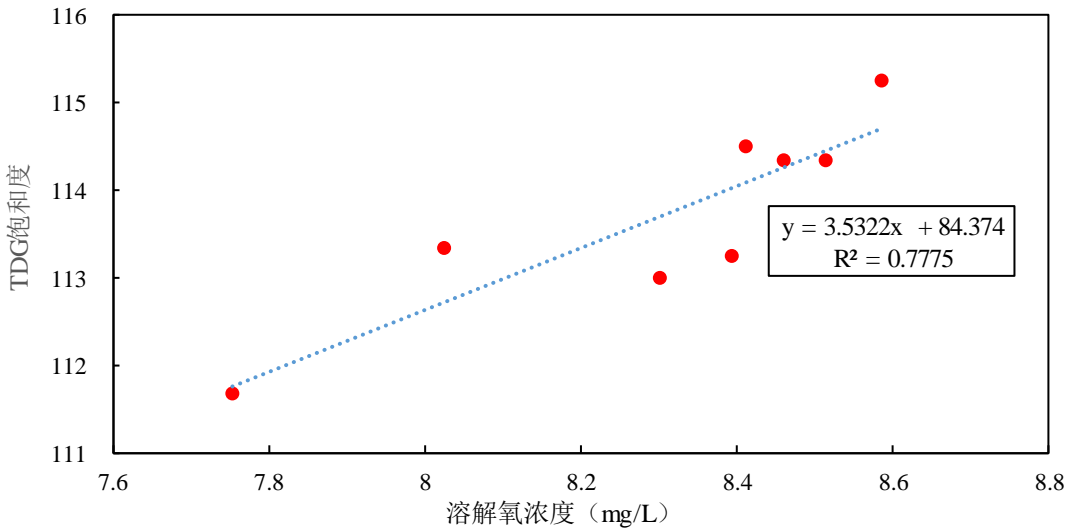
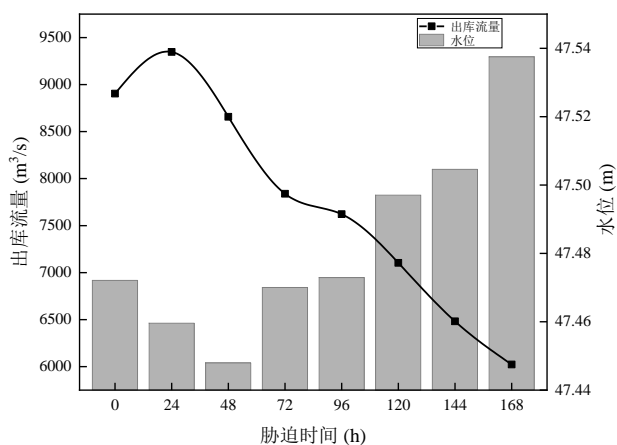
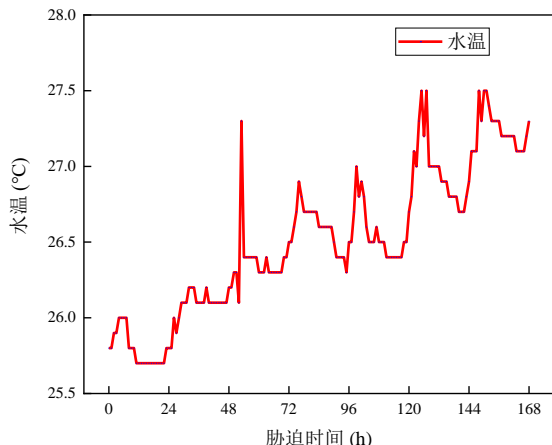


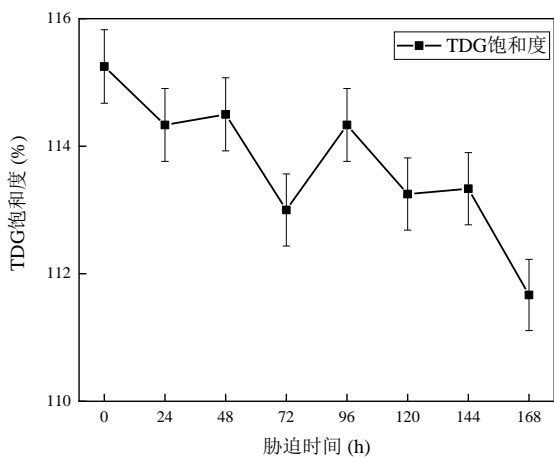
图 4-4 实验期间 TGD 饱和度与 DO 浓度之间的相关关系图



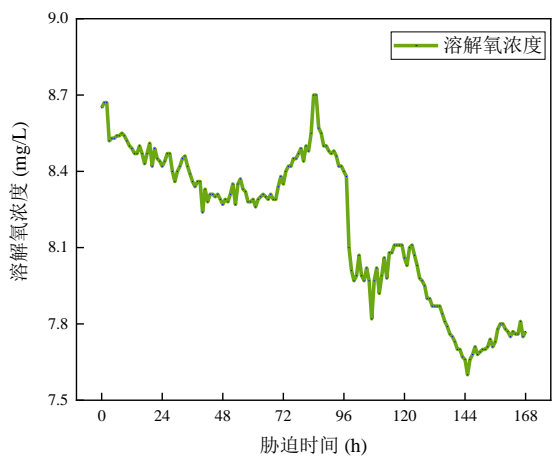
(a) 大藤峡下泄流量与下游水位变化图



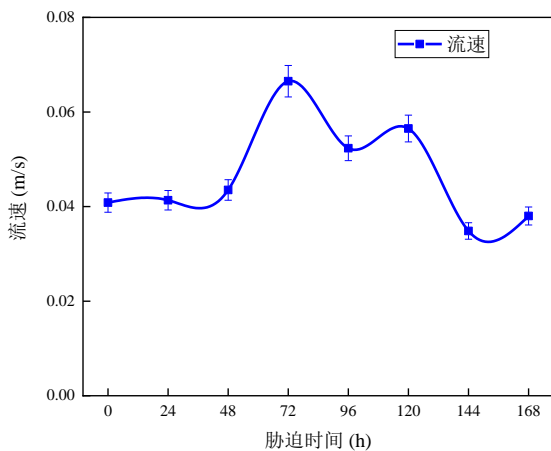
(b) 试验地点水温变化图



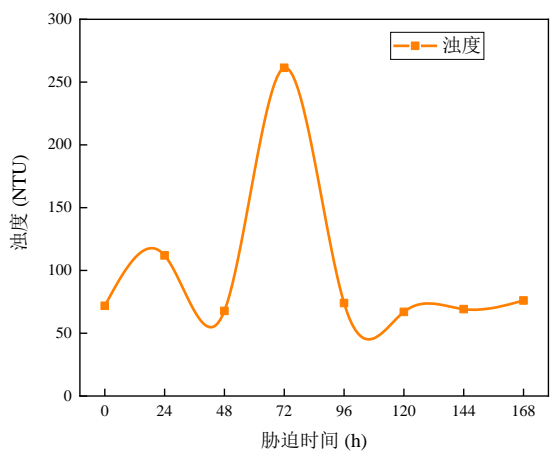
(c) 试验点 TDG 饱和度变化图



(d) 试验点溶解氧浓度变化图



(e) 试验点流速变化图



(f) 试验点浊度变化图

图 4-5 游泳能力试验期间背景值随时间变化图

4.2.2 TDG 过饱和胁迫下不同工况实验结果

在7月5日至7月12日试验草鱼受TDG过饱和胁迫游泳能力试验结束后，试验鱼绝对和相对临界游泳速度对照表见表4-4。

表 4-4 受 TDG 过饱和胁迫不同时间工况与空白对照工况对照表

工况	体长(cm)	体重 (g)	U_{crit-a} (m/s)	U_{crit-r} (BL/s)
空白对照	8.18±0.66	9.78±0.91	93.80±15.94	11.45±1.75
胁迫 24h	7.70±0.53	9.54±0.56	84.10±12.20	10.91±1.40
胁迫 48h	8.24±0.60	10.00±0.54	93.90±23.98	11.33±2.44
胁迫 72h	7.76±0.71	9.62±0.63	94.00±17.27	12.08±1.67
胁迫 96h	8.02±0.64	9.80±0.80	102.90±29.88	12.98±4.19
胁迫 120h	7.94±0.74	9.80±1.04	93.50±13.66	11.79±1.48
胁迫 144h	6.88±0.59	8.58±0.71	85.00±19.09	12.59±3.74
胁迫 168h	7.34±0.84	9.24±1.00	83.30±1.17	11.49±1.23

4.2.2.1 单因素方差分析

(1) 绝对游泳速度 U_{crit-a}

表 4-5 绝对游泳速度 ANOVA 分析描述性统计量表

胁迫时间	样本数	平均值	SD	SE	平均值的 95% 置信区间		最小值	最大值	成分间方差
					下限	上限			
0	5	93.80	17.82	7.97	71.67	115.93	62.00	104.00	
24	5	84.10	13.64	6.10	67.16	101.03	64.00	102.50	
48	5	93.90	26.80	11.99	60.62	127.18	73.50	140.00	
72	5	94.00	19.30	8.64	70.02	117.98	67.00	121.00	
96	5	102.90	33.40	14.94	61.42	144.37	61.50	147.00	
120	5	93.50	15.27	6.83	74.54	112.46	71.00	111.50	
144	5	85.00	21.34	9.54	58.50	111.50	71.00	120.00	
168	5	83.30	1.30	0.58	81.68	84.92	81.50	84.50	
总计	40	91.31	19.73	3.12	85.00	97.62	61.50	147.00	
模	固定效应		20.62	3.26	84.67	97.95			
型	随机效应			3.26 ^a	83.60 ^a	99.02 ^a			-40.00

注：SD表示标准偏差（Standard Deviation），SE表示标准错误（Standard Error）。

a.警告：成分间方差为负。在计算此随机效应测量时，会将其替换成0.0。

表 4-6 绝对游泳速度 ANOVA 方差齐性检验

		莱文统计	自由度 1	自由度 2	显著性
绝对临	基于平均值	1.762	7	32	0.130
界游泳	基于中位数	1.011	7	32	0.442
速度	基于剪除后平均值	1.633	7	32	0.162

表 4-7 绝对对游泳速度 ANOVA 分析结果表

			平方和	自由度	均方	F	显著性
	组合		1576.144	7	225.163	0.530	0.805
组间	线性项	对比	111.836	1	111.836	0.263	0.612
		偏差	1464.308	6	244.051	0.574	0.748
组内			13604.700	32	425.147		
总计			15180.844	39			

ANONA结果如表4-7所示,结果显示试验草鱼的绝对游泳速度 U_{crit-a} 在不同工况组间没有显著性差异(One-way ANOVA: $p=0.805>0.05$)。这说明在本试验中,随着TDG过饱和胁迫时间的延长,试验草鱼的绝对游泳速度 U_{crit-a} 的变化不显著。

(2) 相对游泳速度 U_{crit-r}

表 4-8 相对游泳速度 ANOVA 分析描述性统计表

胁迫时间	样本数	平均值	SD	SE	平均值的 95% 置信区间		最小值	最大值	成分间方差
					下限	上限			
0	5	11.45	1.95	0.87	9.02	13.87	8.38	13.29	
24	5	10.91	1.56	0.70	8.97	12.85	9.28	13.31	
48	5	11.33	2.72	1.22	7.94	14.71	9.44	16.09	
72	5	12.08	1.87	0.83	9.76	14.39	9.31	14.07	
96	5	12.98	4.68	2.09	7.17	18.79	7.41	19.60	
120	5	11.79	1.65	0.74	9.74	13.84	9.34	13.38	
144	5	12.59	4.18	1.87	7.40	17.78	9.17	19.67	
168	5	11.49	1.37	0.61	9.79	13.19	9.60	13.00	
总计	40	11.83	2.59	0.41	11.00	12.66	7.41	19.67	
模	固定效应		2.76	0.44	10.94	12.72			
型	随机效应			0.44 ^a	10.79 ^a	12.86 ^a			-1.05

注：SD表示标准偏差（Standard Deviation），SE表示标准错误（Standard Error）。

a.警告：成分间方差为负。在计算此随机效应测量时，会将其替换成0.0。

表 4-9 相对游泳速度 ANOVA 方差齐性检验

		莱文统计	自由度 1	自由度 2	显著性
相对临	基于平均值	1.850	7	32	0.111
界游泳	基于中位数	0.795	7	32	0.597
速度	基于剪除后平均值	1.729	7	32	0.137

表 4-10 相对游泳速度 ANOVA 分析结果表

			平方和	自由度	均方	F	显著性
	组合		16.642	7	2.377	0.311	0.944
组间	线性项	对比	3.575	1	3.575	0.468	0.499
		偏差	13.067	6	2.178	0.285	0.940
组内			244.592	32	7.644		
总计			261.234	39			

ANOVA结果如表4-10所示，结果显示试验草鱼的相对游泳速度 U_{crit-r} 在不同工况组间没有显著性差异（One-way ANOVA: $p=0.940>0.05$ ）。这说明在本试验中，随着TDG过饱和胁迫时间的延长，试验草鱼的相对游泳速度 U_{crit-r} 的变化不显著。

4.3 讨论

4.3.1 TDG 饱和度对试验鱼类游泳能力影响讨论

TDG过饱和对试验鱼游泳能力影响研究试验的结果显示，受TDG过饱和胁迫不同时间工况下试验鱼的临界游泳速度与未受到TDG过饱和胁迫工况下鱼类的临界游泳速度之间均不存在显著性差异（包括绝对临界游泳速度和相对临界游泳速度）（ $p>0.05$ ）；受TDG过饱和胁迫下试验鱼的临界游泳速度在不同工况组间也不存在显著性差异（ $p>0.05$ ）。

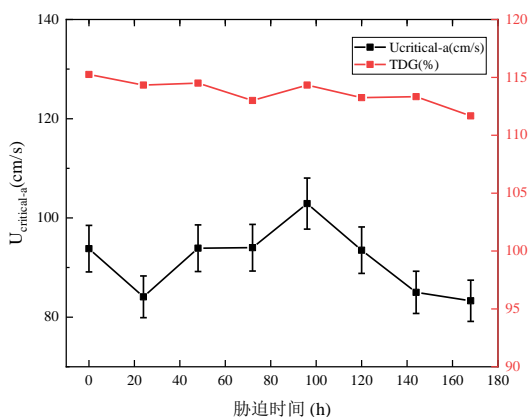
Ji在进行TDG对鲢鱼游泳能力影响的研究中，对非致死胁迫下（TDG饱和度分别为110%、120%、130%）的实验鱼临界游泳能力做胁迫时间及TDG饱和度的双因素方差分析，结果显示：TDG饱和度和胁迫时间的交互作用不显著（ $df=12$, $F=0.295$, $p=0.989$ ），TDG饱和度对实验结果的影响差异不显著（ $df=2$, $F=0.281$,

$p=0.756$), 而胁迫时间是实验结果差异的主要影响因素($df=6, F=2.960, p=0.010$)^[26]。对每个饱和度下不同胁迫时间做单因素方差分析后发现: TDG饱和度为110%时组间差异性极显著($p=0.002, F=4.310, df=7$); 120%时具有显著性差异($p=0.042, F=2.416, df=7$); 130%时差异亦显著($p=0.013, F=3.117, df=7$)^[26]。

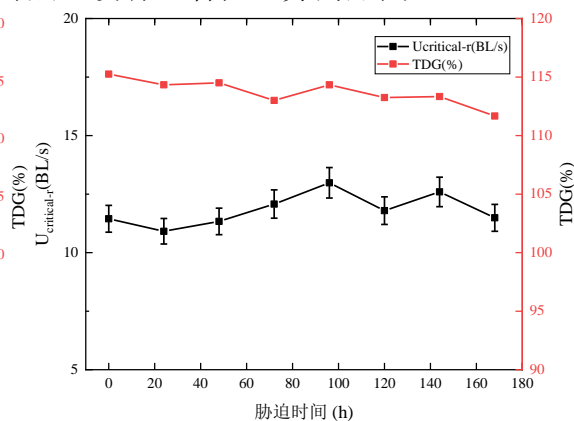
袁嫒在2017年两次大岗山现场鱼类游泳能力实验中发现, 齐口裂腹鱼和重口裂腹鱼的绝对临界游泳速度 U_{crit-a} 与相对临界游泳速度 U_{crit-r} 在受到TDG过饱和和水体胁迫后均显著降低, 但在经历18h恢复后, 其绝对临界游泳速度 U_{crit-a} 与相对临界游泳速度 U_{crit-r} 空白对照组没有显著性差异^[92]。

与上述两位研究人员实验结果相比, 可以发现在本实验中, TDG过饱和胁迫对试验鱼类的游泳能力影响十分有限, 是否胁迫以及胁迫时间不同造成的试验鱼类临界游泳速度的差异性均不显著($p>0.05$), 如图4-6(a)、图4-6(b)以及图4-6(c)所示。在本试验中TDG饱和度水平处在111%~116%之间, 处在非致死胁迫区间内, 在Ji的试验中, 在TDG饱和度为110%以及120%时, 试验鱼受TDG过饱和胁迫时间越长, 临界游泳速度越低, 而Yuan的结果表明, 虽然试验鱼在受TDG过饱和胁迫后临界游泳速度有所降低, 但在清水中恢复后, 临界游泳速度与空白对照组没有显著性差异, 两者结果均与本实验结果存在差别^[26,92]。

此外, 在本试验中设有平行对照组, 用于观察试验鱼的死亡情况, 结果如图4-6(d)所示。可以发现, 对照组试验鱼死亡数量随TDG胁迫时间的增加而有所增加, 可以认为在试验中存活的试验鱼健康状况较好, 其受TDG过饱和影响较小, 这可能是导致其临界游泳速度与空白对照组没有显著性差异的原因。



(a) U_{crit-a} 与 TDG 饱和度随时间变化图



(b) U_{crit-r} 与 TDG 饱和度随时间变化图

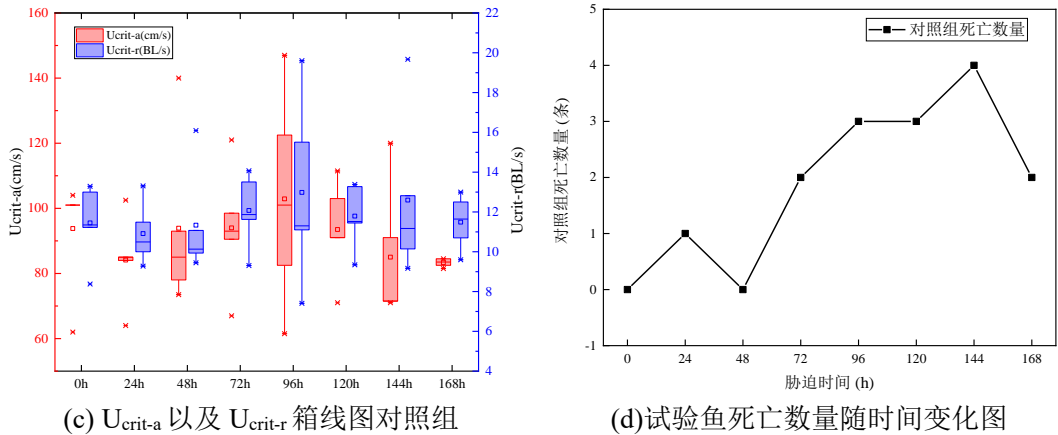


图 4-6 临界游泳速度与 TDG 饱和度随时间变化关系

4.3.2 其他因素对试验鱼类游泳能力影响讨论

水温是影响鱼类游泳能力的重要因子^[103]。在本章TDG过饱和对实验鱼游泳能力影响试验期间，水温变化范围在25.7℃~27.5℃之间，在试验研究过程中，因持续时间较长，试验水温有比较明显地波动变化，因此有必要进一步研究试验环境中水温变化和TDG过饱和胁迫对鱼类游泳能力的共同影响。

鱼类在游泳运动过程中伴随着大量的氧气消耗，因此，水体中的溶解氧水平也对鱼类的游泳能力有着重要影响。过去有学者发现对于鳊鱼（*Parabramis pekinensis*）和中华倒刺鲃（*Spinibarbus sinensis*）幼鱼的临界游泳速度在不同的溶解氧水平下有着显著性差异^[128]。此外，不同种类的鱼类对环境中溶解氧水平变化的敏感性以及行为表现也不一样，因此有必要进一步研究溶解氧变化和TDG过饱和对鱼类游泳能力的共同影响^[129,130]。

此外，水流流态、鱼类种类和鱼类体型特征等因素也会对鱼类的游泳能力产生一定影响。鱼类具有通过感知水流的流速和方向来调整自身游向和游速的能力，在本次TDG过饱和对试验鱼游泳能力影响研究试验中，试验点流速变化范围在0.03~0.07m/s之间，故可以认为水流流速对其游泳能力影响有限。在本次试验中，研究对象为体长在7.34~10.98cm区间内的草鱼幼鱼，在后续研究中，应进行其他鱼类和其他体型草鱼的TDG过饱和对游泳能力影响试验。

4.4 小结

本章通过开展不同TDG过饱和胁迫时间对实验鱼游泳能力影响试验，并对

比分析四川大学已开展的工作，得到以下结论：

在TDG过饱和对实验鱼游泳能力影响实验中，通过单因素方差分析后发现试验草鱼的绝对游泳速度 U_{crit-a} 在不同工况组间没有显著性差异（One-way ANOVA: $p=0.805>0.05$ ）；试验草鱼的相对游泳速度 U_{crit-r} 在不同工况组间没有显著性差异（One-way ANOVA: $p=0.940>0.05$ ）。这说明在本试验中，随着TDG过饱和胁迫时间的延长，试验草鱼的临界游泳能力变化不显著。

5 鲢鱼水深适应性室内试验研究

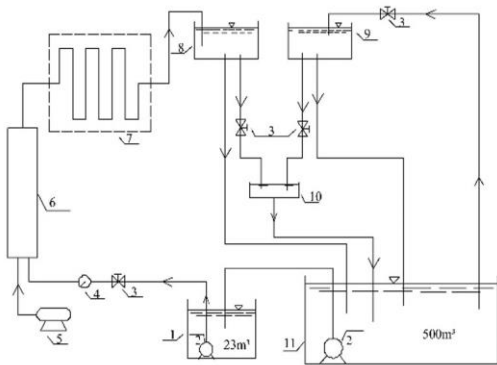
在本文第二章中的试验结果显示鲢鱼在分层网箱中处在2-3m水深层的死亡率最高，而通常认为在补偿水深的作用下，TDG过饱和水体对试验鱼类的胁迫会减弱，在本文第二章中的讨论部分认为这一反常现象是由于不同鱼类的适宜水深不同所导致的。鲢鱼是一种中上层鱼类，其通常生活在水体表层，2-3m的水深层是其不常活动的区域，尽管补偿水深对鱼类回避TDG过饱和有积极影响，但人为将试验鱼束缚在其不适宜的水深层区域也可能会导致其死亡。本文第五章将在第二章研究结论的基础开展室内试验，研究鲢鱼的适宜水深分布，探寻适宜水深与TDG过饱和胁迫多因素影响下鲢鱼的行为规律。

5.1 材料与方法

5.1.1 试验材料

5.1.1.1 试验仪器

(1) TDG过饱和系统：试验采用实验室自主研发的TDG生成及其鱼类影响研究系统，如图5-1所示。通过空气压缩机将气体掺入高压水体中，从而产生过饱和水体。



1蓄水池，2、12水泵，3水阀，4压力表，5空压机，6高压钢管，7混合管段，8过饱和水箱，9清水箱，10实验水箱，11大水池

(a) TDG水体生成及其对鱼类影响研究系统



(b) 装置实物图

图 5-1 试验装置概念与实物图

(2) 鱼类利用补偿水深回避TDG过饱和水体实验装置：装置为高4m，直径0.4m，厚0.5cm的有机玻璃圆柱。装置底部设置有两个进水口，一侧通入TDG过

饱和水体，另一侧通入清水。水流从底部进入，出水口则设置在顶部。装置实物图如图5-2所示。



(a) 实验装置主视图



(b) 实验装置侧视图

图 5-2 鱼类利用补偿水深回避 TDG 过饱和水体实验装置实物图

(3) PT4压力测定仪、YSIPRO20i溶氧仪。试验开始之前以及结束以后记录水体TDG饱和度以及溶解氧浓度。仪器实物图如图5-3所示。



(a) PT4 TGP 压力测定仪



(b) PT4 YSI PRO20i 溶氧仪

图 5-3 鱼类利用补偿水深回避 TDG 过饱和水体试验仪器实物图

5.1.1.2 试验对象

试验鱼采用四川省成都市金堂县土桥镇养殖鱼塘中的健康白鲢鱼苗，试验开展前将试验鱼暂养72h，暂养水体为经过曝气24h的自来水。暂养期间使用抽水泵让水体在各个水槽间循环，从而使暂养水体保持充足的氧气含量。暂养期间溶解氧浓度为8.91~10.00mg/L，水温处在15.9-16.9℃。



(a) 试验鱼类图



(b) 暂养环境现场图

图 5-4 试验鱼类及暂养环境图

表 5-1 试验鱼类暂养地背景参数表

3月16日			3月17日		
DO (%)	TDG (%)	水温 (°C)	DO (%)	TDG (%)	水温 (°C)
100.4	101	15.9	100.7	101	16.9

5.1.2 试验方案

利用如图5-1和图5-2所示的TDG过饱和生成装置以及鱼类利用补偿水深垂直回避TDG过饱和水体实验装置，开展养殖白鲢幼鱼的适应性水深以及在喜好水深及TDG过饱和共同影响下回避行为规律研究。

试验为白鲢幼鱼设置TDG饱和度为100%、110%、120%三种TDG饱和度工况。每个试验工况设置2个平行样，每个平行样使用试验鱼20尾，试验水温控制在15.9-16.7℃。

每个平行试验开始之前，在鱼类利用补偿水深垂直回避TDG水体的试验装置底部一侧进水口通入TDG过饱和水体，而在另一侧通入清水，通过调节过饱

和水和清水的流量比例来达到三种试验工况所设置的TDG饱和度，然后关闭进水水流。试验开始后，将20尾试验鱼从装置顶部放入，每隔0.5小时记录一次试验鱼类所处的水深层，每种工况试验时间为3.5小时。

试验过程中，根据每隔0.5h记录的试验鱼类所处的水深层，统计出位于0~1m, 1~2m以及2~3m区间内试验鱼类的数量以及占有所有试验鱼类的百分比，并观察试验鱼类随时间的分布趋势。具体工况设置如表5-2所示。

表 5-2 水深适应性室内试验工况表

工况设置	TDG 饱和度	试验时间	试验鱼数量	平行组
工况 1	100%	3.5h	20	2
工况 2	110%	3.5h	20	2
工况 3	115%	3.5h	20	2
工况 4	120%	3.5h	20	2

表 5-3 水深适应性室内试验鱼身长体重参数

工况设置	平行组	体重(g)	体长(cm)	总长(cm)
工况 1	实验组	3.22±1.18	5.46±0.83	6.91±0.89
工况 1	平行组	3.37±1.23	5.53±0.69	7.02±0.82
工况 2	实验组	3.52±1.82	5.64±0.93	7.15±1.09
工况 2	平行组	3.95±1.75	6.02±0.82	7.71±0.99
工况 3	实验组	4.45±2.16	6.03±1.04	7.33±1.33
工况 3	平行组	3.50±1.03	5.71±0.65	7.22±0.76
工况 4	实验组	4.02±1.43	5.59±0.81	6.91±0.84
工况 4	平行组	4.37±1.82	5.88±0.96	7.29±1.09

注：体重、体长表示为 Mean±SD。

5.1.3 数据分析

试验过程中，根据每隔0.5h记录的试验鱼类所处的水深层，统计出位于0~1m, 1~2m以及2~3m区间内试验鱼类的数量以及占有所有试验鱼类的百分比，并观察试验鱼类随时间的分布趋势。

根据实验记录的各时刻鱼苗位于水柱中的深度，采用公式(5-1)计算出该时刻下鱼苗位于水柱中的平均深度。对于各平行实验计算出来的平均深度，取平均值代表该时刻实验鱼在水柱中的深度值。

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^N H_i}{N} \quad (5-1)$$

式中， \bar{H} 为某时刻鱼苗位于水柱中的平均深度，单位为m； H_i 为某时刻第*i*条鱼位于水柱中的深度，单位为m； N 为某时刻，水柱中存活实验鱼苗的总数，本文中为20。

运用独立样本T检验方法分析试验鱼在TDG过饱和组与清水组垂向水深的差异显著性。显著水平为 $p < 0.05$ 。

5.2 试验结果

5.2.1 试验鱼在 100%TDG 饱和度水体垂向回避能力

如图5-5所示，在实验组工况下，将试验白鲢幼鱼放入TDG饱和度为100%的清水水柱中，在经历十几分钟适应后，试验鱼开始往底部靠拢，在暴露1h时，3条试验鱼处在0-1m水深层，3条试验鱼处在1-2m水深层，14条试验鱼处在2-3m水深层。随着暴露时间的增加，在试验进行到1.5h时，开始有9条试验鱼游到0-1m的水深层。而在试验进行到2.5h时，0-1m水深层的鱼类已经达到20条。至试验结束时（3.5h），在0-1m水深处试验鱼数量占总数量的95%，1-2m、2-3m处各分布0%和5%的试验鱼类。在此工况TDG过饱和实验过程中实验鱼未出现死亡。

在平行组工况下，在暴露0.5h时，3条试验鱼处在0-1m水深层，而其余17条试验鱼处在2-3m水深层。而随着试验时间的推移，在0-1m水深层的试验鱼的数量逐渐上升。在试验进行到2.5h时，开始有9条试验鱼游到0-1m的水深层，2条游至1-2m水深层，而其他9条试验鱼依然处在2-3m水深层。至试验结束时（3.5h），在0-1m水深处试验鱼数量占总数量的85%，1-2m、2-3m处各分布15%和0%的试验鱼类。在此工况TDG过饱和实验过程中实验鱼未出现死亡。

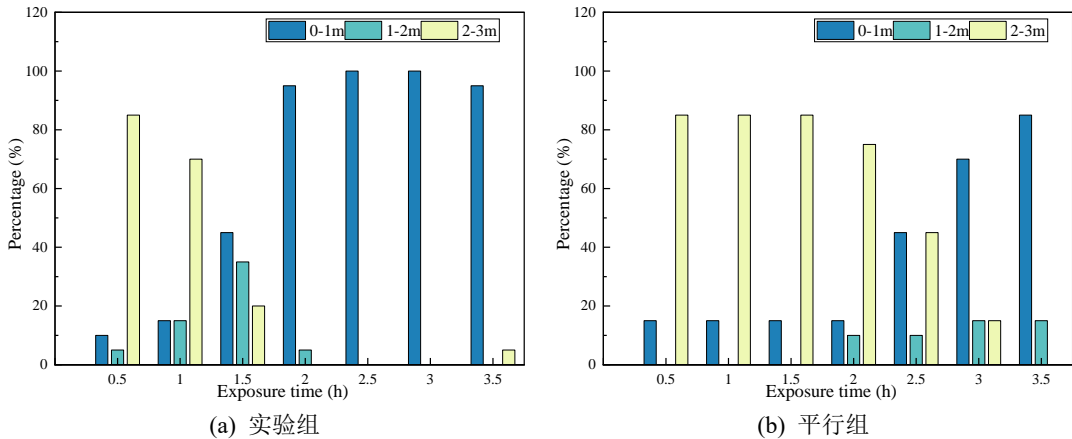


图 5-5 试验鲢鱼在 100%TDG 饱和度下垂向分布情况随时间变化图

表 5-4 工况 1 试验前后溶解氧变化情况

试验组别	时间段	TDG 饱和度 (%)	溶解氧饱和度 (%)	溶解氧浓度 (mg/L)
实验组	试验开始前	103.0%	104.1	9.98
	试验结束后	103.0%	106.3	10.40
平行组	试验开始前	103.0%	100.9	9.49
	试验结束后	102.0%	100.9	9.46

在工况1试验开始前以及结束后用PT4压力测定仪、YSIPRO20i溶氧仪测量试验水柱的TDG饱和度、溶解氧饱和度以及溶解氧浓度，结果如表5-4所示。

5.2.2 试验鱼在 110%TDG 饱和度水体垂向回避能力

如图5-6所示，在实验组工况下，将试验白鲢幼鱼放入TDG饱和度为110%的试验水柱中，在暴露1h时，有2条试验鱼处在0-1m水深层，有3条试验鱼处在1-2m水深层，而其他15条试验鱼均处在2-3m水深层。随着暴露时间的增加，在试验进行到2.5h时，开始有7条试验鱼游到0-1m的水深层，而处在1-2m水深层的试验鱼类数量只有1条，其他13条试验鱼依然处在2-3m水深层。在整个试验过程中，处在0-1m水深层的试验鱼类的数量随试验时间的增加而增加，而处在2-3m水深层的试验鱼类的数量随试验时间的增加而减少，至试验结束时（3.5h），在0-1m水深处试验鱼数量占总数量的50%，1-2m、2-3m处各分布25%和25%的试验鱼类。在TDG过饱和实验过程中实验鱼未出现死亡。

在平行组工况下，在暴露1h时，所有试验鱼均处在2-3m水深层。在试验进

行到2h时,开始有2条试验鱼游到0-1m的水深层,8条试验鱼游到1-2m的水深层,而其他10条试验鱼依然处在2-3m水深层。而随着试验时间的推移,在0-1m水深层的试验鱼的数量经历了先升后降最后又升的过程。至试验结束时(3.5h),在0-1m水深处试验鱼数量占总数量的45%,1-2m、2-3m处各分布50%和5%的试验鱼类。在TDG过饱和和实验过程中实验鱼未出现死亡。

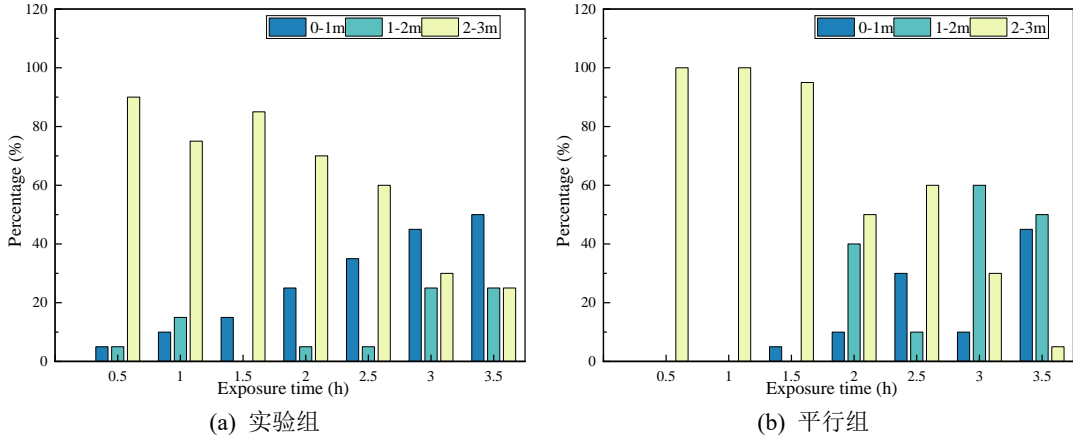


图 5-6 试验鲢鱼在 110%TDG 饱和度胁迫下垂向分布情况随时间变化图

表 5-5 工况 2 试验前后溶解氧变化情况

试验组别	时间段	TDG 饱和度 (%)	溶解氧饱和度 (%)	溶解氧浓度 (mg/L)
实验组	试验开始前	108.0%	104.9	9.94
	试验结束后	107.0%	102.3	9.64
平行组	试验开始前	112.0%	112.4	10.55
	试验结束后	112.0%	111.8	10.48

在工况2试验开始前以及结束后用PT4压力测定仪、YSIPRO20i溶氧仪测量试验水柱的TDG饱和度、溶解氧饱和度以及溶解氧浓度,结果如表5-5所示。

图5-7显示了2组平行试验中试验鱼在110%TDG饱和度水柱和清水水柱中的各时间点的平均水深。在实验组中,110%TDG饱和度水柱中实验鱼的平均水深较清水水柱中实验鱼的平均水深在各个时间段均有所升高,其中,在1.5h、2h、2.5h、3h和3.5h时间点实验组与清水组实验鱼的平均水深均存在显著性差异($p < 0.05$)。而对于平行组工况而言,在平行组110%TDG饱和度水柱中实验鱼的平均水深较清水水柱中实验鱼的平均水深在各个时间段均有所升高。其中,在3h和3.5h时间点实验组与清水组实验鱼的平均水深均存在显著性差异

($p < 0.05$)。

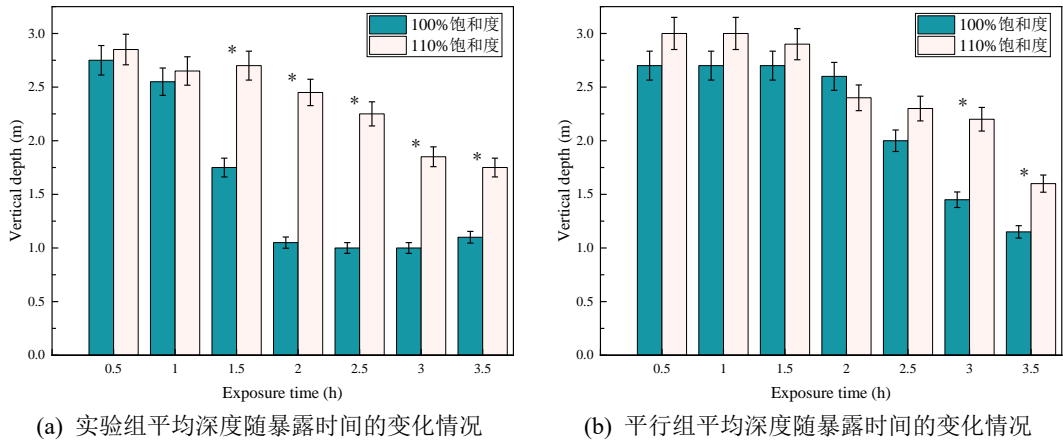


图 5-7 试验鲢鱼在 110%TDG 饱和度与清水工况平均深度随时间变化图

垂向深度表示为平均值±SD, *表示平行样与清水工况之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

5.2.3 试验鱼在 115%TDG 饱和度水体垂向回避能力

如图5-8所示,在实验组工况下,将试验白鲢幼鱼放入TDG饱和度为115%的试验水柱中,在暴露2h时,有5条试验鱼处在0-1m水深层,而其他15条试验鱼均处在2-3m水深层。随着暴露时间的增加,在试验进行到2.5h时,开始有7条试验鱼游到0-1m的水深层,而其他13条试验鱼依然处在2-3m水深层。而在试验进行到3h时,0-1m水深层的鱼类已经达到10条。至试验结束时(3.5h),在0-1m水深处试验鱼数量占总数量的95%,1-2m、2-3m处各分布5%和0%的试验鱼类。在TDG过饱和实验过程中实验鱼未出现死亡。

在平行组工况下,在暴露1h时,有2条试验鱼处在0-1m水深层,5条试验鱼处在1-2m水深层,而其他13条试验鱼均处在2-3m水深层。在试验进行到2h时,开始有10条试验鱼游到0-1m的水深层,而其他10条试验鱼依然处在2-3m水深层。而随着试验时间的推移,在0-1m水深层的试验鱼的数量经历了先升后降的过程。至试验结束时(3.5h),在0-1m水深处试验鱼数量占总数量的30%,1-2m、2-3m处各分布55%和15%的试验鱼类。在TDG过饱和实验过程中实验鱼未出现死亡。

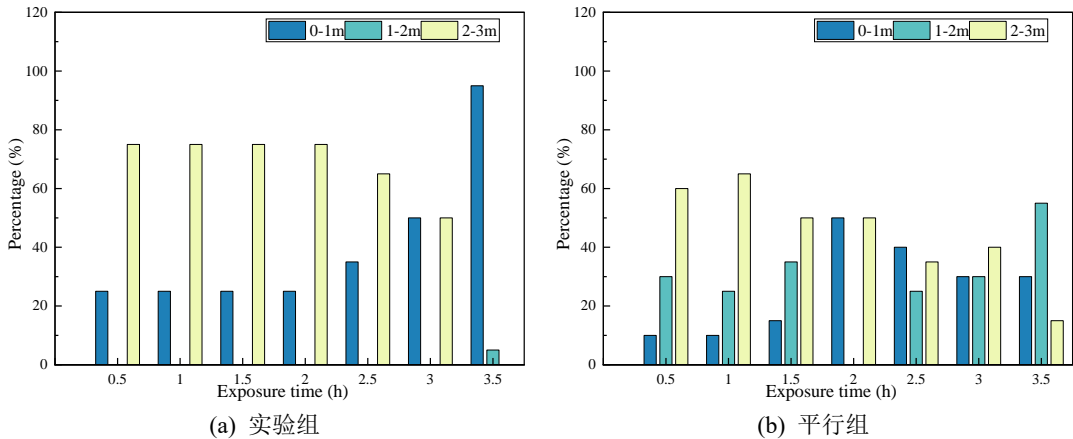


图 5-8 试验鲢鱼在 115%TDG 饱和度胁迫下垂向分布情况随时间变化图

表 5-6 工况 3 试验前后溶解氧变化情况

试验组别	时间段	TDG 饱和度 (%)	溶解氧饱和度 (%)	溶解氧浓度 (mg/L)
实验组	试验开始前	116.0%	109.3	10.28
	试验结束后	116.0%	109.0	10.09
平行组	试验开始前	114.0%	114.8	10.89
	试验结束后	114.0%	113.8	10.84

在工况3试验开始前以及结束后用PT4压力测定仪、YSIPRO20i溶氧仪测量试验水柱的TDG饱和度、溶解氧饱和度以及溶解氧浓度，结果如表5-6所示。

图5-9显示了2组平行试验中试验鱼在115%TDG饱和度水柱和清水水柱中的各时间点的平均水深。在实验组中，115%TDG饱和度水柱中实验鱼的平均水深较清水水柱中实验鱼的平均水深在0.5h、1h、3.5h时间点有所降低，而在其他时间点都有所升高，其中，在1.5h、2h、2.5h和3h时间点实验组与清水组实验鱼的平均水深均存在显著性差异 ($p < 0.05$)。而对于平行组工况而言，在平行组115%TDG饱和度水柱中实验鱼的平均水深较清水水柱中实验鱼的平均水深在3h和3.5h时间点有所升高，而在其他时间点都有所降低，其中，在2h、3h和3.5h时间点实验组与清水组实验鱼的平均水深均存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

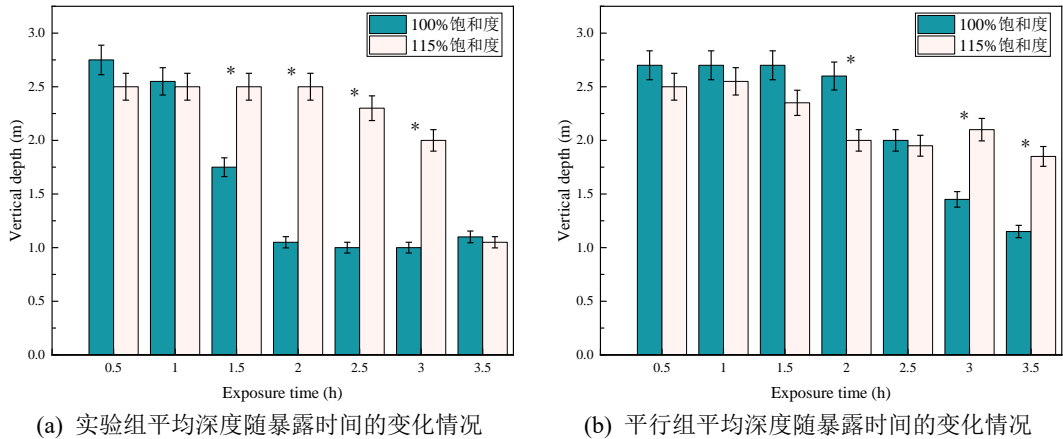


图 5-9 试验鲢鱼在 115%TDG 饱和度与清水工况平均深度随时间变化图

垂向深度表示为平均值±SD, *表示平行样与清水工况之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

5.2.4 试验鱼在 120%TDG 饱和度水体垂向回避能力

如图5-10所示, 在实验组工况下, 将试验白鲢幼鱼放入TDG饱和度为120%的试验水柱中, 在经历十几分钟适应后, 试验鱼开始往底部靠拢, 在暴露1h时, 所有试验鱼均处在2-3m水深层。随着暴露时间的增加, 在试验进行到1.5h时, 开始有2条试验鱼游到1-2m的水深层, 而其他18条试验鱼依然处在2-3m水深层。而在试验进行到2.5h时, 1~2m水深层的鱼类已经达到19条。至试验结束时(3.5h), 在0-1m水深处试验鱼数量占总数量的55%, 1-2m、2-3m处各分布40%和5%的试验鱼类。在TDG过饱和实验过程中实验鱼未出现死亡。

在平行组工况下, 在暴露0.5h时, 所有试验鱼均处在2-3m水深层。随着暴露时间的增加, 在试验进行到0.5h时, 开始有1条试验鱼游到1-2m的水深层, 而其他19条试验鱼依然处在2-3m水深层。而随着试验时间的继续推移, 在0-1m水深层的试验鱼的数量经历了先升后降的过程。至试验结束时(3.5h), 在0-1m水深处试验鱼数量占总数量的55%, 1-2m、2-3m处各分布30%和15%的试验鱼类。在平行组试验中, 出现1条试验鱼死亡。

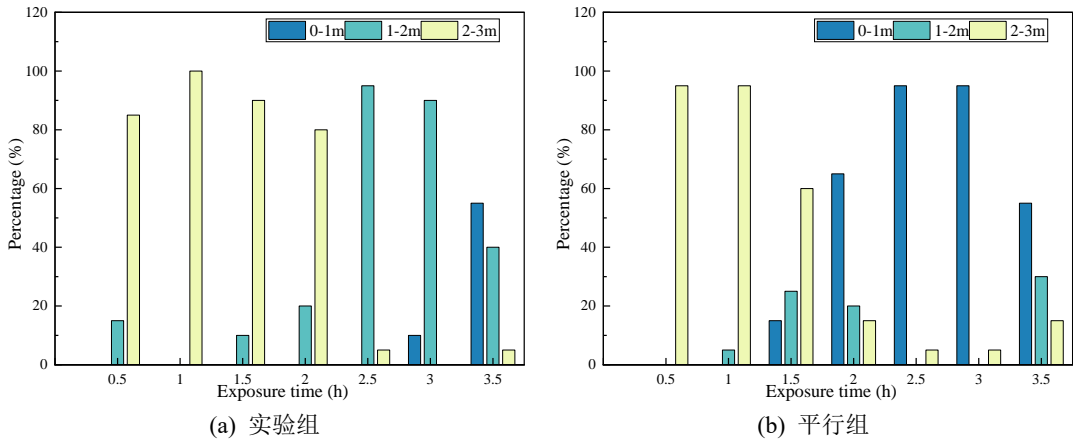


图 5-10 试验鲢鱼在 120%TDG 饱和度胁迫下垂向分布情况随时间变化图

表 5-7 工况 4 试验前后溶解氧变化情况

试验组别	时间段	TDG 饱和度 (%)	溶解氧饱和度 (%)	溶解氧浓度 (mg/L)
实验组	试验开始前	123.0%	120.0	11.35
	试验结束后	120.0%	119.8	11.31
平行组	试验开始前	121.0%	112.8	10.66
	试验结束后	120.0%	111.9	10.52

在工况4试验开始前以及结束后用PT4压力测定仪、YSIPRO20i溶氧仪测量试验水柱的TDG饱和度、溶解氧饱和度以及溶解氧浓度，结果如表5-7所示。

图5-11显示了2组平行试验中试验鱼在120%TDG饱和度水柱和清水水柱中的各时间点的平均水深。在实验组中，120%TDG饱和度水柱中实验鱼的平均水深较清水水柱中实验鱼的平均水深在各个时间段都有所升高，其中，在1h、1.5h、2h、2.5h、3h和3.5h时间点实验组与清水组实验鱼的平均水深均存在显著性差异 ($p < 0.05$)。而对于平行组工况而言，在平行组120%TDG饱和度水柱中实验鱼的平均水深较清水水柱中实验鱼的平均水深在0.5h、1h和3.5h时间点有所升高，而在其他时间点都有所降低，其中，在2h、2.5h和3.5h时间点实验组与清水组实验鱼的平均水深均存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

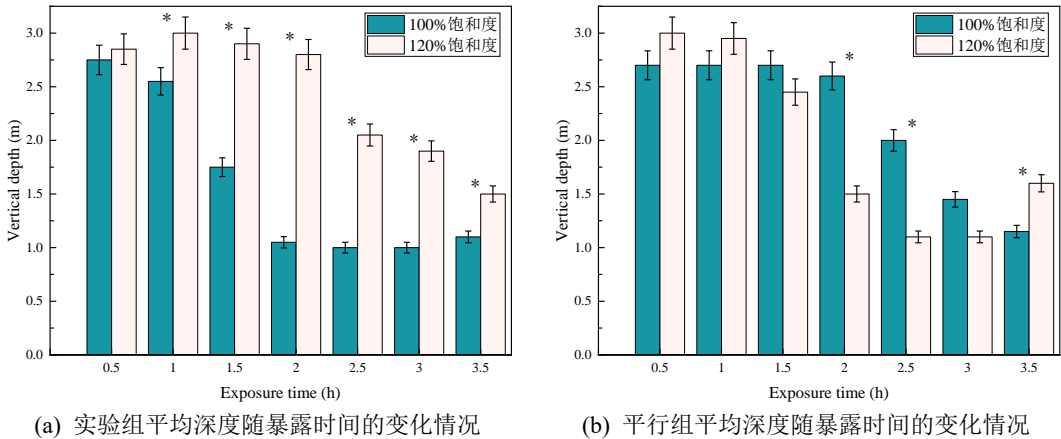


图 5-11 试验鲢鱼在 120%TDG 饱和度与清水工况平均深度随时间变化图

垂向深度表示为平均值±SD, *表示平行样与清水工况之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

5.3 讨论

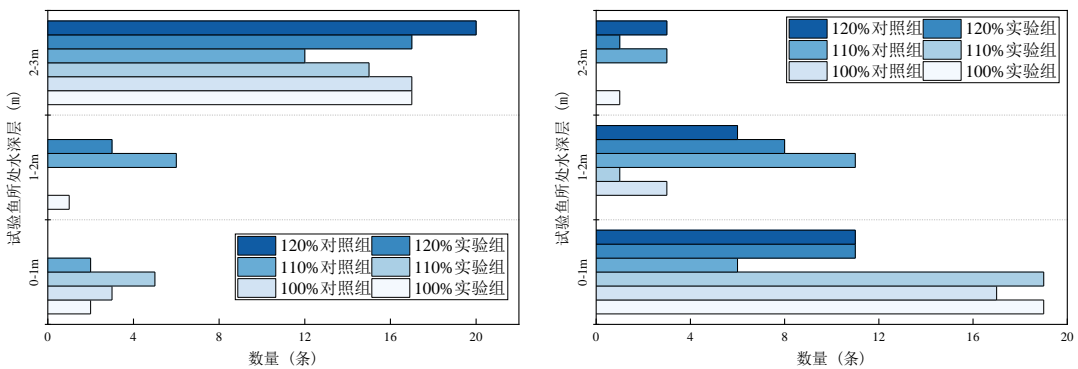
尽管有补偿水深的存在，但是鱼类利用补偿水深回避TDG过饱和胁迫的能力还受到自身喜好水深的影响。清水工况试验结果显示，在3.5h的试验结束时，实验组和对照组0-1m水深层试验鱼的数量占比分别达到95%和85%，这说明相较于1-2m和2-3m的水深层，0-1m水深层可以认为是鲢鱼的喜好水深区域。而在110%TDG饱和度工况试验条件下，在3.5h的试验结束时，实验组和对照组0-1m水深层试验鱼的数量占比分别为50%和45%，相较于清水组试验结果出现了一定程度的降低。115%TDG饱和度工况试验条件下，在3.5h的试验结束时，实验组和对照组0-1m水深层试验鱼的数量占比分别为95%和30%，相较于清水组试验结果也出现了一定程度的降低。而在120%TDG饱和度工况试验条件下，在3.5h的试验结束时，实验组和对照组0-1m水深层试验鱼的数量占比分别为55%和55%，相较于清水工况组也出现了明显的降低。

通过比较4种工况下试验鱼的水深分布情况可以发现，在TDG饱和度为120%、115%以及110%的过饱和水体中试验鱼所处的平均水深均大于清水水体试验鱼所处的平均水深。可以认为试验鱼类在受到TDG过饱和胁迫下有往更深的水深层游动的趋势，这体现了试验鱼具有利用补偿水深回避TDG过饱和的能力。

但是同样值得注意的是，如图5-12a所示，在试验进行到0.5h时，清水工况实验组和对照组2-3m水深层试验鱼的数量占比分别达到85%和85%，110%TDG

饱和度工况实验组和对照组2-3m水深层试验鱼的数量占比分别达到75%和60%，115%TDG饱和度工况实验组和对照组2-3m水深层试验鱼的数量占比分别达到75%和60%，120%TDG饱和度工况实验组和对照组2-3m水深层试验鱼的数量占比分别达到85%和100%。这说明在试验刚开始的半小时内，无论是否存在TDG过饱和胁迫，试验鱼类都会游动至2-3m水深层，这可能与鱼类对陌生环境的探索和适应能力有关。而随着时间的推移，如图5-12b所示，在试验进行至3.5h时，2-3m水深层试验鱼类所占比例逐渐下降，而0-1m水深层试验鱼类所占比例逐渐提升，这可能是受到试验鱼类本身的适宜水深影响。

通过对比室外试验以及本次室内试验的结果可以发现，在室外试验中，试验鲢鱼在受到TDG过饱和胁迫时，在分层网箱工况0-1m、1-2m以及2-3m的补偿水深下，鲢鱼的最终死亡率分别为40%、27.5%和85.0%，在连通网箱工况0-3m补偿水深下，鲢鱼的最终死亡率为12.5%。而在室内试验中，仅在120%TDG饱和度工况对照组试验中死亡1条试验鱼，可以看出，在室内试验工况与室外试验的连通网箱工况下，试验鱼的死亡率较室外试验的分层网箱工况更低。因此，鱼类需要有包含其喜好水深在内的一定深度的游泳空间才能发挥其利用补偿水深回避TDG过饱和的能力，换言之，在受到TDG过饱和胁迫下，尽管试验鱼具有利用补偿水深回避TDG过饱和的能力，如果不考虑其自身的适宜水深，仍然会导致其死亡。



(a) 0.5h 时各工况下不同水深层试验鱼数量分布

(b) 3.5h 时各工况下不同水深层试验鱼数量分布

图 5-12 试验鲢鱼在 0.5h 以及 3.5h 各工况下不同水深层试验鱼数量分布图

5.4 小结

本章通过研究鲢鱼的最适宜水深以及受到不同TDG饱和度胁迫下鲢鱼垂向

回避行为，得到以下主要结论：

(1) 通过比较100%、110%、115%以及120%TDG饱和度工况下试验鲢鱼在垂向上的分布情况后发现：在实验组110%TDG饱和度水柱中实验鱼的平均水深较清水水柱中实验鱼的平均水深在各个时间段均有所升高，其中，在1.5h、2h、2.5h、3h和3.5h时间点实验组与清水组实验鱼的平均水深均存在显著性差异 ($p<0.05$)；在对照组110%TDG饱和度水柱中实验鱼的平均水深较清水水柱中实验鱼的平均水深在各个时间段均有所升高。其中，在3h和3.5h时间点实验组与清水组实验鱼的平均水深均存在显著性差异 ($p<0.05$)。在实验组115%TDG饱和度水柱中实验鱼的平均水深较清水水柱中实验鱼的平均水深在0.5h、1h、3.5h时间点有所降低，而在其他时间点都有所升高，其中，在1.5h、2h、2.5h和3h时间点实验组与清水组实验鱼的平均水深均存在显著性差异 ($p<0.05$)；在对照组115%TDG饱和度水柱中实验鱼的平均水深较清水水柱中实验鱼的平均水深在3h和3.5h时间点有所升高，而在其他时间点都有所降低，其中，在2h、3h和3.5h时间点实验组与清水组实验鱼的平均水深均存在显著性差异 ($p<0.05$)。在实验组120%TDG饱和度水柱中实验鱼的平均水深较清水水柱中实验鱼的平均水深在各个时间段都有所升高，其中，在1h、1.5h、2h、2.5h、3h和3.5h时间点实验组与清水组实验鱼的平均水深均存在显著性差异 ($p<0.05$)；在对照组120%TDG饱和度水柱中实验鱼的平均水深较清水水柱中实验鱼的平均水深在0.5h、1h和3.5h时间点有所升高，而在其他时间点都有所降低，其中，在2h、2.5h和3.5h时间点实验组与清水组实验鱼的平均水深均存在显著性差异 ($p<0.05$)。

(2) 鲢鱼在TDG饱和度为120%、115%以及110%的过饱和水体中试验鱼所处的平均水深均大于TDG饱和度为100%清水水体试验鱼所处的平均水深。因此可以认为试验鱼类在受到TDG过饱和胁迫下有往更深的水深层游动的趋势。但是鱼类利用补偿水深回避TDG过饱和胁迫的能力还受到自身喜好水深的影响。相较于1-2m和2-3m的水深层，0-1m水深层可以认为是鲢鱼的喜好水深区域。

6 结论与展望

本文以草鱼、鲢鱼以及鳊鱼三种网箱养殖鱼类为研究对象，通过野外原型观测实验研究西江流域养殖鱼类暴露在TDG过饱和水体中不同补偿水深下的存活规律；鱼类受TDG过饱和胁迫下游泳能力变化规律；鱼类受TDG过饱和胁迫下气泡病的形成与发展规律。根据野外原型观测实验的结果，进一步开展室内试验，研究了鲢鱼在受自身喜好水深影响下利用补偿水深回避TDG过饱和胁迫的行为规律。得到一些成果如下。

6.1 主要结论

(1) 养殖鱼类草鱼、鲢鱼以及鳊鱼在在野外环境中受到TDG过饱和胁迫时，在不同水深层工况下的存活率存在显著性差异。草鱼、鲢鱼在表层网箱实验组和平行组的生存率均显著低于连通网箱0-3m实验组和平行组 ($p < 0.05$)，鳊鱼在表层网箱实验组与平行组的生存率显著低于连通网箱0-3m平行组 ($p < 0.05$)，与连通网箱0-3m实验组之间不存在显著性差异 ($p > 0.05$)，表明补偿水深对鱼类回避TDG过饱和有积极影响。鲢鱼在分层网箱2-3m水深工况下两组平行样的生存率显著低于连通网箱0-3m工况 ($p < 0.05$)，而草鱼平行组和鳊鱼平行组在分层网箱2-3m水深工况下的生存率与连通网箱0-3m水深工况之间不存在显著性差异 ($p > 0.05$)。这一差异是由于不同鱼类的喜好水深不同所导致的。

(2) 养殖鱼类草鱼、鲢鱼以及鳊鱼在在野外环境中受到TDG过饱和胁迫会患气泡病。通过建立针对鱼鳍的气泡病严重程度评分标准，本文发现在草鱼受TDG过饱和胁迫下的气泡病形成阶段，胁迫4-11天后试验鱼类气泡病得分显著高于胁迫1-3天后试验鱼类气泡病得分 ($p < 0.05$)。在草鱼受过饱和胁迫下的气泡病恢复阶段，恢复1-3天后试验鱼类气泡病得分没有显著性差异 ($p > 0.05$)，但显著高于恢复4-8天后试验鱼类气泡病得分 ($p < 0.05$)。结果反映了养殖草鱼在短期暴露在TDG过饱和环境下也易患气泡病，并且其气泡病的症状会随胁迫时间的增加而加剧。在TDG过饱和胁迫时间不超过11天的条件下，气泡病症状会随恢复时间的增加而有所减轻。

(3) 在TDG过饱和对草鱼游泳能力影响实验中，通过单因素方差分析后发现试验草鱼的绝对游泳速度 U_{crit-a} 和相对游泳速度 U_{crit-r} 在不同TDG过饱和胁迫时间下没有显著性差异 ($p > 0.05$)。这说明在本试验中，随着TDG过饱和胁迫时间

的延长，试验草鱼的临界游泳能力变化不显著。

(4) 在鲢鱼水深适应性室内试验中，TDG饱和度为120%、115%以及110%的过饱和水体中试验鱼所处的平均水深均大于TDG饱和度为100%清水水体试验鱼所处的平均水深。因此可以认为试验鱼类在受到TDG过饱和胁迫下有往更深的水深层游动的趋势，但是鱼类利用补偿水深回避TDG过饱和胁迫的能力还受到自身喜好水深的影响。相较于1-2m和2-3m的水深层，0-1m水深层可以认为是鲢鱼的喜好水深区域。

6.2 创新点

(1) 本文研究了在野外环境下草鱼、鲢鱼和鳊鱼暴露在TDG过饱和水体中不同补偿水深下的存活规律：补偿水深对中下层鱼类草鱼和鳊鱼回避TDG过饱和有积极影响，而对于表层鱼类鲢鱼还受到其自身喜好水深的影响。通过在室内试验研究鲢鱼在受自身水深特性影响下利用补偿水深回避TDG过饱和胁迫的行为规律发现：相较于1-2m和2-3m的水深层，0-1m水深层可以认为是鲢鱼的喜好水深区域。

(2) 本文通过建立针对鱼鳍的气泡病严重程度评分标准，研究了在野外环境下草鱼的气泡病的形成与发展规律：在TDG过饱和胁迫时间不超过11天的条件下，草鱼气泡病症状会随胁迫时间的增加而加剧，随恢复时间的增加而有所减轻。

(3) 本文研究了在野外环境下草鱼受TDG过饱和胁迫下游泳能力变化规律：随着TDG过饱和胁迫时间的延长，试验草鱼的临界游泳能力变化不显著。

6.3 研究展望

本文针对TDG过饱和水体对养殖鱼类的影响开展了现场原型试验和室内试验，但受时间、试验条件以及人为误差等因素所限，尚存在以下问题值得深入研究。

(1) 本文现场原型观测试验只针对草鱼、鲢鱼和鳊鱼三种网箱养殖鱼类，室内试验则只针对鲢鱼这一种鱼类，此后的研究可拓展至其他鱼类，丰富珠江流域网箱养殖鱼类受TDG过饱和胁迫的影响研究体系。

(2) 试验鱼类在TDG过饱和水体中的耐受性和游泳能力还与环境温度、试验个体发育水平、河道泥沙运动等因素有关，因此有必要进一步开展多因素共

同作用下鱼类在TDG过饱和水体中的耐受性与游泳能力研究。

(3) 以往的研究包含本文室内试验已经证明鱼类利用补偿水深回避TDG过饱和胁迫的能力会受到自身喜好水深的影响。但不同种类的鱼类具有不同的适宜水深, 在本文第四章中仅仅开展了鲢鱼的最适宜水深以及受到不同TDG饱和度胁迫下鲢鱼垂向回避行为, 在后续试验中, 适宜性水深对其他中上层鱼类利用补偿水深回避TDG过饱和能力的影响亟待研究。

7 参考文献

- [1] Huang H. L., and Y. Zheng. Present situation and future prospect of hydropower in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009, 13: 1652-1656.
- [2] Jia J. A technical review of hydro-project development in China[J]. **Engineering**. 2016, 2: 302-312.
- [3] Niu X.. Key technologies of hydraulic structures of the Three Gorges project[J]. **Engineering**. 2016, 2: 340-349.
- [4] Hibbs D. E., and J. S. Gulliver. Prediction of effective saturation concentration at spillway plunge pools[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1997, 132: 940-949.
- [5] Li R., J. Li, K. F. Li, Y. Deng, and J. J. Feng. Prediction for supersaturated total dissolved gas in high-dam hydropower projects[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*. 2009, 52: 3661-3667.
- [6] 马倩. 基于过饱和总溶解气体对鱼类影响的梯级电站生态调度研究[D]. 成都: 四川大学博士学位论文, 2016.
- [7] 冯镜洁. 高坝泄水下游过饱和总溶解气体释放规律及应用研究[D]. 成都: 四川大学博士学位论文, 2013.
- [8] Feng, J., R. Li, Q. Ma, and L. Wang. Experimental and field study on dissipation coefficient of supersaturated total dissolved gas[J]. *Journal of Central South University*. 2014, 21: 1995-2003.
- [9] Ma Q., Li R., Feng J., Lu J., Zhou Q. Cumulative effects of cascade hydropower stations on total dissolved gas supersaturation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018, 25(14): 13536-13547.
- [10] Weitkamp, D. E. and M. Katz. A review of dissolved gas supersaturation literature[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*. 1980, 109: 659-702.
- [11] Weitkamp, D. E. Total dissolved gas supersaturation biological effects, Review of Literature 1980-2007[J]. Bellevue: Parametrix Inc., 2008:1-65.
- [12] Adam W., Timothy M., Kevin S., Boualem H., David N., Edith Z., Marcela P.. Development and Implementation of an Optimization Model for Hydropower and Total Dissolved Gas in the Mid-Columbia River System[J]. *Journal of Water Resources Planning & Management*.

- 2017, 143(10).
- [13] Brosnan I G., Welch D W., Jacobs Scott M.. Survival Rates of Out-Migrating Yearling Chinook Salmon in the Lower Columbia River and Plume after Exposure to Gas Supersaturated Water[J]. Journal of Aquatic Animal Health. 2016, 28(4):240-25
- [14] Kamal, R., Zhu, D. Z., Mcarthur, M., Leake, A.. Field Study on the Dissipation of Supersaturated Total Dissolved Gases in a Cascade Reservoir System[C]// World Environmental and Water Resources Congress Florida, 2016.
- [15] Westgard, R. L. Physical and biological aspects of gas-bubble disease in impounded adult Chinook salmon at McNary spawning channel[J]. Transactions of the American Fisheries Society.1964, 93: 306-309.
- [16] Ebel, W. J. Supersaturation of nitrogen in the Columbia River and its effect on salmon and steelhead trout[J]. United States National Marine Fisheries Service Fishery Bulletin. 1969, 68: 1-11.
- [17] McGrath, K. E., E. M. Dawley, and D. R. Geist. Total dissolved gas effects on fishes of the Lower Columbia River[R]. Pacific Northwest National Laboratory. 2006
- [18] Arntzen, E. V., K. J. Murray, E. M. Dawley, K. D. Hand, J. L. Panther, V. I. Cullinan, and D. R. Geist. Effects of total dissolved gas on Chum salmon fry incubating in the lower Columbia River[R]. Pacific Northwest National Laboratory. 2008
- [19] Heather, M. B., and M. W. Johnston. Total dissolved gas and water temperature in the Lower Columbia River, Oregon and Washington, Water Year 2014. The U.S. Army Corps of Engineers.
- [20] 谭德彩. 三峡工程致气体过饱和对鱼类致死效应的研究[D]. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2006
- [21] 长江流域水资源保护局. 葛洲坝工程泄水与鱼苗气泡病调查[R]. 武汉: 长江流域水资源保护局. 1983.
- [22] 张庆民. 一个环境问题-水体中溶解气体过饱和和现象[J]. 1985. 环境科学. 6: 27-30.
- [23] 吴成根. 新安江虹鳟气泡病的初步观察[J]. 鱼类病害研究. 1998, 020(003):30-31.
- [24] CCTV. 金沙江下游打捞处置40吨死鱼官方排除中毒可能[EB/OL].(2014-07-09) [2020-05-20]. http://news.cntv.cn/2014/07/19/ARTI1405750580_177886.shtml.
- [25] Li P., Zhu D Z, Li R, Wang Y., James, A., W.L.. Production of total dissolved gas

- supersaturation at hydropower facilities and its transport: A review[J]. *Water Research*. 2022, 223: 119012.
- [26] 冀前锋. 总溶解气体过饱和对长江中上层鱼类的耐受性与运动能力影响研究[D]. 成都: 四川大学硕士学位论文, 2020
- [27] 王远铭. 长江上游特有鱼类受总溶解气体过饱和胁迫的响应规律及减缓措施研究[D]. 成都: 四川大学博士学位论文, 2017
- [28] 陈锋, 雷欢, 郑海涛等. 珠江干流梯级开发对鱼类的影响与减缓对策[J]. *湖泊科学*. 2018,30(4) : 1097-1108
- [29] 陈宜瑜, 曹文宣. 珠江的鱼类区系及其动物地理区划的讨论[J]. *水生生物学报*. 1986
- [30] 帅方敏, 李新辉, 刘乾甫等. 珠江水系鱼类群落多样性空间分布格局[J]. *生态学报*. 2017, 37(9) : 3182-3192.
- [31] 丁瑞华. 四川鱼类志[M]. 四川科学出版社. 1994
- [32] 王茂元. 闽江中游鲢的年龄与生长[J]. *中国农学通报*. 2020, 36(11): 124-129.
- [33] 珠渔. 珠江鱼类志(上)[J]. *中国水产*. 1984(08).
- [34] 珠渔. 珠江鱼类志(中)[J]. *中国水产*. 1984(09).
- [35] 珠渔. 珠江鱼类志(下)[J]. *中国水产*. 1984(11).
- [36] 李博. 水体TDG过饱和对重口裂腹鱼早期生长发育的影响研究[D]. 成都: 四川大学硕士学位论文, 2012
- [37] 陈世超. 高坝下游过饱和TDG对胭脂鱼的影响研究[D]. 成都: 四川大学硕士学位论文, 2013
- [38] 曲璐, 李然, 李嘉等. 高坝工程总溶解气体过饱和影响的原型观测[J]. *中国科学:技术科学*. 2011(2):177-183.
- [39] 曲璐. 高坝下游水体中总溶解气体过饱和和生成规律研究[D]. 成都: 四川大学博士学位论文, 2011.
- [40] Zhang P, Liu Q., Wang Y., et al. River habitat assessment and restoration in high dam flood discharge systems with total dissolved gas supersaturation[J]. *Water Research*. 2022, 221: 118833.
- [41] Antcliffe B L, Fidler L E, Birtwell I K. Lethal and Sublethal Responses of Rainbow Trout Fry to Elevated Dissolved Gas Supersaturation and Temperature[R]. Vancouver, BC: Fisheries and Oceans Canada, 2003.

- [42] Evan V., David R. and Kathrine J. Influence of the Hyporheic Zone on Supersaturated Gas Exposure to Incubating Chum Salmon[J]. North American Journal of Fisheries Management. 2009, 29:1714–1727.
- [43] Sourav B, Abhra C, Sugata H, Sourav D, Saroj B. Environmental Science and Pollution Research. 2020, 27:4353–4364.
- [44] Wang Y, Liang R, Li K, et al. Tolerance and avoidance mechanisms of the rare and endemic fish of the upper Yangtze River to total dissolved gas supersaturation by hydropower stations [J]. River Research and Applications, 2020, 36(7): 993-1003.
- [45] Renfro W C. Gas-Bubble Mortality of Fishes in Galveston Bay, Texas[J]. Transactions of the American Fisheries Society. 1963, 3(92): 320-322.
- [46] Bouck G R. Gasometer: An Inexpensive Device for Continuous Monitoring of Dissolved Gases and Supersaturation[J]. 1982, 111(4): 505-516.
- [47] Speare D J. Histopathology and ultrastructure of ocular lesions associated with gas bubble disease in salmonids[J]. J Comp Pathol. 1990, 103(4): 421-432.
- [48] Westgard R L. Physical and Biological Aspects of Gas-Bubble Disease in Impounded Adult Chinook Salmon at McNary Spawning Channel[J]. Transactions of the American Fisheries Society. 1964, 3(93): 306-309.
- [49] Newcomb T W. Changes in Blood Chemistry of Juvenile Steelhead Trout, *Salmo gairdneri*, Following Sublethal Exposure to Nitrogen Supersaturation[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 1974, 31(12): 1953-1957.
- [50] 黄翔. 高坝泄水产生TDG过饱和对岩原鲤的影响研究[D]. 成都: 四川大学博士学位论文, 2010.
- [51] Bouck G R. Etiology of Gas Bubble Disease[J]. Transactions of the American Fisheries Societ. 1980, 6(109): 707.
- [52] Gilbert B and Roy E. Histopathology of “Gas-Bubble” Disease in Salmon Fingerlings[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 1966, 24(4)
- [53] Speare D J. Histopathology and ultrastructure of ocular lesions associated with gas bubble disease in salmonids[J]. J Comp Pathol. 1990, 103(4): 421-432.
- [54] Newcomb T W. Changes in Blood Chemistry of Juvenile Steelhead Trout, *Salmo gairdneri*, Following Sublethal Exposure to Nitrogen Supersaturation[J]. Journal of the Fisheries

- Research Board of Canada. 1974, 31(12): 1953-1957.
- [55] 姜文. 向家坝水电站TDG过饱和对胭脂鱼幼鱼的致死效应[D]. 成都: 四川大学硕士学位论文, 2013.
- [56] 刘晓庆. 岩原鲤在总溶解气体过饱和和水体中的生长特性与生化效应实验研究[D]. 成都: 四川大学博士学位论文, 2011.
- [57] 周晨阳. 齐口裂腹鱼受水温和TDG 过饱和共同作用的耐受性及其避难所营造[D]. 成都: 四川大学硕士学位论文, 2016.
- [58] 袁嫫, 袁佺, 王远铭等. 总溶解气体过饱和对长薄鳅的急性和慢性致死效应研究[J]. 工程科学与技术. 2017(S2): 56-61.
- [59] Dawley E M, Ebel W J. Effects of Various Concentrations of Dissolved Atmospheric Gas On Juvenile Chinook Salmon and Steelhead Trout[J]. Fishery Bulletin. 1975, 4(78): 787-796.
- [60] Stroud, R. K., G. R. Bouck, and A. V. Nebeker. Pathology of acute and chronic exposure of salmonid fishes to supersaturated water[J]. Chemistry and Physics of Aqueous Gas Solutions 1975: 435-449.
- [61] J. M. SHRIMPTON., D. J. RANDALL., Fidler A L E. Factors affecting swim bladder volume in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) held in gas supersaturated water[J]. Canadian Journal of Zoology. 1990(68): 962-968.
- [62] Shrimpton J M. Factors Affecting Swimbladder Volume in Rainbow Trout(*Salmo Gairdneri*) Held In Gas Supersaturated Water[D]. University of Victoria, 1985.
- [63] Ebel, W. J. The relationship between fish behavior, bioassay information and dissolved gas concentrations on survival of juvenile salmon and steelhead trout in the Snake River[C]. Proceedings of the 53rd Annual Conference, Western Association of State Game and Fish Commissioners 1973, 516-527.
- [64] Backman, T. W. H., and A. F. Evans. Gas bubble trauma incidence in adult salmonids in the Columbia River basin. North American Journal of Fisheries Management. 2002, 22(2): 579-584.
- [65] Beeman J W, Venditti D A, Morris R G, et al. Gas bubble disease in resident fish below Grand Coulee Dam: Final Report of Research[R]. Cook, WA: Western Fisheries Research Center Columbia River Research Laboratory, 2003.
- [66] Alderdice D F, Schnute J, Jensen J O T. Assessing Juvenile Salmonid Response to Gas

- Supersaturation Using a General Multivariate Dose-Response Model[J]. 1986, 43(9): 1694-1709.
- [67] Rucker, R. R., and P. M. Kangas. Effect of nitrogen supersaturated water on coho and chinook salmon[J]. *The Progressive Fish-Culturist*. 1974, 36(3): 152-156.
- [68] Meekin, T. K., and B. K. Turner. Tolerance of salmonid eggs, juveniles and squawfish to supersaturated nitrogen[J]. *Nitrogen Supersaturation Investigations in the Mid-Columbia River, Washington Department of Fisheries Technical Report*. 1974, 12: 75-126.
- [69] Bohl M. Gas bubble disease of fish[J]. *Tierarzliche Praxis (German)*, 1997, 25(3): 284-288
- [70] Rucker, R. R., and P. M. Kangas. Effect of nitrogen supersaturated water on coho and chinook salmon[J]. *The Progressive Fish-Culturist*. 1974, 36(3): 152-156.
- [71] Smiley, J. E., M. A. Drawbridge, M. S. Okihiro, and R. S. Kaufmann. Acute effects of gas supersaturation on juvenile cultured white seabass[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*. 2011, 140(5), 1269-1276.
- [72] 张亦然, 杜秋成, 王远铭等. 总溶解气体过饱和含沙水体对齐口裂腹鱼影响的实验研究[J]. *水利学报*. 2014(09): 1029-1037.
- [73] Knittel M D, Chapman G A, Garton R R. Effects of Hydrostatic Pressure on Steelhead Survival in Air - Supersaturated Water[J]. 1980, 109(6): 755-759.
- [74] 付晓泰, 王振平, 卢双舫. 气体在水中的溶解机理及溶解度方程[J]. *中国科学(B辑 化学)*. 1996(02): 124-130.
- [75] 张月霞. 水体TDG过饱和对岩原鲤和齐口裂腹鱼的影响研究[D]. 成都: 四川大学硕士学位论文, 2011.
- [76] 蒋亮. 高坝下游水体中溶解气体过饱和问题研究[D]. 成都: 四川大学博士学位论文, 2008.
- [77] Dawley, E. M., and W. J. Ebel. Effects of various concentrations of dissolved atmospheric gas on juvenile chinook salmon and steelhead trout[J]. *United States National Marine Fisheries Service Fishery Bulletin*. 1975, 73(4): 787-796.
- [78] Fitzgibbon, Q. P., A. Strawbridge, and R. S. Seymour. Metabolic scope, swimming performance and the effects of hypoxia in the mulloway, *Argyrosomus japonicas* (Pisces: Sciaenidae) [J]. *Aquaculture*. 2007, 270: 358-368.
- [79] Melzner, F., S. Göbel, M. Langenbuch, M. A. Gutowska, H. O. Pörtner, and M. Lucassen..

- Swimming performance in Atlantic Cod (*Gadus morhua*) following long-term (4-12 months) acclimation to elevated seawater P_{CO_2} [J]. *Aquatic toxicology*. 2009, 92: 30-37.
- [80] Tritico, H. M., and A. J. Cotel. The effects of turbulent eddies on the stability and critical swimming speed of creek chub (*Semotilus atromaculatus*) [J]. *The Journal of experimental biology*. 2010, 13: 2284-2293.
- [81] Webb, P. W. Body form, locomotion and foraging in aquatic vertebrates. *American Zoologist*[J]. 1984, 24: 107-120.
- [82] Beamish F W H. *Swimming Capacity*[M]. New York: Academic Press , Inc., 1978.
- [83] 何大仁, 蔡厚才. 鱼类行为学[M]. 1998年3月第1版. 厦门: 厦门大学出版社, 1998.
- [84] 齐亮, 杨宇, 王悦等. 鱼类对水动力环境变化的行为响应特征[J]. *河海大学学报(自然科学版)*. 2012(04): 438-445.
- [85] Day N., Butler P. J.. The effects of acclimation to reversed seasonal temperatures on the swimming performance of adult brown trout *Salmo trutta*[J]. *The Journal of experimental biology*. 2005, 208(14): 2068-2692.
- [86] Zeng L., Cao Z., Fu S., Peng J., Wang Y.. Effect of temperature on swimming performance in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*)[J]. *Comparative biochemistry and physiology. Part A, Molecular & integrative physiology*. 2009, 153(2): 125-130.
- [87] 傅菁菁, 李嘉, 安瑞冬等. 基于齐口裂腹鱼游泳能力的竖缝式鱼道流态塑造研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*. 2013(03): 12-17.
- [88] 胡运燊. 基于鱼类行为对环境因子响应关系的鱼类动态模拟[D]. 三峡大学, 2014.
- [89] 林浩然, 刘晓春. 鱼类生理学实验技术和方法[M]. 广东高等教育出版社, 2006.
- [90] Eloranta A P, Finstad A G, Helland I P, et al. Hydropower impacts on reservoir fish populations are modified by environmental variation[J]. *Science of The Total Environment*. 2018, 618: 313-322.
- [91] Smiley, J. E., M. A. Drawbridge, M. S. Okihiro, and R. S. Kaufmann. Acute effects of gas supersaturation on juvenile cultured white seabass[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*. 2011, 140(5), 1269-1276.
- [92] 袁嫻. 受TDG过饱和胁迫影响的鱼类游泳行为变化探究及回避空间的营造[D]. 成都: 四川大学硕士学位论文, 2018.
- [93] Schiewe M H. Influence of Dissolved Atmospheric Gas on Swimming Performance of

- Juvenile Chinook Salmon[J]. Transactions of the American Fisheries Society. 1974, 4(103): 717.
- [94] Gunnarsli K S, Toften H, Mortensen A. Effects of nitrogen gas supersaturation on growth and survival in juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua* L.)(J). Aquaculture. 2008, 283(1-4): 175-179.
- [95] Wang Y, An R, Li Y, et al. Swimming Performance of Rock Carp *Procypris rabaudi* and Prenant's Schizothoracin *Schizothorax prenanti* Acclimated to Total Dissolved Gas Supersaturated Water[J]. North Africa Technical North American Journal of Fisheries Management. 2017, 37(6): 1183-1190.
- [96] Ji Q, Li K, Wang Y, et al. Swimming performance of a pelagic species in the Yangtze River under different exposure modes of the total dissolved gas supersaturation[J]. Conserv Physiol. 2022, 10(1): coac047.
- [97] Qin Y, Wei Q, Ji Q, et al. Determining the position of a fish passage facility entrance based on endemic fish swimming abilities and flow field[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2022.
- [98] Childs M R, Clarkson R W. Temperature Effects on Swimming Performance of Larval and Juvenile Colorado Squawfish: Implications for Survival and Species Recovery[J]. Transactions of the American Fisheries Society. 1996, 125(6): 940-7.
- [99] Ward D L, Eugene Maughan O, Bonar S A, et al. Effects of Temperature, Fish Length, and Exercise on Swimming Performance of Age-0 Flannelmouth Sucker[J]. Transactions of the American Fisheries Society. 2002, 131(3): 492-7.
- [100] LARIMORE R W, DUEVE M J. Effects of Temperature Acclimation on the Swimming Ability of Smallmouth Bass Fry[J]. Transactions of the American Fisheries Society. 1968, 97(2):175-85.
- [101] Marshall D. McCue. Starvation physiology: Reviewing the different strategies animals use to survive a common challenge[J]. Comparative Biochemistry and Physiology, Part A, 2010, 156(1):1-18.
- [102] Brett J R. Swimming Performance of Sockeye Salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to Fatigue Time and Temperature[J]. Fish Research. BD. Canada. 1967, 8(24): 1731-1741.
- [103] Zeng Ling-Qing, Cao Zhen-Dong, Fu Shi-Jian, et al. Effect of temperature on swimming performance in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*)[J]. Comparative Biochemistry

- and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology. 2009, 153(2):125-130
- [104] 魏琦. 鱼类游泳能力与低坝仿自然鱼道研究[D]. 成都: 四川大学硕士学位论文, 2022.
- [105] 周应祺. 应用鱼类行为学[M]. 科学出版社, 2011
- [106] 张沙龙. 长丝裂腹鱼和短须裂腹鱼的游泳能力和游泳行为研究[D]. 华中农业大学, 2014.
- [107] Videler J. J., Wardle C. S. Fish swimming stride by stride: speed limits and endurance[J]. *Reviews in Fish Biology & Fisheries*, 1991, 1(1):23-40.
- [108] Beamish Frederick. Swimming Capacity[M]. *Fish Physiology*, 1978
- [109] 甘明阳. 温度及镉、铜胁迫对“四大家鱼”游泳特性的影响[D]. 三峡大学, 2015.
- [110] Shingles A., McKenzie D. J., Taylor E. W., et al. Effects of sublethal ammonia exposure on swimming performance in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(15):2691-2698.
- [111] Hildebrandt Emily K., Parsons Glenn R. Effect of Turbidity on the Swimming Performance of the Golden Shiner, *Notemigonus crysoleucas*[J]. *Copeia*, 2016, 104(3):752-755.
- [112] 周永欣, 章宗涉. 水生生物毒性试验方法[M]. 北京, 农业出版社, 1989.
- [113] Blahm, T. H., R. J. McConnell, and G. R. Snyder. 1976. Gas supersaturation research[J]. National Marine Fisheries Service Prescott Facility. 1976, 11-19.
- [114] Maule, A. G., J. Beeman, K. M. Hans, M. G. Mesa, P. Haner, and J. J. Warren. Gas bubble disease monitoring and research of juvenile salmonids[R]. US Department of Energy, Bonneville Power Administration, Annual Report. 1996.
- [115] Blahm, T. H., R. J. McConnell, and G. R. Snyder. Gas supersaturation research[R]. National Marine Fisheries Service Prescott Facility. 1976, 11-19.
- [116] Stevens D G, Nebeker A V, Baker R J. Avoidance Responses of Salmon and Trout to Air-Supersaturated Water[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*. 1980, 6(109): 751-754.
- [117] Weitkamp D E, Sullivan R D. Gas Bubble Disease in Resident Fish of the Lower Clark Fork River[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*. 2003(132): 865-876.
- [118] Weitkamp D E, Sullivan R D, Swant T, et al. Behavior of Resident Fish Relative to Total Dissolved Gas Supersaturation in the Lower Clark Fork River[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*. 2003, 132(5): 856-864.

- [119] Antcliff B L, Fidler L E, Birtwell I K. Effect of Dissolved Gas Supersaturation on the Survival and Condition of Juvenile Rainbow Trout(*Oncorhynchus mykiss*) under Static and Dynamic Exposure Scenarios[R]. Vancouver, BC: Fisheries and Oceans Canada, 2000.
- [120] Dawley, E. M., M. Schiewe, and B. Monk. Effects of long term exposure to supersaturation of dissolved atmospheric gases on juvenile chinook salmon and steelhead trout in deep and shallow test tanks[C]. In Gas Bubble Disease, Fickeisen, D. H. and M. J. Schneider, Eds. Report CONF-741033, 1976. (pp. 1-10).
- [121] 孙井沛, 施浩然, 刘晓庆, 王俊杰, 袁嫒. 鱼类在TDG过饱和含沙水体中的耐受性[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(01): 28-33.
- [122] Lu Cao, Rui-feng Liang, You-cai Tuo, Yong Li, Ke-feng Li. Influence of total dissolved gas supersaturated water on silver carp(*Hypophthalmichthys molitrix*)[J]. Water Science and Engineering, 2016, 9(04): 324-328.
- [123] 杜秋成. TDG 过饱和含沙水体对齐口裂腹鱼的影响研究[D].成都: 四川大学, 2013.
- [124] Liu X., Li N., Feng C., Fu C., Gong Q., Lai J., Jiang Z., Yang Y., Shi H.. Lethal Effect of Total Dissolved Gas-Supersaturated Water with Suspended Sediment on River Sturgeon (*Acipenser dabryanus*) [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 7-12.
- [125] Deng Y., Cao C., Liu X., Yuan Q, Feng C., Shi H., Yang Y., Wu Y.. Effect of Total Dissolved Gas Supersaturation on the Survival of Bighead Carp (*Hypophthalmichthys Nobilis*)[J]. Animals, 2020, 10(1):1-14.
- [126] 姜旭阳, 董双林, 刘骋跃, 周演根. 虹鳟和硬头鳟幼鱼对温度的耐受性[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2019, 49(03):60-65.
- [127] Jared J. Tromp, Paul L. Jones, Jane E. Symonds, Seumas P. Walker, Adam Pope, Stephen M. J. Pether, Luis O. B. Afonso. Effects of commercial diets and temperature on the growth performance and stress response of hapuku (*Polyprion oxygeneios*)[J]. Aquaculture, 2016, 452: 128-133.
- [128] 赵文文, 曹振东, 付世建. 溶氧水平对鳊鱼、中华倒刺鲃幼鱼游泳能力的影响[J]. 水生生物学报. 2013(02): 314-320.
- [129] Domenici P, Herbert N A, Lefrançois C, et al. Chap 6: The Effect of Hypoxia on Fish Swimming Performance and Behaviour[M]. Swimming Physiology of Fish, Berlin Heidelberg:Springer-Verlag, 2013, 129-159.

- [130] Yuan Y, Wei Q, Yuan Q, et al. Impact of TDG supersaturation on native fish species under different hydropower flood discharge programs [J]. *Aquat Toxicol*, 2021, 237: 105898.

本文主要符号表

符号变量	物理意义	单位
U_{crit-a}	绝对临界游泳速度	m/s
U_{crit-r}	相对临界游泳速度	BL/s
Δt_2	各流速的持续时间	min
t_2	在该流速下实验鱼的持续游动时间	min
Δv_2	速度增量	BL/s
v_2	实验鱼能够完成 Δt_2 的最大游泳速度	BL/s
LT_{50}	半致死时间	h
\bar{H}	某时刻鱼苗位于水柱中的平均深度	m
H_i	某时刻第 i 条鱼位于水柱中的深度	m
N	某时刻水柱中存活实验鱼苗的总数	条