

射流式鱼泵胁迫下草鱼的应激响应

吴宁¹ 李莉¹ 侯杰¹ 龙新平² 徐茂森² 苏玉晶¹ 林旺¹

1. 华中农业大学水产学院/农业部淡水生物繁育重点实验室/
淡水水产健康养殖湖北省协同创新中心/池塘养殖工程实验室, 武汉 430070;
2. 武汉大学动力与机械学院, 武汉 430072

摘要 研究草鱼种通过不同参数条件下(分为工况一、工况二、工况三、工况四)的射流式鱼泵后分别恢复0、0.5、1、6、24 h, 和过泵前相比其血清皮质醇(COR)、血糖(GLU)、乳酸脱氢酶(LDH)、总胆固醇(TC)、谷草转氨酶(AST)、谷丙转氨酶(ALT)、肌酐(CREA)以及呼吸频率(Respiratory rate)的变化情况, 从应激和组织损伤的角度分析了该泵4个工况对试验草鱼的影响。结果发现, 各工况试验草鱼血清COR、LDH、AST、ALT、CREA以及呼吸频率均呈现先升高后降低的变化规律, 各工况试验草鱼血糖呈现先降低后升高的趋势, 而各工况试验草鱼血清TC基本无变化。此外, 各工况均出现掉鳞的情况, 但未发现试验草鱼游泳异常, 解剖后也未发现鱼鳔破裂以及内脏受损的情况。通过对比各工况试验结果, 发现工况三对试验草鱼影响最小。

关键词 射流式鱼泵; 工况; 草鱼; 应激; 组织损伤

中图分类号 S 97 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2016)05-0075-09

随着水产养殖业的飞速发展, 大型深水网箱的使用越来越广泛, 与之相应的高效取鱼工作变得越来越重要。传统的人工取鱼方法效率低、劳动强度大、鱼损伤大, 而鱼的鲜活程度和外观对其价值有着决定性的影响, 因此鱼泵作为水产养殖业的配套设备有着极大的潜力和发展空间。早在20世纪中叶, 鱼泵就已经被广泛应用于挪威、美国、日本、丹麦和俄罗斯等水产养殖业非常发达的国家的网箱养殖中^[1-2]。国内外常见的鱼泵大致分为以下几类: 离心式鱼泵、射流式鱼泵和真空压气式鱼泵(或者称为气力式鱼泵)等^[3]。射流式鱼泵亦称“喷射吸鱼泵”, 是一种利用射流湍动扩散作用来传递能量和质量的流体机械和混合反应设备。一般由吸入管、喷嘴、吸入室、喉管、扩散管、排出管、鱼水分离器及水泵供水系统、动力源组成。工作时, 高能工作流体在喷嘴处产生压降促使鱼水混合液进入吸入室。随后通过紊动扩散作用, 能量和动量从工作流体传向被吸流体, 两股流体一起进入扩散管, 最后经排出管排入鱼水分离器。射流式鱼泵本身无运动部件、结构简单、维护方便、成本低廉, 可以适应不同形态鱼类的转运, 并

且通过调试鱼泵的工况可以使鱼的损伤降到最低, 综合效益高, 是一种应用前景十分广阔鱼泵。

射流泵在我国工业领域早已被广泛使用, 但在渔业方面应用还较少, 相关研究也较匮乏。在经由射流泵输送的过程中, 鱼类除可能受到机械损伤外, 还会因为水体各种因素及环境的变化而受损。射流式鱼泵对鱼产生的影响是水流剪切力、空化、水压的迅速变化、水体流速和动荡等因子共同作用的结果。这些因子往往会导致鱼的鳃、鳔、鳞片等的宏观损伤^[4-6], 甚至会影响鱼的生理机能。目前有关环形射流泵的内流机理研究与设计理论尚不完善, 尽管对射流式鱼泵有一些研究和应用, 但关于泵内压力、速度分布及空化等因素对鱼损影响的研究未见报道, 更未开展兼顾泵性能与鱼损方面的研究, 这些问题都制约了射流式鱼泵的发展。

草鱼是我国重要的大宗淡水鱼类品种之一, 其体型呈纺锤型, 在中国常见的经济鱼类中有很强的代表性。本文以草鱼为研究对象, 引入鱼类的生理与病理分析方法, 通过改变射流式鱼泵的动力几何因素(如泵内压力变化、流速梯度、回流与空化等因

收稿日期: 2015-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179374; 31100378); 湖北省自然科学基金项目(2014CFB938); 华中农业大学自主科技创新基金培育专项(2662015PY012)

吴宁, 硕士研究生. 研究方向: 水产品质量安全. E-mail: wuning78@gmail.com

通信作者: 李莉, 博士, 副教授. 研究方向: 水产品质量安全. E-mail: foreverlili78@mail.hzau.edu.cn

素,简称为工况)来分析不同射流式鱼泵工况条件对草鱼机体生理的影响,进而评估出该泵的最适工况,深入了解射流式鱼泵性能与鱼损的相互联系,旨在能够为射流式鱼泵的开发和应用提供参考。

1 材料与方法

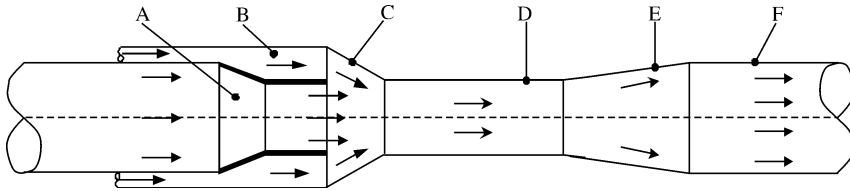
1.1 射流式鱼泵

本试验所用射流式鱼泵示意图如图 1 所示。泵总长 1 480 mm,喉管直径 60 mm,吸入管直径 80 mm,出口管直径 125 mm。试验所用射流式鱼泵

4 个工况的具体参数如表 1 所示。

1.2 试验鱼

草鱼购自湖北省团风养殖场,体质量(28.81 ± 0.78) g,体长(12.63 ± 0.12) cm,体宽(2.49 ± 0.21) cm。养殖环境为 $4.00 \text{ m} \times 2.50 \text{ m} \times 1.40 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)的室外地上水泥池,池内并排放入 3 个 $1.00 \text{ m} \times 1.00 \text{ m} \times 1.00 \text{ m}$ 的网箱,所有试验鱼均分养殖在 3 个网箱内,网箱每天 24 h 曝气,水温(25.11 ± 0.06) $^{\circ}\text{C}$,pH 值 8.25 ± 0.03 ,溶氧(8.32 ± 0.01) mg/L。试验开始前,试验鱼暂养 14 d 以适应环境。



A.吸入管 Suction duct; B.环形喷嘴 Annular nozzle; C.吸入室 Suction chamber; D.喉管 Throat outlet; E.扩散器 Diffuser inlet; F.排出管 Blow-off duct.

图 1 射流式鱼泵示意图

Fig.1 Schematic drawing of jet fish pump

表 1 射流式鱼泵的 4 个工况参数

Table 1 Parameters of four different operating conditions of jet fish pump

参数 Parameters	工况一 Operating condition 1	工况二 Operating condition 2	工况三 Operating condition 3	工况四 Operating condition 4
面积比 Area ratio	1.75	1.75	3.00	3.00
扬程/cm Lift of pump	224.00	184.00	184.00	224.00
进口流量/(m^3/h) Inlet flow	79.62	79.79	65.10	65.12
出口流量/(m^3/h) Outlet flow	109.61	115.30	117.57	112.93
被吸流体压强/kPa The pressure of the sucked fluid	-14.30	-16.74	-23.55	-21.87
工作流体压强/kPa The pressure of working flow	98.50	97.34	237.30	237.90
出口压强/kPa Outlet pressure	21.11	16.88	16.84	21.36
喉管(最快)水流速/(m/s) The velocity at the nozzle exit	10.77	11.33	11.56	11.10
出口管(最慢)水流速/(m/s) The velocity at the outlet duct	2.48	2.61	2.66	2.56

1.3 试验设计及操作

本试验共 4 个工况,过泵前为对照,过泵后设置 0、0.5、1、6、24 h 共 5 个恢复时间点,每个时间点设置 4 个生物学重复。试验开始时,捞取 30 尾试验鱼缓慢移入锥形网管内,待全部试验鱼通过泵体后,于回收箱中将试验鱼全部收集起来放入水泥池内的网箱中使鱼恢复并开始计时。

1.4 血样的采集

过泵操作完成后,依次于设定的各恢复时间点取出试验鱼,立即放入含有 200 mg/L MS-222(磺化甲烷三卡因)的水中麻醉,取出放在工作台上,用 1 mL 一次性无菌注射器尾动脉采血。室温静置 2 h 后,4 000 r/min 离心 15 min,取血清,-80 $^{\circ}\text{C}$ 低温密封保存。

1.5 呼吸频率的统计

每个时间点取 3 尾鱼,分置于 3 个透明的鱼缸内,用摄像机录像 5 min,保存录像留待统计其呼吸频率。呼吸频率:以鳃盖一张一合作为 1 次呼吸,统计 15 s 内各个试验草鱼的呼吸次数,每间隔 15 s 统计 1 次,共统计 4 次,求 4 次统计的平均值,再换算成 1 min 的呼吸次数,即为呼吸频率(次/min)。

1.6 血液指标的测定

检测皮质醇(COR)采用的是竞争性放射性免疫测定法(RIA),试剂盒购自北京北方生物技术研究。谷草转氨酶(AST)、谷丙转氨酶(ALT)、肌酐(CREA)、总胆固醇(TC)、乳酸脱氢酶(LDH)、血糖(GLU)均在贝克曼 AU5400 全自动生化分析仪上检测。

1.7 数据统计与分析

数据用平均值±标准误(Mean±SE)表示。数据用 SPSS 22.0 统计软件做单因素方差分析,并以最小显著极差法(LSD)比较数据间差异显著性,以 $P < 0.05$ 为差异显著性水平。

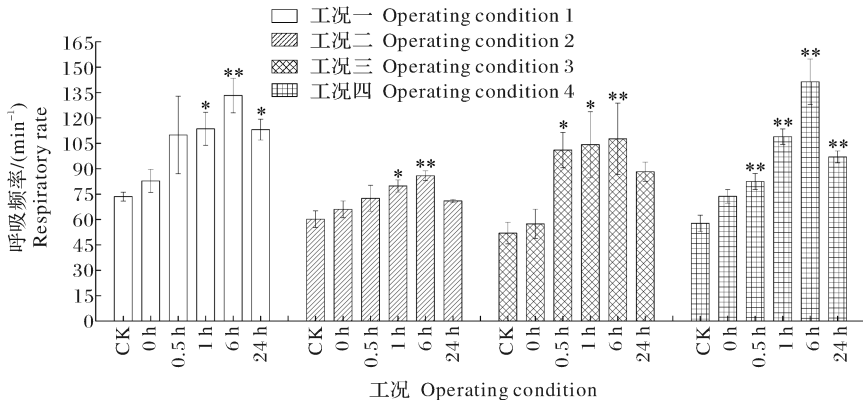
2 结果与分析

2.1 试验草鱼行为及表观损伤情况

各工况条件下过泵后,试验草鱼均出现掉鳞的情况,所占比例分别为:工况一 49.32%,工况二 44.44%,工况三 35.00%,工况四 26.19%。此外所有工况试验鱼中只出现一例挫伤情况。试验中未发现试验鱼游泳异常,解剖后也未发现鱼鳔破裂以及内脏受损的情况。试验恢复期间,未出现试验鱼死亡的情况。

2.2 过泵后草鱼血清应激指标呼吸频率、COR、GLU、LDH 和 TC 的变化

经显著性分析,各工况条件下草鱼呼吸频率在过泵后 0 h 均显著高于对照组。工况一和工况二条件下,草鱼呼吸频率在过泵恢复 0.5 h 仍显著高于对照组,随后呼吸频率逐渐下降,分别在 6 h 和 1 h 恢复到对照组水平。工况三和工况四条件下,草鱼呼吸频率在过泵恢复 0.5 h 内即恢复到对照组水平(图 2)。



图中 * 表示该时间点值与该工况对照组值相比差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示该时间点值与该工况对照组值相比差异极显著 ($P < 0.01$)。下同。The significance compared to the control of the value at each time point is indicated by * for $P < 0.05$ and by ** for $P < 0.01$.The same as follows.

图 2 各工况对草鱼呼吸频率的影响

Fig.2 Effect of each operating condition on respiratory rate of grass carp

过泵后,所有工况草鱼血液 COR 含量先升高后降低,并在过泵 0.5 h 时达到峰值。经显著性分析,仅工况三条件下,草鱼在过泵后 0.5 h 血清 COR 显著高于对照组。其余工况均与对照组无显著差异(图 3)。

工况一条件下,草鱼 GLU 含量在过泵后和对

照组相比无显著差异。工况二条件下,草鱼血糖含量呈先降低后升高的趋势,在过泵恢复 0.5 h 时和对照组相比显著降低。工况三条件下,草鱼血糖含量在过泵恢复 6 h 和 24 h 显著高于对照组水平。工况四条件下,草鱼血糖含量在过泵后 0、0.5 和 1 h 均显著低于对照组水平,随后在 6 h 即恢复正常(图 4)。

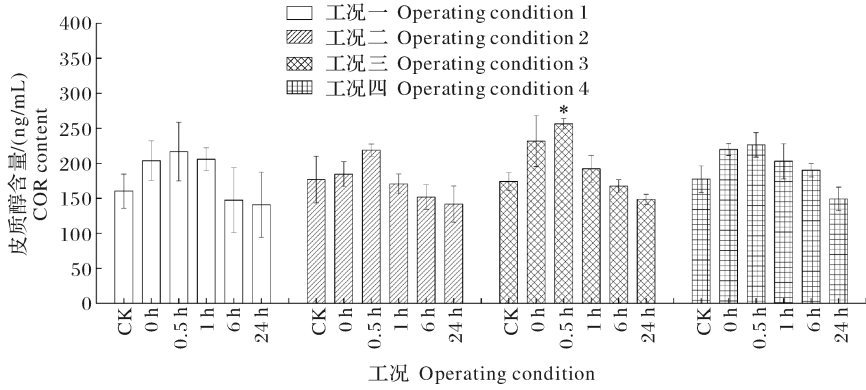


图 3 各工况对草鱼血清 COR 含量的影响

Fig.3 Effect of each operating condition on COR content in serum of grass carp

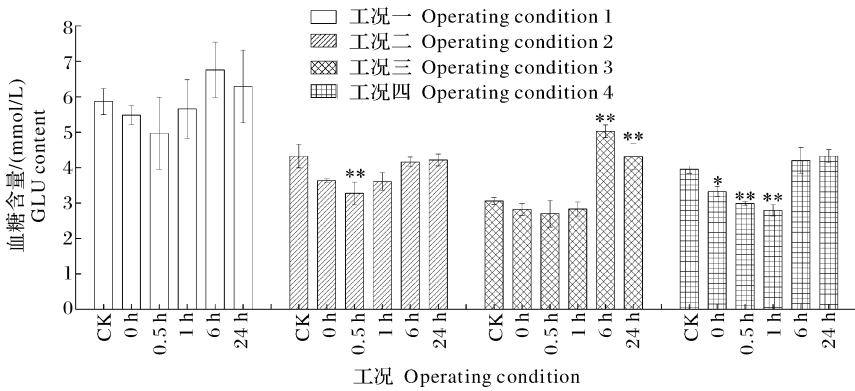


图 4 各工况对草鱼血清 GLU 含量的影响

Fig.4 Effect of each operating condition on GLU content in serum of grass carp

工况一条件下,草鱼血清 LDH 在过泵后 0 h 即显著高于对照组,随后在 1 h 降到对照组水平。工况二和工况四条件下,草鱼血清 LDH 在过泵后 0.5 h 显著高于对照组,随后工况二在 1 h 后降低并

恢复到对照组水平,而工况四在 24 h 降低恢复到对照组水平。经显著性分析,工况三所有时间点均与对照组无显著差异(图 5)。

经显著性分析,各工况对草鱼血清 TC 均无显

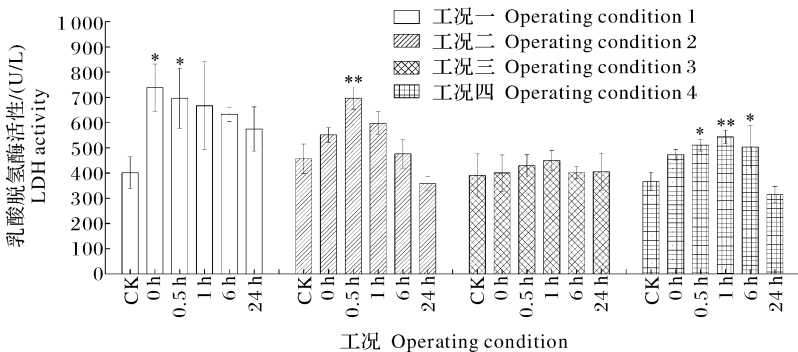


图 5 各工况对草鱼血清 LDH 活性的影响

Fig.5 Effect of each operating condition on LDH activities in serum of grass carp

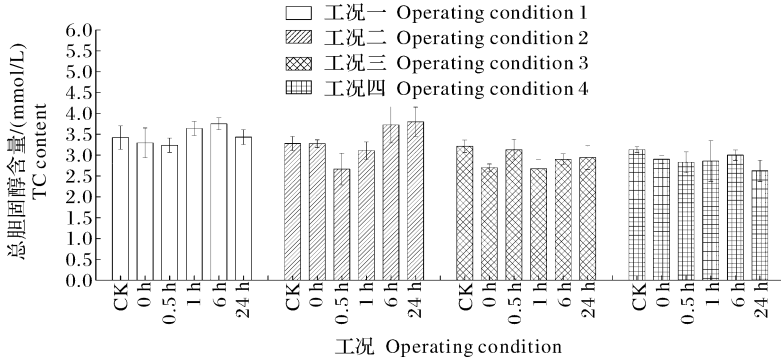


图 6 各工况对草鱼血清 TC 含量的影响

Fig.6 Effect of each operating condition on TC content in serum of grass carp

著影响(图 6)。

2.3 过泵后草鱼血清组织损伤指标的变化

各工况条件下过泵,草鱼血清 AST 均呈现先升高后降低的趋势。工况一条件下,在恢复 1 h 到 24 h 期间均显著高于对照组,工况二条件下,血清 AST 在恢复 1 h 和 6 h 显著高于对照,在恢复 24 h 即下降到对照组水平。工况三和工况四则在 0.5 h 即开始显著高于对照组,并持续升高到 6 h,工况三条件下 24 h 后血清 AST 恢复到对照组水平,工况四条件下,恢复 24 h 后血清 AST 和对照组相比仍显著升高(图 7)。

工况一和工况四条件下过泵,草鱼血清 ALT 在过泵后的 0.5 h 显著高于对照组,随后经过 24 h

恢复,工况四条件下的草鱼血清 ALT 已恢复到了对照组水平,而工况一仍旧极显著高于对照组。工况二和工况三条件下草鱼血清 ALT 分别在恢复后的 6 h 和 1 h 显著高于对照组,随后降至对照组水平(图 8)。

工况一和工况三条件下,草鱼血清 CREA 在过泵后 1 h 极显著高于对照组,而工况二和工况四条件下草鱼血清 CREA 在过泵后的 0.5 h 极显著高于对照组。随后,工况一、工况二和工况四草鱼血清 CREA 在恢复 6 h 后仍旧极显著高于对照组,而工况三草鱼血清 CREA 在 6 h 已经恢复到对照组水平。过泵后 24 h,各工况草鱼血清 CREA 均恢复到对照组水平(图 9)。

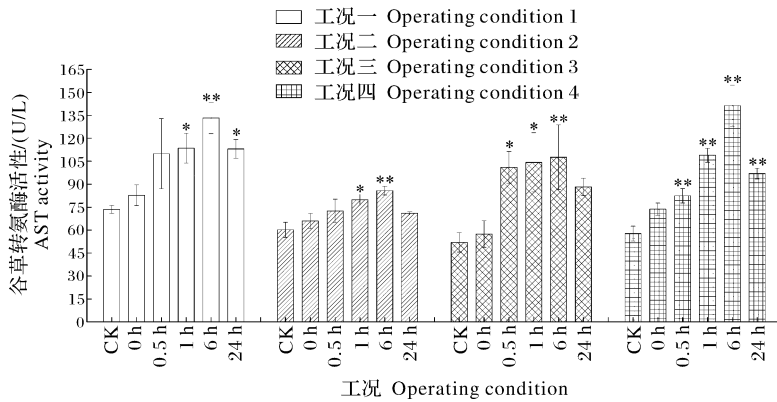


图 7 各工况对草鱼血清 AST 活性的影响

Fig.7 Effect of each operating condition on AST activities in serum of grass carp

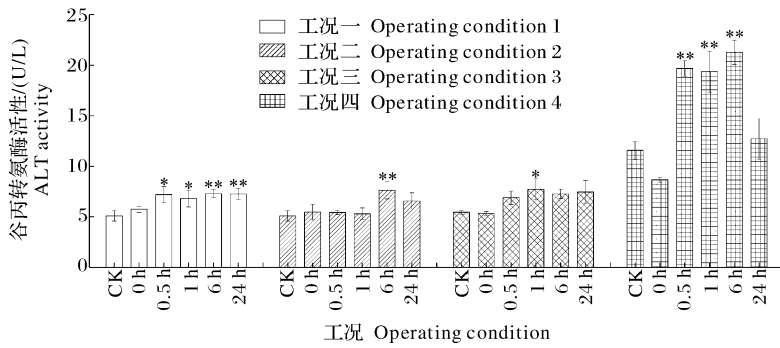


图 8 各工况对草鱼血清 ALT 活性的影响

Fig.8 Effect of each operating condition on ALT activities in serum of grass carp

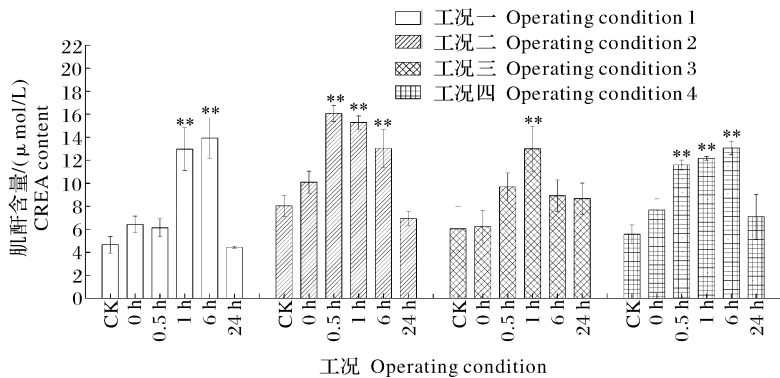


图 9 各工况对草鱼血清 CREA 含量的影响

Fig.9 Effect of each operating condition on CREA content in serum of grass carp

3 讨论

3.1 射流式鱼泵对试验草鱼表现损伤的影响

射流式鱼泵可能对鱼产生影响的因素包括水流剪切力、空化、水压的迅速变化、水体流速和动荡等。Guensch 等^[7]研究发现在喷嘴水流最高时试验鱼的眼睛、鳃盖、鳃会普遍受损伤,但是挫伤和掉鳞的情况相对较少见。Frenkel 等^[8]研究发现超声波诱导的空化效应所导致的组织损伤与暴露时间正相关。Rummer 等^[9]研究发现红鲷鱼鳃在水压降低速率为 10.1 kPa/s 时发生破裂。本研究中,试验草鱼挫伤只出现 1 例,可能是在喉管处由于水流突然加大撞击管壁所致。此外,试验草鱼并未出现眼睛、鳃盖、鳃的受损现象。掉鳞较普遍可能是人为操作导致的,例如人工使用抄网将试验鱼转移至如图 1 所示锥形网管中以便过机;过机之后,需使用抄网将试验鱼从回收箱转移至空网箱中进行恢复;在各个取样时间点,再将试验鱼从恢复网箱中捞出,观察记录表现损伤情况并取血。

3.2 射流式鱼泵导致试验草鱼的应激反应

鱼类的呼吸运动具有一定的节律性。呼吸频率在一定程度上可反映鱼类对氧的需求状态^[10]。鱼类的呼吸频率与多种因素相关,如水温、年龄、活动程度、个体大小、水中二氧化碳含量及氧含量等^[11]。本试验草鱼血清皮质醇和血糖的变化说明试验鱼机体在过泵初期新陈代谢加快、活动程度高,所需能量急剧增加,自然会导致耗氧量上升。由此一来,试验鱼需要提升呼吸频率来增强摄氧量以满足机体需求。本研究结果显示,所有工况条件下,过泵后草鱼呼吸频率在 0 h 即显著高于对照组,其中,工况一和工况二的试验草鱼呼吸频率在 6 h 内恢复正常,而工况三和工况四的呼吸频率在 0.5 h 内即已恢复正常。这一变化规律与血糖以及皮质醇的变化规律相吻合。李黎^[12]在对鲌鱼幼鱼力竭运动的研究中也发现了类似的呼吸频率变化情况。

像其他脊椎动物一样,应激会对鱼类机体的动态平衡造成影响,继而会导致主要由下丘脑—脑垂体—肾间组织轴(HPI)调节的皮质醇(COR)水平上

升。对鱼类而言,皮质醇具有广泛的生理作用,反映着鱼类生理状况的变化。皮质类固醇能够促进脂肪降解和糖的合成,这些过程均能释放能量,而这些能量能够帮助机体来抵抗胁迫^[13-14]。Vijayan等^[15]也指出,皮质醇会对应激期间的能量分配产生重要影响。但是,与此同时,皮质醇对鱼类的免疫功能也有很大影响^[16-18]。研究表明,皮质醇可能会通过抑制淋巴因子的产生来实现对鲑淋巴细胞敏感性的抑制^[19]。Maule等^[20]发现了糖皮质激素位于淋巴细胞上的受体,并且发现在急性和慢性胁迫以及皮质醇处理后,糖皮质激素在白细胞和淋巴组织上的受体会发生改变。这些证据表明,应激会导致机体皮质醇的升高,从而使鱼类代谢速度提高,能量释放增加以应对外界的不良环境,但这是以降低其自身的免疫力为代价的。因此,长期处于应激环境的鱼类,其患病几率会增加。本试验结果表明,试验草鱼在通过该射流式鱼泵的4个工况后其血清皮质醇并未受到显著影响,并且都能在24 h内完全恢复。由此推断,该射流式鱼泵的4个工况不会对试验鱼的免疫功能造成实质性的影响,在经过24 h恢复后,试验鱼不会因皮质醇的改变而导致患病风险增加。

血糖(GLU)是脊椎动物机体重要的能量供应物质,其含量通常处于动态平衡状态,但是机体活动和外界环境的改变常常会导致血糖含量的变化。本研究中,各工况草鱼血糖在恢复前期降低,后期逐渐升高至对照组水平。可能原因是射流式鱼泵水流等导致试验草鱼在整个抽水过程中处于爆发式运动状态,该状态以无氧运动为主,短时间内会导致大量乳酸的积累和糖原的迅速消耗,从而导致血糖含量降低,随着应激效应的恢复,皮质醇动员了鱼类蛋白质^[21]、脂肪^[22]和碳水化合物^[23]的代谢,激活了糖异生的关键酶葡萄糖-6-磷酸酶而使糖异生作用增强,继而使血糖浓度恢复^[24]。

射流式鱼泵导致的试验草鱼爆发式运动,使得试验草鱼新陈代谢由有氧代谢转为无氧代谢。丙酮酸作为脊椎动物糖酵解反应的终产物将不再进入三羧酸循环而由乳酸脱氢酶(LDH)分解为乳酸,以提供机体活动所需要的大量能量^[25]。本试验结果显示,工况三草鱼血清LDH并无显著变化,说明工况三试验草鱼无氧运动并不激烈。

总胆固醇(TC)是血脂的重要组成成分。本研究中,各工况条件下过泵后,试验草鱼其血清总胆固醇表现出一定的波动,但与对照组相比均无显著差

异,提示过泵处理对草鱼胆固醇水平无显著影响。有研究显示急性应激之后的斑点叉尾鲷其胆固醇水平无显著改变^[26],该结果与本试验相似。

3.3 射流式鱼泵导致试验草鱼的组织损伤

血清中的酶类要比血红蛋白、血浆渗透压、血细胞比容等血液指标对自然环境的变化更敏锐^[27]。谷草转氨酶(AST)是肝脏中连接糖、脂质和蛋白质代谢的重要酶,如果血清AST升高则表明肝组织受损伤^[28]。谷丙转氨酶(ALT)和LDH也被视为是指示肝功能损伤的血液学指标^[29]。本研究中,各工况条件下过泵后,草鱼血清AST、ALT和LDH在恢复前期显著高于对照组,直到24 h 3个指标恢复到对照组水平,提示过泵应激后可能导致草鱼肝细胞受损,胞质中的AST、ALT和LDH渗漏引起血清中的3个指标活性升高。Varanka等^[30]研究发现暴露于硫酸铜和单宁酸的鲤肝脏ALT和AST变化相似,且AST较敏感,这一结果与本试验相似。

肌酐(CREA)是机体的一种小分子代谢产物。血清肌酐是肌酸通过不可逆的非酶脱水反应形成的代谢产物,被释放到血液中,再通过肾随尿排泄。因此,血清肌酐(CREA)的升高意味着肾功能的损伤^[31],常作为判别肾功能好坏的一项指标^[32]。本研究结果显示,4个工况条件下过泵后,草鱼血清肌酐显著高于对照组,且在24 h内恢复到对照组水平。该结果提示,过泵处理对草鱼肾脏有一定的损伤。相比工况一、二和四,工况三处理后,试验草鱼仅在1 h时显著高于对照组,因此,工况三条件下草鱼肾脏受损程度较轻。

综上所述,射流式鱼泵所产生的综合应激因子造成过泵试验鱼的应激胁迫,短期内对试验鱼表观形态学、呼吸频率、血清生化指标产生了显著的影响,经过24 h的恢复期后,草鱼可通过自我恢复到正常水平,总体看来本研究中射流式鱼泵对草鱼的影响是较小的且可恢复的。从应激和组织损伤的角度分析,射流泵各工况对试验草鱼的影响大小不一。从应激的角度看,各工况试验草鱼呼吸频率都能在24 h内恢复,但是工况三和工况四能在0.5 h内恢复,而工况一和工况二恢复较慢;工况三处理的试验草鱼血糖并没有显著下降,反而在6 h和24 h与对照组相比有显著提升,反观工况二和工况四,都出现血糖显著消耗的情况,可见工况三对试验草鱼更有利。从试验草鱼组织损伤角度出发,工况三处理的试验草鱼血清ALT不及其他工况提升的多;AST

的活性也只有工况二和工况三能够在 24 h 内恢复到对照组水平;工况三血清 CREA 的量早在 1 h 即已经恢复到与对照组无差异,而其他 3 个工况在恢复 6 h 后仍旧显著高于对照组。因此,从组织损伤情况看,工况三对试验草鱼有利。相比较而言,在 4 个射流式鱼泵工况中,工况三对试验草鱼的伤害最小。

参 考 文 献

- [1] SUMMERFELT S T, DAVIDSON J, WILSON G, et al. Advances in fish harvest technologies for circular tanks [J]. *Aquacultural engineering*, 2009, 40: 62-71.
- [2] VALDEMARSEN J W. Technological trends in capture fisheries [J]. *Ocean & coastal management*, 2001, 44: 635-651.
- [3] XIAO L Z, LONG X P, LI L, et al. Movement characteristics of fish in a jet fish pump [J]. *Ocean engineering*, 2015, 108: 480-492.
- [4] 王得祥. 水流紊动对鱼类影响实验研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [5] ROGERS B L, LOWE C G, FERNÁNDEZ-JURICIC E. Recovery of visual performance in rosy rockfish (*Sebastes rosaceus*) following exophthalmia resulting from barotrauma [J]. *Fisheries research*, 2011, 112: 1-7.
- [6] BROWN R S, PFLUGRATH B D, COLOTELO A H, et al. Pathways of barotrauma in juvenile salmonids exposed to simulated hydroturbine passage: Boyle's law vs. Henry's law [J]. *Fisheries research*, 2012, 121: 43-50.
- [7] GUENSCH G R, MUELLER R P, MCKINSTRY C A, et al. Evaluation of fish-injury mechanisms during exposure to a high-velocity jet [M]. Washington, D.C: Pacific Northwest National Laboratory, 2002.
- [8] FRENKEL V, KIMMEL E, IGER Y. Ultrasound-induced cavitation damage to external epithelia of fish skin [J]. *Ultrasound in medicine & biology*, 1999, 25: 1295-1303.
- [9] RUMMER J L, BENNETT W A. Physiological effects of swim bladder overexpansion and catastrophic decompression on red snapper [J]. *Transactions of the American fisheries society*, 2005, 134: 1457-1470.
- [10] 沈旭明, 赵清良. 温度、溶解氧对暗纹东方鲀幼鱼呼吸频率的影响 [J]. *生态学杂志*, 2001, 20(4): 13-15.
- [11] 王波, 李继强, 曹志海, 等. 犬齿牙鲆幼鱼呼吸耗氧率的研究 [J]. *海洋科学进展*, 2003, 21(3): 325-330.
- [12] 李黎. 力竭性运动后鲑鱼幼鱼生理生化指标的变动 [D]. 重庆: 重庆师范大学, 2006.
- [13] PICKERING A, POTTINGER T. Stress responses and disease resistance in salmonid fish; effects of chronic elevation of plasma cortisol [J]. *Fish physiology and biochemistry*, 1989, 7: 253-258.
- [14] PICKERING A. Environmental stress and the survival of brown trout, *Salmo trutta* [J]. *Freshwater biology*, 1989, 21: 47-55.
- [15] VIJAYAN M, BALLANTYNE J, LEATHERLAND J. High stocking density alters the energy metabolism of brook charr, *Salvelinus fontinalis* [J]. *Aquaculture*, 1990, 88: 371-381.
- [16] KAATTARI S, TRIPP R. Cellular mechanisms of glucocorticoid immunosuppression in salmon [J]. *Journal of fish biology*, 1987, 31: 129-132.
- [17] MAULE A G, SCHRECK C B. Glucocorticoid receptors in leukocytes and gill of juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) [J]. *General and comparative endocrinology*, 1990, 77: 448-455.
- [18] MAZUR C F, IWAMA G K. Effect of handling and stocking density on hematocrit, plasma cortisol, and survival in wild and hatchery-reared chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) [J]. *Aquaculture*, 1993, 112: 291-299.
- [19] TRIPP R A, MAULE A G, SCHRECK C B, et al. Cortisol mediated suppression of salmonid lymphocyte responses *in vitro* [J]. *Developmental & comparative immunology*, 1987, 11: 565-576.
- [20] MAULE A G, SCHRECK C B. Stress and cortisol treatment changed affinity and number of glucocorticoid receptors in leukocytes and gill of coho salmon [J]. *General and comparative endocrinology*, 1991, 84: 83-93.
- [21] CHAN D K, WOO N Y. Effect of cortisol on the metabolism of the eel, *Anguilla japonica* [J]. *General and comparative endocrinology*, 1978, 35: 205-215.
- [22] DAVIS K, TORRANCE P, PARKER N, et al. Growth, body composition and hepatic tyrosine aminotransferase activity in cortisol - fed channel catfish, *Ictalurus punctatus* Rafinesque [J]. *Journal of fish biology*, 1985, 27: 177-184.
- [23] JANSSENS P, WATERMAN J. Hormonal regulation of gluconeogenesis and glycogenolysis in carp (*Cyprinus carpio*) liver pieces cultured *in vitro* [J]. *Comparative biochemistry and physiology Part A: physiology*, 1988, 91: 451-455.
- [24] MOMMSEN T P, VIJAYAN M M, MOON T W. Cortisol in teleosts; dynamics, mechanisms of action, and metabolic regulation [J]. *Reviews in fish biology and fisheries*, 1999, 9: 211-268.
- [25] SHOBHA RANI A, SUDHARSAN R, REDDY T, et al. Alterations in the levels of dehydrogenases in a fresh water fish, *Tilapia mossambica* (Peters) exposed to arsenite toxicity [J]. *Indian journal of environmental health*, 2000, 42: 130-133.
- [26] ELLSAESSER C F, CLEM L. Blood serum chemistry measurements of normal and acutely stressed channel catfish [J]. *Comparative biochemistry and physiology Part A: physiology*, 1987, 88: 589-594.
- [27] IWAMA G, GREEK G, RANDALL D. Changes in selected haematological parameters in juvenile chinook salmon subjected to a bacterial challenge and a toxicant [J]. *Journal of fish biology*, 1986, 28: 563-572.
- [28] 张永嘉, 许其爵. 网箱养殖罗非鱼综合症的血清分析 [J]. *水利渔*

业,1994(2):8-9.

[29] RAJYASREE M, NEERAJA P. Aspartate and alanine aminotransferase activities in fish tissue subcellular fractionation on exposure to ambient urea [J]. Indian journal of fisheries, 1989, 36:88-91.

[30] VARANKA Z, ROJIK I, VARANKA I, et al. Biochemical and morphological changes in carp (*Cyprinus carpio* L.) liver fol-

lowing exposure to copper sulfate and tannic acid [J]. Comparative biochemistry and physiology Part C: toxicology & pharmacology, 2001, 128:467-477.

[31] 巫向前. 临床检验结果评价[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2009.

[32] BURTIS C A, ASHWOOD E R, BRUNS D E. Tietz textbook of clinical chemistry and molecular diagnostics [M]. St. Louis: Elsevier Health Sciences, 2012.

Stress reponse of grass carp after passing the jet fish pump

WU Ning¹ LI Li¹ HOU Jie¹ LONG Xinping² XU Maosen² SU Yujing¹ LIN Wang¹

1. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University/
Key Laboratory of Freshwater Animal Breeding,
Ministry of Agriculture/Freshwater Aquaculture Collaborative
Innovation Center of Hubei Province/Laboratory of Pond
Aquacultural Engineering, Wuhan 430070, China;

2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract We studied the changes in the serum COR, GLU, LDH, TC, AST, ALT and CREA, as well as the respiratory rate of grass carp at 0 h, 0.5 h, 1 h, 6 h and 24 h after the grass carp passed the jet fish pump under 4 operating conditions. In comparison to the fish who didn't pass the jet fish pump, fish who passed the pump under the 4 operating conditions showed an increase in the serum COR, CREA, LDH, AST and ALT as well as the respiratory rate at the first recovery period and then those values decreased to control values gradually, while the serum GLU showed a decline after an initial increase. There was no significant difference in the serum TC in the present study. In addition, the descaling was observed in grass carp under the 4 operating conditions. When fish passed the jet fish pump under the 4 operation conditions, there were no rupture of swimming bladder and damage of viscera. Among the 4 operating conditions, the third operating condition showed less influence on grass carp than the other operating conditions.

Keywords jet fish pump; operating conditions; grass carp; stress; tissue damage

(责任编辑:边书京)