

文章编号: 1674-5566(2018)04-0502-06

DOI:10.12024/jsou.20171202189

高水压变化环境下鲫鱼的承受能力研究

孙 慧, 陈飞儿, 祝文龙, 喻国良

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘 要: 以常见鱼种鲫鱼为研究对象, 利用控制变量及统计分析方法开展鲫鱼在高水压条件下不同降压过程中承受能力的实验研究, 分析了水压变化环境对鲫鱼的影响和不同大小的鲫鱼承压能力的差异。结果表明, 压强和降压速率均对鲫鱼健康有重要影响, 且两者关系密不可分。总体来讲, 压强在 3 MPa 以内, 鲫鱼均未受伤; 压强在 4 ~ 10 MPa 范围内, 压强和降压速率越大, 鲫鱼受伤的几率越大; 压强超过 10 MPa 后, 鲫鱼会死亡, 且压强越大, 造成鲫鱼死亡的降压速率临界值越小。此外发现, 鲫鱼对变压环境的承受能力似乎与其个体大小无明显的关系。该研究有望对未来高科技远洋渔业中所涉及的深水养殖及深水捕捞技术提供一定的理论依据和指导意义。

关键词: 鲫鱼; 水压变化环境; 压强; 降压速率; 个体全长

中图分类号: S 973.9 **文献标志码:** A

我国水产养殖业发展迅速, 目前常见的水产养殖方式有池塘养殖、工厂养殖和近海区域的网箱养殖^[1-2]。但随着土地资源和近海岸资源的利用趋于饱和, 这些形式的养殖方式缺乏发展前景, 走向深水和深远海的养殖方式将成为未来发展的趋势^[3-5]。深水养殖的突出特点是静水压强高, 在捕捞上岸过程中压强变化大。为此, 开展有关鱼类对高水压变化环境承受能力的研究具有重要的现实意义。目前, 国内外关于水压变化环境对鱼类影响的研究主要以水轮机等水利设施附近流场中发生快速降压为背景, 研究主要集中在压强低于 1 MPa 工况下不同种类鱼受水压变化的影响^[6-13]。但是, 在高压条件下水压变化环境对鱼类影响的研究鲜见报道。本文以常见鲫鱼为对象, 通过实验研究鲫鱼对高水压变化环境的承受能力, 分析不同大小的鲫鱼承压能力的差异, 并进一步探明鲫鱼能够安全生存的水深阈值和造成死亡的降压速率临界值, 以期对拓宽深水养殖空间和深水捕捞技术提供一定的参考价值。

1 材料与方法

1.1 实验样本及暂养管理

鲫鱼样本购自上海市奉贤区鲫鱼养殖场, 健康活跃, 个体质量范围为 20 ~ 100 g, 个体全长(自吻端至尾鳍末端的长度)范围为 10 ~ 18 cm。实验前将鲫鱼暂养于水池(长 2.5 m、宽 1.0 m、深 0.8 m)中, 每天早晨定时投喂定量饲料, 并配备增氧机向水中连续充足供氧, 晚上定时排水、换水, 保证实验鲫鱼的养殖环境质量。鲫鱼适应期为 3 d, 待其适应环境, 挑选健康活跃、无病无伤的鲫鱼进行实验。

1.2 实验设备

本研究采用高压釜和增压泵两种设备来模拟高水压环境, 如图 1 所示。其中, 增压泵的增压范围为 0 ~ 30 MPa; 高压釜的容积约 8.9 L, 承压范围为 0 ~ 25 MPa, 上部自带压力表以显示釜内压力值。两端设有进气阀和排气阀, 压强变化率可通过调节高压釜上的排气阀开度进行控制, 变化速率可调范围为 0 ~ 1.1 MPa/s。

收稿日期: 2017-12-17 修回日期: 2018-03-23

基金项目: 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放课题(LP1701)

作者简介: 孙 慧(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋工程、海岸和海洋动力环境及作用。E-mail:sun_hui@sju.edu.cn

通信作者: 喻国良, E-mail:yugl@sju.edu.cn

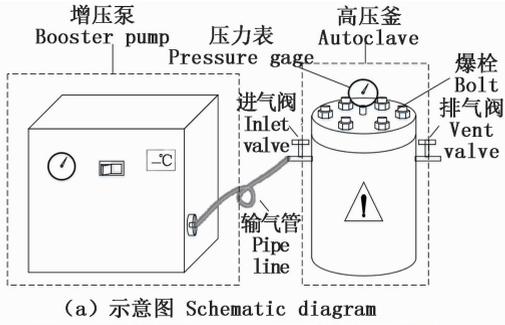


图 1 高压釜及增气泵

Fig. 1 High pressure pump and autoclave

1.3 实验操作

首先,从水池中随机选取一尾健康活跃的鲫鱼,观察并记录其健康状态(体表特征和活跃度)。打开高压釜盖,向釜内注入 15 cm 深的水,将该鲫鱼放入其中,合上釜盖并紧固。然后将增压泵的输气管连接至高压釜的进气阀处,开启增压泵,向高压釜内输气,增压至目标压强后,关闭增压泵及进气阀。维持恒压 0.5 h 后,打开排气阀并控制其开度,使高压釜以特定降压速率降压至大气压。最后打开高压釜盖,并取出鲫鱼样本,再次观察并记录其健康状态,并与实验前的观察结果对比。

1.4 健康状态变化的判别标准

鲫鱼健康状态变化的判别是分析水压环境变化影响的重要依据,主要观察部位包括鱼眼、鱼腹和鱼鳍等。根据其受到伤害的严重程度,将判别标准划分为 4 种:未受伤、轻度受伤(活跃度轻微降低,身体轻微充血)、重度受伤(活跃度明显降低,甚至失衡,体表大面积充血甚至出血)、死亡。

2 结果与分析

本实验分为两部分展开,一是探究水压变化环境对鲫鱼健康的影响,包括压强和降压速率两

个方面;二是探究不同大小(按个体全长划分)的鲫鱼对高水压变化环境的极限承受能力的差异。

2.1 水压变化环境

水压变化环境对鲫鱼的影响统计结果如图 2 所示。实验结果表明,压强和降压速率均对鲫鱼的健康有重要影响,且二者关系密不可分。当压强不超过 3 MPa 时,各降压速率均未对鲫鱼造成伤害;当初始压强为 4 ~ 10 MPa 时,根据观察统计,同一降压速率下实验鲫鱼的受伤程度随压强增大而加重,同一初始压强下实验鲫鱼的受伤程度随降压速率的增大而加重,具体来讲,压强越大,降压速率越大,鲫鱼活跃程度越低甚至失衡,体表特别是鱼眼、鱼鳍、鱼腹等部位充血越明显,典型受伤特征如图 3 所示;当初始压强为 11 ~ 15 MPa 时,实验鲫鱼均出现死亡现象,且各压强下造成鲫鱼死亡的降压速率临界值不同。随着压强的递增,造成鲫鱼死亡的降压速率临界值逐渐递减,且当压强由 13 MPa 增大至 14 MPa 时,临界降压速率出现了明显的台阶式减小,前者约为后者的 2.5 倍。

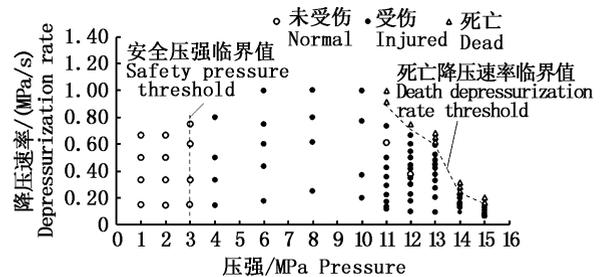


图 2 不同水压环境下鲫鱼承受不同降压速率的结果

Fig. 2 The results of the crucian carps under different pressures and different depressurization rates

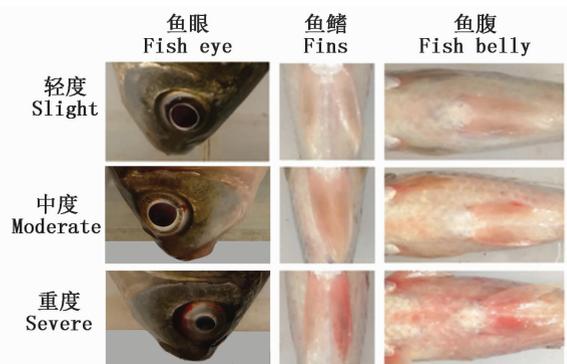


图 3 实验后鲫鱼典型受伤特征变化

Fig. 3 Typical changes of hurt characteristics of crucian carps after experiment

2.2 个体全长差异

压强 11 MPa 和 15 MPa 下,不同个体全长的鲫鱼对降压速率的极限承受能力统计结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,对于各尺寸组的实验鲫鱼,造成其死亡的降压速率临界值基本相同。具体地,当压强为 11 MPa 时,降压速率临界值基本稳定在 0.98 MPa/s,当降压速率超过该临界值时,实验鲫鱼全部死亡;压强为 15 MPa 时,降压速率临界值基本上稳定在 0.12 MPa/s。

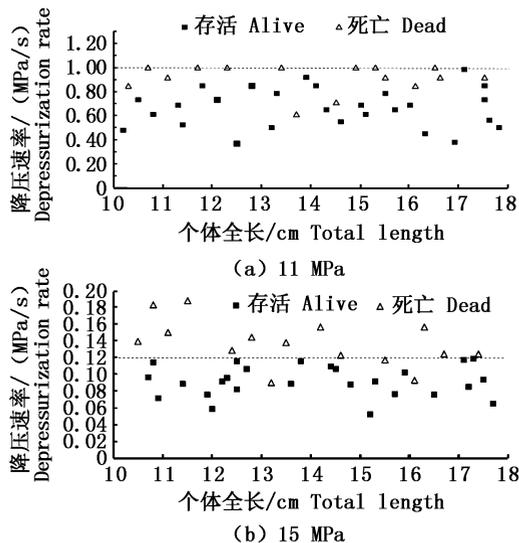


图 4 不同个体全长的鲫鱼对
降压速率的极限承受能力

Fig. 4 The bearing capacity of crucian carps
in different sizes under depressurization rates

3 讨论

3.1 水压变化环境对鲫鱼的影响

压强对鱼类造成的损伤程度主要取决于压强的大小和降压速率^[14-15]。对于压强大小而言,BOYS 等^[16-17]和 BROWN 等^[18]指出,鱼类所能承受的压强存在一定安全临界值,一旦超过该临界值,鱼受到伤害的几率会大幅度地提高。本实验对鲫鱼的研究结果表明,压强在 3 MPa 以内,鲫鱼均未受到影响;当压强大于 3 MPa 时,实验鲫鱼体表出现受伤现象,活跃度降低,且压强越大,受到的伤害越严重,可以认为鲫鱼所能承受的安全压强临界值为 3 MPa。另一方面,类似地,应当也存在一个会造成鲫鱼死亡的压强临界值,一旦压强超过鱼所能承受的压强临界值,鱼死亡的几率会大幅度地提高。本研究中,在实验条件范围

内,11 MPa 以内鲫鱼均未出现死亡现象,而超过该压强后开始出现死亡现象,可认为 11 MPa 是本实验研究中鲫鱼能够承受的理论压强临界值。

对于降压速率对鱼造成影响, BEYER 等^[19-23]发现,鲑类鱼和太阳鱼历经快速降压后,会发生鱼鳔破裂,眼睛凸出或积血,血管破裂导致的伤害、身体失衡等。本研究实验结果表明鲫鱼经历快速降压后,也会出现不同程度地眼睛出血、体表出血、身体失衡等症状,表明压强骤降确实也会对鲫鱼产生重要影响,这与上述结论保持一致,并且发现了导致实验鲫鱼死亡的降压速率临界值,一旦降压速率超过该临界值,鲫鱼会全部死亡。BISHAI 等^[24-26]指出,在快速降压的过程中,受内外压差的作用,气体会不可避免地从鱼的体液、组织和器官中析出,反过来又使得血管和器官等内部压力增大,从而增大了鱼受到损害的风险。自由气体形成气泡,也可以堵塞血管,从而扰乱鳃和心脏等器官的正常功能。这些气体的存在增加了体液的体积,一旦超过实验样本的自身承受能力,血管破裂,会导致鱼出血甚至死亡。按照此理论,在本实验的增压过程中鱼的体液、组织和器官中会不可避免地溶入一定量的气体,且压强越大,溶气量越多。但是受压强的作用,溶入体液中的气泡体积在增压过程中越来越小,不会对鱼造成致命性伤害;而快速降压时气体从体液中析出而形成气泡,并且迅速增大,一旦超过其自身的承受能力,极有可能导致血管破裂,体表出血等伤害,严重者直接死亡。在本实验中所观察到的鲫鱼体表充血、身体失衡甚至死亡等现象应与上述原因有关。这也一定程度上解释了当压强超过安全阈值后,随着降压速率增大,鲫鱼受到的伤害程度普遍增大,且一旦超过临界值实验鲫鱼均会死亡的现象。

此外,实验结果表明,当压强由 13 MPa 增大至 14 MPa 时造成实验鲫鱼死亡的临界降压速率出现了台阶式减小的现象。并且根据实验后观测发现当降压速率小于临界值时,实验组的鲫鱼样本虽然没有即刻死亡,但压强 14 MPa 和 15 MPa 实验组样本在实验结束后存活的时间远小于 12 MPa 和 13 MPa 实验组样本,这也进一步说明 14 MPa 和 15 MPa 实验组的鲫鱼样本受伤更严重。这可能是由于造成鲫鱼内部系统调压功能失效损伤的临界静压强介于 13 MPa 与 14 MPa

之间。在实验中维持恒压阶段,14 MPa 和 15 MPa 的压强超过了鲫鱼样本身体正常承压的极限,在降压之前已经对样本造成严重损伤,使得鲫鱼的自调节能力严重损伤,从而导致这两组造成鲫鱼死亡的临界降压速率明显较小。而 12 MPa 和 13 MPa 下,恒压阶段鲫鱼自身损伤相对较轻,自调节功能较完好,所以这两组的临界降压速率较大且差异不大。

3.2 鲫鱼个体的承压能力差异性

个体全长差异对鱼类承压能力的影响,也是高水压变化环境对鱼类健康影响需要考虑的一项因素,但目前相关报道较少且结论不一致。BEYER 等发现受快速降压的影响,较小尺寸的鲑类鱼比较大尺寸的鱼受到的影响程度更大,受伤和死亡的尾数也更多^[19,21,27]。但是,FEATHERS 和 KNABLE^[25]却发现两个尺寸组(150~250 mm 和 300~380 mm)的大嘴鲈鱼经快速降压后,其受影响程度并未有区别。而本文研究发现在 11 MPa 和 15 MPa 两组实验中,不同尺寸(10~18 cm)的鲫鱼经过快速降压后的临界降压速率值均没有明显差异。这表明在相同高水压环境下,鲫鱼对高水压变化环境的承受能力与其个体大小无明显关系。这可能是因为本研究的实验鲫鱼尺寸分布范围较小,体内器官大小差异不大,因此个体间的承压能力大致相当,相同条件下的生理状态变化无明显区别。关于更大个体差异的鲫鱼是否有相同的高水压环境变化的承受能力,有待进一步地探究。

此外,分别对比 2.1 节和 2.2 节的 11 MPa 和 15 MPa 两个实验组,发现造成鲫鱼死亡的降压速率临界值大小略有差异。这是因为两部分实验所用鲫鱼样本不可避免地存在微小的个体差异,在实验误差允许范围内,可认为两组实验结果具有一致性。

4 结论

本文以常见鱼种——鲫鱼为研究对象,研究了高水压变化环境对不同大小鲫鱼承压能力的影响,实验条件下得到以下主要结论:

(1)在高水压环境下,压强和降压速率对鲫鱼的健康状况均有重要影响。总体上,当压强越大和降压速率越大,鲫鱼活跃程度越低,受伤越严重,甚至死亡。

(2)压强在 3 MPa 以内,鲫鱼的健康均不受影响。因此可认为鲫鱼能够正常生活的安全水深阈值在 300 m 左右。

(3)当压强为 4~10 MPa 时,同一压强下,降压速率越大,鲫鱼受伤越严重;同一降压速率下,压强越大,鲫鱼受伤也越严重。但是,该压强范围内不能造成鲫鱼死亡。

(4)当压强超过 10 MPa 时,降压速率超过一定的临界值,鲫鱼会出现死亡现象,且压强越大,造成鲫鱼死亡的降压速率临界值越小。

(5)鲫鱼对高水压变化环境的承受能力似乎与其尺寸无明显的关系。

参考文献:

- [1] 徐皓. 水产养殖设施与深水养殖平台工程发展战略[J]. 中国工程科学, 2016, 18(3): 37-42.
XU H. Development strategy for aquaculture facility and deepwater aquaculture platform [J]. Engineering Sciences, 2016, 18(3): 37-42.
- [2] 马云瑞, 郭佩芳. 我国深远水养殖环境适宜条件研究[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(2): 249-254.
MA Y R, GUO P F. The research of suitable conditions for Chinese mariculture environment in deep-water area far from coast[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(2): 249-254.
- [3] 侯海燕, 鞠晓晖, 陈雨生. 国外深海网箱养殖业发展动态及其对中国的启示[J]. 世界农业, 2017(5): 162-166.
HOU H Y, JU X H, CHEN Y S. The development of the deep-marine net cage aquaculture abroad and its enlightenment to China[J]. World Agriculture, 2017(5): 162-166.
- [4] 林德芳, 黄文强, 关长涛. 我国海水网箱养殖的现状、存在的问题及今后课题[J]. 齐鲁渔业, 2002, 19(1): 21-23.
LIN D F, HUANG W Q, GUAN C T. The actuality, problem and prospects of the marine net cage culture of China [J]. Shandong Fisheries, 2002, 19(1): 21-23.
- [5] 盛金荣. 海南普通网箱与深水网箱养殖经济效益分析——以海南陵水及澄迈为例[D]. 广东: 广东海洋大学, 2016.
SHENG J R. Economic benefits analysis on the traditional cage and offshore cage culture of Hainan Province: cases of Lingshui county and Chengmai county [D]. Guangdong: Guangdong Ocean University. 2016.
- [6] 邵奇, 李海锋, 吴玉林, 等. 水力机械内压力变化梯度对鱼类损伤的模拟试验[J]. 机械工程学报, 2002, 38(10): 7-11.
SHAO Q, LI H F, WU Y L, et al. Simulating experiment on

- fish damage caused by the pressure gradient in hydraulic machinery[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(10): 7-11.
- [7] 李海锋, 邵奇, 吴玉林, 等. 负压状态下压力变化导致鲫鱼身体组织的损伤[J]. 动物学报, 2003, 49(1): 67-72.
LI H F, SHAO Q, WU Y L, et al. Crucian (*Carassius auratus auratus*) damage caused by pressure changes under subatmospheric conditions[J]. Acta Zoologica Sinica, 2003, 49(1): 67-72.
- [8] 邵奇, 李萌, 吴玉林, 等. 水力机械内鲤鱼草鱼的压力损伤模拟试验[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(6): 954-957.
SHAO Q, LI M, WU Y L, et al. Simulating experiment on the damage of Carp and Grass carp caused by the pressure changing courses in hydraulic machinery [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(6): 954-957.
- [9] 李成, 王煜. 轴流式水轮机流道内压力分布对幼鱼影响研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2015, 37(6): 65-69.
LI C, WANG Y. Effects of pressure distribution over passage of axial flow hydraulic turbine on passing-through fishes[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2015, 37(6): 65-69.
- [10] 程一鑫, 王煜, 王继保. 水轮机内负压对鲢鱼幼鱼损伤阈值模拟试验[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2017, 39(4): 22-26.
CHENG Y X, WANG Y, WANG J B. Simulative experiments on subatmospheric pressure injury to young Silver carps in hydraulic turbine[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2017, 39(4): 22-26.
- [11] 张洋, 王煜, 戴会超. 水轮机流道非恒定流对过机鱼体影响研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(2): 89-96.
ZHANG Y, WANG Y, DAI H C. Impact from unsteady flow in flow passage on fish passing through turbine[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(2): 89-96.
- [12] RICHMOND M C, SERKOWSKI J A, EBNER L L, et al. Quantifying barotrauma risk to juvenile fish during hydro-turbine passage[J]. Fisheries Research, 2014, 154: 152-164.
- [13] FELIZARDO V D O, ANDRADE E D S, MURGAS L D S, et al. Swimbladder abnormalities in piapara (*Leporinus obtusidens*) captured downstream of the Funil Dam [J]. Neotropical Ichthyology, 2010, 8(3): 661-665.
- [14] GORDON M S. II Hydrostatic pressure[J]. Fish Physiology, 1970, 4: 445-464.
- [15] POMPEU P D S, HORTA L F M, MARTINEZ C B. Evaluation of the effects of pressure gradients on four Brazilian freshwater fish species[J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2009, 52(1): 111-118.
- [16] BOYS C A, ROBINSON W, MILLER B, et al. A piecewise regression approach for determining biologically relevant hydraulic thresholds for the protection of fishes at river infrastructure[J]. Journal of Fish Biology, 2016, 88(5): 1677-1692.
- [17] BOYS C A, BAUMGARTNER L, MILLER B, et al. Protecting downstream migrating fish at mini hydropower and other river infrastructure[J]. NSW Department of Primary Industries Fisheries Final Report Series NO. 137, 2013.
- [18] BROWN R S, COLOTELO A H, PFLUGRATH B D, et al. Understanding barotrauma in fish passing hydro structures: a global strategy for sustainable development of water resources [J]. Fisheries, 2014, 39(3): 108-122.
- [19] BEYER D L, D'AUOST B G, SMITH L S. Decompression-induced bubble formation in salmonids: comparison to gas bubble disease[J]. Undersea Biomedical Research, 1976, 3(4): 321-338.
- [20] BECKER J M, ABERNETHY C S, DAUBLE D D. Identifying the effects on fish of changes in water pressure during turbine passage[J]. Hydro Review, 2003, 22(5): 1-5.
- [21] BROWN R S, CARLSON T J, WELCH A E, et al. Assessment of barotrauma from rapid decompression of depth-acclimated juvenile Chinook salmon bearing radiotelemetry transmitters[J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2009, 138(6): 1285-1301.
- [22] 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, 121-122: 43-50.
- [23] PFLUGRATH B D, BROWN R S, CARLSON T J. Maximum neutral buoyancy depth of juvenile Chinook salmon: implications for survival during hydroturbine passage [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2012, 141(2): 520-525.
- [24] BISHAI H M. The effect of pressure on the survival and distribution of larval and young fish [J]. ICES Journal of Marine Science, 1961, 26(3): 292-311.
- [25] FEATHERS M G, KNABLE A E. Effects of depressurization upon largemouth bass [J]. North American Journal of Fisheries Management, 1983, 3(1): 86-90.
- [26] 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(6): 1457-1470.
- [27] TSVETKOV V I, PAVLOV D S, NEZDOLY V K. Changes of hydrostatic pressure lethal to young of some freshwater fish [J]. Journal of Ichthyology, 1972, 12: 307-318.

Research on the tolerance of crucian carp to high water pressure change

SUN Hui, CHEN Feier, ZHU Wenlong, YU Guoliang

(School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Taking the crucian carp as the research object, the tolerance to different depressurization rates under high water pressure conditions is explored by experimental investigation with the variable-controlling method and the statistical analysis method. The effects of water pressure changes on crucian carps and the pressure tolerance difference of individuals of various sizes are analyzed. The results show that two closely related factors, initial pressure and the depressurization rate, both have obvious effects on the health of crucian carp. Generally speaking, the crucian carps stay uninjured under the pressure within 3 MPa; when the pressure comes within the range of 4 – 10 MPa, the greater the pressure and the depressurization rate are, the more likely the carp gets injured; the crucian carp will die under the pressure exceeding 10 MPa, and the greater pressure results in the decline of the death depressurization rate threshold. In addition, it is found that the crucian carp tolerance to the pressure change does not seem to have any significant relationship with their individual size. The research is expected to provide some theoretical basis and guidance significance for deepwater aquaculture and deepwater fishing technology in the future high-tech oceanic fishery.

Key words: crucian carp; water pressure change; pressure; depressurization rate; total length