

长薄鳅对过饱和总溶解气体的回避特征研究

袁 隼,袁 媛,王远铭,李 永,李克锋

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,成都 610065)

摘要:高坝泄洪过程中,高速水流造成下游水体的总溶解气体(Total Dissolved Gas,TDG)过饱和极易使得水体中的鱼类患上气泡病,进而对下游水体的鱼类生存造成威胁。为了探究长薄鳅(*Leptobotia elongate*)幼鱼对TDG过饱和和水体的探知回避能力,本实验以2月龄的长薄鳅为研究对象,记录其在不同TDG饱和度水体中的反应和趋向。结果表明,在120%TDG过饱和水体中,长薄鳅回避率为-20%,其对该饱和度下的水体表现出了一定的趋向性;TDG饱和度为130%时,长薄鳅回避率为-2%,无明显回避能力;TDG饱和度为140%时,长薄鳅展现出微弱的回避特征,其在清水与过饱和水体之间往复游动,最终回避率为12%;150%TDG过饱和水体中,长薄鳅体现出敏锐的探知能力,1~2 min后开始频繁游动,同时具有一定的回避能力,回避率为34%。长薄鳅的回避率与过饱和水体浓度呈现较强的线性相关关系,水体TDG饱和度越高,实验鱼回避现象越明显。

关键词:长薄鳅;回避率;探知能力;气体过饱和

中图分类号:Q142 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2017)04-0077-05

高坝泄水期间,坝下河道水体中的总溶解气体(Total Dissolved Gas,TDG)极易出现过饱和。我国已建的二滩、三峡和紫坪铺等高坝泄洪时,导致下游TDG饱和度达到120%~150%(蒋亮等,2008;曲璐等,2011)。下游水体中的过饱和TDG随着鱼类呼吸进入其体内,由此导致鱼类患气泡病甚至大规模死亡(Weitkamp,1976)。研究表明,TDG过饱和水体会使鱼类游动能力减弱、身体失去平衡以及捕食能力丧失。若鱼类具有探知和回避能力,则可通过回避行为降低其受过饱和TDG的影响程度;然而,不同鱼类的探知及回避能力往往存在差异。Meekin & Turner等(1974)发现大鳞大马哈鱼(*Oncorhynchus tshawytscha*)能探知100%~117%饱和度的水体,而银鲑(*O. kisutch*)却不具备这一能力;Huang等(2010)对岩原鲤(*Procypris rabandi*)的实验表明,短时间内实验鱼即出现躲避行为,其中饱和度低于115%的水体中,约有15%的岩原鲤表现出躲避行为,但未出现死亡;当饱和度超过135%时,95%的

鱼类表现出躲避行为;Bouck等(1976)对不同年龄的大马哈鱼进行生物学效应实验,发现高龄鱼对气体过饱和的耐受性比低龄鱼要强;Jeffrey等(2011)研究表明,温度、鱼体大小、气体过饱和度均对鱼类患气泡病有重要的影响。

长薄鳅(*Leptobotia elongate*)属鳅科、沙鳅亚科、薄鳅属,主要分布于长江上游及其支流,为我国特有鱼类,具有重要的经济价值;但其生存现状却不容乐观,1998年国家濒危物种委员会和国家环保局已将其正式列为濒危动物红皮书(汪松,1998)。刘军(2004)对长江特有鱼类的受威胁程度进行定量分析,认为应将长薄鳅这一珍稀物种进行3级保护。长江上游水电工程开发所带来的TDG过饱和问题,使得长薄鳅的生存面临更为严峻的挑战。然而,长薄鳅能否有效的回避TDG过饱和带来的伤害,此前的研究中却鲜见报道。长薄鳅产卵时间是每年的4~6月,结合高坝泄洪时间,受影响最大的为2~3月龄幼鱼。本实验以2月龄长薄鳅为研究对象,探究了不同TDG饱和度下长薄鳅的回避效应。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

实验用长薄鳅购自四川省农业科学院水产研究所,为2月龄健康个体,平均体重1.0 g,平均体长2.5 cm。实验前将所购实验鱼放于四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室驯养15 d,驯

收稿日期:2016-07-19

基金项目:国家自然科学基金(51379136);减水河道水量变化的鱼类饵料生物量响应关系研究(51479127);国家重点研发计划项目-水利工程环境安全保障及泄洪消能技术(课题十:泄水过饱和和气体形成机制与消减技术研究)(2016YFC0401710)。

作者简介:袁隼,1992年生,女,硕士研究生,主要从事环境水力学研究。E-mail: yuanq1992@126.com

通信作者:李永。E-mail: li_yong@scu.edu.cn

养用水为曝气4 d的自来水,水温为11~13℃,溶解氧浓度为5~7 mg/L。实验时挑选活力强、体型大小基本一致的个体进行实验。为避免饵料对实验结果造成影响,实验前1 d禁食。

利用图1所示的陡梯度直式型回避实验装置,研究不同TDG饱和度下长薄鳅的探知及回避效应。该装置长×宽×高=1.3 m×0.6 m×0.4 m,内分左右2个水槽,实验时一侧通入TDG过饱和水,一侧通入清水。进口处约0.1 m设一过流孔板,使水流全断面均匀流入;距末端0.3 m处设溢流孔板,孔板之后设出水口。实验过程中保持实验水深约12 cm左右,在进口处通过阀门1~4的启闭可顺利、快捷切换左右实验水槽流入的水体。

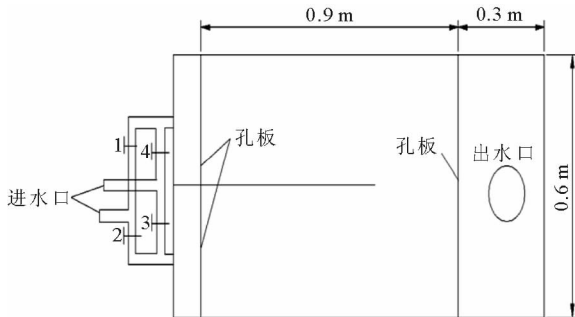


图1 水平回避实验装置

Fig. 1 Apparatus for horizontal avoidance experiment

1.2 实验方法

国内已开展的高坝下游TDG过饱和和原型观测表明,我国多数河流TDG饱和度在120%~150% (Qu et al, 2011)。基于此,实验设定了TDG饱和度分别为120%、130%、140%和150%共计4个工况。实验前,在水槽的一侧通过循环系统让水体达到预期的饱和度,在另一侧打开清水入流阀门;同时控制清水入流阀门开度,使清水支槽与TDG支槽流量相等并保持流动稳定,水深维持在12 cm。每个工况实验重复3次,每次放置19~21尾实验鱼,且实验鱼不重复使用。每次实验后,交换清水和过饱和水的过流水槽,以避免外界其他因素造成影响。因为长薄鳅本身喜欢底栖和喜欢黑暗的习性,实验过程尽量避光处理。

实验开始后,每10 min记录1次鱼的位置。引用水平回避率来评价实验鱼对TDG过饱和水体的探知及水平回避能力(周永欣等, 1989),其表达式为:

$$A = (X - Y) / N \times 100\%$$

式中:A为水平回避率;X为清水槽中实验鱼数

量;Y为TDG过饱和水槽中实验鱼数量;N为实验鱼总数,即 $N = X + Y$ 。

2 结果

2.1 不同TDG饱和度的长薄鳅行为选择

长薄鳅刚进入回避水槽水体时,随机选择一边,感应水体的性质。在饱和度为120%的实验组,3次均群集于水底,较少游动,游速缓慢且在两侧水槽间往复穿梭,实验观察多数长薄鳅在40 min后稳定,由于个体差异,个别长薄鳅表现很活跃。在整个实验过程中,实验鱼出现在TDG过饱和水槽一侧的概率均大于清水侧。由图2-a看出,TDG饱和度为120%时,长薄鳅非但没有受到气体过饱和的胁迫作用,而且更倾向于TDG过饱和水体。

水体饱和度为130%时,长薄鳅的行为相比120%实验工况更为活跃,且实验鱼在两侧水槽间选择交换的时间更早。图2-b表明,在整个实验过程中,清水组出现长薄鳅的概率要比TDG过饱和水体中出现的概率高。实验结束时,长薄鳅在两侧水槽中的数量基本相等。

在TDG饱和度为140%的实验中,长薄鳅在两侧水槽间交换游动较频繁,并无明显倾向性。实验结束时,最终选择清水的长薄鳅数量要多于对TDG过饱和水体的选择(图2-c)。

在150%TDG饱和度实验工况中,刚进入实验水槽的长薄鳅很快出现躁动不安现象,频繁游动,甚至游至水面,在大约40 min时出现较为明显的选择倾向,从图2-d看出,选择清水的实验鱼数量多于过饱和水体,表明长薄鳅对于饱和度为150%的水体具有一定探知和回避的能力。

2.2 长薄鳅回避率与TDG饱和度的关系

TDG饱和度为120%、130%、140%和150%实验工况下长薄鳅的平均水平回避率见图3。可以看出,随着TDG饱和度(x)的升高,长薄鳅的回避率(y)逐步提高,两者呈现线性相关:

$$y = 1.76x - 231.6 \quad (R^2 = 0.9928)$$

当TDG饱和度在140%以下时,长薄鳅回避现象不明显;140%的TDG饱和度时,长薄鳅具有一定的探知和回避能力;而在150%饱和度时,回避率达到34%。总体而言,即使在较高的TDG饱和度下,长薄鳅的回避率仍相对较低。究其原因,可能是长薄鳅为底栖无鳞动物,对TDG过饱和的耐受能力相对较强,且幼鱼较成鱼器官发育尚不完整,故实验所用的2月龄鱼对TDG过饱和水体的感知能力较弱。

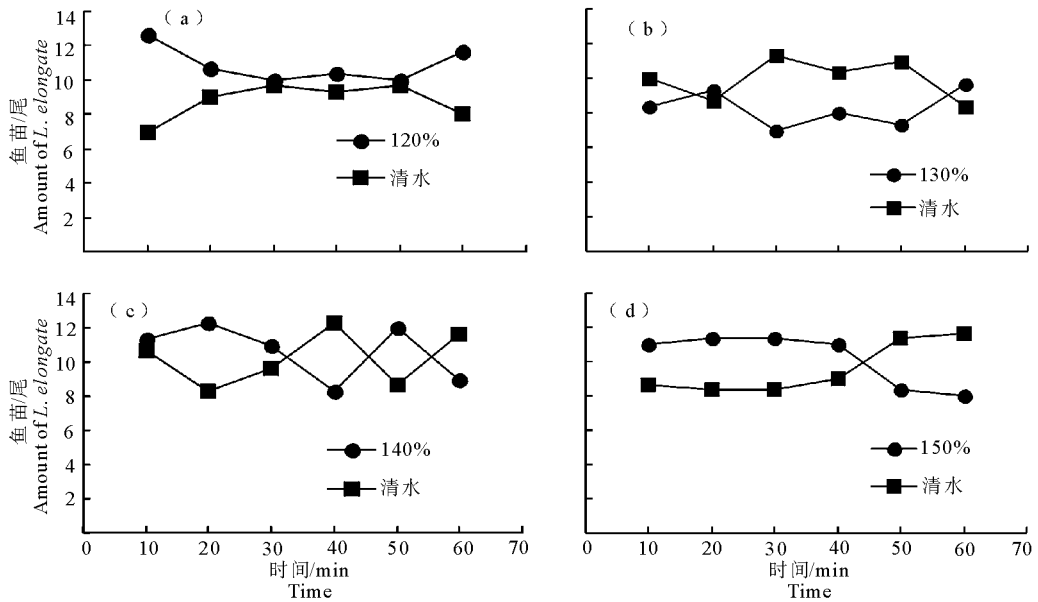


图 2 不同 TDG 饱和度下长薄鳅随时间变化的回避规律

Fig. 2 Avoidance characteristics of *L. elongate* in TDG supersaturated water of different levels varying with exposure time

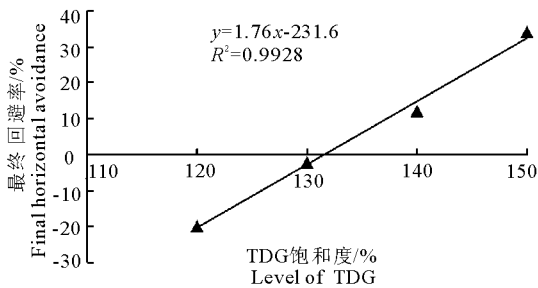


图 3 不同 TDG 饱和度下长薄鳅的最终回避率

Fig. 3 Correlation of *L. elongate* avoidance rate with degree of TDG supersaturation

3 讨论

3.1 长薄鳅对 TDG 过饱和和敏感性

本文通过对长薄鳅的水平回避实验,探究了其对于 TDG 过饱和和水体的感知和回避能力。实验表明,在高于 130% 的 TDG 过饱和水体中,长薄鳅表现出明显的异常,在清水与 TDG 过饱和水体中反复穿梭,甚至频繁游至水面,明显与长薄鳅本身的生活习性有很大的不同,表明其能明显地感知到高于 130% 的 TDG 过饱和水体。TDG 浓度越高,表现越强烈的躁动,这与前人研究得出患气泡病的鱼类游泳活跃频繁并有恐慌感的结论一致 (Huang et al, 2010; Cao et al, 2015; 王远铭等, 2015), 说明长薄鳅对于高浓度的 TDG 具有感知能力。

3.2 不同鱼类 TDG 过饱和和回避能力差异性比较

Lutz 等 (1995) 研究认为,不利环境下实验鱼的

躲避行为与环境致死浓度有较强的相关关系,所以本文所开展的鱼类对过饱和和溶解气体的感知和躲避能力的研究可以为环境风险评估提供依据。并不是每一种鱼都对过饱和 TDG 有回避能力,即使具有回避能力的鱼也往往因为种类不同而存在差异 (Meekin & Turner, 1974)。王远铭等 (2015) 研究表明,齐口裂腹鱼 (*Schizothorax prenanti*) 在 TDG 饱和度为 135% 的水体中回避率为 88.75%; Huang 等 (2010) 对岩原鲤 (*Procypris rabandi*) 的研究表明,TDG 饱和度高于 135% 时,95% 的实验鱼出现躲避行为;胭脂鱼 (*Myxocyprinus asiaticus*) 在 TDG 饱和度为 135% 时回避率为 62.5% (Cao et al, 2015)。同一种鱼在不同年龄时的回避能力也不同,王远铭等 (2015) 研究表明,2 龄齐口裂腹鱼比 1 龄齐口裂腹鱼回避能力更强。

图 4 比较了长薄鳅与其他长江上游特有鱼类对 TDG 过饱和和水体的回避率。可以看出,与齐口裂腹鱼、胭脂鱼和岩原鲤相比,长薄鳅的回避能力相对较弱,不能有效回避 TDG 过饱和带来的威胁。在实验观察中发现,由于不能及时回避,在 TDG 饱和度 150% 实验工况中出现个别实验鱼死亡的现象。尽管长薄鳅相比于其他鱼类在各个实验工况中回避率都较低,但整体规律仍是水体 TDG 饱和度越高,实验鱼回避现象越明显,这一点与其他具有感知能力的鱼类基本一致 (Huang et al, 2010; Cao et al, 2015; 王远铭等, 2015)。

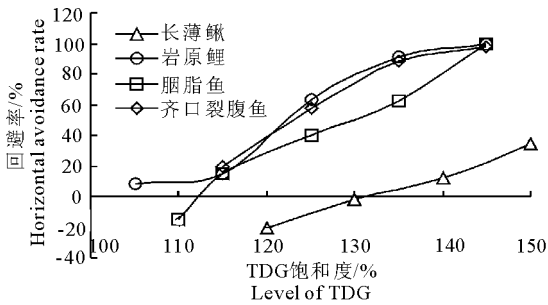


图4 不同鱼类的气体过饱和和回避率

Fig. 4 Avoidance rate of different fish species to different degree of TDG supersaturation

3.3 长薄鳅 TDG 过饱和和耐受性研究的必要性

谭德彩(2006)研究表明,高坝泄洪导致的水体溶解气体过饱和是鱼类气泡病的主要原因。TDG过饱和和水体饱和度大于120%时,鱼类将在10~20 h死亡。王远铭等(2015)发现,齐口裂腹鱼在TDG饱和度为120%的水体里半致死时间为10.7 h;而Huang等(2010)对岩原鲤的研究发现,在TDG饱和度为125%的水体中,其半致死时间为15.4 h;胭脂鱼在TDG饱和度125%的水体中的半致死时间为12.4 h,在TDG饱和度为130%的水体中半致死时间为7.4 h(Cao et al, 2015)。我国已建高坝泄洪时往往导致下游河道水体TDG饱和度达到120%~150%(蒋亮等, 2008; 曲璐等, 2011; Qu et al, 2011)。参考以前鱼类对水体TDG过饱和和水体耐受性的研究,在饱和度高于120%时将是对鱼类的生存造成威胁。长薄鳅对TDG过饱和的回避能力与其他长江上游特有鱼类相比更弱,受到的生存威胁更为严重。目前,关于长薄鳅死亡率的研究尚未见报道。因此,开展长薄鳅对TDG过饱和和水体的耐受能力研究十分必要和迫切。

参考文献

- 蒋亮, 李嘉, 李然, 等, 2008. 紫坪铺坝下游过饱和溶解气体原型观测研究[J]. 水科学进展, 19(7): 367-371.
- 刘军, 2004. 长江上游特有鱼类受威胁及优先保护顺序的定量分析[J]. 中国环境科学, (4): 395-399.
- 曲璐, 李然, 李克锋, 等, 2011. 高坝工程总溶解气体过饱和和影响的原型观测[J]. 中国科学 E 辑(技术科学), 41(2): 177-183.
- 谭德彩, 2006. 三峡工程致气体过饱和和对鱼类致死效应的研究[D]. 重庆: 西南大学.

- 汪松, 1998. 中国濒危动物红皮书[M]. 北京: 科学出版社.
- 王远铭, 张陵蕾, 曾超, 等, 2015. 总溶解气体过饱和和胁迫下齐口裂腹鱼的耐受和回避特征[J]. 水利学报, 46(4): 480-488.
- 周永欣, 章宗涉, 1989. 水生生物毒性试验方法[M]. 北京: 农业出版社.
- Bouck G R, Nebeker A V, Stevens D G, 1976. Mortality, salt-water adaptation and reproduction of fish exposed to gas supersaturated water [R]. EPA - 600/3-76-054, United States Environmental Protection Agency, Corvallis, Oregon, USA.
- Cao L, Li K, Liang R, et al, 2015. The tolerance threshold of Chinese sucker to total dissolved gas supersaturation[J]. Aquaculture Research, 47(9): 2804-2813
- Huang X, Li K, Du J, et al, 2010. Effects of gas supersaturation on lethality and avoidance responses in juvenile rock carp (*Procypris rabaudi* Tchang)[J]. Journal of Zhejiang University Science B, 11(10): 806-811.
- Lutz D M, 1995. Gas supersaturation and gas bubble trauma in fish downstream from a midwestern reservoir[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 124(3): 423-436.
- Meekin T K, Turner B K, 1974. Tolerance of salmonid eggs, juveniles and squawfish to supersaturated nitrogen [R]. Washington Department of Fisheries Technical Report, 12: 78-126.
- Nejdet G, Orhan A, Olcay H, 2011. Carbonic anhydrase activities from the rainbow trout lens correspond to the development of acute gas bubble disease[J]. Journal of Aquatic Animal Health, (23): 134-139.
- Qu L, Li R, Li J, et al, 2011. Field observation of total dissolved gas supersaturation of high-dams [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 54(1): 156-162.
- Smiley J E, Drawbridge M A, Okiniro M S, et al, 2011. Acute effects of gas supersaturation on juvenile cultured white sea-bass[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 140(5): 1269-1276.
- Weitkamp D E, 1976. Dissolved gas supersaturation; live cage bioassays of Rock Island Dam, Washington [R]. In Gas Bubble Diseases, Fickeisen D H and M J Schneider Eds. Report CONF-741033, pp: 24-36.

(责任编辑 万月华)

Avoidance Characteristics of *Leptobotia elongate* to Total Dissolved Gas Supersaturation

YUAN Quan, YUAN Yuan, WANG Yuan-ming, LI Yong, LI Ke-feng

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering,
Sichuan University, Chengdu 610065, P. R. China)

Abstract: High-velocity flow in the process of high dam flood discharge leads to total dissolved gas supersaturation (TDGS) downstream of the dam, which can cause gas bubble disease in fish and can lead to acute mortality. *Leptobotia elongate* is an important economic fish species endemic to China, primarily inhabiting the upper Yangtze River and its tributaries. TDGS resulting from hydropower development on the upper Yangtze River threatens *Leptobotia elongate* populations. *Leptobotia elongate* spawns from April to June and juveniles, two to three months old, are especially vulnerable to TDGS. In this study, two-month-old *Leptobotia elongate* were used to explore avoidance characteristics to different degrees of supersaturation. Test fish, with an average weight of 1.0 g and average length of 2.5 cm, were acclimated for 15 d at 11–13°C and dissolved oxygen of 5–7 mg/L, and fasted one day before testing. Four TDGS levels (120%, 130%, 140% and 150%) were set, with each treatment run in triplicate and 19–21 fish individuals per trial. Tests were conducted in low light and the position of the fish was recorded every 10 min to evaluate the perception and avoidance ability of *Leptobotia elongate* to TDGS water. *Leptobotia elongate* displayed a certain tropism at a TDGS of 120% and the rate of avoidance was –20%. Test fish did not display obvious avoidance at 130% supersaturation and the avoidance rate was –2%. Test fish showed weak avoidance and continually moved between saturated and supersaturated water at a TDGS of 140% and the avoidance rate was 12%. When the degree of TDGS was 150%, *Leptobotia elongate* were sensitive to supersaturated water and, after 1–2 m exposure, avoidance behavior was obvious, with an avoidance rate of 34%. There was a significant positive correlation between the avoidance rate of *Leptobotia elongate* and TDGS degree. These results provide a reference and basic data for the operation of hydropower stations and the establishment of water-related environmental standards in China.

Key words: *Leptobotia elongate*; avoidance rate; perception ability; TDG supersaturation