

鱼类在 TDG 过饱和含沙水体中的耐受性

孙井沛¹, 施浩然^{1,2}, 刘晓庆^{1,2}, 王俊杰¹, 袁 媛³

(1. 西华大学能源与动力工程学院, 四川 成都 610039; 2. 西华大学流体及动力机械教育部重点实验室, 四川 成都 610039;
3. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:为探讨高坝泄洪引起的总溶解气体(TDG)过饱和含沙水体对鱼类的影响,以岩原鲤和鲢鱼为研究对象,开展TDG过饱和含沙水体对不同鱼类的急性暴露试验,根据鱼类受TDG过饱和含沙水体胁迫后的异常行为和死亡率、半致死时间等指标来分析不同鱼类受胁迫后的耐受性和差异性。试验结果表明:试验初期,试验用鱼出现较明显异常行为和气泡病症状,且岩原鲤早于鲢鱼;相同TDG饱和度下,随着含沙量的增加,试验用鱼半致死时间缩短,且岩原鲤半致死时间短于鲢鱼,表明鲢鱼比岩原鲤具有更强的适应能力和耐受能力;当TDG饱和度较高时,即使含沙量低,也会造成试验用鱼的大量死亡;过饱和TDG是导致试验用鱼死亡的主要原因,但不能忽略泥沙对试验用鱼死亡的促进作用。

关键词:岩原鲤; 鲢鱼; 总溶解气体; 泥沙; 耐受性; 死亡率; 半致死时间; 含沙量

中图分类号: TV213

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2019)01-0028-06

Tolerance of fish to TDG supersaturated water with sediments//SUN Jingpei¹, SHI Haoran^{1,2}, LIU Xiaoqing^{1,2}, WANG Junjie¹, YUAN Yuan³ (1. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. Key Laboratory of Fluid and Power Machinery, Ministry of Education, Xihuan University, Chengdu 610039, China; 3. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To investigate the impacts of the total dissolved gas (TDG) supersaturated water with sediments on fish due to flood discharge from high dams, rock carp (*Procypris rabaudi* Tchang) and chub (*Hypophthalmichthys molitrix*) were chosen as test objects and acute exposure experiments were performed to investigate the effects of TDG supersaturated water on different species. Tolerance and difference were analyzed based on the indexes of abnormal behavior, death rate, and median lethal time of the fish. The experimental results show that abnormal behaviors and symptoms of bubble disease are obvious on the test fish during the initial stage of the experiment and the abnormality was found firstly on rock carp. Under the same TDG supersaturated water condition, increase of sediment concentration can lead to a decreased median lethal time for both rock carp and chub, but the latter has longer median lethal time, revealing that chub has much stronger adaptability and endurance capacity. Moreover, when TDG supersaturation level remains a high value, even low sediment concentration can cause a high mortality of fish. TDG supersaturation level is the major reason for fish death, but the acceleration effects from sediment cannot be ignored.

Key words: rock carp (*Procypris rabaudi* Tchang); chub (*Hypophthalmichthys molitrix*); TDG supersaturation; sediment; tolerance; death rate; median lethal time; sediments concentration

随着我国水电建设事业的突飞猛进,水利工程所带来的生态环境问题备受关注。比如,水电站的建设改变了水域生态环境,损害了鱼类及底栖动物种类的生物多样性^[1];梯级水电站的开发阻隔了鱼类洄游和种群交流^[2];水动力环境的改变迫使鱼类的栖息地发生改变^[3];水体中的重金属影响着黄颡

鱼的性腺发育^[4]。大坝泄洪产生的总溶解气体(total dissolved gas, TDG)过饱和含沙水流严重威胁着大坝下游河段鱼类等水生生物的生存。关于TDG过饱和现象对鱼类的影响,国外学者已做了大量的研究,并取得了丰富的成果,证明不同种类的鱼对TDG过饱和水体的耐受性各异^[5-7],且鱼类会向

基金项目:国家自然科学基金青年基金(51509213);流体及动力机械教育部重点实验室学术培育项目(SBZDPY-11-10);三峡库区生态环境教育部工程研究中心(三峡大学)开放基金(KF2017-03)

作者简介:孙井沛(1992—),男,硕士研究生,主要从事环境水力学研究。E-mail:653691812@qq.com

通信作者:刘晓庆(1980—),男,副教授,博士,主要从事环境水力学研究。E-mail:lxq99005@163.com

更远、更开阔和更深的水域游动来减弱或避免过饱和和TDG的伤害^[8]。近年来,国内研究者针对TDG过饱和问题及其对鱼类的影响也展开了一系列的研究。谭德彩^[9]指出三峡大坝下游鱼类患气泡病的主要原因是三峡大坝泄洪时导致的水体总溶解气体过饱和。Liu等^[10]通过开展TDG过饱和和水体对岩原鲤幼鱼生长发育的影响研究,得到急性慢性TDG过饱和和水体暴露对岩原鲤幼鱼的生长影响并不显著,但重口裂腹鱼初孵仔鱼的病变率随着TDG饱和度的增大而呈现增大的趋势^[11]。吴松等^[12]研究了TDG过饱和和对鲫鱼的急性毒性效应及过氧化氢酶(CAT)活性的影响,研究结果表明肌肉组织和鳃组织的CAT活性呈现先升后降的变化规律,且鳃组织的CAT活性对过饱和TDG的敏感度高于肌肉组织。袁嫒等^[13]和袁佺等^[14]研究发现低饱和度的TDG过饱和和水体对长薄鳅存在慢性伤害,且该鱼类的回避率与TDG饱和度呈现较强的线性关系,即TDG饱和度越高,试验用鱼回避现象越明显。Huang等^[15]和Liang等^[16]分别以岩原鲤和重口裂腹鱼为研究对象,指出了不同鱼种受TDG过饱和和水体胁迫下的半致死时间各不相同,其耐受能力也存在差异。此外,国内外关于泥沙对鱼类影响的研究较多,Newcombe等^[17]分析已有研究成果指出了含沙量、暴露时长与鱼类受胁迫后的损伤程度存在一定关系。Bell^[18]发现高含沙量水体的长期胁迫可使鱼鳃上皮细胞增厚而导致鱼类呼吸功能丧失;即使低含沙量情况下,悬浮泥沙的长期暴露也会引起鱼类对疾病或有毒物质的逃逸能力和耐受能力降低,对鱼类的摄食和生长产生严重的负面影响^[19]。另外,Staub^[20]研究认为鱼类因躲避高含沙水流侵害而引起运动量增加,使得鱼类的呼吸加快和需氧量增加,同时细颗粒泥沙堵塞鱼鳃阻碍氧气的摄入而使其缺氧死亡^[21]。

一般地,大坝泄洪除使下游水体产生较高的TDG饱和度外,同时水体含有大量泥沙,影响着鱼类的生存。然而,国外关于TDG过饱和和含沙水体对鱼类影响的研究尚鲜见报道,国内张亦然等^[22]首次开展了TDG过饱和和含沙水体对鱼类的影响研究,指出含沙量小于80 mg/L时,含沙量的多少并不改变TDG过饱和和对试验用鱼致死的基本规律,但泥沙能够加速鱼类在TDG过饱和和水体中的死亡。根据《中国河流泥沙公报》^[23]记载,岷江和嘉陵江年平均含沙量分别为0.535 kg/m³和1.57 kg/m³(1956—2010年),含沙量较大(远大于80 mg/L)。为符合工程实际,进一步探讨TDG过饱和和水体中泥沙对鱼类的影响显得尤为重要。为此,本文选取长江上游特有的

岩原鲤和经济鱼类鲢鱼为试验对象,开展TDG过饱和和含沙水体对不同鱼类的影响研究,分析不同鱼类受TDG过饱和和含沙水体胁迫的耐受性,研究成果可对河道下游水生生物的保护提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

岩原鲤(*Procypris rabaudi* Tchang)(鲤形目、鲤科、鲤亚科、原鲤属)主要生活于长江上游干支流,是长江上游特有的经济价值较高的鱼类。鲢鱼(*Hypophthalmichthys molitrix*)(鲤形目、鲤科、鲢亚科、鲢属)是我国主要的淡水鱼类,长江四大家鱼之一。试验选取的岩原鲤平均体质量(7.8±0.6)g,平均体长(7.9±0.5)cm,购买于四川省农业科学院水产研究所;鲢鱼平均体质量(5.3±0.6)g,平均体长(6.2±0.4)cm,购买于成都市农产品中心批发市场。为使试验用鱼适应试验环境,在试验之前要对其进行5d的适应性暂养,期间不予进食。驯养池内水温、pH值、溶解氧(DO)和流速分别为(22.0±0.5)℃、7.3±0.2、(7.5±0.5)mg/L和2.5cm/s。驯养结束后,精选无病、活动性强、大小一致的幼鱼开展试验。

根据《中国河流泥沙公报》^[23],自2000年至2010年间,岷江和嘉陵江悬沙多年平均中数粒径分别为0.010mm和0.007mm,本文试验以嘉陵江悬沙多年平均中数粒径为参考,选用中数粒径为0.007mm的沙作为试验沙,试验用沙购于成都市河沙批发市场。

1.2 试验方法

试验在四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室水环境实验厅开展,并采用文献[24]中的总溶解气体过饱和和含沙水体对鱼类影响的实验系统来进行。该实验系统中,通过大水池中的泥沙搅拌装置使泥沙悬浮,并通过水泵和空气压缩机将含沙水和空气输入高压钢管形成较高饱和度的TDG过饱和和含沙水体。再将该高饱和度的TDG过饱和和含沙水体与未过饱和的含沙水体分别导入不同的2个大水箱,通过水箱上的阀门控制将高饱和度的TDG过饱和和含沙水体与未过饱和的含沙水体掺混进而获得具有不同饱和度的TDG过饱和和含沙水体。监测仪器主要有总气压测定仪、YSI 6600多参数水质监测仪、FA1004电子天平等。

根据《中国河流泥沙公报》资料数据和四川大学的原型观测数据,该试验设置0、400、600、800 mg/L 4个含沙量,每个含沙量分别与TDG饱和度为100%、130%、140%的TDG过饱和和水体组合,获得不同的试验组,以TDG饱和度为100%(非过饱和)试验

组为对照组。所有试验组均设置 2 个平行样,每个平行样分别放入岩原鲤试验用鱼和鲢鱼试验用鱼 20 尾。试验水温控制在 $(22.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$, pH 值约 7.1 ± 0.1 , 溶解氧约为 $(8.0 \pm 0.2) \text{ mg/L}$, 流速约 3 cm/s 。试验过程中每隔 1 h 用监测仪器监测试验水体温度、pH 以及溶解氧等是否发生变化。连续观察试验用鱼的活动状况,试验用鱼死亡后及时捞出死鱼并记录其死亡时间。

试验中,选取半致死时间作为衡量毒物促使受试动物死亡速度快慢的指标。通过概率单位法^[24-25]分别推求出各试验组两种试验用鱼的半致死时间,进而分析 TDG 过饱和含沙水体对鱼类的影响程度。

2 试验结果

2.1 试验现象

试验初始,各试验水箱中的试验用鱼活动正常。0.5 h 后,TDG 饱和度为 130% 和 140% 的各试验水箱水体表层均逐渐出现带有气泡的白色浮膜。约 1 h 后,鱼体表面附着有小气泡,试验用鱼来回游动愈加频繁,并不时抖动身体。含沙量一定时,TDG 饱和度为 140% 的试验用鱼最先出现呼吸频率加快、上下游窜、跳出水面等异常行为。随着暴露的持续,试验用鱼逐渐失去活动能力,最后死亡漂浮于水面。TDG 饱和度一定时,随着含沙量的增加,出现上述异常行为的时间点提前。试验条件相同的情况下,各试验组 (TDG 饱和度为 100% 的各试验组除外) 的岩原鲤与鲢鱼试验异常现象相似,与岩原鲤相比,鲢鱼出现上述异常行为的时间点有一定程度的延后。经观察,死亡试验用鱼的体表尤其在鱼鳍部位附着有大量气泡,同时鱼鳍和鱼尾部位有出血等气泡病症状。在整个试验过程中,试验用鱼受高饱和度 TDG 含沙水体急性刺激下全部死亡,而 TDG 饱和度为 100% 的各试验组中两种试验用鱼均未出现异常行为,存活良好。

2.2 死亡率与暴露时间的关系

在不同含沙量的 TDG 过饱和含沙水体中,试验用鱼死亡率与暴露时间的关系如图 1 所示。由图 1 可见,在同一含沙量和 TDG 饱和度下,试验用鱼的死亡率随着暴露时间的延长而增大。在同一含沙量下 (以 400 mg/L 含沙量为例,见图 1(b)),随着 TDG 饱和度的增大,两种试验用鱼出现死亡的时间提前。暴露于 TDG 饱和度为 130% 水体的鲢鱼出现死亡时间最晚,约为 8 h;暴露于 TDG 饱和度为 140% 水体的岩原鲤出现死亡的时间最早,约为 4 h;暴露于 TDG 饱和度为 130% 水体的岩原鲤与暴露于 TDG

饱和度为 140% 水体的鲢鱼的死亡时间相近,分布于 4~8 h 之间。根据图 1(a)(c) 和 (d) 中的数据,也可得到相似规律。

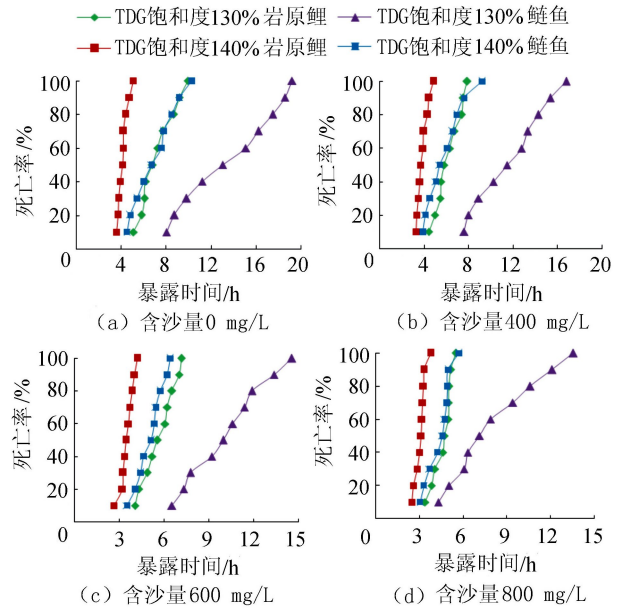


图 1 不同含沙量下的试验用鱼死亡率与暴露时间的关系

2.3 试验用鱼的半致死时间

半致死时间可以反映出 TDG 过饱和含沙水体对试验用鱼的影响程度。若某一试验组试验用鱼的半致死时间越短,则说明 TDG 过饱和含沙水体对该组试验用鱼的影响越大。不同试验工况下岩原鲤和鲢鱼的半致死时间如表 1 所示。

表 1 显示试验用鱼暴露于 TDG 饱和度为 130%, 含沙量为 0 mg/L、400 mg/L、600 mg/L、800 mg/L 的水体中,岩原鲤和鲢鱼的半致死时间分别为 6.78 h、5.85 h、5.36 h、4.41 h 和 12.04 h、10.76 h、9.37 h、7.10 h,鲢鱼的半致死时间比岩原鲤的半致死时间平均延长 75.31%;暴露于 TDG 饱和度为 140%, 含沙量为 0 mg/L、400 mg/L、600 mg/L、800 mg/L 的水体中,岩原鲤和鲢鱼的半致死时间分别为 4.06 h、3.78 h、3.42 h、2.97 h 和 6.36 h、5.41 h、4.81 h、4.12 h,鲢鱼的半致死时间比岩原鲤的半致死时间平均延长 45.47%。表明在相同 TDG 过饱和含沙水体胁迫下,鲢鱼受到的影响弱于岩原鲤,且在

表 1 不同试验工况下岩原鲤和鲢鱼的半致死时间

含沙量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	半致死时间/h			
	岩原鲤		鲢鱼	
	TDG 饱和度 为 130%	TDG 饱和度 为 140%	TDG 饱和度 为 130%	TDG 饱和度 为 140%
0	6.78	4.06	12.04	6.36
400	5.85	3.78	10.76	5.41
600	5.36	3.42	9.37	4.81
800	4.41	2.97	7.10	4.12

同一含沙量下,随着 TDG 饱和度的增大,试验用鱼的半致死时间缩短。

从表 1 还可以看出,即使随着 TDG 饱和度的增加,鲢鱼和岩原鲤半致死时间上的差距仍较为明显,两者的耐受性仍存在明显差别。当 TDG 饱和度一定时,随着含沙量的增加,试验用鱼(岩原鲤和鲢鱼)的半致死时间缩短。TDG 饱和度为 140% 时,随着含沙量从 0 增加到 800 mg/L,岩原鲤半致死时间缩短约 26.85%,鲢鱼半致死时间缩短约 35.22%;TDG 饱和度为 130% 时,随着含沙量从 0 增加到 800 mg/L,岩原鲤半致死时间缩短约 34.96%,鲢鱼半致死时间缩短约 41.03%。当 TDG 饱和度相对较高(140%)时,含沙量对鱼类的影响相对于饱和度为 130% 工况略弱,且在整个试验过程中,试验用鱼受高饱和度 TDG 含沙水体急性刺激下全部死亡,而 TDG 饱和度为 100% 的各试验组中两种试验用鱼均未出现异常行为,存活良好,表明过饱和 TDG 是导致试验用鱼死亡的主要原因,但不能忽略泥沙对试验用鱼死亡的促进作用。

3 讨论

试验用鱼受 TDG 过饱和含沙水体的胁迫后,试验水箱水体表层出现白色浮膜。这是因为鱼类机体存在一种能分泌黏液的腺体细胞(如鳃、皮肤等),其黏液内含有的许多活性物质(如水解性酶等)分解毒性物质,保护机体不受侵害^[26]。试验中,当鱼类受 TDG 过饱和含沙水体胁迫时,腺体细胞为保护鱼类机体不受侵害分泌出大量黏液,与水中的泥沙、气泡等形成浮膜漂浮于水体表层,而试验用鱼出现的气泡病症状为气体过饱和所致^[17]。对于试验用鱼出现的呼吸加快、上下窜动等异常现象,可能是由于水体内含有的细小泥沙颗粒阻塞鱼鳃,减弱了其呼吸能力,影响其正常生理活动^[21]。再加上水中过饱和 TDG 的刺激作用,使得试验用鱼身上的气泡病症状较早出现,溶解于水中的 TDG 堵塞血管,阻碍鱼体血液循环,造成鱼鳍、鱼尾局部瘀血过多而出血。各试验组的岩原鲤与鲢鱼试验异常现象相似,但岩原鲤和鲢鱼在出现患病症状的时间及死亡时间上有较明显的区别,即鲢鱼在相同试验条件下出现患病症状的时间延后于岩原鲤,死亡时间长于岩原鲤,鲢鱼对 TDG 过饱和含沙水体的耐受性强于岩原鲤。此外,已有研究^[21]表明高浓度泥沙(含沙量高于 8.0×10^4 mg/L)可导致黄河鲤鱼死亡,本文中 TDG 饱和度为 100%,含沙量从 400 mg/L 升高到 800 mg/L 时,岩原鲤与鲢鱼均未出现异常行为且生存良好,推测该含沙量未达到这两类鱼的耐受性极

限,其生存的水体泥沙含量阈值方面的研究有待加强。

从试验用鱼的全部死亡时间看,当 TDG 饱和度为 130% 时,含沙量为 0 mg/L、400 mg/L、600 mg/L、800 mg/L 情况下,岩原鲤全部死亡的时间分别为 9.93 h、7.87 h、7.17 h、5.48 h,鲢鱼全部死亡的时间分别为 19.18 h、16.75 h、14.57 h、13.57 h;TDG 饱和度为 140% 时,含沙量为 0 mg/L、400 mg/L、600 mg/L、800 mg/L 情况下,岩原鲤全部死亡的时间分别为 5.06 h、4.85 h、4.22 h、3.77 h,鲢鱼全部死亡的时间分别为 10.28 h、9.23 h、6.42 h、5.70 h。TDG 饱和度为 130% 时的各含沙量下,鲢鱼全部死亡的平均时间比岩原鲤约长 8.8 h;TDG 饱和度为 140% 时的各含沙量下,鲢鱼全部死亡的平均时间比岩原鲤约长 3.43 h。此外,同一 TDG 饱和度下,含沙量越高,试验用鱼的死亡时间越短,且岩原鲤死亡时间短于鲢鱼。表明 2 种鱼受相同的 TDG 过饱和含沙水体胁迫时,鲢鱼比岩原鲤具有更强的适应能力和耐受能力,泥沙的存在加快了试验用鱼的死亡速度。

Smiley 等^[27]研究表明不同鱼种、不同规格的鱼类对 TDG 过饱和的耐受性存在差异。Chen 等^[28]、袁嫒等^[13]、吴松等^[12]、Liang 等^[16]、张亦然等^[22]分别关于胭脂鱼、长薄鳅、鲫鱼、重口裂腹鱼、齐口裂腹鱼对 TDG 过饱和和水体的耐受性研究成果与本次试验结果对比如表 2 所示。在表 2 所列国内鱼种中,长薄鳅幼鱼即使在 TDG 饱和度较高(140%)水体中也具有较强的耐受性,可能是由于其自身活动性强,体表无鳞,气泡难以富集,进而降低了 TDG 过饱和带来的侵害,其次重口裂腹鱼 7 d 龄仔鱼耐受性次之。本文研究的岩原鲤幼鱼耐受性最弱,鲢鱼幼鱼耐受性强于胭脂鱼幼鱼,弱于齐口裂腹鱼幼鱼和鲫鱼幼鱼。

表 2 不同 TDG 饱和度下不同鱼类的半致死时间

鱼类	体长/cm	体质量/g	半致死时间/h	
			TDG 饱和度为 130%	TDG 饱和度为 140%
胭脂鱼幼鱼 ^[28]	11.54±0.91	39.54±7.63	9.20	4.70
长薄鳅幼鱼 ^[13]	5.60	0.45	64.02	14.89
鲫鱼幼鱼 ^[12]	15.30±0.60	119.30±13.70	17.60	9.70
重口裂腹鱼 7 日龄仔鱼 ^[16]			35.38	11.04
齐口裂腹鱼幼鱼 ^[22]	5.60~9.10	3.10~8.20	15.30	11.95
岩原鲤幼鱼	7.90±0.50	7.80±0.60	6.78	4.06
鲢鱼幼鱼	6.20±0.40	5.30±0.60	12.04	6.36

张亦然等^[22]对 TDG 过饱和含沙水体对齐口裂腹鱼的影响进行了研究,结果表明当最高含沙量为 80 mg/L 时,齐口裂腹鱼幼鱼受饱和度分别为

130%、140%的TDG过饱和含沙水体胁迫的半致死时间分别为7.85 h、6.55 h,与不含沙TDG过饱和水体相比,齐口裂腹鱼幼鱼的半致死时间缩短约50%。本试验中,最低含沙量为400 mg/L时,130%、140%TDG饱和度下,岩原鲤的半致死时间分别为5.85 h、3.78 h,鲢鱼的半致死时间分别为10.76 h、5.41 h,与不含沙TDG过饱和水体相比,半致死时间变化不大,推测在TDG过饱和含沙水体中,岩原鲤和鲢鱼对泥沙的敏感性低于齐口裂腹鱼,但齐口裂腹鱼在更高含沙TDG过饱和水体中是否更易受到伤害,有待进一步研究。刘晓庆等^[24]研究表明TDG饱和度为130%和140%的含沙(含沙量600 mg/L)水体中,岩原鲤幼鱼(体质量为 (9.2 ± 0.9) g)的半致死时间分别为5.7 h和3.4 h,本试验相同含沙量的TDG过饱和含沙水体中,岩原鲤幼鱼(体质量为 (7.9 ± 0.5) g)的半致死时间分别为5.36 h和3.42 h,说明规格相差不大的同一鱼类对TDG过饱和含沙水体的耐受性无较大差异。此外,刘晓庆等^[24]的研究结果还显示当TDG饱和度为125%时,无沙和有沙(最低含沙量为200 mg/L)情况下,岩原鲤幼鱼半致死时间分别为14.6 h和13.6 h,虽然泥沙对岩原鲤幼鱼在TDG过饱和水体中的生存有一定影响,但在饱和度相对较低(125%)时能存活较长时间。Huang等^[15]证明实验室条件下岩原鲤幼鱼(体质量为6.6~7.2 g)能在饱和度为115%的TDG过饱和水体中安全生存,提出120%的TDG饱和度是其耐受性阈值。虽然近来研究显示泥沙可能对试验用鱼的死亡速度有促进作用,但由于天然水体中,试验用鱼能选择更广阔更深的水域逃避TDG过饱和和伤害^[8,15]。可见,含沙水体中120%的TDG饱和度仍可被认为是岩原鲤幼鱼的安全饱和度。鲢鱼对TDG过饱和含沙水体的耐受性强于岩原鲤幼鱼,但由于TDG过饱和和对此种群影响的研究成果未见报道,其对TDG过饱和水体的耐受性阈值需进一步研究确定。

4 结 论

a. 在同一含沙量和TDG饱和度下,试验用鱼的死亡率随着暴露时间的延长而增大;在同一含沙量下,随着TDG饱和度的增大,试验用鱼的半致死时间缩短;在同一TDG饱和度下,随着含沙量的增加,试验用鱼的半致死时间缩短。

b. 鲢鱼出现异常行为、患气泡病和死亡的时间均滞后于岩原鲤,且半致死时间相对较长,表明鲢鱼对TDG过饱和含沙水体的耐受性强于岩原鲤;即使TDG饱和度增加,二者耐受能力仍有较明显差距;

岩原鲤对含沙水体中过饱和TDG的耐受性阈值为120%,而鲢鱼的耐受性阈值有待研究确定。

c. 当TDG饱和度较高时,少量泥沙也将造成试验用鱼的大量死亡,高饱和度的过饱和TDG是导致试验用鱼死亡的主要原因,泥沙是促使试验用鱼死亡的次要原因。在实际工程中,应采取措施降低大坝泄洪时下泄水体中的TDG饱和度或者减少水体泥沙含量,进而减缓大坝泄洪对下游鱼类及其他水生生物的影响。

参考文献:

- [1] 韩耀全, 杨琼, 周解, 等. 岩滩水电站建设对水生生物的影响[J]. 水资源保护, 2011, 27(2): 9-12. (HAN Yaoquan, YANG Qiong, ZHOU Jie, et al. Influence of Yantan hydroelectric power station construction on water hydrobios and countermeasures [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(2): 9-12. (in Chinese))
- [2] 吕军, 汪雪格, 刘伟, 等. 松花江流域主要干支流纵向连通性与鱼类生境[J]. 水资源保护, 2017, 33(6): 155-160. (LÜ Jun, WANG Xuege, LIU Wei, et al. Longitudinal connectivity and fish habitat of main tributaries in Songhuajiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6): 155-160. (in Chinese))
- [3] 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, 40(4): 438-445. (QI Liang, YANG Yu, WANG Yue, et al. Fish behavior characteristics in response to change of hydrodynamic environment [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2012, 40(4): 438-445. (in Chinese))
- [4] 唐建勋, 唐奕扬, 程樟顺, 等. Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 在黄颡鱼性腺中的富集及其对性腺发育的胁迫[J]. 水资源保护, 2012, 28(4): 61-63. (TANG Jianxun, TANG Yiyang, CHENG Zhangshun, et al. Accumulation of heavy metals Pb^{2+} and Cu^{2+} in ovary of *Pelteobagrus fulvidraco* and effects on ovum development [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(4): 61-63. (in Chinese))
- [5] BOUCHARD J P, MERLE G. Sediment management at EDF reservoirs [C]//International Workshop and Symposium on Reservoir Sedimentation Management. Toyama: [s. n.], 2000: 169-176.
- [6] FICKEISEN D H, MONTGOMERY J C. Tolerances of fishes to dissolved gas supersaturation in deep tank bioassays [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1978, 107(2): 376-381.
- [7] KRISSE W F, HERMAN R L. Resistance of under-yearling and yearling Atlantic salmon and lake trout to supersaturation with air [J]. Journal of Aquatic Animal

- Health, 1991, 3(4): 248-253.
- [8] BEEMAN J W, MAULE A G. Migration depths of juvenile chinook salmon and steelhead relative to total dissolved gas supersaturation in a Columbia River Reservoir [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2006, 135(3): 584-594.
- [9] 谭德彩. 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, 2006.
- [10] LIU X Q, LI K F, LI R, et al. Effect of chronic and acute exposure to total dissolved gas super saturation on growth and survival in juvenile rock carp (*Procypris rabaudi* Tchang) [J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2013, 11(2): 1930-1939.
- [11] 李博. 水体 TDG 过饱和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, 2012.
- [12] 吴松, 姜文, 刘晓庆, 等. TDG 过饱和和对鲫鱼的急性毒性效应及 CAT 活性的影响 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(增刊 1): 66-70. (WU Song, JIANG Wen, LIU Xiaoqing, et al. Effect of acute toxicity and CAT activity of total dissolved gas supersaturation on crucian (*Carassius auratus*) [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44 (Sup1): 66-70. (in Chinese))
- [13] 袁媛, 袁隼, 王远铭, 等. 总溶解气体过饱和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, 49(增刊 2): 56-61. (YUAN Yuan, YUAN Quan, WANG Yuanming, et al. Acute and chronic lethality of total dissolved gas super saturated water on *Leptobotia elongata* [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49 (Sup2): 56-61. (in Chinese))
- [14] 袁隼, 袁媛, 王远铭, 等. 长薄鳅对过饱和和总溶解气体的回避特征研究 [J]. 水生生态学杂志, 2017, 38(4): 77-81. (YUAN Quan, YUAN Yuan, WANG Yuanming, et al. Avoidance characteristics of *Leptobotia elongate* to total dissolved gas supersaturation [J]. Journal of Hydroecology, 2017, 38(4): 77-81. (in Chinese))
- [15] HUANG X, LI K F, DU J, et al. Effects of gas supersaturation on lethality and avoidance responses in juvenile rock carp (*Procypris rabaudi* Tchang) [J]. Journal of Zhejiang University Science B (Biomedicine & Biotechnology), 2010, 11(10): 806-811.
- [16] LIANG R F, LI B, LI K F, et al. Effect of total dissolved gas supersaturated water on early life of David's schizothoracin (*Schizothorax davidi*) [J]. Journal of Zhejiang University: Science B (Biomedicine & Biotechnology), 2013, 14(7): 632-639.
- [17] NEWCOMBE C P, JENSEN J O T. Channel suspended sediment and fisheries: a synthesis for quantitative of risk and impact [J]. North American Journal of Fisheries Management, 1996, 16(4): 693-727.
- [18] BELL M C. Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria [R]. Portland: US Army Corps of Engineers, 1973.
- [19] LLOYD D S. Turbidity as a water quality standard for salmonid habitats in Alaska [J]. North American Journal of Fisheries Management, 1987, 7(1): 18-33.
- [20] STAUB E. Effects of sediment flushing on fish and invertebrates in Swiss Alpine Rivers [C] // International Workshop and Symposium on Reservoir Sedimentation Management. Toyama: [s. n.], 2000: 185-193.
- [21] 白音包力皋, 许凤冉, 陈兴茹, 等. 小浪底水库排沙对下游鱼类的影响研究 [J]. 水利学报, 2012, 43(10): 1146-1153. (BAIYINBAOLIGAO, XU Fengran, CHEN Xingru, et al. Impact of sediment flushing of Xiaolangdi Reservoir on downstream fish [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(10): 1146-1153. (in Chinese))
- [22] 张亦然, 杜秋成, 王远铭, 等. 总溶解气体过饱和和含沙水体对齐口裂腹鱼影响的实验研究 [J]. 水利学报, 2014, 45(9): 1029-1037. (ZHANG Yiran, DU Qiucheng, WANG Yuanming, et al. Effects of TDG supersaturated water with sediment on juvenile *Schizothorax prenanti* [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(9): 1029-1037. (in Chinese))
- [23] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [24] 刘晓庆, 王俊杰, 孙井沛, 等. TDG 过饱和和高含沙水体对岩原鲤的急性效应研究 [J]. 水力发电学报, 2017, 36(10): 93-101. (LIU Xiaoqing, WANG Junjie, SUN Jingpei, et al. Acute effects of TDG supersaturated water with high concentration sediment on rock carp (*Procypris rabaudi*) [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(10): 93-101. (in Chinese))
- [25] 颜虹. 中华医学统计百科全书(单变量推断统计分册) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [26] 杨桂文, 安利国. 鱼类黏液细胞研究进展 [J]. 水产学报, 1999, 23(4): 403-408. (YANG Guiwen, AN Ligu. Research progress of fish mucus cells [J]. Journal of Fisheries of China, 1999, 23(4): 403-408. (in Chinese))
- [27] SMILEY J, DRAWBRIDGE M. Acute effects of gas supersaturation on juvenile cultured white seabass [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2011, 140(5): 1269-1276.
- [28] CHEN S C, LIU X Q, JIANG W, et al. Effects of total dissolved gas supersaturated water on lethality and catalase activity of Chinese suker (*Myxocyprinus asiaticus* Bleeker) [J]. Journal of Zhejiang University: Science (Biomedicine & Biotechnology), 2012, 13(10): 791-796.

(收稿日期: 2017-11-24 编辑: 雷燕)