

高坝下游水中总溶解气体过饱和和研究进展

张 政,肖 柏 青

(安徽理工大学 地球与环境学院,安徽 淮南 232001)

摘要: 随着水电工程的不断兴起,高坝建设引起的过饱和和水体问题日渐突出。总结了近年来国内外的研究进展,从鱼类的耐受性、鱼类对过饱和和总溶解气体(TDG)的规避效应以及过饱和 TDG 对鱼类的致死机理 3 方面分析了过饱和 TDG 与下游水生生物之间的相互作用,并提出了一些研究思路 and 想法。此外,还重点论述了促进过饱和 TDG 释放速率方面取得的进展和不足之处,指出实际工况条件下过饱和 TDG 的释放易受河流形态等周边环境的影响,而实验条件下无法准确反映实际工况,今后室内试验和原型观测需进一步加强。而如何在安全行洪的前提下实现快速高效的 TDG 释放是该领域下一步研究的重点。

关键词: 总溶解气体; 过饱和; 鱼类耐受性; 规避效应; 过饱和 TDG 释放

中图分类号: X522 ,S931.3

文献标志码: A

DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.04.003

1 研究背景

过饱和和气体问题多出现于高坝泄洪期间。高坝下泄水流具有大流速和高水头的特点,其下泄水流与空气接触相互混合一方面导致过量的空气进入水体内部,使总溶解气体(TDG)达到过饱和状态^[1];另一方面河道中的自然水流经下泄水流冲击作用使得河流的水流状态、沉积物质量、水质、水温等条件发生了改变^[2-3],二者将对下游水生态问题产生深远影响。

所谓 TDG 即溶解于水体中的总溶解气体,主要包括氧气、氮气、二氧化碳、水蒸气等。不同的气体通常有着不同的溶解度,在一定温度和压力作用下,空气中的气体会依据自身溶解度的不同部分溶解于水体中,与此同时,水体溶解的气体也会从表面逸出,当气体的溶解速度和逸出速度相等时,二者即可认为达到了平衡状态,我们称此时气体在液体中的溶解状态为饱和态。在某些特殊条件下,各气体的浓度(例如氮气、氧气、氩气、二氧化碳、水蒸气等的浓度)高于一定温度

和压强下的平衡浓度,此时我们将这一现象称为 TDG 过饱和现象^[4]。伴随着高坝的不断建成,TDG 过饱和现象发生的越加频繁,当过饱和 TDG 随着水流向下游迁移时,下游鱼类会因此患上气泡病(GBD),甚至造成鱼类的大规模死亡。研究表明:当水体中 TDG 饱和度范围在 105% ~ 110% 时,就有可能使鱼类患气泡病;饱和度超过 140% 时,鱼类在几小时内就会迅速死亡^[5-6]。在中国及一些西方国家,如美国和加拿大,已经观察到水体中 TDG 饱和度高达 130% 的现象^[7]。1986 年美国环境保护署在水质标准(WQC)中将 110% 的 TDG 饱和度确定为限制标准,而我国目前还没有相应的环境控制标准。

高坝泄水造成的过饱和和气体问题日渐突出,国内外对此进行了大量的研究并取得了丰硕成果,但目前缺乏这方面的研究总结。本文从鱼类的耐受性、鱼类的规避效应、促进过饱和气体释放的影响以及对鱼类的致病机制等方面进行综合分析,为寻找促进过饱和 TDG 释放的方法提供理论依据,同时对水电工程鱼类

收稿日期: 2019 - 05 - 26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579002)

作者简介: 张 政,男,硕士研究生,研究方向为环境水力学。E-mail: 1910358858@qq.com

通讯作者: 肖柏青,男,副教授,博士,研究方向为水力学及河流动力学。E-mail: baiqingx@126.com

保护方案的制定提供一定的参考。

2 过饱和 TDG 对鱼类的影响

2.1 鱼类的耐受效应

高坝泄洪会导致河流中产生过饱和 TDG,而 TDG 的释放过程又非常缓慢,其影响区域达数百公里^[8]。当地的水生生物,特别是鱼类,因长时间受到过饱和气体毒害而容易产生气泡病(CBD)甚至死亡,总溶解气体(TDG)过饱和对大坝下游鱼类的影响已成为高坝工程最重要的生态风险之一。为研究不同浓度过饱和 TDG 对鱼类的影响,国内外开展了大量过饱和 TDG 胁迫下鱼类的耐受性试验。Chen 等^[9]将胭脂鱼放入过饱和 TDG 浓度水平为 120%~145%的水中暴露 48 h,观察过饱和 TDG 对胭脂鱼的急性致死效应。Dawley 等^[10]研究了不同浓度的过饱和 TDG 对幼年鲑鱼和虹鳟鱼的影响。黄翔等^[11]将长江上游特有鱼种岩原鲤暴露于过饱和 TDG 水体中观察其行为和生理活动,发现岩原鲤对过饱和 TDG 的耐受性随着岩原鲤鱼苗的生长发育逐渐增强。宋明江等^[12]发现当过饱和度达到 130%~140%时,半致死时间(Median Lethal Time, LT_{50})并无太大变化,高浓度的过饱和 TDG 已经破坏了鱼体的机能,鱼类无法通过自身的调节来减免外界环境带来的伤害。吴松等^[13]研究了不同浓度过饱和水体对鲫鱼的影响,发现鱼鳃和肌肉中的 CAT 活性先上升后下降。参考以前有关 TDG 过饱和和水体条件下鱼类的耐受性研究,均得出了一致的结论:即随着 TDG 饱和度的增加,对鱼类的影响越大,半致死时间越短。半致死时间^[14]是指在动物急性毒性实验中,不同浓度的药物导致受试动物出现半数死亡的时间,它是评估实验鱼对不同浓度 TDG 过饱和和水体耐受性的重要参数。袁媛等^[15]对长薄鳅进行急性致死试验和再暴露试验,将在低浓度暴露 96 h 后存活的长薄鳅置于高浓度工况中,发现与原高浓度实验组相比,实验鱼半致死时间缩短了 25%~75%,得出 TDG 低饱和度水体对长薄鳅有慢性伤害的结论。

鱼类在不同过饱和度下的适应性不同,半致死效应也存在差异,建议将实验鱼在不同饱和浓度下表现出来的气泡病症状和半致死时间或半致死浓度联系起来,以明确不同过饱和浓度下鱼类受到的损害程度。同时,建议通过对高坝下游鱼种的耐受性研究确定下游气体饱和度的阈值,通过阈值来确定建筑物的适宜下泄流量。

2.2 不同鱼种的差异性影响

高坝泄水会威胁下游河段鱼类的生存,国内外现

有研究成果主要是针对高坝下游特有鱼种进行研究,而不同鱼种对过饱和 TDG 的耐受能力存在差异。例如,基于长江流域现有鱼类的研究,对各 TDG 饱和度下不同鱼种的半致死时间进行比较,发现在 TDG 饱和度为 120%时,齐口裂腹鱼的半致死时间为 10.70 h,而长薄鳅的半致死时间高达 152.81 h;在 TDG 饱和度为 125%时,齐口裂腹鱼的半致死时间为 9.50 h,而胭脂鱼的半致死时间为 43.40 h;在 TDG 饱和度为 140%时,胭脂鱼的半致死时间为 4.70 h,而长薄鳅的半致死时间为 14.89 h。

不同鱼种对过饱和 TDG 具有不同的耐受能力。相关研究表明:试验鱼的大小、体型、鱼龄、实验工况下的水温和水深也影响着鱼类对过饱和 TDG 的耐受特性^[16]。现有成果主要是针对某流域下特定鱼种的研究,而缺少具有普适性的预测模型,建议将鱼的体型、年龄、大小、水温、水深同半致死浓度建立起数学模型,而在研究某一鱼种时可以通过参数率定以修正该数学模型,从而获得具有针对性的结果。

3 鱼类的规避效应

过饱和总溶解气体(TDG)增加了鱼类患气泡病甚至死亡的可能性,提高 TDG 过饱和和水体中鱼类的存活率对于维持生态系统平衡至关重要。研究表明,目前普遍用于改善鱼类存活的方法有两种:①开发增加过饱和 TDG 消散率的方法;②提供或增强具有较低 TDG 饱和度的避难区域。Xia 等^[17]通过对河流主流和支流交汇处的 TDG 进行数值模拟,发现支流的收敛降低了主流的 TDG 饱和度,当加深河床和安装阻力障碍后,低饱和区域面积会扩大,该区域可为鱼类提供避难场所,以摆脱过饱和 TDG 的破坏性影响。为了验证鱼类是否可以检测并且规避这种 TDG 过饱和水体,袁佳^[18]和王远铭^[19]分别以长薄鳅幼鱼和齐口裂腹鱼幼鱼为实验对象,采用陡坡直线型避让实验装置,探讨不同 TDG 饱和度下实验鱼的避让能力。实验结果表明:当 TDG 浓度达到 130%时,实验鱼表现出明显的异常现象,且浓度越高反应越明显。周晨阳等^[20]以半龄齐口裂腹鱼为研究对象,营造了 TDG 过饱和室内避难模型,实验结果表明,齐口裂腹鱼的避难趋势随着水流 TDG 饱和度的升高逐渐增强。但是并不是所有鱼类都能对过饱和 TDG 进行探知和回避,即使能够对这种外界刺激做出反应,也往往因种类不同而表现出差异。以长江流域生长的鱼种为例,图 1 对比了 4 种鱼类在不同浓度过饱和水体下的回避率。

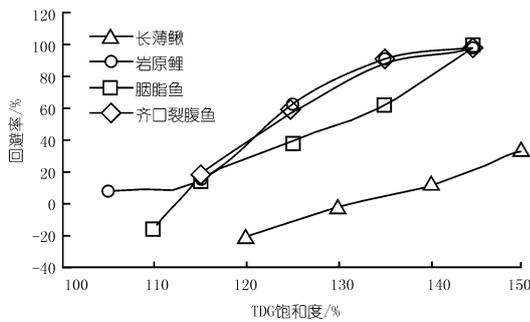


图1 不同鱼种在不同过饱和和气体浓度下的回避率

Fig. 1 Circumvention of different fishes at different supersaturated gas concentration

由图1可知,TDG饱和度一定时,长薄鳅与其他3类鱼种相比,表现出了较弱的回避率。而岩原鲤和齐口裂腹鱼在TDG饱和度高于110%时表现出了一致的回避率。规避实验会因鱼种、年龄以及体态大小间的差异而产生影响。而在实际工况中因为水深较大,鱼类通常会利用补偿水深来减弱和避免过饱和水体对自身带来的伤害^[21]。其原因在于,气体在水中的溶解度与压强呈正比关系,随着压强的增大,水体中气体的溶解度也相应增大。而压强包括空气压力和静水压力,随着水体深度的增加,水体中的静水压力增大,导致气体的溶解度也增大,此时水体越不容易发生TDG过饱和的现象,鱼类探知到低饱和适宜环境便向水体深处游动来躲避高饱和TDG对自身带来的损害。目前关于过饱和TDG的研究成果主要集中于过饱和水体对鱼类的影响,而鱼类对这种过饱和水环境产生的规避效应还有待深入研究,通过研究鱼类应对外界刺激的反应,可以从另一个角度制定出保护鱼类资源的措施。

4 鱼类气泡病的发生机理

20世纪初,科学家已经认识到水体中过饱和气体可引起鱼类气泡病,但是对气泡病这一宏观现象的产生机理尚没有最终的结论。多位学者在观察由于气泡病引起的死鱼中,发现血管和鱼肠道内存在大量的游离气体和气泡,鳃丝可发现柱状气泡,还发现气泡充塞在细动脉的分支,引起鳃小瓣恶化,形成动脉瘤^[12, 22]。20世纪60、70年代,大部分学者认为氮气过饱和是导致气泡病的主要因素,极少数学者认为高浓度的溶解氧可能引发气泡病。Harvey^[23]将氧气分为生物源氧气和非生物源氧气,认为非生物源氧气的过饱和常伴随氮气过饱和,两者一起导致气泡病。Rucker与Kangas^[24]根据实验结果分析得出,水中总气压比溶解氮

分压对气泡病的影响要大得多。在解释过饱和气体如何导致鱼类气泡病上,一般认为:鱼类血液中的过饱和溶解气体在水温和压力条件改变时会从溶解状态恢复到气体状态,析出的气泡堵塞血管,致使鱼类死亡^[11]。与该观点类似,Knittel等^[25]认为在过饱和水体中,过量溶解的气体会以小气核形式析出,微小气核会通过呼吸作用进入鱼体内的血液循环系统,血液中的血红蛋白仅对有用的氧进行适量的吸收,而剩余的气体如溶解氮就会在相应部位血管中堵塞形成气泡病,最终导致血液在血管中瘀滞,直至死亡。这种观点无法解释患气泡病的鱼类在鱼肠道内等血液很少的组织里也存在大量气泡的事实。Mesa等^[26]研究泄洪期间气泡对大坝下游鱼类的影响,发现水中过多的气泡黏附在鱼体表面,会导致鱼类拒绝摄食、细菌感染而死亡。总之,不同鱼类对过饱和 O_2 、 N_2 的耐受性不同,因此致病的机制也会存在差异。过饱和水环境中气泡病的发生可能是多种因素综合作用的结果,今后还需要更深入的探索,以明确哪些因素对气泡病是主要的。

高坝泄水通常含有大量泥沙,关于含沙水流条件下过饱和TDG对鱼类的影响,国内外已开展相应的研究,研究内容涉及含沙量浓度、持续作用时间、溶解氧饱和度等综合因素对鱼类活性的影响。Erich^[27]指出,下泄水流中的泥沙中含有还原性物质,这些物质会消耗鱼类周围的氧气,形成缺氧环境。刘晓庆等^[28]通过室内实验得知,与过饱和TDG单独作用于鱼类相比,含有泥沙的TDG过饱和水体致死时间更短。张亦然等^[29]通过电子显微镜对实验鱼进行观察,发现泥沙会堵塞鱼鳃,造成机械磨损,加速实验鱼的缺氧死亡。

5 过饱和TDG的释放

过饱和溶解气体的释放属于水气界面传质过程,其传质速率主要受气液界面面积、温度、水体紊动强度等因素影响^[30]。此外,泥沙也会影响过饱和总溶解气体的释放。许多学者从如何加速过饱和气体释放,减轻过饱和水体带来的负面影响方面开展了诸多研究,具体论述如下。

5.1 泥沙

高坝泄洪通常是高含沙水流,水中泥沙颗粒的存在增加了TDG在水中的粘附介质,使得溶解的气体能更加迅速地转变为自由状态并聚集,最后以气泡的形式漂浮到空气中。Qu^[31]通过室内试验,提出可开启排沙孔等泄洪调度方式使下泄水流中悬沙含量增加,

以此加快沿程过饱和总溶解气体的释放速率。冯镜洁等^[32]通过自行设计静置水柱、搅拌诱发紊动、明渠流水槽实验,探究泥沙对过饱和 TDG 释放速率的影响,实验结果表明,过饱和气体的释放速率随着泥沙含量的增加而加快。然而需要指出的是,高坝排沙时,泥沙会和过饱和 TDG 同时作用于下游水生生物。刘晓庆^[33]以岩原鲤幼鱼为实验鱼开展室内试验,对总溶解气体饱和度分别为 100%、125%、130%、135%、140% 的水体,分别设置含沙浓度为 0、200、600、800、1000mg/L 的实验条件,在过饱和总溶解含沙水工况下对实验鱼进行持续暴露实验。实验结果表明,在过饱和含沙水体中,岩原鲤幼鱼的半致死时间随着 TDG 饱和度的增高、含沙浓度的增大而减小。

5.2 温度

气体在水中的溶解度除了受压强影响外还与温度呈反比关系。研究表明:在标准大气压下,温度每升高 1℃,总溶解气体的饱和度就会增加 2%^[11],温度越高总溶解气体饱和度就越大,过饱和水体随着温度的升高就更容易向饱和态转化。这是因为,随着温度的升高,水中的气体分子具有更大的动能,其运动速率升高,溶解在水中的气体越容易从水中逸出,从而使溶解度降低。Shen^[34]等通过实验研究了静态和湍流条件下温度对过饱和 TDG 耗散的影响。结果表明,过饱和 TDG 耗散系数随温度和湍流强度的增加而增大。王皓冉^[4]等通过监测不同时刻雅砻江三滩桥断面的水温和总溶解气体饱和度,发现水温和总溶解气体饱和度表现出良好的相关性。

5.3 水体紊动强度

过饱和和溶解气体的释放过程受到水深、河流形态、静水压力、水温和湍流强度等因素的限制。在实际工程中,河流深度、河流形态和水温难以人为控制,因此紊动强度成为促进过饱和气体释放的主要研究方向。杜开开等^[35]通过以潜水泵数量、功率、摆放方式、排水方向等因素为变量研究对过饱和和溶解氧释放的影响。其中潜水泵在实验中充当紊动源,水泵产生的紊动强度有效促进了水中过饱和和溶解氧的释放。在一些缓慢流动的水中,例如水库或湖泊,风可能是显著影响传质过程的重要因素。Huang 等^[36]通过风驱动实验和数值模拟研究 TDG 在风力驱动流中的运输和耗散过程,实验结果表明,由于风速的增加提高了湍流能量和湍流耗散速率,可显著加快过饱和 TDG 的耗散。刘焱等^[37]通过室内试验观察到同一风速下,过饱和水体浓

度越高,其释放速率越快,随着浓度的降低,释放速率呈递降趋势。

5.4 阻水介质

高坝泄水过程中,下游水位在排放期间上升,淹没了底部的部分植被,而植被的茎和叶能提供大量的固体-液体接口,吸附溶于水中的气体。根据溶解气体的热力学理论,溶解气体的析出过程应分为 4 个步骤:首先,少量溶解气体形成气核;然后,气核周围的溶解气体附着在它上面,产生一个微小的气泡;此外,在压力、浮力和气泡-液体传质的作用下,微小气泡逐渐成长为粗气泡;最后,通过空气-水表面传质,将总气泡从水中排出。因此增加水中的沙、人工气泡、活性炭等介质可为形成气核提供很大的优势。类似的,下游河道中淹没的植被也能作为加速过饱和 TDG 释放速率的媒介。Yuan 等^[38]在实验装置中通过分别种植人造植物和树脂玻璃板进行植被对过饱和 TDG 释放的影响研究,实验结果表明,在水中种植植被可以有效地促进过饱和 TDG 的消散,而且随着植被密度的增加过饱和 TDG 的耗散率变高。冯镜洁等^[39]以立柱为阻水介质模拟水下植被,研究结果表明:随着立柱密度、表面粗糙程度、立柱外观不规则性的增高,促进过饱和 TDG 的释放效果越明显。

5.5 曝气

水下曝气能增加水气界面面积,增加水体的湍流强度。为了探索曝气对过饱和 TDG 释放速率的影响,Ou 等^[40]在曝气水柱中探究了过饱和 TDG 释放速率与曝气条件(如气体流速、水深和孔径)之间的关系,研究结果表明:随着气体流速的增加,过饱和水体的耗散速率呈指数型增长,对于一定的气体流速,耗散系数随着水深和扩散器孔径的增加而减小。黄鹰翰等^[41]通过室内试验,建立了 DO 释放系数与曝气量和曝气深度间的定量关系。曝气技术在环境工程和化工领域表现出了良好的实用性和经济性,但使用曝气产生的气泡促进过饱和 TDG 的消散却是一种前瞻性方法,天然水体中由于地形条件复杂,尚存诸多不确定因素,如何将曝气技术应用于促进过饱和 TDG 释放过程,还有待进一步研究。

6 结论

高坝泄水产生的过饱和 TDG 水流蔓延至下游,会对下游水生生物繁殖产生严重影响。国外对高坝泄水产生的过饱和和水体研究较早,而国内起步相对较晚。

我国尚未规定过饱和 TDG 的限制标准,而高坝泄水引起的过饱和问题却日渐突出,因此需要综合分析鱼类资源对过饱和 TDG 的耐受能力,有效降低高坝下泄水流中的过饱和浓度,从而保护水生生态环境。本文通过对国内外关于过饱和水体的相关文献进行综述,分别从高坝泄水对鱼类的致死效应、鱼类对过饱和 TDG 的规避效应、加速过饱和 TDG 释放的措施以及致病机制等几个方面进行综合分析并得出以下结论。

(1) 过饱和水环境中,随着过饱和度的增加,鱼类受到的影响也越大。与高浓度过饱和水体相比,低浓度的水环境对鱼类具有慢性伤害。与过饱和 TDG 单独作用于鱼类相比,下泄水流中的泥沙会加速实验鱼的死亡。

(2) 不同的鱼种对过饱和 TDG 具有不同的耐受能力,其能力强弱与鱼类的大小、体型、鱼龄、水温以及水深等因素有关。现有研究成果中缺乏能将多种因素联系在一起并具有普适性的预测模型。

(3) 鱼类会对过饱和区域进行探知和回避,提供和增强具有较低 TDG 饱和度的避难区域有利于减轻过饱和 TDG 对鱼类资源带来的损害。

(4) 为了加速过饱和 TDG 的释放进程,本文分别从泥沙、温度、水体紊动强度、阻水介质、曝气几个方面分别综述分析,其中紊动强度能有效加速过饱和 TDG 的释放,是主要的研究方向。过饱和总溶解气体在高坝下游的衰减速度极其缓慢,而如何在安全行洪前提下加速过饱和 TDG 的释放是下一步研究的重点。

(5) 高坝泄水导致的过饱和 TDG 使得下游鱼类深受其害,现有研究主要集中在鱼类的耐受性、减少过饱和气体产生以及促进过饱和气体释放等方面,而鱼类气泡病与过饱和气体之间的内在联系,以及气泡病发生机制的研究尚不够深入。明确过饱和气体对鱼类的致病机制,有利于在理论指导下寻找减少对鱼类危害的措施。

参考文献:

[1] 程香菊,陈永灿.大坝泄洪下游水体溶解气体超饱和理论分析及应用[J].水科学进展,2007,18(3):346-350.
 [2] 朱瑶.大坝对鱼类栖息地的影响及评价方法述评[J].中国水利水电科学研究院学报,2005(2):100-103.
 [3] Weitkamp D E, Katz M. A review of dissolved gas supersaturation literature[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1980, 109(6):659-702.
 [4] 王皓冉,周卓灵,行亚楠,等.水利工程总溶解气体过饱和问题探讨[J].水利水电科技进展,2010,30(5):12-15.
 [5] Skajaa G K, Hilde T, Ate M. Effects of nitrogen gas supersaturation on

growth and survival in juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) [J]. Aquaculture, 2008, 283(4):175-179.
 [6] Mesa M G, Weiland L K, Maule A G. Progression and severity of gas bubble trauma in juvenile salmonids [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2000, 129(1):14-185.
 [7] Jiang L, Li J, Li R, et al. A study of dissolved gas supersaturation downstream of Zipingpu dam [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3):367-371.
 [8] 冯镜洁,李然,李克锋,等.高坝下游过饱和 TDG 释放过程研究[J].水力发电学报,2010,29(1):7-12.
 [9] Chen S C, Liu X, Jiang W, et al. Effects of total dissolved gas supersaturated water on lethality and catalase activity of Chinese sucker (*Myxocyprinus asiaticus* Bleeker) [J]. 浙江大学学报(英文版)(B辑:生物医学和生物技术),2012,13(10):791-796.
 [10] 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(73):787-796.
 [11] Huang X, Li K F, Du J, et al. Effects of gas supersaturation on lethality and avoidance responses in juvenile rock carp (*Procypris rabaudi* Tehang) [J]. 浙江大学学报(英文版)(B辑:生物医学和生物技术),2010,11(10):806-811.
 [12] 宋明江,刘亚,龚全,等.总溶解气体过饱和和对达氏鲟急性致死效应[J].淡水渔业,2018,48(5):17-21.
 [13] 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(S1):66-70.
 [14] 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.
 [15] 袁姝,袁佳,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(S2):56-61.
 [16] Okihiro M S, Smiley J E, et al. Acute effects of gas supersaturation on juvenile cultured white seabass [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2011, 140(5):1269-1276.
 [17] Xia S, Li R. Shelter construction for fish at the confluence of a river to avoid the effects of total dissolved gas supersaturation [J]. Ecological engineering: The Journal of Ecotechnology, 2016, 97(5):642-648.
 [18] 袁佳,袁姝,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].水生态学杂志,2017,38(4):77-81.
 [19] 王远铭,张陵蕾,曾超,等.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,2015,46(4):480-488.
 [20] 周晨阳,李克锋,曹露,等. TDG 过饱和对齐口裂腹鱼的影响及避难所营造研究[J].人民长江,2019,50(6):39-43.
 [21] 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.
 [22] Bouck G R. Etiology of gas bubble disease [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1980(109):703-707.
 [23] Harvey H H, Smith S B. Supersaturation of the water supply and oc-

- currence of gas bubble disease at Cultus Lake Trout Hatchery [J]. Canadian Fish Culturist ,1961(30) : 39 - 46.
- [24] Rucker R R ,Kangas P H. Effect of nitrogen supersaturated water on Coho and Chinook salmon [J]. The Progressive Fish - Culturist ,1974 (36) : 152 - 156.
- [25] Knittel M D ,Chapman G A ,Garton R R. Effects of hydrostatic pressure on steelhead survival in air - saturated water [J]. Transactions of the American Fisheries Society ,1980 ,109(6) : 755 - 759.
- [26] Mesa M G ,Weiland L K ,Maule A G. Progression and Severity of Gas Bubble Trauma in Juvenile Salmonids [J]. Transactions of the American Fisheries Society 2000 ,129(1) : 174 - 185.
- [27] Erich S. Effects of sediment flushing on fish and invertebrates in Swiss Alpine Rivers [C] // International Workshop and Symposium on Reservoir Sedimentation Management ,Toyama 2000: 185 - 193.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 李然,李嘉,赵文谦等. 紊动水体复氧规律研究 [J]. 环境科学学报 2000(6) : 723 - 726.
- [31] Qu L . Relation of total dissolved gas supersaturation and suspended sediment concentration of high - dams [J]. Advances in Water Science 2011 22(6) : 839 - 843.
- [32] 冯镜洁,李然,唐春燕等. 含沙量对过饱和和总溶解气体释放过程影响分析 [J]. 水科学进展 2012 23(5) : 702 - 708.
- [33] 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.
- [34] Shen X ,Liu S ,Li R ,et al. Experimental study on the impact of temperature on the dissipation process of supersaturated total dissolved gas [J]. Journal of Environmental Sciences ,2014 ,26(9) : 1874 - 1878.
- [35] 杜开开,李云峰,柳凌等. 紊动对水体过饱和和溶氧释放的影响初探 [J]. 淡水渔业 2017 47(5) : 21 - 25.
- [36] Huang J P ,Li R ,et al. Relationship investigation between the dissipation process of supersaturated total dissolved gas and wind effect [J]. Ecological engineering: The Journal of Ecotechnology 2016 ,95(3) : 430 - 437.
- [37] 刘焱,王乐乐,邹璇等. 风速对过饱和和总溶解气体释放速率的影响 [J]. 水利水电科技进展 2015 35(4) : 28 - 31.
- [38] Yuan Y Q ,Feng J J ,Li R ,et al. Modelling the promotion effect of vegetation on the dissipation of supersaturated total dissolved gas [J]. Ecological Modelling 2018(386) : 89 - 97.
- [39] 冯镜洁,李然,史春红等. 阻水介质对过饱和和总溶解气体释放过程影响的实验研究 [J]. 西南民族大学学报(自然科学版) , 2017 43(1) : 89 - 94.
- [40] Ou Y M ,Li R ,Tuo Y C ,et al. The promotion effect of aeration on the dissipation of supersaturated total dissolved gas [J]. Ecological engineering: The Journal of Ecotechnology 2016 ,95(3) : 245 - 251.
- [41] 黄膺翰,李然,冯镜洁等. 曝气促进溶解氧过饱和和水体恢复的试验研究 [J]. 水力发电学报 2016 35(6) : 80 - 86.

(编辑:胡旭东)

引用本文:张政,肖柏青.高坝下游水中总溶解气体过饱和和研究进展 [J]. 人民长江 2020 ,51(4) : 14 - 19.

Research progress of total dissolved gas supersaturation downstream of high dam

ZHANG Zheng , XIAO Baiqing

(School of Earth and Environment , Anhui University of Science and Technology , Huainan 232001 , China)

Abstract: With the continuous construction of hydropower projects , the problem of water body supersaturation caused by high dam discharge is becoming more and more prominent. In this paper , the research results for water body supersaturation at home and abroad in recent years were summarized , and the interaction between supersaturated total dissolved gas (TDG) and downstream aquatic organisms was analyzed from three aspects: fish tolerance , fish avoidance effect on supersaturated TDG and lethal mechanism of supersaturated TDG to fish , and then some research ideas were puts forward. Furthermore , this paper also focused on the progress and shortcomings in promoting the release rate of supersaturated TDG. It is pointed out that the release of supersaturated TDG under actual working conditions is influenced by surrounding environment such as river morphology , while the experimental conditions can not accurately reflect the actual working conditions , so the indoor tests and prototype observations need to be further strengthened in the future. And how to achieve rapid and efficient TDG release under the premise of safe flood discharge is the focus of further research in this field.

Key words: total dissolved gas; supersaturation; fish tolerance; avoidance effect; supersaturated TDG release