

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.03.007

总溶解气体过饱和削减措施及其评价体系研究进展

付小莉¹, 付世龙¹, 张 斌¹, 赵根生²

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 南京水利科学研究院水工水力学研究所, 江苏 南京 210029)

摘要: 从高坝大库群泄洪引起的总溶解气体(TDG)过饱和的形成和释放规律入手, 分析了影响 TDG 过饱和形成和释放的因素, 归纳总结了当前研究存在的问题和不足, 同时综合大量国内外研究案例, 从工程措施、非工程措施的角度总结了 TDG 过饱和削减措施及其作用机理, 提出了分级筛选的评价思想, 建立了 TDG 过饱和削减措施评价体系。指出未来的研究方向包括 TDG 气液传质机理、TDG 过饱和预测模型开发、TDG 过饱和削减措施的优化以及削减措施评价体系的完善。

关键词: 水电工程; 总溶解气体; 过饱和; 削减措施; 综述

中图分类号: TV131.34

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)03-0050-09

Research progress on abatement measures for total dissolved gas supersaturation and their evaluation system

FU Xiaoli¹, FU Shilong¹, ZHANG Bin¹, ZHAO Gensheng²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The generation and release patterns of total dissolved gas (TDG) supersaturation caused by the flood discharge of high dams and large-scale reservoirs were first analyzed, and the factors affecting the generation and release of TDG supersaturation were investigated. The challenges and shortcomings existing in the current research were summarized, and abatement measures for TDG supersaturation and their mechanism were sorted out from the perspective of engineering measures and non-engineering measures based on a large number of Chinese and foreign research cases. Moreover, an evaluation idea of hierarchical screening was proposed, and an abatement measure evaluation system for TDG supersaturation was established. The future research directions were pointed out, including the mechanism of TDG gas-liquid mass transfer, the development of the TDG supersaturation prediction model, the optimization of abatement measures for TDG supersaturation, and the improvement of the abatement measure evaluation system for TDG supersaturation.

Key words: hydropower engineering; total dissolved gas; supersaturation; abatement measure; review

水电开发是发展国家清洁能源产业、优化能源结构、保障经济发展的重要措施。但是水库运行改变了河流的水文过程, 从而对河流中生源要素的生物地球化学行为和水生态效应、水生态环境、底栖动物生境、鱼类生境以及鱼类洄游通道产生影响^[1-3]。其中, 高坝大库群泄流产生的高速水流会导致水体总溶解气体(total dissolved gas, TDG)过饱和问题, 这是一个不可忽视的生态环境问题。20 世纪 80 年代以来, TDG 浓度作为重要的水质指标受到国内外生态环保部门越来越多的关注^[4-6]。

当鱼类处于 TDG 过饱和的水体中时, 血液中可能会产生高浓度的溶解气体, 引起气泡创伤(gas bubble trauma, GBT)^[7-10], 导致鱼类受损甚至死亡^[11-16]。当鱼从上游高 TDG 浓度水体游到下游低 TDG 浓度水体时, 溶解气体因浓度梯度变化而在鱼的鳃和血管等器官中析出形成气泡, 导致鱼类患上气泡病^[17]。1997 年 5 月和 6 月美国大古力大坝连续泄洪, 下游 Rufus Woods 湖的 TDG 饱和度高达 122%~136%, 远超美国联邦政府限定的水质标准(110%), 导致养殖和野生鱼类(包括彩虹和钢头鲢鱼、大眼鱼、红大麻花鱼、虹鳟鱼、锯

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3201903)

作者简介: 付小莉(1979—), 女, 副教授, 博士, 主要从事生态水力学研究。E-mail: xlfu@tongji.edu.cn

引用本文: 付小莉, 付世龙, 张斌, 等. 总溶解气体过饱和和削减措施及其评价体系研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 50-58.

FU Xiaoli, FU Shilong, ZHANG Bin, et al. Research progress on abatement measures for total dissolved gas supersaturation and their evaluation system[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(3): 50-58.

鲢、鲤鱼、吸盘和白鱼物种)出现急性 GBT 症状。Irle 等^[18]的研究表明,当 TDG 饱和度不超过 110%时,幼鱼几乎不出现 GBT 症状;当 TDG 饱和度超过 120%时,幼鱼开始出现气泡病症状;当 TDG 饱和度超过 130%以后,具有 GBT 症状的幼鱼明显增加。国内,覃春丽等^[19-20]研究了葛洲坝泄水的 TDG 过饱和问题;吴成根^[21]发现在新安江水库两次泄洪期间,下游 3 km 的建德市虹鳟鱼网箱中,虹鳟鱼普遍患有气泡病;李然等^[22-23]研究发现,向家坝库区的鱼类突发性死亡(死亡数量超 40 t)是由上游泄水引起的 TDG 过饱和导致的。

为解决高坝泄流引起的水体 TDG 过饱和问题,首先需明晰 TDG 的气液传质机理,阐明 TDG 过饱和的形成机制和释放机制,在此基础上,制定 TDG 过饱和削减措施,并通过建立削减措施评价体系,确定最佳削减措施。气液传质机理研究已有较多成果,发展较成熟的有三大经典传质理论模型:双膜理论、溶质渗透理论和表面更新理论^[24-31]。除此之外,描述气液传质的理论模型还有表面再生理论、大涡模型、小涡模型、多尺度局部均匀模型等^[32-35]。相对而言,TDG 过饱和削减措施研究发展缓慢,削减措施的评价体系更鲜有进展,目前国内还未有成熟的理论体系及应用案例。本文从 TDG 过饱和的形成和释放过程入手,分析两阶段的影响因素,指出当前研究的问题和不足,并从工程与非工程措施角度总结当前的削减措施,阐明削减机理,最后通过建立削减措施评价体系,筛选最佳削减措施。

1 TDG 过饱和的形成与释放

TDG 过饱和的形成与释放实质上是气相和液相在气液交界面上的质量交换,根据其形成与释放的规律可以概括为形成、释放两个阶段。

1.1 形成阶段

高坝大库下游 TDG 过饱和形成的首要条件是足够的掺气,根据掺气机理和过程,掺气可分为自掺气和强迫掺气。在水流流动过程中,过流边界与水流流态没有突变,仅靠水流紊动使空气通过水气交界面进入水流,由此形成的掺气水流称为自掺气水流^[36-39]。大坝下游未进入消力池的溢洪道中的水流掺气属于自掺气范畴。水流在流动过程中受到某种干扰,如过流边界突变、水流流态突变或水流碰撞与交汇,由此形成的掺气水流称为强迫掺气水流。自由跌落水流、水跃引起的掺气属于强迫掺气。大坝下游掺气过程主要发生于消力池内,掺气水流进入气水淹没层后,在静压和动压作用下大量的水气会迅速发生质量交换,从而破坏原有平衡状态,使得水体中所含气体达到过饱和状态。在 TDG 过饱和形成阶段,关键影响因素主要是水温、泄水流量、气水淹没层的深度、消能结构和操作模式等。Tang 等^[40]认为水库蓄水温度会影响 TDG 过饱和的形成和释放,使用释放模型模拟并比较了天然河段中不同取水结构的 TDG 过饱和演变,发现温度升高会导致 TDG 生成减少。美国陆军工程兵团对哥伦比亚河和蛇河 TDG 过饱和的形成过程的分析表明,在含气量、流量、深度、流速和湍流强度普遍较高的气水淹没层区域,水流会迅速溶解大量气体^[41]。Qu 等^[42]通过对中国紫坪铺、三峡、二滩、漫湾、大朝山、拱嘴、二滩大坝的 TDG 野外观测,认为消能结构、泄洪流量和操作模式是导致 TDG 过饱和的主要因素。此外,TDG 过饱和的形成还与大气压强和上下游水位差等有关^[43-44]。

目前,我国对 TDG 过饱和形成阶段的研究相对较少,主要存在以下几方面的问题:①现场原型观测困难大,TDG 过饱和水体的形成通常发生在消力池中,该处水体流动剧烈,布置观测点难度较大;②开展高坝泄水 TDG 过饱和形成的模型试验难度大,由于难以确定模型和原型的相似准则关系,同时水力模型是原型按比尺缩小的物理模型,而气泡无法缩小,无法在模型试验中观测 TDG 过饱和的形成,导致试验结果与真实结果偏差较大;③TDG 过饱和形成受到多种因素的影响,构建表征过饱和气体形成及变化特征参数之间的关系困难,未来还需进一步研究各种影响因子对过饱和气体形成的影响。

1.2 释放阶段

当 TDG 过饱和水体逐渐被带到下游时,气泡会生成并从水中慢慢上升,脱离过饱和环境而从水中溢出到大气,下游的水垫塘和尾水渠部分是 TDG 饱和度衰减最快的区域。影响 TDG 过饱和释放阶段的主要因素有支流汇合、水深和湍流等^[42,45]。Shen 等^[46]采用三维水动力模拟方法,研究水流比和汇流角对汇流下游 TDG 分布的影响,认为 TDG 浓度分布主要受流入 TDG、二次流和湍流强度的影响。Huang 等^[47]通过风动试验,量化了 TDG 过饱和在不同风速下的释放系数,并研究了 TDG 在风驱动流中的输运和释放过程,得出风驱动流产生的涡流对 TDG 过饱和的释放有很大贡献。Shen 等^[48]通过室内试验研究了在静态和紊流条件下温度对 TDG 过饱和释放的影响,发现 TDG 释放系数随温度和湍流强度的增大而增大。此外,植物和粗糙的

河床会加快 TDG 过饱和的释放^[49-53]。

释放阶段的传质过程主要是两个方面:①过饱和气体通过自由表面释放;②溶解于水体中的饱和气体随压力变化转化为气泡,气泡从水体中上升到水面溢出到大气。未来需要进一步研究上述两方面的释放机制以及影响因素,提取过饱和气体释放过程中水压力、气泡大小及数量、流速等影响因子,对影响因子进行量化分析并建立多影响因子之间的相互作用关系。

2 TDG 过饱和削减措施

目前国内建成的大坝中,TDG 过饱和削减措施的应用不普遍,为了改善水质应该开展相应的研究以确定技术上可行并具有成本效益的解决方案。从工程实施的角度,TDG 过饱和削减措施分为工程措施和非工程措施。工程措施是指通过调整消能结构、减小水垫塘水深、扩宽下游河道、增加电站发电机组等措施,遏制 TDG 过饱和的形成或加快 TDG 过饱和的释放;非工程措施主要是从大坝等水利水电工程调度规则着手,通过优化调整泄洪方式和发电出力,调整出库流量,降低 TDG 浓度,往往需要几个大坝联合调度来实现最佳效果。从 TDG 过饱和发展规律的角度,可以分为形成阶段和释放阶段的削减措施,针对每个阶段的特点需要采用不同的措施。形成阶段可通过结构改进、改善流态和降低射流水头差等措施,减少水流空气夹带量;释放阶段可考虑增加传质速率系数,从而加快过饱和 TDG 从水中释放到大气中。

2.1 工程措施

工程措施通过对上游库区增加引水措施、改造大坝消能结构或下游河道来达到减少掺气、减少泄洪量和降低下游水深的目的,常见的工程措施见表 1。

2.1.1 形成阶段

在 TDG 过饱和形成阶段,主要通过减少水流掺气量、减少泄洪量、降低下游水深减小 TDG 饱和度。

a. 在溢洪道增设挡板。Huang 等^[56]认为在溢洪道入口处设置挡板,可以减少入口处的气泡挟带量,从而降低 TDG 饱和度(下降约 5.2%)。挡板也可以放置在高坝溢洪道下游,在底流和挑流的消能工程下游安装挡板能有效促进气泡上升,从而降低气泡压力,使得 TDG 饱和度减小,采用底流和挑流的大坝 TDG 饱和度分别减小 5.2%和 13.1%。

b. 采用溢洪道挑流坎。在溢洪道表面安装挑流坎,可以将规则的倾伏流转为与自由表面相切的表面射流,避免掺气水流深入消力池底部造成过多的气体溶解。Fu 等^[54]研究发现,有挑流坎的消力池内气体饱和度比无挑流坎的消力池要低 10%~15%。Andriolo 等^[63]研究了 Colider 大坝溢洪道上的挑流坎长度、挑流坎高程对 TDG 产量的影响,得到了能最大限度减少 TDG 饱和度的挑流坎设计方案,并于 2021 年 11 月完成了 4 个溢洪道港湾的挑流坎施工;实测数据表明,小流量情况下 TDG 饱和度减小约 30%,对于溢流流量大于 1 600 m³/s 且无厂房运行的情况,有挑流坎较无挑流坎 TDG 饱和度减少约 10%。

c. 通过减小泄洪量及降低下游水深降低 TDG 浓度。①在大坝上游水库内新增梯级泄洪洞将水直接排入下游河道;②将径流式水电站水库中多余的水量转入到灌溉、抽水蓄能等其他用途或者增加发电量;③通过将下游水垫塘河床抬高降低下游水深。

2.1.2 释放阶段

释放阶段削减措施目前主要采用阶梯溢洪道。与光滑坝面相比,同等流量下阶梯溢洪道水体紊动更强,水气掺混程度更高,可以显著提高 TDG 传质效率,有利于过饱和溶解气体自水相向气相的传递,促进饱和水流的恢复。Cheng 等^[62]探讨了水与过饱和溶解气体在阶梯溢洪道上的脱气机理,发现较高的湍流度、较大的停留时间和较大的气-水界面面积可以改善脱气过程,最大降幅达到 63.3%。现在阶梯溢流坝已被应用在

表 1 工程措施

Table 1 Engineering measures

阶段	工程目标	措施
形成阶段	减少掺气	在溢洪道上增加挑流坎 ^[54-55]
		在溢洪道入口或者下游增设挡板 ^[56-57]
		改造泄洪孔的出口形式 ^[55,58]
	减少泄洪量	在前池增加梯级泄洪洞 ^[59]
		水库多余水量用于灌溉、生态等其他用途 ^[55,60]
释放阶段	降低下游水深	水库水量用于抽水蓄能 ^[55,60]
		增加新型发电机组 ^[55,60]
		抬高下游水垫塘河床 ^[55,60]
	增加传质速率系数	降低部分水垫塘水深 ^[55,60]
		扩宽下游河道 ^[60]
		引入支流掺混 ^[61]
		增加河道糙率 ^[49]
		阶梯溢洪道 ^[62]

糯扎渡、丹江口、东西关等多个工程。

Shen 等^[61]对祖木祖河及其支流墨子沟汇合处的 TDG 进行了数值模拟,发现支流的汇入会降低主流的 TDG 饱和度,在汇流处下游支流侧形成低 TDG 饱和度区域,结合水流流量和水深综合分析,认为汇流区域可以保护鱼类免受 TDG 过饱和的影响。Yuan 等^[52]通过一系列试验得出了固体壁面对 TDG 有吸附作用的结论,因此可以采取一定的工程措施增加过流断面糙率,加快 TDG 过饱和的释放。另外,可以通过拓宽河道较窄的横断面,降低水深,从而加快 TDG 释放。例如,Chief Joseph 大坝下游 Pateros 湖的布鲁斯特平原地区计划拓宽河道,以减少水流到达 Wells 大坝的前池 TDG 浓度^[60]。

由于各项工程措施技术难度大,并且与工程安全密切相关,因此即使在筑坝技术高速发展的今天,过饱和 TDG 削减措施的工程应用仍是关键难点问题^[22]。

2.2 非工程措施

对于已建工程,为了控制 TDG 饱和度,对溢洪道等结构进行改造的难度较大,往往不易决策,因此可以通过非工程措施加快 TDG 过饱和的释放。形成阶段和释放阶段常见的非工程削减措施见表 2。

2.2.1 形成阶段

在 TDG 过饱和形成阶段,非工程削减措施主要通过调度措施减少水流掺气量,降低 TDG 饱和度。例如,通过间断泄洪方式,降低 TDG 过饱和对鱼类的影响^[58]。Ma 等^[64]发现 TDG 在河流中的持续时间是决定 TDG 对鱼类负面影响的主要因素,TDG 释放时间越长,对鱼类的负面影响越大,因此可以采用不连续泄洪方式最小化高浓度 TDG 的持续时间。顾洋等^[65]建立了河道型水库的纵向一维 TDG 过饱和和释放预测模型,认为汛期上游电站在满足防洪安全的前提下,适当延长泄洪时间,减小泄洪流量,可减小泄洪生成的 TDG 饱和度,在相同运行水位下,5 年一遇洪水流量大于 2 年一遇洪水流量,生成的 TDG 饱和度差值可达 6.7%;建议上游电站泄洪期间,下游水库保持高水位运行,以满足各滩地断面鱼类躲避 TDG 过饱和的补偿水深要求,降低 TDG 过饱和导致鱼类患病及死亡的风险。

此外,在水利枢纽之间,在总泄洪量和总发电量保持不变的情况下,可以采用联合调度手段,降低 TDG 过饱和 TDG 对鱼类的影响。在实现梯级电站总体运行目标和效益的前提下,通过联合调度可以优化调整调度规则,最大程度降低 TDG 饱和度^[67]。在哥伦比亚河干流上游的多座大坝之间,由于 Roosevelt 湖流入 Grand Coulee 水库的水流溶解气体水平很高,Grand Coulee 和 Chief Joseph 大坝之间缺乏自由流动的支流、河道断面窄深等多种因素造成水流从 Roosevelt 湖到 Pateros 湖一直保持 TDG 过饱和状态。为了使这段河道符合华盛顿州的 TDG 水质标准,基于支流掺混条件、结构性改造的造价以及削减效果三方面的考虑,美国陆军工程兵团、美国垦务局和博纳维尔电力管理局联合提出了对 Grand Coulee 和 Chief Joseph 大坝进行泄洪量和发电量的联合调度,并在 1997 年水量较大年份成功运行^[60]。现场观测发现,在春季 122 d 泄洪期内 Chief Joseph 大坝上游(Rufus Woods 湖)TDG 水平明显得到改善,TDG 饱和度超过 120%的天数减少了 81%,超过 125%的天数减少了 100%,基本将 TDG 饱和度控制在水质标准以内;Chief Joseph 大坝下游(Pateros 湖)TDG 水平也得到了较大改善,TDG 饱和度超过 120%的天数减少了 5%,超过 125%的天数减少了 13%,但是当 Chief Joseph 大坝承担最大泄洪量时,超过 130%的天数反而会增加^[56]。综合而言,通过联合调度手段可以极大改善水电工程上下游河段的 TDG 水平,这一研究结果可为高饱和度 TDG 期间的水管理决策提供依据,尤其是在流域梯级电站的运行调度中。

2.2.2 释放阶段

在 TDG 过饱和释放阶段,首先,考虑减少泄洪量,尽量将更多的水流通过发电系统进入下游。例如,在发电量最大的时候启闸泄洪,一来可以降低溢洪道分流比,二来可以通过电厂出流掺混溢洪道泄流,加快 TDG 过饱和和释放。加拿大不列颠哥伦比亚省 Pend d' Oreille 河上的七英里大坝通过采用滑跃式设计,使上游高浓度 TDG 的水流经过溢洪道末端的挑流鼻坎后脱气,其中最大的 TDG 浓度差值达到了 11%;大量现场

表 2 非工程措施
Table 2 Non-engineering measures

阶段	工程目标	措施
形成阶段	减少掺气	间断泄洪 ^[64]
		减小泄洪流量,延长泄洪时间 ^[65]
释放阶段	减少泄洪量 优化泄洪方式	联合调度 ^[60]
		在发电量最大的时候启闸泄洪 溢洪道水流集中在一个溢洪道中 ^[66]

测量表明,自由射流是脱气的主要贡献者^[68-69]。其次,需要优化泄洪方式,因为泄洪方式对 TDG 过饱和和释放有影响。Politano 等^[66]研究发现,将溢洪道水流集中在一个溢洪道中会导致气泡更靠近自由表面,从而产生更多的脱气。

3 削减措施评价体系

削减措施评价体系不仅要考虑削减效果,还需要从其他角度如经济、施工、维护、生态等多方面制定评价标准,以全面评估削减措施的可行性,选择综合评分较高的几个方案作为备选进一步研究。在满足泄流消能安全的前提下,本文提出了几个重要的评价指标,包括工程影响、工程造价、水质效应、生态效应、可行性、时间、对上下游的影响、运行和维护,并赋予评分标准(表 3)。

表 3 评价指标和评价标准

Table 3 Evaluation indicators and evaluation criteria

评价指标	评价指标含义	评价标准
工程影响	对现有项目(水电、灌溉和周边环境)的影响程度	高,中,低
工程造价	工程所花费的总费用	视具体工程而定
水质效应	通过结构手段降低 TDG 饱和度、通过工程运行手段改变/降低 TDG 饱和度或通过系统运行改变/降低混合河流 TDG 饱和度(发电流量和溢流中 TDG 的流量加权平均值)	明显降低 TDG 饱和度 10%~15%以上,部分降低了溢洪道或下游混合水体的 TDG 饱和度 5%~10%,没有降低 TDG 饱和度,部分增高了溢洪道或下游混合水体的 TDG 饱和度
生态效应	对洄游鱼类和常栖鱼类的数量和生存质量影响	负面,没有,正面
可行性	从设计、施工和操作的角度评估可行性	具有可行性,无可行性,部分可行性
时间	实施方案所需要花费的时间	实施方案小于 1 a,实施方案需要 1~<4 a,实施方案需要 4~6 a
对上下游的影响	对项目的上游或下游有无负面影响	有影响,部分影响,无影响
运行和维护	后期运行和维护的成本	高,中,低

鉴于可考虑的削减措施较多,本文提出分级筛选的评价思想,先选取关键指标对削减措施进行初步筛选,再对评分较高的削减措施综合所有指标进一步筛选,最终得到一个或多个综合得分较高的削减措施(图 1)。通过这种方式,在确保评价多维性和全面性的基础上,提升了筛选效率。为展示该评价体系的使用方法,选用时间、水质效应、工程造价 3 个评价指标,以某大坝为例,给出初步筛选评价结果(表 4)。

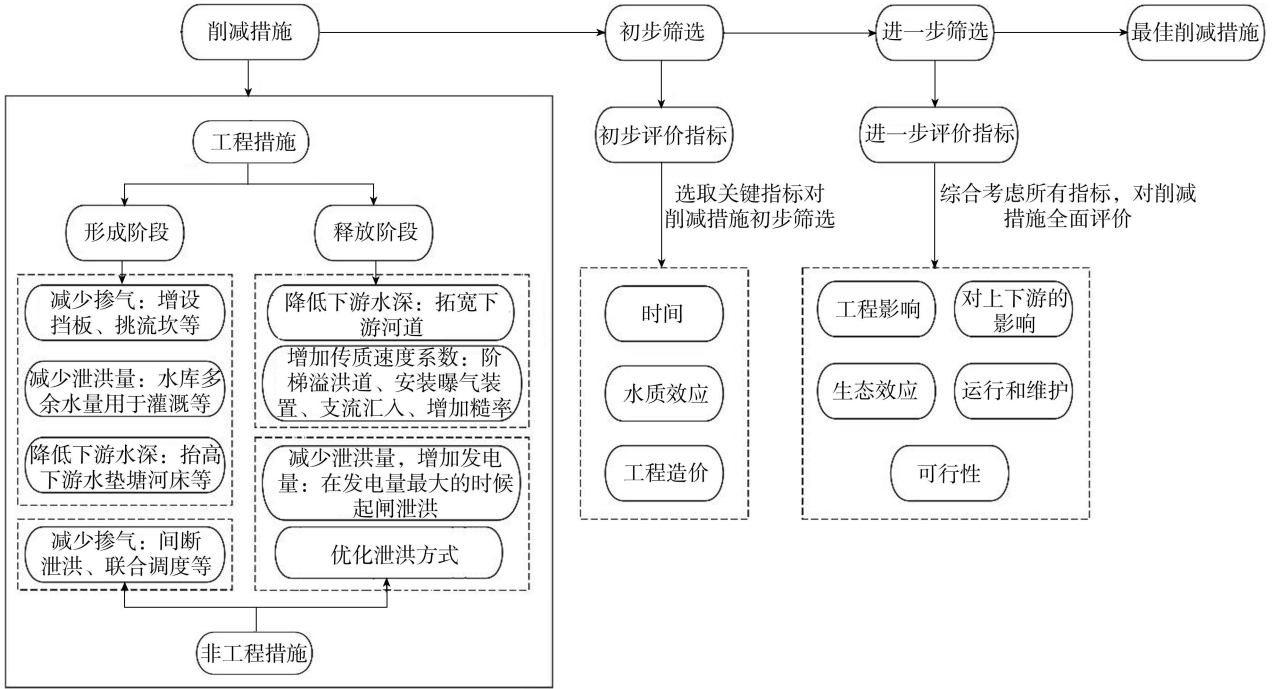


图 1 TDG 削减措施评价体系示意图

Fig. 1 Abatement measure evaluation system for TDG

表 4 削减措施的初步筛选评价结果

Table 4 Evaluation results of preliminary screening of abatement measures

削减措施类别	削减措施	评价指标排序			排序和	总排序
		时间	水质效应	工程造价		
工程措施	溢洪道增设挡板	2	2	3	7	3
	溢洪道挑流坎	2	2	2	6	2
	在前池增加梯级泄洪洞	3	2	5	10	5
	水库多余水量用于灌溉、生态等其他用途	1	3	1	5	1
	抬高下游水垫塘河床	2	1	4	7	3
非工程措施	间断泄洪	2	3	1	6	3
	在发电量最大的时候启闸泄洪	1	2	1	4	1
	联合调度	2	1	2	5	2

注:工程措施和非工程措施分开排序;时间分为小于 1a、1~<4a、4~6a,对应排序为 1、2、3;水质效应的 TDG 减小量越多,排序越靠前;工程造价越小,排序越靠前;排序之和为时间、水质效应、工程造价三者排序的和;总排序根据排序和从小到大排序,它代表在对应 3 种指标下,各方案的推荐顺序。

4 研究展望

- a. TDG 气液传质机理研究。虽然目前有三大经典传质理论、大涡模型、小涡模型等能描述气液传质过程,但因大坝泄洪引起 TDG 过饱和的影响因素众多,且受消能结构形式影响,不同大坝下游流态也不相同,增加了气液传质过程的复杂性。今后需要加强不同消能形式(底流式消能、挑流式消能、面流式消能和其他形式)下的气液传质研究,明确主导传质方式,并深入研究气泡表面、水流自由表面等各类传质对 TDG 的贡献率。在此基础上,研发不同消能结构形式下的 TDG 累积机制及传质模型,提高模型的适用性。
- b. TDG 饱和度预测模型开发。未来需要进一步以理论分析、模型试验、数值模拟和原型观测手段为支撑,以高新量测技术为辅助,构建下游 TDG 饱和度预测模型。加强 TDG 容易过饱和河段水情、工情的实时监测,根据气候、流量、泄洪量、发电、前池水位、机组停运信息和水质数据等动态模拟未来时段 TDG 饱和度变化趋势及分布情况,并通过模型模拟出最佳调度方案,构建形成河段的 TDG 防控信息化系统。
- c. TDG 过饱和削减措施的优化。因高坝泄洪水头高、泄量大、流速高,TDG 过饱和问题往往不可避免,但可以采取一定的手段降低 TDG 饱和度并减少 TDG 过饱和对鱼类等水生生物的危害。在梯级开发的河流上,若大坝之间的间距过小,会出现 TDG 过饱和累积现象。因此,有必要在流域尺度上加强统筹,即综合考虑影响 TDG 过饱和形成和释放因素,结合增设溢洪道挡板、挑流坎等工程措施,以及合理调整电站泄洪方式、降低溢洪道分流比例等非工程措施,开展流域梯级电站的联合调度,以最大限度降低 TDG 饱和度。
- d. 削减措施评价体系的完善。基于国内高坝运行生态安全需求,提出具有指导意义的评价指标,根据评价指标结合实际工程情况对各削减措施作出合理评价,进一步帮助实际工程选择出最优削减措施,本文只介绍了一种评价体系及其对应的使用方法,未来可以从增加评价指标、提出更加客观具体的评价标准、采用更加合理的评价方法等角度入手,进一步完善削减措施评价体系。

参考文献:

[1] 张长征,李洪梅. 基于可变模糊评价法的小型水库运行管理评价研究[J]. 水利经济,2023,41(6):30-36. (ZHANG Changzheng, LI Hongmei. Study on the evaluation of small reservoir operation and management based on variable fuzzy evaluation method[J]. Journal of Economics of Water Resources,2023,41(6):30-36. (in Chinese))

[2] 张万顺,邓浪浪,彭虹,等. 柳堰集水库渔光互补工程对水环境影响的数值模拟研究[J]. 水资源保护,2023,39(5):1-8. (ZHANG Wanshun,DENG Langlang,PENG Hong,et al. Study on numerical simulation of impact of fishery-light complementary project on water environment in Liuyanji Reservoir[J]. Water Resources Protection,2023,39(5):1-8. (in Chinese))

[3] 戴凌全,张培培,常曼琪,等. 三峡水库出库流量变化对洞庭湖定居性鱼类产卵生境的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):38-45. (DAI Lingquan,ZHANG Peipei,CHANG Manqi,et al. Effect of outflow from Three Gorges Reservoir on spawning habitat of sedentary fish in Dongting Lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):38-45. (in Chinese))

[4] MAYNARD C. Evaluation of total dissolved gas criteria (TDG) biological effects research;a literature review[M]. Washington: Department of Ecology,2008.

- [5] PICKETT P J, RUEDA H, HEROLD M. Total maximum daily load for total dissolved gas in the Mid-Columbia river and lake roosevelt submittal report[R]. Washington: Washington State Department of Ecology, 2004.
- [6] PICKETT P J, HEROLD M. Total maximum daily load for lower Snake River total dissolved gas[M]. Washington: Washington State Department of Ecology, 2003.
- [7] SONG Cuihong, MO Weiwei. A temporal perspective to dam management: influence of dam life and threshold fishery conditions on the energy-fish tradeoff[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021, 35(1): 83-94.
- [8] GRAY R H, HAYNES J M. Depth distribution of adult chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) in relation to season and gas-supersaturated water[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1977, 106(6): 617-620.
- [9] JOHNSON E L, CLABOUGH T S, BENNETT D H, et al. Migration depths of adult spring and summer Chinook salmon in the lower Columbia and Snake Rivers in relation to dissolved gas supersaturation[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2005, 134(5): 1213-1227.
- [10] JOHNSON E L, CLABOUGH T S, CAUDILL C C, et al. Migration depths of adult steelhead *Oncorhynchus mykiss* in relation to dissolved gas supersaturation in a regulated river system[J]. Journal of Fish Biology, 2010, 76(6): 1520-1528.
- [11] WANG Yuanming, AN Ruidong, LI Yong, et al. Swimming performance of Rock Carp *Procypris rabaudi* and Prenant's Schizothoracin *Schizothorax prenanti* acclimated to total dissolved gas supersaturated water[J]. North American Journal of Fisheries Management, 2017, 37(6): 1183-1190.
- [12] WANG Yuanming, LIANG Ruifeng, LI Kefeng, et al. Tolerance and avoidance mechanisms of the rare and endemic fish of the upper Yangtze River to total dissolved gas supersaturation by hydropower stations[J]. River Research and Applications, 2020, 36(7): 993-1003.
- [13] WANG Y, LIANG R, TUO Y, et al. Tolerance and avoidance behavior towards gas supersaturation in Rock Carp *Procypris rabaudi* with a history of previous exposure[J]. North American Journal of Aquaculture, 2015, 77(4): 478-484.
- [14] WANG Yuanming, LI Kefeng, LI Jia, et al. Tolerance and avoidance characteristics of Prenant's schizothoracin *Schizothorax prenanti* to total dissolved gas supersaturated water[J]. North American Journal of Fisheries Management, 2015, 35(4): 827-834.
- [15] LI Na, FU Chenghua, ZHANG Jing, et al. Hatching rate of Chinese sucker (*Myxocyprinus asiaticus* Bleeker) eggs exposed to total dissolved gas (TDG) supersaturation and the tolerance of juveniles to the interaction of TDG supersaturation and suspended sediment[J]. Aquaculture Research, 2019, 50(7): 1876-1884.
- [16] YUAN Yuan, WANG Yuanming, ZHOU Chengyang, et al. Tolerance of Prenant's Schizothoracin *Schizothorax prenanti* to total dissolved gas supersaturated water at varying temperature[J]. North American Journal of Aquaculture, 2018, 80(1): 107-115.
- [17] 刘彩虹, 杨慧霞, 梁珈珈, 等. 大坝泄流下游过饱和 TDG 生成过程综述[J]. 水利规划与设计, 2022(2): 125-128. (LIU Caihong, YANG Huixia, LIANG Jiajia, et al. Overview of supersaturated TDG generation process in downstream of dam discharge [J]. Water Resources Planning and Design, 2022(2): 125-128. (in Chinese))
- [18] IRLE P. Wells hydroelectric project total dissolved gas abatement plan[J]. Environmental Science, Engineering, 2012, 2012: 132329263.
- [19] 覃春丽, 李玲. 葛洲坝过坝水流溶解气体超饱和数值模型研究[J]. 科技导报(北京), 2008, 26(18): 45-48. (QIN Chunli, LI Ling. Numerical model of dissolved gas supersaturation flow over spillway of Gezhou Dam Project[J]. Science & Technology Review, 2008, 26(18): 45-48. (in Chinese))
- [20] 长江流域水资源保护局. 葛洲坝工程泄水与鱼类气泡病调查[R]. 武汉: 长江流域水资源保护局, 1983.
- [21] 吴成根. 虹鳟气泡病[J]. 中国水产, 1994(10): 27. (WU Chenggen. Gas bubble disease in rainbow trout[J]. Chinese Fisheries, 1994(10): 27. (in Chinese))
- [22] 李然, 李克锋, 冯镜洁, 等. 水坝泄水气体过饱和对鱼类影响及减缓技术研究综述[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(4): 91-101. (LI Ran, LI Kefeng, FENG Jingjie, et al. Review on the effect of dissolved gas supersaturation of dam spill on fishes and its mitigation measures[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(4): 91-101. (in Chinese))
- [23] 范围, 敖亮, 王军, 等. 高坝下游过饱和 TDG 对鱼类的影响分析: 以 2014 年金沙江向家坝库区死鱼事件为例[J]. 四川环境, 2022, 41(5): 180-184. (FANG Wei, AO Liang, WANG Jun, et al. Effect of supersaturated total dissolved gas on fish in the lower reaches of high dam: take the dead fish event Xiangjiaba Reservoir Area of Jinsha River in 2014 as an example[J]. Sichuan Environment, 2022, 41(5): 180-184. (in Chinese))
- [24] 雒文生, 李莉红, 贺涛. 水体大气复氧理论和复氧系数研究进展与展望[J]. 水利学报, 2003, 34(11): 64-70. (LUO Wensheng, LI Lihong, HE Tao. Advances and prospects in the research of water reaeration theory and reaeration coefficient[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(11): 64-70. (in Chinese))

- [25] 刘壮. 表面更新理论在废水处理生物接触氧化池设计中的应用[J]. 工业用水与废水, 2011, 42(1): 35-36. (LIU Zhuang. Application of surface-renewal theory in design of bio-contact oxidation tank for wastewater treatment[J]. Industrial Water & Wastewater, 2011, 42(1): 35-36. (in Chinese))
- [26] LUO Xiaobo, WANG Meihong, LEE J, et al. Dynamic modelling based on surface renewal theory, model validation and process analysis of rotating packed bed absorber for carbon capture[J]. Applied Energy, 2021, 301: 117462.
- [27] 王广丰, 张国忠, 李文华. 溶气水饱和度对气浮净水溶气效率的影响[J]. 青岛建筑工程学院学报, 2002, 23(3): 45-48. (WANG Guangfeng, ZHANG Guozhong, LI Wenhua. The influence of saturation degree of dissolved water on the gas solution efficiency of flotation waste water treatment system[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2002, 23(3): 45-48. (in Chinese))
- [28] 赵步超. 一种用于油田水处理的新型溶气设备的研究[J]. 环境工程, 2014, 32(1): 60-63. (ZHAO Buchao. Study on a new air-dissolving device for oilfield water treatment[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(1): 60-63. (in Chinese))
- [29] WANG Chao, XU Zhijie, LAI Canhai, et al. Beyond the standard two-film theory: computational fluid dynamics simulations for carbon dioxide capture in a wetted wall column[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 184: 103-110.
- [30] 付博, 袁希钢, 张会书, 等. 伴有 Rayleigh 对流的气液传质理论[J]. 化工学报, 2013, 64(Z1): 21-25. (FU Bo, YUAN Xigang, ZHANG Huishu, et al. Gas-liquid mass transfer theory accompanied by Rayleigh convection[J]. CIESC Journal, 2013, 64(Z1): 21-25. (in Chinese))
- [31] 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, 20(6): 723-726. (LI Ran, LI Jia, ZHAO Wenqian, et al. Study on reaeration laws of turbulent water body[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(6): 723-726. (in Chinese))
- [32] 苗容生. 两相流气泡界面附近湍流场和浓度场的激光测量及局部传质理论研究[D]. 天津: 天津大学, 1990.
- [33] LEVICH V G, RICE S A. Physicochemical hydrodynamics[J]. Physics Today, 1963, 16(5): 75.
- [34] LAMONT J C, SCOTT D S. An eddy cell model of mass transfer into the surface of a turbulent liquid[J]. AIChE Journal, 1970, 16(4): 513-519.
- [35] KISHINEVSKY M. Two approaches to the theoretical analysis of absorption processes[J]. Journal of Applied Chemistry of the USSR, 1955, 28: 881-886.
- [36] WANG Yushi, POLITANO M, WEBER L. Spillway jet regime and total dissolved gas prediction with a multiphase flow model[J]. Journal of Hydraulic Research, 2019, 57(1): 26-38.
- [37] RAO N S L, SEETHARAMIAH K, GANGADHARAIH T. Characteristics of self-aerated flows[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1970, 96(2): 331-355.
- [38] EHRENBERGER R. Flow in steep chutes with special reference to self-aeration[R]. Denver: Hydraulics Laboratory under United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1937.
- [39] WILHELMS S C, GULLIVER J S. Bubbles and waves description of self-aerated spillway flow[J]. Journal of Hydraulic Research, 2005, 43(5): 522-531.
- [40] TANG Lei, LI Ran, HODGES B R, et al. Effects of hydropower reservoir withdrawal temperature on generation and dissipation of supersaturated TDG[J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2020, 19(2): 739-745.
- [41] U. S Army Corps of Engineers. Technical analysis of TDG processes[R]. US Army Corps of Engineers-Northwest Division, Environmental Resources and Fish Planning Offices, 2005.
- [42] QU Lu, LI Ran, LI Jia, et al. Field observation of total dissolved gas supersaturation of high-dams[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(1): 156-162.
- [43] 蒋亮, 李嘉, 李然, 等. 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, 2008, 19(3): 367-371. (JIANG Liang, LI Jia, LI Ran, et al. A study of dissolved gas supersaturation downstream of Zipingpu dam[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 367-371. (in Chinese))
- [44] 程香菊. 河道泄水建筑物复氧研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- [45] 姚元波, 杨慧霞, 王云云, 等. 紊动促进过饱和总溶解气体释放研究[J]. 水利规划与设计, 2022(11): 114-120. (YAO Yuanbo, YANG Huixia, WANG Yunyun, et al. Study on supersaturated TDG release promoted by turbulence[J]. Water Resources Planning and Design, 2022(11): 114-120. (in Chinese))
- [46] SHEN X, HODGES B R, LI R, et al. Factors influencing distribution characteristics of total dissolved gas supersaturation at confluences[J]. Water Resources Research, 2021, 57(6): e2020WR028760.
- [47] HUANG Juping, LI Ran, FENG Jingjie, et al. Relationship investigation between the dissipation process of supersaturated total

dissolved gas and wind effect[J]. *Ecological Engineering*,2016,95:430-437.

[48] SHEN Xia, LIU Sengyun, LI Ran, 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.

[49] YUAN Youquan, HUANG Juping, WANG Zhenhua, et al. Experimental investigations on the dissipation process of supersaturated total dissolved gas: focus on the adsorption effect of solid walls[J]. *Water Research*,2020,183:116087.

[50] WANG Haizhou, XU Zexing, YU Haiti, et al. Flow variability along a vegetated natural stream under various sediment transport rates[J]. *Journal of Mountain Science*,2018,15(11):2347-2364.

[51] WANG Zhenhua, LU Jingying, YUAN Youquan, et al. Experimental study on the effects of vegetation on the dissipation of supersaturated total dissolved gas in flowing water[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*,2019,16(13):2265.

[52] YUAN Youquan, HUANG Yinghan, FENG Jingjie, et al. Numerical model of supersaturated total dissolved gas dissipation in a channel with vegetation[J]. *Water*,2018,10(12):1796.

[53] YUAN Youquan, FENG Jingjie, LI Ran, et al. Modelling the promotion effect of vegetation on the dissipation of supersaturated total dissolved gas[J]. *Ecological Modelling*,2018,386:89-97.

[54] FU X L, SHEN C. Analysis of impact of spillway defectors on supersaturated gas in still basin[J]. *Water Resources and Power*,2015,33(6):113-116.

[55] SEATTLE C L. Evaluation of TDG and potential abatement measures of boundary hydroelectric project[R]. Seattle: Seattle Ciyt Light,2007.

[56] HUANG Juping, LU Jingying, LI Ran, et al. Numerical study on the cumulative effect of supersaturated TDG through the spillway [J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*,2021,21(2):292-298.

[57] HUANG Juping, LI Ran, FENG Jingjie, et al. The application of baffle block in mitigating TDGS of dams with different discharge patterns[J]. *Ecological Indicators*,2021,133:108418.

[58] FENG J, LI R, LIANG R, et al. Eco-environmentally friendly operational regulation: an effective strategy to diminish the TDG supersaturation of reservoirs[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*,2014,18(3):1213-1223.

[59] FRIZELL K H, COHEN E. Structural alternatives for TDG abatement at Grand Coulee Dam[R]. Denver: Bureau of Reclamation Technical Service Center,2000.

[60] ENGINEERS U A C O. Chief Joseph Dam gas abatement study[R]. Seattle: US Army Corps of Engineers,2000.

[61] SHEN Xia, LI Ran, HUANG Juping, et al. Shelter construction for fish at the confluence of a river to avoid the effects of total dissolved gas supersaturation[J]. *Ecological Engineering*,2016,97:642-648.

[62] CHENG Xiaolong, LU Jingying, LI Ran, et al. Experimental study of the degasification efficiency of supersaturated dissolved oxygen on stepped cascades and correlation prediction model[J]. *Journal of Cleaner Production*,2021,328:129611.

[63] ANDRIOLO M V, ARAÚJO A N, FONTANELLI C, et al. Installation of deflector in Colider Dam to minimize the percentual of total dissolved gases[J]. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*,2023,28:e25.

[64] MA Qian, LIANG Ruifeng, LI Ran, et al. Operational regulation of water replenishment to reduce supersaturated total dissolved gas in riverine wetlands[J]. *Ecological Engineering*,2016,96:162-169.

[65] 顾洋,刘四华,黄翔,等. 河道型水库过饱和总溶解气体释放模型及应用研究[J]. *四川环境*,2021,40(2):88-95. (GU Yang, LIU Sihua, HUANG Xiang, et al. Prediction model and application study of supersaturated total dissolved gas release in channel reservoirs[J]. *Sichuan Environment*,2021,40(2):88-95. (in Chinese))

[66] POLITANO M, AMADO A A, BICKFORD S, et al. Evaluation of operational strategies to minimize gas supersaturation downstream of a dam[J]. *Computers & Fluids*,2012,68:168-185.

[67] 付小莉,沈超. 联合生态调度对超饱和气体影响的数值研究[J]. *水动力学研究与进展*,2016,31(1):99-106. (FU Xiaoli, SHEN Chao. Numerical study for the effect of joint ecological operation on the gas supersaturation[J]. *Journal of Hydrodynamics*,2016,31(1):99-106. (in Chinese))

[68] KAMAL R, ZHU D Z, MCARTHUR M, et al. Field study on the dissipation of supersaturated total dissolved gases in a cascade reservoir system[C]//World Environmental and Water Resources Congress 2016. West Palm Beach: American Society of Civil Engineers,2016.

[69] KAMAL R, ZHU D Z, CROSSMAN J A, et al. Case study of total dissolved gas transfer and degasification in a prototype ski-jump spillway[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2020,146(9):05020007.