文章编号：1000-7709(2021)12-0141-03

水利水电工程下泄水气体过饱和研究

邹艳苹[1,2]，付意成[2]，赵进勇[2]，王 琦[2]，张 晶[2]，彭文启[2]

（1. 重庆交通大学河海学院，重庆 400074；2. 中国水利水电科学研究院，北京 100038）

摘要：为缓解水利水电工程建设引起的河道下游水体总溶解气体(TDG)过饱和现象，系统梳理TDG过饱和的机理、影响因素，并针对不同成因、不同水利水电工程提出各类改善措施。研究表明，水利水电工程下游水中出现TDG过饱和主要与溢洪道、涡轮机等结构设计和设备有关，天然河流水温、压强等条件发生剧烈改变是导致下游水体TDG过饱和现象的主要原因，安装导流板、设计二道坝、合理布置泄水建筑物和发电厂房等结构、优化梯级水库运行调度、水流掺混、增加下泄水体含沙量可有效降低水利水电工程下游水体中TDG过饱和水平。基于自然解决方案(NbS)的生态应对策略，旨在消除该现象对河流生态造成的负面影响，为水资源合理开发及生态水利工程可持续发展提供参考。

关键词：水利水电工程；TDG过饱和；根源；致病机理；NbS

中图分类号：TV211.2 **文献标志码**：A

1 引言

水中总溶解气体(TDG)过饱和会导致鱼类患上气泡病甚至死亡。近年来，下泄水体TDG过饱和逐渐引起人们的广泛关注，并成为水利水电工程对生态环境影响的研究热点。目前，针对水利水电工程造成的下游水体中TDG过饱和的研究尚未形成理论体系，本文通过系统梳理水利水电工程下游水体TDG过饱和的产生机理、影响因素，基于NbS提出改善措施，旨在引起对该问题的广泛关注，从而推动利于生物保护的生态水利工程技术发展。

2 TDG过饱和机理

水体TDG过饱和是一种自然情况下就可能存在的状态，当温度或压强发生变化时，会打破水中所含气体的分压与它们各自在大气中的分压之间的平衡，造成水中TDG过饱和。此外，强烈光合作用产生过多氧气也会导致水中溶解气体过饱和。水中气体溶解度与压强正相关，压强越大，气体溶解度越大。因此，气体在水体中随着深度的增加，水压增大，气体溶解度增大。水中气体溶解度与水体温度负相关。温度升高时，水中气体分子动能增大、运动速率加快，气体就更容易从水中逸出，从而降低气体在水中的溶解度。藻类等水生植物进行强烈的光合作用，增加水中溶解氧含量，产生TDG过饱和现象。

3 水利水电工程TDG过饱和影响因子

水流从上游水库下泄进入下游河道时，如果水体来自水库表层，则下游水中出现TDG过饱和主要是因为下泄流量造成水－气掺混强度增大导致；如果水体来自水库深处，则水深变浅造成压强减小、水温升高造成溶解度减小、下泄流量造成水－气掺混强度加大共同导致了下游水中出现TDG过饱和。溢洪道泄流时，空气和水在溢洪道上发生混合，水流将大量气泡带到水体深处，该处由水深产生的静水压力远高于当地大气压，极大地增加了大气气体在水中的溶解量，使空气以足够的量与水混合从而产生气体过饱和水，导致下游水中出现TDG过饱和。水电站运行水体经过涡轮机时，气泡尺寸和数量发生变化，尺寸变小、数量增加，水体与气泡的交界面面积增大，溶解于

收稿日期：2021-05-18，**修回日期**：2021-06-25

基金项目：水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07105-002)

作者简介：邹艳苹(1996-)，女，硕士研究生，研究方向为水文学及水资源，E-mail：2654241631@qq.com

通讯作者：付意成(1983-)，男，博士、教授级高级工程师，研究方向为河流生态修复，E-mail：swfyc@126.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

水中的气体体积会有所增加；同时由于下游流量较天然水流状态发生均匀化，常水位增加，单宽流量增大，也导致 TDG 过饱和加剧。TDG 过饱和现象还具有累计效应，大渡河下游水体研究结果显示由于梯级电站的运行导致下泄水量和水深逐级增加，引起 TDG 累计效应，加速 TDG 过饱和的产生[1]。

因此，影响水利工程下泄水体中 TDG 含量的因素主要有上游水体 TDG 饱和度、下泄流量、压力水头、泄洪方式、尾水水深等，而以静水生态系统为主的湖(库)发生 TDG 过饱和主要与水体的水面温度、日照、风速、风力及水生植物类型等有关。

4 面向 NbS 的 TDG 过饱和缓解举措

水利水电工程下游水中 TDG 一旦达到过饱和状态要想自然恢复到正常水平是非常困难和缓慢的，依靠河水流动 100 千米才能将 TDG 过饱和度降低 6%～8%[2]。

基于自然解决方案(NbS)的措施是在传统生物多样性保护和管理战略的基础上，系统综合地整合科学、政策和实践，充分利用生态系统及其服务应对社会挑战的综合性措施[3]，NbS 在生态水文学领域被用作解决水生生态系统和环境问题的有效方法[4]。为了能够在满足各种生产生活用水的同时，降低水库下泄水气体饱和度，减轻水利水电工程对水生态水环境的不利影响，基于 NbS 提出 TDG 过饱和缓解措施非常必要。

4.1 工程措施

(1)溢洪道或消力池位置 TDG 过饱和。对于中小河流上修建的水利水电工程，在溢洪道设置导流板可有效缓解沿溢洪道进入消力池的空气夹带造成的下游水中 TDG 过饱和，其具有结构简单、重量较轻、体积较小的优势。导流板的作用是对水流产生顶托作用，使一部分水流到达更高的位置，达到分散射流的效果，阻止溢洪道上携带大量气泡的水流进入消力池深处，减少水流携带气泡的时间和到达的深度。Wanapum 大坝上安装导流板以防止下泄水流进入消力池深处，减少气体在水中溶解量，有效降低了下游水体 TDG 过饱和水平[5]。

对于新建大型水利水电工程可以修建生态友好型二道坝来缓解下游水体 TDG 过饱和[6]，这种坝体在坝顶设置闸门以控制溢流面上的下泄流量；在坝体末端设置连续式跌坎，平顺衔接过坝水流和下游水体，使 TDG 过饱和水体位于下游水体表面，增加水－气接触面积、加快水中气体的逸出速度；在坝体内部设置引水道并在引水道内安装贯流式水轮机，在发电的同时增强水体紊动强度降低下游水体 TDG 过饱和水平。通过溢流闸门控制水垫塘内水深，不仅可以保障消能安全，还可提高二道坝内水轮机的发电量，经济、社会效益显著：在增加经济效益的同时，通过低水头水轮机降低水体 TDG 过饱和度，减小下游河道水体 TDG 过饱和度，有效降低大坝泄洪造成的 TDG 过饱和对其下游水生生物的影响。

此外，操作闸门来减小射流的尺寸和流量，从而减小射流在进入尾水池的冲击力以降低射流的入水深度，可以缓解水中 TDG 过饱和现象；增加溢洪道表面的粗糙程度来增加水流的湍流强度，以便增强空气交换和水－空气界面的气体转移，可以降低水中 TDG 过饱和水平。

(2)尾水位置 TDG 过饱和。合理布设发电厂房和尾水通道，利用 TDG 饱和度低的发电尾水来掺混稀释下泄水流，可以降低下游水体 TDG 过饱和水平[7]。相关研究[7]表明，发电尾水和泄洪水流交汇角度对掺混效果、混合段长度和宽度有影响，合理发电尾水的汇入角度为 30°～90°。

尾水水深减少，辐射面增加可有效加速释放水中溶解气体。当下游尾水渠足够宽浅，可以按照明渠水流条件设计拥有足够水力梯度的尾水渠道，迫使水流在渠道内翻滚，从而增加暴露在空气下的水面面积，有效降低下游水体 TDG 过饱和水平。将 Ice Harbor 大坝(尾水深度在 3～5 m)和 Wanapum 大坝(尾水深度常保持在 12 m 左右)进行比较[5]：下泄水流在离开 Ice Harbor 大坝消能池后，水流进入较浅的尾水区并沿着河道扩散开来，大大增加了水面与大气的接触面积，更有利于溶解气体从高气压的水中溢出，下游 TDG 过饱和水平有明显下降；由于 Wanapum 大坝尾水深度相对较深，水流会带着气泡横穿整个尾水区，从而导致下游 TDG 过饱和水平并未明显下降。

4.2 非工程措施

(1)水库运行调节。对于梯级水利水电工程，水库优化调度是降低其 TDG 水平、缓解大坝溢流与鱼类保护矛盾的有效途径。巴拉水库位于大渡河源头足木足河，上游是落差高达 242 m 的下尔呷电站，下游是落差达 138 m 的巴拉电站，二者泄水建筑物主要包括表面溢洪道和底部溢洪道。利用横向平均二维模型对巴拉水库的几种运行调节方式进行模拟研究(表 1)[8]，从巴拉水库最大 TDG 过饱和水平和 TDG 过饱和高达 130%

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　巴拉水库运行调节方式

Tab. 1　Operation regulation mode of Bala Reservoir

运行调节方式	下尔呷电站				巴拉电站			巴拉水库最大 TDG 过饱和水平/%	巴拉水库 TDG 过饱和水平超过 130%的面积比例
	泄洪结构	泄洪方式	泄洪流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	下泄水 TDG 过饱和水平/%	泄洪结构	泄洪方式	泄洪流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)		
1	表面溢洪道	连续 12 h	1 710	141	表面溢洪道	连续 12 h	1 710	136.2	约 50%
2	表面溢洪道	间歇 12 h	1 710	141	表面溢洪道	间歇 12 h	1 710	135.3	约 30%
3	底部溢洪道	连续 12 h	1 710	141	底部溢洪道	连续 12 h	1 710	136.8	约 70%

及它们所占模拟区域面积百分比两个方面对比发现,与连续泄洪相比,间歇泄洪能更好地消除 TDG 过饱和;表面溢洪道比底部溢洪道更有利于 TDG 过饱和水平的降低。

(2)水流混掺。对于下游有支流汇入的水利水电工程,可充分利用其混掺效应降低 TDG 过饱和。也可人为创造条件利用周边蓄水、引调水设施引入 TDG 饱和水平相对较低的客水,以综合下泄水流中的 TDG 过饱和水平。对二滩大坝泄水期间雅砻江与金沙江汇口上下游 TDG 变化进行观测,结果表明二滩泄水产生的过饱和水流自雅砻江汇入金沙江后,由于金沙江水流的稀释作用,汇合后的 TDG 饱和度明显减小,且 TDG 浓度变化符合流量加权平均的混合公式[9]:

$$C=(C_1Q_1+C_2Q_2)/(Q_1+Q_2) \quad (1)$$

式中,C 为混合后 TDG 饱和度,%;C_1、C_2 分别为混合前干、支流 TDG 饱和度,%;Q_1、Q_2 分别为混合前干、支流流量,m^3/s。

(3)增加水体含沙量。水体中泥沙颗粒的存在会促使水中溶解气体快速变为游离态并聚集,之后以气泡形式上浮到空气中,从而脱离水体,使水中 TDG 过饱和水平有所降低[10]。我国多高含沙河流,为缓解下泄水中 TDG 过饱和状态,在大坝泄洪时,可考虑同时打开排沙孔闸门,增加下泄水体中的泥沙含量,提升水体紊动强度,加快水中 TDG 的释放速度。

5　结论

a. 温度升高降低气体在水中的溶解度,造成水中 TDG 过饱和现象;环境压力增加,给定水体体积溶解更多的大气气体,使水中溶解气体过饱和。

b. 影响水利工程下泄水体中 TDG 含量的因素主要有上游水体 TDG 饱和度、下泄流量、压力水头、泄洪方式、尾水水深等;而以静水生态系统为主的湖(库)等发生 TDG 过饱和主要与水体的水面温度、日照、风速、风力及水生植物类型等有关。

c. 对溢流坝体、溢洪道、尾水渠采用合理结构可有效缓解和降低下泄水体中 TDG 含量;优化水库运行及泄洪方式是降低水中溶解气体过饱和水平的有效途径,间歇泄洪、增加水体混掺效应及水体含沙量能够快速降低流过水体的 TDG 过饱和水平。

d. 水利水电工程引起的各类水流过饱和现象导致河流湖库生态系统恶化问题不容忽视,但目前对于该问题尚处在研究阶段,本文提出和汇总的各种缓解措施效果还无法量化和系统评估,后续仍有大量研究工作,也期待相关强制和规范性文件尽快出台。

参考文献:

[1] FENG JINGJIE, WANG LIN, LI RAN, et al. Operational regulation of a hydropower cascade based on the mitigation of the total dissolved gas supersaturation[J]. Ecological indicators, 2018, 92:124-132.

[2] 张庆明. 一个环境问题——水中溶解气体过饱和现象[J]. 环境科学,1985,6(5):27-30.

[3] 杨崇曜,周妍,陈妍,等. 基于 NbS 的山水林田湖草生态保护修复实践探索[J]. 地学前缘,2021,28(4):25-34.

[4] EGGERMONT H, BALIAN E, AZEVEDO J M N, et al. Nature-based solutions: new influence for environmental management and research in Europe [J]. GAIA-ecol. perspect. sci. soc., 2015, 24(4): 243-248.

[5] ORLINS J J, GULLIVER J S. Dissolved gas supersaturation downstream of a spillway Ⅱ: computational model[J]. Hydraul. res., 2010, 38(2):151-159.

[6] 戴会超,刘伟,蒋定国,等. 一种改善气体过饱和的生态友好型二道坝:CN202830898U[P]. 2013-03-27.

[7] 樊启祥,王小明,李嘉,等. 有利于降低水体气体过饱和的水利水电工程布置结构:CN105735211A[P]. 2016-07-06.

[8] FENG J J, LI R, LIANG R F, 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.

(下转第 155 页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2018.
[2] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(3):433-454.
[3] 裴向军,蒙明辉,袁进科,等. 干燥及饱水状态下裂隙岩石冻融特征研究[J]. 岩土力学,2017,38(7):1999-2006.
[4] 张峰瑞,姜谙男,江宗斌,等. 化学腐蚀－冻融综合作用下岩石损伤蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学,2019,40(10):3879-3888.
[5] 李玉成,陈有亮,孙浩程,等. 寒区花岗岩冻融损伤破坏的试验研究[J]. 工业建筑,2019,49(7):83-88,107.
[6] 张慧梅,彭川,杨更社,等,刘慧. 冻融损伤岩石的强度准则研究[J]. 西安科技大学学报,2017,37(2):154-158.
[7] 张慧梅,王焕,张嘉凡,等. CT 尺度下冻融岩石细观损伤特性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2020,39(1):51-56.
[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准:GB/T 50123-2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
[9] HOEK E. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition [J]. Proceedings of the fifth North American rock mechanics symposium, 2002, 1:18-22.

Physical and Mechanical Properties and Strength Model of Rocks After Freeze-thaw Cycles

MIAO Fang-li[1], YAO Zhi-hui[2], ZHANG Ding[2]
(1. Zhengzhou University of Industrial Technology, Zhengzhou 451150, China;
2. China Construction Third Engineering Group Co., LTD., Wuhan 430000, China)

Abstract: In order to study the impact of freeze-thaw cycles on the physical and mechanical properties of rocks, a series of rock triaxial shear experiments were designed under different confining pressures and freeze-thaw cycles. The microscopic analysis was used to study the microstructure and minerals of rock samples after freeze-thaw cycles. The changing law of the composition is studied to explain the macroscopic mechanical behavior. The shear test shows that the strength of the sample gradually decreased with the increase of the number of freeze-thaw cycles while the Poisson's ratio showed an upward trend. The SEM results show that obvious pores and cracks appeared in the rock after the freeze-thaw cycles. The slice scan and XRD results show that the calcite and other minerals are also dissolved and lost, which leads to the continuous weakening of the mechanical properties of the rock. Based on mechanical tests and microscopic analysis, the Hoek-Brown empirical model was used to establish a rock strength criterion considering the effects of freeze-thaw cycles. The comparison between the simulation results and the experimental results shows that the criterion can better predict the weakening law of rock strength with the number of freeze-thaw cycles.

Key words: rock; freeze-thaw cycle; deformation; strength; micro-analysis; strength criterion

(上接第 143 页)

[9] 曲璐,李然,李嘉,等. 高坝工程总溶解气体过饱和影响的原型观测[J]. 中国科学:技术科学,2011,41(2):177-183.
[10] 冯镜洁,李然,唐春燕,等. 含沙量对过饱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.

Study on Supersaturation of Discharge Gas in Water Conservancy and Hydropower Projects

ZOU Yan-ping[1,2], FU Yi-cheng[2], ZHAO Jin-yong[2], WANG Qi[2], ZHANG Jing[2], PENG Wen-qi[2]
(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: This paper systematically summarized the mechanism and influencing factors of TDG supersaturation of downstream water body caused by water conservancy and hydropower project construction, and puts forward various improvement measures according to different causes and different water conservancy and hydropower projects. The phenomenon of TDG supersaturation in the downstream water of water conservancy and hydropower projects is mainly related to the structural design and equipment such as spillway and turbine, etc. The main reason for TDG supersaturation in the downstream water is the drastic change of water temperature and pressure in the natural river. The TDG supersaturation level in the downstream water of water conservancy and hydropower projects can be effectively reduced by installing diversion plates, designing the secondary DAMS, reasonably arranging drainage buildings and powerhouse structures, optimizing the operation of cascade reservoirs, mixing water flow and increasing the sediment concentration in the discharge water. To eliminate the phenomenon of the negative impact of the river ecology, the strategies of reasonable development of water resources and the sustainable development of ecological hydraulic engineering based on Nature-based Solutions (NbS) were provided in the paper.

Key words: water conservancy and hydropower projects; TDG supersaturation; reason; pathogenesis mechanism; NbS

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net