

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.02.008

过饱和总溶解气体释放过程预测

黄奉斌,李 然,邓 云,曲 璐

(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 通过室内试验,研究泄流水体中过饱和总溶解气体的释放过程,分析了影响气体从水中释放的主要因素。利用原型观测资料对已有的过饱和总溶解气体释放的数学模型进行验证,同时对释放系数公式进行了修正。在此基础上预测了金沙江某电站下游河段过饱和总溶解气体的沿程释放规律。

关键词 泄流水体 过饱和气体 总溶解气体 释放系数

中图分类号 :TV13 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)02-0029-03

Prediction of release process of supersaturated total dissolved gas //HUANG Feng-bin, LI Ran, DENG Yun, QU Lu(*State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

Abstract :The release process of supersaturated total dissolved gas (TDG) in discharge water was studied through the laboratory experiments. The main factors for the release of gas from water were analyzed. The existing mathematic models for the release of the supersaturated TDG were validated by use of the prototype observations. Simultaneously, the formulas for the release coefficients were modified. On such a basis, the developed model was employed to predict the release process of supersaturated TDG of river section downstream a hydropower station on Jinsha River.

Key words :discharge water ; supersaturated gas ; total dissolved gas ; release coefficient

水电工程在发挥其巨大经济和社会效益的同时,不可避免地会对环境产生不利影响。例如,在大坝泄洪时,伴随泄水产生的过饱和总溶解气体(TDG)导致水体中含有过量的气体,易引发鱼类气泡病,严重威胁它们的生存和繁殖。为了鱼类以及其他水生生物的生存和繁衍,大坝泄水产生的过饱和 TDG 应当得到有效的控制。1986 年美国环保局^[1]规定河流允许的 TDG 过饱和度为 110%。我国目前虽然没有相应的环境控制标准,但水体溶解气体过饱和问题将日渐突出并备受关注。1987 年,我国葛洲坝泄洪时下游水体中大量鱼类出现气泡病症状,并导致部分死亡。1994 年 6 月,新安江水库开闸泄流,导致距电站大坝 3 km 的建德市虹鳟场的虹鳟普遍患气泡病,因病致死的虹鳟占死鱼总量的 62.2%^[2],这些鱼类的死亡均与水中 TDG 过饱和有关。

为了定量预测和研究高坝下游 TDG 过饱和的影响程度和范围,需要对过饱和 TDG 在下游河道的输移释放规律进行研究。美国陆军工程兵团^[3]在

2005 年提出了纵向一维过饱和 TDG 释放模型。Politano 等^[4]、Weber 等^[5]用两相流模拟了溢洪道下游过饱和气体的释放过程。国内随着大量的高坝大库进入设计和建设阶段,也展开了过饱和 TDG 的相关研究,李然等^[6]、蒋亮等^[7-8]进行了过饱和 TDG 释放的室内试验以及理论分析研究,对二滩、大渡河等电站进行了原型观测和数值模拟。程香菊等^[9]采用数值模拟手段对葛洲坝电站下游过饱和 TDG 的沿程释放规律进行了初步探讨。但总体来说,由于下游河道内过饱和 TDG 原型观测资料缺乏,对河道内过饱和 TDG 释放过程的预测尚存在诸多困难和问题。

本文从室内试验、原型观测结果出发,探讨得到过饱和 TDG 沿程释放规律,并修正了过饱和 TDG 的纵向一维释放模型,该模型可用于定量预测过饱和 TDG 的释放过程。

1 室内机理试验研究

1.1 试验装置和试验条件

试验装置如图 1 所示。利用空气压缩机制造溶

基金项目 国家自然科学基金(50579043)

作者简介 黄奉斌(1985—),男,四川成都人,硕士研究生,从事环境水力学研究。E-mail :huangfengbin@live.cn

通讯作者 李然(1968—),女,河北无极人,教授,从事环境水力学研究。E-mail :liran@china.com

解气体饱和度约为 116% 的过饱和水体,容器尺寸为圆柱形,底面半径 15 cm,高 30 cm,水深 25 cm。水体中 TDG 饱和度测量采用加拿大 Point Four Systems Inc. 生产的 PT4 Tracker with TGP Smart Probe,将测得的水体中 TDG 的压力与当地标准大气压进行比较,得到水体中 TDG 的过饱和度,测量精度达到 0.1%。将探头和搅拌器固定于水面下 15 cm 处。控制搅拌器的不同转速,在转速 n 分别为 200 r/min, 400 r/min, 600 r/min 时测量 TDG 饱和度随时间的变化过程,所得结果如图 2 所示。

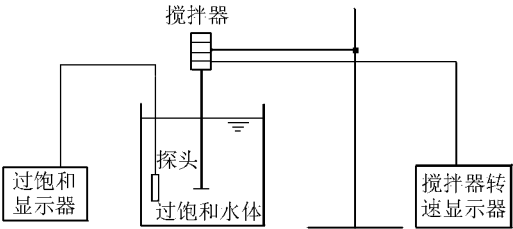


图 1 室内耗散机理试验装置

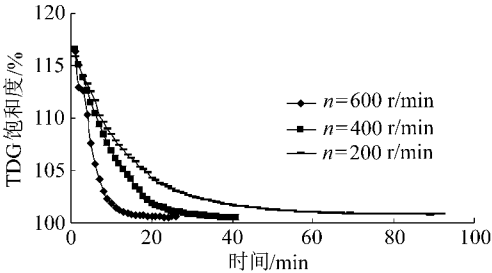


图 2 TDG 饱和度随转速及时间变化关系曲线

由图 2 可以看出,在初始时段水体过饱和 TDG 迅速下降,之后随着水体中 TDG 过饱和度的降低,耗散速率越来越慢,直至趋近于饱和状态;转速越大,紊动强度越大,耗散速度越快。转速为 600 r/min 时,水体在 26 min 后 TDG 降至 102%;转速为 400 r/min 时,水体在 41 min 后 TDG 降至 102%;转速为 200 r/min 时,需 91 min TDG 方能降至 102%。说明紊动是影响水体过饱和 TDG 释放的重要因素之一。

2 原型观测

四川大学 2007 年对黄果树瀑布下游白水河河道水体、二滩电站下游金沙江河道水体及铜街子电站下游大渡河河道水体开展了过饱和 TDG 释放的

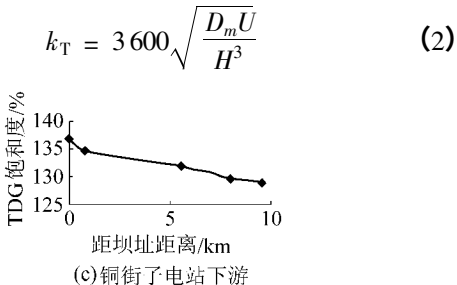
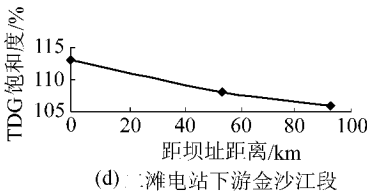
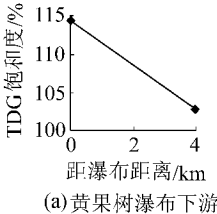


图 3 河道水体 TDG 释放过程曲线

原型观测。

图 3 为河道水体 TDG 的沿程释放过程。图 3(a)表明,观测期间黄果树瀑布下游河道内 TDG 饱和度较大,为 114.4%。水流经过约 4 km 的河道后,TDG 饱和度即衰减至 102.7%,平均每千米减小约 2.2%,可见该瀑布下游河道过饱和 TDG 释放速率相当快。分析原因,一是由于河道水浅,水流中的过饱和和溶解气体与大气充分交换所致;另外,河道内分布着多个小落差跌水,跌水有助于水体与大气的充分接触和质量交换,从而加速了过饱和 TDG 向大气中释放的速度。

图 3(b)表明,二滩电站坝下水流经过 93 km 河道后,TDG 过饱和度仅降低 7%,平均每千米减小约 0.075%。图 3(c)表明,铜街子电站下游 TDG 过饱和度最大值为 136.7%,水体经过 9.7 km 河道后 TDG 饱和度降低至 129%,平均每千米减小约 0.7%。可见,相对于金沙江的过饱和气体沿程释放速度,铜街子电站下游大渡河干流的过饱和气体释放速度较快。分析原因,铜街子电站下游河道的流速比二滩电站下游金沙江河道流速大而水深较小,因此加速了水体中 TDG 的耗散。由此说明在天然河道中,影响大坝泄洪时产生过饱和 TDG 耗散的主要因子是水深、紊动强度以及静水压强。由于试验装置内水体深度与河道的深度有一定差别,导致了容器内的净水压强比河道的静水压强小。

3 过饱和 TDG 释放的数学模型

关于过饱和 TDG 在下游河道的释放过程,美国陆军工程兵团曾提出过饱和 TDG 在下游河道的释放服从于一阶动力学过程。公式表述为

$$\frac{d(G - G_0)}{dt} = k_T(G_0 - G_{eq}) \tag{1}$$

式中: G 为计算时刻的 TDG 饱和度,%; G_0 为 TDG 初始饱和度,%; G_{eq} 为 TDG 平衡饱和度,%; t 为滞留时间,h; k_T 为释放系数, h^{-1} 。

在 Columbia 河上,美国陆军工程兵团把 k_T 的估算公式形式写为

$$k_T = 3600 \sqrt{\frac{D_m U}{H^3}} \tag{2}$$

式中： U 为断面平均流速， m/s ； H 为断面平均水深， m ； D_m 为 TDG 的分子扩散系数， m^2/s 。

k_T 估算公式(式(2))的局限在于其仅考虑分子扩散的作用，忽略了紊动扩散的作用，因此应用于大江大河时误差较大。

采用二滩电站下游金沙江干流河段和铜街子电站下游大渡河干流河段原型观测资料，对上述数学模型进行参数率定，得到金沙江干流河段和大渡河干流河段的 k_T 值分别为 $0.0678 h^{-1}$ 和 $0.2013 h^{-1}$ ，相关系数 R^2 分别为 0.9995 和 0.9694 。率定结果如图 4 所示。

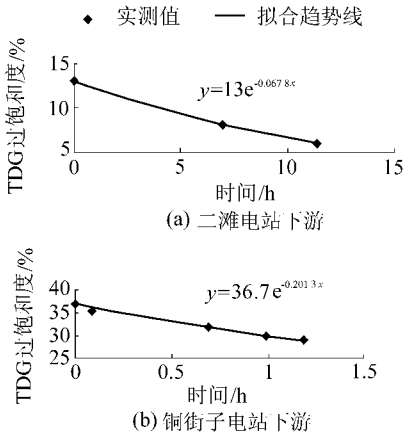


图 4 河道过饱和气体释放过程 k_T 率定关系

通过对天然河道原型观测值进行拟合，得出金沙江干流河段和大渡河干流河段饱和 TDG 沿程 k_T 分别为 $0.0678 h^{-1}$ 和 $0.2013 h^{-1}$ 。金沙江干流河段深度比大渡河干流河段大，而流速较小，因此金沙江干流过饱和 TDG 释放系数比大渡河小。

根据冯镜洁等^[10]对金沙江、澜沧江、岷江、长江等多条河流过饱和 TDG 释放过程的原型观测成果，考虑分子扩散作用以外的紊动作用等在过饱和 TDG 释放过程中的作用，对 k_T 的估算公式进行修正，得到

$$k_T = 3600 \sqrt{\frac{\varphi_T U}{H}} \quad (3)$$

式中： φ_T 为考虑分子扩散、紊动扩散作用等的综合系数，量纲为 T^{-1} 。

采用式(3)计算得到金沙江、大渡河原型观测河段的 φ_T 分别为 $4.43 \times 10^{-10} s^{-1}$ 和 $3.13 \times 10^{-9} s^{-1}$ 。

4 某电站下游过饱和 TDG 沿程释放预测

金沙江中游某待建电站最大坝高 138 m，泄洪建筑物由左岸溢洪道和厂房左右两侧的泄洪冲沙底孔组成。根据相关研究成果，该电站通过表孔挑流单泄流量 $2188 m^3/s$ 时，坝下生成的最大 TDG 饱和度为 122.5%^[11]。不考虑下游河道支流汇入情况，采

用前述过饱和 TDG 释放模型对下游过饱和 TDG 水流沿程释放过程进行预测。

预测模型采用式(1)，其中 k_T 根据式(3)计算得到。 φ_T 的取值参照前述金沙江河道原型观测率定的成果 $4.43 \times 10^{-10} s^{-1}$ 。沿程断面平均流速和平均水深采用纵向一维计算软件 HEC-RAS 计算得到，由此得到过饱和 TDG 释放系数的沿程变化情况，如图 5 所示，预测得到坝下游 TDG 饱和度的沿程衰减过程如图 6 所示。计算结果表明：经过 100 km 的天然河道后，水体 TDG 饱和度从 122.5% 降至 115%；经过 172 km 后 TDG 饱和度降至 110%。可见，该工程泄洪产生的 TDG 过饱和的水体在下游河道的释放速度较慢，影响范围较大，需要进一步采取措施减缓水体中过饱和 TDG 对鱼类的影响。

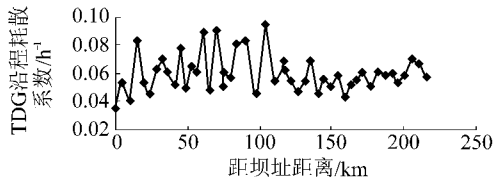


图 5 下游河道 k_T 沿程变化

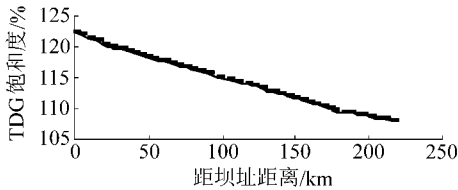


图 6 下游河道 TDG 饱和度的沿程变化

5 结 语

电站泄洪造成的下游水体中 TDG 过饱和问题是水电开发的环境影响所面临的一个重要问题。过饱和 TDG 沿程释放规律研究是客观公正地预测和评价水体中过饱和 TDG 对水生生态影响的重要基础。本文在室内机理试验研究和对二滩电站下游河道、铜街子电站下游河道原型观测的基础上，对过饱和 TDG 沿程释放的定量预测进行探讨，研究发现水深、静水压强以及紊动强度是影响气体释放的主要因素。过饱和 TDG 释放速率随水体深度的增加而减小，随紊动强度的增加而增大。并且过饱和 TDG 释放过程随时间的推移逐渐减慢。

本文预测研究对定量评价水体中 TDG 的过饱和程度具有重要意义。由于过饱和 TDG 释放研究起步较晚，室内试验和原型观测资料还需要在今后进一步完善和丰富。

本文采用的过饱和 TDG 释放预测模型没有考虑泄水的非恒定过程。同时过饱和 TDG 释放除了受流速的影响外，还要受温度、含沙量、(下转第48页)

为负效应。例如,若 E_T 固定为 250 mm,当化肥投入量由 45 kg/hm² 增加到 375 kg/hm² 时,化肥投入量的边际效应由 2.66 下降到 1.73。 $\frac{\partial y}{\partial x_1}$ 值的大小表示了 E_T 的边际效应。在化肥投入量一定的情况下, $\frac{\partial y}{\partial x_1}$ 随着 E_T 的增加而增加。但由于一次项系数很小,所以可以认为 $\frac{\partial y}{\partial x_1}$ 基本保持不变。也就是说,在化肥投入量一定的情况下,产量与 E_T 的关系可以近似为直线关系。

b. 水肥耦合效应。水肥生产函数的交叉项化肥的系数为正表明,水肥耦合效应表现为对产量的协同作用,该作用能促进产量的提高。增加化肥投入量有利于提高作物水分利用效率,反之亦然。

5 结 语

用多元非线性回归方法分析水分、肥料对冬小麦产量的耦合影响,结果表明,只有当水分和肥料合理搭配时才能充分发挥它们的作用。多元回归分析时,最小二乘回归可正确地估计模型参数。利用该方法建立了北京市水利科学研究所永乐店灌溉试验站 1999 ~ 2000 年的水肥生产函数回归模型。

模型的模拟结果表明该模型参数估计合理。对模型的分析表明, E_T 和化肥 2 个因素都具有明显的增产效应。在化肥投入量不变的情况下,作物的水分利用效率随着耗水量的增加而有所增加,在作物

耗水量保持不变的情况下,作物肥料利用效率随着肥料投入量的增加而下降。在一定范围内,增加化肥投入量能够提高作物产量,但在一定范围之外增加化肥投入会引起作物减产。

参考文献：

[1] 翟丙年,李生秀.冬小麦产量的水肥耦合模型[J].中国工程科学,2002,4(9) 69-74.
[2] 张凤翔,周明耀等,郭凯泉.水肥耦合对冬小麦生长和产量的影响[J].水利与建筑工程学报,2005(2) 24-26.
[3] 沈荣开,张瑜芳,黄冠华.作物水分生产函数与农田非充分灌溉研究述评[J].水科学进展,1995,6(3) 249.
[4] OZSABUNCUOGLU I H. Production functions for wheat : a case study of Southwestern Anatolian Project (SAP) Region [J]. Agricultural Economics,1998(18) 75-87.
[5] 徐学选,穆兴民.小麦水肥产量效应研究进展[J].干旱地区农业研究,1999,17(3) 6-12.
[6] 周纪芾.回归分析[M].上海:华东师范大学出版社,1993 33-50.
[7] 薛薇.SPSS 统计分析方法及应用[M].北京:电子工业出版社,2004.
[8] 康绍忠,胡笑涛,蔡焕杰,等.现代农业与生态节水的理论创新及研究重点[J].水利学报,2004(12) 1-7.
[9] 胡庆芳,尚松浩,温守光.萧河冬小麦水肥生产函数偏最小二乘回归建模及分析[J].节水灌溉,2006(1) 1-4.
[10] 薛亮.夏玉米分根交替灌溉施肥的水肥耦合效应研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2008.

(收稿日期 2009-04-08 编辑 高建群)

(上接第 31 页)

河道地形等条件的影响。为了进一步完善纵向一维过饱和 TDG 释放预测模型,需积累更多的过饱和 TDG 原型观测资料,并对 k_T 及 φ_T 的取值范围作进一步率定。同时,可以对泄水的非恒定流特征进行研究,并开展二维或三维天然河道释放过程预测,进一步完善过饱和 TDG 沿程释放模型。

参考文献：

[1] US Environment Protection Agency. Quality criteria for water [R]. Washington, D. C. :Environment Protection Agency, 1986.
[2] 谭德彩.三峡工程致气体过饱和对鱼类致死效应的研究[D].重庆:西南大学,2006.
[3] US Army Corps of Engineers. Technical analysis of TDG processes [R]. Jacksonville District :US Army Corps of Engineers-Northwest Division, Environmental Resources and Fish Planning Offices,2005.
[4] POLITANO M, CARRICA P, TURAN C, et al. Prediction of the total dissolved gas downstream of spillways using a two-

phase flow model[C]. World Water Congress. [s.l.]. 2004.
[5] WEBER L, HUANG H, LAI Y, et al. Modeling total dissolved gas production and transport downstream of spillway : three-dimensional development and application [C]. IAHR&INBO [s.l.], 2004.
[6] LI Ran, LI Jia, LI Ke-feng, et al. Field observation of total dissolved gas supersaturation of high dams [C]. 33IAHR Congress. [s.l.], 2008.
[7] 蒋亮,李嘉,李然,等.紫坪铺下游过饱和和溶解气体原型观测研究[J].水科学进展,2008,19(3) 367-371.
[8] 蒋亮,李然,李嘉,等.高坝下游水体中溶解气体过饱和和问题研究[J].四川大学学报:工程科学版,2008,40(5) : 69-73.
[9] 程香菊,陈永灿.大坝泄洪下游水体溶解气体超饱和和理论分析及应用[J].水科学进展,2007,18(3) 346-350.
[10] 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.
[11] 李然,李嘉,李克锋,等.高坝工程总溶解气体过饱和和预测研究[J].中国科学,2009,39(12) 1887-2006.

(收稿日期 2009-10-28 编辑 高建群)