



高坝工程总溶解气体过饱和影响的原型观测

曲璐, 李然*, 李嘉, 李克锋, 邓云

四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065

* E-mail: liran@scu.edu.cn

收稿日期: 2010-06-20; 接受日期: 2010-11-10

国家自然科学基金(批准号: 50979063)资助项目

摘要 高坝泄水对环境的不利影响之一是会产生总溶解气体(TDG)过饱和, 导致鱼类患气泡病甚至死亡. 本文通过对紫坪铺、三峡、二滩、漫湾、大朝山、龚嘴和铜街子等工程的观测, 探讨了影响高坝工程过饱和 TDG 生成与释放大过程的主要因素. 其中, 消能方式、泄洪流量与泄水建筑物的布置是影响过饱和 TDG 生成的主要因素, 发电尾水的掺混作用可有效降低坝下 TDG 过饱和度, 而支流汇入、水深、紊动是影响 TDG 过饱和沿程释放的重要因素. 观测结果还表明泄水期间 TDG 过饱和度垂向、横向分布存在规律. 研究对积累高坝 TDG 原型观测经验, 评价其对环境的影响具有重要意义, 可为 TDG 过饱和问题的理论研究提供基础数据和参考依据.

关键词

高坝
总溶解气体过饱和
原型观测

水利工程的不利环境影响之一就是泄水时可能导致坝下总溶解气体(total dissolved gas, 简称 TDG)过饱和, 进而致使鱼类患气泡病甚至死亡. 随着国家西部大开发和“西电东送”战略的实施, 紫坪铺、溪洛渡、向家坝和锦屏等一批高坝或超高坝已建或在建之中, 并且还将新建一批如双江口、白鹤滩等坝高在 200 m 以上的高坝. 因此, 我国高坝泄水导致的 TDG 过饱和问题将日渐突出, 开展高坝下游 TDG 过饱和研究, 特别是已建高坝工程的原型观测具有特别重要的现实意义和理论价值.

国外关于坝下 TDG 过饱和问题的研究开展较早^[1,2], 成果也较丰富. 但多针对于 50 m 以下中低水头特定水利工程的 TDG 过饱和问题, 成果通用性较差. 由于我国许多大坝工程为 50 m 以上的高坝、超高坝, 坝高、泄洪流量、掺气消能等工程特性与国外中低坝有着很大不同, 因此国外许多相关研究成果尚不能直

接应用. 我国虽在 20 世纪 80 年代葛洲坝工程的初期运行中就已注意到了工程泄水导致的溶解气体过饱和问题的不利影响, 并开展了初步的调查工作^[3], 但之后一直没有对此进行深入系统的研究. 随着三峡工程蓄水发电及越来越多的高坝工程的投入运行, 过饱和问题近年来再次被人们普遍关注. 目前我国对溶解气体过饱和生成与释放大过程的研究尚处在起步阶段, 已建高坝工程溶解气体过饱和和原型观测, 特别是对 TDG 的观测工作开展较少, 同时缺乏深入系统的对过饱和 TDG 生成与释放大过程的机理研究, 更没有开展对过饱和 TDG 消减措施特别是工程措施的研究. 据了解, 在我国已建、在建或待建高坝工程的环境影响评价中, 多数工程没有对其坝下溶解气体过饱和和影响进行评价, 少数工程虽进行了初步评价, 但仅局限于粗浅的分析, 没有进行深入系统的研究. 受独特的气候、地理及历史等因素的影响, 我国许多

河流水生生物具有特有程度高、物种数量大等特点, 由此决定了不同河流的鱼类对 TDG 过饱和环境的耐受性差异较大. 但我国在关于高坝下游过饱和 TDG 对下游水生生物的影响研究中, 尚缺乏水生生物对过饱和 TDG 耐受性的深入研究.

1 高坝泄水 TDG 原型观测

1.1 研究对象的确

众多关于鱼类气泡病的研究分析^[4,5], 水体中溶解氧(DO)、溶解氮或 TDG 过饱和均可导致鱼类患气泡病, 但水中 TDG 过饱和较单一的溶解氮或溶解氧过饱和更容易导致鱼类气泡病. 近年来国外关于坝下溶解气体过饱和的研究中, 也将 TDG 作为研究对象. 我国由于对这一问题认识较晚, 同时缺乏便于工程中应用的 TDG 观测仪器, 因此以往关于溶解气体过饱和的研究中均以溶解氧作为研究对象^[5,6]. 2006 年四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室先后购进了美国 YSI 公司及加拿大 PT4 公司生产的 TDG 测定仪, 开始了以 TDG 为研究对象的原型观测和理论研究^[7]. 以下主要为结合已建高坝工程泄水开展的 TDG 原型观测成果的总结分析.

1.2 影响大坝泄水 TDG 过饱和因素的分析

美国陆军工程兵团(U.S. Army Corps of Engineers)

曾根据对 Columbia 河及其支流 Snake 河上 TDG 的研究成果, 对 TDG 产生过程及其影响因素进行了总结分析^[8], 认为大坝泄水时, TDG 的迅速生成过程通常发生在水垫塘内. 这是由于水垫塘内气体浓度、水流深度、流速和紊流强度都很高, 气体被卷吸从而溶解在水体中. 而当水流进入尾水渠后, 质量传输过程则相反, 气体开始从水体释放到大气中. 根据 2006~2009 年对紫坪铺、三峡、二滩、漫湾、大朝山、龚嘴和铜街子大坝泄水时 TDG 过饱和和观测成果, 总结认为泄流消能方式、泄水建筑物的布置与泄洪流量是影响 TDG 过饱和生成过程的主要因素, 发电尾水中 TDG 饱和度与坝前水体中 TDG 饱和度差异不大, 发电尾水的掺混对于稀释坝下 TDG 过饱和度具有一定作用. 图 1 为原型观测工程地理位置示意图.

1.2.1 泄流消能方式对 TDG 过饱和生成的影响

大坝消能的主要方式有挑流消能、面流消能、底流消能. 其中水头比较高的 70 m 以上高坝应用挑流的有 80%; 而中、低水头工程多采用面流消和底流消能. 四川大学在 2006 到 2009 年间, 先后对多个大坝泄水时进行了 TDG 过饱和生成的原型观测, 表 1 为大坝泄水时过饱和 TDG 的观测结果.

根据原型观测结果, 四川大学建立了挑流消能时水垫塘内 TDG 生成的数学模型^[9]:

$$G_k = G_{eq} + \frac{1}{2} \frac{\Delta \bar{P}_k}{P_0} \phi_2 G_{eq} \exp \left[-k_k \left(\frac{h_k}{h_t} \right)^{3/2} \right], \quad (1)$$

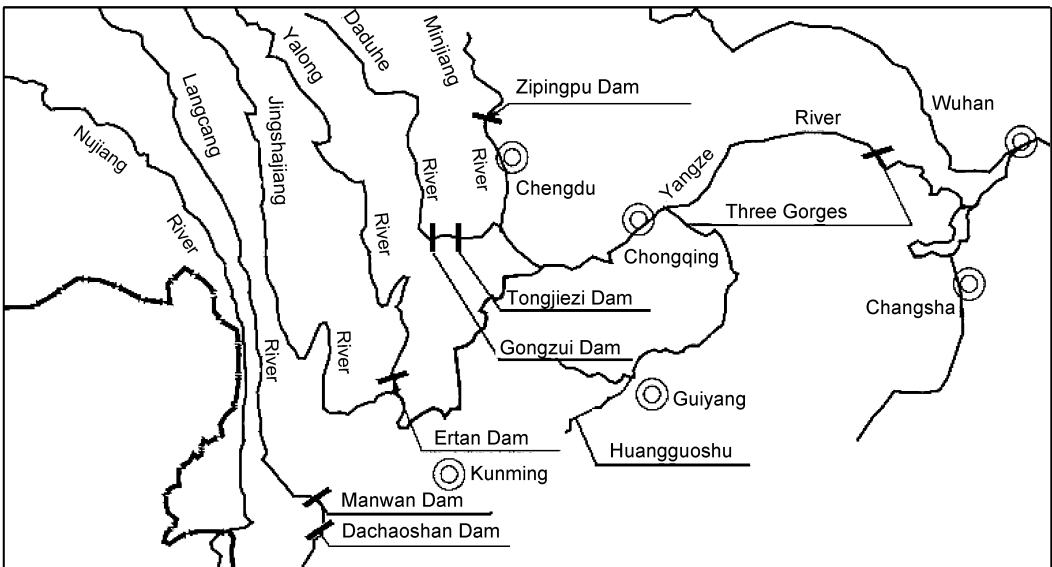


图 1 原型观测工程地理位置示意图

表 1 大坝泄水时过饱和和 TDG 观测结果表

Case No.	Project	Location of the observed section	Energy dissipation	Spill rate (m³/s)	Power flow (m³/s)	TDG level (%)
1	Three Gorges	4000 m downstream the dam	Ski-jump energy dissipation	20200	15600	138.0
2	Ertan	3000 m downstream the dam	Ski-jump energy dissipation	3706	1809	140.0
3	Zipingpu	Rainbow Bridge downstream the dam	Ski-jump energy dissipation	340	0	114.9
4	Manwan	Downstream stilling basin export	Ski-jump energy dissipation	1810	1927	124.0
5	Dachaoshan	Bridge downstream the dam	Ski-jump energy dissipation	830	2120	116.0
6	Gongzui	Gongdian Bridge downstream the dam	Surface flow energy dissipation	2642	1580	142.5
7	Tongjiezi	Stilling basin export	Underflow energy dissipation	317	1920	138.7

式中, G_k 为水垫塘出口下游 TDG 饱和度(%); G_{eq} 为当地大气压强相应的平衡饱和度(%); $\Delta \bar{P}_k$ 为水垫塘底板平均相对压强(kPa); P_0 为当地大气压强(kPa); ϕ_2 为修正系数; k_k 为水流流经二道坝时的 TDG 释放系数; h_k 为二道坝高(m); h_t 为二道坝上水深(m).

当大坝采用面流消能或底流消能时, 压强修正系数 ϕ_2 和水流流经二道坝时的 TDG 释放系数 k_k 的取值范围会因为压强、水深、紊动强度的改变而改变, 参数的选取需要进一步的大量原型观测数据来进行研究验证.

1.2.2 泄水流量对 TDG 过饱和和生成的影响

图 2 绘出了紫坪铺观测期间某时段内泄洪洞流量及彩虹桥(坝下 500 m)和柏条河(约坝下 9 km)TDG 饱和度随时间的变化过程. 可以看出, 下游河道 TDG 饱和度变化过程随着下泄流量的变化而变化, 且变化趋势一致. 随着沿程水流的输移扩散作用, 愈往下游, TDG 变化幅度愈小.

图 3 为三峡工程泄水期间 TDG 饱和度与泄洪流量的关系. 可以看出, TDG 饱和度随泄洪流量增大而增大. 图4为龚嘴泄洪流量与发电流量的比值和 TDG 饱和度的关系. 可以看出, 在汛期发电流量基本不变时, TDG 饱和度随泄洪流量增大而增大. 结果表明, TDG 饱和度与泄洪流量(或泄洪流量与发电流量的比值)在一定范围内近似线性相关. 但由于三峡工程观测期间泄洪流量值分布较为集中, 较小和较大流量时观测数据较少, 因此其线性相关结果有待今后通过观测数据的积累进一步完善.

分析 TDG 饱和度与泄洪流量的关系认为, 泄洪流量增大时, 水垫塘内紊流强度更高, 导致水体内部 TDG 承受平均压强更大, TDG 浓度更高, 所以水垫塘

内生成的过饱和水体与发电尾水掺混后的水体中的 TDG 过饱和度也越高.

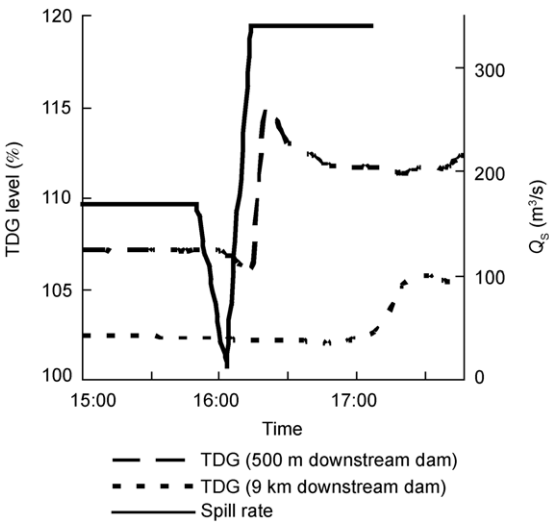


图 2 紫坪铺泄水流量及下游 TDG 饱和度随时间变化过程

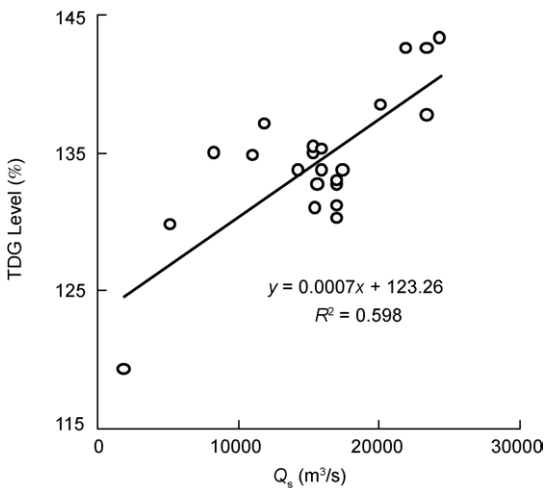


图 3 三峡泄水期 TDG 饱和度与泄洪流量关系图

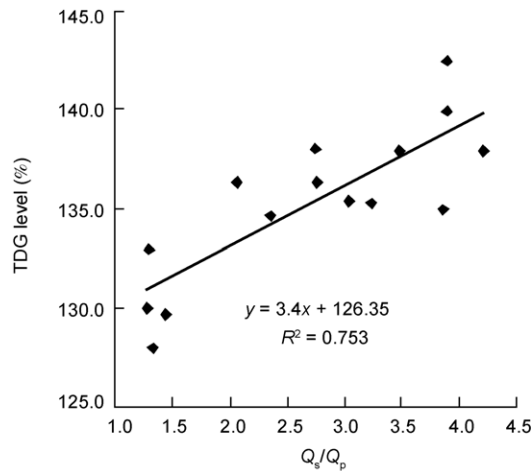


图4 龚嘴 TDG 饱和度与 Q_s/Q_p 关系图

1.2.3 泄水建筑物布置方式对 TDG 过饱和生成的影响

在对采用挑流消能的大坝泄水观测中发现, 尽管其消能方式相同, 但是由于泄洪建筑物的布置方式的不同, TDG 饱和度的差异很大. 以二滩为例, 通过表 2 的观测数据可以看出, 在汛期发电流量相差不大时, 当工况 1 采用 3#、4#、5#表孔及 2#泄洪洞同时泄水, 泄洪流量为 3622 m³/s, 坝下观测到的总溶解气体饱和度最大值为 127.9%; 当改由 2#泄洪洞泄水, 泄水流量减小到约为工况 1 的一半时, 坝下观测到的 TDG 饱和度仅下降了 5.2%; 而当工况 3 采用 1#泄洪洞泄水时, 泄水流量减小到 1261 m³/s, 坝下观

测到的总溶解气体饱和度反而增加, 最大值达到 140.0%. 由此说明, 坝下 TDG 过饱和度与泄水建筑物的泄洪布置方式密切相关.

二滩观测发现, 在相同泄洪和发电流量下, 泄洪洞泄洪产生的 TDG 过饱和水平高于其它泄洪建筑物. 分析认为, 不同泄水建筑物泄水过程中, 掺气过程及下游水体消能过程中压力、紊动等水动力学特性是影响其过饱和 TDG 产生水平的重要因素. 具体成因有待通过深入细致的水动力学模型试验或数值模拟进行揭示.

1.2.4 发电尾水对 TDG 过饱和生成的影响

为研究发电尾水生成 TDG 过饱和的影响, 观测了大渡河上龚嘴水电站和澜沧江上漫湾水电站的发电水体在坝前和尾水洞出口的 TDG 饱和度, 其中龚嘴水电站坝前 TDG 饱和度的测量点深度为发电进水口水深, 漫湾水电站由于仪器功能限制, 采用进水口表面 TDG 饱和度. 表 3 为在泄水期间对大渡河上龚嘴水电站的观测结果, 得到坝前发电进水口 TDG 饱和度为 111.9%, 坝下发电尾水 TDG 饱和度为 111.4%~112.9%, 坝上与坝下最大差值 1.0%. 表 4 为在泄水期间对澜沧江漫湾水电站的观测结果, 得到坝前 TDG 饱和度为 107.0%~110.0%之间, 坝下发电尾水 TDG 饱和度为 105.0%~109.0%, 坝上与坝下最大差值 3.0%. 研究显示通过发电下泄的水流饱和度较坝前没有明显的变化, 即发电流量对水体中 TDG 饱和度没有显著的影响. 在这种情况下, 发电尾水的 TDG

表2 二滩水电站过饱和 TDG 观测数据表

Case No.	Occurrence time	Operational pattern	Upriver: TDG level (%)	3000 m downstream the dam: TDG level (%)	Q_s (m ³ /s)	Q_p (m ³ /s)
1	2007.07.26	3 upper spillway and 2# spill tunnel	105.0	127.9	3622	1826
2	2007.07.27	2# spill tunnel	105.0	122.7	1892	1802
3	2007.07.27	1# spill tunnel	105.0	140.0	1261	1901

表3 龚嘴电站坝前与 1#尾水洞 TDG 饱和度观测结果

Case No.	Occurrence time	Location of the observed section	T (°C)	Atmospheric pressure (mmHg)	TDG level (%)	Remark
1	2009.08.03	Water inlet of upper reaches	15.8	712	111.9	Elevation of 494 m
2	2009.08.03	No.1# tail water exit	15.8	717	112.4	Surface
3	2009.08.04	No.1# tail water exit	16.5	716	112.9	
4	2009.08.04	No.1# tail water exit	16.6	716	112.2	
5	2009.08.05	No.1# tail water exit	16.1	718	112.2	
6	2009.08.06	No.1# tail water exit	15.8	717	111.4	
7	2009.08.06	No.1# tail water exit	15.8	717	112.1	

表 4 漫湾电站坝前与尾水洞 TDG 饱和度观测结果

Case No.	Occurrence time	Location of the observed section	T (°C)	Atmospheric pressure (mmHg)	TDG level (%)	Remark
1	2008.07.28	Tail water exit	19.9	711	105	Surface
2	2008.07.28	Upper reaches	19.9	717	107	
3	2008.07.29	Tail water exit	19.9	716	106	
4	2008.07.29	Upper reaches	19.9	716	109	
5	2008.07.30	Tail water exit	20.3	718	109	
6	2008.07.30	Upper reaches	19.9	717	110	

饱和度低于泄水时在冲坑、水垫塘处产生的 TDG 饱和度, 通过在坝下与泄洪流量的掺混作用, 可以起到降低水体中的 TDG 过饱和度的作用。

1.3 TDG 沿垂向分布

研究过程中, 对水体中 TDG 饱和度的垂向分布进行了原型观测. 图 5 为 2009 年龚嘴坝前 TDG 饱和度垂向观测结果, 龚嘴坝前 TDG 饱和度在 109.2%~113.9%之间. 图 6 为 2008 年澜沧江上的大朝山库区 TDG 饱和度垂向观测结果. 研究发现由于受到大坝泄水时下游河道地形及水流形态的影响, 泄洪期间 TDG 饱和度垂向上分布不均匀, 不均匀程度与工程泄水时的水动力学特性有关. 其中水体表面由于和空气接触, 饱和度一般较低, 而在水深达到一定深度后的 TDG 饱和度垂向上趋于稳定。

1.4 TDG 沿横向分布

从表 5 可以看出, 紫坪铺水库坝下 200 m 断面主流区域 TDG 饱和度略大于非主流区域, 观测得到的 TDG 饱和度最大差值约 1.4%; 三峡泄水期间坝下黄陵庙断面 TGP 横向分布不均匀, 主流岸饱和度高于

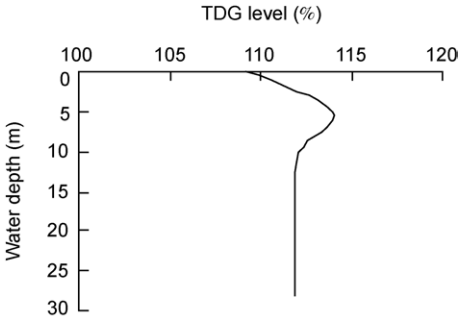


图 5 2009 年 8 月 3 日龚嘴坝前 TDG 饱和度垂向变化图

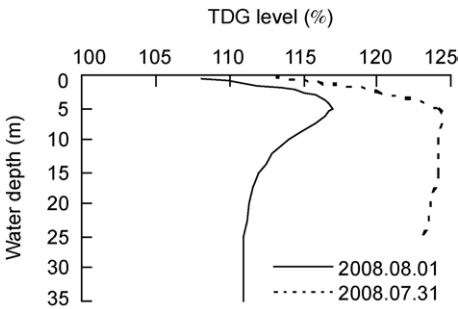


图 6 2008 年大朝山库区 TDG 饱和度垂向变化图

表 5 TDG 饱和度横向分布原型观测表

Case No.	Location of the observed section	Left TDG level (%)	Middle TDG level (%)	Right TDG level (%)	Max. difference (%)	Main current
1	200 m downstream the Zipingpu Dam	105.5	-	106.9	1.4	Middle
2	Rainbow Bridge downstream the Zipingpu Dam	104.7	106.0	105.5	1.3	Middle
3	Huanglingmiao downstream the Three Gorges	121.0	127.0	134.0	13.0	Right
4	Bridge downstream the Huangguoshu	110.1	111.4	107.4	4.0	Middle
		135.2	130.0	124.6	10.6	
		137.9	136.4	130.1	7.8	
5	Gongdian Bridge downstream the Gongzui Dam	130.7	125.3	124.2	6.5	Left
		138.1	132.9	125.2	12.9	
		127.3	135.0	141.2	13.9	
6	Section downstream the Tongjiezi Dam	129.0	129.0	140.9	11.9	Left power

非主流岸, 最大差值为 13.0%; 2007 年汛期对贵州黄果树大瀑布下游 TDG 观测表明, 泄水下游 200 m 断面上左右岸 TDG 饱和度最大差值约 4.0%; 2009 年汛期对大渡河上龚嘴水电站和铜街子水电站下游 TDG 观测也表明, 龚电大桥断面主流区域 TDG 饱和度大于非主流区域, 最大差值约为 12.9%; 大渡河上铜街子水电站主流区域 TDG 饱和度与非主流区域最大差值为 13.9%。

上述观测结果表明, 受大坝泄水沿河宽的横向不均匀分布及发电尾水掺混等因素影响, 坝下 TDG 沿横向呈现不均匀分布, 不均匀程度与泄水建筑物布置方式及下游水动力学特性有关, 其中主流区域 TDG 饱和度普遍大于非主流区域, 泄洪侧 TDG 饱和度普遍大于发电侧。

1.5 过饱和和溶解气体释放过程及其影响因素

各工程原型观测结果表明, 影响过饱和和溶解气体释放过程的主要因素有支流汇入、水深及紊动。

1.5.1 支流汇入对释放过程的影响

二滩大坝泄水期间, 对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:

$$C = (C_1 Q_1 + C_2 Q_2) / (Q_1 + Q_2), \quad (2)$$

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)。

1.5.2 水深对释放过程的影响

三峡观测结果表明, 三峡坝下 TDG 饱和度最大值为 143.0%, 坝下游约 600 km 的武汉观测到的 TDG 饱和度最大值为 117.0%, 说明长江河道过饱和 TDG 沿程恢复相当缓慢, 部分时段三峡泄水产生的过饱和和影响一直持续到武汉。观测期间, 三峡泄洪流量和坝下 TDG 饱和度在不断变化, 观测到的过饱和和气体影响范围也随之在三峡至武汉之间不断变化。二滩泄水观测结果同样表明, 除去雅砻江支流安宁河汇入的影响后, 过饱和 TDG 在二滩坝下雅砻江天然河道内的恢复过程相当缓慢, 至金沙江汇口附近时, TDG 饱和度仍大于 120.0%。分析长江河道及雅砻江

河道过饱和 TDG 衰减速率较慢的原因认为, 长江和雅砻江河道水深大, 底部水体承压大, 因此水体过饱和 TDG 不易形成气泡溢出。

根据 2006 年紫坪铺泄水原型观测结果, 过饱和 TDG 在坝下岷江河道内的衰减速率较快。图 7 为 2006 年 12 月 27 日紫坪铺泄水期间下游河道 TDG 沿程变化图。由图可以看出, 在约 40 km 的河道内, 过饱和 TDG 已基本恢复至正常饱和状态, 且 TDG 饱和度衰减速率随着距离的增加逐渐减小。在前 17 km 内 TDG 饱和度由 111.0% 衰减至 103.0%, 平均每公里衰减 0.4%, 在其后的 20 km 河段内, TDG 饱和度由 103% 衰减至 101.4%, 平均每公里衰减约 0.1%, 衰减速率明显减小。

分析紫坪铺下游河道过饱和和溶解气体恢复较快的原因, 主要是由于紫坪铺下游河道流量在坝下约 7 km 处经都江堰分水闸分流进入都江堰灌区, 灌区内各河流量明显减小, 水深变浅, 水体承压接近大气压, 加快了河道内过饱和和溶解气体的溢出。另外, 灌区内沟渠纵横交错, TDG 饱和度较高的水流与饱和度较低的水流混合, 加速了过饱和 TDG 的耗散。

1.5.3 紊动对释放过程的影响

为探讨 TDG 过饱和和水体在不同紊动条件下的释放过程, 在三峡和二滩电站泄水观测期间提取长江及雅砻江河道内过饱和水样, 在 2000 mL 烧杯内利用搅拌器进行搅拌实验, 通过控制搅拌器搅拌速度, 测量烧杯内 TDG 饱和度随时间的变化过程。图 8 为搅拌器转速在 200, 400, 800 r/min 三种情况下, 三峡坝下天然过饱和水样 TDG 饱和度随时间的变化过程。释放实验结果表明, 搅拌器转速愈大, 过饱和 TDG

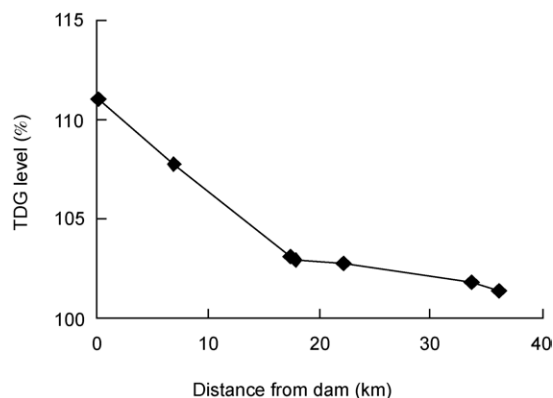


图 7 紫坪铺坝下河道 TDG 沿程变化

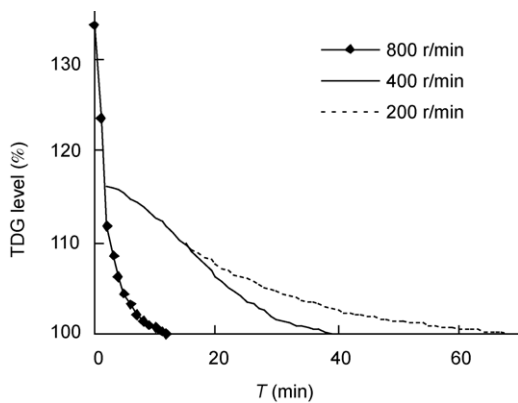


图 8 不同转速下 TDG 释放实验结果对比图

恢复释放过程愈快, 表明水体紊动特性是影响过饱和 TDG 恢复释放过程的重要因素. 水体紊动越强, 过饱和 TDG 恢复释放越快.

2 结论

2006~2009 年间对国内已建紫坪铺、三峡、二滩、

漫湾、大朝山、龚嘴和铜街子大坝工程 TDG 的原型观测结果表明, 大坝工程在泄水期间坝下均出现了不同程度的 TDG 过饱和现象. 研究认为, 泄洪消能方式、泄洪流量与泄水建筑物的布置方式是影响坝下过饱和和 TDG 生成的主要因素. 发电尾水中 TDG 饱和度与坝前水体中 TDG 饱和度差异不大, 发电流量通过在坝下与泄洪流量的掺混作用, 可以起到降低水体中的 TDG 过饱和度的作用. 泄洪期间 TDG 饱和度垂向、横向上分布不均匀, 不均匀程度与工程泄水及下游水动力学特性有关. 其中垂向上的表面饱和度一般较低, 而在水深达到一定深度后的 TDG 饱和度垂向上变化趋于稳定. 横向上主流区域 TDG 饱和度普遍大于非主流区域, 泄洪侧 TDG 饱和度普遍大于发电侧. 支流汇入、水深、紊动特性是影响过饱和 TDG 沿程恢复释放的重要因素. 研究对积累高坝 TDG 原型观测经验, 评价其对环境的影响具有重要意义, 可为 TDG 过饱和问题的理论研究提供基础数据和参考依据.

参考文献

- 1 Orlins J J, Gulliver J S. Dissolved gas supersaturation downstream of a spillway II: Computational model. *J Hydraulic Res*, 2000, 38: 151–159
- 2 Politano M, Carrica P, Turan C, et al. A multidimensional two-phase flow model for the total dissolved gas downstream of spillways. *J Hydraulic Res*, 2007, 45: 165–177
- 3 长江流域水资源保护局. 葛洲坝工程泄水与鱼苗气泡病调查, 1983
- 4 Weitkamp D E, Katz M. A review of dissolved gas supersaturation literature. *Trans Am Fisheries Soc*, 1980, 109: 659–702
- 5 谭德彩. 三峡工程致气体过饱和和对鱼类致死效应的研究. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2006
- 6 陈永柏, 彭期冬, 廖文根. 三峡工程运行后长江中游溶解气体过饱和和演变研究. *水生态学杂志*, 2009, 2: 1–5
- 7 蒋亮, 李嘉, 李然, 等. 紫坪铺坝下游过饱和和溶解气体原型观测研究. *水科学进展*, 2008, 19: 367–371
- 8 US Army Corps of Engineers. Technical Analysis of TDG Processes. US Army Corps of Engineers-Northwest Division, Environmental Resources and Fish Planning Offices, 2005
- 9 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. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2009, 39: 2001–2006