

DOI:10.12170/20200731002

曾晨军, 莫康乐, 关铁生, 等. 水库泄水总溶解气体过饱和对鱼类的危害 [J]. 水利水运工程学报, 2020(6): 32-41. (ZENG Chenjun, MO Kangle, GUAN Tiesheng, et al. Effect of total dissolved gas supersaturation on fish in the reservoir between cascade hydropower stations[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(6): 32-41. (in Chinese))

水库泄水总溶解气体过饱和对鱼类的危害

曾晨军, 莫康乐, 关铁生, 陈求稳, 李 婷, 张 辉

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 水库建设促进了库区渔业养殖的发展, 但高坝大库泄水导致的总溶解气体(Total Dissolved Gas, TDG)过饱和可能导致下游河道尤其下一梯级水库的鱼类患气泡病甚至死亡。为探究 TDG 过饱和对鱼类的胁迫效应, 以金沙江梯级电站溪洛渡至向家坝江段为研究对象, 构建立面二维 TDG 动态模型, 推求库区控制断面的安全水深阈值, 结合库区主要鱼类生活习性和网箱养殖深度, 研究 TDG 过饱和对野生鱼类和网箱养殖鱼类的胁迫效应。结果表明: 梯级电站库区的野生鱼类具有足够的垂向空间进行深度补偿以规避 TDG 过饱和的危害, 其生活习性以及利用深度补偿的能力决定了受饱和 TDG 胁迫的程度; 但养殖鱼类受网箱限制难以自由下潜至安全水深, 为保证养殖鱼类的安全, 网箱深度至少应大于安全水深阈值, 在 TDG 过饱和和胁迫期, 鱼类的游泳水深应持续限制在安全水深阈值以下。对于具有利用深度补偿能力的鱼类, 梯级电站的库区比最后一个梯级的下游河道更安全, 需要对最后一级电站实施比中间梯级更严格的坝下近区 TDG 饱和度限制标准。

关 键 词: 总溶解气体; 深度补偿; 安全水深; 网箱深度; 梯级电站

中图分类号: TV135

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2020)06-0032-10

河流建坝具有防洪、发电、航运、供水、灌溉等综合效益, 但对河流水生态环境也产生了一定影响^[1], 其中一个突出问题是坝泄水产生的水体总溶解气体(Total Dissolved Gas, TDG)过饱和。为了保证大坝安全, 通常需要将多余的来水下泄, 泄水时水流大量掺气, 在水垫塘内巨大的水压作用下, 大量气体溶解使水体 TDG 过饱和。由于 TDG 释放缓慢, 下游河道中水体的 TDG 长时间保持过饱和状态^[2]。高坝泄水具有“泄量大、水头高”的特点, 同时梯级水库的建设使得上一梯级的下游河道成为了下一梯级的库区, 由于库区水深增加、流速降低, 延缓了 TDG 的释放^[3], 导致 TDG 过饱和在梯级电站的河道中产生沿程累积效应^[4], 因此梯级高坝引发的 TDG 过饱和问题尤为突出。

当 TDG 饱和度超过大气压和静水压力之和时, 鱼类组织和体液中溶解状态的气体将析出形成气泡, 罹患气泡病, 对鱼类的生理和行为造成影响, 严重时会导致鱼类死亡^[5]。早在 1965 年, 关于哥伦比亚河 TDG 过饱和现象的研究就确定了其对鱼类有潜在的危害^[6]; 2014 年 7 月溪洛渡电站泄水也导致向家坝水库比较严重的鱼类死亡事件^[7]。鱼类可以承受的 TDG 饱和度与品种、体型、身体状况、游泳深度、过饱和持续时间及水温等因素有关^[8], 其中鱼类游泳深度对应的静水压力对 TDG 过饱和有补偿效应^[9]。以饱和度 100% 代表饱和状态水体时, 水深每增加 1 m, 可以补偿约 10% 的 TDG 饱和度^[10], 故深度的增加有助于减缓 TDG 过饱和对鱼类的胁迫。野外监测^[11]和室内试验^[12]均表明, 鱼类具有探测并利用深度补偿规避 TDG 过饱和和胁迫的能力, 即通过改变自身游泳深度至安全水深, 从而获得间歇性的深度补偿以避免气泡病

收稿日期: 2020-07-31

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0502205); 国家杰出青年科学基金资助项目(51425902); 国家自然科学基金资助项目(51879165, 51809175)

作者简介: 曾晨军(1990—), 男, 江西抚州人, 博士研究生, 主要从事生态水力学研究。E-mail: zcjing@163.com

通信作者: 陈求稳(E-mail: qwchen@nhri.cn)

的发生。但是,部分鱼类需要在 TDG 饱和度达到一定的阈值时才会出现躲避行为^[13]。此外,受网箱的限制,养殖鱼类最大游泳深度为网箱深度,在出现 TDG 过饱和情况时无法自由下潜,因而存在更大的风险,而网箱养殖如何才能实现有效规避过饱和 TDG 的影响目前尚缺乏相关依据。

本文通过建立库区立面二维 TDG 动态模型,结合目标鱼类安全水深阈值,分析 TDG 过饱和对库区野生鱼类和网箱养殖鱼类的可能危害,为梯级高坝大库生态调度和下游渔业养殖适应性管理提供科学依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域为金沙江下游溪洛渡水电站至向家坝水电站江段,总长约 156 km(图 1)。溪洛渡水电站于 2013 年 5 月下闸蓄水,设有 7 个泄洪表孔、8 个泄洪深孔,坝后设水垫塘和二道坝,左右两岸共布置了 4 条泄洪洞,泄洪建筑物的设计和校核洪峰流量为 43 700 m³/s($P=0.1\%$)和 52 300 m³/s($P=0.01\%$)^[14]。向家坝水电站是金沙江梯级水电开发的最末一个梯级,于 2012 年 10 月下闸蓄水,泄水建筑物由 10 个中孔和 12 个表孔组成,设计和校核洪峰流量分别为 41 200 m³/s($P=0.2\%$)和 49 800 m³/s($P=0.02\%$)^[15]。向家坝库区回水范围至溪洛渡坝址,为典型的山区狭长河道型水库^[16]。研究区域渔业资源丰富,向家坝蓄水后 2015 年渔业资源调查显示,库区中部绥江县附近采集鱼类共 60 种,分别隶属于 5 目 12 科,其中包含长江上游特有鱼类 12 种^[17],如圆口铜鱼、长鳍吻鲈、齐口裂腹鱼等。

为研究溪洛渡水电站泄水导致的 TDG 过饱和对鱼类的胁迫效应,以 2014 年溪洛渡泄水导致向家坝库区死鱼现象为例,采用文献调研和对渔民走访调查的方式,获取了该时期的溪洛渡水电站运行数据,以及相应的鱼类死亡数据。

1.2 库区 TDG 饱和度预测模型

1.2.1 控制方程 本文采用 TDG 饱和度预测模型的控制方程如下:

连续方程:

$$\frac{\partial uB}{\partial x} + \frac{\partial wB}{\partial z} = qB \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial uB}{\partial t} + \frac{\partial uuB}{\partial x} + \frac{\partial wuB}{\partial z} = gB \sin \alpha - \frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B\tau_{xz}}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = g \cos \alpha \quad (3)$$

自由水面方程:

$$B_{\xi} \frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\xi}^h uB dz - \int_{\xi}^h qB dz \quad (4)$$

状态方程:



图 1 研究区域地理位置及目标河段高程

Fig. 1 Geographical location and elevation of the target study region

$$\rho = f(T_w) = 999.842\,594 + 6.793\,952 \times 10^{-2} T_w - 9.095\,290 \times 10^{-3} T_w^2 + 1.001\,685 \times 10^{-4} T_w^3 - 1.120\,083 \times 10^{-6} T_w^4 + 6.536\,332 \times 10^{-9} T_w^5 \quad (5)$$

式中: u 、 w 分别为纵向和垂向流速 (m/s); B 为宽度 (m); q 为单宽流量 (m²/s); g 为重力加速度 (m/s²); ρ 为密度 (kg/m³); p 为压强 (N/m²); τ_{xx} 和 τ_{xz} 为紊动切应力 (N/m²); α 为河床与 x 方向的夹角 (°); ξ 为水面高程 (m); h 为水深 (m); B_ξ 为水面宽度 (m); T_w 为水温 (°C)。

通用输运方程:

$$\frac{\partial \Phi B}{\partial t} + \frac{\partial u B \Phi}{\partial x} + \frac{\partial w B \Phi}{\partial z} = \frac{\partial (B D_x)}{\partial x^2} + \frac{\partial (B D_z \Phi)}{\partial z^2} + S_\Phi B \quad (6)$$

式中: Φ 为标量, 代表横向平均温度 (°C) 或 TDG 饱和度 (%); S_Φ 为标量对应的源项; D_x 为纵向弥散系数 (m²/s); D_z 为垂向弥散系数 (m²/s)。热输运中的源项 $S_{\Phi T}$ 仅考虑由水面进入水体的热交换, 忽略底质热交换, 因此热通量计算方程为:

$$S_{\Phi T} = H_{aw} = H_{sn} + H_{an} - H_{br} + H_e + H_c \quad (7)$$

式中: H_{aw} 为水面进入水体的热通量 (W/m²); H_{sn} 为太阳短波辐射 (W/m²); H_{an} 为大气长波辐射 (W/m²); H_{br} 为水体长波的返回辐射 (W/m²); H_e 为水面蒸发热损失 (W/m²); H_c 为热传导通量 (W/m²)。

TDG 源项 $S_{\Phi G}$ 的计算方程为:

$$S_{\Phi G} = k(G_s - G) \quad (8)$$

式中: G_s 为当地大气压下饱和状态的饱和度 (%), 通常为 100%; G 为水体饱和度 (%); k 为释放系数 (s⁻¹), 采用 Streeter 提出的经典复氧方程^[18] 计算:

$$k = 5.26v^{0.969}H^{-1.673} \quad (9)$$

式中: v 为断面平均流速 (m/s); H 为断面平均水深 (m)。

1.2.2 网格划分与边界条件设置 选取溪洛渡水电站至向家坝水电站全长约 156 km 的库区水域为计算区域。采用均匀网格对计算区域进行离散, 其中垂向网格尺寸为 1 m, 纵向网格尺寸为 1 000 m, 计算区域内共计 14 011 个网格。以中国三峡集团网站公布的溪洛渡水电站出库流量和向家坝水电站出库流量, 作为模型入流边界和出流边界 (图 2(a))。气象参数采用计算时段内中国气象数据网公布的向家坝库区屏山气象站逐小时气象数据。模型入流 TDG 饱和度边界根据 USACE 建立的过饱和 TDG 生成预测模型计算得到, 入流水温采用溪洛渡坝下 1 km 处水温监测数据 (图 2(b))。

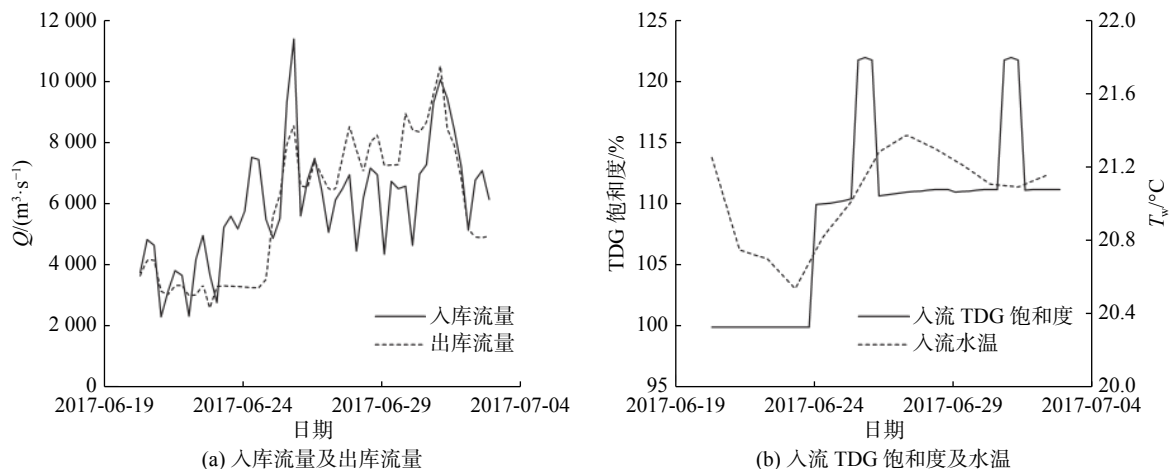


图 2 向家坝库区流量以及入流 TDG 饱和度和水温边界条件

1.2.3 模型验证 以2017年6月20日—7月2日为模型的验证期,并以此期间的实测数据对模型进行验证。鉴于溪洛渡水电站在6月20日之前未发生泄水行为,因此计算区域初始TDG场设置为饱和状态。由于缺乏库区初始水温分布,根据2017年1月1日—6月20日的向家坝库区水温和气象资料,计算库区水温分布,将计算得到的2017年6月20日库区水温分布作为模拟时段的初始水温场。

向家坝坝前水位验证及向家坝库区沿程TDG饱和度验证结果见图3,水位和TDG饱和度检验精度评定显示 R^2 分别为0.991和0.915,说明模型采用的参数合理,结果可靠,可以用于向家坝库区TDG时空分布模拟计算。

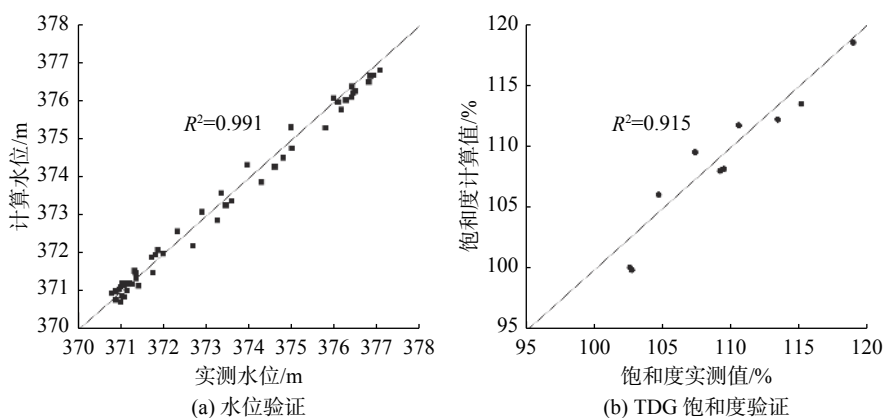


图3 向家坝坝前断面水位及库区沿程TDG饱和度的监测值与计算值对比

Fig. 3 Comparison between simulated results and field observations of the water level at the cross section in front of the Xiangjiaba Dam and the TDG saturation along the Xiangjiaba Reservoir, respectively

1.2.4 模拟工况设置 为分析坝下近区饱和度对库区TDG饱和度分布的影响,拟定坝下近区TDG饱和度工况为115%~150%,并根据USACE建立的TDG生成预测模型^[19],计算各饱和度工况对应的流量值,模拟工况见表1。由于每年6—10月为溪洛渡水电站泄水期,因此采用向家坝库区屏山站丰水年6—10月的平均水文气象数据为模型边界,库区初始水温场和TDG饱和度场与模型验证采用的初始场一致。

考虑到过饱和TDG沿程逐渐衰减,距离坝下近区越远,鱼类受到的胁迫程度越轻。同时自溪洛渡坝下33 km处的桧溪断面(图1)起,河道存在网箱养殖,且该断面开始出现鱼类死亡^[7],因此以该断面作为控制断面,分析过饱和TDG胁迫下向家坝库区鱼类安全水深阈值。

1.3 鱼类TDG耐受阈值及安全水深阈值计算

TDG过饱和对各生长阶段鱼类均存在不同程度的影响,且不同鱼类对TDG过饱和的耐受性也存在差异。美国国家环保局1986年发布的天然河道水质管理标准^[20]中指出,自然水体TDG饱和度应小于110%。四川大学测试了TDG过饱和对长江上游岩原鲤鱼苗^[12]和齐口裂腹鱼^[21]两种鲤形目鱼类的胁迫效应,发现岩原鲤鱼苗的TDG饱和度耐受阈值为115%,齐口裂腹鱼在饱和度120%的水体中2 h便开始出现死亡。综合以上内容,本文选择最不利情况,以饱和度110%作为鱼类的耐受阈值。考虑深度补偿效应后的

表1 坝下近区TDG饱和度模拟工况

Tab. 1 Simulation conditions of TDG in stilling basin

工况	坝下TDG饱和度/%	溪洛渡出库流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
1	115	3 590
2	120	4 845
3	125	6 096
4	130	7 343
5	135	8 586
6	140	9 825
7	145	11 060
8	150	12 291

水体 TDG 饱和度计算方法^[10]:

$$G_{\text{comp}} = \left(\frac{G}{G_s + \rho gh / P_0} \right) \quad (10)$$

式中: G_{comp} 为深度补偿后的 TDG 饱和度 (%); P_0 为当地大气压 (mmHg)。

为便于判断鱼类活动深度是否受过饱和 TDG 胁迫, 提出安全水深阈, 即考虑水深补偿效应下, 鱼类免于受过饱和 TDG 胁迫时的最小安全水深, 本研究采用的是 G_{comp} 为 110% 时对应的水深。

2 结果分析

文献调研显示, 2014 年 7 月 5 日 14 时—11 日 8 时, 溪洛渡水电站出库流量持续超过 10 000 m³/s, 期间水体 TDG 饱和度值均超过 135%, 最大达到 144%^[3]; 在 2014 年 7 月 5—13 日期间, 向家坝库区的绥江段水面大量鱼类患气泡病死亡, 主要为草鱼、鲤鱼、长吻鲩和太湖新银鱼^[7]。通过对当地渔民走访调查, 分别统计 2014 年 7 月溪洛渡坝下桧溪镇网箱养殖鱼类死亡情况与网箱破损情况, 结果表明死亡鱼类主要是鲤鱼、鲢、长吻鲩、鲫鱼, 生物量占比分别为 39.2%、34.1%、14.2% 和 10.5%, 另外该区域还有至少 65 口网箱损毁。

2.1 模型验证期库区饱和度分布

模型验证期(2017 年 6 月 20 日—7 月 2 日), 不同饱和度的水体在河道中以云团状向下游运动, 如图 4 所示。6 月 27 日 0 时(图 4(a))库区 TDG 峰值饱和度达到 120%, 结合图 2(b) 中入流的 TDG 饱和度随时间变化情况可以发现, 这部分高 TDG 饱和度水体主要来自溪洛渡 6 月 25 至 26 日的泄水期。在 6 月 25 日之前和 6 月 26 日之后入流的 TDG 饱和度相对较低, 导致下游 TDG 饱和度沿程分布出现先升高后降低的趋势。从 6 月 27 日 0 时开始, 向家坝库区 86 km 断面处 TDG 饱和度达到 110%, 在未来 24 h 内该断面的 TDG 饱和度持续升高, 超过 118%, 并在一段时间内持续保持高饱和度。24 h 内饱和度超过 118% 的峰值云团前端向下游推进 22.1 km, 峰值云团尾端向下游推进 36.3 km, 纵向长度覆盖的范围明显变窄, 由 34.0 km 降低到 19.8 km。

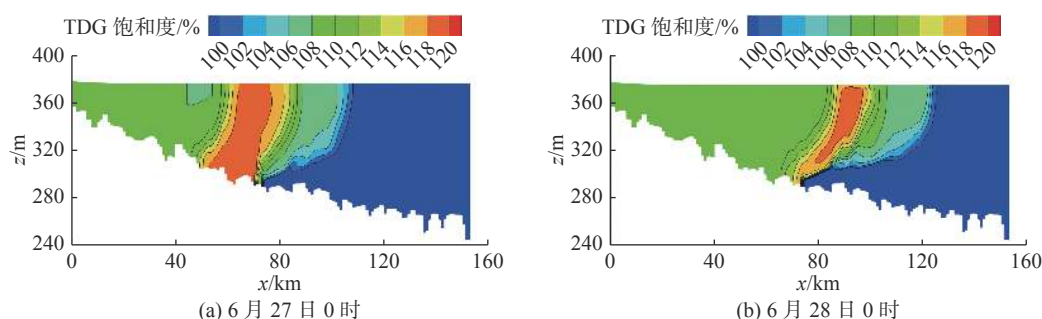


图 4 典型时间段向家坝库区 TDG 饱和度分布

Fig. 4 Spatial distributions of TDG saturation in the Xiangjiaba Reservoir of typical time periods

2.2 模拟工况控制断面 TDG 饱和度分布

在溪洛渡坝下近区各 TDG 饱和度工况下, 控制断面 TDG 饱和度沿水深方向的分布见图 5。整体上看, 控制断面 TDG 饱和度沿水深方向变化不大。水流从坝下近区运动至控制断面的过程中, TDG 不断发生传质释放。鉴于控制断面距坝下近区较近(仅 33 km), 且 TDG 传质过程较慢, 断面饱和度均值稍低于相应坝下近区的 TDG 饱和度。由于 TDG 传质发生在水气交界面, 因此表层的 TDG 饱和度值为整个控制断面的最低值。

2.3 深度补偿效应下安全水深阈值

由于表层水体是过饱和 TDG 对鱼类产生胁迫的主要区域, 因此选取各工况下控制断面表层 6 m 水深内的 TDG 饱和度进行分析。考虑深度补偿效应下控制断面附近沿水深方向 TDG 饱和度分布见图 6。对比图 5 和 6, 在深度补偿效应作用下, 尽管在水面附近, 深度补偿后的 TDG 饱和度与补偿前变化不大, 但是随着水深的增加, 深度补偿后的 TDG 饱和度迅速降低。对比各工况控制断面饱和度低于 110% 的鱼类安全生境区域可以发现, 随着坝下近区饱和度的升高, 鱼类安全生境区域相应减少。将各工况满足鱼类生境需求($\text{TDG} \leq 110\%$)的安全水深阈值进行统计列于表 2。由表 2 可见: 随着坝下近区饱和度的升高, 鱼类需要的安全水深越大, 其中安全水深阈值最小(0.48 m)的工况为坝下近区 TDG 饱和度 115%, 安全水深阈值最大(3.98 m)的工况为坝下近区 TDG 饱和度 150%。

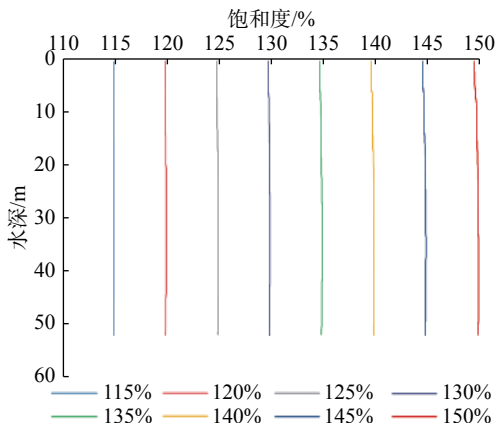


图 5 各工况下控制断面 TDG 饱和度垂向分布

Fig. 5 Vertical distribution of TDG supersaturation in each simulation condition

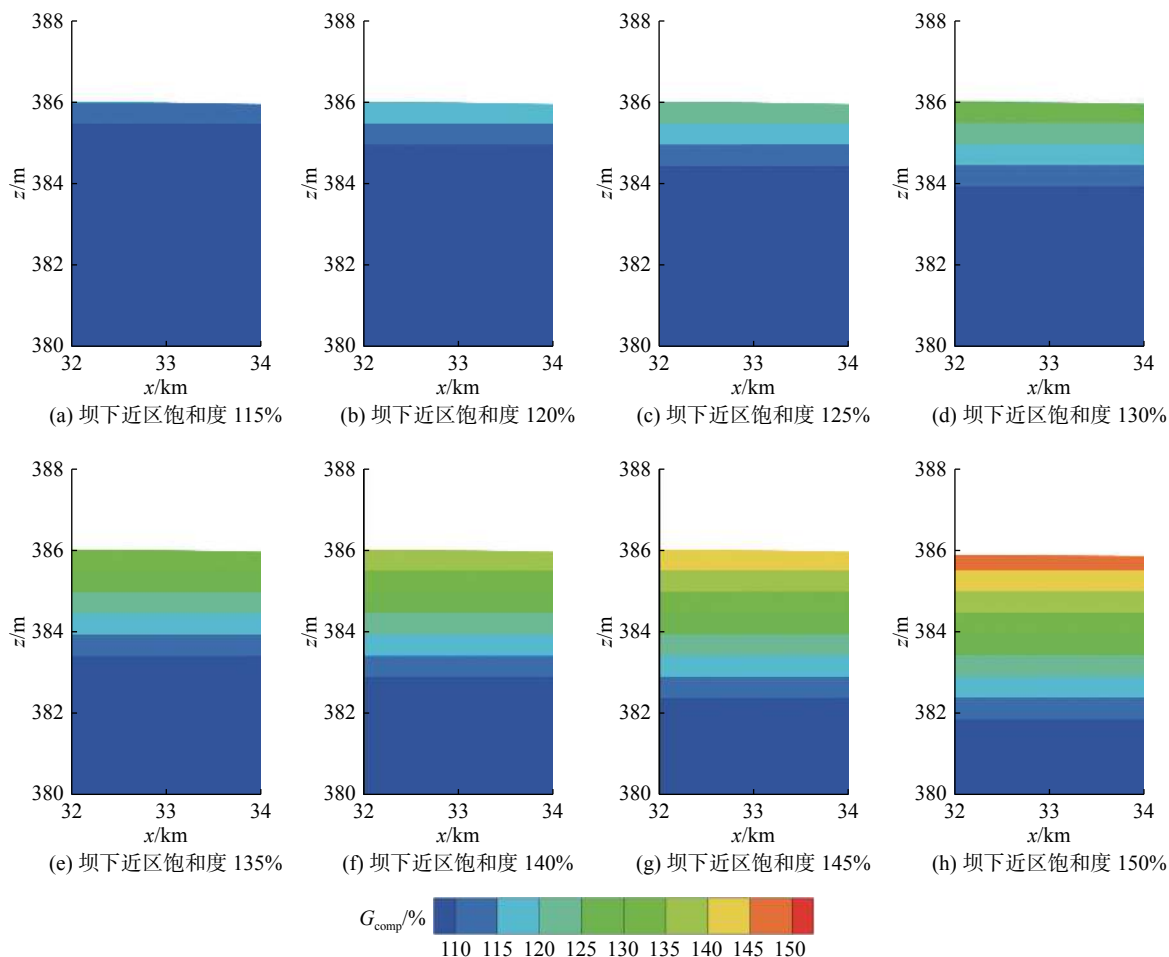


图 6 各工况控制断面附近考虑深度补偿后的饱和度垂向分布

Fig. 6 Vertical distribution of hydrostatic compensated TDG supersaturation nearby the control section in each simulation condition

表 2 各工况下控制断面安全水深阈值
Tab. 2 Threshold safety depth of control section in each simulation condition

工况	坝下近区饱和度/%	安全水深阈值/m	工况	坝下近区饱和度/%	安全水深阈值/m
1	115	0.48	5	135	2.51
2	120	0.95	6	140	3.03
3	125	1.47	7	145	3.55
4	130	1.99	8	150	3.98

3 TDG 过饱和和对库区鱼类的影响及应对措施

3.1 TDG 过饱和对库区野生鱼类的影响

2014 年 7 月泄水期间,库区水面患气泡病死亡的鱼类主要为草鱼、鲤鱼、长吻鮠和太湖新银鱼^[7]。2018 年向家坝库区鱼类资源调查表明,溪洛渡坝下 33 km 的桧溪镇附近,以瓦氏黄颡鱼、寡鳞鲃、光泽黄颡鱼、圆口铜鱼等为该江段主要的渔获物,其中圆口铜鱼生物量占比最大^[22]。对比鱼类资源调查结果和鱼类死亡调研结果,生物量最大的圆口铜鱼却并不是主要的死亡鱼类,这主要和圆口铜鱼的生活习性有关。圆口铜鱼为下层鱼类,杨志等^[23]在金沙江下游进行圆口铜鱼生境调查的结果显示,其游泳深度的平均值为 6.22 m。但是泄水期间,溪洛渡坝下近区 TDG 饱和度最大值为 144%^[3],对应的桧溪断面鱼类安全水深阈值为 3.55 m,小于圆口铜鱼的平均游泳深度。因此,圆口铜鱼的平均游泳深度足以保证其免受过饱和 TDG 的胁迫。死亡鱼类中,草鱼是死亡生物量最大的鱼类,主要是因为草鱼为桧溪下游绥江县断面附近主要的渔获物,生物量占比达到 53.1%^[17],同时草鱼主要生活在水域的中层,有时也在表层和近岸多水草区域,游泳深度较圆口铜鱼浅,因此,草鱼受过饱和 TDG 胁迫严重。蛇河下游成年大鳞大麻哈鱼游泳轨迹监测结果^[11]以及岩原鲤^[12]、齐口裂腹鱼^[21]、胭脂鱼^[24]等鱼类的胁迫试验结果均表明,鱼类具有利用压力补偿,探测并躲避 TDG 过饱和和胁迫的能力;但是部分鱼类需要饱和度达到一定的阈值才会有相应的躲避行为^[13],且躲避行为还受其他环境因素或物种特定属性的影响。目前草鱼的躲避能力还未见相关报道。当水体 TDG 饱和度达到 144% 时,草鱼是否具有利用深度补偿进行躲避的能力,还有待进一步开展野外游泳轨迹监测以及室内胁迫试验确定。由于鱼类的生活习性各不相同,对流速和水深的喜好也存在较大差异,因此野生鱼类的喜好游泳深度及利用深度补偿的能力,决定了其受 TDG 过饱和和水体危害的程度。

3.2 TDG 过饱和对网箱养殖鱼类的影响

除了野生鱼类,2014 年 7 月泄水期间库区网箱养殖的经济鱼类也受到 TDG 过饱和和水体的胁迫。尽管在溪洛渡水电站泄水调控的影响下,库区水位上涨,可用于深度补偿的水深增加,但是受网箱深度的影响,养殖的经济鱼类垂向活动范围受限,其最大游泳深度与网箱深度尺寸一致,导致深度补偿的效果有限。当网箱深度尺寸不足以达到安全水深阈值的要求时,将对鱼类产生致命影响。Cao 等^[25]在向家坝下游网箱中开展 TDG 过饱和对胭脂鱼幼鱼的胁迫试验结果表明,水体平均饱和度为 123% 时,放置在 0~1 m 网箱深度的胭脂鱼幼鱼死亡率达 80%,而放置在 2~3 m 网箱深度的胭脂鱼幼鱼,死亡率仅为 6.25%。对其安全水深阈值进行计算可以发现,平均饱和度 123% 对应的安全水深阈值为 1.30 m,因此 0~1 m 网箱深度不满足要求,而 2~3 m 网箱深度满足水深要求。通过现场走访及对当地渔民的调研发现,2014 年 7 月溪洛渡泄水期间,库区的经济鱼类主要采用垂向尺寸为 3.00 m 的网箱进行养殖,小于 3.55 m 的安全水深阈值要求。同时考虑网箱养殖的密度,鱼群在网箱各个深度均有分布,所以网箱的深度不足以为养殖鱼类提供足够的补偿水深来躲避 TDG 过饱和和水体的胁迫。尽管部分鱼类具有探测并垂向移动以躲避 TDG 过饱和和水体的能力,但受网箱的限制,鱼类依然会受到 TDG 过饱和的严重影响,导致大量死亡。另外,长吻鮠和圆口铜鱼一样,

属于喜底层的鱼类。在深度补偿的效应下,野生长吻鮠受 TDG 过饱和和水体的胁迫程度应该和圆口铜鱼一样较轻,同时枞溪镇和绥江县的鱼类资源调查均表明,鲤鱼和长吻鮠并不是库区的主要物种^[18,25],因此库区水面出现的大量死亡长吻鮠,并不是野生长吻鮠。养殖鱼类死亡情况统计结果表明大量养殖长吻鮠死亡,通过对当地渔民走访调查发现,泄水期间养殖鱼类死亡后,渔民为了方便,将死亡鱼类直接捞出后丢弃在库区。同时,该江段还存在部分养殖网箱在水流的冲击下损毁,导致死亡的养殖长吻鮠进入库区,因此,可以认为库区江面上大量死亡的长吻鮠主要来自网箱养殖。

3.3 应对措施

为降低 TDG 过饱和和水体对养殖鱼类的胁迫效应,需要增加养殖网箱深度尺寸至安全水深以下。同时,在网箱中加设盖板,确保泄水期鱼类活动的最小水深满足水深补偿的需求,以降低网箱养殖鱼类患气泡病的几率。同时,需要注意的是,当水体 TDG 饱和度恢复正常时,不应立即解除对网箱养殖鱼类的水深约束,因为鱼体长时间处在过饱和水体中,突然解除深度补偿,促使体内组织和体液中的过饱和气体以气泡形式析出,罹患气泡病。谭德彩^[5]将受到 TDG 过饱和胁迫的长江鱼转移到活水舱时,均出现存活困难的现象。因此,当水体恢复正常饱和度时,须待体内适应正常饱和度水体一段时间,再解除水深约束,恢复其在深度方向上的自由。

由于过饱和 TDG 对野生鱼类的胁迫程度与其本身的生活习性以及躲避能力等因素有关,为降低过饱和和 TDG 的胁迫程度,需要提供足够的水深使其进行深度补偿。梯级电站之间,由于库区水深较大,为野生鱼类进行深度补偿提供了必要条件。但是对于最后一级电站的下游,由于主河槽泄水期流速较大,喜好静水的鱼类往往栖息于流速较低的滩地或近岸浅水区,不利于鱼类进行深度补偿,因此对于具有利用深度补偿能力的野生鱼类,梯级电站的库区相比河道更安全。同时由于距离大坝越近,鱼类受过饱和 TDG 影响越大,有必要对最后一级电站坝下近区的 TDG 过饱和度提出比中间梯级电站更严格的限制标准。为降低最后一级电站坝下近区的 TDG 过饱和度,可以通过梯级电站联合调度等方法,减少最后一个梯级电站的泄水流量,最大限度降低电站坝下近区 TDG 饱和度,改善下游鱼类生境。

4 结 语

针对水库泄水导致鱼类受 TDG 过饱和胁迫甚至死亡的问题,以金沙江溪洛渡至向家坝江段为研究区域,构建了向家坝库区立面二维 TDG 动态模型,提出了深度补偿下控制断面鱼类安全水深阈值评估方法,探讨了库区 TDG 过饱和对野生鱼类和网箱养殖鱼类的胁迫效应,得到以下主要结论:

(1)库区野生鱼类在垂向上具有足够的活动空间可以规避过饱和 TDG 的胁迫,但是个体受到的胁迫程度取决于鱼类的生活习性以及利用深度补偿的能力。

(2)网箱限制了养殖鱼类的游泳水深,网箱深度不足是导致 TDG 过饱和对养殖鱼群产生危害的主要原因之一。建议通过评估确定关键断面安全水深阈值,调整网箱位置或者增大网箱尺寸至大于安全水深,并在 TDG 过饱和期限制网箱内养殖鱼类的活动范围。

(3)梯级水库的最后一级坝下近区 TDG 饱和度需要实施比中间梯级更严格的控制标准,建议通过梯级联合调度的方式减少瞬时下泄流量,保障下游河道鱼类生境安全。

参 考 文 献:

- [1] 麻泽龙,程根伟. 河流梯级开发对生态环境影响的研究进展[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 748-753. (MA Zelong, CHENG Genwei. Progress in research on impacts of river hydro-power engineering on eco-environment[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(5): 748-753. (in Chinese))

- [2] QU L, LI R, LI J, et al. Field observation of total dissolved gas supersaturation of high-dams[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(4): 156-162.
- [3] MA Q, LI R, FENG J J, et al. Cumulative effects of cascade hydropower stations on total dissolved gas supersaturation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(14): 13536-13547.
- [4] FENG J J, WANG L, LI R, et al. Operational regulation of a hydropower cascade based on the mitigation of the total dissolved gas supersaturation[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 92: 124-132.
- [5] 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. (TAN Decai. Research on the lethal effect of the dissolved gas super-saturation resulted from Three Gorges project to fish[D]. Chongqing: Southwest University, 2006. (in Chinese))
- [6] EBEL W J. Supersaturation of nitrogen in the Columbia River and its effect on salmon and steelhead trout[J]. *Fishery Bulletin*, 1969, 68(1): 1-11.
- [7] 谭平才, 徐勇, 王艳龙. 金沙江向家坝库区现大量死鱼系溪洛渡水电站泄水所致[N/OL]. 中国新闻网. [2014-08-18]. <http://www.chinanews.com/sh/2014/08-28/6540122.shtml>. (TAN Pingcai, XU Yong, WANG Yanlong. Large numbers of dead fishes were found in the surface of Xiangjiaba Reservoir due to the spill of Xiluodu Dam[N/OL]. China News Network. [2014-08-18]. <http://www.chinanews.com/sh/2014/08-28/6540122.shtml>. (in Chinese))
- [8] WEITKAMP D E, KATZ M. A review of dissolved gas supersaturation literature[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1980, 109(6): 659-702.
- [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] PLEIZIER N K, NELSON C, COOKE S J, et al. Understanding gas bubble trauma in an era of hydropower expansion: How do fish compensate at depth?[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2020, 77(3): 556-563.
- [11] 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.
- [12] HUANG X, LI K F, DU J, et al. Effects of gas supersaturation on lethality and avoidance responses in juvenile rock carp (*Procypris rabaudi Tchang*) [J]. *Journal of Zhejiang University-Science B (Biomedicine & Biotechnology)*, 2010(10): 74-79.
- [13] GRAY R H, PAGE T L, SAROGLIA M G. Behavioral response of carp, *Cyprinus carpio*, and black bullhead, *Ictalurus melas*, from Italy to gas supersaturated water[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 1983, 8(2): 163-167.
- [14] 杜兰, 卢金龙, 李利, 等. 大型水利枢纽泄洪雾化原型观测研究[J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(8): 59-63. (DU Lan, LU Jinlong, LI Li, et al. Prototype observation on flood discharge atomization of large hydraulic project[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(8): 59-63. (in Chinese))
- [15] 吴时强, 吴修锋, 周辉, 等. 底流消能方式水电站泄洪雾化模型试验研究[J]. *水科学进展*, 2008, 19(1): 84-88. (WU Shiqiang, WU Xiufeng, ZHOU Hui, et al. Model experiment study of effect of discharge atomization for energy dissipation by hydraulic jump[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(1): 84-88. (in Chinese))
- [16] 朱玲玲, 董先勇, 陈泽方. 金沙江下游梯级水库淤积及其对三峡水库影响研究[J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(3): 1-7. (ZHU Lingling, DONG Xianyong, CHEN Zefang. Sediment deposition of cascade reservoirs in the lower Jinsha River and its impact on Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(3): 1-7. (in Chinese))
- [17] 王俊, 苏巍, 杨少荣, 等. 金沙江一期工程蓄水前后绥江段鱼类群落多样性特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(3): 394-401. (WANG Jun, SU Wei, YANG Shaorong, et al. Variation characteristics of fish biodiversity in Suijiang section before and after impoundment of first phase of Jinsha river hydropower project[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(3): 394-401. (in Chinese))
- [18] STREETER H W, WRIGHT C T, KEHR R W. Measures of natural oxidation in polluted streams III[J]. *Sewage Works Journal*, 1936, 8(2): 282-316.
- [19] WES. Total dissolved gas production at spillways on the Snake and Columbia Rivers, memorandum for record[R]. Vicksburg: Waterways Experiments Station, 1997.
- [20] U.S. EPA. Quality criteria for water: EPA No. 440/5-86-001[S]. Washington, D. C: EPA, 1987.

- [21] 冀前锋, 王远铭, 梁瑞峰, 等. 总溶解气体渐变饱和度下齐口裂腹鱼的耐受特征[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(3): 130-137. (JI Qianfeng, WANG Yuanming, LIANG Ruifeng, et al. Tolerance of *Schizothorax prenanti* to gradually varied total dissolved gas supersaturation[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(3): 130-137. (in Chinese))
- [22] 李婷, 唐磊, 王丽, 等. 水电开发对鱼类种群分布及生态类型变化的影响——以溪洛渡至向家坝河段为例[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1473-1485. (LI Ting, TANG Lei, WANG Li, et al. Distribution characteristics and ecological types changes in fish communities under hydropower development from Xiluodu to Xiangjiaba reach[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1473-1485. (in Chinese))
- [23] 杨志, 张鹏, 唐会元, 等. 金沙江下游圆口铜鱼生境适宜度曲线的构建[J]. 生态科学, 2017, 36(5): 129-137. (YANG Zhi, ZHANG Peng, TANG Huiyuan, et al. The formation of habitat suitability curves for *Coreius guichenoti* (Sauvage & Dabry de Thiersant, 1874) of the lower Jinsha River[J]. Ecological Science, 2017, 36(5): 129-137. (in Chinese))
- [24] 冯翠霞, 李娜, 袁佳, 等. 总溶解气体过饱和对胭脂鱼耐受性和回避性的影响现场试验[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(10): 45-50. (FENG Cuixia, LI Na, YUAN Qian, et al. Field exposure experiment on tolerance and avoidance of *Myxocyprinus asiaticus* to total dissolved gas supersaturation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(10): 45-50. (in Chinese))
- [25] CAO L, LI Y, AN R D, et al. Effects of water depth on GBD associated with total dissolved gas supersaturation in Chinese sucker (*Myxocyprinus asiaticus*) in upper Yangtze River[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 6828.

Effect of total dissolved gas supersaturation on fish in the reservoir between cascade hydropower stations

ZENG Chenjun, MO Kangle, GUAN Tiesheng, CHEN Qiuwen, LI Ting, ZHANG Hui

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The construction of reservoirs promotes the development of fishery, but discharge from high dam leads to the generation of total dissolved gas (TDG) supersaturation, which is detrimental to the fish in downstream reservoirs and may cause gas bubble disease (GBD). To investigate the effect of TDG supersaturation on fish in the Xiangjiaba Reservoir on the Jinshajiang River, a laterally averaged dynamic model for TDG transport was established, and the threshold of safe depth for the control section was investigated. Then the impact of TDG supersaturation on wild freshwater fish and cage-culture fish was studied based on habits and net cage depth. The results show that: the reservoir provides enough vertical space for wild freshwater fish to swim and acquire hydrostatic compensation to avoid GBD, and the risk of fish suffering from TDG supersaturation depends on the fish habits and the ability of utilizing hydrostatic compensation. For the limit of net cage depth, cage-culture fish have no enough vertical space to swim to safety depth. In order to avoid fish suffering from GBD, the net cage depth should be deeper than the threshold of safe depth, and the fish should be kept swimming under the threshold of safe depth during the period of TDG supersaturation. The reservoir between cascade hydropower stations is safer than the reach downstream of the last cascade hydropower station, and it is necessary to set a most strict TDG limitation standard for the last cascade hydropower station.

Key words: total dissolved gas; hydrostatic compensation; safe depth; net cage depth; cascade hydropower stations