

三峡工程运行后长江中游溶解气体过饱和和演变研究

陈永柏^{1,2}, 彭期冬³, 廖文根³

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101;

2. 中国长江三峡工程开发总公司, 湖北 宜昌 443002; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 为了分析三峡工程运行后泄洪对长江中游溶解气体过饱和的影响, 建立了长江中游溶解氧数学模型, 对不同流量下长江中游的溶解氧过饱和和演变进行了模拟预测。模拟结果表明, 三峡和葛洲坝过坝水流的溶解氧饱和度和在流量 40 000 ~ 50 000 m³/s 和 100 000 m³/s 附近存在 2 个峰值, 长江中游河道天然情况下溶解氧过饱和和恢复速度较为缓慢, 平均每 100 km 降低 5%, 洞庭湖水的汇入能显著降低长江干流的溶解氧过饱和度。当三峡出库流量超过 40 000 m³/s 时, 其影响范围可达 400 km 以上。讨论了溶解气体过饱和的不同指标间的关系, 对气体过饱和可能造成的影响以及对长江中游鱼类目前的影响进行了阐述, 认为通过三峡水库的调度减少出库高流量次数和历时是减缓下游溶解气体过饱和的有效手段。

关键词: 三峡工程; 长江中游; 气体过饱和; 演变

中图分类号: X824, X143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2009)05-0001-05

大坝通过泄洪孔洞泄流时, 水流跌落到下游的过程中伴随着剧烈的水气交换, 使得下游水体中溶解气体含量显著增加, 并随着水流迁移影响到下游更远的范围。长江三峡水利枢纽是目前世界上最大的水利枢纽, 最大坝高为 180 m, 未来三峡电站全部建成后, 其机组过流能力接近 30 000 m³/s, 但是在汛期, 三峡水库入库流量超过 30 000 m³/s 时, 仍然需要通过泄洪孔洞泄洪, 从而造成坝下河道的溶解气体过饱和现象。葛洲坝电站机组过流能力小于三峡电站, 因此经过葛洲坝大坝的水流也易形成气体过饱和现象。近年来, 对三峡大坝和葛洲坝下游溶解氧浓度进行的初步监测结果表明: 由于大坝泄流造成下游河流以溶解氧为代表的溶解气体的过饱和现象较为明显(中国水利水电科学研究院等, 2009), 下泄水体溶解氧浓度的变化与弃水流量密切相关(陈永柏, 2007)。三峡工程运行后带来的长江中游水体溶解气体过饱和是否会对水生生物, 特别是对长江鱼类产生不利影响, 一直受到相关部门及社会各界的广泛关注。

本文运用数值模拟的方法, 以溶解氧为代表性指标, 分析和预测长江中游溶解气体过饱和演变情

况, 研究三峡和葛洲坝以下长江中游江段溶解气体过饱和的时空分布和演变规律, 对了解气体过饱和影响的程度和范围具有十分重要和必要的意义。

1 溶解氧水动力模型建立

本研究采用水环境模拟商业软件 MIKE 11 (DHI WATER & ENVIRONMENT, 2000, 2001) 进行河道溶解氧的一维模拟。MIKE 11 软件以 N-S 方程为水流基本控制方程, 对 N-S 方程垂向和横向积分得到描述一维水流运动的基本方程见式(1)。

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: Q 为流量(m³/s); A 为断面面积(m²); q 为源汇项(m²/s); α 为流速在垂向的分布系数; h 为水深(m); C 为谢才系数(m^{1/2}/s); R 为水力半径(m)。

选用 MIKE 11 水质计算模块中的“BOD-DO”模块进行模拟。该模块在考虑水体中溶解氧的变化时, 除了水体中的扩散输移外, 对于源项主要考虑水体溶解氧与大气的交换、水体中动植物的呼吸耗氧、BOD 的衰减耗氧、植物光合作用等 4 个过程。这 4 个过程在河道溶解氧演变中的作用可用式(2)表示。

$$\frac{dG}{dt} = K_2 \cdot (G_{eq} - G) - R + P(t) - K_1 \cdot C \quad (2)$$

收稿日期: 2009-02-29

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(200701029), 中国长江三峡工程开发总公司生态与环境保护科研项目(0799509)

作者简介: 陈永柏, 1966 年生, 男, 湖北仙桃人, 教高, 博士, 主要从事水利水电工程生态保护、鱼类生态与水生生物保护等研究。
E-mail: chen_yongbo@ctgpc.com.cn

式(2)中, G 为溶解氧浓度(mg/L), G_{eq} 为饱和溶解氧浓度(mg/L), R 为呼吸耗氧[$\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 或 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$], $P(t)$ 为植物光合作用产氧量[$\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 或 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$], C 为BOD浓度(mg/L), K_1 为BOD衰减系数($1/\text{d}$), K_2 为复氧系数($1/\text{d}$)。 K_2 一般可表示为 $K_2 = a \cdot u^b \cdot h^c \cdot I^d$,式中, u 为流速(m/s), h 为水深(m), I 为河道坡降, a, b, c, d 均为系数。对不同的河道,各个系数取值不同,如表1。

表1 不同河流复氧系数(K_2)计算公式中的系数取值
Tab.1 Value of Parameters of reaeration constant (K_2)
Expression in Different Rivers

河流类型	a	b	c	d	说明
小河流	27185	0.931	-0.692	1.09	Thyssen 表达式
一般河流	3.9	0.5	-1.5	0	O'Connor Dubbins 表达式
流速较大河流	5.233	1	-1.67	0	Churchill 表达式

本文研究区域为宜昌葛洲坝至汉口的长江中游江段,全长 600 余 km,计算区域示意图见图1。在模型计算中,根据断面数据情况,将计算区域划分为 400 余个计算断面。

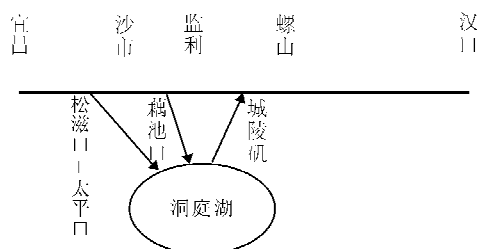


图1 长江中游模拟范围示意

Fig.1 The Sketch Map of Simulation Area in the Middle Reaches of Yangtze River

2 模型率定验证

模型上边界采用宜昌站实际流量过程,下边界采用汉口实际水位过程;洞庭湖和汉江采用相关站

位流量的出入流过程,按源汇项进行处理。

采用宜昌、沙市、监利、螺山、汉口等水文站 1997~2004 年连续的实测日流量、水位数据对模型进行了率定验证。结果表明,计算得到的沿程各断面的水位、流量过程与实测值均符合较好(中国水利水电科学研究院,2008)。图2、图3为沙市和监利2个测站的模拟计算值与实测值对比。

采用 2007 年 7 月 9 日左右巡测结果作为模型的率定数据,利用 2003 年 11 月 1~3 日长江水产研究所的溶解氧巡测结果对模型进行验证。率定和验证结果如图4。

从 2007 年的率定结果看,与实测值符合较好,仅在开始阶段误差较大,在城陵矶以下也略微偏高。产生这种现象,主要是实测与水流不同步所致。

从模型率定验证结果看,模型模拟结果较好地模拟了溶解氧的沿程分布,表明选用的模型及参数对于模拟长江葛洲坝以下河段的溶解氧演变是适用的,率定得到的式(2)中主要参数见表2。

表2 率定得到的主要参数

Tab.2 Value of Major Parameters by Calibration

参数	K_2	R	$P(t)$	K_1
取值	Churchill 表达式	3.5	2.5	0.2

3 长江中游溶解氧模拟预测结果

由于三峡电站机组的过流能力较大,未来三峡电站机组全部运行后,流量在 $30\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以下时,三峡大坝基本可以不泄洪,不会引起下游河道明显的溶解气体过饱和现象。根据宜昌站洪水流量-频率对应表,本文选取模拟的流量范围为 $30\,000 \sim 115\,000\text{ m}^3/\text{s}$,其中 $30\,000 \sim 60\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 为较为常见流量范围,而 $115\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的流量已超过万年一遇洪水标准。

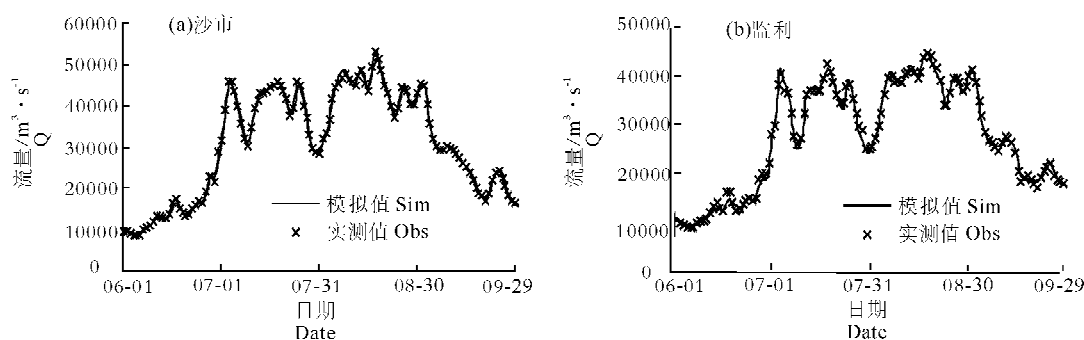


图2 流量计算与实测过程比较

Fig.2 Discharge Comparing of Calculating and Measuring

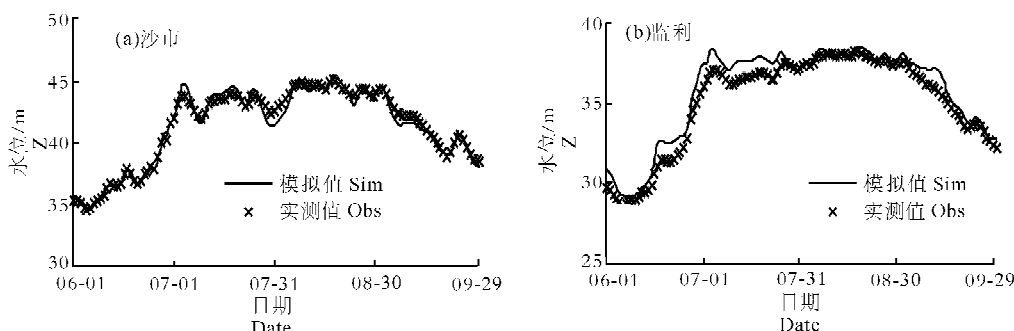


图 3 水位计算与实测过程比较

Fig. 3 Water Level Comparing of Calculating and Measuring

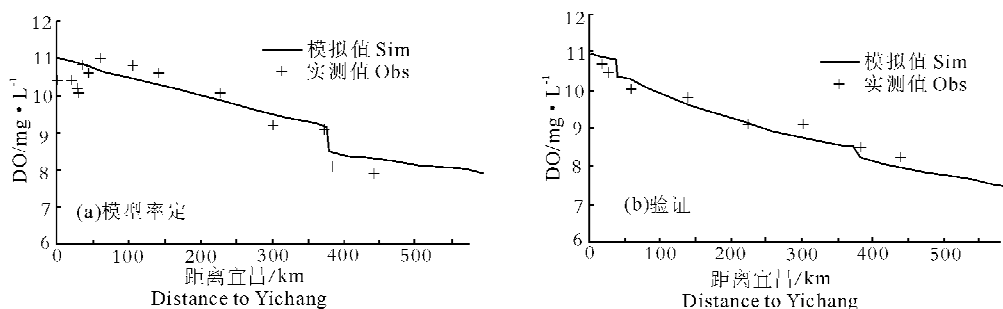


图 4 模型率定和验证溶解氧沿程计算与实测值比较

Fig. 4 DO Comparing of Calculating and Measuring

图 5 为 $30000 \sim 115000 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量下,庙嘴、监利和螺山 3 个站位的溶解氧饱和度随流量变化情况。

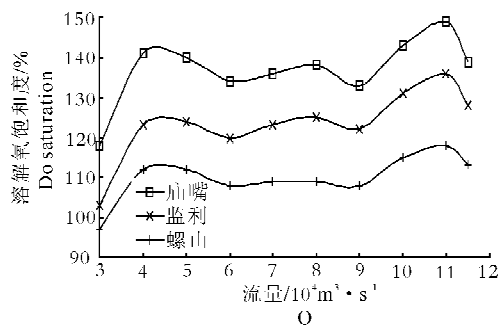


图 5 庙嘴、监利和螺山溶解氧饱和度随流量变化

Fig. 5 Changes of DO Saturation with Discharges at Miaozui, Jianli and Luoshan

3 个站点溶解氧饱和度随流量变化趋势具有高度一致性。随着流量的增加,溶解氧饱和度并不会出现单一的增加趋势,而是出现了波动;在模拟的流量范围内,有 2 个比较明显的波峰:1 个在 $40000 \sim 50000 \text{ m}^3/\text{s}$,1 个在 $100000 \text{ m}^3/\text{s}$ 附近。在 2 个波峰之间,溶解氧饱和度还有 1 个小的波动,但整体来说较 2 个波峰明显降低。

葛洲坝下庙嘴的溶解氧饱和度决定于先后经过三峡和葛洲坝的 2 次大坝泄流。水流经过三峡大坝时,由于三峡电站机组过流能力约为 $30000 \text{ m}^3/\text{s}$,随着流量的增加,大坝弃水增加,其下游饱和度也随

之增加;当流量超过 $80000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,开始起用表孔泄洪,这种情况下过坝水流的溶解氧饱和度会较深孔泄洪增大。经过葛洲坝大坝时,随着流量的增加,一方面大坝弃水量增加;另一方面大坝下游河道水位升高,使得大坝上下游水位差减小从而使得水流的溶解氧饱和度升高不明显,甚至在流量较大的时候出现“敞泄”的情况,经过葛洲坝的水流溶解氧饱和度不会增加。葛洲坝的过坝水流在 2 种作用的综合作用下,随着流量增大,过坝后的溶解氧饱和度表现出明显升高、升高较少或者不升高 3 种情况。相对应地,坝下庙嘴随着流量增加,出现了溶解氧饱和度的波动现象。

由于出现 $100000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上流量的概率极小,因此 $30000 \sim 60000 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量的溶解氧饱和度应该作为重点研究。图 6 为 $30000 \sim 60000 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量下,模拟得到宜昌以下河道中溶解氧的沿程变化情况。

从宜昌(庙嘴站)往下,长江河道中溶解氧饱和度逐渐降低,但是恢复的速度较为缓慢,在 $30000 \sim 60000 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量时,下游约 300 km 处的监利站位的溶解氧饱和度分别较庙嘴减小 15、18、16 和 14 个百分点,即溶解氧饱和度沿着河道大致每 100 km 降低 5 个百分点。在庙嘴和监利间较大支流为清江,而清江的流量较长江干流而言非常小,其汇入后基本对干流的溶解氧饱和度没有影响,故可将每 100

km的5%衰减速率作为长江中游天然河道中溶解氧饱和度的恢复速率。

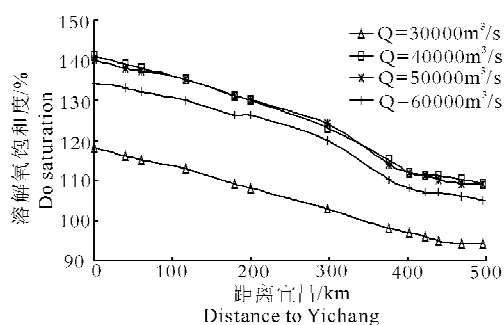


图6 30 000 ~ 60 000 m³/s 流量宜昌
以下河道溶解氧沿程变化

Fig. 6 Changes of DO Saturation along the Reaches
under Yichang Station with the Discharges
between 30 000 m³/s and 60 000 m³/s

监利以下至螺山区间约100 km的江段有洞庭湖水汇入长江,洞庭湖水常年溶解氧饱和度较低且水量较大,对长江干流溶解氧饱和度的降低有明显作用。在30 000 ~ 60 000 m³/s流量时,螺山站位的溶解氧饱和度较监利站位分别降低6、11、11和12个百分点,显著大于天然河道中恢复速率。

如以美国EPA(国家环境保护署)的规定为参考,以饱和度超过110%作为判断气体过饱和的有害标准,在30 000 m³/s的流量下,下游河道有害范围不到150 km,而当流量超过40 000 m³/s后,过饱和和有害范围显著扩大,达到400 km以上。

4 讨论

本文的模拟主要针对长江中游干流河道中的溶解氧进行,而对于判断溶解气体过饱和的溶解氮和总溶解气体压力指标,由于资料和手段的限制,未进行相应模拟。根据2007年长江水产研究所与三峡水文局巡测的结果,长江中游过饱和和溶解氮和总气体压力衰减较溶解氧要缓慢(中国水利水电科学研究院等,2009),主要原因是溶解氮是惰性气体,除与空气进行交换外,基本不参与生化反应,而总气体压力的组成中,溶解氮约占80%,故总气体压力水平与溶解氮水平较为接近。

河道中溶解气体过饱和最主要的危害是容易造成鱼类患“气泡病”(谭德彩等,2006)。三峡水库蓄水以来,尚未发现下游天然河道中大量鱼类患气泡病的现象,主要原因可能是在天然水体中存在“静水压力补偿效应”。长江中游水深一般可达10 m以上,成鱼具有规避能力,能够自动下潜,避免长期

持续暴露在表层的水体中,因此过饱和的江水对成鱼伤害不大;产漂浮性鱼卵鱼类的鱼苗和幼鱼,不能下潜,如果长期暴露在表层溶解气体过饱和水体中,可能受到损害。目前长江中游以“四大家鱼”为代表的产漂浮性卵鱼类其产卵期一般在4月底至7月初(陈永柏等,2009),在此期间,宜昌流量极少超过30 000 m³/s,其影响有限,根据1996 ~ 2005年三峡工程坝下流量统计分析表明(陈永柏,2007),坝址流量超过30 000 m³/s年平均概率不到10%,即使汛期也仅为22%。现阶段的监测尚没有发现产漂浮性鱼卵鱼类受损害的直接证据,此项工作应该进一步加强。

三峡工程围堰蓄水运行初期(2003 ~ 2004年),下泄水体曾较长时间出现溶解氧过饱和现象(程香菊等,2005),这是由于此时流量主要是通过泄洪方式下泄产生的,但随着机组的不断投入运行,其影响历时和程度是下降的(陈永柏,2007)。

本研究结果表明,在三峡出库流量超过40 000 m³/s后,会形成一个溶解气体过饱和的峰值。因此,通过水库的合理调度特别是在汛期利用可调节库容,减少超过40 000 m³/s出库流量出现的次数和历时,即减少通过泄洪设施弃水的次数或历时,是减缓三峡水库下游河道溶解气体过饱和现象的非常关键和有效的技术手段。

参考文献:

- 陈永柏. 2007. 三峡水库运行影响中华鲟繁殖的生态水文学机制及其保护对策研究[D]. 北京:中国科学院: 38 ~ 40.
- 陈永柏,等. 2009. 四大家鱼产卵水文水动力特性研究综述[J]. 水生态学杂志, 2(2): 130 ~ 133.
- 程香菊, 陈永灿, 高千红, 陈燕. 2005. 三峡水库坝身泄流超饱和复氧分析[J]. 水力发电学报, 24(6): 62 ~ 67.
- 谭德彩, 倪朝辉, 郑永华, 等. 2006. 高坝导致的河流过饱和及其对鱼类的影响[J]. 淡水渔业, 36(3): 56 ~ 59.
- 中国水利水电科学研究院. 2008. 针对四大家鱼自然繁殖的三峡工程生态调度前期研究水文学机制与模型模拟研究[R].
- 中国水利水电科学研究院, 长江水产研究所, 三峡水文局, 清华大学. 2009. 三峡水库泄水溶解气体过饱和及其对鱼类影响和保护措施研究[R].
- DHI WATER & ENVIRONMENT. 2000, 2001. MIKE 11-A Modeling system for river and channels user guide[R]. DHI software.

(责任编辑 张俊友)

The Evolvement Study on Supersaturation of Dissolved Gas in the Middle Reaches of Yangtze River after the Three Gorges Project Running

CHEN Yong-bo^{1,2}, PENG Qi-dong³, LIAO Wen-gen³

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2. China Three Gorges Project Corporation, Yichang, Hubei Province 443002, China

3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to analyze the ecological effects of gas supersaturation by the Three Gorges Dam in the middle reaches of Yangtze River, this paper established a mathematical model of dissolved oxygen (DO) in the middle reaches of the Yangtze River. Using this model, the evolvement of supersaturation of dissolved oxygen under different discharges in the middle reaches of the Yangtze River was simulated and predicted. The results showed that there were two peaks of DO, one of which was at the discharge between 40 000 m³/s and 50 000 m³/s, the other was near the discharge of 100 000 m³/s. The reduction of DO was very slow in the natural river and the rate was 5% per 100 km in the middle reaches of Yangtze River. The inflow of Dongting Lake can reduce the supersaturation of DO in Yangtze River. When the outflow of Three Gorges Reservoir was 40 000 m³/s, the harmful range was more than 400 km. This paper also discussed the relationship among different indexes of gas supersaturation and briefly analyzed the effects of gas supersaturation on fishes in the middle reaches of Yangtze River. Reducing the times and duration of high outflow of Three Gorges Reservoir through the operation was considered the best mitigation measures.

Key words: Three Gorges Project; Middle reaches; Yangtze River; Gas supersaturation; Evolvement