



China Environmental Hydraulics
and Eco-Hydraulics 2012

中国环境与生态水力学

2012

陈永灿 李克锋 刘昭伟 黄真理 编

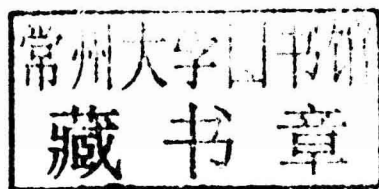


中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国环境与生态水力学

2012

陈永灿 李克锋 刘昭伟 黄真理 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共收录论文 49 篇, 主要从水环境模拟与应用、水环境机理试验与评价方法、水污染控制与水安全、生态调度与生态水力学四个方面介绍了近年来我国在环境水力学领域所取得的理论和实践研究的最新成果。

本书适合环境保护、水利工程、电力工程、市政建设等相关部门的研究人员、技术人员和管理人员参考, 也可作为高等院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

中国环境与生态水力学. 2012 / 陈永灿等编. -- 北
京 : 中国水利水电出版社, 2012. 10
ISBN 978-7-5170-0240-6

I. ①中… II. ①陈… III. ①环境水力学—中国—文
集②生态学—水力学—中国—文集 IV. ①
X52-53②TV13-05

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第240385号

书 名	中国环境与生态水力学 2012
作 者	陈永灿 李克锋 刘昭伟 黄真理 编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 21.75 印张 516 千字
版 次	2012 年 10 月第 1 版 2012 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—1200 册
定 价	78.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

第十届全国环境与生态水力学学术研讨会 2012 年 10 月在成都召开。这次会议由中国水利学会水力学专业委员会（环境与生态水力学学组）主办，四川大学承办，世界自然基金会（WWF）协办。

环境与生态水力学涉及水力学、环境学、生态学等多学科交叉，既需要研究水动力与生态环境的相互作用机制，揭示自然水体中物质输移、扩散、转化的规律，也需要研究多因素耦合和影响的生态环境问题。随着全球气候变化的日趋明显，地球环境正经历着全新的变化，是环境与生态水力学发展的难得机遇，也对环境与生态水力学提出了更高的挑战。无论是在最近几届国际水利与环境工程学会（IAHR）年会上，还是在其分委员会 Environmental Hydraulics、Eco-Hydraulics、HydroInformation 的学术讨论会上，气候变化均作为会议的重要议题。为应对气候变化，减少温室气体排放量，中国政府提出“到 2020 年，单位 GDP 的二氧化碳排放量比 2005 年下降 40%~45%”的目标，并制定了“优先发展水电、优化发展火电、安全发展核电”的电力发展规划。2011 年的中央一号文件《中共中央国务院关于加快水利改革发展的决定》以及当年 7 月召开的“中央水利工作会议”均提出以保障安全为基础的水利发展战略，并强调了污染控制、环境保护和科技进步的重要性。作为环境与生态水力学的相关研究者和从业者，需要树立人与自然和谐相处的理念，将国家重大需求和国际学科前沿有机结合，通过深入细致的研究，揭示气候变化对我国水生态环境的影响，兼顾防洪建设与河流恢复，协调水资源开发利用与保护的关系，为国家粮食安全、防洪安全、生态安全提供有力的科技支撑。

环境与生态水力学学组的发展已历经 20 多个年头，两年一次的全国环境与生态水力学学术研讨会是老中青年学者开展学术交流的一个重要平台。在学组成员单位和全体委员的大力支持下，2012 年第十届全国环境与生态水力学学术研讨会如期举行。这次会议共收录论文 65 篇，其中论文集收录 49 篇，包括水环境模拟与应用（12 篇）、水环境机理试验与评价方法（13 篇）、水污染控制与水安全（15 篇）、生态调度与生态水力学（9 篇）四个专题。同往届论文相比，除在水环境模拟技术、物质输移转化规律等方面继续进行深

入研究外，开始涉及水生植被、微生物、鱼类产卵场等方面的内容，反映了当前国内环境与生态水力学发展的新趋势和新动向。会议论文集《中国环境与生态水力学 2012》将继续由中国水利水电出版社正式出版，选取 16 篇优秀论文刊登在《四川大学学报（工程科学报）》会议专辑上，以进一步扩大会议和成果的影响。在这里感谢中国水利水电出版社和《四川大学学报（工程科学报）》杂志编辑部的大力支持。

这次会议承办单位四川大学与协办单位世界自然基金会为会议的筹备与组织、论文的征集与出版等做了大量的工作。各成员单位，特别是清华大学、中国水利水电科学研究院、四川大学、长江科学院、重庆大学、西安理工大学、青岛理工大学等在论文的审查和修改中给予了大力的支持。四川大学“赵文谦环境水力学奖学金基金”将继续奖励高水平的研究生论文。论文集的出版得到国家自然科学基金重点项目（51039002）和清华大学自主攻坚项目（20101081780）的资助。在此，向所有为会议成功召开和论文出版做出贡献的单位和个人表示由衷的谢意！

陈永灿

环境与生态水力学学组组长
清华大学土木水利学院院长

2012 年 9 月 10 日

目 录

前言

水环境模拟与应用

CE-QUAL-W2 模型在三峡水库水温模拟中的应用	骆辉煌	李 翀	廖文根	(3)
气候变化条件下密云水库的水温模拟	李钟顺	陈永灿	刘昭伟	朱德军 (9)
基于 DEM 的河道断面形状获取和水动力 过程数值模拟	俞 茜	陈永灿	朱德军	刘昭伟 (15)
基于 WASP 软件的南四湖上级湖水质模拟 及其应用	陈 珊	武周虎	路成刚	任 杰 董国栋 (21)
水库水温分布影响因素及预测研究前沿进展	何 洁	任华堂	夏建新	(29)
径向基函数配点法应用于二维对流扩散初值反问题	周 康	毛献忠		(37)
基于反馈性人工神经网络方法的大型底栖动物栖息地模拟	杨青瑞	陈求稳	林育青	(43)
自排沙廊道三维流场的模拟及优化	钟博刚	程 文	陈 琛	马 霞 赵轻舟 (48)
大型深水库水温研究进展	陈 敏	廖文根	陈永灿	(54)
WASP7.3 在湖泊水质分析与评价 中的应用	路成刚	武周虎	任 杰	辛 颖 赵金刚 (59)
钱塘江河口水体交换能力计算	朱军政	郜会彩	李若华	(68)
河网水动力数值模型 THU-River1H 的原理 和可视化界面开发	武文博	李兆锋	金 成	李钟顺 朱德军 (74)

水环境机理试验与评价方法

重庆主城区悬浮泥沙与总磷浓度相关性分析	罗以生	吕平毓	陈 虎	陈 静 (85)
基于综合水质标识指数法的梁滩河流域水质评价 及污染特征分析	封 丽	李崇明	张 韵	黄建盛 (90)
环境累积影响评价方法及其应用示例	王 波	黄 薇		(97)
灰色新陈代谢模型在长江重庆主城区段水质 预测中的应用	罗以生	吕平毓	张 朝	(105)
水体中悬浮颗粒物对磷的吸附特性研究	张 丹	李 玲		(112)
水沙条件变化对监利河弯演变及护岸稳定性 的影响研究	唐 峰	岳红艳	姚仕明	渠 庚 (118)

长江上游城市悬浮泥沙与重金属浓度变化趋势分析

——以重庆主城区为例	罗以生	吕平毓	陈 虎	陈 静	(125)
植被间隙水流流动特性实验研究	陶嗣康	曾玉红			(131)
重庆主城区水环境指标与社会经济影响因素的					
灰色关联度分析	罗以生	吕平毓	刘 莹		(137)
大亚湾沉积物—水界面氮磷含量及释放分析	李 兵	程香菊	郭振仁	刘 国	(145)
垂直流人工湿地净化污染河水效果的					
影响因素研究	史 炜	程 文	王雅琼	马 霞	赵轻舟 (153)
浅水湖泊水华暴发的环境驱动作用模式分析：以太湖为例	毛劲乔	戴会超			(160)
气泡羽流用于湖泊去分层的效率问题浅析	邵冬冬	Ruo-Qian Wang			(166)

水污染控制与水安全

三峡工程蓄水前期重庆主城区江段底泥重金属

污染现状评价	王平义	杨延梅	陈 静	潘 瑾	(175)			
水利工程对环境的影响及其防治建议			杨延梅	赵 俊	(182)			
用水总量控制决策支持系统建设探讨			洪晓峰	黄 薇	(188)			
龙溪河长寿段水质及污染特征分析	张 韵	李崇明	封 丽	黄建盛	(194)			
支流保护的基本概念与研究框架		高 婷	李 翀	廖文根	(201)			
钱塘江河口健康评价指标体系构建	李若华	郜会彩	周 维	熊李虎	(206)			
确定河段控制性污染指标的层次								
分析法及应用	王志刚	陈永灿	刘昭伟	朱德军	(212)			
溢油滞留潮间带海滩的水动力学因素研究进展		夏玉强	李海龙	黄 薇	(219)			
三峡大宁河流域污染驱动								
因子分析	黄健盛	李崇明	邢延峰	王 野	郭 胜	封 丽	张 韵	(225)
水域纳污能力研究方法综述		马 巍	廖文根	浦承松	陈 欣			(230)
输水渠系应对水污染事故的自动化								
控制研究	刘孟凯	邢领航	冯晓波	黄国兵	黄明海			(238)
城市原水污染事故的危害度分级					李 永			(245)
城市生态小区雨洪资源化利用方式浅析			高 亮	孙国强				(254)
倾斜岸河库水面污染带影响下								
的浓度分布研究			武周虎	贾洪玉				(262)
深圳湾污染负荷估算与水环境容量分析	陶 亚	任华堂	栗苏文	夏建新				(270)

生态调度与生态水力学

水利工程环境流管理的实现途径探讨	陈广才	黄 薇			(281)
环境流评估的整体法简述	赵 利	李 翀	陈渠昌	彭期冬	王俊娜 (287)

生态流量调度管理经验借鉴与探讨	霍军军	马贇杰	黄 薇	(294)
气候变化背景下水库调度生态风险因子	杨 可	高 婷	徐 挺	许文年 (300)
汉江中下游春季硅藻水华优势种分类				
地位研究	殷大聪	郑凌凌	黄 薇	宋立荣 (306)
洞庭湖来水量变化特征	朱德军	王智勇	陈永灿	刘昭伟 (311)
浮床栽培油菜在冬季富营养化水体中				
的应用研究	桑连海	黄 薇	殷大聪	张 劲 (318)
三峡水库不同运行时段下支流澎溪河浮游				
植物群落特征	杨 梅	李 哲	郭劲松	方 芳 龙 曼 (323)
基于植被指数的呼伦贝尔草原植被变化				
及其驱动力分析	余 晓	李 翀	王 昊	高 婷 王义成 (331)

水环境模拟与应用

CE-QUAL-W2 模型在三峡水库 水温模拟中的应用*

骆辉煌¹ 李 翀² 廖文根³

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 中国长江三峡集团公司, 100038;

3. 水利部水利水电规划设计总院, 100120)

摘 要 本文采用 CE-QUAL-W2 建立了三峡水库水温模型, 利用三峡水库实测下泄水温数据, 率定和验证了模型主要参数, 并采用模型预测了三峡水库提前蓄水情景下的下泄水温变化情况。研究结果表明: CE-QUAL-W2 模型能较好地适用于三峡水库的水温模拟。经比对 2006~2008 年的计算与实测日均下泄水温数据, 计算结果与实测数据的绝对误差为 0.5℃, 相对误差为 3%。在三峡水库提前蓄水情景下, 仅在蓄水期三峡水库的下泄水温略有变化, 而在中华鲟产卵期三峡水库的下泄水温并无明显变化。在蓄水期的三峡水库下泄水温变化, 对全年水水温积温略有影响, 对中华鲟性腺发育基本没有影响。

关键词 三峡 水库 水温 模型 CE-QUAL-W2

1 引言

三峡水库电站总装机容量 2250 万 kW, 年发电量超过 1000 亿 kW·h, 是世界上装机容量最大的水电站。水库正常蓄水位 175m, 总库容 393 亿 m³, 水库全长 600 余 km, 平均宽度 1.1km, 水库面积 1084km²。大型水库在蓄水后往往会改变原天然河道的水温结构, 库区水温变化将改变库区内的水生生态系统。同时, 下泄水温的改变还将影响下游河道鱼类繁殖生长。因此, 有必要建立三峡水库水温模型以分析三峡水库运行对下游河道的水温影响。

预测库区水温分布一般采用数学模型。数学模型是在充分理解水库垂向水温分层物理成因的基础上建立数学方程, 并采用数值计算方法来预测库区水温分布。国内有学者应用垂向一维模型研究库区垂向水温, 如李怀恩 (1993)、陈永灿 (1998) 等先后开发了一系列垂向一维模型, 分别在黑河水库、密云水库等水库的库区水温预测中取得了较好的效

* 基金项目: 中国长江三峡集团公司长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区生态补偿项目 (鱼类保护研究项目《珍稀特有鱼类繁殖生长的关键环境因子综合分析研究》), 国家“十二五”科技支撑计划课题 (2012BAC06B04)。

果^[1,2]。对于沿河流纵向尺度较大和横向宽度相对较窄,且横向温度分布差异小的水库水温模拟,宜采用横向平均的立面二维水温模型。在国内,陈小红(1992)采用立面二维紊流模型模拟了湖泊型水库的温度场^[3];邓云(2006)等将宽度平均的立面二维 $\kappa-\epsilon$ 湍流模型应用于水库水温预测,较好地模拟了温度分层环境下的紊动扩散系数^[4]。随着计算机技术的快速发展,三维水温数学模型开始发展。如,李冰冻(2007)等采用剪切应力输运紊流数学模型对小尺度水库三维水温开展了相关研究^[5];任华堂(2008)等将三维数学模型应用于二滩水库水温的研究^[6]。由于立面二维水温模型计算稳定性好,需率定的参数少,因而实用性较好,对预测有明显温度分层的大型水库的水温结构及其下泄水温过程具有良好的精度,目前研究中主要采用立面二维水温模型开展相关研究。

CE-QUAL-W2模型由美国陆军工程兵团和波特兰州立大学负责开发,应用于河流、河口、湖泊和水库的纵向/垂向二维水动力水质模型。CE-QUAL-W2模型主要用于模拟纵向/垂向二维水流、水温、水质等。CE-QUAL-W2广泛应用于水库和河口水温数值模拟,在国外已有400个成功应用案例,较为精确地模拟水库、湖泊的垂向水温状况,其模拟的绝对误差均在 0.5°C 以内,相对误差均在5%以内^[7]。

本文拟选用CE-QUAL-W2建立三峡水库水温模型,率定和验证CE-QUAL-W2模型主要参数,并分析三峡水库提前蓄水方案下的下泄水温变化。

2 水温模型

2.1 模型方程

2.1.1 连续方程

$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB \quad (1)$$

2.1.2 动量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} \\ &= gB \sin \alpha + g \cos \alpha B \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g \cos \alpha B}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xz}}{\partial z} + qBU_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$0 = g \cos \alpha - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (3)$$

2.1.3 水温方程

$$\frac{\partial B\Phi}{\partial t} + \frac{\partial UB\Phi}{\partial x} + \frac{\partial WB\Phi}{\partial z} - \frac{\partial (BD_x \frac{\partial \Phi}{\partial x})}{\partial x} - \frac{\partial (BD_z \frac{\partial \Phi}{\partial z})}{\partial z} = q_{\Phi}B + S_{\Phi}B \quad (4)$$

以上式中: U 为 x 向流速, m/s ; W 为 z 向流速, m/s ; B 为水面宽, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; α 为河底与水平线夹角, rad ; τ_{xx} 为控制体在 yz 面 x 向的湍流正应力, N/m^2 ; τ_{xz} 为控制体在 xy 面 x 向的湍流剪应力, N/m^2 ; q 为侧向单位体积净入库流量, m/s ; Φ 为侧向平均条件下热量浓度, J/m^3 ; D_x 为温度纵向扩散系数, m^2/s ; D_z 为温度垂向扩散系数, m^2/s ; q_{Φ} 为单元控制体侧向热量出入流的速率, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; S_{Φ} 为侧向平均的

热量源汇项, $J/(m^3 \cdot s)$ 。

湍流模型采用 $k-\epsilon$ 标准湍流模型。

2.2 模型边界条件

水面热交换是水体能量的主要来源之一。水面热交换由式 (5) 计算:

$$H_n = H_s + H_a + H_c - (H_e + H_{sr} + H_{ar} + H_{br}) \quad (5)$$

式中: H_n 为进入水面的净热量, W/m^2 ; H_s 为太阳短波辐射, W/m^2 ; H_a 大气为长波辐射, W/m^2 ; H_c 为热对流, W/m^2 ; H_e 为蒸发散热, W/m^2 ; H_{sr} 为水面反射的太阳短波辐射, W/m^2 ; H_{ar} 为水面反射的大气长波辐射, W/m^2 ; H_{br} 为水体长波辐射, W/m^2 。

3 三峡水库水温模型适用性

三峡水库泄水主要通过发电和泄洪方式进入下游河道。三峡水库泄洪坝段位于河床中部, 前缘总长 483m, 设有 22 个表孔和 23 个泄洪深孔, 其中深孔进口高程 90.00m, 孔口尺寸为 $7m \times 9m$; 表孔孔口宽 8m, 溢流堰顶高程 158.00m, 表孔和深孔均采用鼻坎挑流方式进行消能。三峡水库电站坝段位于泄洪坝段两侧, 设有电站进水口。电站进水口底板高程为 108.00m。压力输水管道为背管式, 内直径 12.40m, 采用钢衬钢筋混凝土联合受力的结构型式。校核洪水时坝址最大下泄流量 $102500m^3/s$ 。

本文以 2006 年 1 月 1 日至 2008 年 12 月 31 日的实测数据为三峡水库水温模型参数率定、验证的依据, 其中以 2006 年 1 月 1 日至 2007 年 12 月 31 日实测数据来率定模型参数, 2008 年 1 月 1 日至 2008 年 12 月 31 日实测数据来验证模型参数。

以库尾至坝前建立三峡水库垂向二维水温模型。根据库区地形变化条件, 模型纵向划分 113 段, 垂向划分 121 层。模型以干流朱沱水文站、支流嘉陵江北碛水文站和乌江武隆水文站同期实测日均流量和水温过程为上边界入流条件, 以三峡水库坝前日均水位和下泄日均流量为下边界条件, 以重庆和宜昌两个气象站实测日均气象数据为水温模型选用气象条件的依据, 以宜昌水文站实测日均水温过程为率定和验证的水温数据。因无库区水温实测数据, 故无法验证库区水温的吻合程度, 本研究只用下泄水温进行率定验证。水温模型率定和验证的结果如图 1 所示。模拟结果表明, 三峡水库垂向水温分层不明显, 结论与相关研究一致, 如图 2 所示。

由图 1 可见, 2006 年 1 月 1 日至 2008 年 12 月 31 日的计算结果与实测结果吻合较好。误差分析采用绝对误差和相对误差方式分析。

绝对误差 AME 的分析方法为:

$$AME = \frac{\sum_{i=1}^N |T_{obz} - T_{cal}|}{N} \quad (6)$$

式中: T_{obz} 为实测水温, $^{\circ}C$; T_{cal} 为计算水温, $^{\circ}C$; N 为模拟的数据个数, $N=1096$ 。

统计分析 2006 年 1 月 1 日至 2008 年 12 月 31 日的计算结果与实测结果的绝对误差为 $0.50^{\circ}C$ 。相对误差为 3.0%。

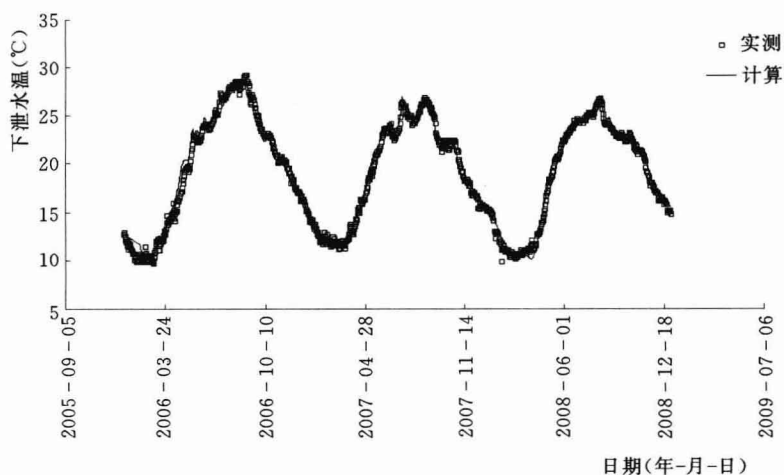


图1 三峡水库下泄水温实测结果与模拟结果对比图

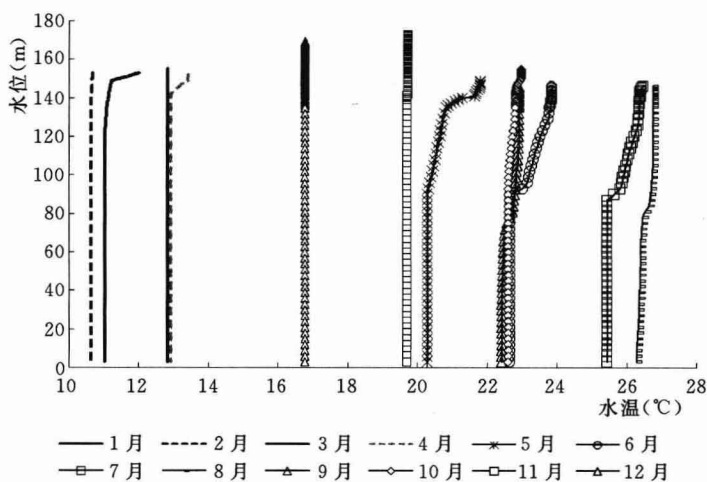


图2 三峡水库坝前垂向水温模拟结果

根据以上分析,采用CE-QUAL-W2建立的三峡水库水温模型具有较好的适用性,水库水温垂向分布结构模拟合理,下泄水温模拟结果较为准确,可用于三峡水库不同运行情景下水库水温结构和水库下泄水温的预测研究。

4 三峡水库提前蓄水情景下下泄水温模拟

4.1 三峡水库提前蓄水情景设计

根据三峡水库的调度规程,本研究设定在不提前蓄水情景下三峡水库于每年的9月15日开始蓄水,提前10d蓄水情景为9月5日开始蓄水,提前15d蓄水情景为9月1日开始蓄水。研究中设定的平水年入库流量过程如图3所示,提前蓄水的水库调度过程如图4

和图 5 所示。

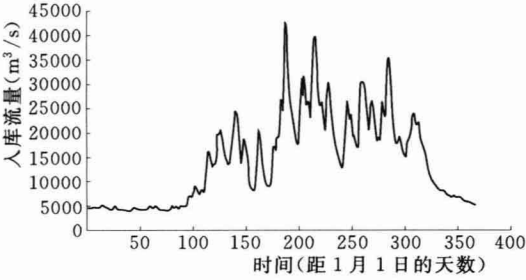


图 3 三峡水库入库流量过程

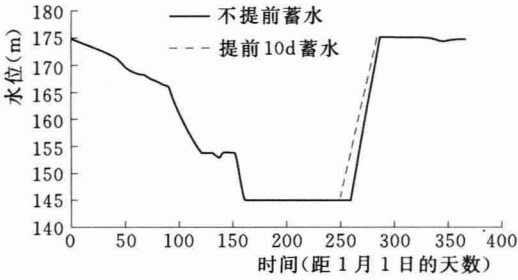


图 4 三峡水库提前 10d 蓄水调度过程

4.2 提前蓄水情景下下泄水温模拟

采用 CE-QUAL-W2 建立的三峡水库水温模型，选用蓄水情景设定的水文条件。水温及气象条件选取 2006 年为基准年，水温入流条件选取 2006 年入库实测水温，库区气象条件选取 2006 年实测库区气象条件，以分析三峡水库提前蓄水下泄水温的变化。三峡水库提前蓄水下泄水温变化如图 6 所示。

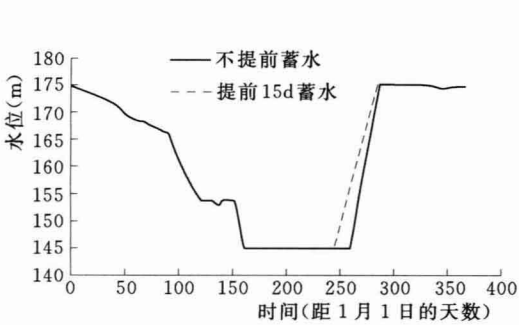


图 5 三峡水库提前 15d 蓄水调度过程

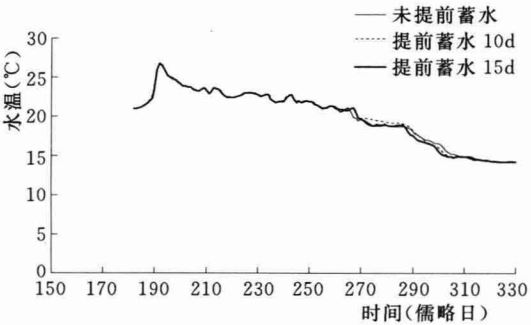


图 6 三峡水库提前蓄水下泄水温变化

根据近年的生物监测，中华鲟产卵期的儒略日（Julian date）为 300~330。根据三峡水库提前蓄水三峡水库下泄水温模拟结果，与三峡水库不提前蓄水下泄水温相比，下泄水温的变化均在儒略日 300 以前，故三峡水库提前蓄水不会改变中华鲟产卵期的水温。同时，由于提前蓄水，在一定时段内改变了库区水动力条件，提前蓄水在局部时段改变了下泄水温，对全年水温积温略有影响。然而，水温积温的变化对中华鲟性腺发育不会造成影响。

5 结论

(1) 本文利用三峡水库实测下泄水温数据，率定和验证了 CE-QUAL-W2 模型，验证结果与实测结果吻合良好，计算水温与实测水温绝对误差为 0.5℃，相对误差为

3.0%。结果表明, CE-QUAL-W2 在三峡水库水温分布及下泄水温模拟中具有较好的适用性。

(2) 采用 CE-QUAL-W2 建立的三峡水库水温模型模拟了三峡水库提前蓄水情景下的下泄水温变化过程, 结果表明: 三峡水库提前蓄水对中华鲟产卵期水温不会产生影响。提前蓄水情景下, 在蓄水期略微改变了下泄水温, 对全年水温积温稍有影响, 对中华鲟性腺发育基本不会造成影响。

参 考 文 献

- [1] 李怀恩. 分层型水库的垂向水温分布公式 [J]. 水利学报, 1993, (2): 43-49, 56.
- [2] 陈永灿, 张宝旭, 李玉樑. 密云水库垂向水温模型研究 [J]. 水利学报, 1998, (9): 14-20.
- [3] 陈小红. 湖泊水库垂向二维水温分布预测 [J]. 武汉水利电力学院学报, 1992, 25 (4): 376-383.
- [4] 邓云, 李嘉, 李然, 李克锋. 水库调度对溪洛渡电站下游水温的影响 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2006, 38 (5): 65-69.
- [5] 李冰冻, 李克峰, 等. 水库温度分层流动的三维数值模拟 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2007, 39 (1): 23-27.
- [6] 任华堂, 陈永灿, 刘昭伟. 三峡水库水温预测研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23 (2): 141-148.
- [7] Thomas M Cole, Scott A Wells. CE-QUAL-W2 User Manual [M]. U. S. Army Corps of Engineers, 2006.

气候变化条件下密云水库的水温模拟^{*}

李钟顺 陈永灿 刘昭伟 朱德军

(清华大学水利水电工程系, 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要 为了分析密云水库在未来气候变化条件下的水温分布规律, 该文基于 CE-QUAL-R1 模型, 建立了适用于密云水库的垂向一维水温模型, 分析了 1998~2007 年长时段的水温监测、模拟结果, 提出了高水位、低水位两种基本工况。利用全球气候模式 CGCM3.1 和 MIROC3.2 在 SRES-A1B 情景下的模拟结果对未来气候条件进行预测, 进而模拟 21 世纪末密云水库的水温分布。结果表明, 在全球变暖, 气温升高的情况下, 密云水库水温分层依然存在; 冬季逆温分布的时间将缩短 15d 左右, 水温分层的时间略有延长; 根据水位条件的不同, 表层水温将出现 1.4~4.7℃ 的升高, 底层水温变化较小, 冬季略有下降。

关键词 密云水库 水温模拟 气候变化

1 引言

根据 IPCC 的第四次评估报告及第五次评估的部分报告^[1,2], 当前, 全球正在经历一场以变暖为主要特征的气候变化过程。在全球和区域气候变化的影响下, 地表气温、太阳辐射、风场、相对湿度、降雨量的变化将改变水库、湖泊、河流等水域的水温分布, 进而对区域生态造成影响。从 20 世纪 90 年代开始, 国内外的学者开始研究这方面的相关问题。Stefan 等人利用垂向一维水质模型 Minlake 对美国 Minnesota 不同类型的湖泊进行了在 $2\times\text{CO}_2$ 的气候情景下的水温结构进行了预测^[3]。结果表明深水层的水温将有较大幅度的改变, 分层现象根据不同类型的湖泊将延长 20~90d。FANG 等人利用 CGCM 模型在美国大陆 $2\times\text{CO}_2$ 的气候情景下的计算结果, 预测了美国大陆不同地区 27 种类型的湖泊在未来气候条件下的水温变化^[4]。GAO 等利用包含冰盖的垂向一维水温模型对美国 and 加拿大的 5 个湖泊进行了数值模拟, 结果表明在未来气候情景下, 湖泊的结冰时间将延长, 化冰时间将提早, 结冰期将缩短^[5]。GOOSEFF 等利用气候模式的输出结果和纵向一维河流水温模型对 Lower Madison 河进行了水温模拟, 结果表明该河的生态系统将遭遇更高的水温带来的潜在影响^[6]。国内学者对于全球气候变暖造成的湖泊、水库水温的变化的相关研究还处于起步阶段。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金 (51039002)。