

CE-QUAL-W2 在紫坪铺水库的应用 及其参数敏感性分析

李 艳, 邓 云*, 梁瑞峰, 脱友才

(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: 采用宽度平均立面二维水动力模型 CE-QUAL-W2, 对紫坪铺水库水温结构进行了数值模拟, 运用库区实测资料进行了模型的参数率定及验证。库区及下泄水温的计算值与实测值吻合良好, 显示模型能较好地模拟库区垂向水温分层的形成发展过程, 以及升温期电站下泄水温变化, 证实该模型对紫坪铺水库的水温模拟是适用的, 也可为同类型水库提供参考。经参数灵敏度分析, 发现水温模拟对模型中的风遮蔽系数与动态光遮蔽系数最为敏感, 其余参数影响不明显, 可取模型默认值。其中风遮蔽系数增大, 风速加大, 水库表层温度降低, 水库垂向混合作用增强, 温跃层下移, 水温分层明显减弱, 库底水温明显提升; 动态光遮蔽系数增大, 入射的太阳辐射增强, 水库上层 40 m 水体温度升高, 中下层水体温度无明显变化。

关键词: 水库; 水温; CE-QUAL-W2; 敏感度分析

中图分类号: TV697.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-8227(2011)10-1274-05

水温分层是大型深水库的一个重要特征, 水库水温分层可能导致库区内的水质分层和生态分层; 水库运行将改变下游河道的水温分布规律, 使春季升温 and 秋季降温过程延迟, 直接表现为春季水温下降, 秋冬季水温升高^[1]。为更好地进行水库管理和制定环境保护对策, 水温数学模型已成为水温研究最主要的技术方法。

国内外不少研究机构和学者已经研究开发出多个实用水温模型^[2~6], 用于水库水温模拟的成熟商业软件^[7~11] 也不断涌现, 如 MIKE、EFDC、CE-QUAL-W2 等。其中 CE-QUAL-W2 模型是由美国陆军工程兵团水道实验站研发, 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, 主要用于模拟纵向/垂向二维水流、水温、水质等。本文采用 CE-QUAL-W2 模型模拟紫坪铺水库立面二维水温分布, 取得较好的模拟效果。文中结合紫坪铺水库水温实测和计算成果, 对模型参数的影响程度进行了分析, 其中风遮蔽系数和动态光遮蔽系数是对预测成果最敏感的参数, 对二者进行了更细致的敏感性分析。

1 CE-QUAL-W2 模型

1.1 模型基本方程

模型采用水动力方程和热输运方程耦合求解, 方程组由宽度平均的连续性方程、动量方程、状态方程、自由水面方程及热输运方程组成。

连续方程

$$\frac{\partial Bu}{\partial x} + \frac{\partial Bw}{\partial z} = qB \quad (1)$$

动量方程

$$\begin{aligned} x \text{ 向: } \frac{\partial uB}{\partial t} + \frac{\partial uuB}{\partial x} + \frac{\partial wuB}{\partial z} = & gB \sin \alpha \frac{\partial \eta}{\partial x} - \\ & \frac{gB \cos \alpha}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(B \rho A x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \\ & \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left(B \rho A z \frac{\partial u}{\partial x} \right) + qBu_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$z \text{ 向: } 0 = g \cos \alpha - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

状态方程

$$\rho = f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{SS}) \quad (4)$$

收稿日期: 2011-02-11; 修回日期: 2011-04-18

作者简介: 李 艳 (1985~), 女, 广西桂林人, 硕士研究生, 主要从事环境水力学研究。E-mail: cqlly.2005@163.com

* 通讯作者 E-mail: dengyun@scu.edu.cn

自由水面方程

$$B_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta} B u dz - \int_{\eta} q B dz \quad (5)$$

热输运方程

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

式中: B 为水体宽度, m ; u 、 w 分别为纵向和垂向流速, m/s ; q 为侧向单位体积净入库流量, L/s ; η 为水位, m ; α 为河道倾角, rad ; ρ 为水体密度, kg/m^3 ; A_x 、 A_z 分别为纵向和垂向紊动涡流粘滞系数, m^2/s ; u_x 为支流流速的 x 分量; $f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{SS})$ 为密度函数, 自变量为水温、盐度、悬浮物浓度。当只计算水温而不计算污染物时, 密度函数仅为水温的函数; B_{η} 为水面宽度, m ; Φ 为侧向平均条件下热量浓度, J/m^3 ; $\Phi = \rho C_p T$, C_p 为水的比热, $J/kg/^\circ C$, T 为水温, $^\circ C$; D_x 、 D_z 分别为纵向和垂向的离散系数, m^2/s ; q_{Φ} 为单元控制体侧向热量出入流的速率, $J/m^3/s$; S_{Φ} 为热源项, $J/m^3/s$ 。

1.2 紊动涡流粘滞系数的计算

由于在纵向上对流输运占主要地位, 紊动切应力的影响相对较小, 因此对纵向涡流粘滞系数的模拟采用较为简单的常数模型, 即 $A_x = const$ 。

由于垂向速度较小, 紊动切应力引起的扩散与对流输运同样重要, 不适宜采用简单的常数模型计算垂向涡流粘滞系数。CE-QUAL-W2 模型提供了 6 种垂向涡流粘滞系数 A_z 计算公式用于模拟不同特征水域。对于模拟库区水温时, 模型推荐采用 W2 公式:

$$\begin{cases} A_z = \kappa \left(\frac{l_m^2}{2} \right) \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{wy} e^{-2kz} + \tau_{ytributary}}{\rho A_z} \right)^2} e^{-CR_i} \\ l_m = \Delta z_{max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: A_z 为垂向涡流粘滞系数, m^2/s ; κ 为范卡门常数; l_m 为混合长度, m ; u 为纵向流速, m/s ; z 为垂向坐标, m ; τ_{wy} 为因风而产生的横向剪应力, N/m^2 ; k 为波数; $\tau_{ytributary}$ 为因支流流入而产生的横向剪应力, N/m^2 ; C 为常数, 假定为 0.15; R_i 为理查森数; Δz_{max} 为垂向网格间距的最大值, m 。

1.3 热源项计算

模型中主要考虑水面热交换, 包括太阳短波辐射 H_s 、大气长波辐射 H_a 、水面长波辐射 H_{br} 、蒸发热损失 H_e 和热对流 H_c 。水面热交换的计算参考

文献[8], 此处不再赘述。

1.4 主要参数

影响水库水温结构的因素较多, 主要有气象条件、入流条件、出流条件、水库几何形态等。CE-QUAL-W2 计算水库水温 (不考虑污染物) 的主要参数如表 1 所示[8]。其中风遮蔽系数 (Wind-sheltering Coefficient, WSC) 用于修正测点风速与库区实际风速的差异, 动态光遮蔽系数 (Dynamic Shading Coefficient, Dynsh) 用于考虑地形、植被对太阳辐射的遮蔽作用 (本次研究假定地形、植被对太阳辐射的遮蔽作用不随时间变化, 因此未考虑植物长叶落叶、植物高度及太阳入射角变化等情况)。涡流粘滞系数、风遮蔽系数直接影响水动力条件, 从而影响热量和污染物质传输。其他系数直接影响温度, 进而影响水动力学条件。

表 1 模型主要参数

Tab. 1 Main Parameters in Model

系数	纵向涡流粘滞系数	纵向涡流扩散系数	风遮蔽系数	动态光遮蔽系数	水表面太阳辐射吸收系数	纯水中太阳辐射衰减系数
变量名	A_x	D_x	WSC	Dynsh	BETA	EXH2O
默认值	$1m^2/s$	$1m^2/s$	需率定	需率定	0.45	0.45/m

2 紫坪铺水库水温模拟

紫坪铺水利枢纽工程位于岷江上游, 坝址处多年平均流量 $469 m^3/s$, 年径流量总量 148 亿 m^3 , 水库正常蓄水位 877 m, 死水位 817 m, 总库容 11.12 亿 m^3 , 其中正常蓄水位以下库容 9.98 亿 m^3 , 是四川省以灌溉、供水为主, 结合发电、防洪、旅游等的大型综合利用水利枢纽工程。紫坪铺水库为一河道型深水库, 坝前水深超过 100 m, 库区长度约 24 km, 形状狭长。

库区被划分为 43×71 (纵向 $\times$ 垂向) 个矩形单元。单元纵向尺寸为 $315 \sim 600 m$, 垂向尺寸为 $2 m$ 。采用 2009 年 11 月 6 日~2010 年 7 月 15 日的径流过程及入库水温和气象条件, 以 2009 年 11 月 6 日实测值为初始温度场 (见图 1), 图中离散点为温度测点位置。以初始时刻至 2010 年 3 月 31 日的实测水温成果进行模型参数的率定, 然后以率定的参数模拟 2010 年 3 月 31 日至 2010 年 7 月 6 日水温过程, 并以 2010 年 7 月 6 日水温实测值做模型验证。

经过多次试算, 发现紫坪铺水库垂向水温对风遮蔽系数与动态光遮蔽系数最为敏感, 其余参数对库区水温影响不明显, 可取模型默认值。经过率定,

紫坪铺水库水温模型的主要参数取值为:纵向涡流粘滞系数 $A_x = 1 \text{ m}^2/\text{s}$, 纵向涡流扩散系数 $D_x = 1 \text{ m}^2/\text{s}$, 风遮蔽系数 $WSC = 2.0$, 动态光遮蔽系数 $D_{\text{dynsh}} = 0.8$, 水表面太阳辐射吸收系数 $BETA = 0.45$, 纯水中太阳辐射衰减系数 $EXH_2O = 0.45/\text{m}$ 。库区 2010 年 3 月 31 日垂向水温率定成果见图 2, 以率定的参数验证 2010 年 7 月 6 日库区垂向水温分布, 成果见图 3, 水库下泄水温的计算值与实测值的对比见图 4。模型计算值与实测值拟合较好, 能够较好模拟出水库垂向水温分布结构, 证实了 CE-QUAL-W2 模型对紫坪铺水库的适用性, 也可同为

类型水库提供参考。

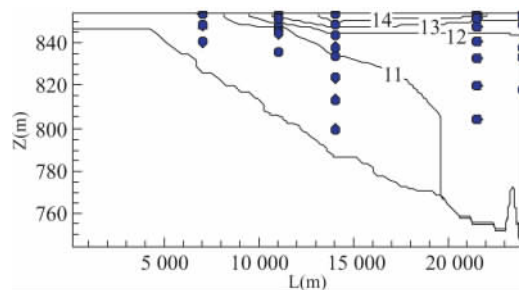


图 1 初始温度场

Fig. 1 Initial Temperature Field

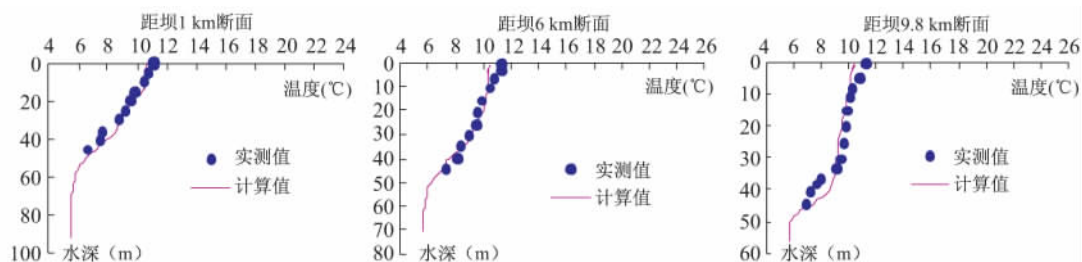


图 2 2010 年 3 月 31 日垂向水温计算值与实测值比较

Fig. 2 Comparison of Observed and Computed Data for Vertical Temperature on March 31, 2010

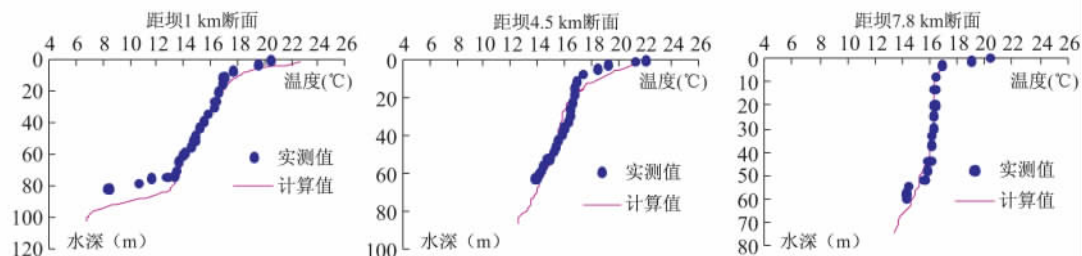


图 3 2010 年 7 月 6 日垂向水温计算值与实测值比较

Fig. 3 Comparison of Observed and Computed Data for Vertical Temperature on July 6, 2010

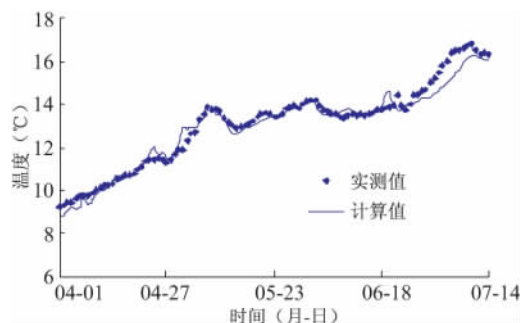


图 4 下泄水温计算值与实测值比较

Fig. 4 Comparison of Observed and Computed Data for Effluent Flow Water Temperature

3 CE-QUAL-W2 参数对水库水温分布结构的影响

在紫坪铺水库水温模型参数率定中,发现水库

垂向水温分布对风遮蔽系数和动态光遮蔽系数最敏感。本文就模型中的风遮蔽系数和动态光遮蔽系数的变化对紫坪铺水库水温结构影响进行试验模拟分析,分别采用 2010 年 3 月 31 日与 2010 年 7 月 6 日紫坪铺水库坝前断面垂向水温分布进行对比分析。

3.1 风遮蔽系数对水库水温分布结构的影响

模型计算中,风遮蔽系数是修正测点风速与库区实际风速的差别。风遮蔽系数大,则库区风速大;风遮蔽系数小,则库区风速小。由公式(7)可知,风遮蔽系数变化,引起风速变化,风速变化引起横向剪应力 τ_{xy} 变化,进而引起垂向涡流粘滞系数的变化。风速变化还会影响水面热交换中蒸发的计算。而垂向涡流粘滞系数、水面热交换会影响整个垂向断面上的水温分布,因此研究风遮蔽系数对水库水温结构的影响是十分必要的。

图 5 为坝前断面垂向水温分布在不同风遮蔽系

数取值情况下的模拟结果。由图可知,坝前断面垂向水温分布在 3 月为单温跃层结构,7 月为双温跃层结构。风遮蔽系数变化,水库坝前断面垂向水温分布发生较大变化。风遮蔽系数增大,风速增大,风力搅动加快了热量交换和混合,表层温水层厚度有

所加大。风速增大,垂向涡粘系数增大,紊流扩散作用增强,加速了垂向上热量和动量的传递,中下层水体温度升高。随着风遮蔽系数增大,水库垂向混合作用增强,对下层水体水温干扰加大,水温分层明显减弱,库底水温明显提升。

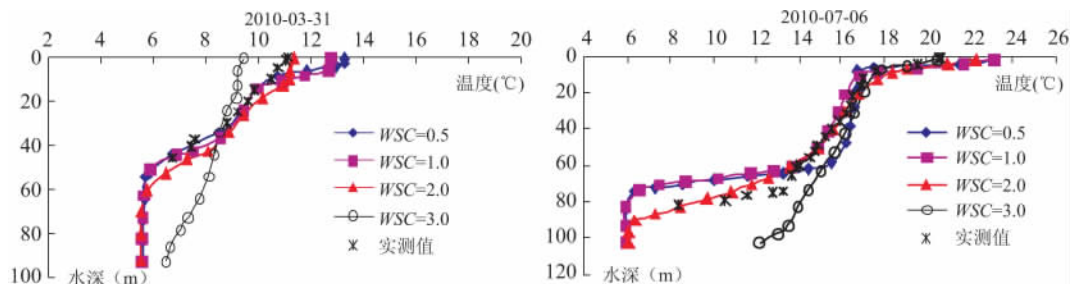


图 5 不同风遮蔽系数下水库坝前断面水温分布比较图

Fig. 5 Comparison of Temperature Distribution Before the Dam at Different Wind Sheltering Coefficients

3.2 动态光遮蔽系数对水库水温分布结构的影响

由于植被和地形的遮蔽,到达水表面的太阳辐射受到不同程度的影响。动态光遮蔽系数用来考虑植被和地形对太阳辐射的遮蔽。动态光遮蔽系数取成 0.0 时,太阳辐射 100% 受到遮蔽;动态光遮蔽系数逐渐增大时,太阳辐射受到遮蔽逐渐减小,到达水体表面太阳辐射增加。动态光遮蔽系数取成 1.0 时,太阳辐射无遮蔽,100% 到达水体表面。

图 6 为坝前断面垂向水温分布在不同动态光遮蔽系数取值情况下的模拟结果。由图可知,动态光遮蔽系数增大,水库上层水体都有不同程度的升幅。随动态光遮蔽系数增大,3 月份水库上层约 40 m 水体水温增加,下层水体水温变化不明显。7 月份水库表层约 10 m 水体水温升高,以下水体水温无明显变化。动态光遮蔽系数对水库上层一定范围内的水体温度影响较大。

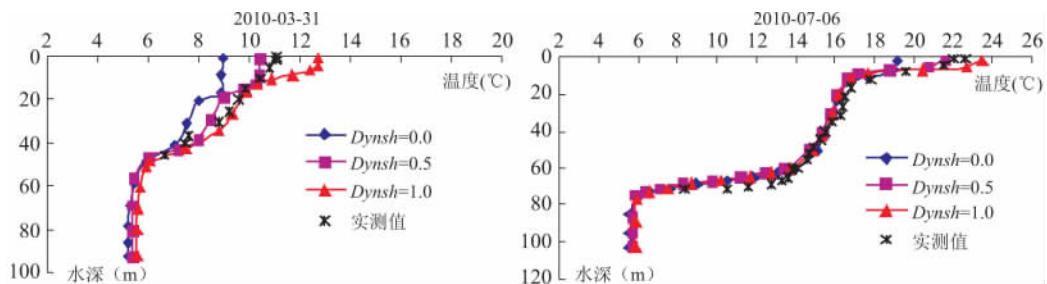


图 6 不同动态光遮蔽系数下水库坝前断面水温分布比较图

Fig. 6 Comparison of Temperature Distribution Before the Dam at Different Dynamic Shading Coefficients

4 结论

本文建立了紫坪铺水库立面二维水温数值模拟模型,利用实测水温数据对模型参数进行了率定验证。在此基础上,重点分析了模型中对水温模拟影响最大的风遮蔽系数和动态光遮蔽系数对水库水温分布结构的影响。通过本研究可得到以下结论:

(1)CE-QUAL-W2 模型对紫坪铺水库的垂向温度分层结构具有较好的模拟效果,证实该模型对紫坪铺水库的水温模拟是适用的,也可为同类型水

库提供参考;

(2)紫坪铺水库水温模拟对 CE-QUAL-W2 模型中的风遮蔽系数与动态光遮蔽系数最为敏感,其余参数对库区水温模拟影响不明显,可取模型默认值。

(3)风遮蔽系数增大,风速加大,水库表层温度降低,水库垂向混合作用增强,温跃层下移,对库底水温扰动增强,水温分层减弱;动态光遮蔽系数增大,入射的太阳辐射增强,水库上层 40 m 水体温度升高,中下层水体温度无明显变化。

参考文献:

- [1] 邓 云. 大型深水库的水温预测研究[D]. 成都: 四川大学, 2003.
- [2] CHU C R, SONG C K. Numerical simulation of windinduced entrainment in a stably stratified water basin[J]. J Hydraulic Research, 1997, 35(1): 21~41.
- [3] FARRELL G, STEFAN H G. Mathematical modeling of plunging reservoir[J]. J Hydraulic Research, 1998, 26(5): 525~537.
- [4] 陈永灿, 张宝旭, 李玉梁. 密云水库垂向水温模型研究[J]. 水利学报, 1998(9): 14~20.
- [5] 江春波, 张庆海, 高忠信. 河道立面二维非恒定水温及污染物分布预报模型[J]. 水利学报, 2000(9): 20~24.
- [6] 郝红升, 李克峰, 李 然, 等. 取水口高程对过渡型水库水温分布结构的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 21~25.
- [7] DANISH HYDRAULIC INSTITUTE. MIKE3 esturrline and coastal hydraulic and oceanography hydraulic module reference manual[M]. DHI, 2002.
- [8] U S ARMY CORPS OF ENGINEERS. CE-QUAL-W2 user mannul[M]. U S Washington: U S Army Corps, 2010.
- [9] WELLS S A. River basin modeling using CE-QUAL-W2 version 3[C]//Proc ASCE Inter Water Res Engr Conf. Seattle, WA, 1999.
- [10] KURUP R G, HAMILTON D P, PHILLIPS R L. Comparison of two 2-dimensional, laterally averaged hydrodynamic model applications to the Swan River Estuary[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2000, 51(6): 627~639.
- [11] DELIMAN P N, Gerald J A. Application of the two-dimensional hydrothermal and water quality model, CE-QUAL-W2, to the Chesapeake Bay-Conowingo Reservoir[J]. Journal of Lake and Reservoir Management, 2002, 18(1): 1~9.

APPLICATION OF CE-QUAL-W2 TO ZIPINGPU RESERVOIR AND SENSITIVITY ANALYSIS OF MODEL PARAMETERS

LI Yan, DENG Yun, LIANG Rui-feng, TUO You-cai

(State Key Laboratory and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: CE-QUAL-W2, a two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic model, was applied to simulate the water temperature structure in Zipingpu reservoir. Model parameters were adjusted during calibration and the simulation results were compared with the observed measurements in site. The simulation results of area of reservoir and effluent flow were compared favorably with the observed measurements, showing that the model can simulate the process of formation and development in vertically stratified reservoir and changes of water temperature for power station during temperature raising period. The model is suitable to be applied to simulate vertical water temperature structure in Zipingpu reservoir, which also can provide reference for the simulations of vertical water temperature in similar reservoirs. Through sensitivity analysis of parameters, it is found that wind-sheltering coefficient and dynamic shading coefficient's effects on simulation of vertical water temperature are most obvious. The rest parameters have little effects on simulation of vertical water temperature, so they can be the model's default values. The influences of wind-sheltering coefficient and dynamic shading coefficient on temperature structure in reservoir are analyzed. It is shown that the wind-sheltering coefficient's increase, will cause that wind speed increases, reservoir surface temperature decreases, reservoir vertical mixing action is enhanced, thermo-cline moves down, water temperature stratification is weakened and temperature bottom rises; Dynamic shading coefficient's increase, causes the enhancement of incidence of solar radiation, upper 40 m water body's temperature rises, without obvious changes of temperature in middle and bottom water body.

Key words: reservoir; water temperature; CE-QUAL-W2; sensitivity analysis