

磨盘山水库温度场的数值模拟

伍悦滨¹, 徐莹², 田禹¹, 张海龙³

(1. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090, ybwu@hit.edu.cn;
2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090; 3. 哈尔滨供水工程有限责任公司, 哈尔滨 150076)

摘要: 基于 EFDC 建立水库水动力学模型进行流场、温度场、浓度场及生态过程的数值模拟是进行水库环境保护、管理及运行的有力工具. 以磨盘山水库为研究对象, 进行非稳态温度场数值模拟. 结果表明: 磨盘山水库水温全年均处于分层状态, 库表分层现象最为明显, 至库底分层减弱, 库底水温变化平缓. 4 月垂向温差较小, 6、7 月形成表层温跃层, 对于垂向传质具有一定程度的屏障作用, 至 9、10 月份出现秋季翻滚, 垂向掺混加强, 对水质影响较大. 因此, 水库取水口深度应该随季节调整, 丰水期至冬季时段, 建议净水厂强化水处理工艺.

关键词: 水动力学模型; 水库水温; 温度分层; 数值模拟

中图分类号: TV133 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2010)06-0925-04

Numerical simulation of temperature fields in Mopanshan reservoir

WU Yue-bin¹, XU Ying², TIAN Yu¹, ZHANG Hai-long³

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, ybwu@hit.edu.cn; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
3. Harbin Water Supply Engineering Company, Harbin 150076, China)

Abstract: Numerical simulation of flow field, temperature field, concentration field and ecological process is a powerful tool for operation, management and environmental protection of reservoir based on EFDC. The hydrodynamic model is utilized to simulate the temperature field of Mopanshan reservoir under unsteady flow condition and all the numerical simulations are carried out. The results show that the reservoir is under the condition of thermal stratification in the whole year. In April the temperature difference in vertical is small. In June and July the water close to the surface forms a thermocline, which is a barrier of mass transfer in vertical. In September and October the mixing of water in different temperature layers is strengthened and it has a large effect on water quality. The study provides a reference for locating the water intake with seasons. It is suggested that water plants should enhance the preprocess in high water period in September and October.

Key words: hydrodynamic model; reservoir temperature; temperature layer; numerical simulation

水库蓄水带来了防洪、发电、灌溉, 供水等综合效益, 同时也引起了河流水文、泥沙、生态等各方面的环境影响, 随着社会经济的发展, 大量工业废水和城市污水未经处理排入河流、水库, 超过了水体的自净能力, 河流, 水库污染日益严重, 影响着人类

的生存和发展. 水温是水质的一个重要影响因素, 因此进行水库水温分析和预测, 是水库环境评价、规划、治理和管理的基础.

磨盘山水库位于拉林河干流上游五常市沙河子乡沈家营村的上游 1.8 km 附近, 拉林河是松花江右岸的一级支流, 流域总面积 19 200 km². 除供水外, 磨盘山水库兼有防洪、灌溉及其他综合利用效益. 水库的建成将改变库区及大坝下游河段的水文和水环境状况, 进而对水库下游河段的灌溉和生活用水产生重大影响.

收稿日期: 2010-03-01.

基金项目: 黑龙江省科技攻关计划资助项目 (GB07C20202);

黑龙江省留学回国基金资助项目 (LC06C16)

作者简介: 伍悦滨 (1966—) 女, 教授;

田禹 (1968—) 女, 教授, 博士生导师.

1 数学模型

EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code) 是由美国国家环保署资助开发, 用于模拟河流、湖泊、水库、海湾、湿地和河口等水环境系统中流场、温度场、浓度场及生态过程的三维数值计算模型^[1-2]. 对水库水温进行模拟的数学模型主要采用 Mellor 等^[3-5]提出的控制方程.

(1) 连续方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(m_x m_y H) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y H u) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x H v) + \frac{\partial}{\partial z}(m_x m_y w) = Q_H + \delta(0)(Q_{SS} + Q_{SW}), \quad (1)$$

(2) 曲线正交坐标中 x 向和 y 向动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(m H u) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y H u u) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x H v u) + \frac{\partial}{\partial z}(m w u) - (m f + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y}) H v = -m_y H \frac{\partial}{\partial x}(g \zeta + P) -$$

$$m_y \left(\frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial (m H^{-1} A_v \frac{\partial u}{\partial z})}{\partial z} + Q_u, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(m H v) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y H u v) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x H v v) + \frac{\partial}{\partial z}(m w v) -$$

$$(m f + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y}) H u = -m_x H \frac{\partial}{\partial y}(g \zeta + P) -$$

$$m_x \left(\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial (m H^{-1} A_v \frac{\partial v}{\partial z})}{\partial z} + Q_v, \quad (3)$$

(3) 温度

$$\frac{\partial (m H \theta)}{\partial t} + \frac{\partial (m_y H u \theta)}{\partial x} + \frac{\partial (m_x H v \theta)}{\partial y} + \frac{\partial (m w \theta)}{\partial z} = \frac{\partial (m H^{-1} A_b \frac{\partial \theta}{\partial z})}{\partial z} + Q_\theta. \quad (4)$$

式中: u 和 v 分别是沿着正交曲线水平方向 x 向和 y 向的流速分量; m_x 和 m_y 是平面坐标转换因子, $m = m_x m_y$.

$$w = w^* - z \left(\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u m_x^{-1} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v m_y^{-1} \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) + (1 - z) \left(u m_x^{-1} \frac{\partial h}{\partial x} + v m_y^{-1} \frac{\partial h}{\partial y} \right). \quad (5)$$

其中, z 为无量纲垂向坐标, w^* 为物理垂向速度; 水深 $H = h + \zeta$, h 代表实际垂向的底高程; ζ 代表水位; 动量方程中 f 表示科里奥利(Coriolis)参数; A_v 为垂向紊动粘性系数; Q_u 和 Q_v 表示动量方程中的源汇项; θ 为水温; 在温度方程中的 Q_θ 项是外源输入输出项. 连续方程中的 Q_{SS} 和 Q_{SW} 表示

河床与水体之间的泥沙及水的交换通量, 其正值表示通量由河床入水体中, 反之为负值. 三角函数 $\delta(0)$ 表示这类通量进入水体的最底层.

2 数值计算及分析

磨盘山水库为典型的河道型水库, 干流回水长约 13 km. 地形总趋势为东南高、西北低, 呈不对称的“U”字型, 地面坡降约为 3.8%. 磨盘山水库坝高 45 m, 正常蓄水位 318 m, 相应的水库总库容 355.92 × 10⁶ m³, 调节库容为 292.95 × 10⁶ m³. 汛限制水位为 317.00 m, 重复利用库容为 27.27 × 10⁶ m³. 设计洪水位为 318.77 m, 相应的设计总库容为 375.98 × 10⁶ m³. 校核洪水位为 320.89 m, 相应的校核总库容为 443.02 × 10⁶ m³.

2.1 网格划分

库区地形资料是进行水库模拟计算的基础, 首先根据水库地形高程图, 按照模型要求划分计算网格. 计算中时间步长为 10 s, 运行周期为 1 d, 即 86 400 s, 模型运行时间设定为 30 个周期. 控制方程的数值解法为有限体积法和有限差分法的结合, 对于模拟对象, 沿流动方向采用正交曲线网格离散, 而在垂直方向上则采用分层方法进行离散, 进而引入了层厚的概念. 根据磨盘山水库的地理特点, 将其水平方向上划分 1 052 个矩形网格, 每个单元格大小为 85 m × 65 m. 考虑温度分层效应, 垂直方向上分为 8 层, 占水深比例分别为 12.5%, 12.5%, 20%, 20%, 20%, 5%, 5%, 5%. 水库概化及计算区域单元格见图 1.

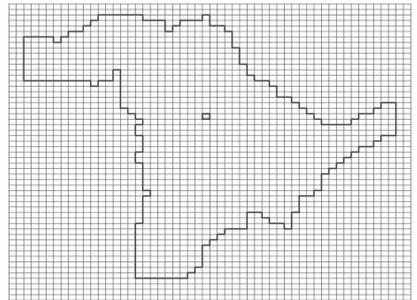


图 1 水库概化及计算区域单元格

2.2 初始条件

拉林河流域内现有沈家营、五常等 13 处水文站, 根据磨盘山水库工程地点和资料情况, 选用的主要分析测站是拉林河的沈家营测站. 测站观测项目有降水、蒸发、气温、气压、日照、温度和风速等以及磨盘山库区的日气温变化. 初始水位水深根据地形图得到, 初始水温根据水库管理区测量资料以及《水利水电工程水文计算规范》(SDJ214

-83)(试行)条例中给出.地面坡降为3.8%,初始计算流速设为零.

2.3 边界条件

根据库区管理站测量的2007年入库流量和出库流量作为上、下游边界条件,入库流量过程线见图2,出库流量过程线见图3.

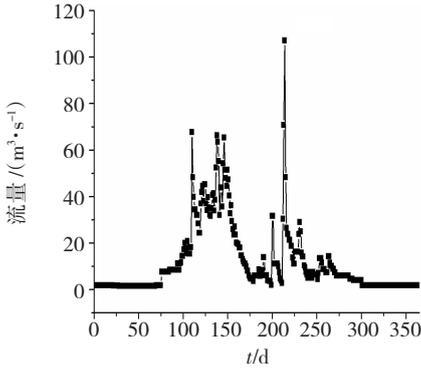


图2 入流流量过程线

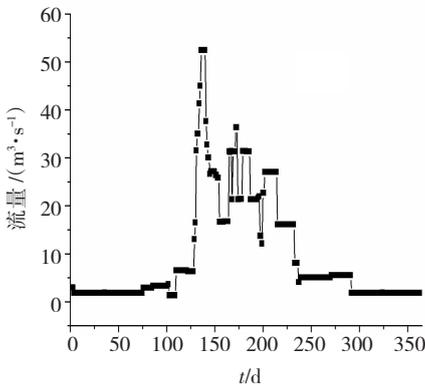


图3 出流流量过程线

2.4 模型验证

通过对磨盘山水库枯水期、平水期和丰水期的模拟,得到了水库出流温度变化曲线,并与实际出流温度变化进行了比较,结果如图4~6所示.模拟结果与实测值基本吻合,说明计算模型及方法的可行性.

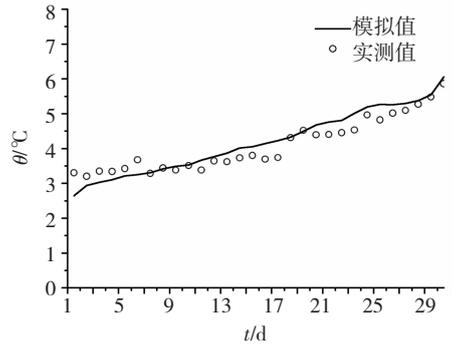


图4 2007年4月坝前水温实测与模拟值对比

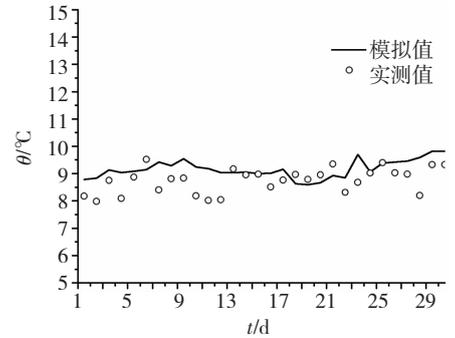


图5 2007年6月坝前水温实测与模拟值对比

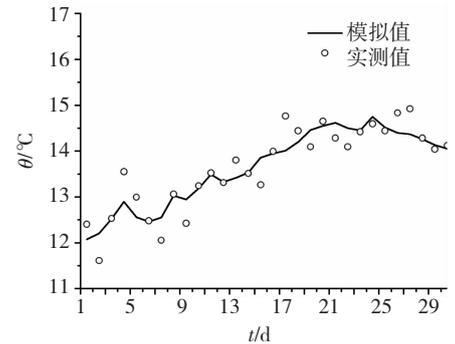


图6 2007年9月坝前水温实测与模拟值对比

2.5 模拟结果及分析

本文分别模拟了2007年枯水期(四月)、平水期(六月)、丰水期(九月)磨盘山水库的水温变化规律.坝前水温在枯水期、平水期、丰水期的温度场计算结果分别见图7.

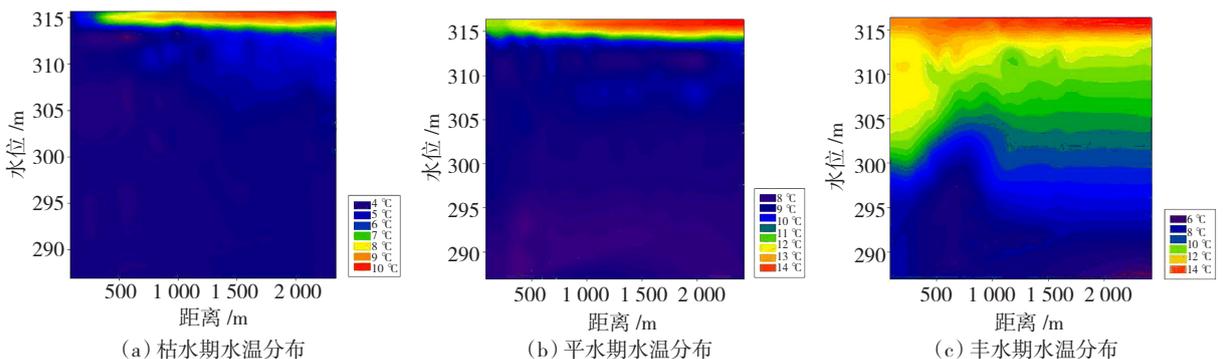


图7 坝前断面的温度分层

水温在4月份为升温期,入流水温和表面热通量逐渐增加,上层水体水温增长迅速;在4月末,表层水温已达到10℃,但是靠近底部的水温几乎没有变化,仍保持低于6℃的低温,在水面附近出现了较大的温度梯度,形成了较明显的水温分层.6月份为高温期,入流水温和气温都达到最高.在表面很薄的水体中,由于水气热交换形成了表层温跃层^[6-7],表层水温保持在15℃作用,底部的水温缓慢上升了2~3℃,但仍然保持低于8℃的温度,在整个垂向断面上的温差达到了接近10℃的水平,在这一时期,水体上部分保持稳定的温度分层现象.9月份为降温期,气温和入流水温逐渐下降,水体向大气散失热量,冷水下沉使表层温跃层消失,水库在整体垂直方向形成水温分层,并开始出现层与层之间的垂向掺混,即秋季翻滚现象^[8-10].

水库的这种分层结构对水质具有重要的影响.对于磨盘山水库而言,由于其温度分层作用,不同深度的水质状况将有所不同.在枯水期,水库水温混合基本均匀,导致水中的营养物质沿垂向均匀混合.又加之冬季水中生化反应缓慢,消耗较少的营

养物质,至春季时沉积了大量营养物质,为藻类快速生长提供了物质基础.平水期处于夏季,水库上部分水体水温分层较为明显.此时温跃层在垂直方向上具有“屏障”作用^[11-13],水中的营养物质在垂直方向上的交换量被大大的削减.在丰水期,汛期来临,洪水挟带着冲起的河底淤沙,涌进水库,使大量的亚磷酸盐进入水流.水库水温的稳定分层被破坏后,“屏障”消失,水库底层的沉淀物和有害物质会翻滚到表层,对水体造成污染.

图8是枯水期、平水期和丰水期在水库输水洞断面的模拟水温分布剖面图.磨盘山水库的输水洞位于右岸,进口位于右岸坝轴线上游约250m处.水体自输水洞进入长直管线,向净水厂输送原水.由模拟结果可知,水库在枯水期和平水期沿深度方向上水温分布稳定,水温较低,可以直接选取水面以下10m的水库水作为饮用水水源;在丰水期,水温结构发生变化.随着气温降低,表层水温也下降,相应的水密度增大,导致表层水开始下沉,底层水上升,在整个深度范围内表层和底层发生了混合,这种秋季翻滚现象可能会引发水质问题^[14-15].

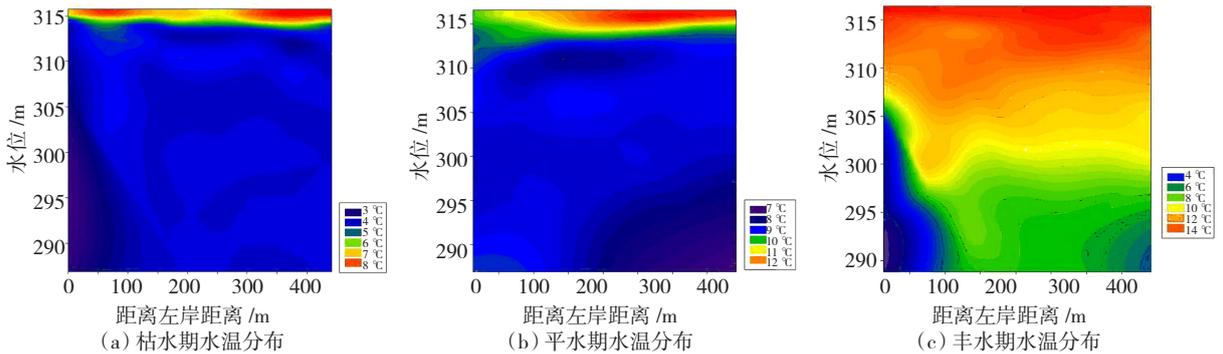


图8 输水洞断面水温分布

3 结 论

1)通过实测值与模拟值的对比验证,应用EFDC建立的水库水动力学模型,能够很好的模拟水库中水温的时空分布.因此基于该模型进行水体中流场、温度场、浓度场及生态过程的数值模拟是进行水库环境保护、管理及运行的有力工具.

2)磨盘山水库属于分层型水库,水温出现季节性分层现象,库表分层现象最为明显,至库底分层减弱,库底水温变化平缓.枯水期垂向分层现象不明显,平水期形成表层温跃层,对于垂向传质具有一定程度的屏障作用,丰水期出现秋季翻滚,对水质影响较大.

3)水库取水口深度应该随季节调整.在枯水

期和平水期沿深度方向上水温分布稳定,大部分水体水温较低,水深10m以下均可布置取水口;而在丰水期出现的秋季翻滚现象,形成水体垂向的自循环流动,可能引发水质问题.因此,丰水期至冬季时段,取水口位置应有所调整,并建议净水厂强化水处理工艺.

参 考 文 献:

[1] HAMRICKJ M. A Three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects [M]. Gloucester, Massachusetts: Virginia Institute of Marine Science, the College of William and Mary, 1992: 1 - 63.
 [2] 李云生, 刘伟江, 吴悦颖, 等. 美国水质模型研究进展综述[J]. 水利水电技术, 2006(2): 68 - 73.