

文章编号:1004-8227(2011)01-0084-06

三峡水库香溪河库湾水温分布特性研究

余真真,王玲玲*,戴会超,成高峰

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:建立三维水温数学模型,对2007年三峡水库香溪河库湾及部分库首江段的水温分布特性进行了数值研究。根据计算区域的特点,模型采用贴体网格系统,并充分考虑水体与外界的热交换、入流、出流等因素,利用实测资料率定相关参数后进行模拟,结果表明:(1)香溪河库湾属于季节性水温分层型水体,分层期会有温跃层的出现;但在水平方向上水温差异较小,全年水温在11.1~29.14℃变化。(2)库区干流由于水体紊动作用强,模拟时段2007年全年没有发生水温分层现象。(3)库湾在水温分层期间,表层的水温普遍高于干流,底层局部水温则低于干流,香溪河口存在水平及立面环流与潜流现象,呈现极为复杂的三维流动特性。研究结果可为三峡库区生态环境安全管理提供科学依据。

关键词:数学模型;香溪河库湾;长江干流;水温分布
文献标识码:A

香溪河系长江三峡水库湖北库区的第一大支流,同时也是三峡大坝上游第一条主要支流,流域总面积3 099 km²,发源于湖北省西北部神农架林区,沿流经兴山县、秭归县,于香溪镇注入长江(见图1),入江口距三峡大坝约30 km^[1,2]。三峡水库蓄水成库后,由于受库首高水位的顶托,香溪河部分河段随即成为库湾。

在河流上修建水库,不仅会引起库区水动力条件的改变,而且也会对水环境状况产生影响。由于太阳辐射的变化和水体在垂向上增温冷却的强度不同,使水库温度呈现分层现象。国内外已有的研究表明,水温分层可抑制水体在垂直方向上的交换^[3~5],导致溶解氧以及其它水质因子也呈分层状态。一般而言,水体上部溶解氧含量较高,由于水温分层阻碍其向下输移,再加上有机物的耗氧分解,使得下部水体出现厌氧状态,底泥中的氨氮和磷酸盐就会释放出来,对水体质量造成不利影响。水温作为评价水质、研究水体生态环境的重要因素之一,受到了人们的广泛关注。余文公^[6]通过资料分析研究了三峡水库蓄水前后下泄水温变化;卞俊杰^[7]利用实测资料判断了三峡坝前河段水库水温分布类型;

熊伟^[8]、任华堂^[9]分别建立数学模型分析并预测了三峡水库干流水温分布规律。然而,作为三峡水库重要组成部分的支流库湾,其水动力条件与长江干流相比显得极为微弱,水体几乎不再流动而处于静止状态^[10]。三峡水库运行实践表明,长江支流库湾往往是水体富营养化与水华爆发的多发地^[11]。所

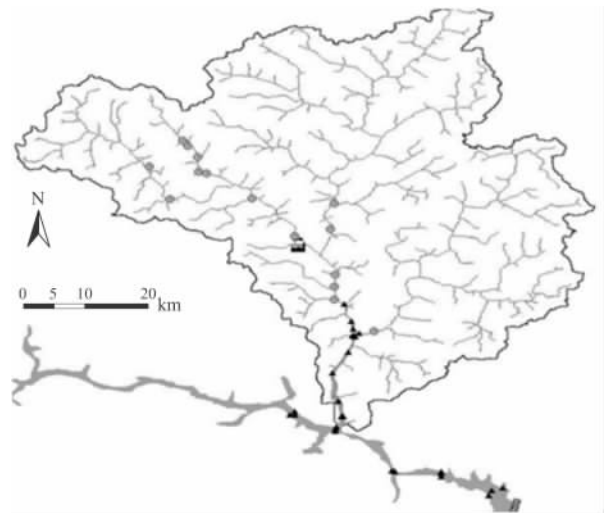


图1 香溪河流域示意图
Fig. 1 Sketch of Xiangxi Basin

收稿日期:2010-03-11;修回日期:2010-07-31

基金项目:杰出青年基金项目(50925932);国家科技支撑计划资助项目(2008BAB29B09);江苏省“青蓝工程”资助项目

作者简介:余真真(1982~),女,河南省郑州市人,博士研究生,主要研究方向为水环境数值模拟技术。E-mail:yuzhenzhen8@126.com

* 通讯作者 E-mail:wanglingling@hhu.edu.cn

以,就整个库区而言,支流库湾的水质状况尤其需要高度关注。鉴于此,本文以香溪河支流为例对库湾的水温分布特性进行研究,为三峡水库的可持续开发和利用提供参考。

1 研究方法

根据质量、动量和热量平衡建立符合物理机制的水温数学模型,数值求解该模型即可获得水温分布的欧拉场描述,因此,本文采用数值模拟的方法研究香溪河库湾水温分布特性。

1.1 控制方程

计算采用粘性、不可压缩、Boussinesq 假定下的 Navier-Stokes 方程。由流场中各瞬时量的微分方程出发,通过雷诺分解和平均,对关联项引入梯度模拟进行封闭处理。在动量方程中考虑表面风应力及科氏力作用;假设垂向加速度远小于重力加速度,因而动量方程中的垂直分量可用静压方程代替;在温度输运方程中考虑热源项,从而构成三维水温控制方程。

香溪河地形情况复杂,为了更好地反映底部地形的变化,本模型在垂向上采用 σ 坐标系。 σ 坐标为: $\sigma = \frac{z-\zeta}{d+\zeta} = \frac{z-\zeta}{H}$, ζ 为自由表面相对于参考平面 ($z=0$) 的高程, d 为参考平面下的水深, σ 从水底到水面的变化范围 $(-1, 0)$ 。 σ 坐标中的控制方程如下所示:

$$\text{连续方程 } \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程 } \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{1}{H} \frac{\partial uw}{\partial \sigma} - f_v = -\frac{1}{\rho} P_x + F_x + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{1}{H} \frac{\partial vw}{\partial \sigma} + fu = -\frac{1}{\rho} P_y + F_y + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma}) \quad (3)$$

$$\text{温度方程 } \frac{\partial HT}{\partial t} + \frac{\partial uHT}{\partial x} + \frac{\partial vHT}{\partial y} + \frac{\partial WT}{\partial \sigma} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} (\frac{v_v}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial \sigma} + F_T + \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma}) \quad (4)$$

$$\text{状态方程 } \rho = f(T) \quad (5)$$

式中: u, v, w 分别为 x, y, σ 方向的速度分量;

P_x, P_y 为 x, y 方向的压力梯度; f 为科氏力系数 ($f = 2\omega \sin\phi$); F_x, F_y, F_T 分别为各方程中的水平扩散项; v_v 为垂向涡粘系数; σ_T 为紊动普朗特数; T 为水温; ρ 为水体密度; c_p 为水的等压比热容; φ 为热交换项,包括太阳短波辐射、大气长波辐射、水面长波反射、蒸发和热传导。采用考虑浮力修正的 $k-\epsilon$ 紊流模型封闭上述方程组。

1.2 方程离散及求解方法

采用交错网格上有限差分法离散模型方程组,交替方向隐式 ADI 算法求解流速和水位。每一计算时步顺序求解动量方程、紊动能及其耗散率方程。考虑到水流运动与水温分布相互影响,水动力与温度方程耦合求解。

2 香溪河库湾水温数值模拟

2.1 计算区域及网格剖分

计算区域由香溪河库湾和三峡水库部分库首江段共同组成,共计 $6.6 \times 10^7 \text{ m}^2$ 。由于三峡最高蓄水位为 175 m 高程,所以根据地形资料分别提取等高线为 200 m 的河岸边界线,构成计算的平面区域,库湾及水库库首地形高程均为实测值。计算区域包含三峡库区干流上游入流断面、三峡大坝、香溪河库湾上游及高岚河口入流,共计 4 个边界。对计算区域采用正交曲线网格进行剖分,平面网格数为 394×649 ,垂向分为 20 层。模型计算区域和网格剖分如图 2 和 3 所示。

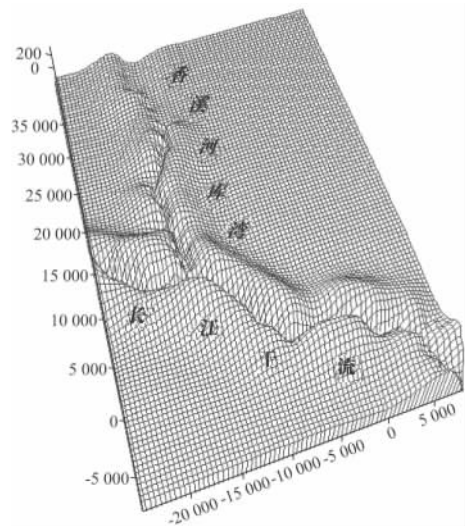


图 2 模型计算区域

Fig. 2 Computational Domain of the Model

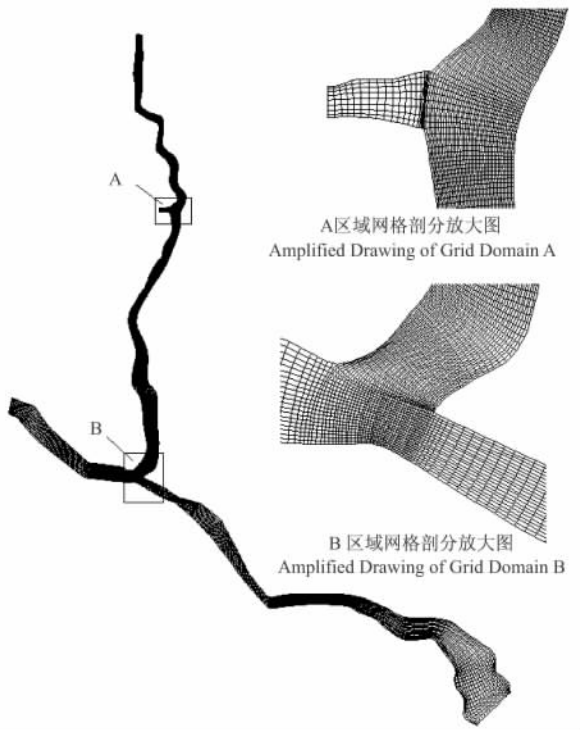


图 3 计算区域网格剖分
Fig. 3 Grid Generation

2.2 定解条件

水流的初始条件为静水条件, 入库流量和出库水位均采用 2007 年实测值(见图 4); 壁面边界采用粘性无滑移条件, 假定没有质量和热量交换; 自由表面边界考虑风引起的切应力及与大气间的热交换; 水温以 2007 年 3 月份实测的全库湾水温分布作为计算初始条件, 以庙河实测水温过程为入口边界条件, 出库水温为零梯度条件, 气象资料采用宜昌市气象台 1971~2000 年观测资料的平均值, 太阳辐射根据该地区同类研究取值确定。

3 计算结果分析

3.1 实测资料验证

采用上述模型对 2007 年 3~5 月计算域内的水温进行了数值计算, 并与库湾峡口处的实测数据进行了对比验证。如图 5 所示, 计算得到的水温沿深度变化规律与实测值基本一致。3 月份的模拟精度较高, 4、5 月份计算值在库湾深水部位与实测值稍有差异, 约为 0.5℃。计算结果基本反映了香溪河库湾水温的变化特点, 能满足本次研究的需要。

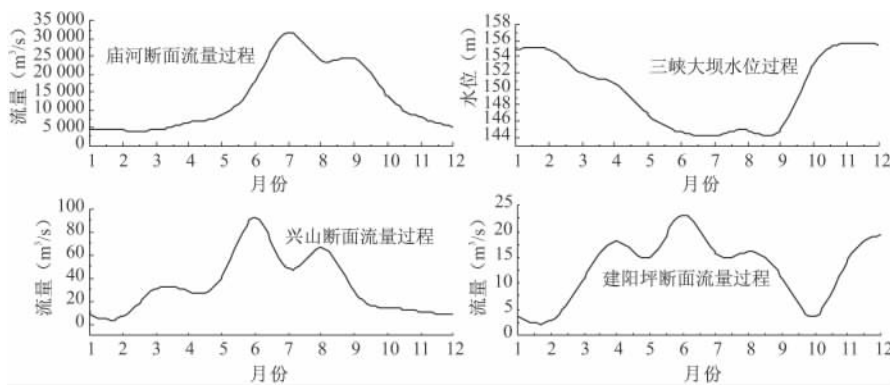


图 4 水动力边界条件
Fig. 4 Hydrodynamic Boundary Conditions

3.2 垂向水温分布特性

2007 年 2、5、8、11 月香溪河库湾水温立面分布模拟(见图 6)表明, 库湾水温随季节变化显著。1~3 月份库湾垂向最大温差仅有 1.5℃, 几乎趋于同温分布。4~9 月份随着入流水温和气象条件的大幅度升高, 上层水受太阳辐射作用明显升温较快, 由于水分子的热力传导度很小, 导致下层水升温较慢, 水体中逐渐出现水温分层现象。5 月份可明显观察到温跃层的出现, 其垂直温度梯度达 0.53℃/m, 此时

表底垂向温差已达 2.07℃, 水体已经形成稳定的密度分层, 等温面基本呈水平面分布, 6 月份香溪河上游的来流量平均为 92 m³/s, 但仍难以打破这种水温分层状况。8 月份库湾水面温度攀升到了 29.14℃, 热量积蓄达到极值, 随后气温开始逐步降低, 当气温低于水温时, 表面水温开始散热, 密度将会重新调整致使上下层水体开始混合。10~12 月库湾水温随着气温的下降而整体缓慢降低, 分层现象随之结束。另外, 本次模拟也表明香溪河库湾不

存在逆温分层现象,冬季最低水温为 11.1℃。

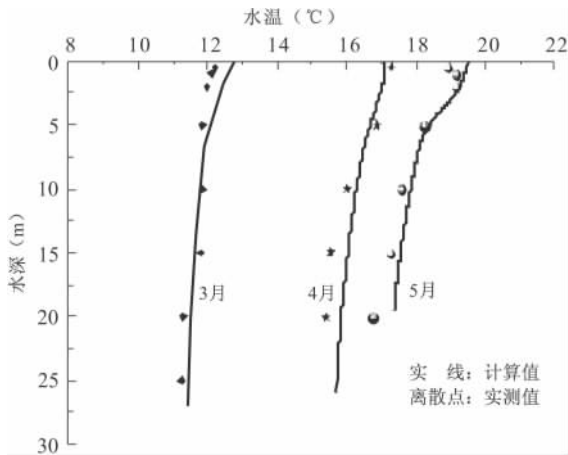


图 5 水温计算结果与实测值对比

Fig. 5 Comparisons of the Results Between Computed and Measured Values

图 6 所显示的库湾逐月温度分布图中,靠近左侧坐标原点约 800 m 宽度范围、深度最大的水域为香溪河河口的三峡水库干流河道。通过对比分析可发现,当库湾发生水温分层时,库区干流都表现出表底同温的分布特性。水体的流动性是影响库湾水温分布的因素之一。图 7 分别为库区干流与香溪河库湾中的两个典型测点处垂线平均流速随时间变化的过程,对比可知,在模拟时段库区干流的平均流速为 0.08 m/s,然而库湾中的最大流速仅为 0.003 m/s。因此,库区干流的流速大导致水体紊动作用强,不易形成稳定的水温分层。而库湾的水动力特性类似于深水湖泊,为水温分层创造了有利条件,由此可以认为,极其微弱的水体紊动特性是促使库湾出现季节性水温分层的重要外因。

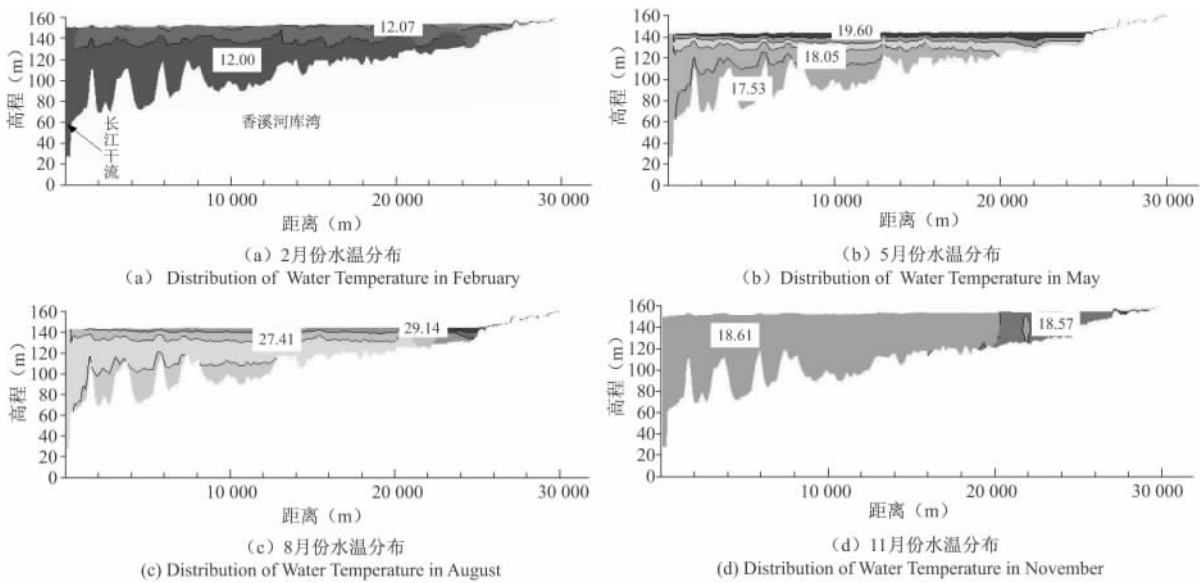


图 6 计算区域立面水温模拟(℃)

Fig. 6 Simulation Results of Elevation Water Temperature Distribution (℃)

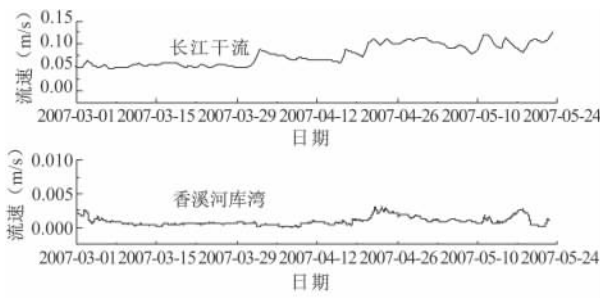


图 7 库区干流与香溪河库湾流速过程对比
Fig. 7 Comparisons of Velocity Process Between Mainstream and Xiangxi Bay

3.3 水平水温分布特性

库湾水温在水平方向上差异较小,图 8 给出了 4 月份表层和底层水温的分布情况,从中可以看出,4 月库湾表层水温在长达 30 km 的范围内仅存在 0.87℃ 的温差,整体处于 16.57~17.44℃。水平温差主要出现在深泓与边滩之间,以及区域边界形状有突变的小区域中;与表层相比,底层水温在水平方向上的差异稍小,仅在 15~15.5℃ 变化,变幅为 0.5℃。

然而,在同一水平高程上,长江干流与库湾水温存在较大的差异。计算结果表明,4 月份库湾表层

水温比干流高 1.6°C , 6 月份竟高达 2.9°C ; 但两者的这种差异表现在底层上恰好相反, 从图 8(b) 中可以清楚地看出, 4 月份库湾从河口向上游约 8 km 范

围内, 底层水温比长江干流水温低 0.8°C 。以上这种水温分布特性与江水湍急导致水体垂向混合充分, 使得热量分布与库湾相比相对均匀有关。

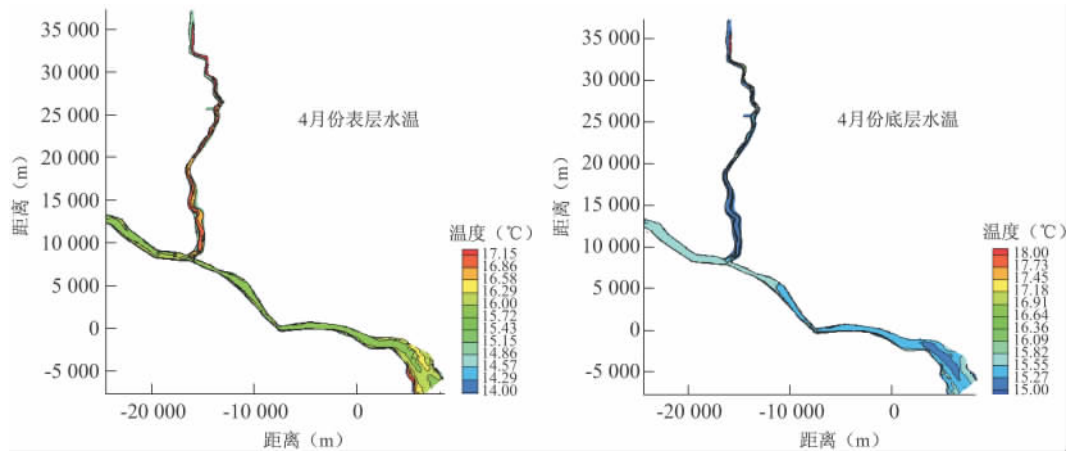


图 8 计算区域水平水温模拟($^{\circ}\text{C}$)

Fig. 8 Simulation Results of Water Temperature in Horizontal Plane ($^{\circ}\text{C}$)

3.4 密度分层流的三维流动特性

湖泊水库一般都具有垂向水温分层现象, 因此对其进行垂向一维和立面二维模拟是较为常见的方法。但本次数值模拟结果表明, 自然环境非规则区域中的水流流动具有明显的三维特性, 水动力条件、风力风向、河床形状等均会对水温的分布产生影响, 特别是干流与支流交汇处的水动力场具有复杂的流动形态, 存在极强的潜流与平面、立面环流现象(见图 9), 这对水体的热输运及热扩散均将产生显著影响。因此描述复杂水体水流运动特性及水温分布及演变规律时, 应当采用三维模型。

水温分层所产生的密度流, 同样对水动力场也有影响。图 6 表明, 在香溪河库湾水温分层期间, 干流水温介于库湾上层与底层温度之间, 因此, 香溪河口处的流动形态, 除受干流的流速、流向、香溪河上游来流量的影响外, 还受到水温分层所产生密度流的影响。在与库区干流发生水量交换时, 在河口立面上将发生环流, 即当水位升高库水进入香溪河时, 库水不是浮于表面, 也不是沿河床潜入, 而是从水深一半偏上部位进入香溪河, 进而与上部及下部水体分别形成两个大的回流区; 而当库水位降落, 香溪河水正向流动进入长江干流时, 则分别从水体表面及河床进入干流。在研究干流与香溪河支流库湾的水量及物质输运问题时, 必须考虑到平面与立面环流, 才能得到较为真实的河口流态。

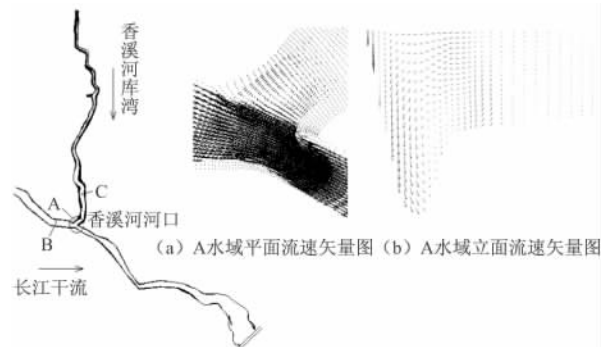


图 9 2007 年 5 月 3 日典型区域速度矢量图

Fig. 9 Vectogram of Velocity in Typical Region on May 3, 2007

4 结论

本文采用数值模拟的方法对三峡水库香溪河库湾的水温分布特性进行了分析, 并与长江干流同期水温进行对比, 结果表明:

(1) 香溪河库湾为季节性水温分层型水体, 分层期会有温跃层的出现, 冬季不会出现逆温分层现象。全年水温变化范围在 $11.1\sim 29.14^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 在同一模拟时段, 长江干流垂向水温分布比较均匀, 沿水深方向没有明显的温度梯度。由此可知, 微弱的水动力条件是促使香溪河库湾出现季节性水温分层的重要外因。

(3)香溪河库湾水温分布在水平方向上差异较小,但在分层期间表层水温普遍高于长江干流水温,然而底层局部水温较干流偏低。

(4)由于库湾与干流流速差异极大且存在密度分层流的影响,因此两者交界处的香溪河河口存在复杂的水流流态,只有三维模型才能合理描述其水流流动与水温分布的变化规律。

参考文献:

- [1] 唐涛,渠晓东,蔡庆华,等. 河流生态系统管理研究——以香溪河为例[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(6): 594~598.
- [2] WANG L L, YU Z Z, DAI H C, et al. Eutrophication model for river-type reservoir tributaries and its applications[J]. Water Science and Engineering, 2009, 2(1): 16~24.
- [3] ELCIS. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality[J]. Limnology, 2008, 9(2): 135~142.
- [4] HAN B P, ARMENGOL J, GARCIA J C, et al. The thermal structure of Sau Reservoir (NE, Spain): A simulation approach [J]. Ecological Modelling, 2000, 125(2-3): 109~122.
- [5] 张玉超, 钱新, 钱瑜, 等. 太湖水温分层现象的监测与分析 [J]. 环境科学与管理, 2008, 33(6): 117~121.
- [6] 余文公, 夏自强, 蔡玉鹏, 等. 三峡水库蓄水前后下泄水温变化及其影响研究[J]. 人民长江, 2007, 38(1): 20~22.
- [7] 卞俊杰, 陈峰. 三峡水库蓄水后库区水温影响分析[J]. 水利水电快报, 2006, 27(19): 7~10.
- [8] 熊伟, 李克峰, 邓云, 等. 一二维耦合温度模型在三峡水库水温中的应用研究[J]. 四川大学学报, 2005, 37(2): 22~27.
- [9] 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.
- [10] 况琪军, 周广杰, 胡征宇. 三峡库区藻类种群结构与密度变化及其与氮磷浓度的相关性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(2): 231~235.
- [11] 蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究[J]. 水生生物学报, 2006, 30(1): 7~11.

CHARACTERISTICS OF WATER TEMPERATURE DISTRIBUTION IN XIANGXI BAY OF THE THREE GORGES RESERVOIR

YU Zhen-zhen, WANG Ling-ling, DAI Hui-chao, CHENG Gao-feng

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this study, a three-dimensional model of water temperature has been developed, and the characteristics of water temperature distribution in Xiangxi Tributary Bay and part of mainstream of Three Gorges Reservoir in the year of 2007 were studied using numerical simulation method. The body-fitted grid system was applied to the computational domain, the heat exchange between the water body and the outside, the inflow, and the outflow were taken into account fully, the measured data were used to calibrate the water temperature model. Simulation was undertaken for one year and the results showed that the Xiangxi Bay was the water body of seasonal temperature stratification, and the thermocline could be observed during stratification. However, the temperature difference was smaller in horizontal plane. The annual water temperature changed from 11.1°C to 29.14°C. The phenomenon of water temperature stratification in the mainstream did not occur in 2007 because of strong turbulence. The temperature of surface water in the Xiangxi Bay was generally higher than the mainstream in the stratified period, but the temperature of bottom water was locally lower than the mainstream. Moreover, Xiangxi Estuary had the phenomena of sub-surface flow, circulation flow in plane and elevation, showing very complex three-dimensional flow characteristics. Therefore, the results could provide scientific basis for safety management of ecological environment in Three Gorges Reservoir.

Key words: numerical model; the Xiangxi Bay; the Yangtze River mainstream; water temperature distribution