

基于立面二维水动力-水温耦合模型的水库水温分布

王 冠¹ 韩龙喜² 常文婷²

(1. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 建立了考虑浮力影响的立面二维水动力-水温耦合数学模型, 对温差异重流进行了研究, 分析了浮力流的水流结构和温度分层的形成、发展过程。利用水库物理模型的试验数据对模型进行了验证, 再将该模型应用于一拟建水库, 模拟预测了该水库建成后夏季典型条件下库区的流场及温度场分布, 研究了不同高程放流洞放水对库区流场、温度场及下泄水温的影响。

关键词 水库水温; 浮力流; 立面二维耦合模型; 大坝下游; 温差异重流

中图分类号 :TV131.2;TV697.2+1 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2009)02-0059-05

Modeling water temperature distribution in reservoirs with 2D laterally averaged flow-temperature coupled model

WANG Guan¹, HAN Long-xi², CHANG Wen-ting²

(1. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract A 2D laterally averaged flow-temperature coupled model that considers buoyancy was established and applied to thermal density flow simulation. The current structure of buoyant flow and the formation and growth of thermal stratification in reservoirs were studied. After being calibrated with the experimental data of a reservoir, the model was applied to a soon-to-be-built reservoir. The velocity field and temperature field in the reservoir under typical summer conditions were predicted, and the influence of water released from discharge points at different elevations on the velocity field, temperature field, and outflow temperature were studied.

Key words :reservoir water temperature; buoyant flow; 2D laterally averaged coupled model; lower reaches of dam; thermal density flow

在河流上筑坝建库是开发利用水资源常见的工程措施。建库后, 库区水温分布结构的变化将影响库区水生生物群落组成; 下游原天然河道水温的改变将对河道水生生物的生长、农作物灌溉、河道水质等产生影响。准确模拟和预测水库库区的水温分布规律, 研究放流洞设置、水库优化调度对下泄水温的影响机理, 对保护生态环境、发展工农业生产有着重大意义。

水库的水动力和水温问题属于三维问题, 但是用三维模型模拟天然大型水库的水流运动及水温分布, 将耗费大量的时间, 对于河道型水库, 其横向上

的温度变化可以被忽略, 在实际预测中, 用横向平均的立面二维水温模型代替三维模型, 计算效率更高, 经济上更加合理, 能够满足工程的实际需要。

国内立面二维水库水温模型的研究已取得了一些成果。江春波等^[1]将模型应用于优化水库取水口计算, 采用实测资料率定出有浮力影响的情况下不同变量在不同方向上的紊动涡黏系数。陈小红^[2]采用水温模型模拟了具有弱分层的湖泊型水库的水温分布。邓云等^[3-4]建立了立面二维水温模型, 模拟研究了大型深水库的水温分层分布特征。雒文生等^[5]将水温模型引入水库水温预测与水质的分布规律研

究中。本文建立了考虑水动力-水温相互影响的立面二维水动力水温耦合数学模型,利用 Johnson^[6-7]在美国陆军工程师团水道实验站的水库模型的试验资料进行模型验证,再将该模型应用于一拟建水库,分析了该水库建成后夏季典型条件下库区的流场及温度场空间分布特征,研究了不同高程放流洞放水对库区流场、温度场及下泄水温的影响。

1 立面二维水库水温数学模型

1.1 基本方程

对于天然水体,忽略压力对密度的影响,密度 ρ 与温度 T 的关系可表达为:

$$\rho = (1.020\ 276\ 92 \times 10^{-3} + 6.777\ 372\ 62 \times 10^{-8} T - 9.053\ 458\ 43 \times 10^{-9} T^2 + 8.643\ 721\ 85 \times 10^{-11} T^3 - 6.422\ 661\ 88 \times 10^{-13} T^4 + 1.051\ 644\ 34 \times 10^{-18} T^7 - 1.048\ 688\ 27 \times 10^{-20} T^8) \times 9.8 \times 10^5 \quad (1)$$

采用 Boussinesq 假定,将三维湍浮力流的时均连续方程、动量方程及热量方程组沿河宽方向积分,就可得到立面二维水库水温模型的方程组。

$$\frac{\partial}{\partial x}(Bu) + \frac{\partial}{\partial z}(Bw) = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(Bu) + u \frac{\partial}{\partial x}(Bu) + w \frac{\partial}{\partial z}(Bu) = \\ 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(B\nu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(B\nu_e \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(B\nu_e \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{B}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial x} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(Bw) + u \frac{\partial}{\partial x}(Bw) + w \frac{\partial}{\partial z}(Bw) = \\ 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(B\nu_e \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(B\nu_e \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(B\nu_e \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{B}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial z} + \beta \Delta T g B \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(BT) + u \frac{\partial}{\partial x}(BT) + w \frac{\partial}{\partial z}(BT) = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{B\nu_e}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{B\nu_e}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: B 为河宽; u 为纵向速度分量; w 为垂向速度分量; ν 为水的运动黏性系数; ν_t 为紊动黏性系数, m^2/s ; ν_e 为有效黏性系数, m^2/s , $\nu_e = \nu + \nu_t$, m^2/s ; T 为水体的温度; T_a 为水体的参考温度, $\Delta T = T - T_a$; ρ 为水的密度; ρ_a 为与参考温度相对应的参考密度; β 为热膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$,取为 $2.1 \times 10^{-4} ^{\circ}\text{C}^{-1}$; σ_T 为温度普朗特数,取为 0.85。

1.2 边界条件

进口边界给定流速和水温,出口断面给定流速,其他变量的纵向梯度为 0;表面采用刚盖假定,由于受资料所限,不考虑水面热交换的作用;库底和坝体

表面采用无滑移边界条件,且为绝热边界。

1.3 控制方程的离散及求解

本文选用有限体积法对控制方程进行离散,采用交错网格系统解决压力梯度和连续方程的离散困难,采用 SIMPLEC 计算程式,利用 ADI 法和 TDMA 法对水动力方程与水温方程进行耦合求解。

2 模型验证

2.1 Johnson 水库模型试验

Johnson 水库试验模型布置见图 1,该模型长 24.39 m,可以分为两段,前 6.10 m 宽度从 0.30 m 线性变化至 0.91 m,底部水平,后 18.29 m 段宽度不变,恒为 0.91 m,底部高程从 0.61 m 线性降到 0 m。

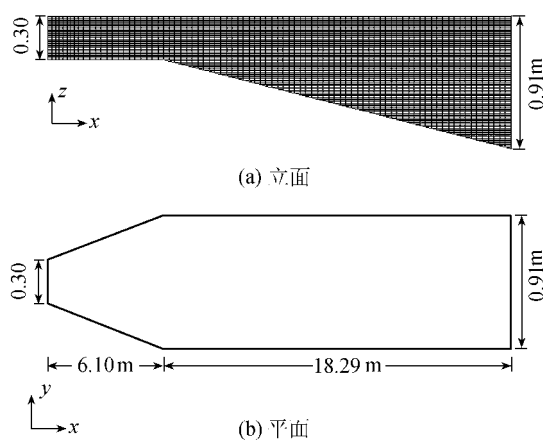


图 1 水库模型

模型中初始水温为 $21.44 ^{\circ}\text{C}$,然后从靠近底部 0.15 m 高的孔口向水库注水,流量为 $0.000\ 63 \text{ m}^3/\text{s}$,水温为 $16.67 ^{\circ}\text{C}$,坝址出口位于底部上 0.15 m 处,出流流量为 $0.000\ 63 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.2 计算结果分析

采用矩形坐标网格,将计算域划分为 87×91 个单元,有效计算网格为 4500 个。网格尺寸在主流方向上为 20~30 cm,在垂向上均为 1 cm,网格划分见图 1。计算时段为 60 min,计算步长取为 1 s。有效黏性系数取为 1.0×10^{-5} ,水体的参考温度 T_a 取为 $20 ^{\circ}\text{C}$ 。

a. 流速场分析。图 2 显示了冷水自入口进入水库后的整个运动过程。从图 2 中可以看出,注入冷水由于密度大于库区水体,进入水库后,迅速下潜,在底部形成潜流层,同时上层水体在剪切力的作用下反向流动,在垂向上形成一个逆时针的漩涡。随着入流水体逐渐向前推移,漩涡尺度也越来越大,第 30 min 时潜流前锋到达坝前。此后,低温潜流层内的部分水体从靠近底部的出水口流出,而另一部分水体则因为坝体的阻挡而折向库区表面流动,并在出水口的上层反向流动,随着时间推移,漩涡的强

度趋于稳定。

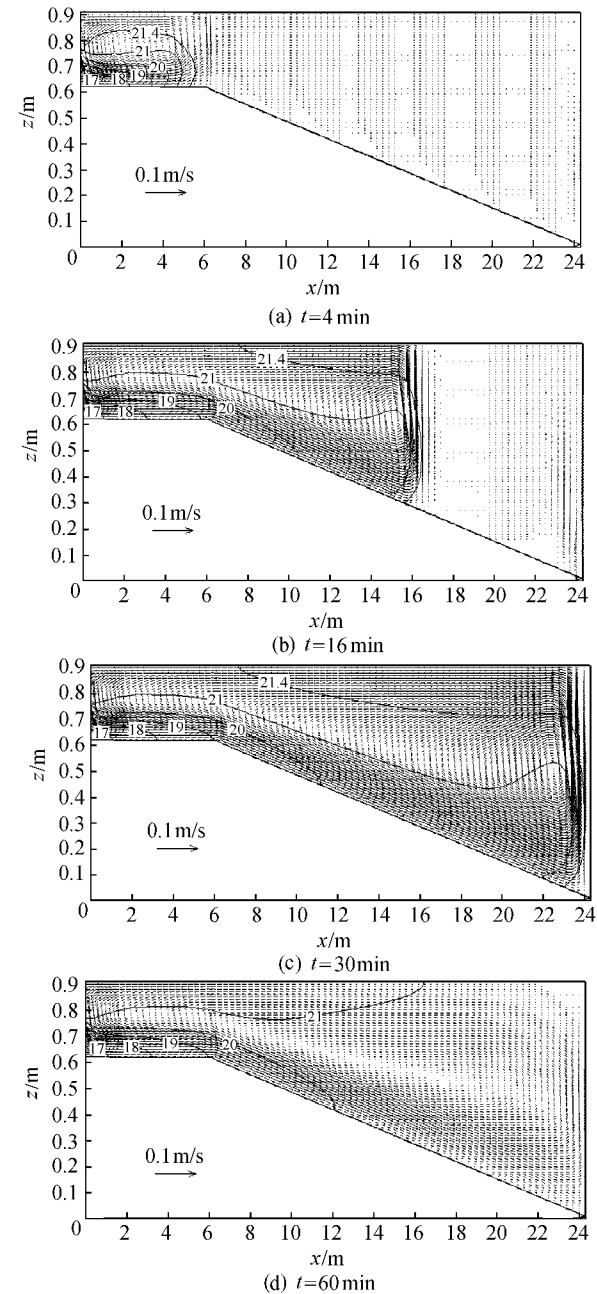


图 2 计算的不同时刻流速矢量和温度等值线

b. 温度场分析。从图 2 中可以看出,由于冷水的下潜运动,库区底部水温首先降低,随着冷水潜流逐渐向前推进,降温范围也随之逐渐扩大,潜流抵达坝前时($t = 30\text{ min}$),一部分低温水体因为坝体阻挡在出水口的上层反向流动,坝前的上层水体首先开始降温,坝前上层的低温水体逐渐向库区中心扩散,降温范围越来越大。

综观整个重力下潜流推进过程,可以发现起始阶段上层水体的水温并未受到很大影响,潜流层内一直保持着较大的温度梯度,垂向上速度梯度很大,温度差的存在强烈地抑制了动量与热量在垂向上的传递。

2.3 数学模型验证

图 3 显示了 $t = 11\text{ min}$ 时距离入口 11.43 m 横断面上中垂线的纵向流速分布的试验值与计算结果,图 4 比较了出流水温的模型计算值与试验结果,可以看出,由于本文建立的模型为零方程紊流模型,受紊动黏性系数取值的影响,计算出的潜流层厚度偏厚,潜流层流速偏小及由此引起的出流水温降温的时间推迟。但是纵向流速分布特征、出流水温随时间的变化规律均与试验结果基本吻合。

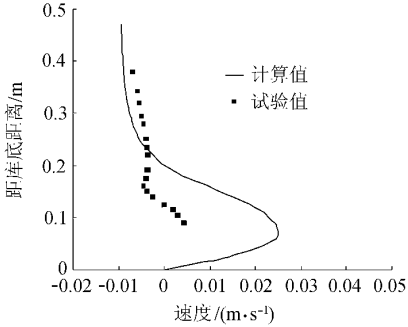


图 3 $x = 11.43\text{ m}$ 处纵向流速分布

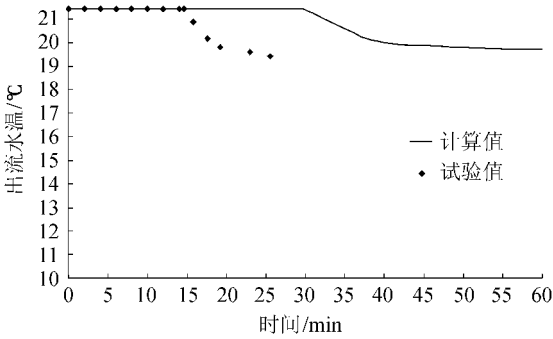


图 4 出流水温变化

3 应用实例

3.1 拟建水库概况及预测工况

拟建水库坝址位于浙江省,在主汛期(4 月 16 日~8 月 31 日),水库控制水位为 22 m ,9 月 1 日~次年 4 月 15 日期间,水库控制水位为 24 m ,大坝底部高程为 3 m 。根据分层取水的要求,拟设置 2 个生态放流洞,洞高 2 m ,底坎高程分别为 7.5 m 和 14.5 m 。

本文对库区 7 月份的水温分布进行了预测,入库流量和入库水温均采用月均值,入库流量为 $8.37\text{ m}^3/\text{s}$,入库水温为 $23.43\text{ }^{\circ}\text{C}$,以文献[8]预测的水库水温垂向分布作为计算的初始水温,以无浮力的流场作为初始流场,根据设计要求,选用底坎高程为 14.5 m 的放流洞放流。

3.2 结果分析

图 5 显示了放流条件下库尾至坝前区域速度及水温的立面分布特征。从图 5 可见,由于入库水温比底层水温要高,较表层水温低,水流受温差引起的

浮力影响,迅速潜入其同温层,同时由于剪切力的作用,该潜流层的上、下层水体出现了反向速度,从而在垂向断面上形成了两个反向漩涡,坝前水体的流动主要受到放流洞放流的影响,同时由于温度梯度的存在,相邻层水体间的动量传递被大大削弱,垂向速度梯度很大,水流主要集中在放流洞的高程范围内流动,上下层水体流速极小,表现出水库分层流动的特性。

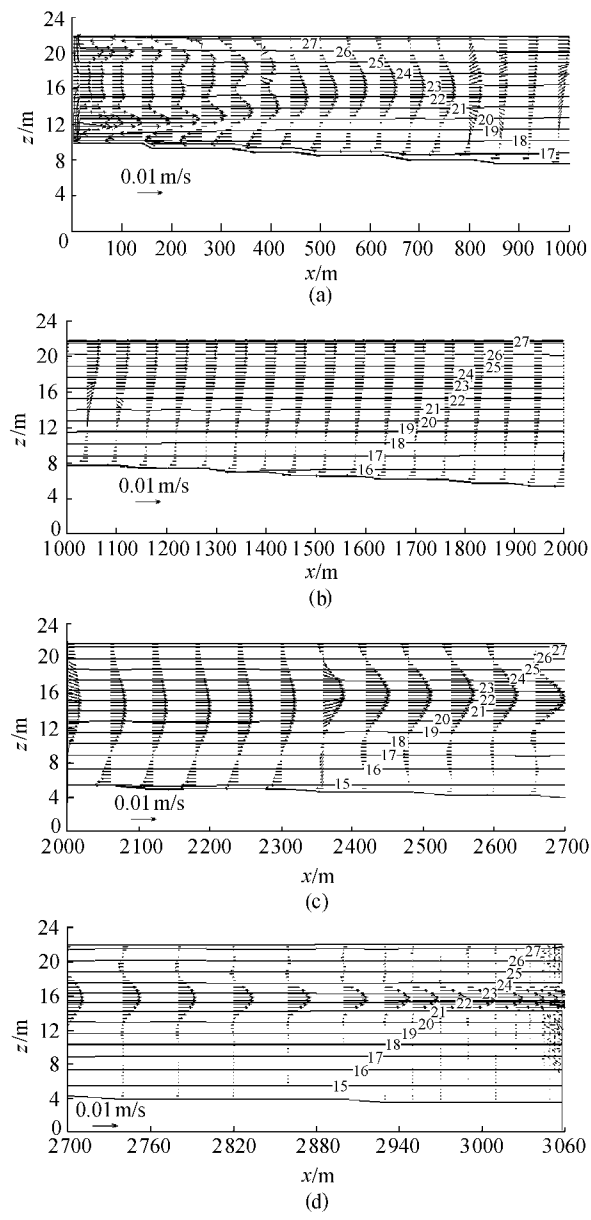


图5 7月份库区流场、温度场分布
(使用14.5 m高程的放流洞)

库区水温在空间上呈现出规律性的分布,垂向上按水深分层分布,沿纵向变化不明显,同一个高程上的水体基本上处于同一个等温层。

由于7月份太阳辐射强度强,气温高,水库表面水体由于吸收了大量热量而迅速升温,上层水体呈稳定分层导致上下层水体之间热交换强度小,热量

难以往下传递。而水库深层水体主要靠与上层水体的热交换来获得热量,由于获得热量小,导致水库底层水体维持较低的温度。因此,7月份该水库表层水温高,密度小,底层水温低,密度大,不易发生热对流,水库将处于稳定的温度分层状态。

对比图2与图5,可以看出,试验模型与天然水库中的水温都呈现出分层分布的特征。天然水库尺度大,库区内水流的流动对水温分布的影响相对较小,水库深层水体通过热交换获得的热量更小,因此,天然水库在垂向上按水深分层分布的特征更加明显。

3.3 放流洞对库区流场、温度场及下泄水温的影响

影响温度在库区内分布的因素很多,除了水体含沙量、气象条件等自然因素之外,放流洞布置、水库调度运行等因素也能对库区流场和温度场产生重要的影响。研究如何通过水库的调度运行、优化放流洞布置等手段来实现对下泄水水温的控制将成为今后研究发展的一个重要方向。

本文在拟建水库设计方案的基础上,选用不同高程的放流洞放水对水库库区流场、温度场及下泄水温的影响作初步研究。设计方案中2个生态放流洞的底坎高程分别为7.5 m和14.5 m,图5已模拟预测了底坎高程为14.5 m的水动力水温特征分布,下面分析底坎高程为7.5 m时相应的流场和温度场分布情况。

图6显示了选用底坎高程为7.5 m的放流洞放流时,拟建水库夏季库尾至坝前的流场和温度场分布。与图5对照可以看出,两者在水库入流起始段流场分布相似,之后都形成了潜流层,坝前水流都集中在潜流层内流动,但潜流层的位置存在较大的差别,其共同特征是潜流都主要集中在放流洞的高程范围内,可见,放流洞的位置对库区的流场分布有着显著影响。

使用底坎高程为7.5 m、14.5 m的放流洞放水时,拟建水库下泄水温分别为16.9℃和22.3℃。显然,选取底坎高程为14.5 m的放流洞放水时,水库下泄水的水温与天然河道水温较接近,对下游河道水质、水生生态以及农作物灌溉的影响较小。

4 结 论

本文利用建立的水动力-水温耦合模型对温差异重流进行了研究,模拟得到的流场和温度场分布与水库试验模型的结果基本吻合。将该模型应用于拟建水库,结果表明,该水库夏季库区水温在空间上呈现出规律性的分布,垂向上按水深分层分布,水体在同一个高程上基本处于同一个等温层。库区流场分布呈现出分层流动的特性,放流洞的位置对库区

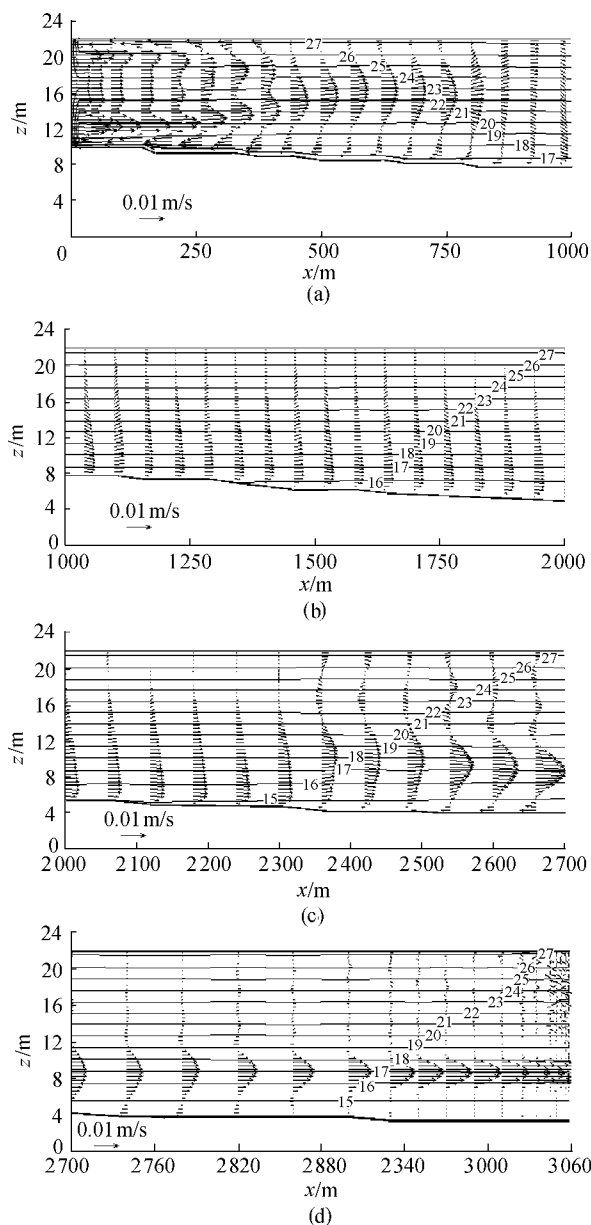


图6 7月份库区流场、温度场分布
(选用7.5m高程的放流洞)

的流场分布影响很大,通过优选放流洞放水,可以实现对下泄水水温的控制,减免对下游水生生态的不利影响。

本文建立的立面二维水温数学模型为零方程模型,模型中将紊动黏性系数和热的紊动扩散系数取为常数,给计算结果带来了一定的误差,建议在今后的研究中建立立面二维 $k-\epsilon$ 模型或三维水温模型,同时考虑水面热交换的影响,提高模拟预测精度。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈小红.湖泊水库垂向二维水温分布预测[J].武汉大学学报:工学版,1992,25(4):40-47.

- [3] 邓云,李嘉,罗麟,等.河道型深水库的温度分层模拟[J].水动力学研究与进展,2004,19(5):604-609.
- [4] 邓云,李嘉,罗麟,等.水库温差重流模型的研究[J].水利学报,2003(7):7-11.
- [5] 雒文生,周志军.水库垂直二维湍流与水温水质耦合模型[J].水电能源科学,1997,15(3):1-7.
- [6] JOHNSON B H. A review of multidimensional reservoir hydrodynamic modeling[C]//STEFAN H F. Proc of the Symp on Surface Water Impoundments, ASCE, 1980:497-507.
- [7] JOHNSON B H. A review of numerical reservoir hydrodynamic modeling[R]. US Army Engr Waterways Experiment Station, 1981.
- [8] 戴群英.水库库区及下游河道水温预测研究[D].南京:河海大学,2006.

(收稿日期:2007-11-20 编辑:高渭文)

(上接第58页)

此外,衡阳市养殖业的发展,成为湘江干流衡阳段有机物污染的重要来源之一。

为保护衡阳的母亲河——湘江,只有不断地加强环保执法力度,提高企业的环境保护意识与能力;加强湘江流域生态环境保护和建设,杜绝无规划的采矿、小电力建设项目,加快城市污水处理厂和垃圾处理厂的建设步伐,保证生活污水的达标排放,引导广大农民科学种养,合理布局,从源头控制农业面源污染,才能从根本上治理衡阳市的水污染现状,实现对湘江干流衡阳段水资源保护。

参考文献:

- [1] 王英健,杨永红.环境监测[M].北京:化学工业出版社,2004:56-174.
- [2] 陈剑虹,杨保华,邓子云.环境统计应用[M].北京:化学工业出版社,2005:172-177.
- [3] 陈咏淑,吴甫成,吕焕哲,等.近20年来湘江水质变化分析[J].长江流域资源与环境,2004,13(5):508-512.
- [4] 李颂,谭利人,罗建平,等.湘江株洲城区段水质监测、评价及污染因素调查分析[J].实用预防医学,2006,13(3):582-585.
- [5] 孙树青,胡国华,王勇泽,等.湘江干流水环境健康风险评估[J].安全与环境学报,2006,6(2):12-15.
- [6] 赵寿云,申春香.湘江衡阳市段纳污能力及总量控制分析[J].水资源保护,2004,20(3):23-25.
- [7] 欧阳素芳,曾怀才.湘江衡阳市区段水质卫生状况及变化趋势[J].实用预防医学,2003,10(5):751-752.

(收稿日期:2007-10-30 编辑:高渭文)