

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.05.008

洪水对水库水温分层结构的影响

陶 美¹, 逢 勇^{1,2}, 王 华¹, 鲍 琨³

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210005)

摘要:以乌江梯级水库中的洪家渡水库、东风水库、乌江渡水库为研究对象,通过数值计算得到上游 3 d、5 d、7 d 洪量下不同的水库水温分层结构,分析上游不同洪量对下游不同库容的水库水温分层结构的影响。结果表明:当洪水历时相同时,若洪水量增量相同,水库的库容越大,洪水对水温的分层结构影响越小;若水库库容相同,洪水量越小,洪水对水温的分层结构影响越小。当一次洪水量相同时,若水库库容相同,洪水历时越长,洪水对水温的分层结构影响越小。

关键词:洪水量;洪水历时;水温分层;乌江水库

中图分类号:TV697.2⁺1 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2013)05-0038-07

Effects of floods on reservoir temperature hierarchy

TAO Mei¹, PANG Yong^{1,2}, WANG Hua¹, BAO Kun³

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Jiangsu Province Communications Planning and Design Institute Limited Company, Nanjing 210005, China)

Abstract: The different temperature hierarchy structures of the Hongjiadu Reservoir, Dongfeng Reservoir, and Wujiangdu Reservoir of the Wujiang cascade reservoirs were obtained by numerical calculation with upstream floods that lasted three, five, and seven days. The effects of different upstream flood flows on the temperature hierarchy structures of reservoirs with different storage capacities were analyzed. The research results show that, with the same flood duration, when the flood flow increase remained identical, the impact on the reservoir temperature hierarchy was smaller with a greater storage capacity, and, when the storage capacities of the reservoirs remained identical, the impact on the reservoir temperature hierarchy was smaller with a smaller flood flow. With the same flood flow, when the storage capacities of the reservoirs remained identical, the impact on the reservoir temperature hierarchy was smaller with a longer flood duration.

Key words: flood flow; flood duration; temperature hierarchy; Wujiang Reservoir

水库建成蓄水后,受以年为周期的水温、入流水温、气象规律性变化的影响,水库在沿水深方向上呈现出有规律的水温分层,水库水温分层可能直接导致库区内的水质分层和生态分层,并且对农田灌溉、工业供水、生活用水、下游河流的水质和生态平衡等方面都产生重要影响,因此对水库水温分层规律及

其影响因子的研究具有重大意义^[1-4]。目前,我国关于水库水温分层结构的研究主要包括两方面:①定性研究,采用径流-库容比数法(即参数 α - β 法)^[5]判定水库水温结构,该法在山口岩水库、刘家峡水库的水温研究中有重要的应用^[6-7];②定量研究,主要采用经验法和数值算法

基金项目: 国家自然科学基金(51179053); 国家科技重大专项(2012ZX07506-006-05, 2012ZX07506-007-01)
作者简介: 陶美 (1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水资源规划与保护。E-mail: taomeidonghai@163.com

分析水库库区的水温分布。经验法主要有朱伯芳^[8]、张大发^[9]的水温一维垂向经验公式法,预测水库坝前垂向水温具体分布,模型计算主要有垂向一维水温模型,其代表有 WRE 模型、MIT 模型以及“湖温一号”模型^[10],同时剖面二维的水库水温模型已有一些研究成果,并在实际工程中有一定的应用^[3,11],三维耦合浮力流 $k-\varepsilon$ 模型对漫湾水库进行了应用^[12],MIKE3 水温模块在托什河干流梯级水库水温研究也得到了应用^[13]。

在前人研究的基础上,笔者定性分析水库水温分层结构的影响因子,定量研究各个影响因子的具体影响,以乌江梯级水库中具有典型库容和水温分层结构的洪家渡水库、东风水库、乌江渡水库为研究对象,研究不同历时洪水量对不同水库水温分层结构的具体影响,同时根据模型计算和数据结果分析,完善 β 值的定义,提出具有应用价值的通用表,以期对全国其他流域梯级水库水温研究有借鉴作用。

1 水温数学模型介绍

水库水温数值计算拟采用目前美国环保局推荐使用的环境流体动力学模型 EFDC (environmental fluid dynamic code) 三维水动力模型。

1.1 模型基本方程^[14]

- a. 动量方程。
$$\begin{aligned} &\partial_t(mHu) + \partial_x(m_yHu u) + \partial_y(m_xHvu) + \\ &\partial_z(mwu) - (mf + v\partial_xm_y - u\partial_y m_x)Hv = \\ &-m_yH\partial_x(g\xi + p) - m_y(\partial_xH - z\partial_xH)\partial_zp + \\ &\partial_z(mH^{-1}A_v\partial_zu) + Q_u \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} &\partial_t(mHv) + \partial_x(m_yHuv) + \partial_y(m_xHvv) + \\ &\partial_z(mwv) - (mf + v\partial_xm_y - u\partial_y m_x)Hu = \\ &-m_xH\partial_y(g\xi + p) - m_x(\partial_yh - z\partial_xH)\partial_zp + \\ &\partial_z(mH^{-1}A_v\partial_zv) + Q_v \end{aligned} \tag{2}$$

$$\partial_t(m\xi) = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} \tag{3}$$
- b. 连续方程。
$$\partial_t(m\xi) + \partial_x(m_yHu) + \partial_y(m_xHv) + \partial_z(mw) = 0 \tag{4}$$
- $$\begin{aligned} &\partial_t(m\xi) + \partial_x\left(m_yH\int_0^1ud_z\right) + \\ &\partial_y\left(m_xH\int_0^1vd_z\right) = 0 \end{aligned} \tag{5}$$
- c. 状态方程。
$$\rho = \rho(p, S_a, T) \tag{6}$$

d. 温度输移方程。
$$\begin{aligned} &\partial_t(mHT) + \partial_x(m_yHuT) + \partial_y(m_xHvT) + \\ &\partial_z(mwT) = \partial_z(mH^{-1}K_v\partial_zT) + Q_T \end{aligned} \tag{7}$$
- 式中: $u、v、w$ 分别是边界拟合正交曲线坐标 $x、y、z$
- 方向上的速度分量; t 为时间; $m_x、m_y$ 和分别为水平坐标变换因子; m 为度量张量行列式的平方根, $m = m_xm_y$; A_v 为垂向紊动黏滞系数; K_v 为垂向紊动扩散系数; f 为科里奥利系数; g 为重力加速度; ρ 为混合密度; ρ_0 是参考密度; H 为总水深; h 为未扰动的 z 坐标原点以下的水深; p 为压力; S_a 为盐度; T 为温度; ξ 为自由势能; $Q_u、Q_v$ 分别为动量在 $x、y$ 方向的源汇项; Q_T 是温度的源汇项。
- 联立各动量方程和连续方程即可解出 $u、v、w、\rho、p、S_a、T$ 和 ξ 。
- ### 1.2 方程的离散求解
- EFDC 模型采用二阶精度的空间有限差分格式求解控制方程,变量布置采用交错网格。模型的时间积分采用具有二阶精度的三层有限差分格式,采用内外模分裂方式将物理过程分解为内模和外模。外模求解采用半隐格式,利用预处理共轭梯度法同时求解二维水位场。内模求解垂向扩散项采用隐格式。动量方程内模主要是求解应力和速度的垂向分布。输移方程中的平流项模型采用 Smolarkiewicz 多维正定对流输移格式。
- ## 2 水温数学模型的建立与率定
- ### 2.1 洪家渡水库模型的建立
- 洪家渡水库数值计算范围为坝址处至回水段 20 km,计算时段根据 2006 年水库水温实测资料选取,选择水温分层具有季节规律的 4 月、7 月、10 月、12 月。
- #### 2.1.1 初始条件的确定
- a. 初始水位的确定。初始水位采用 2006 年洪家渡水库坝前实测月均水位资料(表 1)。
- | 月份 | 月均水位/m | 下泄水温/℃ | 月份 | 月均水位/m | 下泄水温/℃ |
|----|---------|--------|----|---------|--------|
| 1 | 1083.62 | 13.1 | 7 | 1094.30 | 13.4 |
| 2 | 1081.30 | 12.1 | 8 | 1096.16 | 13.8 |
| 3 | 1077.78 | 11.7 | 9 | 1094.57 | 14.3 |
| 4 | 1077.15 | 11.8 | 10 | 1093.83 | 14.9 |
| 5 | 1078.74 | 12.0 | 11 | 1097.05 | 15.8 |
| 6 | 1084.18 | 12.3 | 12 | 1093.30 | 15.6 |
- b. 初始水温条件的确定。根据水温实测资料垂向分布情况,将水库水温沿水深方向分为 20 层,初始水温根据 2006 年洪家渡水库坝前断面垂向水温(表 2)给定,取值为模拟月份前一个月的水温实测值,用线性内插法设定每层的初始水温。
- #### 2.1.2 边界条件的确定
- a. 流量、水位边界条件的确定。洪家渡水电站共设 3 个开边界,入流边界为凹水河、白甫河和木白河,出流边界为坝前出流断面。2006 年 1 月 1 日—12 月 31 日库区实测日平均入、出库流量见图 1 和图 2。
- 39 •

表 2 2006 年洪家渡水库坝前断面垂向水温分布

水位/m	水温/℃											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
1971	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.1	18.2	17.9	17.9	18.0	18.0	18.1
1005	18.3	18.5	18.4	18.4	18.4	18.4	18.4	18.1	18.0	18.0	17.9	18.4
1035	17.6	16.5	16.0	15.0	14.6	14.4	14.4	14.0	13.9	14.0	14.0	14.4
1060	14.4	13.3	12.5	12.3	12.6	13.1	13.7	13.6	14.0	15.0	15.3	13.1
1085						21.2	19.4	19.8	20.7	20.8	18.3	21.2

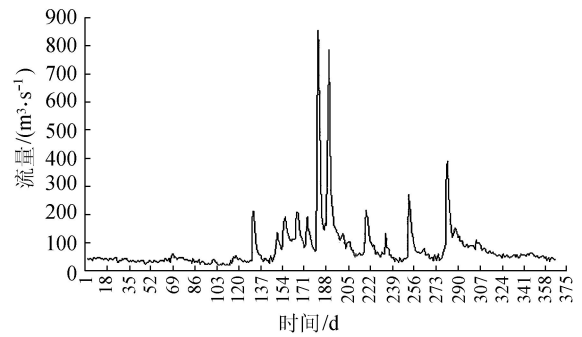


图 1 2006 年洪家渡库区实测入库流量过程线

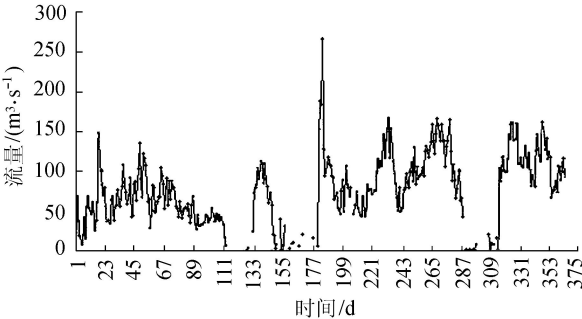


图 2 2006 年洪家渡库区实测出库流量过程线

b. 水温边界条件的确定。主流的入库水温采用 2006 年洪家渡坝前断面实测值(表 2),支流水温数据较小,水深较浅,河道特征明显,垂向断面水温

混合均匀,接近天然水温。出流水温根据 2006 年洪家渡水库下泄水温实测值给定(表 1)。

c. 大气边界条件的确定。大气边界条件中大气压、空气温度、空气湿度、降水量根据毕节地区气象实测资料给定,蒸发量、太阳辐射量及云量由模型自行运算。

2.2 模型率定结果

洪家渡水库 2006 年 4 月、7 月、10 月、12 月坝前断面垂向水温率定结果见图 3。

由图 3 得水温计算值与实测值误差为 0.5 ~ 2.0℃,模型率定效果较好,可以用来模拟计算洪家渡库区的水温分布情况,对洪家渡水库进行水温率定的同时也对乌江流域的东风水库和乌江渡水库作了率定验证。各水库水温参数率定结果见表 3。

表 3 各水库水温参数率定结果

水库名称	蒸发传热系数	净水消光系数	总悬浮固体消光系数	水体表层水最小太阳辐射吸收率	河床热力厚度/m	初始河床温度/℃	河床反射到水体的太阳辐射的比率	河床和水体之间的传热系数
洪家渡	1.50	0.44	0	0.45	13	12	0.003	0.28
东风	1.49	0.45	0	0.45	11	12	0.002	0.30
乌江渡	1.47	0.45	0	0.45	12	12	0.003	0.29

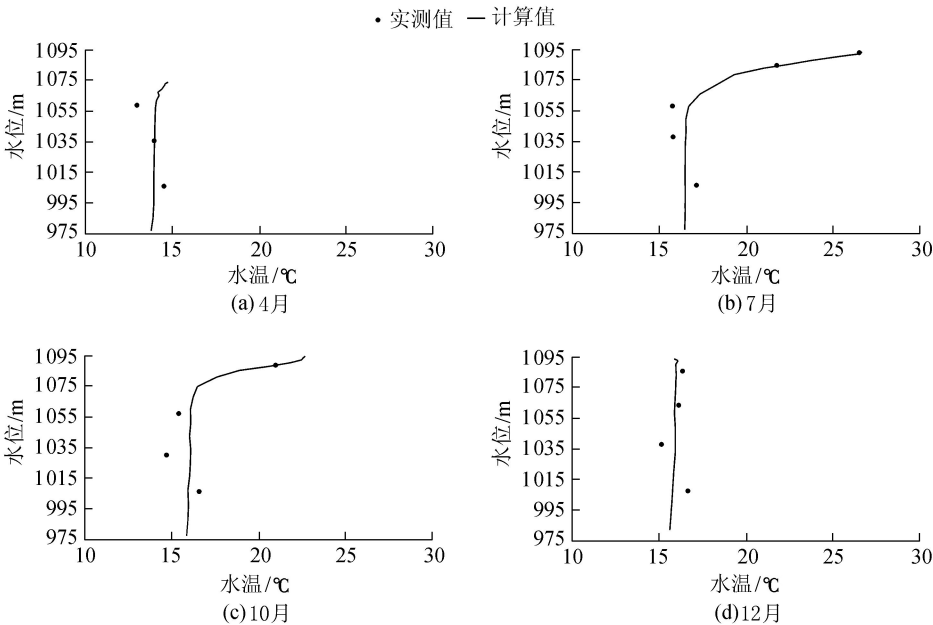


图 3 洪家渡水库水温率定结果

3 不同来水量对乌江梯级水库水温分层结构的影响

3.1 水库水温判定方法

我国现行的水库环境影响评价中普遍采用经验公式方法——径流-库容比数法来判定水库的水温结构。径流-库容比数法又称为库水替换次数法^[5]。其判别指标为：

$$\alpha = \frac{\text{多年平均年径流量}}{\text{水库总库容}}$$
$$\beta = \frac{\text{一次洪水量}}{\text{水库总库容}}$$

当 $\alpha < 10$ 时,为稳定分层型;当 $\alpha > 20$ 时,为混合型;当 $10 < \alpha < 20$ 时,为过渡型。

对于分层型水库,当 $\beta > 1.0$ 时,洪水对水温结构有影响,为临时混合型;当 $\beta < 0.5$ 时,洪水对水温结构无影响;当 $0.5 < \beta < 1.0$,洪水对水温结构有一定影响,但未破坏水温的分层结构。

3.2 乌江梯级水库水温结构

3.2.1 洪家渡水库

洪家渡水库坝址多年平均流量为 $149 \text{ m}^3/\text{s}$,电站水库总库容为 49.47 亿 m^3 ,正常蓄水位为 1140 m ,相应库容为 44.97 亿 m^3 ,调节库容为 33.60 亿 m^3 ,死水位为 1076 m ,死库容为 11.36 亿 m^3 ,水库回水长度为 85 km 。

目前我国普遍采用参数 α - β 法判别水库水温结构,洪家渡坝址多年平均径流量为 46.99 亿 m^3 ,水库水温结构的 α 值为 0.95 。根据判别式对 α 值进行分析,洪家渡水电站水库属于稳定分层型水温结构,水库会产生水温分层现象。

洪家渡库区大洪水过程多为复峰,一般陡涨缓落,洪峰主要是由 1 d 暴雨造成,一次洪水以 3 d 洪量为主。根据实测洪水峰、量系列进行计算,洪家渡水电站设计洪水(五百年一遇)洪量为 $6550 \text{ m}^3/\text{s}$, 3 d 洪量为 11.22 亿 m^3 ,水库总库容为 49.47 亿 m^3 , β 值为 0.227 ,洪水对洪家渡水库水温的分布结构没有影响。 5 d 洪量 14.94 亿 m^3 , 7 d 洪量 17.48 亿 m^3 , β 值分别为 0.302 、 0.353 ,洪水对洪家渡水库水温的分布结构依然没有影响。

3.2.2 东风水库

东风水电站坝址多年平均流量为 $345 \text{ m}^3/\text{s}$ 。电站水库总库容为 10.16 亿 m^3 ,调节库容为 4.91 亿 m^3 ,死库容为 3.73 亿 m^3 。正常蓄水位为 970 m ,死水位为 936 m 。电站大坝设计洪水标准为百年一遇($P=1\%$),设计洪水位为 974.08 m ,校核标准为千年一遇($P=0.1\%$),校核洪水位为 977.53 m 。依据前述

的 α 和 β 判别法,对东风水库水温结构判别如下:东风坝址多年平均径流量 108.80 亿 m^3 ,水库总库容为 10.25 亿 m^3 , α 值为 10.61 。根据判别式对 α 值进行分析可知,东风水电站水库属于过渡型水温结构,水库会产生水温分层现象,但不稳定。

从历年特大暴雨来看, 3 d 暴雨多集中在一天,因此流域内洪峰主要是由 1 d 暴雨造的,一次洪水过程主要集中在 3 d 洪水过程线内, 3 d 洪量为 7.76 亿 m^3 ,水库总库容为 10.25 亿 m^3 , $\beta=0.757$, $0.5 \leq \beta \leq 1.0$,表明洪水对东风水库水温的分布结构的影响不明显; 5 d 洪量为 10.61 亿 m^3 , 7 d 洪量为 12.95 亿 m^3 , β 值分别为 1.035 、 1.263 , $\beta > 1.0$,表明洪水对东风水库水温的分布结构有影响。

3.2.3 乌江渡水库

乌江渡坝址多年平均流量为 $483 \text{ m}^3/\text{s}$,电站水库总库容为 23.00 亿 m^3 ,调节库容为 9.28 亿 m^3 ,死库容为 12.12 亿 m^3 ,正常蓄水位为 760 m 。电站大坝设计洪水标准为五百年一遇($P=0.2\%$),设计洪水位 760.30 m ,校核标准为五千年一遇($P=0.02\%$),校核洪水位为 762.80 m 。乌江渡坝址多年平均径流量为 158 亿 m^3 ,水库总库容为 21.40 亿 m^3 , α 值为 7.383 。根据判别式对 α 值进行分析,乌江渡水库属于过渡型水温结构,水库会产生水温分层现象,但不稳定。

乌江渡水库 3 d 洪量为 20.50 亿 m^3 , 5 d 洪量为 29.70 亿 m^3 , 7 d 洪量为 36.90 亿 m^3 ,相应的 β 值分别为 0.96 、 1.39 、 1.72 ,由此可见大洪水对乌江渡水库水温结构影响非常显著。

3.3 分析方法

分析文献[3-4]中水库坝前断面水温计算的方法,再结合水温计算公式的基本原理,可得出汛期影响水库水温分层结构的因子主要有:一次洪量的大小、一次洪量历时、水库库容等。文献[3-4]中在计算 β 值时都未明确一次洪水量的历时,这在判定洪水对水库水温分层结构的影响时不完全准确,对某一水库,当一次洪水量相同时,计算得到的 β 值是相同的,即汛期洪水对该水库水温分层结构的影响是相同的,但当这一次洪水量经历的时间不一样时,其相同的一次洪水量对水库坝前水温分层结构的影响程度是不同的。为了具体分析上述3个因子对水库水温分层结构的影响,笔者对乌江流域的洪家渡、东风、乌江渡3个水库数值进行计算,总结分析3个因子对水库水温分层的不同影响,同时给出3个水库在不同的 β 值条件下坝前断面水温分布情况,补充完善 β 值的定义,为乌江流域其他水库在汛期受洪水影响后水库水温分层情况的研究作参考和借鉴。

根据洪家渡水库 3 d、5 d、7 d 洪量值,采用内插法确定洪家渡水库汛期受洪水影响程度时一次洪水量分别为 7.64 亿 m^3 、14.64 亿 m^3 、20.68 亿 m^3 ,根据洪家渡水文站历年洪水资料,利用同频率放大法得到在 3 d、5 d、7 d 洪量为上述 3 组数值时的洪水过程线,以洪水过程线的流量值作为模型的边界条件,利用 EFDC 模型计算在此洪水过程后水库坝前断面的水温分布情况,从而说明一次洪水过程在不同历时情况下水库不同的坝前断面水温分布,根据库表与库底的最大温差值判定洪水对水库水温结构的影响程度,在通过计算 β 值来说明洪水影响程度的基础上,再通过计算数据更加具体地说明水库在汛期经历不同历时的一次洪水后水库坝前断面的水温变化情况。

单个水库的计算说明洪水历时、洪水量的大小对水库水温分层结构的影响,无法说明水库水温分

层结构的另外一个影响因子——水库库容,因此需要计算不同水库在汛期一次洪水量条件下的坝前断面水温分层情况,从不同水库的计算结果可以分析得到在洪水历时相同的条件下不同库容水库在汛期一次洪水情况下水温分层结构。东风水库和乌江渡水库类比洪家渡水库进行计算,东风水库一次洪水量定为 4.8 亿 m^3 、7.3 亿 m^3 、18.9 亿 m^3 ,乌江渡水库一次洪水量定为 14.2 亿 m^3 、29.5 亿 m^3 、41.2 亿 m^3 。同样利用 EFDC 模型进行计算,得到不同洪水过程后水库坝前断面水温分布情况。

3.4 结果及分析

利用 EFDC 模型计算洪家渡水库、东风水库、乌江渡水库汛期经历不同历时的一次洪水后坝前断面水温分布情况,每个水库计算相同的一次洪水量不同历时过程后坝前水温分布情况,计算结果见图 4 ~ 图 6。

从图 4 ~ 图 6 可以看出,对于同一个水库,当一

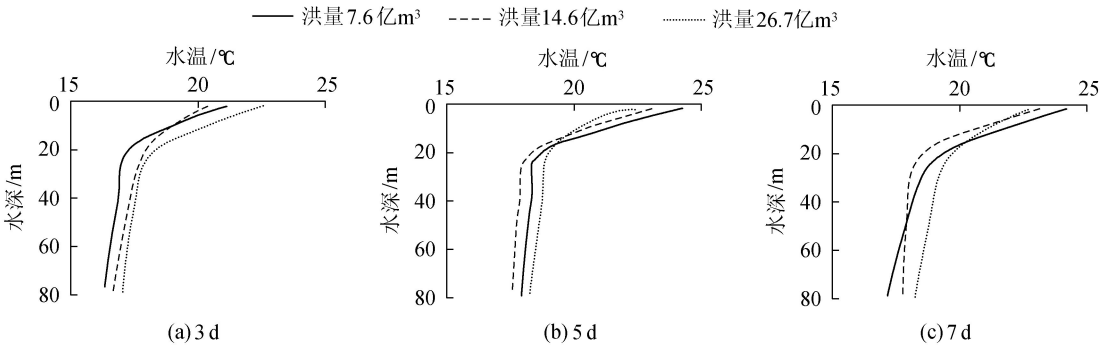


图 4 洪家渡水库坝前断面水温分布

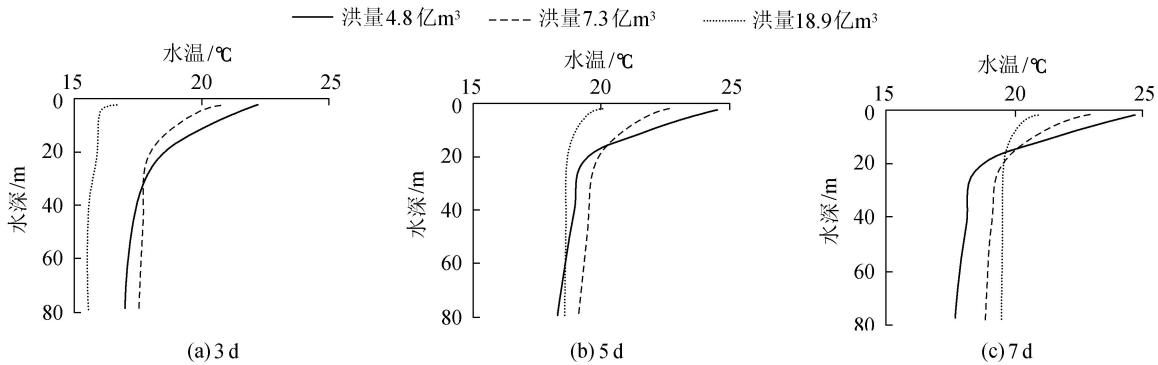


图 5 东风水库坝前断面水温分布

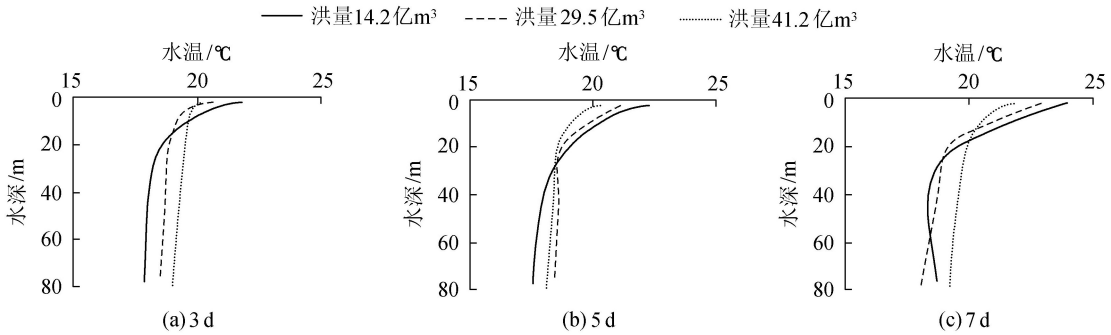


图 6 乌江渡水库坝前断面水温分布

次洪水量相同时,洪水历时越长,洪水对水库水温分层结构影响越小,以乌江渡水库为例,在经历一次洪水量为 41.2 亿 m³ 时,若历时 3 d,水库库表与库底的温差为 1.7℃;历时 7 d,温差为 3.0℃,可以看出一次洪水量历时越长对水库结构影响越小,该规律对其他两水库也同样适用。从图 4 ~ 图 6 可以看出,对于同一个水库,当一次洪水量相同时,洪水历时越长,洪水对水库水温分层结构影响越小,以乌江渡水库为例,在经历一次洪水量为 41.2 亿 m³ 时,若历时 3 d,水库库表与库底的温差为 1.7℃;历时 7 d,水库库表与库底的温差为 3.0℃,可以看出一次洪水量历时越长对水库水温分层结构影响越小,该规律对其他两水库也同样适用。当一次洪水量相同,洪水历时也相同,库容越大的水库洪水过程对该水库的坝前断面水温分层结构影响越小。以洪家渡(库容 45 亿 m³)水库和乌江渡水库(库容 21 亿 m³)为例,当洪水历时 3 d,一次洪水量为 14 亿 m³、26 亿 m³ 时,洪家渡水库库表与库底的温差分别为 4.8℃、2.7℃,乌江渡水库库表与库底的温差分别为 3.2℃、2.2℃,即一次洪量增加 12 亿 m³ 时洪家渡水库库表与库底的温差变化了 2.1℃,乌江渡水库库表与库底的温差变化了 1.1℃,说明洪水对洪家渡水库水温分层结构影响较小。

为了完善 β 值的定义,给 β 值补充洪水历时的概念,以乌江流域 3 座水库不同洪水过程的计算结果为基础,总结得到不同库容的水库在不同 β 值时水库坝前断面库表水温与不同水深处的水温的差值(表 4 ~ 表 6),即通用表,以温度差来说明坝前断面的水温情况,通过 β 值的量化来说明汛期一次洪水对水库水温结构的影响。

表 4 3 d 洪量不同 β 值时不同库容的水库
库表与不同水深处的温差值

库容/ 亿 m ³	水深/m	温差/℃				
		$\beta=0.15$	$\beta=0.45$	$\beta=0.75$	$\beta=1.15$	$\beta=1.95$
10	5	1.62	1.31	0.65	0.48	0.18
	20	3.66	2.61	0.98	0.74	0.36
	40	3.84	3.22	1.43	0.89	0.48
	80	4.99	4.01	2.36	1.63	0.65
21	5	1.49	1.11	0.63	0.46	0.16
	20	3.54	1.66	0.78	0.68	0.32
	40	3.80	1.79	1.12	0.98	0.43
	80	4.90	3.58	1.43	1.15	0.63
45	5	1.45	0.82	0.60	0.64	0.12
	20	3.49	1.63	0.70	0.68	0.29
	40	3.76	2.43	1.09	0.91	0.39
	80	4.50	2.70	1.33	1.02	0.60

表 5 5 d 洪量不同 β 值时不同库容的水库
库表与不同水深处的温差值

库容/ 亿 m ³	水深/m	温差/℃				
		$\beta=0.15$	$\beta=0.45$	$\beta=0.75$	$\beta=1.15$	$\beta=1.95$
10	5	2.21	1.39	0.75	0.50	0.28
	20	4.46	3.10	1.12	0.87	0.38
	40	5.01	3.69	1.78	1.02	0.49
	80	6.01	4.38	3.01	1.39	0.78
21	5	2.19	1.28	0.65	0.45	0.25
	20	4.42	2.12	1.09	0.83	0.35
	40	4.97	2.56	1.38	1.12	0.50
	80	5.92	4.25	2.14	1.29	0.69
45	5	2.17	1.25	0.63	0.42	0.22
	20	4.38	2.18	1.01	0.79	0.31
	40	4.92	2.43	1.29	1.01	0.45
	80	5.21	4.23	2.04	1.15	0.76

表 6 7 d 洪量不同 β 值时不同库容的水库
库表与不同水深处的温差值

库容/ 亿 m ³	水深/m	温差/℃				
		$\beta=0.15$	$\beta=0.45$	$\beta=0.75$	$\beta=1.15$	$\beta=1.95$
10	5	2.52	1.68	0.79	0.58	0.23
	20	5.79	3.40	1.36	0.97	0.58
	40	6.11	4.24	1.98	1.23	0.72
	80	7.02	5.04	3.21	2.05	1.12
21	5	2.43	1.48	0.70	0.43	0.18
	20	5.69	2.43	1.01	0.87	0.43
	40	6.02	2.95	1.31	1.15	0.65
	80	6.88	4.89	2.51	1.96	0.91
45	5	2.38	1.34	0.65	0.41	0.15
	20	5.54	1.85	0.87	0.76	0.38
	40	6.00	2.90	1.12	1.02	0.57
	80	6.32	4.51	2.35	1.36	0.81

从表 4 ~ 表 6 可以看出,在 3 d 洪量条件下,对于库容为 10 亿 m³ 的水库,当 $\beta=0.15 \sim 1.95$ 时,库表与库底相应的温差为 4.99 ~ 0.65℃,对于库容为 45 亿 m³ 的水库,当 β 值为 0.15 ~ 1.95 时,库表与库底相应的温差为 4.50 ~ 0.60℃。可以看出,对于同一个水库, β 值越大,库表与库底温差越小,水温分层结构越不明显。对于库容为 10 亿 m³ 的水库,当 $\beta=0.15$ 时,在 3 d 洪量条件下和 7 d 洪量条件下,库表与库底相应的温差分别为 4.99℃、7.02℃,由此可以说明,对于同一水库,洪水历时越长,洪水对水库水温分层结构影响越小,水温分层结构越明显,库表与库底温差越大。

分析水库数值计算结果结合其他水库水温历史数据,对 β 值中的一次洪水量补充定义,一次洪水量以历时 7 d 作为参考,对于分层型水库(包括稳定分层型和过渡型水库),当 $\beta>1.0$ 时,洪水对水温结构有影响,为临时混合型;当 $\beta<0.5$ 时,洪水对水温结构无影响;当 $0.5<\beta<1.0$,洪水对水温结构有一定影响,但未破坏水温的分层结构,仍为分层型水库。对

于其他历时的一次洪水量 β 值的定义区间也适用,各个区间所说的“有影响”、“有一定影响”、“临时混合”的程度不一样,具体即表现为不同历时的一次洪水量情况下,水库库表与库底的温差不相同。以东风水库的模型数值计算结果阐述 β 的补充定义,当 $\beta=0.15<0.5$ 时,洪量历时 3 d 时,库表与库底的温差为 5.28°C ,历时 7 d 时,库表与库底的温差为 7.02°C ,这两个温差都可称为对东风水库水温分层结构无影响,水库水温结构仍然为稳定分层型;当 $\beta=0.75>0.5$ 时,洪量历时 3 d 时,库表与库底的温差为 2.36°C ,历时 7 d 时,库表与库底的温差为 3.21°C ,这两个温差都可称为对东风水库水温分层结构有一定的影响,历时 3 d 的洪水对水温分层结构影响较大;当 $\beta=1.95>1$ 时,洪量历时 3 d 条件下,库表与库底的温差为 0.75°C ,历时 7 d 条件下,库表与库底的温差为 1.12°C ,水库水温结构都为临时混合型,历时 3 d 混合程度较高。

4 结 论

- a. 当一次洪水历时相同,若洪水量相同,水库的库容越大,洪水对水温的分层结构影响越小;若水库库容相同,洪水量越小,洪水对水温的分层结构影响越小。当一次洪水量相同,若水库库容相同,洪水历时越长,洪水对水温的分层结构影响越小。
- b. 通过分析水库数值计算结果和参考相关文献,对参数 α - β 判定法中的 β 值进行了时间上的定义,深入阐述了 β 值的具体含义,制定了不同洪量对乌江流域水库水温分层结构影响的通用表。该水温研究方法对全国其他流域水电梯级开发水温研究可提供参考和借鉴。

参考文献:

[1] 吴莉莉,王惠民,吴时强. 水库的水温分层及其改善措施[J]. 水电站设计,2007,23(3):97-100. (WU Lili, WANG Huimin, WU Shiqiang. Water temperature hierarchy of the reservoir and its improving measures [J]. Design of Hydroelectric Power Station,2007,23(3):97-100. (in Chinese))

[2] PETTS G E. 蓄水河流对环境的影响[M]. 王兆印,曾庆华,吕秀贞,等,译. 北京:中国环境科学出版社,1988:25-27.

[3] 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.

[4] 邓云. 大型深水库的水温预测研究[D]. 南京:河海大学,2003.

[5] SL278—2002 水利水电工程水文计算规范[S].

[6] 詹晓群,陈建,胡建军. 山口岩水库水温计算及其对下

游河道水温影响分析[J]. 水资源保护,2005,21(1):29-35. (ZHAN Xiaoqun, CHEN Jian, HU Jianjun. Mountain rock reservoir water temperature calculation and the analysis of influence on the downstream river water temperature [J]. Water Resources Protection, 2005, 21(1):29-35. (in Chinese))

[7] 周孝德,张华丽. 刘家峡水库水温影响回顾评价研究[D]. 西安:西安理工大学,2008.

[8] 张大发. 水库水温分析及估算[J]. 水文,1984(1):19-27. (ZHANG Dafa. Analysis and estimation of water temperature of reservoir [J]. Journal of China Hydrology, 1984(1):19-27. (in Chinese))

[9] 朱伯芳. 水库水温度估算[J]. 水利学报,1985(2):12-21. (ZHU Bofang. Estimation of water temperature of reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985(2):12-21. (in Chinese))

[10] 雒文生,宋星原. 水环境分析及预测[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,2000:27-29.

[11] 江春波,马强,付清潭. 二维温度分层流的数值模拟[J]. 水力发电学报,2003,29(2):24-26. (JIANG Chunbo, MA Qiang, FU Qingtan. Numerical simulation of two-dimensional temperature stratified flow [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2003, 29(2):24-26. (in Chinese))

[12] 陆俊卿,张小峰,强继红,等. 水库水温数学模型及其应用[J]. 水力发电学报,2008,27(5):124-129. (LU Junqing, ZHANG Xiaofeng, QIANG Jihong, et al. Reservoir water temperature mathematical model and its application [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008,27(5):124-129. (in Chinese))

[13] 周孝德,孙东迁. 托什干河上游梯级水库水温预测研究[D]. 西安:西安理工大学,2008.

[14] 刘夏明,李俊清,豆小敏,等. EFDC 模型在河口水环境模拟中的应用及进展[J]. 环境科学与技术,2011,34(6G):136-140. (LIU Xiaming, LI Junqing, DOU Xiaomin, et al. The application and advance of environmental fluid dynamics code (EFDC) in estuarine water environment [J]. Environmental Science & Technology,2011,34(6G):136-140. (in Chinese))

(收稿日期:2013-03-05 编辑:徐 娟)

