

小调节能力水库的水温结构

梁瑞峰,李 嘉,李克锋,郝红升

(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 水库的修建将对库区及下游河道的水温带来不利影响,因调节能力不同水库对库区及下泄水温的影响程度各异。以金沙江中游某周调节水库为例,采用立面二维水温模型对小调节能力水库的库区水温结构、坝前水温分布和下泄水温进行研究,结果表明小调节能力水库受来流和库容影响水温在部分月份会出现分层现象,但总体上其年内下泄水温过程与天然水温较为接近,水库建设对水温的影响有限。

关键词 水库 调节能力 水温预测 水温结构

中图分类号 :TV697.2+1 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2008)S1-0034-03

对于以发电为主要任务的水库,如果其上游有控制性水库,其对流量的调节作用也较小。本文以金沙江中游某周调节水库为对象,研究小调节能力水库的水温结构。该水库最大坝高为 140 m,多年平均流量为 1770 m³/s。水库在汛期 6~10 月以正常蓄水位 1 223 m 运行,其他月份以 1 222.5 m 水位运行。水库总库容为 16.92 亿 m³,调节库容为 5.64 亿 m³。年径流量与库容比为 33.0,根据 α-β 指数法^[1]初步判断,水库的水温结构属于混合型。根据三峡、漫湾等水库运行以来的水温观测资料^[2-3],混合型水库在某些水文条件下也会出现季节性分层,有一定的温度梯度,进而可能对库区及水库下游的水温、水质等产生不利影响^[4-5]。因此预测研究小调节能力电站建设对水库水温及下泄水温的影响具有重要意义,可为工程的环境影响评价及环境保护政策的拟定提供科学依据。

1 水温预测模型

由于河宽变化对水面热交换及热量的向下传递都有一定的影响,因此假定流场及温度场在河宽方向无变化,将控制方程在该方向积分,即可得到宽度平均的立面二维水库水温预测模型^[6]。

水动力学方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(Bu) + \frac{\partial}{\partial z}(Bw) = 0 \tag{1}$$
$$\frac{\partial}{\partial t}(Bu) + u \frac{\partial}{\partial x}(Bu) + w \frac{\partial}{\partial z}(Bu) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(B\nu_e \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(B\nu_e \frac{\partial u}{\partial z}\right) - \frac{B}{\rho_s} \frac{\partial p}{\partial x} +$$
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(B\nu_e \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(B\nu_e \frac{\partial w}{\partial x}\right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(Bw) + u \frac{\partial}{\partial x}(Bw) + w \frac{\partial}{\partial z}(Bw) =$$
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(B\nu_e \frac{\partial w}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(B\nu_e \frac{\partial w}{\partial z}\right) - \frac{B}{\rho_s} \frac{\partial p}{\partial z} -$$
$$\beta \Delta Tg + \frac{\partial}{\partial x}\left(B\nu_e \frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(B\nu_e \frac{\partial w}{\partial z}\right) \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(Bk) + u \frac{\partial}{\partial x}(Bk) + w \frac{\partial}{\partial z}(Bk) =$$
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(B \frac{\nu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(B \frac{\nu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z}\right) +$$
$$B(G_k + G_b - \epsilon) \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(B\epsilon) + u \frac{\partial}{\partial x}(B\epsilon) + w \frac{\partial}{\partial z}(B\epsilon) =$$
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(B \frac{\nu_e}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(B \frac{\nu_e}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z}\right) +$$
$$BC_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G_k - BC_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \tag{5}$$

其中

$$G_k = \nu_e \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right]$$

$$G_b = -\beta g \frac{\nu_e}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$\nu_e = \nu + \nu_t = \nu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

式中 :B 为河宽 ;u,w 分别为纵向和垂向流速 ;浮力

项 G_b 反映了紊动动能与内能的转换关系; β 为热膨胀系数; σ_T 为温度普朗特数; ν 为分子黏性系数; ν_t 为紊动涡黏系数; p 为压强; T 为水温; ρ 为密度; ρ_s 为参考密度; k 为紊动动能; ϵ 为紊动动能耗散率; $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ 分别为紊动动能及耗散率的普朗特数, 一般取 1.0, 1.3 模型常数 $C_\mu, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}$ 分别为 0.09, 1.44, 1.92。

水温方程为

$$\frac{\partial(BT)}{\partial t} + u \frac{\partial(BT)}{\partial x} + w \frac{\partial(BT)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{B\nu_e}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{B\nu_e}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial(B\varphi_z)}{\partial z} \quad (6)$$

式中: σ_T 为温度普朗特数; C_p 为水的比热容; φ_z 为穿过水深 z 的太阳辐射通量。

水库巨大的计算区域和极大的纵深比给数值计算的稳定和收敛带来很大困难, 因此采用数值模型进行水温预测前需要利用天然水库的实测资料对模型进行验证。立面二维水温数学模型用二滩实测水温数据进行了长期验证和参数率定, 结果表明预测结果与实测水温有较好的一致性。

2 初始及边界条件

初始流场为静止状态, 初始温度场为入流水温全库同温。

水面采用‘刚盖假定’, 即水气界面热交换是水体主要的热量来源, 水温的水面边界条件反映了水面与大气间的热交换:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = 0 \quad w = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = - \frac{\varphi_n}{\rho C_p D_z} \quad (8)$$

式中: φ_n 为水体净吸收的热量; D_z 为热扩散系数。

库底和坝体表面采用无滑移边界条件, 且为绝热边界。假定出口断面为充分发展的湍流, 有

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad w = 0 \quad (9)$$

3 预测结果及分析

图 1 为库区逐月坝前垂向水温分布。图 2 和图 3 分别显示了库区在夏季(6 月)和冬季(12 月)的立面二维水温分布情况。

由图 1 可知, 库区水温在 1 月最低, 坝前垂向断面上平均水温为 9.6℃。1 月、2 月温度结构相似, 在表层深度 20 m 内存在一个温度梯度 0.2℃/m, 使温度从表层 13℃左右逐渐线性过渡到下层 9.6℃左右。3~6 月为升温期, 入流水温和气温大幅度增加, 在此期间入流水温和气象条件的变化逐渐影响到水库在冬季形成的库底低温层, 使低温层

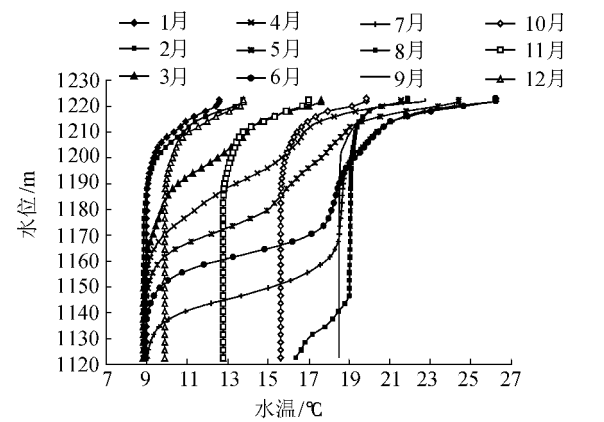


图 1 库区逐月坝前垂向水温分布

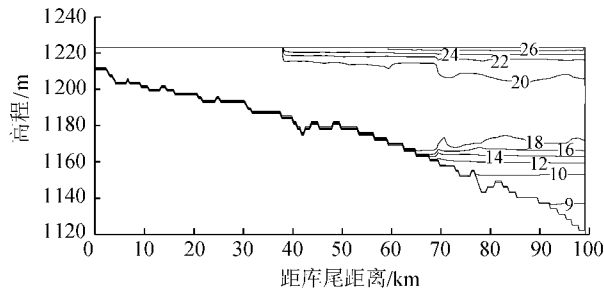


图 2 库区 6 月立面二维水温分布

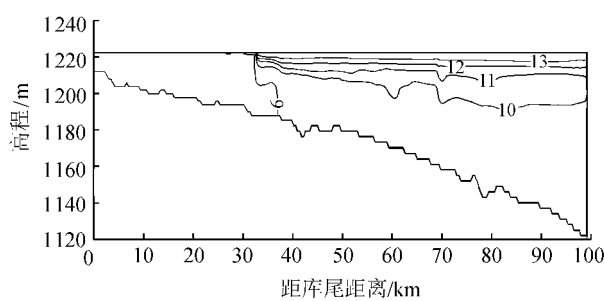


图 3 库区 12 月立面二维水温分布

厚度不断减小, 位置下移, 且表层温度梯度逐渐加大。7 月的太阳辐射强度已开始下降, 但库区云量为全年最高, 提高了长波辐射的强度, 使水体表层维持在一个较高的温度; 热量的向下传递使下层温跃层进一步下移, 且上下两温跃层间的同温层更加巩固。8 月的太阳辐射强度略高于 7 月, 而云量稍有下降, 但该月的入流水温和入库流量为全年最高, 库区流速加大, 使热量不易蓄积, 因而表层水温比 7 月的低, 同时, 下层温跃层的下移也彻底破坏了库区在冬季形成的库底低温层, 使库底水温大幅提高, 垂向温差低于 5℃, 分层明显减弱。9 月气象条件与 8 月接近, 除坝前 40 km 的表层 20 m 内存在较弱的水温分层外, 其余区域均形成垂向均温层。10~12 月为降温期, 气温、云量和入流水温迅速下降, 太阳辐射也达到最低, 水体向大气散失热量, 库区水温整体下降, 而入流低温水从库底潜入库区, 底部降温迅速, 垂向一直保持弱分层状态。

图4 比较了水库的月均下泄水温、坝前表层水温、库底水温、坝址处天然水温及气温年内变化过程。

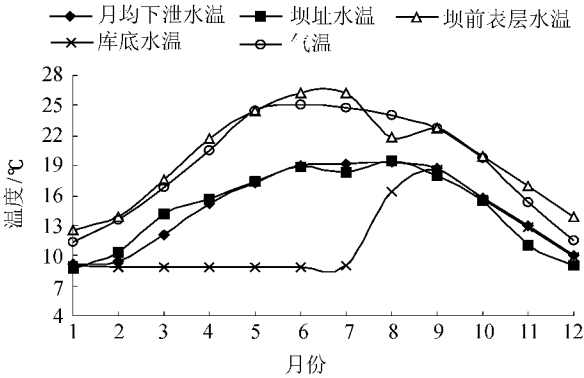


图4 水库月均下泄水温、坝前表层水温、库底水温、坝址处天然水温及气温情况

就坝前表层水温而言,1月最低,为12.6℃,6~7月最高,为26.3℃,年内变化达13.7℃。8月的坝前表层水温较7月明显降低,主要是由于8月的入库流量为全年最高,库区水体掺混加剧,使热量不易蓄积,且其气温和云量也均低于7月,这说明气象条件对库表水温的影响很明显。

库底水温在1~7月基本没有变化,维持在9.0℃左右。但从8月开始由于受来流和泄洪影响,冬季形成的库底低温层被破坏,之后的9~12月库底与表层水温基本保持同步变化。

水库对下游水温的影响较弱。水库年均下泄水温较建坝前提高0.2℃。在升温期2~5月,下泄水温较建坝前平均降低了0.9℃,3月降低最多,达2.1℃,但该温度仍然在坝址水温年变化极值范围内。下泄水温在5月26日达到18℃,基本与建坝前维持同步,延迟现象不明显。在降温期10~12月,下泄水温平均较建坝前升高了1.1℃,11月升幅最高,达1.9℃。下泄水温全年月均最高温度从19.5℃降到19.4℃,月均最低温度从8.7℃升至9.2℃,温差降低了0.6℃,由此可见建坝前后下游水温过程整体变化不明显。

4 与其他电站的比较

表1列出了锦屏一级电站单层引水口方案的预测下泄水温。由表1可知,锦屏一级电站的下泄水温在升温期降幅最大时低于坝址天然水温2.3℃,在降温期升幅最大时高于坝址天然水温5.1℃,年均下泄水温(13.2℃)比坝址天然水温高0.8℃,其变动幅度远高于本文研究的周调节能力水库。

金沙江中游最末一级梯级电站观音岩电站年径流量与库容比为27,在升温期(3~5月)低于坝址天然水温0.9℃,在降温期(12月~翌年1月)高于坝

表1 锦屏一级电站单层引水口方案的下泄水温 ℃

月份	月均下泄水温	坝址天然水温	月份	月均下泄水温	坝址天然水温
1	9.4	-4.2	7	16.6	0.7
2	8.9	-1.6	8	17.4	0.2
3	9.1	1.2	9	16.5	0.4
4	11.2	2.3	10	14.8	-1.3
5	14.5	1.4	11	13.0	-3.6
6	16.1	1.1	12	10.9	-5.1

址天然水温3.3℃,其预测年均下泄水温16.5℃仅比坝址天然水温提高0.2℃。该电站下泄水温的变动幅度与本文的示例水库接近。

锦屏一级电站具有年调节能力,观音岩电站具有日调节能力,本文研究的水库具有周调节能力,3个水库的下泄水温差异说明调节能力对水库下泄水温的影响是较大的。

5 结 论

a. 小调节能力水库的水温结构一般为混合型,不存在稳定的分层,但在夏季升温期受气象条件影响垂向最大温差接近10℃,有明显的分层现象。

b. 库底水温在1~7月较为稳定,但由于水库调节能力较小,对汛期大流量无蓄滞作用,因此汛期将破坏前期的分层结构,引起底层温度的大幅度升高。

c. 本文研究的水库下泄水温达到18℃的时间与建坝前同步,延迟现象不明显。

d. 小调节能力水库运行对下泄水温的影响较小,在升温期和降温期对天然水温的改变都不明显。就本文研究的水库而言,年均下泄水温较建坝前提高0.2℃;下泄水温在升温期低于坝址天然水温,最大低于坝址天然水温2.1℃,平均降低0.9℃;在降温期高于坝址天然水温,平均上升约1.1℃,最高达1.9℃;其余月份基本与坝址天然水温持平。

参考文献:

[1] 张大发. 水库水温分析及估算[J]. 水文,1984(1):19-26.
[2] 王欣. 漫湾水库水温水质的回顾评价[J]. 水电站设计,1999,15(3):71-75.
[3] 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.
[4] 戴松晨. 宝珠寺水库蓄水前后水温、水质变化回顾分析[J]. 水电站设计,2001,17(4):58-60.
[5] MICHIOKU K, KANDA T, ITOH T, et al. Water quality behavior in a reservoir having anaerobic heavy bottom layer coupled with inverse temperature gradient[C]//San Francisco, California, Environmental and Coastal Hydraulics, 27th IAHR, 1997:100-105.
[6] 邓云,李嘉,李克锋,等. 水库宽度平均的立面二维水温模型研究[M]. 四川 四川大学出版社,2000:188-195.

(收稿日期 2007-11-02 编辑 骆超)