

梯级水电站对库区和河道水温的影响预测

李褪来,陈黎明,王向明

(南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210029)

摘要:针对某河流梯级水电站水库中不同的水温结构类型,分别建立了一维和三维水动力与水温数学模型,对建设梯级电站后库区及河道的水温变化进行研究。研究表明,建设梯级电站后改变了库区水温的垂向分布,增大了水库表层和底层水温温差;改变了下游河道水温的时空分布,降低了下泄水流全年平均水温,减小了年内水温变幅。

关键词:梯级电站;水温预测;温跃层;数学模型

中图分类号:TV697.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)03-0023-06

Influence forecast of the cascade power stations on water temperature of reservoirs and rivers//LI Tilai, CHEN Liming, WANG Xiangming (*State Key Laboratory of Hydrology-Water Resource and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: The one-dimensional and three-dimensional hydrodynamic and water temperature numerical models for a reservoir of the cascade hydropower station with different temperature types were established to study the influences of the cascade hydropower station construction on the water temperature. The results show that after the construction of the stations, the vertical distribution of water temperature in the reservoir changes; the difference between the bottom and surface water temperatures increases; the spatial and temporal distributions of water temperature in the lower reaches of the river change; the variation range of water temperature in the lower reaches of the river decreases; and the annual average water temperature of the discharged flow decreases.

Key words: cascade power stations; water temperature forecast; thermal stratification; numerical models

我国山区河流落差大,水量充沛,具备建设梯级水电站的自然条件。开发梯级水电站不但可以充分利用河流的水资源,而且还可以调节水量、提高防洪和航运能力以及增加旅游资源等。然而,梯级水电站的建设改变了河道的蓄水量、流量过程、水域面积、水温分布和泥沙运动,所带来的生态环境问题也越来越受到关注。近年来国内外学者针对梯级水电站建设带来的河流水温变化进行了研究,Huber等^[1-2]建立了垂向一维水动力和水温数学模型、平面二维水动力和水温数学模型和三维水动力和水温数学模型,并已在湖泊型水库的水温研究中应用;刘兰芬等^[3-8]通过经验公式法和数学模型对水库水温进行了研究。梯级水电站水库对河流的水温影响较单一水库的影响更为复杂,本文针对某河流梯级水电站开发中不同水库的水温结构类型,采用一维水动力和水温数学模型和三维水动力和水温数学模型相结合的方法,对水库水温分布、下泄流水温以及对干

流水温的影响进行预测,为进一步研究梯级水电站建设对整个河流鱼类和水生物生长影响提供理论依据。

1 水动力和水温数学模型

1.1 一维水动力和水温数学模型

为研究梯级水电站建设对整个干流水温的影响,首先将干流、大坝及其主要支流作为整体考虑,采用一维水动力和水温数学模型进行模拟研究。

一维天然河道水流运动计算可归结为求解一维非恒定流圣维南方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e \right) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; h 为水位, m ; A 为过水断面面积, m^2 ; x 为沿主流向的纵向距离, m ; t 为时间, s ; q 为侧向出、入流, m^2/s ; S_f 为河道的阻力坡降; S_e 为河道突扩或收缩引起的坡降。式(1)采用四点加权隐式

有限差分格式离散, Newton-Raphson 迭代法求解。

水温扩散方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(VT) = -\frac{\partial}{\partial x}(QT)\Delta x + \frac{\partial}{\partial x}\left(DA\frac{\partial T}{\partial x}\right)\Delta x \pm S \quad (2)$$

式中: V 为计算单元体积, m^3 ; T 为水温, $^{\circ}\text{C}$; D 为自定义的离散系数, m^2/s ; S 为源汇项, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

一维水动力和水温数学模型的纵向离散系数参考相关文献及经验公式进行估算^[10]:

$$D = \frac{0.011mu^2B^2}{hu^*} \quad (3)$$

其中

$$u^* = \sqrt{ghs}$$

式中: m 为自定义系数; B 为断面的平均宽度, m ; h 为断面的平均水深, m ; u 为断面的平均流速, m/s ; u^* 为摩阻流速, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; s 为坡降。

1.2 三维水动力和水温数学模型

对于每一个水库而言, 库区水流运动和水温分布是呈三维特性的, 研究水库水动力和水温时空变化的三维数学模型的基础是时均化的雷诺方程, 它包括了紊流影响和密度变化, 其中紊动应力可通过 Boussinesq 涡黏概念来模拟。

三维水流运动基本方程为

$$\frac{1}{\rho c_s^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = S_0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} + 2\Omega_{ij} u_j = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_T \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] + u_i S_1 \quad (5)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \nu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \beta g_i \frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} - \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left[\nu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + C_{3\varepsilon} \beta g_i \frac{\nu_T}{\sigma_T} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right] - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

式中: i 为横向或纵向; j 为横向、纵向及垂向; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; c_s 为声音在水中的传播速度, 取 1450 m/s ; u_i 为 x_i 方向的速度分量, m/s ; p 为压强, Pa ; g_i 为重力加速度, m/s^2 ; k 为紊动动能, m^2/s^2 ; ε 为紊动动能的耗散率; Ω_{ij} 为克氏张量; ν_T 为紊动黏性系数; δ 为克罗奈克函数; S_0 、 S_1 为源汇项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 、 σ_k 、 σ_ε 、 σ_T 为特征值; β 为容量扩张系数; ϕ 为浮力标量。

温度对流扩散方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (Tu_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S_T \quad (8)$$

$$\text{其中} \quad D_j = \frac{\nu_T \Delta t}{\sigma_T (\Delta S_j)^2} \quad \nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

式中: D_T 为温度扩散系数, m^2/s ; S_T 为源汇项, $^{\circ}\text{C}/\text{s}$; $1/\sigma_T$ 为温度扩散系数比例; ΔS_j 为 j 方向网格尺度。

2 某江梯级电站概况

某江干流长 759 km , 规划建设五级水电站, 如图 1 所示。目前梯级二、三、五水电站已经建成, 梯级一、四水电站将于 2020 年建成。梯级一水电站库区河段长为 178.0 km , 库容为 151.3 亿 m^3 ; 梯级二水电站库区河段长为 70.0 km , 库容为 9.2 亿 m^3 ; 梯级三水电站库区河段长为 91.2 km , 库容为 8.9 亿 m^3 ; 梯级四水电站库区河段长为 210.0 km , 库容为 237.0 亿 m^3 ; 梯级五水电站库区河段长为 105.0 km , 库容为 12.3 亿 m^3 。其中梯级一、四水电站由于水库库容较大, 具有多年调节能力, 将对天然径流产生较强的调节作用, 库区的水温结构也发生较大的变化。

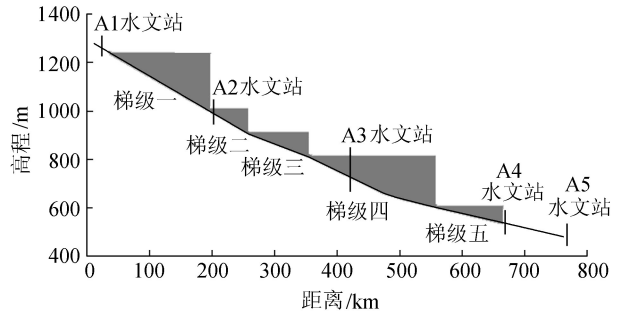


图1 某江梯级水电站示意图

根据各梯级水电站的总库容以及入库年径流量, 通过参数 α ($\alpha = W_y/W_r$, W_y 为年入库总水量, W_r 为总库容) 判断出各水库的水温结构类型, 梯级一、四水电站库区的 $\alpha < 10$, 属于稳定分层型, 水温在垂向变化较大; 其他 3 个梯级水电站库区的 $\alpha > 20$, 为混合型, 水温在垂向变化较均匀。因此对梯级一、四水电站采用三维水动力和水温数学模型进行模拟研究, 其他梯级水电站及下游河道可以采用一维水动力和水温数学模型进行模拟研究。

3 数学模型验证

3.1 一维水动力和水温数学模型验证

对某江干流和梯级二、三、五水电站建立一维水动力和水温数学模型, 计算范围从上游 A1 水文站起, 至下游 A5 断面止, 包括了 5 个梯级水电站, 共有 71 个计算断面, 断面间距为 $3 \sim 15 \text{ km}$ 。模型计算时间步长为 3600 s 。

选取 2002 年梯级二、三水电站已经建成情况下的 A2 水文站和 A4 水文站的全年水位、流量和水温

实测过程对一维水动力和水温数学模型进行验证。

上游边界控制条件采用2002年1—12月A1水文站的实测流量过程,下游边界条件通过曼宁公式获取水位^[11]。上游A1断面至下游A5断面之间共有12条支流汇入,支流流入边界控制采用各支流多年平均流量。梯级二、三水电站作为内部边界处理,给定水电站的运行水位。水温上游边界给定A1水文站2002年1—12月的实测水温资料,由于支流水温资料较少,难以获取,支流水温根据支流所处干流的位置,将与支流最接近的干流水文站的实测水温给支流赋值,并且通过支流所处位置的不同,利用纬度变化对支流水温进行微调。

气象资料采用2002年1—12月干流对应站的气温、气压、风速、湿度和太阳辐射等数据,如图2所示,图中时间用当年的顺序日期表示。当河道比较顺直且河床植被较少时,糙率取0.020~0.040;当河床多由卵石组成时,糙率取0.035~0.050。

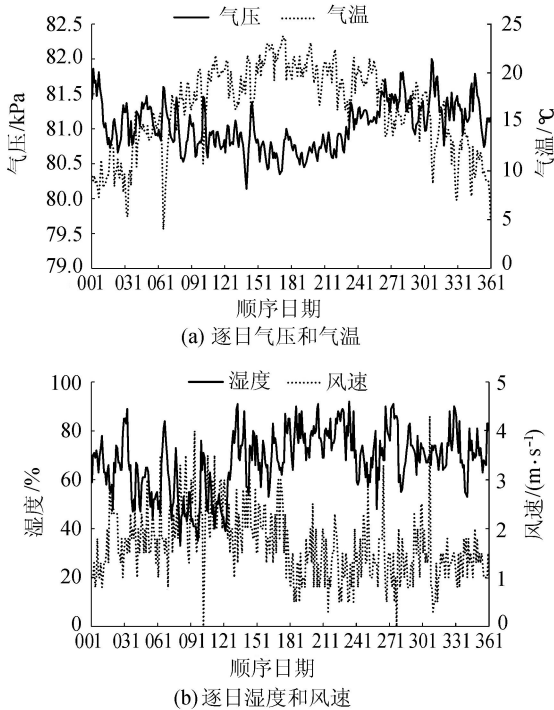


图2 2002年1—12月气象资料

验证计算表明,A2水文站和A4水文站的水位和流量计算值与实测值的变化趋势和变化幅度基本一致,A2水文站流量计算值与实测值的相对误差约12.2%,水位计算值与实测值的全年平均误差为0.53m;A4水文站流量计算值与实测值的相对误差约24.1%,水位计算值与实测值的全年平均误差为0.06m。限于篇幅,文中只给出A4水文站水位和流量过程的验证结果(图3)和数学模型计算得到的梯级二、三水电站蓄水运行后的河道水面线过程(图4)。

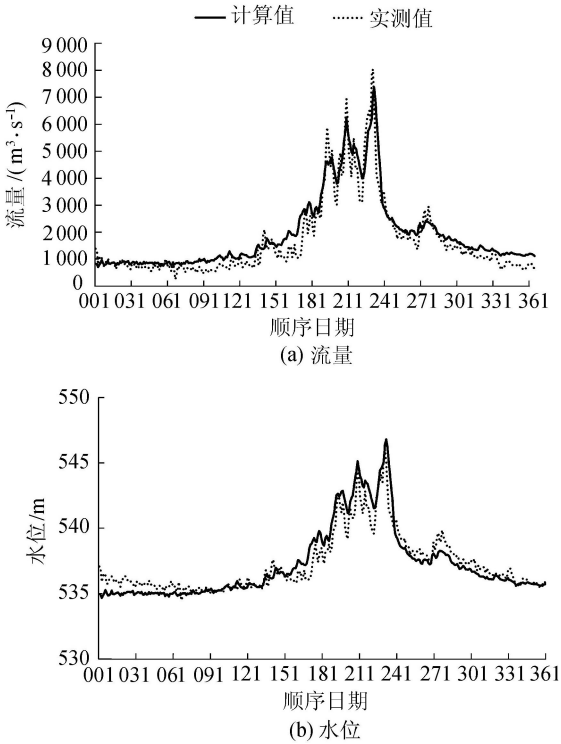


图3 2002年A4水文站流量、水位计算值和实测值的比较

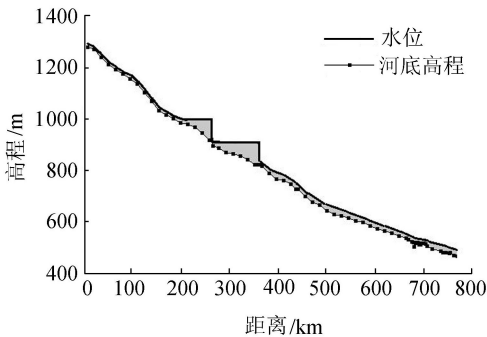


图4 2002年某江梯级二、三水电站运行后河道水面线

2002年A2、A4水文站的全年水温验证如图5所示,A2水文站水温计算值与实测值的最大误差为1.5℃,全年平均误差0.6℃;A4水文站水温计算值与实测值的最大误差为0.9℃,全年平均误差为0.1℃。

上述验证表明,所建立的一维水动力和水温数学模型能够较好地反映干流两个梯级电站运行后的流量变化和水温变化,可以用来预测整个干流的水温变化。

3.2 三维水动力和水温数学模型参数的确定

由于梯级一和梯级四电站尚未建成,模型参数难以率定。三维水动力和水温数学模型的参数确定参照了刘兰芬等^[3-4]在漫湾水电站水库水温研究中通过现场观测对三维数学模型进行率定的研究成果,给出方程(4)~(7)中的有关参数取值。

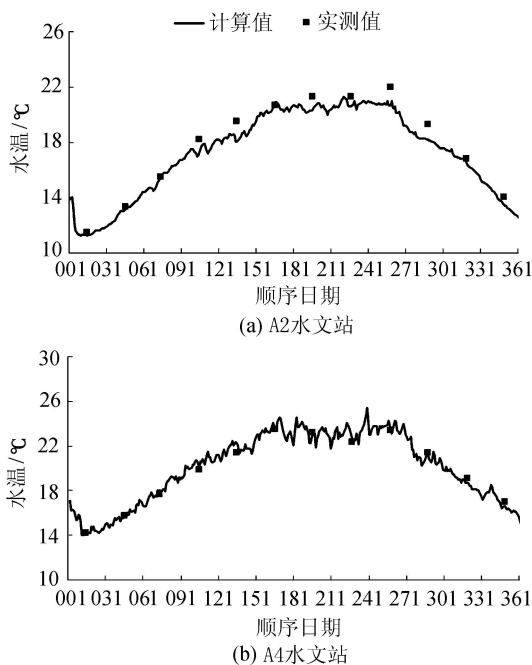


图5 2002年A2、A4水文站水温计算值和实测值的比较

4 梯级水电站水温预测

为预测梯级水电站运行后对库区及干流水温的影响,首先采用三维水动力和水温数学模型研究水温结构类型为稳定分层型的梯级一、四水电站库区水温变化,再利用一维水动力和水温数学模型研究混合型梯级二、三、五水电站及下游河道的水温变化。

4.1 梯级一水电站库区水温变化

梯级一水电站调节库容近100亿 m^3 ,坝高292 m,水库正常蓄水位为1240 m,干流回水长度为180 km,水电站发电取水高程为1140 m。

梯级一水电站的三维水动力和水温数学模型计算范围从大坝向上游116 km,将库区划分为 $116 \times 22 \times 26$ (纵向 $\times$ 横向 $\times$ 垂向)个计算网格单元,其网格尺寸分别为1000 m、100 m和10 m。计算时间步长60 s。

计算条件:为保证下游水量平衡,下游必须给定流量边界,故上游给定梯级一水电站典型平水年运行水位,下游给定梯级一水电站典型平水年条件下的下泄流量;气象资料采用典型平水年条件下的当地气温、气压、风速和相对湿度等数据;上游来流水温根据A1水文站水温推算得到。

平水年条件下,梯级一水电站的下泄流水温采用所建立的三维水动力和水温数学模型进行预测计算,主要参数根据参考文献[3-4]的研究成果确定,水动力参数 C_μ 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 σ_k 、 σ_ε 分别为0.09、1.44、1.92、1.00、1.30;水深方向和水平方向的热扩散比例系数分别为0.005和0.1。

从三维水动力和水温数学模型计算结果中提取

代表春、夏、秋、冬4个季度的典型月份(2月、5月、8月、11月)第15天的水温数据组成梯级一水电站库区纵断面的水温分布,可以看出,水库全年均处于分层状态,属于典型的稳定分层型水库;表层水温受气象条件影响较大,冬季2月降至最低约14.5℃(图6),夏季8月达到全年最大值约22.0℃。

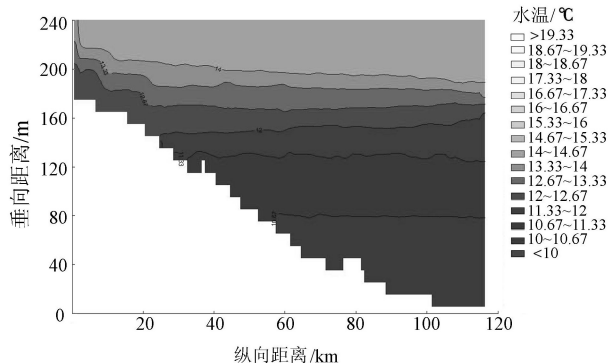


图6 典型平水年2月梯级一水电站库区纵断面水温分布

从梯级一水电站坝前断面各月水温垂向分布(图7)看出:冬季2月表、底层水温温差最小,约为4.5℃,夏季8月表、底层水温温差最大,约为12.0℃;冬、春季1—6月温跃层厚度较薄,约为70~80 m,夏、秋季7—12月温跃层较厚,约为100~120 m。

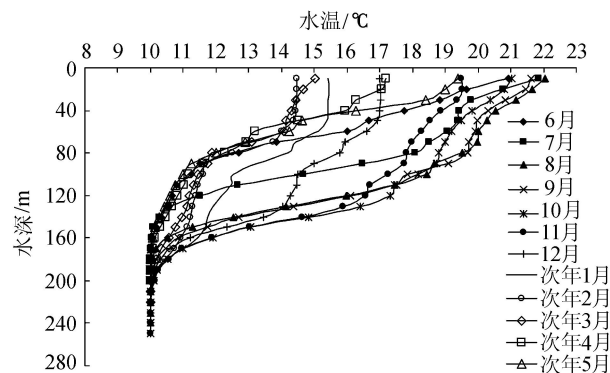


图7 梯级水电站坝前断面各月水温垂向分布

4.2 梯级四水电站库区水温变化

梯级四水电站坝高为262 m,水库总库容为237亿 m^3 ,水库正常蓄水位为812 m,正常蓄水位以下库容为217亿 m^3 ,调节库容为113亿 m^3 ,水库具有多年调节特性。水电站采用分层取水方案,典型平水年条件下取水高程为774 m。

梯级四水电站的三维水动力和水温数学模型计算范围从大坝向上游216 km,将库区划分为 $434 \times 21 \times 23$ (纵向 $\times$ 横向 $\times$ 垂向)个计算网格单元,其网格尺寸分别为500 m、100 m和10 m。计算时间步长60 s。

计算条件:上游给定梯级四水电站典型平水年运行水位,下游给定典型平水年条件下取水高程处的发电下泄流量;气象资料采用典型平水年条件下的当地气温、气压、风速和相对湿度等数据;上游来

流水温采用梯级一水电站建成后一维水动力和水温数学模型计算得到的梯级三电站下泄流水水温。

从梯级四水电站库区各月的纵断面水温分布来看,水温在1—2月趋于同温,垂向最大温差约2.1℃;3—5月为升温期,上游来流水温较低,表面受太阳辐射及气温升高影响,上层水温增长迅速,但靠近底部水温基本保持不变,仍然保持低于14.0℃,在整个垂向段面上出现了很大的水温梯度,形成了明显的水温分层;6—10月气温达到最高,表层20~30m的水温达21.5~24.0℃,6—7月中层40~60m的水温为17.5~21.5℃,8—10月中层40~80m的水温为17.5~21.5℃,6—10月中层厚度逐渐增加,底层80m以下至库底的水温为14.0~17.5℃;11—12月为降温期,气温迅速下降,水体向大气散失热量而开始降温,冷水下沉使表层温跃层消失。图8给出了典型平水年7月梯级四水电站库区纵断面水温分布。

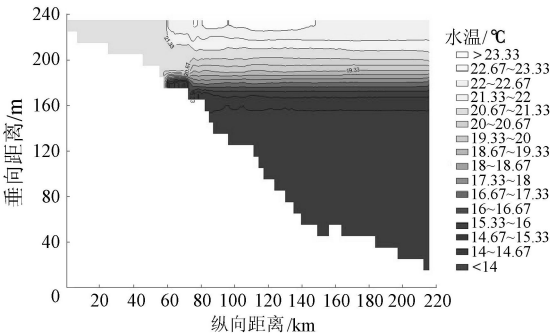


图8 典型平水年7月梯级四水电站库区纵断面水温分布

从梯级四水电站坝前断面各月水温垂向分布(图9)可以看出,靠近水库底层的水温相对稳定,一年内的变化幅度很小,基本维持在14.0℃左右;年内春季低温层较厚,随着气温的升高,逐渐变薄,到了秋、冬季再随着气温的下降逐渐变厚;夏、秋季温跃层厚度较厚,约为70~80m,冬、春季较薄,约为40~60m。

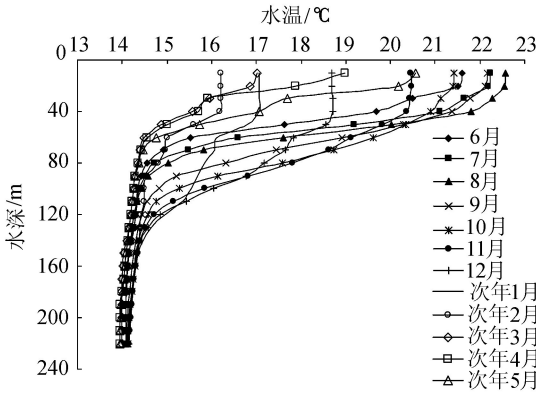


图9 梯级四水电站坝前断面各月水温垂向分布

总体而言,梯级四水电站下泄流水水温变化趋势与梯级一水电站基本一致,下泄流水水温在秋、冬

季略高于上游来流水温,在春、夏季则低于上游来流水温,全年平均水温略有降低。

4.3 梯级水电站运行后对下游河道水温的影响

2020年梯级四水电站建成后,5个梯级电站将同时运行。在梯级四水电站下泄流水水温发生变化的条件下,采用一维水动力和水温数学模型对典型平水年下游河道水温进行预测。

计算条件:上游边界采用梯级四水电站下泄流量,下游边界通过曼宁公式获取水位。支流流量采用各支流多年平均流量。气象资料采用平水年1976年6月至1977年6月对应水文站的气温、气压、风速、湿度和太阳辐射等数据。上游来流水温采用三维水动力和水温数学模型计算出的梯级四水电站下泄流水水温结果,支流水温采用与2002年验证的相同水温值。

从预测结果(图10)可看出,2020年梯级四水电站建成后,5个梯级水电站同时运行条件下,沿程水温变化基本上是升温过程,梯级水电站对水温的累积影响明显。受梯级四水电站下泄流水水温的影响,下游梯级五水电站坝址处和A5断面在10月至次年2月(秋、冬季)下泄流水水温高于现状水温;3—9月(春、夏季)下泄流水水温低于现状水温。另外梯级四水电站下游至A5断面近100km的河段无大型水利工程,随着水温沿程恢复,梯级四水电站下泄流水水温影响逐步减小。

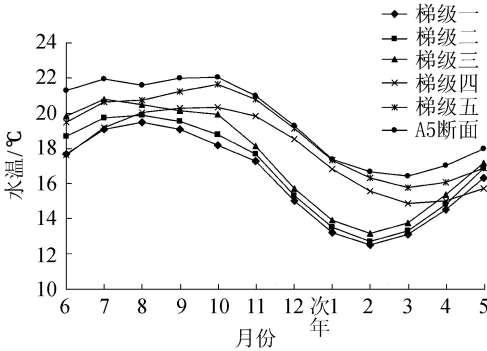


图10 梯级四水电站建成后各坝址处水温过程比较

从预测结果(图11)还可以看出,梯级四水电站建成后,下游A5断面处水温发生了变化,最高水温

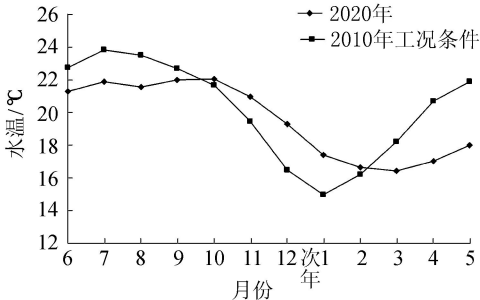


图11 梯级水电站建设前后A5断面水温变化比较

出现在 10 月,月均值为 22.1℃;最低水温出现在 3 月,月均值为 16.4℃;冬季 12 月水温升幅最大,升高 2.8℃;夏季 7 月水温降幅最大,减低 2.0℃;年内水温变幅减小,由梯级四水电站建成前的 15.0 ~ 23.9℃变为 16.4 ~ 22.1℃。

5 结 论

a. 梯级水电站中的稳定分层型水库表层水温受气象条件影响较大,但靠近水库底部水温基本保持不变,表层和底层水温温差在冬季最小、在夏季最大;下泄水流水温在秋、冬季略高于上游来流水温,在春、夏季低于上游来流水温,全年平均水温略有降低。

b. 5 个梯级水电站同时运行时,沿程水温变化基本上是升温过程,梯级水电站对水温的累积影响明显;受上游梯级水电站下泄水流水温的影响,下游河道秋、冬季水温高于现状水温,春、夏季水温低于现状水温。

c. 上游梯级水电站的运行改变了下游河道水温的时空分布,A5 断面最高水温出现时间由原来的 7 月推迟至 10 月,最低水温出现时间由原来的 1 月推迟至 3 月;水温年内变幅减小,月平均最高水温降低 1.8℃,月平均最低水温升高 1.4℃;冬季(12 月至次年 2 月)12 月水温升幅最大,升高 2.8℃;夏季(6—8 月)7 月水温降幅最大,降低 2.0℃。

参考文献:

[1] HUBER W C, HARLEMAN D R F. Temperature prediction in stratified reservoirs[J]. J of the Hyd Div, ASCE,1972,98(4):645-666.
[2] HARLEMAN D R F. Hydrothermal analysis of lakes and reservoirs[J]. J of the Hyd Div, ASCE,1982,103(3):301-325.
[3] 刘兰芬,张士杰,刘畅,等. 漫湾水电站水库水温分布观测与数学模型计算研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2007,5(2):86-94. (LIU Lanfen, ZHANG Shijie,

LIU Chang,et al. Study on the water temperature structure of the Manwan Reservoir[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2007,5(2):86-94. (in Chinese))
[4] 刘兰芬,陈凯麒,张士杰,等. 河流水电梯级开发水温累积影响研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2007,5(3):173-180. (LIU Lanfen, CHEN Kaiqi, ZHANG Shijie, et al. Study on cumulative effects of water temperature by cascade hydropower stations built on rivers [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2007, 5 (3): 173-180. (in Chinese))
[5] 李怀恩. 分层型水库的垂向水温分布公式[J]. 水利学报,1993(2):43-49. (LI Huaen. Vertical temperature distribution equation for thermal stratification reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993(2):43-49. (in Chinese))
[6] 邓云. 大型深水库的水温预测研究[D]. 成都:四川大学,2003.
[7] 陈永灿,张宝旭. 密云水库垂向水温模型研究[J]. 水利学报,1998(9):14-20. (CHEN Yongcan, ZHANG Baoxu. Temperature in Miyun Reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(9):14-20. (in Chinese))
[8] 马方凯,江春波,李凯. 三峡水库近坝区三维流场及温度场的数值模拟[J]. 水利水电科技进步,2007,27(3):17-20. (MA Fangkai, JIANG Chunbo, LI Kai. Numerical simulation of 3D flow field and temperature field near dam area of Three Gorges Reservoir [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007,27(3):17-20. (in Chinese))
[9] 任华堂,陈永灿,刘昭伟,等. 深水湖泊水库水温数值计算模型研究[J]. 水力发电学报,2007,26(3):99-104. (REN Huatang, CHEN Yongcan, LIU Zhaowei, et al. Study on water temperature simulation model for deep lake and reservoir[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007,26(3):99-104. (in Chinese))
[10] 鲁彦. 糯扎渡水库有机污染物一维动态水质模型[D]. 西安:西安理工大学,2005.
[11] The U. S. Army Corps of Engineers. HEC-RAS river analysis system hydraulic reference manual[M]. [S. l.]: [s. n.],2008.

(收稿日期:2012-07-17 编辑:周红梅)

(上接第 17 页)

[11] 张发明,龚政,陈国平,等. 新型围垦堤防设防标准与设计方法研究[J]. 水利经济,2012,30(3):26-30. (ZHANG Faming, GONG Zheng, CHEN Guoping, et al. Design standards and methods for new type reclamation dykes[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2012,30(3):26-30. (in Chinese))
[12] 丁贤荣,康彦彦,葛小平,等. 辐射沙脊群条子泥动力地貌演变遥感分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(2):231-236. (DING Xianrong, KANG Yanyan, GE Xiaoping, et al. Tidal flat evolution analysis using remote sensing on Tiaozini flat of the radial sand ridges [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(2):231-236. (in Chinese))

[13] 张长宽,陈君,林康,等. 江苏沿海滩涂围垦空间布局研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(2):206-212. (ZHANG Changkuan, CHEN Jun, LIN Kang, et al. Spatial layout of reclamation of coastal tidal flats in Jiangsu Province[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(2):206-212. (in Chinese))
[14] 陶建峰,张长宽,姚静. 江苏沿海大规模围垦对近海潮汐潮流的影响[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(2):225-230. (TAO Jianfeng, ZHANG Changkuan, YAO Jing. Effect of large-scale reclamation of tidal flats on tides and tidal currents in offshore areas of Jiangsu Province [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(2):225-230. (in Chinese))

[15] JTJ 213—1998 海港水文规范[S].

(收稿日期:2012-07-16 编辑:骆超)