

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2012.04.006

水库下游河道水温沿程分布的解析解及与其他方法的比较

刘军英¹, 贾更华², 韩龙喜¹, 李小虎³, 孙 娟¹

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 水利部太湖流域管理局, 上海 200434;
3. 江苏省环境科学研究院, 江苏 南京 210036)

摘要 :在考虑沿流向的温度梯度、假设河流水面热交换通量沿程恒定的基础上,根据河道一维水温控制方程推导出解析解,并与国内常用的一种河道水温计算解析解的简化解法作了较详细的对比。结果表明,基于热交换通量沿程恒定的解析解具有较高的精度,能较好地模拟水库下游河道水温复温过程。以安徽白莲崖水库为例,在预测白莲崖水库水温结构的基础上,利用推导的解析解对白莲崖水库下游河道水温沿程分布进行了预测,并分析了水库下游河道水温对周围环境的影响:白莲崖水库下游河道长期处于低温环境,河水不适于浇灌两岸的农作物,对鱼类生长、繁殖也产生一定的不利影响,需将其他温度适宜的水源输至农田进行灌溉,适合鱼类生长、产卵的场所将向下游推移。
关键词 :白莲崖水库;下游河道;水温计算;一维水温控制方程

中图分类号 :P333.9 文献标识码 :A 文章编号 :1004-6933(2012)04-0028-05

Analytical solution of water temperature distribution in river downstream of reservoir and comparison with another method

LIU Jun-ying¹, JIA Geng-hua², HAN Long-xi¹, LI Xiao-hu³, SUN Juan¹

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Taihu Basin Authority of the Ministry of Water Resources, Shanghai 200434, China;
3. Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China)

Abstract : With consideration of the temperature gradient in the flow direction, an analytical solution was deduced using a one-dimensional water temperature control equation, based on the assumption that the heat exchange over a unit surface area is constant along the river. This method was compared in detail with a simplified model for computing river temperature, which is commonly used in China. The results show that the deduced analytical solution had high accuracy, and could well simulate the temperature recovery process in the river downstream of the reservoir. A case study was conducted in the Bailianya Reservoir. Based on prediction of the water temperature structure of the Bailianya Reservoir, the deduced analytical solution was used to predict the water temperature distribution in the lower reach of the Bailianya Reservoir, and the influences of the water temperature distribution on the reservoir's surrounding environment were analyzed. There has been a low temperature in the lower reach of the Bailianya Reservoir, where the water is unsuitable for irrigation of crops on both banks and for growth and propagation of fish. It is necessary to transfer suitable water to the croplands for irrigation. The region that is suitable for growth and propagation of fish needs to be moved downstream.

Key words : Bailianya Reservoir; downstream river; water temperature calculation; 1D water temperature control equation

随着河流上高库大坝的建成运行,水库下泄水温明显地改变了下游河道的水温沿程分布,使下游

河道夏季水温低于天然河道水温,冬季水温高于天然河道水温,对河流水生生物种群的多样性产生了

基金项目 水利部公益性行业科研专项经费项目(201001028)

作者简介 刘军英(1986—),女,硕士研究生,研究方向为环境水力学研究。E-mail: fantaistic@163.com

通讯作者 韩龙喜 教授。E-mail: hanlongxi@sina.com

深远影响。研究水库下游河道水温沿程分布具有重要意义,可为水电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。

在无水库下泄水温实测资料的情况下,须模拟水库库区温度场,以获得水库下泄预测水温,用以计算水库下游河道的水温沿程分布。目前较成熟的水库水温模型有垂向一维水温模型、纵向一维水温模型、立面二维水温模型和三维湖泊水库水温模型^[1],这些模型在实际工程中得到了广泛运用。余洋等^[2]结合混合模型和扩散模型,建立垂向一维水温数值模型来研究亭子口水库库区及下泄水温的时空变化规律,梁瑞峰等^[3]利用宽度平均的立面二维水库水温模型研究了小调节能力水库的水温结构;王冠等^[4]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,利用水库物理模型的试验数据对其进行验证,并将其应用于某拟建水库的温度场模拟;马方凯等^[5]基于三维不可压缩流动的 N-S 方程建立了水库水流水温模型,对三峡水库近坝区三维流场及温度场进行数值模拟。

计算水库下游河道水温沿程分布的方法大致可分为两类:经验法和数学模型法。经验法从实践经验中总结而来,计算简单,但精度较差,只适用于某些特殊情况;数学模型法通过分析影响水温的主要因素,由热量、质量平衡原理建立数学模型,具有一定的普遍性,精度较高,但计算较为复杂^[6]。数学模型法又分为数值模型法和简化模型法两类。一般情况下,用数值方法求解的数学模型法称为数值模型法。为解决数学模型计算的复杂性、精确性及普遍性的矛盾,对数学模型进行简化处理,由数学模型求得解析解。这种由解析解求解的方法称为简化模型法,亦称解析解法。解析解法集合了经验法和数值模型法的优点,计算简单且精度较高,而对数学模型采用不同的简化解法可求得不同的解析解。欧辉明等^[7-8]运用一种解析解分别计算了百色水利枢纽和穆阳溪梯级水库坝下河道的水温沿程分布,预测效果较好。文献[9]采用非线性项线性化的简化解法对一维水温控制方程进行简化,并将简化所解得的解析解运用于梅山水库坝下河流水温的计算,计算精度较高。

通过研究前人的数学模型简化解法,发现多数文献在对数学模型进行简化时忽略了沿流向的温度梯度的影响,因此,本文采用考虑沿流向的温度梯度、假设河流水面热交换通量沿程恒定的简化解法,以白莲崖水库为例,对河道一维水温控制方程进行简化求得解析解(以下简称“解析解 I”),利用解析解 I 对白莲崖水库下游河道水温沿程分布进行预测,分析白莲崖水库下游河道水温对周围环境的影

响,并对解析解 I 与文献[9]解析解的计算精度进行对比分析。

1 水库下游河道水温影响因素

引起河道水温变化的因素有:水体表面(水、气界面)的热交换,水体与河床之间的热交换,水体内部产生的热、降水及各支流天然来水的热交换,以及人为的加热和减热^[10]。水库下游河道水温主要受水库下泄水温及河道水体表面热交换的影响,水库下泄水温直接决定下游河道的基础水温,由于水体表面热交换效应,水库下游河水在流动过程中逐渐复温,水温最终趋于平衡。

水体表面热交换通量^[11] φ_n 与水体所处的地理位置(经、纬度)、水文水流特性(降雨特性、水深、水体透明度、水表面温度)、气象条件(风速、云量、气温、露点温度)等有关,能较精确地反映河道水温受外部环境的实际影响。 φ_n 包括辐射(净太阳短波辐射 φ_{sn} 、净大气长波辐射 φ_{an} 、水体长波的返回辐射 φ_{br})、水面蒸发热损失 φ_e 及热传导通量 φ_c 3部分,可表示为

$$\varphi_n = \varphi_{sn} + \varphi_{an} - \varphi_{br} - \varphi_e - \varphi_c \quad (1)$$

a. 净太阳短波辐射 φ_{sn} 。太阳短波辐射在进入水体的过程中,除很少部分被水面反射外,绝大部分短波辐射被水体吸收。 φ_{sn} 的表达式为

$$\varphi_{sn} = \beta_1 \varphi_s (1 - \gamma) \quad (2)$$

式中: β_1 为太阳辐射的水体表面吸收率; φ_s 为晴天到达地面的太阳短波辐射, W/m^2 ; γ 为水面反射率。

b. 净大气长波辐射 φ_{an} 。大气吸收的太阳能以长波形式向地面发射,其长波辐射强度取决于气温和云量,可用 Stefan-Boltzman 定律计算:

$$\varphi_{an} = (1 - \gamma_a) \sigma \epsilon_a (273 + T_a)^4 \quad (3)$$

其中

$$\epsilon_a = (1 + KC^2) [1 - 0.261 \exp(-0.74 \times 10^{-4} T_a^2)] \quad (4)$$

式中: γ_a 为长波反射率; σ 为 Stefan-Boltzman 常数,通常取值为 $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$; ϵ_a 为大气发射率; T_a 为水面以上 2 m 处的气温, $^{\circ}C$; K 为与云层高度有关的系数,一般取值为 0.017; C 为云量 %。

c. 水体长波的返回辐射 φ_{br} 。水体吸收的大气长波辐射会向大气进行返回辐射,其表达式为

$$\varphi_{br} = \sigma \epsilon_w (273 + T_s)^4 \quad (5)$$

式中: ϵ_w 为水体的长波发射率; T_s 为水体表面温度, $^{\circ}C$ 。

d. 水体由于蒸发而损失的热量 φ_e 。水体由于蒸发而损失的热量可根据下式计算:

$$\varphi_e = (9.2 + 0.46W_z^2)(e_s - e_a) \quad (6)$$

式中: W_z 是水面以上 10m 处的风速; e_s 为相应于水面温度 T_s 的紧靠水面的空气饱和蒸发压力, mmHg; e_a 为水面上空气的蒸发压力, mmHg。

e. 热传导通量 φ_c 。当水体表层水温与气温有温差时, 水气界面上会通过传导进行热交换, φ_c 表达式为

$$\varphi_c = 0.4(9.2 + 0.46W_z^2)(T_s - T_a) \quad (7)$$

2 河流一维水温控制方程

水库下游河道水流湍急, 水深一般不大, 水温在横断面上分布基本均匀, 因此, 一般一维水温模型即可较好地模拟下游河道的水温沿程分布。河流一维水温控制方程是在对微分河段建立水量平衡连续性关系及热量平衡关系的基础上得到的, 公式为

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(QT)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{B\varphi_n}{\rho C_p} \quad (8)$$

式中: T 为接纳水体水温, $^{\circ}\text{C}$; t 为时间, s ; x 为距水库大坝的距离, m ; Q 为流量, m^3/s ; E_x 为纵向分散系数, m^2/s ; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; C_p 为水的比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; A 为过水断面面积, m^2 ; B 为水面宽度, m ; φ_n 为水体表面热交换通量, W/m^2 。

3 基于水面热交换通量恒定的解析解 I

在水库下游河道无支流汇入的情况下, 对式(8)进行简化, 本文假设: ①水库下游河道水流恒定; ②河道水温的影响因素只有水体表面热交换。河道沿程水温对 φ_n 有一定影响, 但影响较小, 这里假设 φ_n 沿程恒定; ③河道上游入流边界条件为 $T(0, t) = T_0$, 即上游入流水温为水库下泄水温; ④下游出流边界条件为 $\frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = 0$ (L 为模拟河道长度, m), 即河道下游出流边界水温趋于稳定。

根据假设, 水流恒定的情况下, 式(8)中 $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$, 又由于假设 φ_n 沿程恒定, 则式(8)右边的第二项恒定, 同时考虑沿流向的温度梯度, 则式(8)可变为

$$\frac{\partial(QT)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{B\varphi_n}{\rho C_p} \quad (9)$$

根据边界条件可由式(9)推得解析解 I 如下(具体推导过程略):

$$T = T_0 + \frac{B\varphi_n AE_x}{C_p \rho Q^2} e^{-\frac{Q}{AE_x} L} - \frac{B\varphi_n AE_x}{C_p \rho Q^2} e^{-\frac{Q}{AE_x} L} e^{\frac{Q}{AE_x} x} + \frac{B\varphi_n}{\rho C_p Q} \quad (10)$$

式中: T_0 为河道上游边界入流水温, $^{\circ}\text{C}$ 。

4 与文献 9 解析解的比较

文献 9 利用数值模型法对文献 9 解析解的精度进行分析, 结果表明, 文献 9 解析解的精度较高, 满足计算精度要求。本文推导的基于水面热交换通量恒定的解析解 I 与文献 9 解析解的精度对比, 在理论上都具有很高的可信性。

4.1 文献 9 解析解

文献 9 解析解的模型简化求解过程如下:

对某一无支流汇入河段, 假设: ①气象条件是相同的; ②水流为恒定流, 且没有汇分流情况; ③水温在断面上是均匀的; ④河段的断面形状及水力特性沿流向方向不变。根据假设, 水流恒定的情况下, 式(8)中 $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$, 又由于沿水流方向温度梯度小, 可忽略式(8)右边第一项, 则式(8)变为

$$\frac{\partial(QT)}{\partial x} = \frac{B\varphi_n}{\rho C_p} \quad (11)$$

文献 9 针对式(11)为水温的非线性函数而造成模型不能直接求解析解的原因, 提出对非线性项线性化的简化解法, 得出简化项为: ①水体长波的返回辐射 $\varphi_{br} = A_0 + B_0 T$ (A_0 、 B_0 为常数, 取值见文献[9]); ②蒸发热损失计算公式中的汽化潜热: $q + C_s T \approx q$, 且 $E_w = C_0 + D_0 T$ (q 为汽化潜热, J/kg ; C_s 为波温常数, 波温常数在 0.58 ~ 0.66 之间变化, 通常取值 0.61; E_w 为对应于水面温度的空气饱和水汽压, Pa ; C_0 和 D_0 为常数, 取值见文献[9])。根据上述条件, 可由式(11)推得文献 9 解析解为

$$T = T_0 + (T_e - T_0) \left(1 - e^{-\frac{NB}{Q} x} \right) \quad (12)$$

其中: $T_e = \frac{M}{N}$ (13)

$$N = \frac{B_0 + q(9.2 + 0.46W_z^2)(0.00061P_a + D_0)}{86400\rho C_p} \quad (14)$$

$$M = \frac{\varphi_{sn} + \varphi_{an} - A_0 + q(9.2 + 0.46W_z^2)(E_w + 0.00061P_a T_a - C_0)}{86400\rho C_p} \quad (15)$$

式中: T_e 为平衡水温, $^{\circ}\text{C}$; P_a 为大气压, Pa 。

4.2 两者比较

解析解 I 与文献 9 解析解在模型简化求解过程中既有相同点又有不同点。①相同点: 两种方法都是在水库下游河道无支流汇入、假设水流恒定的情况下, 只考虑水温在流向上变化推导而得。②不同点: 解析解 I 考虑了河流水温沿流向的温度梯度的影响, 是基于假设水体表面热交换通量沿程恒定、根据河流一维水温控制方程推导而得, 简化解法考虑了水温在河流纵向上的扩散作用而忽略了热交换

通量随水温的变化而变化,而文献[9]解析解是基于忽略沿流向的温度梯度、对非线性项线性化而得,简化解法忽略了水温的纵向扩散作用而考虑了热交换通量随水温的变化而变化,并把热交换通量中的非线性项线性化。

5 案例应用

5.1 项目概况

白莲崖水库地理位置为东经 $116^{\circ}10'$,北纬 $31^{\circ}16'$,位于安徽省大别山区霍山县境内,东涘河佛子岭水库上游西支漫水河上,其坝址距已建佛子岭水库大坝 26 km,距下游霍山县城 43 km,距涘河入淮河口 189 km,控制流域面积 745 km^2 ,总库容 4.60 亿 m^3 。水库正常蓄水位 209 m,汛限水位 205 m,死水位 180 m。发电站厂房位于背阴山北侧佛子岭水库库尾右岸,尾水平台位于主厂房下游侧,发电尾水将直接进入佛子岭水库库尾。水库建成后不仅具有使下游佛子岭水库现在四百年一遇的防洪能力提高到五千年一遇,还具有为淮河干流滞洪、错峰,减少下游涘河洪水、洪涝灾害等主要防洪功能。另外,白莲崖水库建成后可以使涘河灌区在 2015 年达到设计灌溉面积 44 万 hm^2 ,灌溉保证率达到设计保证率 80%,并满足下游城镇特别是合肥市的供水要求。

5.2 参数确定

a. 水库类型、代表月及河道预测长度等参数。白莲崖水库多年平均年径流量为 6.46 亿 m^3 ,水库总库容为 4.51 亿 m^3 。根据 α 指数法^[12],判断白莲

表 2 利用解析解 I 与文献[9]解析解分别计算不同月份水库下游河道水温的结果对比

距离/m	1月水温/ $^{\circ}\text{C}$			4月水温/ $^{\circ}\text{C}$			7月水温/ $^{\circ}\text{C}$			10月水温/ $^{\circ}\text{C}$		
	解析解 I	文献[9]解析解	差值	解析解 I	文献[9]解析解	差值	解析解 I	文献[9]解析解	差值	解析解 I	文献[9]解析解	差值
0	8.40	8.40	0	13.60	13.60	0	11.30	11.30	0	12.70	12.70	0
1000	8.03	7.89	0.14	13.58	13.47	0.11	12.41	12.56	-0.15	12.62	12.65	-0.04
2000	7.66	7.41	0.25	13.57	13.35	0.21	13.51	13.70	-0.20	12.54	12.61	-0.08
3000	7.30	6.98	0.32	13.55	13.25	0.30	14.59	14.75	-0.16	12.46	12.57	-0.12
4000	6.97	6.59	0.38	13.53	13.15	0.38	15.58	15.70	-0.12	12.38	12.54	-0.15
5000	6.72	6.22	0.50	13.52	13.06	0.46	16.33	16.57	-0.24	12.33	12.50	-0.18
5500	6.67	6.05	0.62	13.52	13.02	0.50	16.47	16.97	-0.50	12.32	12.49	-0.17

表 3 利用解析解 I 与文献[9]解析解分别计算不同月份水库下游河道水温增温量的结果对比

距离/m	1月				7月			
	解析解 I		文献[9]解析解		解析解 I		文献[9]解析解	
	水温/ $^{\circ}\text{C}$	增温量/ $^{\circ}\text{C}$	水温/ $^{\circ}\text{C}$	增温量/ $^{\circ}\text{C}$	水温/ $^{\circ}\text{C}$	增温量/ $^{\circ}\text{C}$	水温/ $^{\circ}\text{C}$	增温量/ $^{\circ}\text{C}$
0	8.40	0	8.40	0	11.30	0	11.30	0
1000	8.03	-0.37	7.89	-0.51	12.41	1.11	12.56	1.26
2000	7.66	-0.37	7.41	-0.47	13.51	1.10	13.70	1.15
3000	7.30	-0.36	6.98	-0.43	14.59	1.08	14.75	1.04
4000	6.97	-0.33	6.59	-0.40	15.58	1.00	15.70	0.95
5000	6.72	-0.25	6.22	-0.36	16.33	0.75	16.57	0.87
5500	6.67	-0.05	6.05	-0.17	16.47	0.14	16.97	0.40

崖水库属于水温分层型水库。为使以年为周期的计算结果具有代表性,选取 1 月、4 月、7 月和 10 月为代表月进行计算。白莲崖水库下游河道在 5.5 km 处进入佛子岭水库,选取河道预测长度为 5.5 km。该河段为山区峡谷型河道,河底宽 20 m,河底高程 130 m,河道边坡系数为 3。

b. 下泄水温的确定。由于发电站地理位置的原因,白莲崖水库发电尾水将直接排入下游的佛子岭水库库尾,因此本文的水库下泄水不考虑发电尾水。由于白莲崖水库无下泄水温实测资料,本文采用东北勘测设计研究院法^[13]利用垂向一维水温模型计算的白莲崖水库水温垂向分布数据,并估得 1 月、4 月、7 月和 10 月下泄水温分别为 8.4°C 、 13.6°C 、 11.3°C 、 12.7°C 。

c. E_x 、 φ_n 的确定。 E_x 与水流流速、水面宽度成正比,与水深成反比,可采用经验公式^[14]进行计算,根据式(1)计算 φ_n 的值,计算所需的部分基础资料见表 1。

表 1 白莲崖水库下游河道基础资料

月份	水面以上 10 m 处风速 $W_z/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	云量 $C/\%$	太阳短波辐射 $\varphi_s/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	水面温度 $T_s/^{\circ}\text{C}$	露点温度 $T_d/^{\circ}\text{C}$	水面以上 2 m 处气温 $T_a/^{\circ}\text{C}$
1	2.3	0.65	89.2	4.5	-1.5	2.0
4	2.4	0.74	149.8	15.5	11.1	15.4
7	2.5	0.71	231.0	24.3	23.6	27.8
10	2.2	0.64	135.4	16.0	11.4	15.6

5.3 计算结果对比

以白莲崖水库为应用案例,运用解析解 I 与文献[9]解析解分别计算白莲崖水库下游河道水温沿程分布,计算结果见表 2 和表 3。经分析可得以下结论:

a. 基于水面热交换通量恒定的解析解 I 同样具有较高的计算精度。文献 9 已验证文献 9 解析解的精度较高,解析解 I 的计算精度与之对比在理论上也具有可信度。从表 2 可见,河道预测长度内,在 4 个代表月中,解析解 I 与文献 9 解析解的计算结果最小差值为 0.04°C ,最大差值为 0.62°C ,两种方法的精度非常接近,因此,解析解 I 同样具有较高的精度,能满足河道水温预测预报的技术要求。

b. 利用解析解 I 计算的下游河道水温沿程分布符合水库下游河道河水的复温过程。分层型水库下泄水温一般夏季低于天然河道水温,冬季高于天然河道水温,水库下泄水进入下游河道后,与大气、河床等进行热交换,河水逐渐复温,增(降)温量逐渐减小,最终趋于一种平衡水温,此即为水库下泄水温在下游河道中的复温过程。从表 3 可见,1 月,利用解析解 I 与利用文献 9 解析解计算出的水温沿程降温量均逐渐减小,逐渐趋于降温量为 0°C 的状态;7 月,利用解析解 I 与利用文献 9 解析解计算出的水温沿程增温量均逐渐减小,逐渐趋于增温量为 0°C 的状态,与冬季、夏季水库下游河道河水的复温过程相符。

5.4 水库下泄水温对下游环境的影响

安徽省位于长江以南,主要农作物为水稻。研究表明,适宜水稻生长的灌溉水温约为 $30\sim 34^{\circ}\text{C}$,若灌溉水温低于 $25\sim 21^{\circ}\text{C}$,水稻就有明显的受害现象,特别是在成活期和分蘖期^[5]。水稻的生长期主要是夏季。从表 2 可以看出,白莲崖水库下游河道 4 月、7 月的水温分别低于 14°C 和 17°C ,白莲崖水库下游河道的水不适于用来浇灌农作物,需采用其他温度适宜的水源输至农田进行灌溉。水温也是影响鱼类生长的重要因素,当水温小于 14°C 时,鲢、鳙鱼摄食量很少,处于生长停滞期;水温在 $14\sim 23^{\circ}\text{C}$ 之间时,鲢、鳙鱼摄食量增大,鱼体重量缓慢增加,处于缓慢生长期;水温在 $24\sim 32^{\circ}\text{C}$ 之间时,鲢、鳙鱼新陈代谢增强,摄食旺盛,生长加快,处于快速生长期^[13]。春、夏季为鱼类生长、繁殖的黄金时期,受下泄水温的影响,白莲崖水库下游河道长期处于低温环境中,对鱼类生长、繁殖不利,因此,适合鱼类生长、产卵的场所可能将向下游推移。

6 结 论

基于水面热交换通量恒定、由河流一维水温控制方程推得的解析解 I 具有较高的计算精度,能满足河道水温预测预报的技术要求,能很好地模拟水

库下游河道水温复温过程,较精确地反映水库下游河道水温受外部环境的实际影响,适用于水库下游河道及电站温排水一维河道的水温沿程分布计算。

根据基于水面热交换通量恒定的解析解 I 对白莲崖水库下游河道水温分布进行模拟,结果表明,受水库下泄水的影响,白莲崖水库下游河道长期处于低温环境,4 月、7 月水温分别低于 14°C 、 17°C ,河水不适于浇灌两岸的农作物,需采用其他温度适宜的水源输至农田进行灌溉;低温的白莲崖水库下游河道对鱼类生长、繁殖也产生一定的不利影响,适合鱼类生长、产卵的场所将向下游推移。

参考文献:

- [1] 郝红升,李克锋,梁瑞峰,等.支流影响下的水库水温预测模型[J].水利水电科技进展,2006,26(5):7-10.
- [2] 余洋,彭虹,张万顺,等.亭子口水库垂向一维水温模型研究[J].人民长江,2009,40(20):24-27.
- [3] 梁瑞峰,李嘉,李克锋,等.小调节能力水库的水温结构[J].水利水电科技进展,2008,28(1):34-36.
- [4] 王冠,韩龙喜,常文婷.基于立面二维水动力-水温耦合模型的水库水温分布[J].水资源保护,2009,25(2):59-63.
- [5] 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].水利水电科技进展,2007,27(3):17-20.
- [6] 庄春义.河道一维非恒定流水温预测模型研究[D].成都:四川大学,2005.
- [7] 欧辉明.百色水利枢纽水库水温结构分析[J].广西水利水电,2001(3):13-15.
- [8] 陈辉.穆阳溪梯级水库低温水结构分析[J].水电站设计,1999,15(3):79-81.
- [9] 刘少文.一种河流水温计算公式[J].武汉水利电力学院学报,1991,24(1):49-58.
- [10] 刘中峰.纵向一维水温模型研究[J].吉林水利,2010(2):14-16.
- [11] 余常昭,马尔柯夫斯基,李玉梁.水环境中污染物扩散输移原理与水质模型[M].北京:中国环境科学出版社,1989:175-191.
- [12] 张大发.水库水温分析及估算[J].水文,1984(1):19-26.
- [13] 杨学倩,朱岳明.水库水温计算方法综述[J].人民黄河,2009,31(1):41-42.
- [14] 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.
- [15] 夏长庚.日本灌溉用水的水温和水质标准[J].水利水电技术,1980(2):61-64.

(收稿日期 2011-04-27 编辑 彭桃英)