

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.02.005

刘小龙, 施勇, 陈炼钢, 等. 基于水文学与水力学方法的雅砻江水情预报模型[J]. 水利水运工程学报, 2015(2): 33-37. (LIU Xiao-long, SHI Yong, CHEN Lian-gang, et al. A study of an extensive river forecasting model for Yalong River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(2): 33-37.)

基于水文学与水力学方法的雅砻江水情预报模型

刘小龙^{1,2}, 施勇², 陈炼钢², 栾震宇², 虞美秀^{1,2}

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要:以雅砻江官地水库至河口为对象,建立一个基于水文学与水力学方法相耦合的水情预报模型。其中,官地水库出流作为模型入流边界,官地水库至二滩水库河道汇流采用马斯京根河道演算法模拟;官地水库至二滩水库区间入流采用基于栅格的新安江模型模拟,以使模拟结果具有一定的预见期;二滩水库按水库调度规则计算水库出流;二滩水库至河口对完全圣维南方程组采用一维非恒定流隐式差分求解,模拟出沿河道任意断面水情过程,从而使具有预见期的水文预报成果沿河道方向得到了延伸,实现了对二滩水库至河口段水情的精准预报和过程控制。采用2007—2009年日系列资料对模型进行严格的率定与验证后发现,小得石站最高水位的绝对误差均小于0.3 m,桐子林站最大流量的相对误差均小于10%,日模拟的确定性系数均高于0.989,高精度的模拟结果证实了模型的合理性和有效性。

关键词:水情预报;新安江模型;非恒定流;雅砻江

中图分类号: P333

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2015)02-0033-05

雅砻江是金沙江第一大支流,水量丰沛、落差巨大且集中,干支流蕴藏水能资源丰富。从河源至河口,干流全长1 571 km,流域面积约13.6万 km²,天然落差3 830 m,干流共规划了21级水电站,雅砻江两河口、锦屏一级、二滩为控制性水库工程,总调节库容148.4亿 m³,具有多年调节功能。在全国规划的十三大水电基地中,雅砻江排列第三。

在二滩水电站设计与运行期间,水利工作者针对二滩电站水库入流做了大量的降雨径流模拟,以水文模型为主,并达到了较高的精度,但二滩至河口段模拟精度一般^[1-7]。中水科技建设的雅砻江水情自动测报系统已正式验收,可为雅砻江各梯级电站施工期安全度汛和运行期水库调度打下坚实基础^[8],然而对于整个雅砻江流域而言缺乏水力学模型。

在雅砻江流域现有的水文模型基础上,构建以基于栅格的分布式新安江模型与水动力模型相耦合的水情预报模型,为数字雅砻江的建设提供重要的技术支撑,为水联网多水源实时调度与过程控制技术课题研究提供技术与方法参考。

1 模型与算法

模型研究的范围为雅砻江官地水库至河口,包括雅砻江干流、主要支流以及官地、二滩、桐子林(在建)3个水电站。根据研究区域的水文测站和水电站空间分布,模型的基本结构设置及所采用的算法如下:官地水库出流作为上游来流,采用马斯京根法演算至二滩坝址;官地水库—二滩水库的区间入流由基于栅格的新安江模型计算;二滩水库按相应调度规则进行调算;二滩水库—河口采用一维水力学模型模拟。

收稿日期: 2014-05-21

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2013BAB05B03, 2012BAB04B04, 2013BAB12B03)

作者简介: 刘小龙(1989-),男,陕西渭南人,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: liuxiaolong125@126.com

1.1 基于栅格的分布式新安江模型

官地水库至二滩水库区间干流长 145 km, 面积为 6 373 km², 主要支流有平川河、树瓦河、藤桥河、鳧鱼河等 4 条河流。区间入流由打罗水文站控制。研究缺乏蒸发量资料, 收集到的 3 个蒸发量站(石龙坝、列瓦、桐子林)均在区域外; 18 个降水量站中 6 个在区域内, 12 个在区域外, 蒸发量、降水量测站分布见图 1。

在官地水库至二滩水库区间构建基于栅格的新安江模型, 尺度为日径流模拟^[9]。模型将逐个栅格作为 1 个计算单元, 蒸散发计算、产流计算及分水源计算分别采用新安江计算原理的三层蒸散发模型、蓄满产流模型及采用自由水蓄水库结构进行水源划分, 再计算出每个栅格上的张力水蓄水容量与自由水蓄水容量, 得到每一个栅格单元的产流量和地表、壤中、地下 3 种水源, 然后根据栅格演算次序矩阵, 将每一个栅格上的地表径流、壤中流按照马斯京根法逐栅格演算至流域出口, 地下径流则采用新安江模型中线性水库的方法演算至流域出口^[10]。在进行栅格演算时, 如果当前栅格的土壤含水量未达到饱和, 则上游栅格的出流量首先补充当前栅格的土壤含水量; 如果当前栅格有河道存在, 属于河道栅格, 则地表径流、壤中流将按比例把部分流量汇入河道中。

1.2 二滩水库至河口的一维非恒定流水力学模型

二滩水库至河口段干流长 33 km, 干流河道有小得石、桐子林 2 个水文站; 主要支流为安宁河, 湾滩站为出流控制站点; 河口处径流资料可由金沙江攀枝花、三堆子两站进行控制。将研究区间概化为单一河道, 从三滩大桥—河口共有 18 个实测河道大断面和 3 个概化地形断面(见图 2)。

模型采用圣维南方程组描述一维河道水流运动:

$$\begin{cases} B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{|Q|Q}{K^2} = qV_x \end{cases} \quad (1)$$

式中: x, t 分别为距离和时间; Z, Q, A, B 分别为水位、流量、过水面积、水面宽度; α 为动量修正系数; K 为流量模数; q 为旁侧入流, 入流为正, 出流为负; V_x 为入流沿水流方向的速度。

采用 Preissmann 四点隐式差分格式离散式, 整理可得如下代数方程组:

$$\begin{cases} -Q_i^{n+1} + C_i Z_i^{n+1} + Q_{i+1}^{n+1} + C_i Z_{i+1}^{n+1} = D_i \\ E_i Q_i^{n+1} - F_i Z_i^{n+1} + G_i Q_{i+1}^{n+1} + F_i Z_{i+1}^{n+1} = \Phi_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: $C_i, D_i, E_i, F_i, G_i, \Phi_i$ 均为系数, 可由水位和流量的已知值 Z_i 和 Q_i 计算。

结合上、下边界条件可构成一个封闭的代数方程组, 利用双扫描法求解该方程组, 可得所需任意断面的水位和流量^[11]。

2 模型率定与验证

为了验证模型的基本算法和数值处理的合理性和有效性, 采用 2007—2009 年 3 年逐日实测流量资料对



图 1 研究区域蒸发量、降水量测站分布

Fig. 1 Distribution of evaporation and precipitation stations in the study area

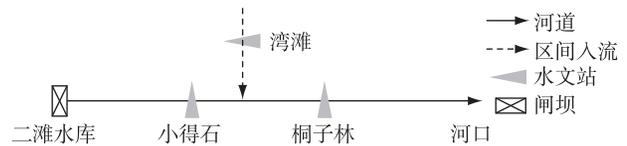


图 2 二滩水库—河口概化图

Fig. 2 Generalized channel from Ertan reservoir to estuary

模型进行严格的率定和检验, 下面概述率定检验的主要结果。

2.1 水文模型参数率定

由于掌握的水文资料系列长度远不能满足分布式水文模型参数率定的要求, 故本文改建的水文模型不做参数率定, 直接采用陈科和陈克昌等^[3-4] 研究中率定的参数(见表 1)。

表 1 官地水库至二滩水库综合参数

Tab. 1 Parameter values for daily simulation of the Xinanjiang model from Guandi reservoir to Ertan reservoir region

参数符号	参数意义	数值	参数符号	参数意义	数值
<i>K</i>	蒸散发能力折算系数	0.57	<i>EX</i>	表层自由水蓄水容量曲线方次	1.50
<i>WM</i>	张力水容量 (mm)	120	<i>KG</i>	地下水出水系数	0.06
<i>WUM</i>	上层张力水容量 (mm)	20	<i>KI</i>	壤中流出水系数	0.12
<i>WLM</i>	下层张力水容量 (mm)	60	<i>CI</i>	壤中流汇流系数	0.97
<i>B</i>	蓄水容量曲线方次	0.40	<i>CG</i>	地下水汇流系数	0.99
<i>C</i>	深层蒸发系数	0.25	<i>CS</i>	地表水汇流系数	0.80
<i>IMP</i>	不透水面积比例	0.01	<i>KE</i>	马斯京根法演算参数(稳定流时河段传播时间)	2.50
<i>SM</i>	表层自由水蓄水容量 (mm)	45	<i>XE</i>	马斯京根法演算参数(流量比重因素)	0.46

2.2 水力学模型参数率定

二滩水库至河口水力学模型参数率定主要包括初始条件的修正和粗糙系数的率定。粗糙系数的率定又包括流量分级的试错与分级粗糙系数的率定两部分。采用 2007 年打罗、小得石、湾滩、桐子林、攀枝花、三堆子等站逐日流量资料对水力学模型进行了率定。率定的粗糙系数平均值为 0.067, 变化范围为 0.038 ~ 0.107, 这与研究区域实地考察情况相符。率定结果表明: 模拟与实测日径流过程, 峰谷相应, 吻合甚好。以小得石水位为例, 计算与实测水位的确定性系数为 0.998 3, 汛期与非汛期洪峰水位率定误差小于 0.15 m (见图 3 与表 2); 以桐子林流量为例, 计算流量与实测流量的确定性系数为 0.989 1, 洪峰流量率定的相对误差小于 10% (见图 4 与表 2)。

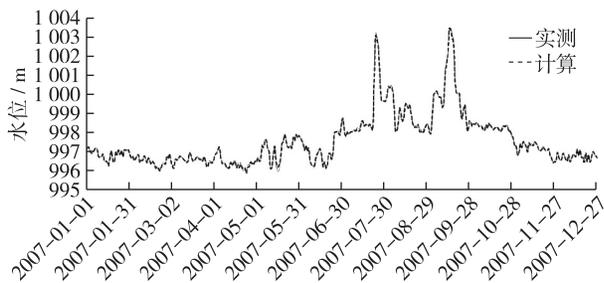


图 3 2007 年小得石站计算与实测水位对比

Fig. 3 Temporal variations of daily simulated/measured water levels at Xiaodeshi station in 2007

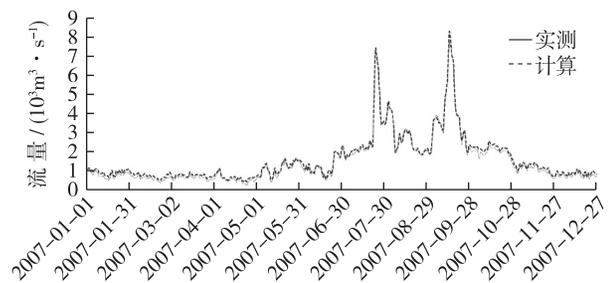


图 4 2007 年桐子林站计算与实测流量对比

Fig. 4 Temporal variations of daily simulated/measured water levels at Tongzilin station in 2007

表 2 二滩水库至河口水力学模型率定与检验结果

Tab. 2 Results of calibration and verification of a hydraulic model for the channel from Ertan reservoir to estuary

年份	时期	误差	
		小得石最高水位/m	桐子林最大流量/%
2007 年(率定期)	汛期	-0.11	6.6
	非汛期	-0.01	4.0
2008 年(验证期)	汛期	-0.27	2.6
	非汛期	-0.15	4.5
2009 年(验证期)	汛期	-0.28	1.1
	非汛期	0.04	6.9

2.3 模型验证

针对已建水情预报模型,利用率定的水文模型参数和流量粗糙系数曲线,以 2008—2009 年实测资料作为模型输入,对模型的适应性、稳定性和有效性进行检验。

2008 年,小得石站计算水位与实测水位确定性系数为 0.996 5,洪峰水位验证误差小于 0.3 m;桐子林站计算流量与实测流量确定性系数为 0.995 3,洪峰流量验证的相对误差小于 5%(见图 5,6 与表 2)。2009 年,小得石站计算水位与实测水位确定性系数为 0.997 5,洪峰水位验证误差小于 0.3 m;桐子林站计算流量与实测流量确定性系数为 0.996 7,洪峰流量验证的相对误差小于 10%(见表 2)。限于篇幅,不列出 2009 年结果图。

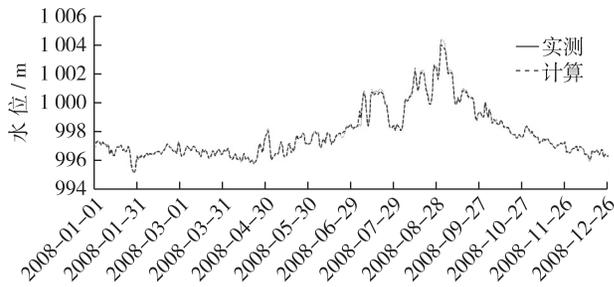


图 5 2008 年小得石站计算与实测水位对比

Fig. 5 Temporal variation of daily simulated/measured water level at Xiaodeshi station in 2008

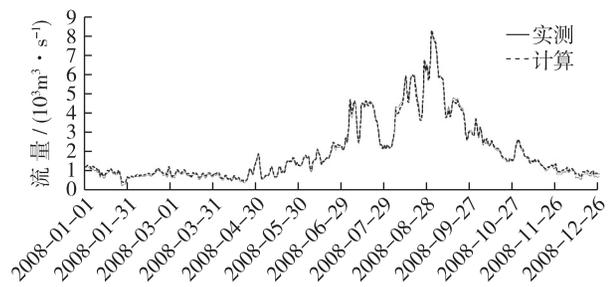


图 6 2008 年桐子林站计算与实测流量对比

Fig. 6 Temporal variation of daily simulated/measured discharges at Tongzilin station in 2008

3 结 语

本文改建了基于水文学与水力学方法相耦合的雅砻江水情预报模型,模型由官地至二滩的马斯京根河道演算、官地至二滩区间入流的产汇流模拟、二滩水库的调度、二滩至河口的河道水力学模拟 4 个模块。该模型集成了水文模型与模型水力学的优点,既有一定的预见期,又能模拟出任意断面水情过程,实现了水文预报成果在空间尺度上(沿河道流向上)的延伸。以实测资料作为二滩至河口水力学模型边界时,不论是汛期还是非汛期,对最高水位、最大流量均具有很高的模拟精度。

参 考 文 献:

- [1] 陶涛. 二滩洪水预报方案的分析与探讨[J]. 四川水力发电, 1994, 13(增 1): 41-46. (TAO Tao. Analysis and discussion of flood forecasting program of Ertan reservoir[J]. Sichuan Water Power, 1994, 13(Suppl1): 41-46. (in Chinese))
- [2] 李幼华, 陈克昌. 二滩水电站施工期洪水预报方法研究——泸宁~小得石河段预报方案[J]. 水电站设计, 1986(1): 45-50. (LI You-hua, CHEN Ke-chang. Research on flood forecasting method in construction period of Ertan hydropower station-Luning~Xiaodeshi river region forecasting program[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1986(1): 45-50. (in Chinese))
- [3] 陈科, 陈国春, 王源, 等. 二滩水电站施工期降雨径流预报方案研究[J]. 水电站设计, 1993(3): 12-17. (CHEN Ke, CHEN Guo-chun, WANG Yuan, et al. Research on rainfall runoff forecasting program in construction period of Ertan hydropower station[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1993(3): 12-17. (in Chinese))
- [4] 陈克昌, 李幼华. 二滩水电站施工期水情预报方案总体布置[J]. 水电站设计, 1993(2): 12-16. (CHEN Ke-chang, LI You-hua. Overall layout of river forecasting program in construction period of Ertan hydropower station [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1993(2): 12-16. (in Chinese))
- [5] 吴世勇, 马光文, 刘媛媛, 等. 二滩水电站日平均流量预测[J]. 水利水电技术, 2005, 36(11): 11-14. (WU Shi-yong, MA Guang-wen, LIU Yuan-yuan, et al. Study on mid-range forecast of runoff for Ertan hydropower station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(11): 11-14. (in Chinese))
- [6] 周惠成, 王峰, 唐国磊, 等. 二滩水电站水库径流描述与优化调度模型研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(1): 18-23.

- (ZHOU Hui-cheng, WANG Feng, TANG Guo-lei, et al. Study on the runoff description and optimal operation models for Ertan hydropower station[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(1): 18-23. (in Chinese))
- [7] 张杨. 二滩水电站中长期径流预报及隐随机优化调度模型研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.(ZHANG Yang. Study on medium and long term runoff forecasting and implicit stochastic optimal operation model for Ertan hydropower station[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [8] 毛学工, 安波, 蹇德平, 等. 雅砻江流域梯级电站水情自动测报系统[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.(MAO Xue-gong, AN Bo, JIAN De-ping, et al. Yalong River automatic hydrological data telemetering and forecasting system[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012. (in Chinese))
- [9] 李致家, 姚成, 章玉霞, 等. 栅格型新安江模型的研究[J]. *水力发电学报*, 2009, 28(2): 25-34.(LI Zhi-jia, YAO Cheng, ZHANG Yu-xia, et al. Study on a grid-based Xinanjiang model[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(2): 25-34. (in Chinese))
- [10] 袁飞, 赵晶晶, 任立良, 等. TRMM 多卫星测雨数据在赣江上游径流模拟中的应用[J]. *天津大学学报: 自然科学与工程技术版*, 2013, 46(7): 611-616. (YUAN Fei, ZHAO Jing-jing, REN Li-liang, et al. Streamflow simulation in the upper Ganjiang River basin using the TRMM multi-satellite precipitation data [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2013, 46(7): 611-616. (in Chinese))
- [11] CUNGE J A, HOLLY F M, VERWEY A. Practical aspects of computational river hydraulics[M]. London: Pitman Advanced Publishing Program, 1980.

A study of an extensive river forecasting model for Yalong River

LIU Xiao-long^{1,2}, SHI Yong², CHEN Lian-gang², LUAN Zhen-yu², YU Mei-xiu^{1,2}

(1. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: River forecasting and tracking is one of key technologies for developing waternet to prompt water utilization efficiency. Taking the region of Guandi reservoir-Ertan reservoir-estuary in the Yalong River basin as a case study site, the authors try to establish a river forecasting model based on the hydrological-hydraulic methods to forecast the water regime on the scales of time and space. In the model constructions, taking outflow of Guandi reservoir as inflow of the region, the Guandi-Ertan reservoir model uses the Muskingum method to route in the river channel and adopts the Xinanjiang model (XAJ model) based on the use of a digital elevation model (DEM) to make the model have a certain foreseeable period; for Ertan reservoir, the authors use its operation rules to get the outflow; and for the channel, from Ertan reservoir to estuary, one-dimension unsteady flow implicit difference scheme solution is adopted to simulate the absolute Saint Venant equations and obtain the hydrological processes of any cross-section along the river channel. So that, the hydrological forecasting results with a certain leading time have been extended on any cross-section of the river channel, and accurate forecasting and process controlling have been realized for the channel from the Ertan reservoir to estuary. The model is calibrated and validated strictly based on the daily hydrological data series from 2007 to 2009. The analysis results of this study show that the model performed very well with the absolute water level error of the Xiaodeshi station less than 0.30 m, the relative error of daily flow obtained from the Tongzilin station less than 10%, and a coefficient of determination higher than 0.989. The findings from this research could provide an essential technical support for the construction of a digital Yalong River, and be used as a valuable technical and methodological reference for real-time regulating and process controlling of multi-water resources of the internet of water.

Key words: river regime forecasting; Xinanjiang model; unsteady flow; Yalong River