

Topmodel 模型在黑河金盆水库流域的应用研究

李抗彬, 沈 冰, 李智录, 冯雨实

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

[摘 要] **【目的】**预测黑河金盆水库的入库流量过程,为水库汛期的安全运行提供理论依据。**【方法】**根据陕西省黑河金盆水库流域水文、气象资料,采用 Topmodel 模型模拟流域的降雨径流过程,以流域内 2003—2007 年雨量站及水文站的实测数据进行模型率定,以 2009 年的实测资料对模型进行检验。**【结果】**Topmodel 模型模拟结果显示,模拟期 Nash 系数平均值为 0.78,洪峰预报误差的平均值为 -10.3% ,峰现时间平均值为 -1 h ;检验期 Nash 系数平均值为 0.875,洪峰预报误差平均值为 11.2% ,峰现时间平均值为 -1 h 。Topmodel 模型在黑河金盆水库流域的预报水平为乙等水平。**【结论】**模型在该流域具有较强的适用性,可以用于金盆水库汛期的入库流量预报,可为水库的安全运行和科学管理提供数据支持。

[关键词] 黑河金盆水库;入库流量预报;Topmodel 模型;地形指数;水文模拟

[中图分类号] P333

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2011)07-0207-05

Applied research of Topmodel in Heihe river Jinpen reservoir catchment

LI Kang-bin, SHEN Bing, LI Zhi-lu, FENG Yu-shi

(Faculty of Water Resources and Hydraulic Power, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: **【Objective】** The study is to forecast the inflow of the Heihe Jinpen reservoir to provide safe operation and management in the flood season. **【Method】** According to the hydrologic and meteorological data of HeiheJinpen reservoir basin in Shaanxi province, the rainfall-runoff of the watershed is simulated with the Topmodel Model. The model is calibrated with the measured data of the rainfall station and the hydrologic station from 2003 to 2007, and tested with that of the 2009. **【Result】** The average Nash coefficient is 0.78, the average error of the prediction flood peak -10.3% and the average time between flood peak -1 h when the model is calibrated; And the average Nash coefficient is 0.875, the average error of the prediction flood peak 11.2% and the average time between flood peak -1 h when the model is tested. The comprehensive evaluation grade of the model is at level B. **【Conclusion】** The model has a strong applicability in this basin and it can be used to predict inflow of the Heihe Jinpen reservoir in flood season, which can provide data for safe operation and scientific management of the reservoir.

Key words: Heihe Jinpen reservoir; inflow forecast; Topmodel; topography index; hydrological simulation

近年来,随着气候的变化,极端天气发生概率急剧增加,山洪灾害频繁发生。加强水库汛期的入库

流量预报,对水库汛期的安全运行和科学管理具有极为重要的作用,同时也是减少灾害、保护水库下游

* [收稿日期] 2010-11-10

[基金项目] 国家自然科学基金重点项目(50939004)

[作者简介] 李抗彬(1981—),男,陕西韩城人,在读博士,主要从事流域水文模拟及水利信息自动化研究。

E-mail: winer891@sina.com

人民生命财产安全的必要手段。Topmodel 模型是 1979 年 Beven 和 Kirkby 提出的一个流域半分布式水文预报模型方法^[1-2], 由于该模型结构简单, 物理参数少, 并且可以利用流域的地形特征, 反映土壤水分的亏缺情况、径流分布规律以及变动产流面积等, 因而受到国内外水文工作者的广泛关注^[3]。从国内外 Topmodel 模型在不同尺度、不同区域和不同气候条件下的流域径流模拟效果来看, 该模型基本上能够取得令人满意的模拟结果^[4]。

本研究根据陕西省西安市黑河金盆水库流域的降雨、径流资料以及流域的 1:50 000 数字高程数据, 采用 Topmodel 模型建立了该流域的入库洪水预报模型, 验证 Topmodel 模型在黑河金盆水库流域的适用性, 以期为汛期金盆水库的安全运行和科学管理提供必要的决策数据。

1 Topmodel 模型简介

1.1 模型的基本原理

Topmodel 模型的基础是变动产流面积的原理。当包气带中的含水量达到饱和含水量, 即满足完全重力排水的含水量时, 土壤中的水均变成自由水而完全在重力的作用下流动。由于垂直排水及流域内的侧向水分运动, 流域部分面积的地下水位抬升至地表面成为饱和面, 产流只发生在这种饱和地表面积(即饱和源面积)上。所有落在饱和源面积上的雨水都将形成直接径流, 而且集中在地下水埋深较浅的地方, 在饱和源面积上形成饱和地表径流。饱和层的出流视为基流。在整个降水过程中, 源面积是不断变化的, 其位置受流域地形和土壤水力特性 2 个因素的影响。在一定意义上, 变动产流面积可看作河道系统的延伸^[5]。

1.2 模型的基本方程及假设^[6-7]

Topmodel 模型通过土壤含水量来确定源面积的大小和位置。土壤缺水量 D 为土壤含水量与饱和含水量之间的差值, $D_i \leq 0$ 的面积即为饱和源面积, 在这些面积上将产生饱和地表径流。缺水量计算方程的推导主要应用了连续方程和达西定律。对一个单元水流带(或变宽度水流带), 连续性方程可根据缺水量 D 的变化由入流与出流之差得到, 即:

$$\alpha \frac{\partial j}{\partial x} - \frac{\partial D}{\partial t} = (i - j). \quad (1)$$

式中: α 为系数, j 为单元面积上的产流, D 为土壤缺水量, x 为沿最陡坡度的曲线水流路径, t 为时间, i 为降雨强度。

模型的基本假定: ①假设饱和地下水的水力坡度近似于地表局部地形坡度 $\tan \beta$ 。②假定土壤的传导度是缺水量的指数递减函数。③假定产流 j (单位面积上的流量) 在空间上均等。根据上述假定可以有:

$$\frac{\bar{D} - D_i}{szm} = \left[\ln \frac{a}{\tan \beta} - \lambda \right] - [\ln T_0 - \ln T_e]. \quad (2)$$

式中: $\bar{D}$ 为平均缺水量; D_i 为第 i 个网格的缺水量; szm 为土壤下渗率呈指数衰减时的速率系数; a 为网格上游的单宽面积; $\tan \beta$ 为表面地形坡度; T_0 为土壤刚达到饱和时的有效下渗率; $\lambda = \frac{1}{A} \times \sum_i A_i \ln \frac{a}{\tan \beta}$, $\ln T_e = \frac{1}{A} \sum_i A_i \ln T_0$, 其中 A_i 为第 i 个网格的上游面积, A 为流域面积。

模型中假定 T_0 在空间上均等, 则式(2)中最后一项消失, 基本方程可变为:

$$\frac{\bar{D} - D_i}{szm} = \ln \frac{a}{\tan \beta} - \lambda. \quad (3)$$

式中: $\ln \frac{a}{\tan \beta}$ 称为地形指数。

1.3 模型的主要参数^[3,8-9]

在 Topmodel 模型中, 采用不同的算法就会有不同的参数序列。如上所述, 除地形指数以外, Topmodel 模型的参数主要有 7 个: szm 为土壤下渗率呈指数衰减时的速率系数(m); $\ln T_0$ 为土壤刚达到饱和时有效下渗率的自然对数的流域均值(m^2/h); Td 为重力排水的时间滞时参数; $SR_{\max}$ 为田间持水量的通量(m); SR_0 为根带土壤饱和和缺水量初值(m), 与 $SR_{\max}$ 成比例; Rv 为地表坡面汇流的有效速度(m/h); Chv 为主河道汇流的有效速度(m/h)(假定为线性汇流), 当将流域作为一个完整的流域来计算时, 不用考虑此参数。

2 Topmodel 模型在金盆水库流域的应用

2.1 流域概况

黑河金盆水库位于陕西省西安市周至县黑峪口境内。黑河流域山川地形界限分明, 黑峪口以上为峪谷山区, 峪口以上集水面积 1 481 km^2 , 河道平均比降为 14.7‰, 河系呈羽毛状, 流域平均宽度为 16.2 km, 支流多集中于右岸, 右岸集水面积为左岸的 3 倍。

流域内植被良好, 黑峪口以上植被覆盖率高达 46.5%, 支流洪水河上游约 95 km^2 为太白山自然保

护区。黑河全流域属暖温带半干燥、半湿润大陆性气候。据水文资料统计,流域多年平均降雨量 823.91 mm。

2.2 资料的收集与整理

黑河金盆水库流域 2003 年前后流域数据雨量遥测站点由原来的 8 个增加到现在的 15 个,其中陈河站为水文站,各站点的分布情况如图 1 所示。流域 2003—2009 年各雨量站点的雨量数据长短不一,陈河水文站 2004、2008 年数据不全。



图 1 黑河金盆水库流域站点分布及子流域的划分
Fig.1 Heihe Jinpen reservoir station distribution and sub-basin divide

通过对流域各站点水文数据进行整理及比较分析,共整理出 14 场降雨洪水过程实测资料。对于陈河水文站的流量数据资料,采用线性插值方法将数据序列按 1 h 的步长进行整理。对降雨资料采用雨量插值程序,依据流量资料插值得出的时段,获得同步的雨量序列资料。由于 Topmodel 模型采用面雨量进行计算,因此在进行流域面雨量计算时,首先采用泰森多边形法得到流域内各测站的控制面积,然后再计算各测站的权重系数,最后进行加权计算。

Topmodel 模型的核心是流域地形指数^[4,10]。除计算方法外,地形指数的值还与网格的大小有关,网格越大,丢失的地形信息就越多,但太细的网格又

会引起流向和坡度的混乱^[11]。由于地形指数的分布对 DEM 图的分辨率很敏感^[12],因此在流域地形指数计算时,合适的网格依赖于山坡特性尺度,许多研究建议采用 50 m 的网格^[13]。为此,本研究对流域地形指数计算时采用 50 m×50 m 网格的 DEM 地形数据。由于黑河金盆水库流域的面积相对较大,故将流域划分为 8 个不同的子流域,针对每一个子流域分别进行计算,8 个子流域的划分结果如图 1 所示,计算得到各子流域的地形指数-面积比分布图如图 2 所示。

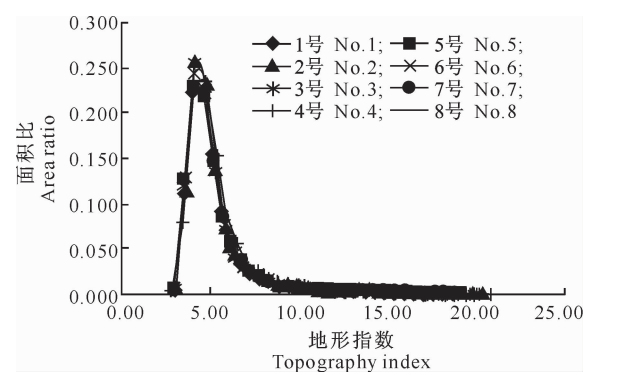


图 2 黑河金盆水库 8 个子流域地形指数-面积比分布图

Fig.2 Topography index and area ratio distribution picture of Heihe Jinpen reservoir sub-basin

2.3 模拟结果与分析

根据整理出的流域 2003—2009 年 14 场降雨洪水过程实测资料,采用前 12 场洪水资料来率定模型参数并进行误差分析,用最后 2 场洪水过程做模型效果检验。由于陈河水文站在 7 号子流域的出口附近,因此计算时仅对陈河水文站以上的 7 个子流域进行产汇流计算,通过遗传算法进行模型参数率定,得到 1~7 号子流域的模型参数如表 1 所示。黑河水库 12 场降雨洪水的 Topmodel 模型模拟结果特征值统计如表 2 所示。

表 1 遗传算法率定的黑河金盆水库各子流域模型的参数

Table 1 Model parameter of Heihe Jinpen sub-basin statistical table obtained by genetic algorithm

子流域序号 No. of sub-basin	Topmodel 参数值 Topmodel parameter value						
	szm/m	$T_0/(m^2 \cdot h^{-1})$	Td	$Chv/(m \cdot h^{-1})$	$Rv/(m \cdot h^{-1})$	SR_{max}/m	SR_0/m
1	0.002	28.432	145.579	11 367	6 303	0.148	0.007
2	0.022	0.363	0.494	9 842	3 444	0.075	0.060
3	0.010	13.141	79.433	18 179	6 004	0.031	0.005
4	0.013	3.392	23.029	12 059	8 479	0.128	0.113
5	0.019	6.056	173.340	5 343	3 396	0.149	0.094
6	0.019	1.784	28.946	18 684	4 330	0.116	0.095
7	0.011	50.267	6.637		1 403	0.142	0.003

根据表 2,采用 Nash 确定性系数来评价 Topmodel 模型对 12 场洪水过程的模拟效果,其中 2 场

为甲等水平,9 场为乙等水平,1 场为丙等水平;从洪峰误差可以看出,模型对洪峰值的预报有 7 场合格,5 场不合格,洪峰值普遍偏小;从峰现时间来看,模型的预报效果良好。综合 Nash 系数、洪峰误差、峰

现时间等模型评价标准,可知 Topmodel 模型在黑河金盆水库流域的预报水平属于乙等水平,可以用于金盆水库入库洪水的预报。

表 2 基于 Topmodel 模型的黑河金盆水库流域模拟结果的特征值

Table 2 Topmodel simulation result eigenvalue statistics in Heihe Jinpen reservoir basin

序号 No.	洪水场次 Flood period	Nash 系数 Nash coefficient	实测洪峰值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) Measured flood peak value	模拟洪峰值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) Simulated flood peak value	洪峰误差/ % Flood peak error	峰现时间/h Flood peak appear time
1	20030711	0.71	483.00	509.00	5.38	-1
2	20030828	0.78	711.00	611.65	-13.97	0
3	20050630	0.84	374.00	407.71	9.01	0
4	20050814	0.93	327.00	328.53	0.47	-2
5	20050923	0.82	1 760.00	986.04	-43.98	-1
6	20060721	0.58	178.00	236.07	32.62	+3
7	20060827	0.70	306.26	230.27	-24.81	-1
8	20060923	0.90	280.00	275.02	-1.78	+2
9	20070701	0.75	279.77	175.80	-37.16	0
10	20070726	0.83	260.00	212.09	-18.43	-1
11	20070808	0.76	585.49	403.15	-31.14	-1
12	20070925	0.71	144.00	143.56	-0.31	-2

采用 2009 年的 2 场洪水过程对率定好的 Topmodel 模型进行检验,模型的模拟流量与实测流量

的对比如图 3 和图 4 所示。

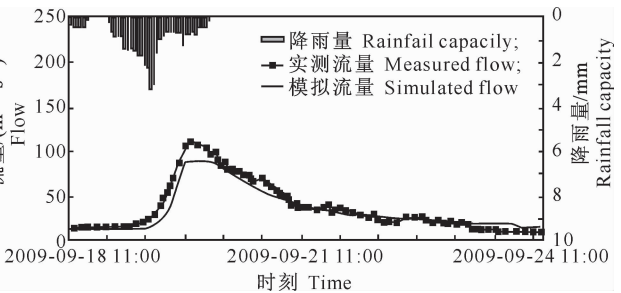
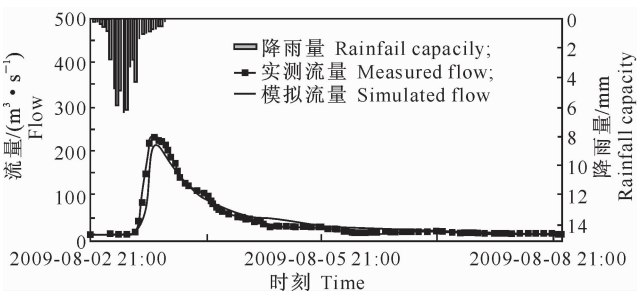


图 3 20090802 号洪水实测流量与计算流量的对比

Fig. 3 No. 20090802 flood flow comparison diagram

从图 3 和图 4 可以看出,Topmodel 模型对 2 场洪水过程的模拟均较好,通过计算得到 2 场洪水模拟的确定性系数分别为 0.89 和 0.86,为乙等水平;洪峰峰现时间分别为-1 和 0 h;洪峰误差分别为-8.12%和-14.38%。综合来看,Topmodel 模型的检验效果良好,为乙等水平,因此该模型能够用于汛期黑河金盆水库入库流量的预报。

3 结 论

本研究通过对黑河金盆水库流域 2003—2009 年降雨资料、陈河水文站流量资料的整理与分析,以及对流域 1:50 000 DEM 数据地形指数和汇流长度的提取,采用半分布式 Topmodel 水文模型,建立了流域的洪水预报模型,并模拟了流域的降雨径流过程。从所建立的 Topmodel 模型对流域汛期洪水

图 4 20090918 号洪水实测流量与计算流量的对比

Fig. 4 No. 20090918 flood flow comparison diagram

过程的模拟和检验效果来看,模型的模拟效果为乙等水平,因此该模型可用于黑河金盆水库控制流域汛期入库流量的预报,能够为水库汛期的安全运行和科学管理提供必要的数据支持。同时,应该注意到 Topmodel 模型模拟过程中洪峰流量的预报值普遍偏小,这可能是由于流域 DEM 数据分辨率对其有较大影响所致。因此,在以后的研究中,需进一步分析模型产生计算误差的具体原因,并采取相应的办法(如卡尔曼滤波实时校正方法、误差自回归实时校正方法等)对模型预报结果进行修正,或从产、汇流机理上对模型做进一步的改进,以进一步提高 Topmodel 模型的模拟、预报精度。

[参考文献]

[1] 解河海,郝振纯,杨 涛. Topmodel 模型在岔巴沟流域的模拟

- 研究 [J]. 三峡大学学报:自然科学版,2007,29(3):197-200.
- Xie H H, Hao Z C, Yang T. Study on simulation of Topmodel in Chabagou catchment [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2007, 29(3): 197-200. (in Chinese)
- [2] 熊立华, 郭生练, 胡彩虹. Topmodel 在流域径流模拟中的应用研究 [J]. 水文, 2002, 22(5): 5-8.
- Xiong L H, Guo S L, Hu C H. Application and studies of Topmodel in runoff simulation on different watersheds [J]. Hydrology, 2002, 22(5): 5-8. (in Chinese)
- [3] 解河海. Topmodel 模型的应用及参数的不确定性研究 [D]. 江苏南京: 河海大学, 2006.
- Xie H H. Application of Topmodel and research of parameter's uncertainty estimate [D]. Nanjing, Jiangsu: Hohai University, 2006. (in Chinese)
- [4] 吴波, 张万昌. Topmodel 地形指数的计算 [J]. 水土保持通报, 2006, 26(5): 49-52.
- Wu B, Zhang W C. Calculation of topography index for the Topmodel [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(5): 49-52. (in Chinese)
- [5] 凌峰, 杜耘, 肖飞, 等. 分布式 Topmodel 模型在清江流域降雨径流模拟中的应用 [J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(1): 48-53.
- Ling F, Du Y, Xiao F, et al. Rainfall runoff modeling in Qingjiang catchment with distributed Topmodel [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(1): 48-53. (in Chinese)
- [6] 林凯荣, 郭生练, 熊立华, 等. DEM 栅格分辨率对 Topmodel 模拟不确定性的影响研究 [J]. 自然资源学报, 2010, 25(6): 1022-1031.
- Lin K R, Guo S L, Xiong L H, et al. The impact of DEM resolution on Topmodel simulation uncertainty [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(6): 1022-1031. (in Chinese)
- [7] 张亚萍, 周国兵, 胡春梅, 等. Topmodel 模型在重庆市开县温泉小流域径流模拟中的应用研究 [J]. 气象, 2008, 34(9): 34-39.
- Zhang Y P, Zhou G B, Hu C M, et al. Runoff simulation for wenquan catchment in kaixian of Chongqing using Topmodel [J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(9): 34-39. (in Chinese)
- [8] 李超群, 郭生练, 张俊, 等. 利用 Horton 下渗曲线改进 Topmodel 模型的基流模拟 [J]. 水文, 2009, 29(1): 4-7, 20.
- Li C Q, Guo S L, Zhang J, et al. A modified Topmodel based on Horton infiltration capacity curve [J]. Hydrology, 2009, 29(1): 4-7, 20. (in Chinese)
- [9] 周买春, 高咏彤, 刘远. 结合新安江模型和 Topmodel 模型对流域土壤水分空间分布模式的描述 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 245-253.
- Zhou M C, Gao Y T, Liu Y. Matching Xinanjiang model and Topmodel for describing spatial soil moisture patterns over the catchment [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science Edition, 2010, 46(3): 245-253. (in English)
- [10] 刘青娥, 夏军, 陈晓宏. 潮河流域 Topmodel 模型网格尺度研究 [J]. 水文, 2008, 28(6): 29-32.
- Liu Q E, Xia J, Chen X H. Study on mesh scale of Topmodel for Chaohe River basin [J]. Hydrology, 2008, 28(6): 29-32. (in Chinese)
- [11] 孙立群, 胡刚, 陈刚. Topmodel 模型中的 DEM 尺度效应 [J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 699-706.
- Sun L Q, Hu G, Chen G. Effects of DEM resolution on the Topmodel [J]. Advances in Water Sciences, 2008, 19(5): 699-706. (in Chinese)
- [12] 钟凯文, 解靓, 孙采歌. DEM 分辨率对 Topmodel 模型模拟精度的影响研究 [J]. 人民珠江, 2009, 16(3): 43-45, 67.
- Zhong K W, Xie L, Sun C G. Study on the impact of DEM resolution on Topmodel simulation accuracy [J]. Pearl River, 2009, 16(3): 43-45, 67. (in Chinese)
- [13] 黄晴, 张万昌. 地形指数算法设计对分布式水文模型径流模拟影响研究 [J]. 水电能源科学, 2008, 26(6): 21-24, 200.
- Huang Q, Zhang W C. Study on effects of topographic index algorithm design effects on runoff simulation of distributed Topmodel [J]. Water Resources and Power, 2008, 26(6): 21-24, 200. (in Chinese)