

# Topmodel 在故县水库入库流量预报中的应用

史玉品<sup>1</sup>, 刘兴盛<sup>2</sup>, 刘龙庆<sup>1</sup>, 张防修<sup>3</sup>

(1. 黄河水利委员会水文局, 河南 郑州 450004; 2. 无锡市重点水利工程建设管理处, 江苏, 无锡, 214000; 3. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

**摘要:** Topmodel 模型是以地形为基础的半分布式流域水文模型, 被广泛应用于流域水文模拟中, 并认为是一个相当成功的流域水文模型。本文介绍了该模型已有的应用成果和基本原理, 并以故县水库入库(卢氏站)流量预报为例, 探讨模型在较大流域的应用。计算结果表明: 模型在故县水库入库流域具有较强的适用性, 可以用于该水库汛期的入库流量预报, 为水库的安全运行和优化调度提供技术支持。

**关键词:** 入库流量预报; Topmodel; 地形指数; 故县水库

中图分类号: P334.92

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)03-0209-04

## Application of Topmodel in inflow forecast of Guxian Reservoir

SHI Yupin<sup>1</sup>, LIU Xingsheng<sup>2</sup>, LIU Longqing<sup>1</sup>, Zhang Fangxiu<sup>3</sup>

(1. Hydrology Bureau of Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450004, China; 2. Wuxi Water Project Management Office, Wuxi 214000, China; 3. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** Topmodel is a semi-distributed watershed hydrological model based on topography. It has been applied in many hydrological modeling and is a very successful watershed hydrological model. This paper introduced the results of predecessor application and the basic principle of the model, then took the inflow forecast of the Guxian reservoir for example to probe its application in rainfall runoff simulation in large catchments. The results show that the model has a strong applicability in this basin and can be used to predict inflow of Guxian reservoir in flood season, and can provide theoretical foundation for safe operation and optimal dispatching of the reservoir.

**Key words:** inflow forecast; Topmodel model; topography index; Guxian reservoir

1969年, Freeze 和 Harlan 第一次提出了关于分布式水文模型的概念<sup>[1]</sup>, 随后分布式水文模型开始得到迅速发展。为研究流域地形对降雨径流过程的影响, Beven 等于 1979 年提出以变源产流为基础的 Topmodel 模型。该模型是一种以地形为基础的半分布式流域水文模型, 考虑了流域地形、地貌、土壤等因素对径流形成的影响, 在一定的假设条件下利用地形指数将流域地形结构与土壤蓄水饱和面积联系在一起, 从而反映流域水文过程, 特别是径流运动的分布规律<sup>[2]</sup>。

Topmodel 从提出到现在已有 30 多年的历史, 在国内外已应用于多个研究领域, 包括复合洪水频率计算(Beven, 1986, 1987)、模型参数率定(Hornberger 等, 1986)、地形对水质的影响(Wolock 等, 1990)、地形对径流的影响(Hornberger, Wolock, 1991)以及流域的地貌发育。本文介绍了 Topmodel 的基本概念与理论, 并将 Topmodel 应用于故县水库入库流

域, 探讨模型在大流域的应用情况。

## 1 模型简介

### 1.1 基本理论

地形是降雨-径流动态物理过程中的重要因素。Topmodel 以地形空间变化为主要结构, 用地形信息(以地形指数  $\ln(a/\tan B)$  或土壤-地形指数  $\ln(a/T_0 B)$ )描述水流趋势和由于重力排水作用径流沿坡向的运动, 模拟径流产生的变动产流面积概念, 尤其是模拟地表或地下饱和水源面积的变动。

变源面积理论是 Topmodel 的理论基础, 该理论指出流域上并不均匀产生地表径流, 地表径流仅仅产生于由于降水使土壤达到饱和的一小部分流域面积上, 这部分面积称为饱和地表面积或源面积<sup>[3]</sup>。流域源面积的位置受流域地形和土壤水力特性两个因素的影响。当地下水向坡底运动时, 将会在地形平坦的辐合面上汇集, 而地形辐合的程度决定于给

定面积上坡面汇水面积的大小,平坦面积的坡度影响水继续坡向运动的能力。土壤水力特性、水力传导度和土壤的厚度决定了某一地点的导水率,因而也会影响水分继续坡向运动的能力。饱和地表面积一般位于河道的附近,随着下渗的持续源面积向河道两边延伸,这种延伸同时受到来自山坡上部的非饱和壤中流的影响,所以变动源面积在一定意义上可以看作河道系统的延伸。

## 1.2 模型的基本方程及假定

Topmodel 模型中通过土壤含水量来确定源面积的大小和位置,定义土壤含水量  $D$  为土壤含水量与饱和含水量之间的差值<sup>[4]</sup>。 $D \leq 0$  的面积即为饱和和源面积,在这些面积上将产生饱和和地表径流,缺水量计算方程的推导主要应用了连续方程和达西定律。根据一个变宽度的水流带的连续方程,可推导出水流带通用连续性方程<sup>[5]</sup>:

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

式中:  $i$  为降雨强度,  $m$ ;  $j$  为产流率,  $m$ , 即单元面积的流量;  $x$  为沿最陡坡向的曲线水流路径,  $m$ ;  $t$  为时间,  $s$ ;  $\alpha$  为系数。

为了求解式(1),做了3个基本假定:①饱和面积上的水力梯度近似于表面地形坡度  $\tan\beta$ 。②假定土壤的传导度是缺水量的指数衰减函数。③产流  $j$  在空间上均等。根据上述假设可以推导出模型的基本方程<sup>[5]</sup>:

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

式中:  $D_i$  为第  $i$  网格的缺水量,  $m$ ;  $\bar{D}$  为平均缺水量,  $m$ ;  $a$  为流经坡面任一点  $i$  处单位等高线长度的汇水面积,  $m^2/m$ ;  $\tan\beta$  为表面地形坡度;  $m$  为土壤下渗率呈指数衰减的速率系数,  $m$ ;  $T_0$  为土壤刚达到饱和时有效下渗率,  $m^2/h$ ;  $\lambda = \frac{1}{A} \sum_i A_i \ln \frac{a}{\tan\beta}$ ;  $\ln T_e = \frac{1}{A} \sum_i A_i \ln T_0$ ;  $A_i$  为第  $i$  个网格的上游面积,  $m^2$ ;  $A$  为流域面积,  $m^2$ 。

假定  $T_0$  在空间上均等, 则式(2)中  $(\ln T_0 - \ln T_e)$  就消失了, 基本方程变为

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

## 2 模型应用分析

### 2.1 流域概况

故县水库位于洛河上游(卢氏站为故县水库入

库站), 水库控制流域为卢氏站以上, 地理坐标为  $109^{\circ}40' \sim 110^{\circ}10'E$ ,  $33^{\circ}45' \sim 34^{\circ}30'N$ , 位于黄河小浪底-花园口间一级支流洛河的上游, 流域面积  $4623 \text{ km}^2$ 。流域共有 13 个雨量站(各雨量站分布见图 1), 2 个流量站(灵口和卢氏), 两个蒸发站(灵口和卢氏); 河道全长  $196.3 \text{ km}$ , 占整个洛河流域总面积的 25% 左右。地势同整个伊洛河流域一样, 西高东低, 高程在  $356 \sim 2747 \text{ m}$  之间。

该流域地处亚热带和暖温带的过渡地带, 多年平均降水量为  $720 \text{ mm}$ , 多年平均水面蒸发量为  $966 \text{ mm}$ 。从降水的空间分布看, 流域西北部较大, 南部较小。降水量年内分布不均, 一般集中在 6-9 月, 占全年降雨量的 55%~65%, 春秋次之, 冬季最少, 仅占 3.4%。受江淮切变线的影响, 区内夏秋常出现暴雨。

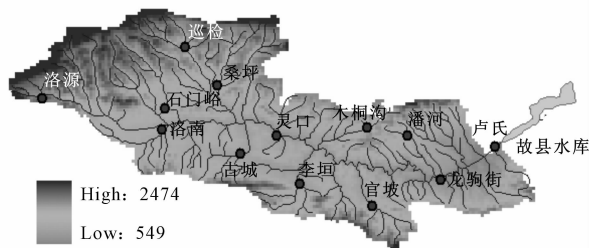


图 1 DEM 生成的故县水库控制流域数字流域图

### 2.2 模型应用

在 Topmodel 中, 需要的水文资料主要包括降雨、蒸发和流量。本次研究获取了 1980-2011 年所有站点的降雨资料, 灵口和卢氏站的流量资料和蒸发资料(卢氏是故县入库站)。通过线性插值方法将灵口和卢氏水文站的流量数据资料按 1 h 的步长整理。通过雨量插值程序获得和流量资料同步的雨量资料。模拟过程中, 流域平均降雨量通过泰森多边形法计算得到, 蒸发量使用灵口和卢氏站的实测数据。

利用 GIS 软件和 DEM 资料将研究区域划分为 15 个子流域, 如图 2。

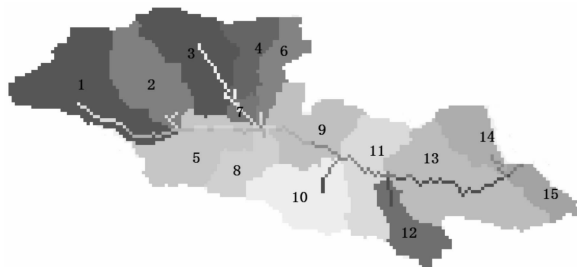


图 2 故县水库控制流域子流域划分

如果子流域内没有雨量站,就采用距离其较近雨量站的资料。每个子流域中包括若干网格,根据网格进行地形指数计算,再在子流域尺度上进行产汇流计算。在子流域上,通过时间滞时函数进行汇流计算,得到子流域出口断面的流量过程;子流域以下的河道汇流采用马斯京根法,将子流域的出流演

算至流域出口断面,叠加后得到流域总流量过程。  
Topmodel 模型的核心参数是流域地形指数<sup>[6-7]</sup>,该参数是在无洼地的 DEM 基础上计算得到,本文利用改进多流向法计算流域地形指数,并对各子流域进行统计分析,得到 15 个子流域的地形指数统计分布曲线(见图 3)。

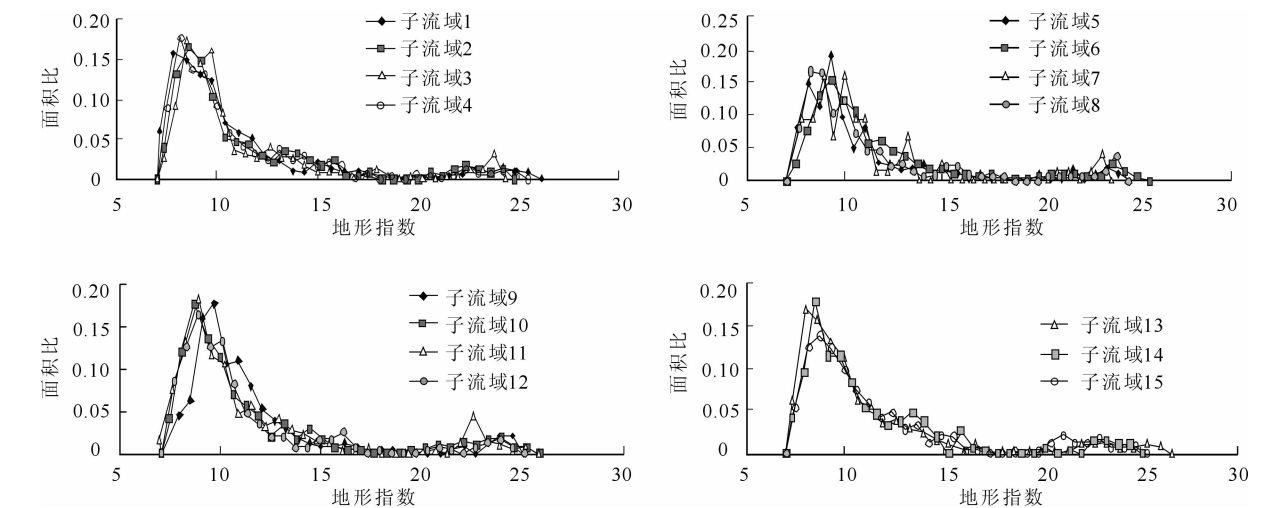


图 3 15 个子流域的地形指数统计分布曲线

2.3 应用结果

在 Topmodel 模型中,主要参数有 7 个:  $SZM$  为土壤下渗率呈指数衰减的速率参数,  $m$ ;  $\ln T_0$  为土壤刚达到饱和时有效下渗率的流域均值,  $m^2/h$ ;  $T_d$  为重力排水的时间滞时参数;  $S_{rmax}$  为根带最大蓄水能力,  $m$ ;  $SR0$  为根带土壤饱和缺水量的初值,  $m$ , 与  $S_{rmax}$  成比例;  $R_v$  为地表坡面汇流的有效速度,  $m/h$ ;  $CH_v$  为主河道汇流的有效速度,  $m/h$ 。

在模拟计算中,首先确定一套模型参数的初始值,然后用模型模拟出产汇流过程,并与实际过程进行比较和分析,以与过程的误差最小为原则,用人工试错和自动优选相结合方式率定参数结果见表 1。经实践表明,对洪峰和洪水过程影响较为明显的参数有  $SZM$ 、 $S_{rmax}$ 、 $T_0$ 、 $R_v$  而参数  $T_d$  则较不敏感。

表 1 模型参数率定结果

| 子流域<br>编号 | $SZM$ | $T_0$ | $T_d$ | $S_{rmax}$ | $CH_v$ | $R_v$ |
|-----------|-------|-------|-------|------------|--------|-------|
| 1~5       | 0.008 | 395   | 1.1   | 0.06       | 7000   | 7200  |
| 6         | 0.009 | 388   | 1.1   | 0.06       | 7000   | 7000  |
| 7~10      | 0.01  | 388   | 1.1   | 0.055      | 6500   | 6800  |
| 11~12     | 0.01  | 373   | 1.1   | 0.053      | 6500   | 6500  |
| 13~15     | 0.011 | 373   | 1.1   | 0.05       | 5500   | 6000  |

表 2 是卢氏站(故县水库入库)洪水的模拟与验证结果。

| 表 2 模型率定与检验结果 |      |      |        |    | $m^3/s, \%, h$ |
|---------------|------|------|--------|----|----------------|
| 洪水场次          | 实测   | 模拟   | 洪峰     | 峰现 | 确定性<br>系数      |
|               | 洪峰   | 洪峰   | 误差     | 时差 |                |
| 19810907      | 1110 | 1069 | -3.69  | -2 | 0.79           |
| 19820730      | 2070 | 1851 | -10.60 | 2  | 0.68           |
| 率 19840704    | 1520 | 1654 | 8.8    | 1  | 0.82           |
| 定 19920913    | 1440 | 1113 | -22.70 | -1 | 0.85           |
| 期 20030829    | 2200 | 1852 | -15.82 | 5  | 0.78           |
| 20090723      | 592  | 532  | -10.14 | 0  | 0.88           |
| 20110912      | 1446 | 1309 | -9.47  | -1 | 0.83           |
| 19890910      | 1160 | 1118 | -3.62  | 0  | 0.81           |
| 检 19940707    | 1480 | 1546 | 4.46   | -2 | 0.86           |
| 验 20070729    | 2076 | 2096 | 0.96   | -1 | 0.90           |
| 期 20110919    | 1660 | 1328 | -20.00 | -2 | 0.77           |

综合洪峰误差、峰现误差和确定性系数等模型评价标准,可知 Topmodel 模型可以用于水库入库洪水的预报,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。但是图 5 显示模拟洪峰值偏小很多,效率系数也不高,这个问题除了地形指数、模型参数和模型结构的影响外,还有就是该流域降

雨空间分布变化大,因此很有可能出现邻近雨量站降雨变化很大,而且该流域相邻雨量站间距离往往

超过 10 km,因此资料误差也是引起模型应用误差的一个很重要的原因。

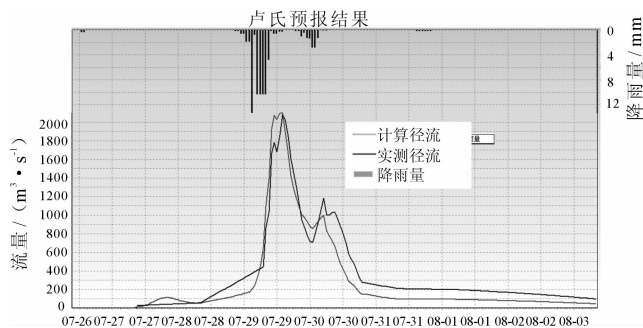


图4 20070729 洪水实测与计算对比

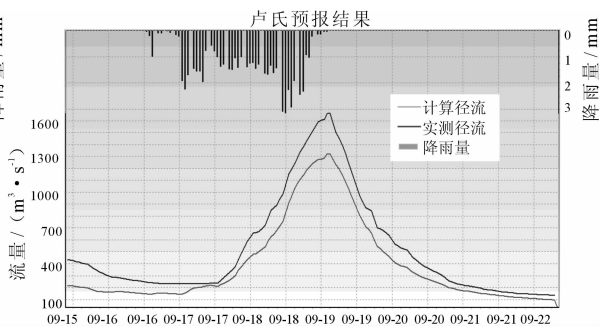


图5 20110919 洪水实测与计算对比

### 3 结 语

Topmodel 是一个以地形为基础的半分布式水文模型,由于其不能考虑降雨等水文要素的空间不均匀性,目前国外的应用研究大多为试验流域,或者一面山坡,汇水面积从几百平方米到十几平方公里,至多几十平方公里。因此本文选择几千平方公里的故县水库入库流域,通过对流域划分子流域,建立基于子流域的 Topmodel,模型在每个子流域计算时采用本子流域的降雨和地形指数统计曲线及地形、地貌信息。模型的模拟结果说明在几千平方公里的一般流域上,Topmodel 能够成功的概化变动产流面积概念进行流域水文模拟。

尽管计算结果表明,Topmodel 模型在该流域还是适用的,但由于多种原因的限制,有些场次洪水的模拟精度不够理想,主要是因为水文模型只是对客观水文规律的数学概化,必然带有一定误差及不合理性,而且实时计算时,对蒸发、土湿等因子的计算都会存在误差。

### 参考文献:

- [1] Freeze R A, Harlan R L. Blue print for a physically based digitally response model [J]. Journal of Hydrology, 1969, 9: 237 - 258.
- [2] Beven K J, Kirkby M J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology [J]. Hydrological Science Bulletin, 1979, 24(1): 43 - 69.
- [3] 郭方, 刘新仁, 任立良. 以地形为基础的流域水文模型 - Topmodel 及其拓宽应用 [J]. 水科学进展, 2000, 11(3): 296 - 301.
- [4] 刘青娥, 左其亨. Topmodel 模型探讨 [J]. 郑州大学学报, 2002(4): 82 - 86.
- [5] Wolock D M and McCabe G J. Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in Topmodel [J]. Water Resource Research, 1995, 31: 1315 - 1324.
- [6] 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.
- [7] 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.