

# 三峡库区张家冲小流域降雨—径流模拟

余楚<sup>1</sup>, 孙自永<sup>2</sup>, 周爱国<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 中国地质大学 环境学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 以三峡库区的张家冲小流域为例, 对降雨—径流过程进行模拟, 以期为库区小流域水土流失和非点源污染过程研究提供借鉴, 并为控制三峡库区的水土流失和非点源污染, 保障库区的水资源安全, 缓解日趋严重的环境压力提供科学支撑。首先以研究区的水文、气温观测资料以及数字高程模型为基础, 利用半分布式水文模型 TOPMODEL 模型对日径流进行模拟, 选用 Nash—Sutcliffe 效率系数、均方根误差 RMSE 以及相关系数  $r$  作为目标函数。模拟结果表明, 研究区径流的模拟值与实测值变化趋势较为一致; 丰水期的模拟精度和拟合效果都优于枯水期, 且差异较大; 依据《水文情报预报规范》SL250—2000, 确定该区丰水期的模拟精度为丙级, 枯水期在丙级以下。研究发现, TOPMODEL 比较适用研究区丰水期的日径流模拟, 不适用于枯水期的日径流模拟。

**关键词:** 降雨—径流模拟; 水文模型; 小流域; TOPMODEL 模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)03-0178-04

中图分类号: S157.4

## Rainfall—Runoff Simulation for Zhangjiachong Small Watershed in the Three Gorges Reservoir

YU Chu<sup>1</sup>, SUN Zi-yong<sup>2</sup>, ZHOU Ai-guo<sup>2</sup>

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 2. China University of Geoscience, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** By taking the Zhangjiachong small watershed in the Three Gorges Reservoir for an example, rainfall—runoff process simulation is conducted to provide references to the researches on soil and water loss and non-point source pollution process and scientific supports to control soil and water loss and non-point source pollution, to ensure water security, and to alleviate the growing pressures on ecological environment. Based on the observed data of hydrology and temperature and digital elevation model, TOPMODEL, a half-distributed hydrological model, is used to simulate daily runoff in the study area. Nash—Sutcliffe coefficient, Root Mean Squared Error(RMSE) and correlation coefficient are taken as objective functions. Simulation results show that the measured values of runoff dynamics are roughly consistent with the simulated values. Simulation accuracy and fitting efficiency in wet season are better than those in dry season and they vary greatly. According to the "hydrological forecasting standards" SL250—2000, runoff simulation accuracy grade is in C class in wet season and below C class in dry season. TOPMODEL is appropriate for the daily runoff simulation in wet season, but not appropriate in dry season.

**Keywords:** rainfall—runoff modeling; hydrological model; small watershed; TOPMODEL

三峡工程是迄今世界上最大的水利水电枢纽工程, 具有防洪、发电、航运、供水等综合效益, 水库水资源安全至关重要。随着经济的发展、人口的增加和城市化进程的加快, 库区的水土流失和水体污染程度加重, 不仅影响到三峡工程的效益和使用寿命, 对库区及其下游的水环境甚至整个生态环境都造成了巨大压力, 对库区的水土流失和水质污染展开研究显得十分

紧迫。无论在流域侵蚀产沙过程中, 还是在污染物运移过程中, 水的动力作用都是主要影响因素。所以, 在以流域为尺度进行水土流失和面源污染的研究时, 降雨—径流过程是研究的热点之一。

水文模型是研究水文自然规律和解决水文实践课题的重要工具, 目前普遍使用的是流域尺度的水文模型。近年来, 分布式流域水文模型的研究发展得到

广泛关注,但受到技术和资料等原因的制约,分布式水文模型的推广应用还比较困难。目前在三峡库区做出的水文模型相关研究并不多,已有的研究主要集中在非点源污染模拟,如吴磊<sup>[1]</sup>,许其功等<sup>[2]</sup>,和流域侵蚀产沙方面,如余炜敏<sup>[3]</sup>,张海斌<sup>[4]</sup>等,针对流域径流模拟的研究较少。

本文基于 ARCGIS 平台,利用 TOPMODEL 模型对三峡库区张家冲小流域的降雨—径流变化过程进行模拟,以期对库区小流域水土流失和非点源污染过程研究提供借鉴,并为控制三峡库区的水土流失和非点源污染,保障库区的水资源安全,缓解日趋严重的环境压力提供科学支撑。

## 1 流域概况及数据准备

### 1.1 流域概况

张家冲位于湖北省宜昌市秭归县茅坪镇西南部,距秭归新城 8.5 km,距三峡大坝 5 km,其地理位置为东经 110°57′20″,北纬 30°46′51″,流域总面积 1.58 km<sup>2</sup>。流域内有 3 条支流经瓮桥沟汇集流入茅坪河。

张家冲小流域属山地丘陵地貌,四周高,中间低。下部较为平缓,中上部坡度较陡,流域特征为典型的闭合小流域。气候属亚热带大陆性季风气候,温和湿润,雨量充沛,四季分明。流域内的两大主要生态环境问题是水土流失及非点源污染。农业非点源污染是区内水质污染主要原因。流域内水土流失类型主要为水力侵蚀、重力侵蚀,且以面蚀为主。据调查,张家冲流域 2003 年水土流失面积 0.97 km<sup>2</sup>,占土地总面积的 60%,其中轻度流失 24.1 hm<sup>2</sup>,占流失总面积的 24.8%;中度流失 49.5 hm<sup>2</sup>,占 50.9%;强度流失 8.0 hm<sup>2</sup>,占 8.2%;极强度流失 15.6 hm<sup>2</sup>,占 16%,土壤侵蚀总量达到 6 705 t/a,水土流失十分严重<sup>[4]</sup>。

### 1.2 数据来源与方法

本文的模拟研究用到的数据包括:张家冲小流域 2007 年全年的逐日降雨、径流观测资料。为准确观测流域的径流过程,在流域出口处设置矩形堰,在矩形堰的监测断面设置水位自动监测仪,实时记录水位变化,根据水位—流量关系曲线查得流域出口的流量;气温资料因研究区 2007 年缺测,采用距张家冲东北部约 5.8 km 处的三斗坪自动监测站全年的逐日最高、最低及平均气温观测资料代替;研究区的 DEM,利用 ArcGIS 对地形图等高线进行矢量化后生成。

## 2 研究区降雨—径流特征

通过对 2007 年的降雨、径流数据进行统计分析,

研究区的降雨具有以下特点。(1)年内变化较大,7 月降雨量最多,总量为 288.0 mm,占全年降雨总量的 23.1%;(2)枯水期的降雨以小雨为主,中雨、大雨多发生在丰水期,暴雨仅在丰水期发生(表 1);(3)6,7 月的降雨强度较高,呈现出多峰或双峰型曲线。

表 1 2007 年流域枯水期和丰水期的降雨强度分布

降雨强度等级	枯水期降雨/d		丰水期降雨/d
	1—4 月	9—12 月	5—8 月
小雨	26	24	30
中雨	7	3	14
大雨	2	3	7
暴雨	0	0	2
合计	35	53	30

研究区 2007 年总径流量为 754 032.1 m<sup>3</sup>,年内分配不均,与降雨的年内分配相对应(图 1)。流域山势比较陡峭,流域面积较小,出现流量陡涨陡落的现象。对月降雨量和月径流量进行回归分析,丰水期降雨和径流的相关性最高,相关系数  $r$  为 0.992 7。枯水期 9—12 月的相关性次之,1—4 月的相关性最次。

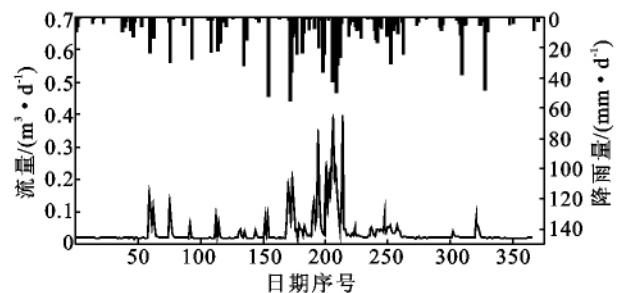


图 1 2007 年张家冲小流域降雨—径流分布

## 3 TOPMODEL 模型模拟研究

### 3.1 TOPMODEL 模型概述

Beven 和 Kirkby(1979 年)提出的 TOPMODEL (topography based hydrological model)模型是目前研究地形条件对降雨—径流过程影响的水文模型中应用最为广泛的。它是一个以地形为基础的半分布式流域水文模型,其显著特点是利用易于获取的地形信息(如地形指数、土壤地形指数等)来描述流域产流及源面积的变化与分布,在集总式和分布式流域水文模型之间起到了承上启下的作用<sup>[5]</sup>。

该模型最初用于模拟英国山区小流域降雨—径流<sup>[6]</sup>。它具有结构简单,优选参数少,物理概念明确,模拟精度高,易于与 GIS 相结合等特点,不但适合于坡地集水区,还能用于无资料或资料缺乏流域的产汇

流估算。无论在径流、泥沙、水质的模拟研究中,还是在气候、土地植被变化研究和水资源管理等领域都具有很好的应用前景。

### 3.2 模型输入资料

模型参数校正需要提供的资料除计算时段内的降雨、径流观测资料,还需要流域的地形指数空间分布和频率分布、潜在蒸散发量和水流长度分级信息,其中地形指数的计算是模型计算的重点。

**3.2.1 地形指数计算** 根据地形指数的定义,由网格单元的上坡汇水面积和网格尺度计算单宽集水面积  $a$ ,由 DEM 提取坡度  $\beta$ ,然后可以得到每一个网格单元的地形指数  $\ln(a/\tan\beta)$ 。将网格单元的地形指数看作是随机变量,经过统计分析可得到地形指数的频率分布<sup>[7]</sup>。选取用于研究区地形指数计算的 DEM 分辨率为 20 m。由于流域出口处地形较平坦,存在坡度为 0 的网格单元。这些网格往往会影响到地形指数的统计特征,因此本文将它们的坡度用周围相邻单元坡度中的最小值代替<sup>[8]</sup>。研究区的地形指数在 2.91~19.89,沿河道两侧地形指数较大,地形指数分布曲线见图 2—3。

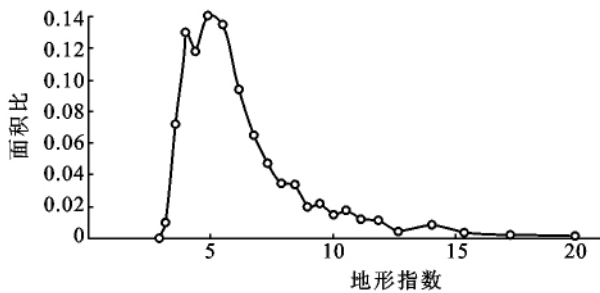


图 2 张家冲小流域地形指数分布曲线

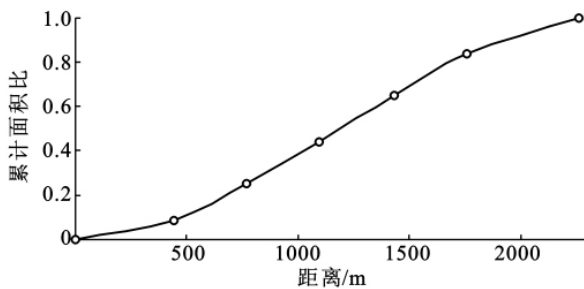


图 3 张家冲小流域等流时线及累计面积—距离曲线

**3.2.2 潜在蒸散发量计算** 本文采用 Hargreaves 法对其进行估算。Hargreaves 方法是在美国西北部较干旱的气候条件下建立的,仅需要每日最高、最低和平均气温,其基本公式为<sup>[9]</sup>:

$$ET_0 = 0.0023(T_{\text{mean}} + 17.8)(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0.5} R_a$$

式中:  $ET_0$ ——潜在蒸散量 (mm/d);  $R_a$ ——外空辐射 [MJ/(m<sup>2</sup>·d)];  $T_{\text{max}}$ ,  $T_{\text{min}}$ ,  $T_{\text{mean}}$ ——最高、最低、平均气温 (°C)。

**3.2.3 等流时线生成** 等流时线是一种经典的流域汇流曲线,一般假设流速在整个流域均匀分布,汇流时间主要由净雨到达流域出口断面的距离确定。本文在提取了张家冲小流域的水流长度基础上,划出了 5 条等流时线用于汇流计算,流域等流时线累计面积—距离曲线见图 3。

### 3.3 模拟结果

**3.3.1 参数率定** 该模型需要率定的参数共有 5 个。(1)  $m$  为土壤非饱和层的最大蓄水量 (m); (2)  $\ln(T_0)$  为土壤饱和导水率的自然对数 (mm/h); (3)  $SR_{\text{max}}$  为土壤植被根系层的最大容水量 (m); (4)  $SR_{\text{init}}$  为植被根系层的初始缺水量 (m); (5)  $Ch_{\text{vel}}$  为主河道汇流的有效速率 (m/h)。

模型参数的率定一般应遵循两个原则:(1) 模拟时段内的流量误差尽可能小;(2) 模拟流量和实测流量的拟合程度尽可能大。本文选取目标函数为 Nash—Sutcliffe 效率系数<sup>[10-14]</sup>、模拟和实测径流量的相关系数  $r$ <sup>[11]</sup> 和均方根误差 RMSE<sup>[15]</sup> 对模型的有效性进行判定,判定的结果对模型能否适用于研究区的实际预测非常重要。

**3.3.2 模拟结果** 本文采用人工试错法对模型参数进行率定,参数率定的结果为:(1)  $m = 0.0015$ ; (2)  $\ln(T_0) = 0.4$ ; (3)  $SR_{\text{max}} = 0.0014$ ; (4)  $SR_{\text{init}} = 0$ ; (5)  $Ch_{\text{vel}} = 3500$ 。模拟的径流过程如图 4 所示,模拟值与实测值的变化趋势大体一致。全年、枯水期和丰水期 3 个时段的模拟精度如表 2 所示。

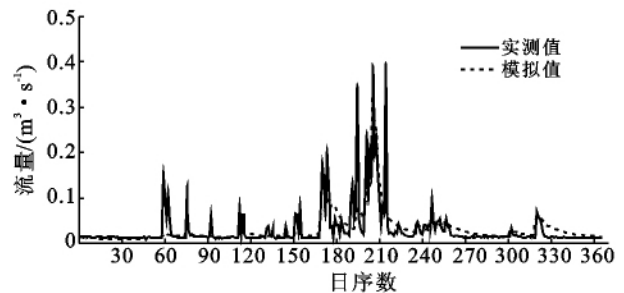


图 4 TOPMODEL 模型径流模拟过程

表 2 不同时间段的径流模拟精度

目标函数	时段/月	Nash—Sutcliffe 效率系数	均方根误差 RMSE	相关系数 $r$	精度等级
全年	1—12	0.618 5	0.033 8	0.737 4	丙
	丰水期	5—8	0.665 3	0.051 5	0.735 4
枯水期	9—12	0.121 9	0.016 6	0.667 4	丙以下
	1—4	0.307 4	0.022 1	0.378 6	丙以下

以《水文情报预报规范》SL250—2000<sup>[16]</sup> 作为参考,以 Nash—Sutcliffe 效率系数(确定性系数)对模

型的模拟精度进行评定,评定结果见表2。模型对不同时期的日径流模拟精度差异较大,丰水期的模拟精度等级为丙级,而枯水期的精度等级在丙级以下。

### 3.4 结果分析

如表2所示,丰水期的 Nash—Sutcliffe 效率系数显著高于枯水期,相关系数  $r$  也比枯水期高,说明模型丰水期的日径流模拟精度显著高于枯水期的模拟精度,丰水期的拟合结果也优于枯水期的拟合结果。5—8月的丰水期是流域降雨较充沛的时期,在雨季流域的土壤比较湿润。而1—4月和9—12月的枯水期期间,流域降雨量较少,流域本身比较干燥,因此模型相对比较适合湿润地区或湿润气候条件下的径流模拟。

TOPMODEL 模型模拟误差的原因可能存在于以下几方面。

(1) 资料误差。降雨、蒸发、径流等模型输入资料测量结果的准确性对模拟结果十分重要。本文采用替代的气温资料和 Hargreaves 经验公式推求的潜在蒸散发量和实际值的差异对模拟结果会有一定程度的影响。

(2) 模型结构。水文模型是对实际水文过程的概化,没有任何一种水文模型能够准确地将水文过程的每个细节刻画清楚。TOPMODEL 模型对实际流域和水文过程的简化也必然会给模拟结果带来系统误差,从而影响模拟的精度。这主要体现在3个方面,一是模型单一的产流机制;二是模型参数的集总程度;三是模型建立的假定条件。

(3) 人类活动的影响。人类活动如农业灌溉、坡改梯、修建水渠塘堰等,会改变流域下垫面与河道的天然情况,进而影响流域的产汇流过程。

## 4 结论

(1) 利用半分布式水文模型 TOPMODEL 对三峡库区张家冲小流域进行日径流模拟研究是可行的。

(2) 模型对研究区丰水期和枯水期的日径流模拟精度差异明显,依据《水文情报预报规范》SL250—2000, TOPMODEL 模型对研究区丰水期的日径流模拟精度为丙级,枯水期的模拟精度在丙级以下。

(3) 模拟误差主要受输入计算资料误差、模型结构和人类活动等方面的影响。

(4) TOPMODEL 模型比较适用研究区丰水期

的日径流模拟,不适用于枯水期的日径流模拟。

由于缺乏研究区长时间序列的降雨、径流资料,文中仅对径流模拟过程进行了校准,无法对径流量进行验证,因此,率定的模型参数在应用于相似地区的时候存在一定的风险性。还有,采用人工试错法得到的模型参数并不一定是最优解。

### [参 考 文 献]

- [1] 吴磊. 三峡库区小江流域非点源污染负荷模拟研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.
- [2] 许其功,刘鸿亮,沈珍瑶,等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. 环境科学学报,2007(2):326-331.
- [3] 余炜敏. 三峡库区农业非点源污染及其模型模拟研究[D]. 重庆:西南农业大学,2005.
- [4] 张海斌. 基于 SWAT 模型的小流域产沙产流的研究:以三峡地区张家冲小流域为例[D]. 武汉:华中农业大学,2006.
- [5] 张文华,郭生练. 流域降雨—径流理论与方法[M]. 2008:265-271.
- [6] 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.
- [7] 孔凡哲,芮孝芳. 一种地形指数计算方法在 Topmodel 洪水模拟计算中的应用[J]. 水文,2003(3):16-19.
- [8] 孔凡哲. 基于数字化平台的分布式流域水文模型和流域汇流研究[D]. 南京:河海大学,2003.
- [9] Allen R G, Pereira L S, Raes D. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements [C] // FAO Irrigation and Drainage Paper NO. 56. Rome: FAO, 1998.
- [10] 石景元. 考虑水土保持措施影响的 TOPMODEL 模型研究及应用[D]. 南京:河海大学,2007.
- [11] 李玉华. 基于 SWAT 模型的三峡库区径流模拟研究[D]. 重庆:西南大学,2010.
- [12] 文佩. 基流分割及基于改进 TOPMODEL 径流模拟[D]. 南京:河海大学,2006.
- [13] 荣琨. 基于 SWAT 模型的晋江西溪流域非点源污染模拟[D]. 福州:福建师范大学,2009.
- [14] 许继军. 分布式水文模型在长江流域的应用研究[D]. 北京:清华大学,2007.
- [15] 王玲. 基于人工神经网络的水文过程模拟研究[D]. 南京:河海大学,2002.
- [16] 中华人民共和国水利部. 水文情报预报规范 SL250—2000[S]. 北京:中国水利水电出版社,2001.