

文章编号:1004-8227(2010)01-0050-00

分布式 TOPMODEL 模型在清江流域 降雨径流模拟中的应用

凌 峰, 杜 耘, 肖 飞, 吴胜军, 薛怀平

(中国科学院测量与地球物理研究所湖北省环境与灾害监测评估重点实验室, 湖北 武汉 430077)

摘 要: 以清江流域上游为研究区域, 探讨 TOPMODEL 模型在大流域的应用; 对比了 SRTM 和地形图两种 DEM 数据在流域地形指数计算及降雨径流模拟中的差异, 结果表明, 虽然不同 DEM 计算得到的地形指数和模型率定参数存在较大差异, 但是模拟效率基本相同, SRTM 数据作为全球覆盖的免费高分辨率 DEM 数据将极大促进 TOPMODEL 模型的应用; 分析了 TOPMODEL 模型在大流域中应用存在的局限性, 在此基础上, 构建了基于子流域的松散耦合的分布式 TOPMODEL 模型, 提出了利用流域实际下垫面数据进行模型参数率定的方法, 探讨了子流域划分详细程度对模拟结果的影响, 结果表明, 分布式 TOPMODEL 模型充分考虑了流域降雨和下垫面属性空间不均匀性对水文过程的影响, 模拟效率高于传统 TOPMODEL 模型, 随着子流域数目的增加, 模型在率定期和校验期的效率均呈上升趋势, 但是到达一定程度之后, 受降雨等输入参数及模型计算误差所限, 增加子流域个数不能继续提高模拟效率。

关键词: TOPMODEL; 数字高程模型; 分布式水文模型; 清江

文献标识码: A

地形是影响流域水循环最为重要的因素之一, 流域地形决定着径流路径, 控制着流域不同位置的汇水面积, 其空间变化会造成流域水文循环过程的空间分布不均匀性, 特别是在以地表或壤中径流为主的山区性流域, 地形结构最终决定着流域的水文响应特征^[1,2]。为研究流域地形对降雨径流过程的影响, Beven 与 Kirkby 在变动产流概念下提出了 TOPMODEL 模型, 该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^[3]。

TOPMODEL 模型自提出以来, 已经被广泛应用到水文学及其相关领域, 很多学者在不同的流域应用该模型进行了径流模拟, 并对模型在实际应用过程中的问题进行了探讨和改进^[4~7]。为进一步拓宽 TOPMODEL 模型的应用, 探讨该模型在大流域的应用效果, 本文以清江流域上游为研究区域, 利用

该模型进行降雨径流模拟, 同时针对研究流域面积较大的特点, 对原始 TOPMODEL 模型进行改进, 构建基于子流域的松散耦合的分布式 TOPMODEL 模型, 从而进一步提高该模型的实际应用效果。

1 研究区域概况

清江位于湖北省西南山区, 巫山山脉南麓, 是长江在湖北省的第二大支流, 发源于鄂西利川市, 自西向东至枝城市注入长江, 河流全长 423 km, 总落差 1 430 m, 流域面积 17 000 km², 其中山区占 80% 以上, 流域暖湿多雨, 属副热带季风气候区, 多年平均降水量 1 400 mm, 降水量年内分配不均, 主要集中在 6~9 月, 其中 7 月份降水量一般大于 200 mm, 为全年各月最大值, 冬季雨量较少, 其中 1 月份降水量最少, 一般仅 20~30 mm。流域水文站点分布较为均匀, 干流上有隔河岩、高坝州、水布垭三大水利枢纽, 对径流的形成带来了较大的人为影响, 考虑到清

收稿日期: 2008-12-09; 修回日期: 2009-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(40801186, 40801045), 中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-141)

作者简介: 凌 峰(1979~), 男, 安徽省宿松人, 博士, 助理研究员, 主要从事环境遥感、水文水资源等方面研究。

E-mail: lingf@asch.whigg.ac.cn

江干流上的降雨径流预报对清江流域水利枢纽的重要影响,同时为了避开水利工程对河道流量的人为影响,本次研究选择清江流域上游中间坪水文站为出口断面,以中间坪水文站控制的清江流域上游区域作为研究范围,研究流域面积约 8 000 km²,流域内部及附近共有 22 个雨量站点,基本情况如图 1 所示。

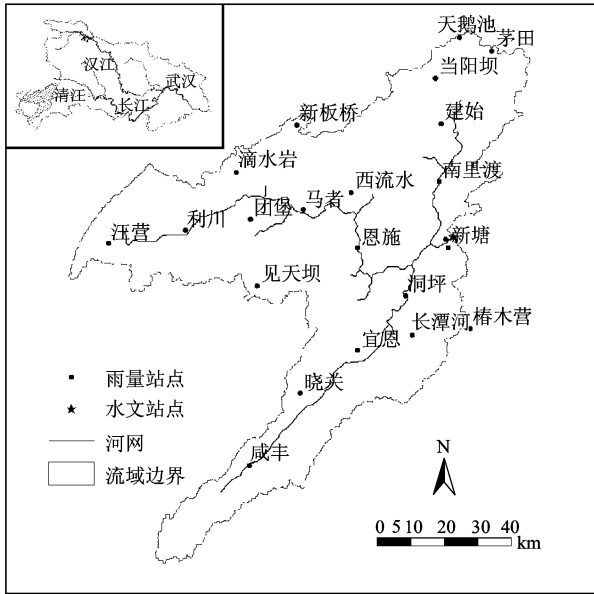


图 1 清江上游流域水文站点示意图
Fig.1 Location of the Qingjiang Headwater Catchment and Hydrological Stations

2 TOPMODEL 模型应用分析

本次研究采用 Lancaster 大学开发的 TOPMODEL 模型进行流域日降雨径流模拟,获取的水文资料包括 2001 年~2003 年所有雨量站点的日降雨量,出口断面(中间坪水文站)的日径流量和日蒸发量。根据水文资料的情况,首先以 2001 年作为模型的预运行期,然后利用 2002 年数据进行模型参数率定,最后用 2003 年数据进行模型验证。模拟过程中,流域平均降雨量通过泰森多边形法计算得到,蒸发量使用中间坪水文站的实测数据。

TOPMODEL 模型主要是利用地形指数来反映流域水文过程的差异,一般通过 DEM 数据计算得来,因此流域 DEM 数据获取对于 TOPMODEL 模型具有重要意义^[2]。随着全球高分辨率 DEM 数据 SRTM 的发布,获取流域 DEM 数据已经相对简单,为对利用该数据进行流域降雨径流模拟的应用效果

进行分析,本文在计算流域地形指数的时候,分别使用了两种 DEM 数据:第一种是 SRTM 数据,在实际应用前,利用数字河网对该数据中存在的无效区域进行了预处理^[8],第二种 DEM 数据是通过 1:250 000 地形图生成的 DEM 数据(简称为 TopDEM),两种 DEM 数据均重采样为 90m 的空间分辨率。图 2 表示了利用两种不同 DEM 数据计算得到的流域地形指数分布图,从图中可以看到,两种流域地形指数分布存在较大差异,流域地形指数与 DEM 数据特征密切相关。

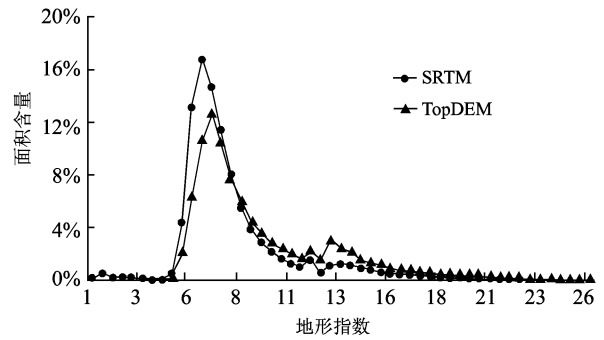


图 2 两种 DEM 数据计算得到的流域地形指数分布图
Fig.2 Distribution of Topographic Index Derived from SRTM and TOPDEM

以 Nash 效率函数为目标函数,通过人工优选,最终获取的模型最优参数如表 1 所示。从表中可以看到,分别使用 SRTM 和 TopDEM 两种 DEM 数据优选得到的模型参数存在较大差异,特别是 $\ln(T_0)$ 相差了几十倍,但是从模型的模拟效率来看,利用两种不同 DEM 数据获取的降雨径流模拟效率基本相同,率定期效率分别为 0.791 和 0.771,效验期效率分别为 0.717 和 0.712。

表 1 TOPMODEL 模型优选参数与模型效率
Tab.1 Calibrated Parameters and Simulation Efficiency of TOPMODEL

	率定模型参数					模型效率 E	
	M	$\ln(T_0)$	SRmax	SRinit	ChVel	率定期	效验期
SRTM	0.018	0.02	0.04	0	3 600	0.791	0.717
TopDEM	0.015	1.80	0.04	0	3 600	0.771	0.712

3 基于子流域划分的分布式 TOPMODEL 模型

从 TOPMODEL 模型的结构来看,该模型认为流域降雨在空间上是均匀分布的,流域产流也是平

均产流,没有考虑空间分布不均匀性;在反映流域下垫面条件对水文循环过程影响的时候,只是通过地形指数分布函数来考虑地形的空间分布不均匀性,而其它影响流域水文过程的因素,包括土壤、植被等等,则利用模型中的集总式参数来反映,包括反映土地利用信息的 SR_{\max} 和反映土壤信息的 M 、 $\ln(T_0)$ [3]。显然,上述方法利用了集总式概念模型的概念,适用于面积较小的流域,但本文研究流域面积达到8 000 km²,如果仍然不考虑降雨和下垫面的这种时空分布不均匀性,将对模拟结果产生较大的影响。

为解决上述问题,本文采用基于子流域的流域空间离散方式构建了松散耦合的分布式 TOPMODEL 模型,该模型将研究流域划分为一系列子流域,认为在每个面积较小的计算单元(子流域)内降雨和下垫面条件不存在空间分布不均匀性。模型主要包括以下几个部分:

(1)子流域划分与地形参数计算:利用 DEM 数据进行子流域划分和拓扑结构生成,并计算每个子流域的地形指数及各种地形特征,包括子流域面积,河网长度、坡度等。

(2)降雨与蒸发数据:通过将子流域边界与雨量站点计算得到的泰森多边形边界进行叠置分析,计算每个子流域的平均降雨量和蒸发量。

(3)子流域径流模拟:在获取每个子流域的降雨、蒸发数据以及地形指数分布函数后,利用 TOPMODEL 模型对子流域的降雨径流过程进行模拟,得到每个子流域出口断面的流量过程。

为进一步考虑流域下垫面特征空间分布不均匀性对水文循环过程的影响,对原始 TOPMODEL 模型进行了改进。将原始模型中的植被根系区分为两层,分别考虑植被截留和根系截留两个部分,降水发生后,首先出现植被截留,只有超过植被最大截留能力的部分才能到达地面进入根系区,而蒸发则首先发生在植被冠层,只有在植被冠层水分完全蒸发后,才出现根系区蒸发。

植被对降水的截留能力随植被的种类和季节而变化,截留能力表示为植物叶面积指数的函数:

$$SD = k \cdot LAI$$

式中: SD 表示植被冠层的最大截留量, LAI 表示植被叶面积指数, k 为转换系数,需要利用实测数据进行率定。得到子流域的植被最大截留量后,对子流域实际降水 P 进行订正,可得到子流域的有效降水量 P_a :

$$S_c = S_c + P, P_a = 0 \text{ 如果 } P_a \leq SD - S_c$$

$$S_c = SD, P_a = P - (SD - S_c) \text{ 如果 } P_a > SD - S_c$$

式中: S_c 表示植被中现有的截留水量。经过截留后的有效降雨量 P_a 则进入植被根系区,其计算方法与传统模型一样,不再累述。

在考虑蒸发时,首先考虑植被截留水量的蒸发,当冠层存在截留水分时,冠层蒸发等于潜在蒸发能力,当冠层的截留水分小于潜在蒸发时,剩余蒸发能力将用于土壤根系区蒸发,具体计算方法如下:

$$E_c = E_p \text{ 如果 } S_c > E_p$$

$$E_c = S_c \text{ 如果 } S_c \leq E_p$$

$$E_p = E_p - E_c, S_c = S_c - E_p$$

式中: E_c 表示冠层实际蒸发, E_p 为潜在蒸发。

(4)汇流计算:模型在获得所有子流域断面出口的流域过程之后,再将其通过河网汇流至流域出口断面,河道汇流采用平均洪水波速的方法,从任意子流域出口到达流域出口所经历的时间为:

$$T_{\text{河道}} = \sum_{i=1}^N [L_{ri} / (V_r \cdot \tan\beta_i)]$$

式中: L_{ri} 为河道长度, $\tan\beta_i$ 为 N 段河道中第 i 段的平均坡度, V_r 为平均河道流速。在式中除了河道流速需要通过实际数据进行率定之外, L_{ri} 和 $\tan\beta_i$ 均可以由 DEM 数据直接计算得到。

4 分布式 TOPMODEL 模型的应用

4.1 参数获取

由于子流域下垫面条件不同,因此在进行子流域的降雨径流模拟时,不同子流域的模型参数应能反映出下垫面条件的空间变化。但是在实际应用中,除了地形差异可以利用每个子流域的地形指数分布函数来描述之外,反映植被、土壤条件的模型参数难以通过实际测量获取,只能利用水文资料通过参数率定来确定,随着子流域数目的增加,需要率定的模型参数也越来越多,给模型的实际应用带来了极大的困难。为解决上述问题,就必须获取流域实际下垫面资料,通过建立模型参数与实际下垫面条件之间的关系来减少模型参数数量,降低模型不确定性。

模型中的流域地面覆盖数据包括土地利用类型和 LAI 参数两类,前者用于确定不同植被根系区的最大蓄水容量,后者则主要影响植被降雨截留过程。本文使用的地面覆盖数据是由 MODIS 数据生成的相关产品(MOD12 和 MOD15),均由 [PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 \[www.fineprint.cn\]\(http://www.fineprint.cn\)](http://edcim-</p>
</div>
<div data-bbox=)

swwww. cr. usgs. gov/pub/ims/welcome/下载获取。为进一步简化模型参数,将土地利用类型根据植被根系深度重新划分为林地、灌木和耕地 3 个类别,这 3 种不同土地利用类型的植被根系区最大蓄水容量 SR_{max} 则表示为模型参数,同时,在率定模型参数时,要求满足 SR_{max} 林地 $>$ SR_{max} 灌木 $>$ SR_{max} 耕地的相对关系;MODIS 数据的 LAI 产品是以 8 天为周期的数据,由于受云的影响,LAI 产品中存在无效数据,为消除这种影响,本文对原始 LAI 数据进行了重新处理,将 8 天时间周期的 LAI 序列重新采样成为月平均值。

本文使用的土壤数据是联合国粮农组织 (FAO) 发布的比例尺为 1:500 万的全球土壤数据库,由 http://www.tucson.ars.ag.gov/agwa/fao_soils.html 下载,研究区域中包含典型强淋溶土和

石质土两种类型,如图 3 所示,土壤参数的获取参照了 AGWA 模型的相关内容^[9]。模型中与土壤相关的参数为土壤饱和导水率 T_0 和土壤导水率随土壤深度变化的衰减系数 M ,其中土壤饱和导水率根据土壤质地来确定: $T_0 = P_{粘} \times T_{0粘} + P_{砂} \times T_{0砂} + P_{粉} \times T_{0粉}$

式中: $P_{粘}$ 、 $P_{砂}$ 和 $P_{粉}$ 分别表示土壤中粘质、砂质和粉质的百分比含量,如果子流域中包含多种不同类型的土壤,则通过不同土壤类型的面积加权平均来计算; $T_{0粘}$ 、 $T_{0砂}$ 和 $T_{0粉}$ 分别表示模型中粘质、砂质和粉质三类物质的饱和导水率,需要通过实际资料来进行率定。由于本次研究流域内仅有两类土壤,也可以分别对两类土壤的饱和导水率进行率定,但为使模型更易于在其它流域应用,本文仍采用了前一种方法。

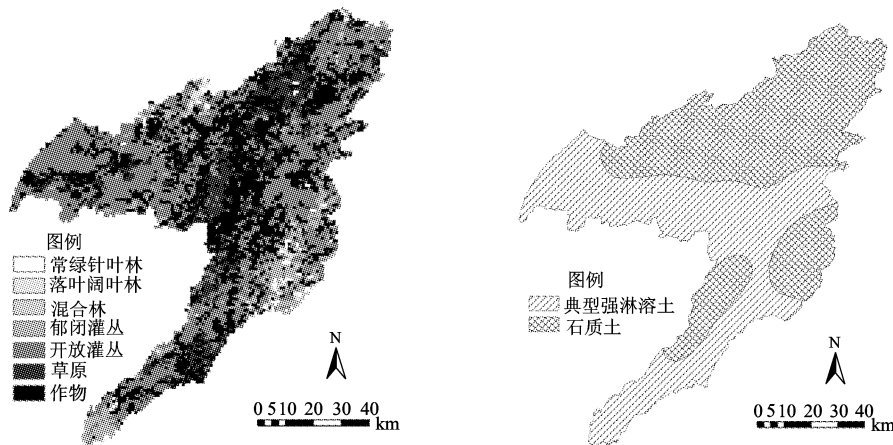


图 3 流域土地利用图与土壤图

Fig. 3 Land Cover and Soil Maps of the Qingjiang Headwater Catchment

由于 FAO 土壤数据库仅有两层土壤数据,很难利用多层土壤资料通过曲线拟合的方法来估算 M 值的相对大小,因此本文直接对流域内所有土壤类型的衰减系数进行率定,随着土壤类型的增加,需要率定的模型参数也相应增多。

4.2 模拟结果分析

由于模型在子流域内部采用的模型参数是平均参数,不再考虑降雨和下垫面特征的空间不均匀性,因此不同子流域划分方法得到的子流域数目不同,对降雨和流域下垫面条件空间不均匀性的反映也有差别,流域划分的越细致,就越能“真实”地反映流域的实际情况,但同时也容易产生更多的虚假子流域,计算时间和后续分析工作量也会大大增加。为讨论子流域划分的详细程度对最终模拟结果的影响,本次研究对研究区域进行 6 种不同的子流域划分,子

流域的数目分别为 3、7、15、25、35 和 47 个。

分布式 TOPMODEL 模型的模拟方法与第二节所述相同,由于所用下垫面数据的比例尺均不相同,因此在模拟过程中,对所有数据均通过重采样生成空间分辨率为 90m 的数据网格后,再进行计算,模型在率定期和验证期的模拟效率如表 2 所示。从表中可以看到,由于分布式 TOPMODEL 模型通过子流域划分考虑了降雨以及流域下垫面条件的空间分布不均匀性,因此在所有子流域划分方式下,模型模拟效率均要好于传统 TOPMODEL 模型,而且随着子流域划分数目的增加,模拟在率定期和效验期的效率也呈上升趋势,但是在子流域个数达到 25 个之后,受流域降雨站点、下垫面数据以及模型本身计算误差所限,继续增加子流域个数并不能提高模型模拟效率。

表 2 不同子流域划分方式的模拟结果
Tab. 2 Simulation Results with Different Sub-Catchment Configurations

子流域个数	3 个	7 个	15 个	25 个	35 个	47 个
率定期效率	0.82	0.86	0.88	0.90	0.91	0.91
验证期效率	0.75	0.78	0.81	0.82	0.83	0.83

表 3 是将流域划分为 35 个子流域时的模型率定参数,图 4 则显示了模型在率定期与校验期模拟的径流过程,从图中可以看到,在率定期和校验期,洪峰过程均能很好的再现。因此,通过对传统 TOPMODEL 模型进行改进,构建基于子流域的松散耦合的分布式 TOPMODEL 模型,并应用流域植被与土壤的实际资料进行模型参数率定可以提高模型效率,模拟结果也与实际情况更加吻合。

表 3 分布式 TOPMODEL 模型率定参数
Tab. 3 Calibrated Model Parameters of the Distributed TOPMODEL

模型参数	率定值	说明
M_{soil1}	0.013	典型强淋溶土壤指数传导函数
M_{soil2}	0.028	石质土壤指数传导函数
$\ln(T_{0粉})$	0.009	粉质土壤有效传导率的自然对数
$\ln(T_{0砂})$	0.015	砂质土壤有效传导率的自然对数
$\ln(T_{0粘})$	0.001	粘质土壤有效传导率的自然对数
SR_{max} 林地	0.05	林地最大蓄水量
SR_{max} 灌木	0.035	灌木最大蓄水量
SR_{max} 耕地	0.025	耕地最大蓄水量
K	0.001 2	植被冠层截留调节系数
SR_{init}	0	根层初始土壤水分亏缺
T	50	时间系数
$V_{子流域}$	2 000	子流域汇流速度
$V_{河网}$	5 000	河网汇流速度

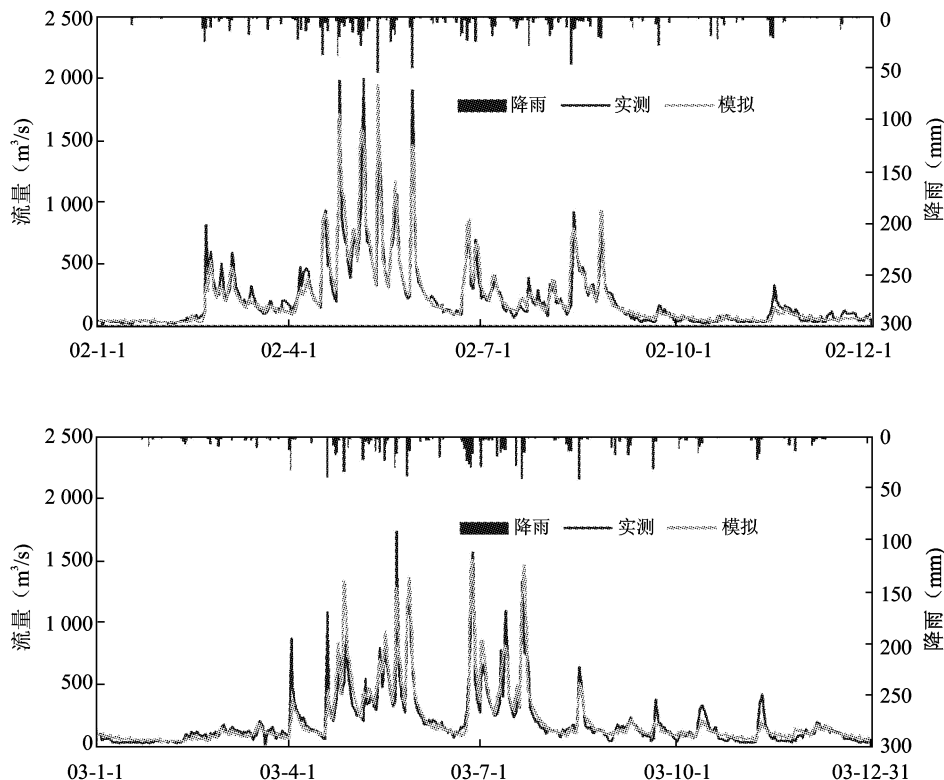


图 4 分布式 TOPMODEL 率定期(2002 年)与校验期(2003 年)模拟结果示意图

Fig. 4 Comparison of the Daily Runoff Observed and Simulated by the Proposed Distributed TOPMODEL in the Calibration (2002) and Validation (2003) Periods

5 结论与讨论

(1) 利用 SRTM 和地形图两种 DEM 数据得到的地形指数和模型率定参数不同,但均可以获得较好的降雨径流模拟结果,作为全球覆盖的免费高分

辨率 DEM 数据, SRTM 数据将极大促进 TOPMODEL 模型的实际应用;

(2) 传统 TOPMODEL 模型未考虑降雨和下垫面的空间不均匀性,影响了在大流域应用时的模拟效果,通过构建基于子流域的松散耦合的分布式 TOPMODEL 模型可较好地解决该问题;

(3)通过建立流域实际下垫面数据与模型参数的关系来进行参数率定可减少模型参数数量,降低模型不确定性,对于大流域而言,相关 MODIS 数据和 FAO 土壤数据均可免费获取,使得模型可以很容易应用于其它地区;

(4)随着子流域数目的增加,模型率定期和校验期的效率函数也呈上升趋势,但是到达一定程度之后,受降雨等输入参数及模型计算误差所限,增加子流域个数不能继续提高模拟效率。

参考文献:

- [1] AMBROISE B, BEVEN K, FREER J. Toward a generalization of the TOPMODEL concepts; topographic indices of hydrological similarity[J]. *Water Resources Research*, 1996, 32: 2 135~2 145.
- [2] 邓慧平, 李秀彬. 地形指数的物理意义分析[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(2): 103~110.
- [3] 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.
- [4] 邓慧平, 李秀彬, 陈军锋, 等. 流域土地覆被变化水文效应模拟——以长江上游源头区梭磨河为例[J]. *地理学报*, 2003, 58(1): 53~62.
- [5] BANDARAGODAA C, TARBOTONA D G, WOODS R. Application of TOPNET in the distributed model intercomparison project[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 298: 178~201.
- [6] XIONG L H, GUO S L. Effects of the catchment runoff coefficient on the performance of TOPMODEL in rainfall-runoff modeling[J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18: 1 823~1 836.
- [7] 吴 波, 张万昌. 基于栅格产汇流的 TOPMODEL[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(5): 661~666.
- [8] LING F, ZHANG Q W, WANG C. Filling voids of SRTM with landsat sensor images in rugged terrain[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(2): 465~471.
- [9] MILLER S N, SEMMENS D J, GOODRICH D C, et al. The automated geospatial watershed assessment tool[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(3): 365~377.

RAINFALL RUNOFF MODELING IN QINGJIANG CATCHMENT WITH DISTRIBUTED TOPMODEL

LING Feng, DU Yun, XIAO Fei, WU Sheng-jun, XUE Huai-ping

(Key Laboratory of Monitoring and Estimate for Environment and Disaster, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China)

Abstract: TOPMODEL, a semi-distributed hydrological model, was applied in the Qingjiang headwater catchment in order to evaluate its performance for rainfall runoff simulation in large catchments. SRTM digital elevation model (DEM) and DEM derived from topographic contours were used for topographic index computation and rainfall runoff simulation. The result shows that although the topographic indexes and calibrated parameters were much different, the simulation efficiencies were almost the same with both DEMs. As a free near-global DEM dataset, SRTM can greatly improve the convenience of TOPMODEL. The limitation of TOPMODEL for rainfall runoff simulation in large catchments was analyzed and a sub-catchment based distributed TOPMODEL was then proposed. In the proposed distributed hydrological model, model parameters were calibrated with the land cover and soil datasets to decrease the number of parameters and the model uncertainty. The impact of sub-catchment partitioning on the simulation efficiency was also discussed to assess the ability of the proposed model for rainfall runoff simulation. The result shows that the proposed model yielded a higher efficiency than the traditional model as it reduced the effect of the spatial heterogeneity of rainfall and underlying surface properties on rainfall runoff modeling. Moreover, the simulation efficiency increased with more sub-catchments until reached the maximum efficiency, which can not be improved by adding the number of sub-catchments as the uncertainty of model inputs and the model structure.

Key words: TOPMODEL, digital elevation model, distributed hydrological model, Qingjiang catchment