

改进型 TOPMODEL 在不同尺度和气候条件流域上的适用性研究

黄 晴¹, 张万昌^{2,3}

(1. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093; 2. 中国科学院大气物理所东亚区域气候—环境重点实验室, 全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029; 3. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

摘 要: 在阐述 TOPMODEL 基本原理的基础上, 针对现行 TOPMODEL 地形指数计算方法、产流机制、汇流方式 3 个方面进行了改进, 并将改进后的模型在小尺度湿润的子午河流域和中尺度半干旱的马莲河流域进行了模拟测试。在模拟过程中, 定量分析了模型模拟的各个水文过程变量, 探讨和揭示了该模型在不同尺度和不同气候条件流域上的适用能力。研究结果表明, 改进后的 TOPMODEL 能够准确地表达实际流域关键地形参数的空间分布特征, 客观地描述流域水文过程的内在机理。该模型在小尺度湿润流域测试效果较好, 在中尺度半干旱流域虽然精度相对较低, 但仍然能够模拟和解译大部分的水文机制。

关键词: 地形指数; TOPMODEL; 产流; 汇流; 水文过程; DEM

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2008)05—0048—07

中图分类号: P334⁺.92

Application and Examination of Improved TOPMODEL in Two Watersheds with Different Scales and Climatic Conditions

HUANG Qing¹, ZHANG Wan-chang^{2,3}

(1. International Institute of Earth System Science, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;

2. START Regional Center for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, CAS,

Beijing 100029, China; 3. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: On the basis of introduction to the basic theory of TOPMODEL and in view of topographic index algorithm, runoff generation mechanism, and flow confluence method utilized in the current TOPMODEL, we present an improved TOPMODEL for overcoming several problems met in watershed hydrologic modeling as current TOPMODEL is used. For investigating and examining the applicability of the model in different watershed scales and different climatic conditions, the improved TOPMODEL is applied and examined for two different typical watersheds, namely the small-scale Ziwu River watershed in humid area and the medium-scale Malian River watershed in semi-arid area, with the research focus mainly on quantitative analyses of the hydrological processes. The study indicates that the improved TOPMODEL can accurately express the spatial distribution characteristics of the important topographic parameters of real watershed and objectively describe the inner mechanism of watershed hydrological processes. The improved TOPMODEL gives rise to better testing results in small-scale humid watershed. Though a relatively lower accuracy of simulation is obtained in medium-sized semi-arid watershed, the improved TOPMODEL can still simulate and interpret the most mechanisms of hydrological processes of the watershed.

Key words: topographic index; TOPMODEL; runoff; conflux; hydrological process; DEM

1979 年由 Beven 和 Kirkby 首次提出的 TOPMODEL (topography based hydrological model) 是一个

以地形为基础的半分布式水文模型^[1]。近 30 a 来, 该模型在水文模拟、生态监测、气候变化、地球物理化学

收稿日期: 2008-04-19

修回日期: 2008-04-29

资助项目: 中国科学院“百人计划”择优支持项目(8-057493); 国家重点基础研究发展规划 973 项目(2006CB400502, 2001CB309404); 面向 TIGGE 的集合预报关键应用技术研究(GYH Y200706001)

作者简介: 黄晴(1982—), 男(汉族), 湖南省岳阳市人, 硕士研究生, 主要从事遥感与地理信息系统及其在水文学中的应用研究。E-mail: huangqing902@163.com。

通信作者: 张万昌(1966—), 男(汉族), 河南省永城县人, 研究员, 博士生导师, 主要从事遥感与地理信息系统水文水资源研究。E-mail: zhangwc@tea.an.cn。

等领域得到了广泛的应用与发展^[2-4],并随着国内外学者对该模型的研究和应用,该模型的理论 and 结构一直在发展之中^[5]。然而,目前国内外关于 TOPMODEL 的绝大部分研究还仅局限于几百平方米到几百平方公里的小尺度流域,对几千平方公里到上万平方公里的大中型流域的实际应用还很少^[6-7]。同时,该模型的模拟运用大多集中在湿润、半湿润地区,而对于半干旱、甚至干旱地区的适应性实例研究并不多见。例如在我国西北内陆干旱区,仅陈仁升^[8]等在黑河流域进行过 TOPMODEL 的尝试性模拟和测试。

此外,在水文模型与陆面过程模式耦合研究领域,由于 TOPMODEL 较好地考虑了水文过程中地形对土壤湿度分布、地表径流量、蒸散发大小及空间分布的影响,所以有可能将其概念耦合到陆面模式中去。同时, Warrach 等^[9]也指出,由于 TOPMODEL 能够简单而定量地刻画地形对次网格土壤含水量空间分布的影响,而且需要率定的参数少,这就使得 TOPMODEL 与陆面模式耦合的能力很可能要优于 VIC 模型,这个结论坚定了很多学者实现大尺度 TOPMODEL 概念模型与陆面模式成功耦合的信心^[10]。

因此, TOPMODEL 在不同尺度和气候条件流域上的表现如何,是一个值得深入研究和分析的关键问题。拓宽 TOPMODEL 研究区域的尺度范围,探讨 TOPMODEL 在不同气候条件下的适用能力,这不仅对 TOPMODEL 本身模式的理论发展而且对陆面水文过程的实际应用等都具有相当重要的科学价值。

1 改进型 TOPMODEL 的模型构建

1.1 TOPMODEL 基本原理

基于重力排水作用下径流沿坡向运动的原理, TOPMODEL 采用数字地形信息来模拟水流的运动趋势及径流产生的变动产流面积。它以水量平衡原理和 Darcy 定律为理论依据,以 3 个重要假设为模型简化的条件,充分考虑地形对产流源面积的形成和动态变化的影响,有效地反映出流域饱和和缺水量的空间变化^[1-4]。

TOPMODEL 对基于地形的基本产流原理为:

(1) 首先在单元坡面上将土壤纵向分为非饱和层和饱和层,其中非饱和层包括根带蓄水层,非饱和蓄水层;(2) 降水在满足冠层截留,填洼等以后,进入非饱和层,入渗的降水先对根带蓄水层进行补偿,多余的降水将进入非饱和蓄水层,同时,贮存在该层土壤中的水以一定的速率蒸发;(3) 在非饱和蓄水层中,一部分水将通过土壤空隙进入饱和层,由于垂直排水和流域内侧向水分运动,流域部分面积地下水位抬升至

地表面成为饱和面。TOPMODEL 的地面产流只发生在这种饱和地表面上,随着饱和面上降水过程的不断变化,饱和源面积也不断变化,亦称变动产流面积。在变动产流面积概念中,饱和坡面流将在土壤传导性差,坡面平缓的饱和坡面上产生,而壤中流则在饱和层的土壤中产生。

TOPMODEL 模型主要通过计算流域的缺水量来确定源面积的大小和位置,含水量的大小主要由地形指数计算。计算中主要运用了水量平衡原理和 Darcy 定律,并利用 3 个重要假设对模型进行简化。

(1) 假设一:流域存在一个稳定供水的饱和层面积

(2) 假设二:土壤的水力传导度与缺水深呈指数递减关系

$$T_i = T_0 \exp(-D_i / SZM) \quad (1)$$

式中: D ——饱和缺水深度; T_0 ——土壤饱和和水力传导度; SZM ——模型参数(土壤下渗率的衰减指数),其物理意义相当于土壤剖面图中的有效深度;

(3) 假设三:饱和面积上的水力梯度近似于表面地形坡度,这个假设比较符合饱和和地下水的实际情况,但对于地表径流不适应,应将地表和地下径流分开计算。由 Darcy 定律,任意点地下径流可表示为

$$q_i = T_i \tan i = aj \quad (2)$$

式中: $\tan i$ ——该点的地表坡度; T_i ——土壤水力传导率; q_i ——单宽地下径流量; a ——单位等值线的汇水面积; j ——单位面积上的流量。

联立公式(1)和(2),可以得到

$$D_i = -SZM \times \ln(aj / T_0 \tan i) \quad (3)$$

$$\bar{D} = \frac{1}{A} \int A_i [-SZM \times \ln(aj / T_0 \tan i)] \quad (4)$$

通过假定 j 和 T_0 在空间上均匀分布,由公式(3)和(4),可得到如下方程

$$(\bar{D} - D_i) / SZM = \ln(a / \tan i) - m \quad (5)$$

式中: \bar{D} ——流域的平均缺水深度; A_i ——缺水深为 D_i 时的面积; A ——全流域面积; $\ln(a / \tan i)$ ——地形指数; m ——地形指数均值。公式(5)即为 TOPMODEL 原理的核心方程。

1.2 对现行 TOPMODEL 的改进

现行的 TOPMODEL 虽然在流域地形特性和地表水文过程之间建立了客观存在的重要关联,但在功能上它仅仅局限于描述小尺度流域山坡水文特征,加上其计算流程仍然存在一些与实际情况并不相符的表达,因此直接将 TOPMODEL 在不同流域进行实地测试的方法是不严谨的,其实验结果的可信度也不高。本文首先对现行 TOPMODEL 的地形指数计算

方法、产流机制、汇流方式 3 个方面分别进行了改进,然后将改进型 TOPMODEL 在实际流域中进行验证、分析,从而将 TOPMODEL 模型概念拓展到中尺度半干旱流域中去,以探讨和揭示该模型在不同尺度和不同气候条件流域上的适应性。

1.2.1 地形指数计算方法改进 地形指数 $\ln(a/\tan)$ 是流域径流源面积和地下水水位空间分布特征的近似表征,是 TOPMODEL 模拟计算的核心参数。TOPMODEL 正是通过地形指数在现实的地形特征信息与流域变源产流机制之间建立了重要的联系和纽带。不同计算方法得到的地形指数空间分布将对 TOPMODEL 径流模拟产生影响,探寻更加符合水文过程机理的地形指数计算方法具有重要的理论意义和实际应用价值。

目前出现的地形指数的计算方法中使用最普遍的是单流向算法(SFD)和多流向算法(MFD)。大量研究表明,MFD的计算结果要比SFD精确,得到的地形指数空间分布也更能反映流域内DEM栅格的水文相似性。然而现行的多流向算法本身仍然存在很多缺陷,有待进一步改良。因此,本文采用了雍斌和张万昌等^[11]提出的地形指数新算法,该方法对Quinn等^[12]于1991年提出的多流向算法进行了以下3点主要改进工作:(1)利用几何锥面内切圆算法^[13]对流动累积分配中的有效等高线长度进行了精确计算,弥补了传统多流向算法对有效等高线主观估计的缺陷^[12,14]。主方向上有效等高线权重确定为0.577,对角方向为0.379;(2)改进了传统的地形指数中单位等高线汇流面积 a 的计算公式^[15];(3)增强了算法对异常栅格(凸凹和平坦区域栅格)的处理能力^[16]。

上述多流向新算法仅从地形指数DEM栅格计算原理的角度对现行MFD进行了改良,并没有考虑算法应用到TOPMODEL模型中可能遇到的技术问题。然而在实际流域中,对于河道的栅格,其汇水面积包含了河道两边坡面汇流面积以及该栅格以上的汇流面积,如果不将河道部分栅格进行处理,将会增加流域的平均地形指数及其高值部分的栅格数,从而使得地形指数的分布函数发生变化。也就是说新算法没有考虑实际应用中,河道对于地形指数的影响。本文则通过设置上游累积积水面积的上限值的方法来消除河道影响,对于汇流面积大于该上限值的网格,在计算地形指数时,汇流面积取该上限值。该上限值就是生成河道的起始临界值(channel initiation threshold,CIT),汇流面积大于该上限值的网格被定义为河道^[17]。本文对不同研究区进行地形指数的计算时,均以改进型多流向算法为基础,同时剔除了河道影响。

1.2.2 产流机制改进 现行TOPMODEL采用集总式的产流计算方法,认为地形指数相同的地方其水文响应相同。计算时,把地形指数分成若干类,产流计算都集中在地形指数类上,这种半分布式的模拟方法忽视了地形指数空间分布的异质性,与实际情况不能严格吻合。

在现行TOPMODEL原理的基础上,本文以VC为平台,构建了一个在栅格上计算产流的TOPMODEL模型。该模型将地形参数的输入由原先的地形指数分类值转换为每个栅格上的地形指数空间分布,可以在每一个DEM栅格单元上进行产流计算。改进后的基于栅格的TOPMODEL模型产流计算流程如图1所示。

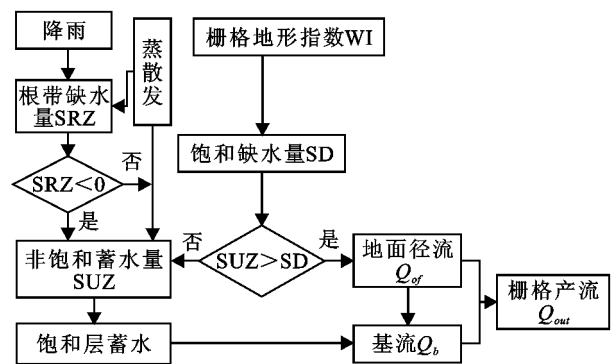


图1 改进的TOPMODEL产流计算流程图

1.2.3 汇流方式改进 在汇流方面, TOPMODEL通常采用等流时线的集总式汇流方法,这种汇流方式认为,在某个时间段内流域内到达出水点的面积由流域内任意点到出水点的距离所决定,这就假定了全流域汇流速度是均定的^[18]。然而,这样的假设与实际是不完全相符的,因为单元栅格内地形坡度,粗糙度等各不相同,这对汇流速度都将产生影响。

因此,本文采用了熊立华^[19]等提出的经验公式来计算每个栅格上净雨流经栅格所需要的时间,从而考虑各个栅格坡度不同对流速产生的影响。也就是说坡度越陡,水流流速越大,汇流时间越短;相反,坡度越小,流速就越小,汇流时间就越长。其中,第 i 个栅格的汇流时间计算公式如下

$$t_i = V / (a \times \text{slop}^b) \quad (6)$$

式中: a ——参数,具有速度量纲; b ——幂指数,反应坡度对流速影响的大小。当 $b=0$ 时,相当于假设全流域平均,与坡度无关。参数 a 和 b 的确定方法主要有两种,一是通过水文学方法直接测定,另外一种方法是通过水文学中的单位线理论来间接测定。通常情况是采用水文学方法,利用人工或自动优选方法率定参数值。

计算得到每个栅格的汇流时间后,再根据生成的时间,计算每个汇流路径上,各个栅格到出水口的总汇流时间。其主要方法是根据流向文件,从出水口的栅格出发,运用深度优先算法依次遍历每个栅格,直到所有的栅格遍历完全。汇流栅格遍历算法如下:(1) 设出水口栅格汇流时间为 $t_i = 1$; (2) 搜索出水口周围的 8 个栅格,对于属于流域范围内的栅格进行第 3 步处理;(3) 利用流向文件,判断周围 8 个栅格中流入当前栅格的栅格,设该栅格为 i ,则第 i 个栅格的汇流时间为: $t_i = t_i + t_j$ 。其中 t_i, t_j 分别为流入当前栅格的栅格到出水口的汇流时间和该单个栅格的汇流时间, t_j 为当前栅格到出水口的汇流时间。

2 研究区介绍及数据准备

本文用来实验验证的两个对比研究区为:小尺度湿润的子午河流域和中尺度半干旱的马莲河流域。子午河流域位于汉江上游地区,控制站点为两河口水文站(33°16' N, 108°04' E),集水面积为 2 816 km²,海拔范围为 360~2 960 m,年平均气温为 7.7~15.7℃,年降水量为 730~1 230 mm。夏季温暖湿润,冬季寒冷干燥。土壤类型主要有黄褐土、黄棕壤、山地棕壤和水稻土。主要植被为华山松、油松和栎等乔木树种。

马莲河流域位于陇东黄土高原,东邻北洛河,北接苦水河,西北与清水河流域相邻,流域面积 19 019 km²。流域深处大陆,为典型的半干旱气候,冬季干旱少雨,夏季多暴雨。年降水量在 350~600 mm 之间,主要集中于夏、秋汛期季节的 5—9 月,冬春季降水稀少。流域内植被覆盖度低,水土流失严重,水文上具有水少沙多的特性。

模型运行需要的相关数据。(1) 气象数据。主要包括流域内的降水和蒸散发数据,子午河流域资料来源于流域内各个气象站点 1981—1985 年的实测日步长数据;对于马莲河流域,由于半干旱区的降水相对较少且空间分布不均匀,因此为了获取更精确的降水数据。本文选用了该流域内的 83 个降水站点和 7 个蒸发站点 1983—1984 年的实测日步长数据,气象站点空间分布如图 3 所示。(2) 水文数据。子午河流域来源于两河口水文站 1981—1985 年的实测日步长流量数据;而马莲河流域源于雨落坪水文站 1983—1984 年的实测日步长流量数据。(3) 地形数据。USGS 发布的 SRTM—DEM 数据,利用改进的多流向算法计算地形指数空间分布(图 2)。

3 模型运行及其结果分析

本文中所构建的改进型 TOPMODEL 模型中,涉及的需要率定参数包括:土壤下渗率的衰减指数 SZM,其物理意义相当于土壤剖面图中的有效深度(m);土壤饱和水力传导度 T_0 (m²/h);根带土壤最大的缺水量 SR_{max} (m);根带土壤饱和缺水量初值 SR_0 (m)。对子午河流域和马莲河流域模拟,模型需要率定的主要参数如表 1 所示,模拟结果如图 3 所示,模拟过程中的水文过程变量分布见图 4。

表 1 子午河流域和马莲河流域参数率定结果

参数	子午流域率定值	马莲河流域率定值
SZM/m	0.007 8	0.001 0
T_0 /(m ² ·h ⁻¹)	2.250 0	5.200 0
SR_{max} /m	0.020 0	0.001 6
SR_0 /m	0.001 8	0.000 9

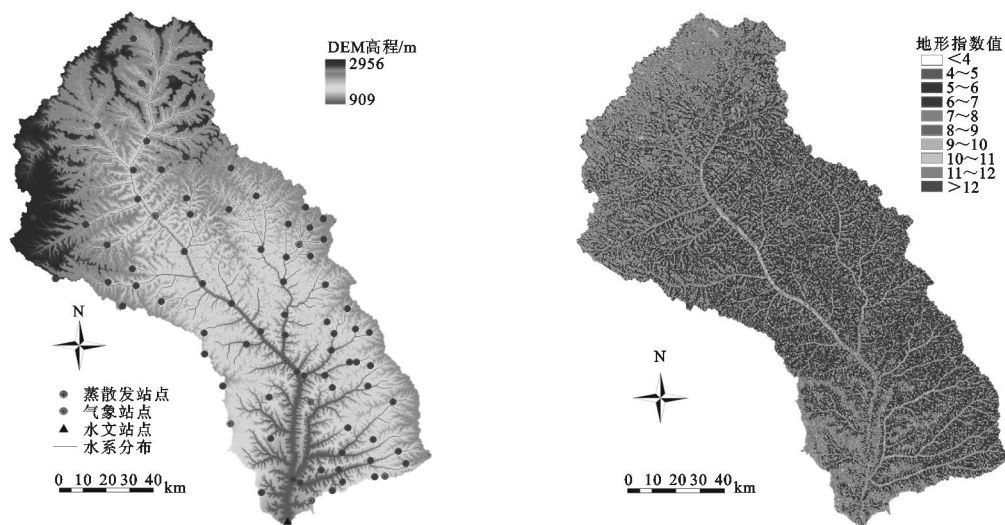


图 2 马莲河流域基本资料及地形指数计算结果

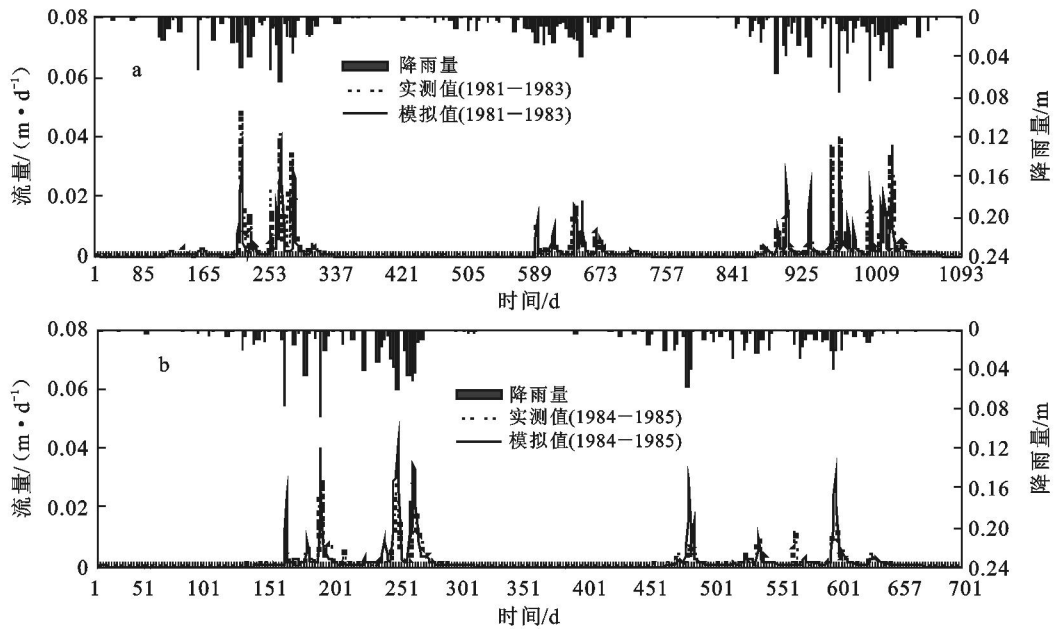


图3 子午河流域率定期模拟结果(a)及验证期模拟结果(b)

本文对模拟结果的评价主要采用 Nash 模型效率系数(确定性系数)来确定^[20]。Nash 系数的定义表达方式如下

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{sim})^2} \quad (7)$$

式中: $Q_{obs,i}$ —— 实测流量; $Q_{sim,i}$ —— 模拟流量; \bar{Q}_{sim} —— 实测流量均值; n —— 模拟的时段数。确定性系数越接近于 1, 表明模型效率越高。

从确定性系数来看(图 3), 在 1981—1983 年率定期模型的效率达到了 77.8%, 用率定期参数在 1984—1985 年对模型进行了验证, 验证期的精度达到了 68.7%。模拟结果表明, 改进的 TOPMODEL 模型总体上能够比较准确地捕捉洪峰出现的时间。但是也有个例, 如在率定期 1982 年 9 月出现了模拟流量显示洪峰出现, 而实测流量没有出现洪峰现象。从降水的分布上来看, 洪峰出现当天, 有强降水现象出现(相对于当年状况, 这是最强的一次降水), 从模型的计算上看, 这有可能就是当天的洪峰。相似的状况在验证期也有出现, 1985 年 8 月出现实测数据有洪峰而模拟结果没有出现洪峰的现象, 并且降水数据显示当天有大量的降水。从洪峰的模拟量来看, 率定期模拟的洪峰偏小, 而在验证期洪峰量都偏大。分析原因可能是 1983 年和 1985 年降水量相对于其它年份都比较少, 1983 年的降水分布相对集中, 而 1985 年降水分布相对分散, 模型计算时中存在预热调整期, 较长时段的干旱对土壤水量变化以及地下水位的

变化产生较大影响。同时, 上述现象出现的原因还可能是数据源本身存在不确定性, 率定的参数在追求最优化的过程中, 存在着彼此削长的现象。

由图 4 可见, 模型将径流分为地表径流和地下径流, 降雨期间, 流域产流以地表径流为主, 在少雨期间, 主要是地下径流。地表径流通常起伏变化较大, 而地下径流则比较平稳, 起伏不明显。在蒸散发的模拟上, 一般认为蒸散发会在降雨过后几天达到最大值, 因为降雨过后, 土壤含水量增加, 表层土壤可以提供充足水分, 实际蒸散发接近潜在蒸散发。从模拟的图上看, 这个与实际情况相符。流域土壤平均缺水深度是模型非常重要的一个动态参数, 它控制着地表产流的计算, 并随着降雨量和蒸散发量的变化而变化, 当土壤的含水量超过平均缺水深度时, 多余的水文以地表产流的形式流走, 土壤饱和时, 含水量稳定在一个水平上, 当降水量减少, 蒸散发增加后, 土壤含水量以一定的速率逐渐减少。表 2 给出了模拟的各个水文过程变量的分布, 从各个变量的值来看, 径流总量与蒸散发总量之和与降水总量基本保持平衡, 从一定程度上验证了模型的水量平衡理论。

表 2 子午河流域 1981—1983 年模拟的各个水文过程变量值分布

项目	地表径流	地下径流	蒸散发	降水
模拟值	0.972	0.763	1.312	3.022
总计		1.735	1.312	3.022

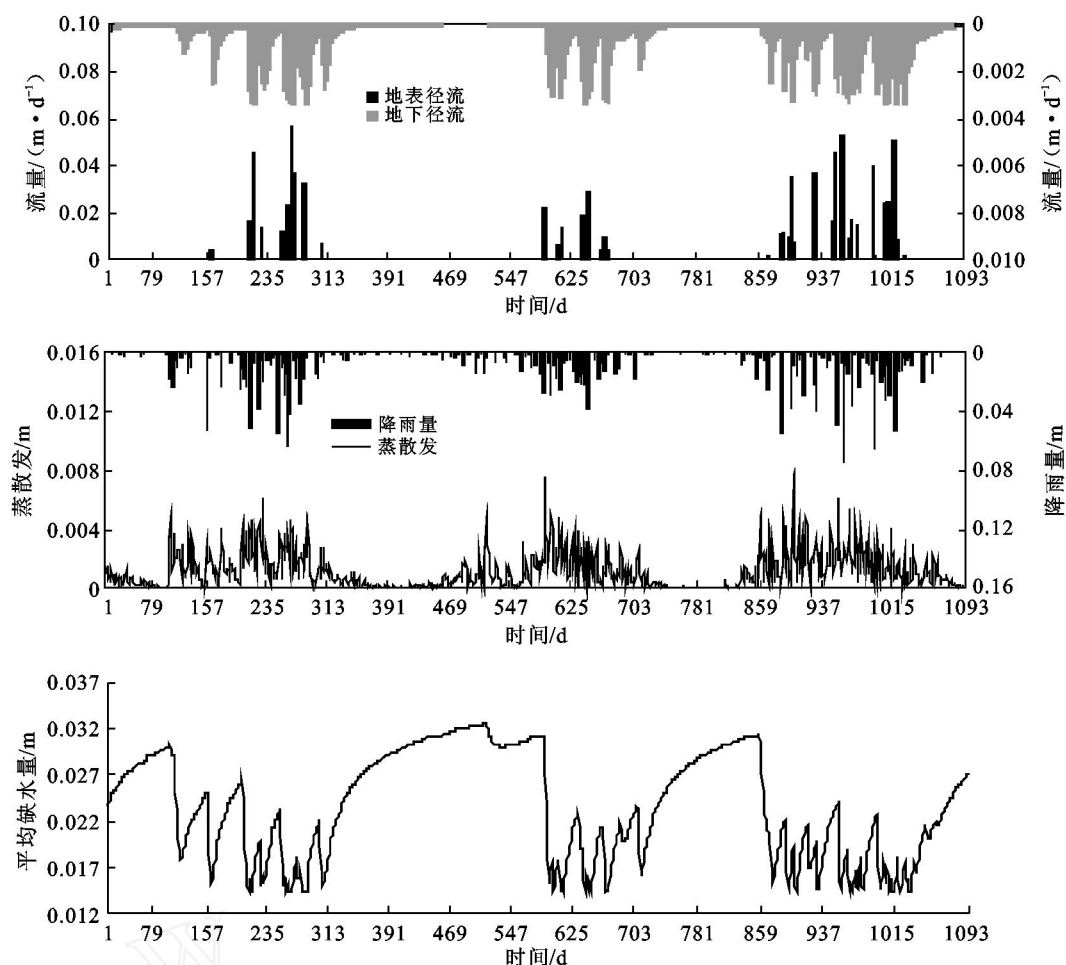


图 4 子午河流域 1981—1983 年连续日地表径流和地下径流模拟值 (a), 连续日降水量和日蒸发模拟值 (b), 土壤平均缺水深度变化图 (c)

通过对马莲河流域率定期和验证期模拟, 结果发现其模拟效果一般, 但是模型能够模拟和解译该流域大部分的水文机制, 能够反应流域的水文现象和过程。率定期和验证期, 在 4 月份之前, 模型经历了较长的一段干旱期, 模拟效果较差, 但是在进入夏汛期后, 模型总体模拟效果可以接受, 能够基本抓住洪峰出现时间, 但是对于洪峰量的模拟上有所偏差。这可能是由于随着流域面积的扩大, 径流的非线性程度增大, 加密的降雨和蒸发观测站点数据计算结果仍与实际有较大偏差。

同时, TOPMODEL 所采用的蓄满产流方式对于以超渗产流为主的干旱半干旱地区的流域水文过程模拟的适应性不强, 因而模拟的误差较大。

除此之外, 资料显示, 该地区在夏秋季节出现大强度暴雨的频率大; 人类活动频繁, 工程建设和生产活动中不合理用水, 破坏了地下储水结构以及地表环境, 也同时破坏了区域水平平衡和水文循环, 造成区域水量损失, 导致地下水位下降, 井枯河干, 这些都是潜在原因^[21]。

4 结论

(1) 改进的 TOPMODEL 能够准确表达实际流域关键地形参数的空间分布差异, 能客观地描述水文过程内在机理, 模型运行总体效果良好。模型从集总式计算拓宽到基于栅格的分布式计算, 模型的模拟次数显著增加, 但改进后的模型无论从理论上还是实际流域的测试都表明这种改进有利于进行比较精确的产流计算。

(2) 将改进的 TOPMODEL 分别在不同气候条件, 不同尺度的流域上进行了验证。在小尺度湿润区子午河流域, 模型总体模拟效果较好; 在中尺度半干旱区的马莲河流域, 虽然总的模拟精度不是很高, 但是模型能够模拟和解译该流域大部分的水文机制。改进型 TOPMODEL 在中尺度半干旱流域的推广和应用有利于将 TOPMODEL 概念模型运用到大尺度陆面水文过程中去。本研究还表明, TOPMODEL 所采用的蓄满产流方式对于以超渗产流为主, 植被覆盖度较差的干旱半干旱地区的实际应用的效果不理想, 在今后研究中, 需要进一步改进 TOPMODEL 这种

单一的产汇流机制,提高其在更大流域,更加复杂气候条件下的模拟效果,促进 TOPMODEL 模型与陆面过程模式的有效拟合。

(3) 改进的 TOPMODEL 的产汇流计算能够从一定程度上反映流域水文过程的内在机理,但在实际中,下垫面的植被分布,土地利用状况,地面粗糙度,以及人类活动等,都对水文模拟产生重要影响。基于 GIS 和 RS 技术,分析探讨这些因素对陆面水文循环过程的影响是分布式水文模型的发展目标之一,而本文所构建的改进的 TOPMODEL 为实现该目标提供一个比较典型的研究平台。

致谢:本文在写作过程中得到了雍斌博士的悉心指导以及吴波硕士的大力支持和帮助,在此表示诚挚的感谢。

[参 考 文 献]

- [1] Beven K J, Kirkby M J. A physically based variable contributing model of basin hydrology [J]. Hydrological Sciences Bulletin, 1979, 24(1): 43—69.
- [2] Beven K J, Kirkby M J, Schofield N, et al. Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three U. K. catchments [J]. Journal of Hydrology, 1984, 69: 119—143.
- [3] Wolock D M. Simulating the variable-source-area concept of stream flow generation with the watershed model TOPMODEL [M]. U. S. Geological Survey: Water Resources Investigation Report. Kansas: Lawrence, 1993:93—4124.
- [4] Ambroise B, Freer J, Beven KJ. Towards a generalization of the TOPMODEL concepts: topographic indices of hydrological similarity [J]. Water Resource Research, 1996, 32: 2135—2145.
- [5] Zhang W C, Li X, Cheng G D. An experimental study of TOPMODEL on a small mountainous watershed in North-western China [C]. Proceedings on Science and Technology Conference Between Mainland China and Chinese Taipei, 2002:26—35.
- [6] Beven K J. Rainfall-Runoff Modelling: The Primer [M]. Chichester: John Wiley, 2001.
- [7] 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.
- [8] 陈仁升,康尔泗,杨建平,等. 内陆河流域分布式水文模型:以黑河干流山区流域为例[J]. 地球科学进展, 2003, 18(2): 198—205.
- [9] Warrach K, Stieglitz M, Mengelkamp H T, et al. Advantages of a topographic controlled runoff simulation in a soil-vegetation-atmosphere transfer model[J]. Journal of Hydrometeorology, 2002, 3: 131—148.
- [10] 雍斌,张万昌,刘传胜. 水文模型与陆面模式耦合研究进展[J]. 冰川冻土, 2006, 28(6): 961—970.
- [11] 雍斌,张万昌,陈艳华. TOPMODEL 中地形指数 $\ln(\frac{1}{\tan})$ 的新算法及分析[J]. 地理研究, 2007, 25(1): 37—45.
- [12] Quinn P, Beven K J, Planchon O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models [J]. Hydrological Processes, 1991, 5(1): 59—79.
- [13] Giuseppe M, Aurella S. Information content theory for the estimation of the topographic index distribution used in TOPMODEL [J]. Hydrological Process, 1997, 11: 1099—1114.
- [14] Wolock D M, Gregory J, McCabe J. Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL [J]. Water Resource Research, 1995, 31(5): 1315—1324.
- [15] 孔凡哲,芮孝芳. 基于地形特征的流域水文相似性[J]. 地理研究, 2003, 22(6): 709—715.
- [16] Beven K J, Quinn P, Lamb R, et al. TOPMODEL and GRIDATB, A users guide to the distribution versions(94. 01) [C]// Tech. Rep. TR110/94. Lancaster, England, 1994.
- [17] 邓惠平,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.
- [18] 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.
- [19] 熊立华,彭定志. 基于数字高程模型的等流时线的推求与应用[J]. 武汉大学学报:工学版, 2003, 36: 1—3.
- [20] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models [J]. J. Hydrol, 1970, 10: 282—290.
- [21] 泾河流域数据中心. 泾河流域自然状况 [EB/OL]. (2006-10-5) [2008-04-01]. <http://cless.bnu.edu.cn/portal/lpdata/data>.