

文章编号 :1671 - 683X(2002)04 - 0082 - 05

TOPMODEL 模型探讨

刘青娥¹, 左其亭²

(1. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072; 2. 郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002)

摘 要:从 TOPMODEL 的基本假设分析入手, 讨论了该模型的物理概念和模型总体结构, 同时比较了它与传统集总式模型和分布式水文模型的差别, 指出 TOPMODEL 模型比传统水文模型对实际水文过程的模拟更贴切, 更易于实现数据的更新, 又比分布式水文模型结构简单, 优选参数少, 便于使用; 目前国内外 TOPMODEL 模型理论及应用的发展大多集中在参数的变化和基本方程的形式上, 需要进一步研究一些理论问题, 如具体应用时模型微结构的调整、地形指数计算方法等。

关键词: TOPMODEL; 变产流面积; 水文模型

中图分类号: P 343; TV 121 **文献标识码:** A

出于考虑气候变化和人类活动影响的水文水资源研究需要, 流域水文循环系统模拟已经从集总式扩展到分布式或者半分布式结构/参数的非线性系统^[1, 2]。分布式水循环模型的开发不仅需要单元的水文物理机制支撑, 而且需要获得大量的流域空间分布数据信息支持。目前国内外开发的分布式水文模拟技术最主要的特点是: 将水文物理模型或者概念性模型或系统模型与数字高程模型(DEM)相结合, 与地理信息系统(GIS)与遥感信息(RS)集成, 以充分提取流域许多重要水文特征参数信息, 如坡度、坡向、水沙运移方向、汇流网络、流域界线等^[3~5]。利用 GIS 和 RS 工具, 揭示自然变化和人类活动影响下的流域水循环规律^[6]。

1979 年, Beven 和 Kirkby 提出了以变源产流为基础的 TOPMODEL 模型(TOPgraphy based hydrological MODEL)。TOPMODEL 模型是一个以地形为基础的流域水文模型, 用地形指数反映下垫面空间变化, 模拟变动产流面积的概念。经过近 30 年的发展, TOPMODEL 在世界各地得到了广泛的应用, 同时也暴露出了一些问题^[7]。许多水文学者针对这些问题进行了研究。

本文试图对这些有关研究进行讨论, 并从 TOPMODEL 的理论基础和基本结构出发, 比较了它与传统集总式模型和分布式水文模型的异同

点, 旨在推动 TOPMODEL 的发展, 为变化环境下水文循环模拟的研究开拓一些思路。

1 TOPMODEL 的理论基础

1.1 流域变源产流特性

TOPMODEL 的基础是变动产流面积的概念。流域降水满足冠层截留和填洼等初损以后, 下渗进入土壤包气带, 包气带分为土壤水带、中间带和毛细水带(见图 1)。只有包气带的含水量达到田间持水量后, 多余的水分中才有一部分以重力水的形式, 通过大空隙直接进入饱和和地下水层, 所以入渗没有马上引起地下水位抬升至地表面^[8]。

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含水量时, 此时土壤中的水都变成自由水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, 一部分流域面积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的地表面积或者叫做源面积上, 如图 2 所示。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。流域源面积的位置受流域地形和土壤水力特性两个

收稿日期: 2002 - 07 - 05; 修订日期: 2002 - 09 - 03

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目(CX10G - E01 - 08/KZCX2 - SW - 317); 河南省科技攻关项目(0224660030); 河南省软科学基金资助项目(0213010900)

作者简介: 刘青娥(1979 -), 女, 湖北省枣阳市人, 武汉大学硕士研究生。

万方数据

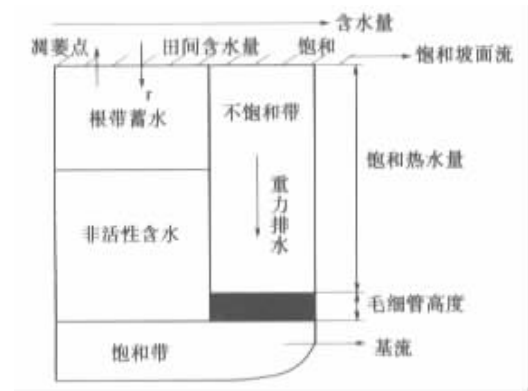


图 1 模型结构水分运动示意图

Fig.1 A simple version of the vertical storage elements

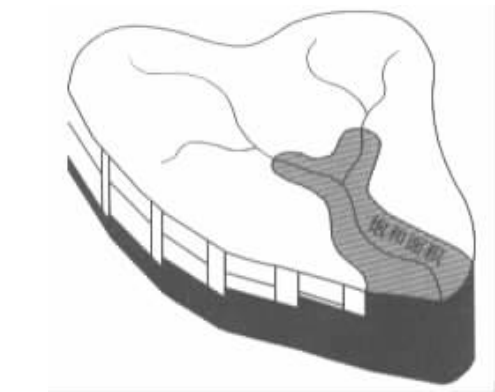


图 2 地形指数分布预测源面积示意图

Fig.2 Schematic diagram of prediction of saturated area using increments of the topographic index distribution

因素的影响.饱和面积的土壤水力传导性差、坡面平缓、坡形辐合,一般位于河道附近.随着下渗的持续,饱和面积向河道两边的坡面延伸.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,在一定意义上,变动产流面积可看作河道系统的延伸.

1.2 模型的基本方程及假设

TOPMODEL 通过土壤含水量来确定源面积的大小和位置.定义缺水量 D 为饱和含水量与土壤含水量之间的差值. $D \leq 0$ 的面积即为饱和源面积.含水量计算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,推导出水流带通用连续性方程式^[9]:

$$a \frac{\partial j}{\partial x} - \frac{\partial D}{\partial t} = i - j, \tag{1}$$

式中: i 为降水强度; j 为产流率; x 为沿最陡坡向的曲线水流路径; a 为系数.

为了求解式(1),首先假定:饱和面积上的水力梯度近似于表面地形坡度 $\tan\beta$.一般情况下,潜水面不是水平的,而是向排泄区倾斜的曲面.起伏

大致与地形一致而较缓和^[8].所以这个假定比较符合饱和地下水的实际情况.但饱和和表面上的地表径流情况却不一样,因此,模型中将地表、地下径流分开进行计算.

其次,假定土壤的传导度是缺水量的指数衰减函数.在绝大多数情况下,地下水的运动都符合达西线性渗透定律^[8].因此,对地下径流可写成:

$$q = \tan\beta f(D) = \tan\beta T_0 e^{-D/m} = aj, \tag{2}$$

式中: T_0 为土壤刚饱和时的传导度 m^2/h ; m 为模型参数.

根据式(2),得流域内每一点缺水量与流量的关系^[9]为

$$D_i = m \ln\left(\frac{aj}{T_0 \tan\beta}\right), \tag{3}$$

在整个对地下水位有贡献的流域面积上,对式(3)积分可得

$$\bar{D} = \frac{1}{A} \sum_i A_i \left[-m \ln\left(\frac{aj}{T_0 \tan\beta}\right) \right]. \tag{4}$$

第三个假设也是最关键的假设,即产流也即单位面积上的流量在空间上均等.为了得到方程的一致解,还必须假定降雨补给 i 和 $\partial D/\partial t$ 项在空间上不变.如此,联立式(3)和式(4),便可得出模型的基本方程:

$$\frac{\bar{D} - D_i}{m} = \left[\ln \frac{a}{T_0 \tan\beta} - \lambda \right] - [\ln T_0 - \ln T_e], \tag{5}$$

式中: $\lambda = \frac{1}{A} \sum_i A_i \ln \frac{a}{\tan\beta}$; $\ln T_e = \frac{1}{A} \sum_i A_i \ln T_0$; $\ln \frac{a}{\tan\beta}$ 被称为地形指数.如果假定 T_0 在空间上均等,则式(5)中最后一项为零,只需地形指数就可直接计算缺水量的大小.

2 TOPMODEL 的基本结构

TOPMODEL 模型把全流域按 DEM 网格分块,每一个网格称为一个水文单元.大的流域又可被分成若干个子流域(或单元流域).对每一个单元流域进行产汇流计算.产流计算包括不饱和层水分运动、饱和层水分运动及地表径流.地表径流和地下径流均视为在空间上相等,可通过等流时线方法进行汇流演算,求出单元流域出口处的流量过程.单元流域的计算流程图见图 3.通过河道汇流得出流域总出口断面流量过程.河道演算多采用近似运动波的常波速洪水演算方法.

在对单元流域进行产流计算时,并不是每个水文单元都计算. TOPMODEL 中假定地形指数相同的网格具有相同的水文响应,用“地形指数-面积分布函数”来描述水文特性的空间不均匀性.因

此只需计算那些水文响应不相同的网格。“地形指数 - 面积分布函数”表示具有相同地形指数值的流域的空间部分.模型用统计方法计算地形指数的分布函数^[10].

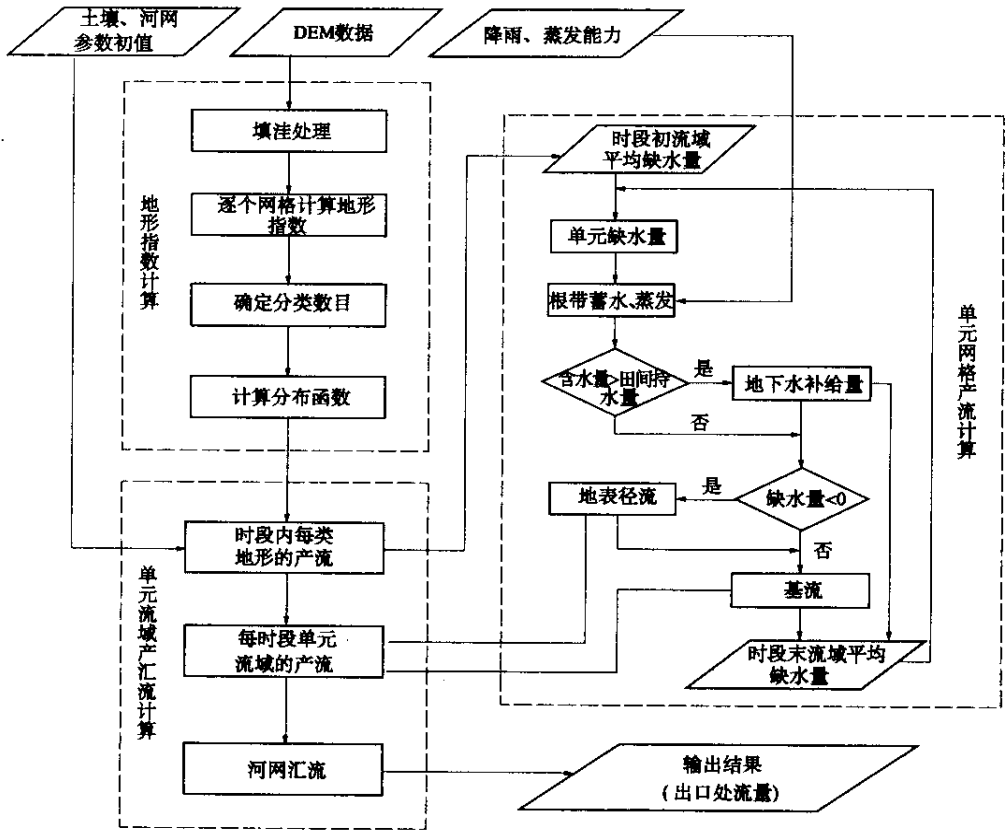


图3 单元流域计算流程图

Fig.3 Program structure of single catchment

3 TOPMODEL 与其它流域水文模型比较

3.1 与传统集总式流域水文模型比较

与传统集总式流域水文模型特征相比^[11,12], TOPMODEL 有三方面的特点:①对实际水文过程的模拟更贴切,尤其是对包气带(不饱和带)水分的运动及浅层地下水动态的模拟;②考虑了下垫面地形的空间变异性对水文响应的影响,并实现了产流面积的空间可视化;③与地理信息系统相结合,易于实现数据的更新,能够实时反映现实下垫面的变化。

TOPMODEL 与传统的蓄满产流模型有相似的一面,但是并不完全相同^[12]。传统蓄满产流概念中,土壤含水量以田间持水量为限控制产流,而 TOPMODEL 中,只有土壤含水量达到或超过饱和含水量才产流。相似地,新安江模型中的蓄水容量与 TOPMODEL 中的缺水量相对应,所不同的是前者是土壤含水量与田间持水量的差值,而后者是与饱和含水量的差值。

传统集总式模型并不能计算流域内各点的蓄水容量,如新安江模型就是用一条经验的抛物线来概化流域蓄水容量曲线。TOPMODEL 模型却可以根据地形指数和流域平均缺水量计算出各点的缺水量,直观地反映源面积的大小和分布。地形指数的空间分布即反映了流域蓄水容量的分布。蓄水容量曲线与地形指数的功能相同,都是为了计算径流。

新安江模型并不直接模拟地表和地下径流运动,而是计算出净雨(时段径流总量)以后,根据蓄水容量曲线通过稳定下渗率进行划分。而 TOPMODEL 用物理公式直接描述水在包气带及饱和含水层中的运动。虽然这些公式可能带有经验性,但它充分体现了地表水与地下水的联系。

3.2 与分布式水文模型比较

与分布式水文模型相比, TOPMODEL 一个突出的特点就是模型结构简单,优选参数少。结构化的程序语言使其很容易根据实际情况调整结构,甚至能作为水文-地形生态模型的子模块。另外,

TOPMODEL 在应用时仅需 DEM 图和基本的水文资料(降水、蒸发、流量),甚至可用于无资料地区^[9]。但分布式水文模型结构非常复杂,参数众多,对资料的要求也较高。许多模型在具体引用时还存在很多问题^[13]。

正因其简单, TOPMODEL 对水文要素的空间变异性及水文单元的相互联系有些考虑不足。模型仅仅考虑了下垫面地形的空间变异性,其它水文要素,如降水、蒸发及产流等,都被假定为空间上均等。而且除了计算地形指数,网格并没有实际的意义^[9]。而分布式水文模型最突出的特点就是考虑水文要素的空间分布及相互间的联系。从这个意义上讲, TOPMODEL 并不能算作分布式水文模型,充其量不过是个准分布式水文模型。

4 模型的改进及存在的问题

TOPMODEL 在国内外有比较多的应用与改进。目前已经有许多文章讨论了松弛 TOPMODEL 基本假设的方法。有些虽然要求增加模型输入,但根本没有涉及到原理和假设问题。另外一些合理的改变也都将焦点聚集在基本方程的形式上。要想检验这些改变的效果,必须先检测式(1)中被忽略项的量级。

目前的改进主要有以下几个方面:

(1) 使近地表水力传导度 T_0 在整个流域上变化。于是,每一点上的地形指数 $\ln(a/\tan\beta)$ 就用土壤-地形指数 $\ln(T_0 a/\tan\beta)$ 代替,但没有改变任何假设。 T_0 在空间上变化很大,相应的缺水量水平也有很大不同,可能还会导致潜在蒸发在空间上也不同。这样就与地下水平行于地表的假设相冲突,也可能使得干旱条件下水流路径不连续,要运用流域逐渐湿润期的整体原则重新确定。

(2) 流域可能包括很多平行的水流带,每一个的土壤厚度参数 m 都不同。虽然不可能确定出每一个水流带的 m 值,但可以将流域分成两个或一些不同的区域。例如:Mendip East Twin 流域(Calver, 1972)被分成两个大致相等的区域,一个是土壤排水贫乏的河流上游源头区,另一个是土壤排水通畅的棕壤区。由两个区域所形成的流域洪峰一般相隔 24~48 h。很多的流域没有这样极端,但是仍有必要区分主要孔隙和边坡的 m 值。

(3) 使参数在一年内逐渐变化,变化 m 和 T_0 的同时维持水量平衡。以一个相对水位线变化较低的速率使参数逐渐变化,这样实际忽略项是可行的。另外,土壤含水量对参数 m 的影响也很大,

可跟前期影响雨量建立关系调节 m 的大小。如运用 API 或 NAPI 指数法。

(4) 改变土壤传导度函数,从而改变缺水量和地形指数之间的关系(式(5))。通常是用一次的或二次的幂函数关系代替指数型衰减关系。其实指数型公式是抛物线型公式中的指数趋于无穷大时的特例。通常都采用 $\gamma=2$ 的抛物线型公式。

线性公式和抛物线型公式中,沿河谷轴线坡度较低的地方,输入的空间变异性可能会对输出水文过程线有显著的影响。这暗示式(2)中的空间项不能被忽略。所以这种改变并不总是合理的。

同时,模型在应用中还有一些问题有待解决。

(1) 渗入补给地下水的水量,在典型的湿润山区全部以地下径流方式排泄,但在典型的干旱半干旱区全部消耗于蒸发^[9]。所以,在干旱半干旱区,地下水的运动并不象模型所描述的那样,模型必须调整后才能使用。

(2) 对于有些数据资料,地形指数能用来成功地预测源面积的分布,有些则不能^[9]。这是因为不仅地形指数的引入大大简化了流域水动力学,而且地形指数大的地方优先饱和的假定也具有很强的局限性。这些表明模型在使用的时候要谨慎,可能还要根据具体情况进行修改。

(3) 现在还没有一种特别理想的方法通过调查、等高线或栅格 DEM 数据来推导地形指数^[4]。DEM 的洼地问题及与此相关的河流网格问题始终是一个难题。这些都有待于理论和方法的突破。

(3) 在实际应用中发现,不同的参数系列模拟实测资料几乎可以得到相同的结果。怎样鉴别出最优参数和最优模型结构,依然需要做大量的工作。

5 结束语

TOPMODEL 基于变动产流的概念,利用地形指数反映下垫面的空间变化对流域水文循环过程的影响,为流域水文模型参数的空间化提供了一个很好的解决方案。但是,目前 TOPMODEL 还存在一些不足之处。在理论上, TOPMODEL 的几个基本假设,仍需要进一步的发展;在模型的输入上,应考虑降水的空间分布和植被覆盖的影响。在与 GIS 的结合上, TOPMODEL 应能够充分利用 RS 所提供的大量的空间数据信息。

TOPMODEL 虽有 30 多年的历史,但仍然有很大的发展空间。本文关于 TOPMODEL 模型几个问题的探讨,目的是为了发展 TOPMODEL,为了引进

TOPMODEL 利用 DEM 获取模型参数的思路 ,提高水文模型 ,特别是分布式水文模型与 GIS 结合的能力 ,使流域水文模型更加贴近自然界中的水文循环过程 ,能够描述气候变化、下垫面因素和人类活动对水循环的影响.

参考文献 :

[1] XIA Jun ,TACKEUCHI K. Barriers to sustainable management of water quantity and quality[J]. Hydrological Science Journal ,1999 44(4) 503 - 505 .
[2] 夏 军 . 水文学科发展与思考[J]. 中国科学基金 , 2000 ,14 (5) 293 - 297 .
[3] 左其亭 ,王中根 . 现代水文学[M]. 郑州 :黄河水利出版社 2002 .
[4] 黄 平 ,赵吉国 . 流域分布型水文数学模型的研究及应用前景展望[J]. 水文 ,1997 (5) 5 - 10 .
[5] 任立良 ,刘新仁 . 数字高程模型信息提取和数字水文模型研究进展[J]. 水科学进展 2000 ,11(4) 463 -

469 .
[6] 何延波 ,杨 琨 . 遥感和地理信息系统在水文模型中的应用[J]. 地质地球化学 ,1999 27(2) 99 - 103
[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] 王大纯 ,张人权 ,史毅虹 ,等 . 水文地质学基础[M]. 北京 :地质出版社 ,1995 .
[9] KEITH J Beven . Rainfall - runoff Modelling[M]. England : John Wiley & Sons 2001 .
[10] SCHUMANN A H . 籍助于 GIS 研制概念性半分散水文模型[J]. 张志成 ,译 . 人民长江 ,1995 ,26(2) :57 - 60 .
[11] 芮孝芳 . 流域水文模型研究中的若干问题[J]. 水科学进展 ,1997 8(1) 94 - 98 .
[12] 叶守泽 ,詹道江 . 工程水文学[M]. 北京 :中国水利水电出版社 2000 .
[13] 刘金清 ,陆建华 . 国内外水文模型概论[J]. 水文 , 1996 (4) 4 - 8 .

Discussion on TOPMODEL

LIU Qing - e¹ , ZUO Qi - ting²

(1. School of Hydrologic & Electric Engineering , Wuhan University , Wuhan 430072 ,China ; 2. College of Environmental & Hydraulic Engineering Zhengzhou University , Zhengzhou 450002 ,China)

Abstract : This paper start from the analysis of the basic assumptions ,represents a view of some of the issues involved in application of the TOPMODEL concepts ,including the physics concept ;the program structure ;comparison with the traditional lumped hydrological model and the distributed model and its development . It describes the hydrological process in a more detail way than the traditional lumped model and has a more simple structure than the distributed model . The past developments always focus on the change of parameters or the from of the basic equation . But other problem of theories also must be took into account ,such as the recent microstructure for certain region or the measurement of topographical index and so on .

Key words : TOPMODEL ; variable contributing area ; hydrological model