

文章编号: 1007-6301 (2002) 05-0430-10

基于 DEM 的分布式水文模型构建方法

王中根¹, 刘昌明¹, 左其亭², 刘青娥³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 郑州大学环境与水利学院, 郑州 450002;
3. 武汉大学水利水电学院, 武汉 430072)

摘要: 基于 DEM 的分布式水文模型是现代水文学同高科技 (如计算机技术、3S 技术等) 相结合的产物, 是研究变化环境下水文循环与水资源演化规律的理想工具, 代表了水文模型的最新发展方向。从 DEM 的特性出发, 本文探讨并总结了分布式水文模型的特点、建模思路和模型基本结构框图。在流域离散化方面, 重点介绍了分布式水文模型常用的三种单元划分方法; 最后, 针对分布式水文模型构建问题, 从“输入模块”、“单元水文模型”、“河网汇流模型”三方面, 阐述了分布式水文模型微结构构建方法。

关键词: 分布式水文模型; DEM; 流域划分; 单元水文模型; 河网汇流模型
中图分类号: P333 **文献标识码:** A

水文模型始终是水文科学研究的重要手段与方法之一^[1,2]。21 世纪以来水资源危机日益突出, 为了深入探讨自然变化和人类活动影响下的水文循环与水资源演化规律, 逐步发展起来“基于 DEM 的分布式水文模型”, 成为当今水文学界研究的热点^[3,6]。

回顾水文模型的发展历史, 不难发现分布式水文模型并不是一个新的概念。早在 20 世纪 70 年代, 国外就开始了分布式水文数学模型的研究^[4], 1969 年 Freeze 和 Harlan 发表了《一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝图》的文章。目前代表性的模型有: SHE 模型、IHDM 模型、SWAT 模型等^[5,6]。

我国在分布式水文模型的研制方面则起步较晚, 目前还没有比较成熟或者得到国际上普遍认可的分布式水文模型。同时国外的模型也不太适用于中国的国情, 许多模型在具体引用时还存在很多的问题^[7,8]。因此, 我们急需在借鉴国外先进模型的基础上, 利用现代科学技术 (尤其是计算机和“3S”技术), 研制适合我们国情的分布式水文模型。

1 基于 DEM 分布式水文模型的特点

“3S”技术的引进, 为水文学注入了新的血液^[9]。目前水文模拟技术趋向于将水文模型与地理信息系统 (GIS) 集成, 以便充分利用 GIS 在数据管理、空间分析及可视性方面的功能。而数字高程模型 (DEM) 是构成 GIS 的基础数据, 利用 DEM 可以提取流域的许多

收稿日期: 2002-08; 修订日期: 2002-08

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G19990436-01)

作者简介: 王中根 (1973-), 男, 河南潢川人, 中科院地理科学与资源研究所博士后, 主要从事水文水资源方面的研究工作。E-mail: wangzg@igsnr.ac.cn

重要水文特征参数,如坡度、坡向、水沙运移方向、汇流网络、流域界线等^[10]。因此,基于DEM的分布式水文模型是现代水文模拟技术发展的必然趋势。

1.1 DEM的简介

数字高程模型DEM(Digital Elevation Model)是由美国麻省理工学院Chaires L. Miller教授于1956年提出来的,其目的是用摄影测量或其他技术手段获得地形数据,在满足一定精度的条件下,用离散数字的形式在计算机中进行表示,并用数字计算的方式进行各种分析。DEM作为地理信息系统的基础数据,已在测绘、地质、土木工程、水利、建筑等许多领域得到广泛应用^[11]。

由于用数字形式表达地形表面,DEM具有如下显著特点:容易以多种形式显示地形信息。产生多种比例尺的地形图、纵横断面图和立体图。精度不会损失。容易实现自动化和实时化。总之,DEM具有便于存储、更新、传播、自动化和多比例尺特性,使其特别适合于各种定量分析与三维建模。

1.2 基于DEM的分布式水文模型的特点

基于DEM的分布式水文模型,通过DEM可提取大量的陆地表面形态信息,这些信息包含流域网格单元的坡度、坡向以及单元之间的关系等^[12]。同时根据一定的算法可以确定出地表水流路径、河流网络和流域的边界(见图1)。在DEM所划分的流域单元上建立水文模型,模拟流域单元内土壤—植被—大气(SVAT)系统中水的运动,并考虑单元之间水平方向的联系,进行地表水和地下水的演算。

概括起来,基于DEM的分布式水文模型具有以下特色:具有物理基础,描述水文循环的时空变化过程。由于其分布式特点,能够与GCM嵌套,研究自然变化和气候变化对水文循环的影响。能及时地模拟出人类活动或下垫面因素的变化对流域水文循环过程的影响^[13]。

2 分布式水文模型的建模思路与基本结构

2.1 分布式水文模型的建模思路

目前,分布式水文模型主要有两种建模思路:应用数值分析来建立相邻网格单元之间的时空关系,如SHE模型等。该类模型水文物理动力学机制突出,也是人们常指的具有物理基础的分布式水文模型。但它结构比较复杂、计算繁琐,当前还很难适用于较大的流域。在每一个网格单元(或子流域)上应用传统的概念性模型来推求净雨,再进行汇流演算,最后求得出口断面流量,如SWAT模型等。该类模型结构与计算过程都比较简单,适用于较大的流域。

另外,还有一类模型(如,TOPMODEL等)基于DEM推求地形空间变化信息,利用地形信息[如地形指数 $\ln(\alpha/\tan\beta)$]模拟水文响应的特性,最后用统计方法求得流域总出口断面流量。由于它考虑了流域下垫面的空间分布对水文过程的影响,同时模型的总体构架属于集总式^[14],因此,也有人称该类模型为半分布式水文模型。

2.2 模型的基本结构

分布式水文模型虽然有不同的建模思路,但模型的基本结构却大同小异。模型所涉及的水文物理过程主要包括降水、植被截留、蒸散发、融雪、下渗、地表径流和地下径流,各

部分的联系如图 2 所示。

3 分布式水文模型的单元划分方法

为了反映流域下垫面因素(如地形、土壤类型、植被覆盖等)和气象因素(如降水、气温、辐射等)的空间分布对流域水文循环的影响,以及人类活动和气候变化对流域径流过程的干扰,同时也为了更好地与DEM和遥感(RS)相结合,分布式水文模型一般在水平方向上将研究流域划分成若干子单元(子单元也可进一步细分),在每一个水文单元上垂向又可分为冠层、非饱和和土壤层与饱和和土壤层。

目前,流域离散的方法主要有三种:单元网格(grid)、山坡(hillslop)或自然子流域(sub watershed)。

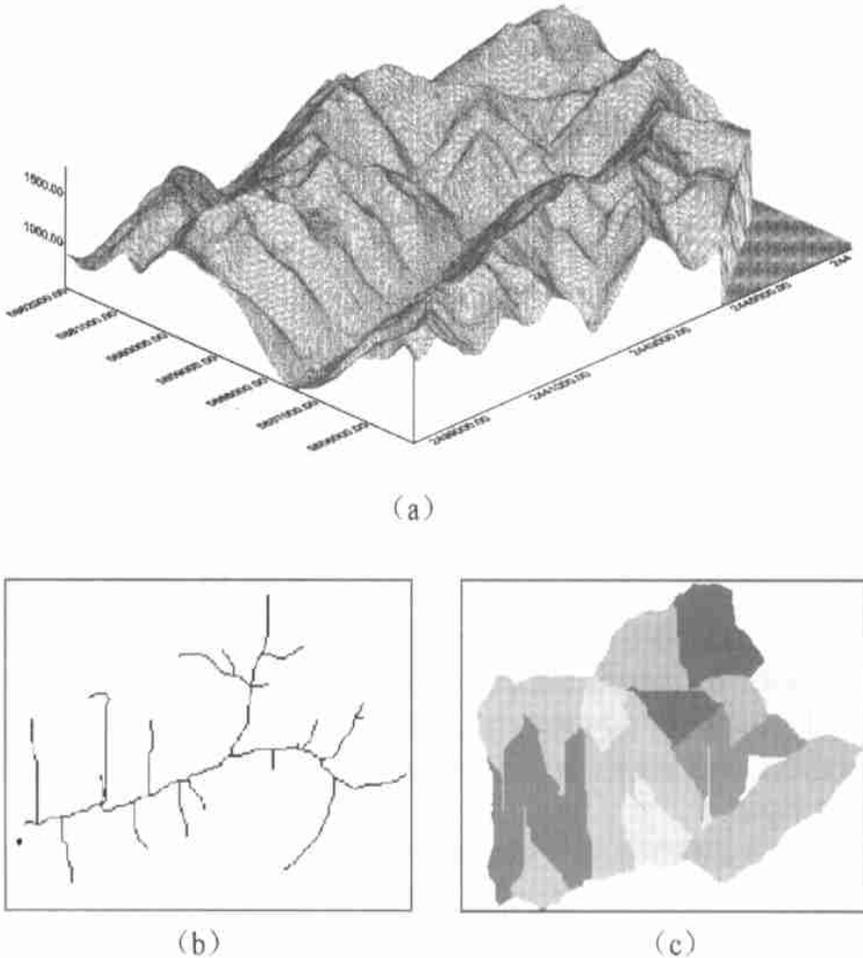


图 1 (a) 流域DEM 三维图; (b) 基于DEM 的河网生成图; (c) 基于DEM 的子流域划分图

Fig. 1 (a) 3- D watershed map based on DEM; (b) Steam network from DEM;

(c) Division of basin based on DEM

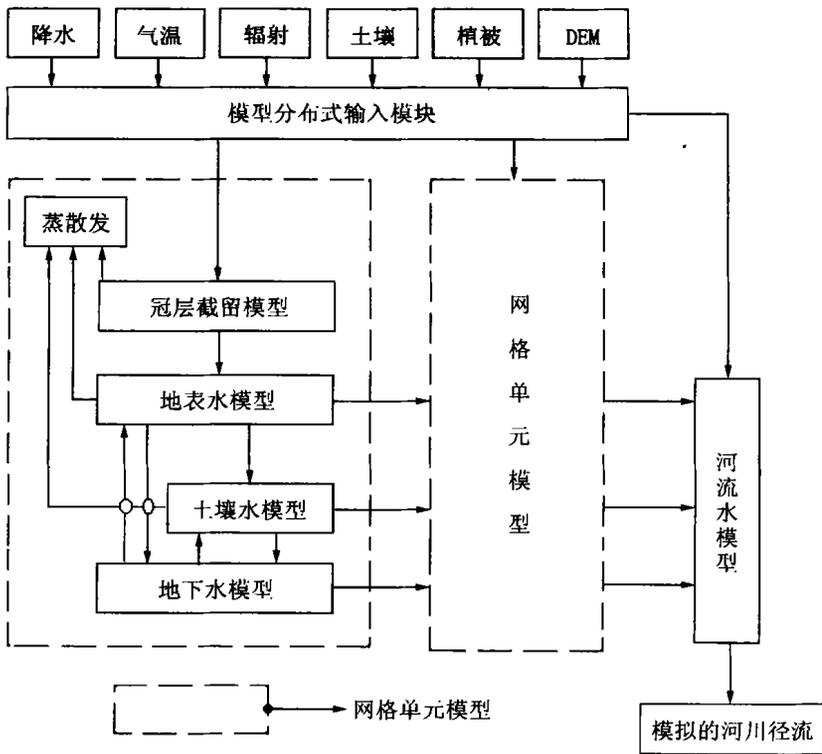


图2 基于DEM 的流域分布式水文模型的典型结构框图

Fig. 2 The typical structure of distributed hydrological model based on DEM

3.1 基于单元网格 (grid) 的划分

基于栅格DEM 将研究区域 (或流域) 划分为若干个大小相同的矩形网格, 是分布式水文模型比较常见的做法。该种划分方法视研究区的不同, 又可细分为两类: 一类是对于较小的实验场或小流域 (几百平方公里以内), 直接用DEM 网格划分。每个网格的大小一般为 30m × 30m 或 50m × 50m 等。该类方法在一些小尺度分布式水文物理模型 (如 SHE 模型等) 中比较流行。另一类是针对几十万到几百万平方公里的大流域, 如一些大尺度的分布式水文模型, 通常将研究区划分为 1 km × 1 km 或更大的网格。每个网格单元根据DEM 分辨率和模型精度要求, 又可分为更小的网格。

3.2 基于山坡 (hillslop) 的划分

将分布式水文模型的最小计算单元落脚于一个矩形坡面, 是分布式水文模型中关于流域离散的又一种常用方法。首先, 根据DEM 进行河网和子流域的提取。然后, 基于等流时线的概念, 将子流域分为若干条汇流网带。在每一个汇流网带上, 围绕河道划分出若干个矩形坡面 (见图 3)。在每个矩形坡面上, 根据山坡水文学原理建立单元水文模型, 进行坡面产汇流计算。最后, 进行河网汇流演算^[15]。

3.3 基于自然子流域 (subwatershed) 的划分

将研究流域按自然子流域的形状进行离散, 也是分布式水文模型中常用的做法之一。目前DEM 能够自动、快速地进行河网的提取和子流域的划分。自然子流域作为分布式水文模

型的计算单元，最大好处是单元内和单元之间的水文过程十分清晰，而且单元水文模型很容易引进传统水文模型，从而简化计算，缩短模型开发时间。当然子流域还可以根据需要进行更细的划分。如图 4 所示，先将流域分为 9 个自然子流域，对于较大的子流域（如子流域 4）又可分成 8 个较小的子流域。根据实际需要子流域 28 还可分为 7 个更小的子流域。

以上探讨了分布式水文模型中三种主要的流域离散化方法，当然水文单元的划分不局限于此。也可以是上述三种的组合，如自然子流域和单元网格相结合的方法等。

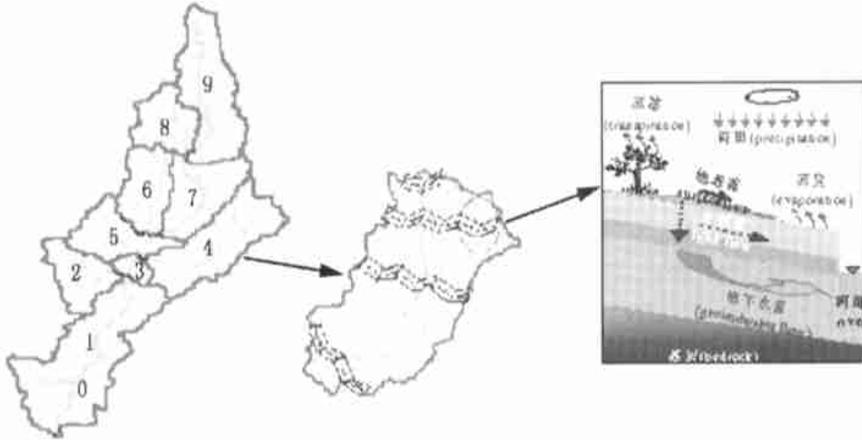


图 3 基于山坡的流域划分示意图 (引自杨大文, 2001)

Fig. 3 Sketch map showing hillslope discretization (Dawen Yang, 2001)

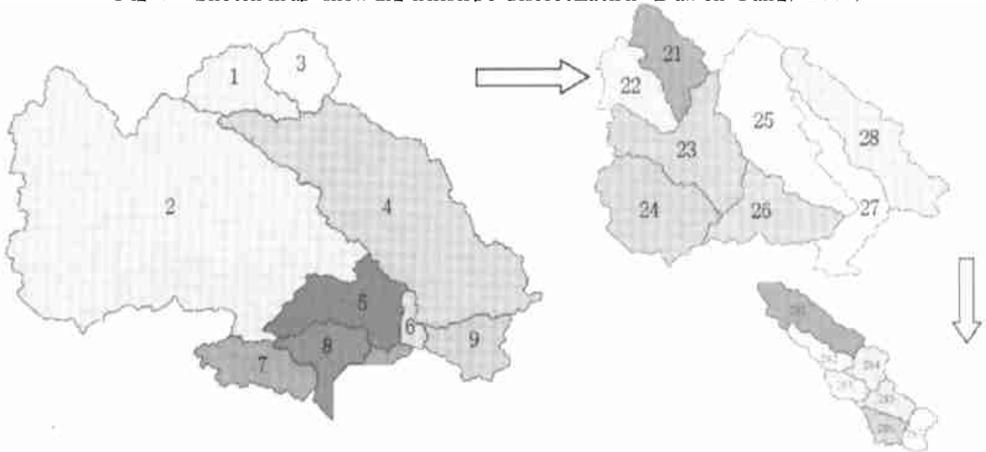


图 4 基于自然子流域的流域划分示意图

Fig. 4 Sketch map showing subwatershed discretization

4 分布式水文模型的微结构

4.1 分布式输入模块

分布式水文模型的输入数据主要包括降水、气温、辐射（气象因素）和土壤、植被（下垫面因素）。有关土壤和植被的分布式数据主要利用遥感技术获得。有关降水、气温和

辐射的分布式数据需要建立相应的模型进行处理。

4.1.1 降水分布模型

当流域内有三个以上雨量测站时, 降水分布模型可以通过空间插值方法生成任一个单元的降水数据 (见图 5)。关于降水的空间插值方法, 常见的有: 线性空间插值法、距离倒数加权法、最小曲率法、三角剖分线性插值法、克里格法 (kriging)、趋势面拟合、最小邻域法等等。其中克里格法在插值过程中能够反映空间场的各向异性, 并充分利用数据点之间的空间相关性, 结果比较理想。图 6 是用克里格法绘制的降水空间分布图。此外, 考虑高程影响的降水三维空间插值模型也开始出现。雷达测雨技术的发展也为获取降水空间分布数据提供了一种有效的手段。

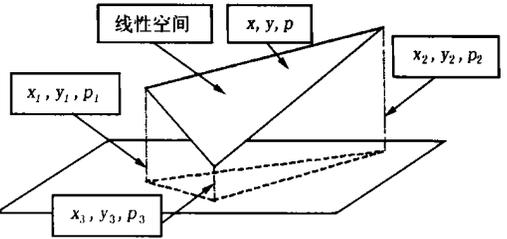


图 5 降水空间插值示意图

Fig. 5 Sketch map showing precipitation space interpolation

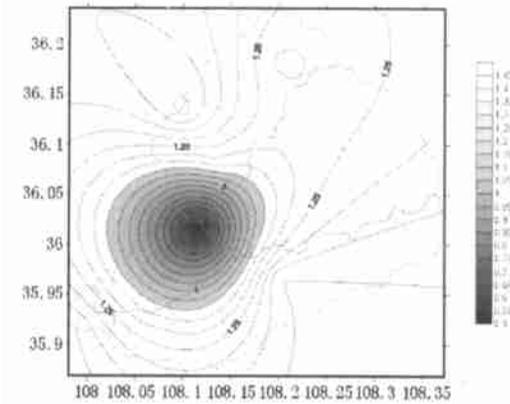


图 6 降水空间分布图

Fig. 6 Precipitation space distribution map

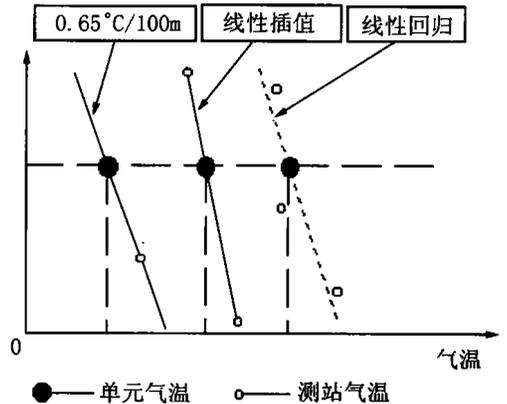


图 7 气温分布模型

Fig. 7 A air temperature distribution model

4.1.2 气温分布模型

当只有一个测站时, 模型将通过环境温度下降率 (平均- 0.65 /100m) 进行计算; 当有两个测站时, 模型将执行线性插值; 当有三个测站时, 模型进行线性回归计算。具体计算模式如图 7 所示。

4.1.3 太阳辐射模型

常用的太阳辐射模型由三部分组成: 宇宙太阳辐射 (Lee, 1978); 云层衰减 (Black, 1956); 冠层衰减 (Ross and Tooming, 1968 and Monteith, 1973):

$$I = I_0 \times \left. Z_a^{\sec(Z)} \right|_{\text{Extraterrestrial}} \times \cos(B) \times \left. (0.8 - 0.34C - 0.46C^2) \right|_{\text{Cloud}} \times \left. e^{-\gamma \times LAI / \cos(Z)} \right|_{\text{Canopy}} \quad (1)$$

式中 I ——单元地表接收的太阳辐射, W/m^2 ; I_0 ——太阳常数, W/m^2 ; Z_a ——大气混浊性 (太阳辐射沿天顶路径的可传送性); Z ——太阳天顶角 ($^\circ$); B ——地表反射率 ($^\circ$); C ——云量覆盖因子系数 (云占天空的比值); LAI ——叶面指数; γ ——冠层衰减系数, 取值 0.21 ~ 0.6, 依赖于冠层结构和太阳高度。

4.2 单元水文模型

单元水文模型是分布式水文模型的核心部分(见图2),内部结构由冠层截留模型、地表水模型、土壤水模型和地下水模型等构成,所涉及到的水文过程有植物截留、蒸散发、下渗、融雪、地表径流、壤中流和地下径流等。根据流域单元划分的方式和建模的目的,单元水文模型有两种主要的构造方法^[16]:

一种数学物理模型,用数学物理方法对水文现象进行模拟,依据物理学质量、动量与能量守恒定律以及产汇流的特性,推导出描述地表径流和地下径流的微分方程组。由于流域下垫面情况非常复杂,产流与汇流交织发生,目前,建立这样复杂的水文数学物理方程还比较困难,也难应用到复杂的大流域。

另一种概念性模型,利用一些简单的物理概念对复杂的水文物理过程进行概化。在传统的集总式水文模型中,该方法应用十分广泛。它能够大大地简化计算量,提高模型的适应能力。目前,针对大流域的分布式水文模型的单元水文模拟多采用概念性模型。

4.2.1 冠层截留

在有植被覆盖的水文单元上,冠层是同大气接触的第一个层面,它主要有截留和蒸散发的功能。冠层的截留能力和蒸散发能力与植被的种类和生长时段有关。目前,水文模型很少考虑冠层内部水的水平传输,冠层水的平衡只涉及到垂向水的运动^[17]。

4.2.2 蒸散发

陆地上年降水量的62%通过蒸散发返回大气。在蒸散发计算中,首先需要确定蒸散能力(或潜在蒸发)(ET_0)。关于 ET_0 的计算,可以采用经验公式法、微气象学方法(如能量平衡法,空气动力学法,能量平衡-空气动力学法和湍度相关技术等)和遥感法^[18]。其中,利用卫星遥感并结合模式模拟研究非均匀陆面上的蒸散发是一个新的趋势,该项技术在我国刚刚起步。比较常用的传统计算方法有4种:Penman-Montieth公式(Montieth, 1965),输入的资料为辐射、气温、风速和相对湿度。Priestley-Taylor公式(1972),输入的资料为辐射和气温。Hargreaves and Samani公式(1985),输入的资料仅为气温。

Jensen and Haise公式(1963),输入的资料为辐射和气温。

4.2.3 融雪

在寒区往往需要考虑融雪的影响,目前融雪计算多采用比较简单的度-日模型(Degree-Day Model),计算如下:

$$M_s(t) = D_f \times [T(t) - T_b] \quad (2)$$

式中 $M_s(t)$ —— t 时段融雪率, m/s ; D_f ——度-日模型因子,取值 $3 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$ (m/s),需要进行校检; $T(t)$ —— t 时段的温度, $^{\circ}C$; T_b ——开始融雪时的气温, $^{\circ}C$ 。

4.2.4 地表径流

在第一类分布式水文模型中,地表径流的模拟多采用圣维南方程组。具体的模拟可以采用运动波或扩散波两种方法。目前,运动波模拟方法(Calver & Wood, 1995; Kite, 1995; Smith et al, 1995; Chen 1996)用得较多,扩散波模拟方法(Refsgaard & Stom, 1995; Wang & Hjelmfelt, 1998)能够改善平原区的径流模拟效果。在第二类分布式水文模型中,地表径流的模拟多采用类似马斯京根模型的方法。

4.2.5 下渗

下渗不仅直接决定地面径流量的大小,同时也影响土壤水分的增长,以及表层流与地

下径流的形成。影响下渗的因素很多, 主要有: 土壤因素(包括土壤均质性、土壤质地和孔隙率等)、土壤初始含水率、地表结皮(表土结皮能减少入渗量达 80% 左右, Morre, 1982)、降雨因素(包括雨型、降雨强度等)和下垫面因素(包括植被、坡度、坡向、耕作措施等)。实际下渗率的计算受外部供水率的控制, 计算公式如下:

$$f = \min\{f_p, r\} \quad (3)$$

式中 f ——实际下渗率; f_p ——下渗能力(或下渗容量); r ——外部供水率。

目前, 关于下渗能力的计算方法很多, 通常可以用以下几种方法: 考斯加柯夫(Kostirakov, 1931)公式; 霍顿(Horton, 1932)公式; 非利浦(Philip, 1957)公式; 格林—安普特(Green-Ampt, 1911)公式。

4.2.6 非饱和土壤水

非饱和土壤层又称包气带, 是土壤水分剧烈变化的土壤带。非饱和土壤含水量直接影响到蒸发、下渗, 并决定了降雨中产生径流(地表径流、壤中流和地下径流)的比例, 把降雨、下渗、蒸发及径流等水文要素在径流形成过程中有机地联系起来。

目前, 关于非饱和土壤水运动的模拟可以采用基于Richards方程组的复杂方法, 也可以采用简单的水量平衡方法。

4.2.7 地下径流

地下径流一般作为河流的基流而存在, 对于地下径流的模拟可以采用简单的线性水库方法; 也可以利用圣维南连续方程和达西定律完成, 计算公式如下:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial l} = r_g \quad (4)$$

$$f_g = D \frac{\partial H}{\partial l} = D S_0 + \frac{\partial h}{\partial l} \quad (5)$$

式中 h ——地下水深度, m; q ——为单宽流量, m^2/s ; r_g ——垂直净入流量, m/s ; l ——坡面长度, m; D ——非饱和土壤水力传导率, m/s ; S_0 ——地表坡度; f_g ——土壤水分通量, m/s 。

4.3 河网汇流模型

在第一类分布式水文模型中, 河网汇流演算模拟多采用一维河流模型, 同地表径流类似采用动力波方法, 河流水的运动由以下方程组决定。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial l} = I_s \quad (6)$$

$$S_f = S_0 \quad (7)$$

$$A = \alpha Q^\beta \quad (8)$$

$$\text{其中 } \alpha = \left[\frac{np^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{S_0}} \right]^{\frac{5}{3}}, \quad \beta = \frac{3}{5}$$

式中 A ——过水断面, m^2 ; Q ——出流量, m^3/s ; S_f ——摩阻坡度; S_0 ——河道坡降; n ——地表曼宁糙率系数; l ——坡面长度, m; I_s ——单位长度河段入流量, m^2/s 。

在第二类分布式水文模型中, 多采用类似马斯京根模型的方法。式(9)是变动存储系数模型(引自SWAT)。

$$Q_{out,2} = SC \cdot q_{in,ave} + (1 - SC) \cdot q_{out,1} \quad (9)$$

式中 $q_{out,1}$ ——时段初出流量, m^3/s ; $q_{out,2}$ ——时段末出流量, m^3/s ; $q_{m,ave}$ ——平均入流量, m^3/s ; S_c ——存储系数

5 结语

基于DEM的分布式水文模型代表了水文模型的发展方向。虽然,经过近30年的研究,分布式水文模型仍处于初级阶段。目前,单纯就模拟与预报结果而言,分布式水文模型并不比集总式水文模型有太多的优势。但是,分布式水文模型所揭示的水循环物理过程越来越接近客观世界。在研究人类活动和自然变化对区域水循环时空过程的影响,研究区域水资源生成与演变规律方面,具有独特的优势。这一切源于与GIS和RS的有机结合,源于对海量的气象和下垫面数据的利用与处理。

分布式水文模型的基本结构和一般构建方法在前文中进行了探讨与总结。从当前状况来看,很多分布式水文模型在产汇流理论方面并不先进。许多模型的区别,仅在于计算的技巧和简化的处理上。而有些简化仅仅为了计算上的方便,缺乏理论依据。具有更强的物理机制应是分布式水文模型的显著特点,而不是形式上的分布式。为了使分布式水文模型具有实用性,计算时间和数据存储的问题,必须加以重视。

参考文献:

- [1] 赵人俊 流域水文模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984
- [2] 文康等编著 地表径流过程的数学模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991
- [3] 左其亭, 王中根 著 现代水文学[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002. 1
- [4] 袁作新 流域水文模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990
- [5] Dunn S M, McAlister E, Ferrier R C. Development and application of a distributed catchment scale hydrological model for the River Ythan, NE Scotland[J]. *Hydrological Processes*, 1998(12): 401-416
- [6] Michael B. Abbott and Jens Christian Refsgaard Distributed hydrological modeling[M]. Published by Kluwer Academic Publishers, 1996
- [7] 芮孝芳 流域水文模型研究中的若干问题[J]. 水科学进展, 1997(1): 94-98
- [8] 黄平, 赵吉国 流域分布式水文数学模型的研究及应用前景展望[J]. 水文, 1997(5): 5-10
- [9] Kwan T L. Generating design hydrographs by DEM assisted geomorphic runoff simulation: a case study[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(2): 375-384
- [10] 魏文秋, 于建营 地理信息系统在水文学和水资源管理中的应用[J]. 水科学进展, 1997(3): 296-300
- [11] 李志林, 朱庆著 数字高程模型[M]. 武汉: 武汉测绘大学出版社, 2000. 3
- [12] Band L E. Topographic partition of watersheds with digital elevation models[J]. *Water Resources Research*, 1986(2): 15-24
- [13] Qian Yadong, Lu Guonian, Chen Zhongming. Study for networks of runoff and sediment transport from grid digital elevation data[J]. *Journal of Sediment Research*, 1997(3): 24-31
- [14] 郭方, 刘新仁, 任立良 以地形为基础的流域水文模型——TOPMODE及其拓宽应用[J]. 水科学进展, 2000(3): 296-301
- [15] Dawen Yang, Srikantha Herath, Katumi Musiaka. Spatial resolution sensitivity of catchment geomorphologic properties and the effect on hydrological simulation[J]. *Hydrological Processes*, 2001(11): 2085-2099
- [16] 詹道江, 叶守泽 工程水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000
- [17] 周国逸 著 生态系统水热原理及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 1997
- [18] 莫兴国 区域蒸发研究综述[J]. 水科学进展, 1996(2): 180-185

Methods of Constructing Distributed Hydrological Model Based on DEM

WANG Zhong-gen¹, LU Changming¹, ZUO Qiting², LIU Qing'e³

(1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101 China; 2. College of Hydraulic & Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002 China; 3. Hydraulic and Electric Engineering Department of Wuhan University, Wuhan 430072 China)

Abstract: Recent advances in remote sensing, geographic information systems, and computer technology make the use of distributed hydrological model, based on digital elevation model (DEM), an attractive approach or tool to studying hydrological processes and evolution laws of water resources under changing environment. But distributed hydrological model is not perfect compared with lumped hydrological model. In order to promote its development, based on DEM, this paper discusses and sums up the characteristics of distributed hydrological model, then probes into two main ways and means of constructing distributed hydrological model. One way is like SHE model, another is like SWAT model. Although distributed hydrological models can be made in different ways, the primary structure of the model is quite similar. A typical structure of DEM based distributed hydrological model is provided in this paper. To better study the impact of the changing environment on hydrological processes, a watershed must be divided into subunits. This paper expressly discusses the three most common techniques used to discretize a watershed, which are respectively grid cell discretization, representative hillslope discretization and subwatershed discretization. In the final, as to the problem of constructing model, the methods of building the components of the distributed hydrological model is set forth from three aspects: input module, unit hydrology model and river routing model. A brief comment on the current distributed hydrological model research and some advice are given in the conclusion. All these will provide a guidance for making distributed hydrological model based on DEM.

Key words: distributed hydrological model; digital elevation model; watershed discretization; unit hydrology model; river routing model