

分布式水文模型的现状与未来

芮孝芳, 黄国如

(河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要:分析分布式水文模型的主要特点及产生背景,借助于 GIS 技术讨论了下垫面特征空间变化的表示方法及子流域划分技术.在分析现有有代表性的分布式水文模型的基础上,提出了分布式水文模型的分类及各自的优缺点、通过归纳 20 世纪 70 年代以来水文学理论的若干进展,探讨了确定分布式水文模型中汇流参数的理论途径和方法原理.最后指出,随着地理信息系统技术、数值方法、测雨雷达技术和水文学理论不断进步,分布式水文模型必将得到越来越广泛的应用.

关键词:降雨径流模拟;分布式水文模型;地理信息系统;数值方法;测雨雷达

中图分类号:P333.1

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2004)02-0055-04

在现实世界中,影响流域降雨径流形成的气候因子(如降雨、蒸发等)和下垫面因子(如地形、地貌、地质、水文地质、土壤、植被、土地利用等)均呈现空间分布不均匀状态.但自 17 世纪水量平衡理论创立以来的 300 余年中,人们基本上都是将流域作为一个整体来进行研究的,这样势必忽略了气候因子和下垫面均呈现空间分布不均匀的事实^[1,2].根据这种观点建立起来的集总式水文模型显然只能用于模拟气候和下垫面因子空间分布均匀的虚拟状态,只能给出空间均化的模拟结果.这样,必然使得集总式水文模型的结构和参数的物理意义模糊,使其在模拟现实世界的流域降雨径流形成过程时必存在较大的局限性,精度也常常不尽如人意.这种局限性还可能将一些人的研究注意力引向寻找如何解算模型参数的纯数学方法上,试图用某些最优化算法来解决其中出现的问题,而忽略了对模型结构和参数物理意义的进一步探讨.

只有分布式水文模型才能为真实地模拟现实世界的流域降雨径流形成的物理过程提供有力的工具,因为分布式水文模型能客观地反映气候和下垫面因子的空间分布对流域降雨径流形成的影响.虽然分布式水文模型的建模思路早在 20 世纪 60 年代就已萌芽,但其长足的进步和广泛的研制和应用,只能在计算机技术、地理信息系统技术、遥感技术、雷达测雨技术和水文学理论有了进一步发展的今天^[3].分布式水文模型必将成为 21 世纪水文学研究的热点课题之一.

1 下垫面因子空间分布的表示

水文学家早就认识到下垫面因子空间分布不均匀性对流域降雨径流形成的重要性.例如,1960 年 Linsley 和 Crawford^[4]在研制 Stanford 模型时就曾使用下渗容量面积分布曲线来考虑下渗容量空间分布对降雨径流形成的影响.20 世纪 70 年代,赵人俊等^[5]在研制新安江模型时提出了旨在考虑包气带持水能力的空间分布对蓄满产流影响的流域蓄水容量曲线.差不多与此同时,Beven 等^[6]在创建 TOPMODEL 时建议采用地形指数的分布曲线来考虑对径流“有贡献”的面积的空间分布对流域降雨径流形成的影响.但这些考虑下垫面因子空间分布不均匀的方法是一种统计方法.由于这种方法不能给出下垫面因子真实的空间分布,故不能同时考虑气候因子空间分布不均对流域降雨径流形成的影响.因此,寻求能够描写下垫面因子真实空间分布的方法,就成为研制分布式水文模型必须解决的关键技术.

从数学上说,下垫面因子的空间分布可用下列函数表达:

$$k = f(x, y) \quad (1)$$

式中: k 表示下垫面因子; x, y 表示流域上某一点的位置坐标.

由于寻求式(1)的解析形式的困难性,使得过去相当长时间内分布式水文模型的发展比较缓慢.虽然直到目前,人们仍无法用一个解析函数来表达式

(1),以便精确地描述下垫面因子在空间上的连续变化,但是空间离散化技术为构建式(1)的离散形式指出了方向.空间离散化旨在将整个流域或计算区域按一定原则和方法划分成若干个子流域和子区域,并以离散数据分布形式给出下垫面因子的空间分布.时至今日,水文学家曾使用过的划分子流域或子区域的方法^[7]有 Thiessen 多边形法、等流时线法、自然分水线法、网格法和不规则三角网格法等,其中网格法最具普遍意义和发展前景.显然,这种做法是对式(1)的近似,其精度与子流域或子区域的划分方法和粗细程度有关.

地理信息系统技术是快速、自动、合理地划分子流域或子区域的强有力的工具.现有的地理信息系统软件已能自动地形成网格和不规则三角形网格.根据网格型数字高程模型可以自动地生成流域水系和分水线,自动地按分水线划分子流域,并能自动地提取每个子流域或子区域的地形地貌特征值,还能自动地绘制 Thiessen 多边形和等流时线等.如果将所划分的子流域或子区域分布图与土壤、植被、地质、水文地质和土地利用图叠加,则还可以提取各子流域或子区域的土壤、植被、地质、水文地质和土地利用特征.现在,由地理信息系统构建的数字化平台已成为描写水文现象时空分布和探讨降雨径流形成机理的新研究手段.

2 分布式水文模型的分类

20 世纪 70 年代以来,水文学家已经提出了众多的分布式水文模型^[8].建立在概念性水文模型基础上的一类分布式水文模型已为人们所熟知.在其他分布式水文模型中,笔者认为最值得介绍的当推 SHE 模型和 DBSIN 模型,这是两个均具有比较明确物理概念的分布式水文模型. SHE 模型^[9]以水动力学为其基础,模型中涉及到的植物截留、蒸散发、坡面水流、河道水流、土壤水运动、地下水流和融雪径流等物理过程均由基于物质不灭和能量守恒定律的微分方程来描写.为了求解这些微分方程式及考虑降雨和下垫面因子空间分布的影响,流域在水平方向上划分成网格;为了考虑不同土层中的土壤水运动,土层在垂直方向上划分为若干子土层.模型的地面水流和地下水流计算均采用二维差分格式,并用一维非饱和水流计算的差分格式连接起来. SHE 模型的作者们曾对英国威尔士中部面积只有 10.55 km² 的 Wye 河流域率定了该模型参数,采用的平面网格的大小为 250 m × 250 m,整个土层划分为 38 个子土层,每个子土层厚仅 0.05 m,达到的精度基本上是令人满意的. DBSIN 模型^[10]以水文学理论为基础,以数

字高程模型为平台.模型将流域划分成网格,每个网格作为一个计算单元,其降雨输入由雨量站网或雷达测雨提供.模型由产流模块和汇流模块构成.采用运动型下渗模型计算每个网格的产流量.根据每个网格中水滴流达出口断面的汇流时间进行汇流计算.每个网格中水滴流达流域出口断面的汇流路径包括坡面和河道两部分,由数字高程模型自动生成,并认为流速与地形坡度有关.该模型曾应用于意大利半岛西北部 Arno 河的支流 Sieve 河流域,其流域面积为 840 km²,数字高程模型的高程分辨率为 1 m,网格的大小为 400 m × 400 m.模型中大多数参数由地形地貌和土壤类型资料确定,只有少数参数通过率定求得,模拟结果有 80% 是令人满意的.

概括现有分布式水文模型的结构可以看出,若按子流域或子区域所采用的分析降雨径流形成的理论和方法,分布式水文模型可分为概念性和具有物理基础两类.常见的可用于构建概念性分布式水文模型的有^[5]:美国的 SAC 模型、日本的 TANK 模型、中国的新安江模型等.具有物理基础的分布式水文模型又可分为以水动力学原理为主要基础和以水文学原理为主要基础两种情形,前者的例子可举上述的 SHE 模型,后者的例子可举上述的 DBSIN 模型.此外,也有一些模型,如 TOPMODEL^[6]和 TOPKAPI 模型^[11],由于既不同于概念性分布式水文模型的结构,又不同于具有物理基础的分布式水文模型的结构,而是属于具有物理基础的半分布式水文模型.若按各子流域或子区域形成的径流过程转变成全流域径流过程的方法,分布式水文模型可分为松散型和耦合型两类.松散型分布式水文模型的特点是:假设流域中每个子流域或子区域对整个流域的总响应的贡献是相互独立的,因此,可在分别求得各子流域或子区域对整个流域的贡献后,通过叠加计算来求得整个流域的总响应.耦合型分布式水文模型,由于是通过一组微分方程及其定解条件构成的定解问题来描述流域降雨径流形成规律的,因此它能考虑各子流域或子区域对全流域贡献之间的相互作用,即只有通过联立求解,才能给出这类定解问题的解.

概念性分布式水文模型多是松散的,而具有物理基础的分布式水文模型有些是耦合的,例如,以水动力学为主要基础的分布式水文模型几乎都是耦合的,像上述 SHE 模型;也有一些是松散的,例如,以水文学理论为主要基础的分布式水文模型一般是松散的,像上述 DBSIN 模型.概念性松散型分布式水文模型,由于对降雨径流的形成机理作了较大的概化,故理论上不够完善,但求解计算比较简单.具有物理基础的耦合型分布式水文模型,由于较好地遵循降雨径流形

成机理,故理论上较完善,但必须解复杂的微分方程组,这是其困难所在.具有物理基础的松散型分布式水文模型的优缺点介乎以上两者之间,因此是近期发展前景较好的一类分布式水文模型.

3 模型参数确定的理论途径

分布式水文模型包含的参数在空间上一般是呈不均匀分布的,也就是说,每个子流域或子区域的模型参数一般是不同的.由于不可能在每个子流域或子区域都设站收集水文气象资料,因此,传统上主要依赖于实测水文气象资料来率定模型参数的方法,在此情况下,难以得到全面应用.如果试图根据流域出口断面水文资料来率定为数众多的子流域或子区域的模型参数,那也是难以解得物理意义明确的参数值的.因此,确定分布式水文模型参数的问题,就成为缺乏水文气象资料条件下如何推求模型参数的问题.

水文过程与下垫面,尤其是流域地形地貌的相互作用是自然界客观存在的现象.虽然水文过程对流域地形地貌的作用十分缓慢,甚至只有地质年代上的意义,但流域地形地貌的改变对水文过程的影响一般是比较快速的.寻求水文过程与流域地形地貌的相互作用及其定量关系,不仅是为了揭示科学规律,而且是为了寻求缺乏水文气象资料情况下确定模型参数的方法.

经过长期努力,水文学家和地貌学家发现,流域降雨径流的形成,除了受控于降雨特性,如降雨量、降雨强度、降雨历时和降雨时空分布等外,与下垫面因子存在明显的因果关系.早在 20 世纪 30~40 年代,水文学家就试图通过对大量实测水文资料和流域地形地貌资料的分析,利用综合统计法寻找流域单位线的主要特征值,如单位线峰值、单位线滞时、单位线底宽等与流域地形地貌因子之间的经验关系,来解决缺乏水文气象资料情况下流域单位线的推求.这种所谓“综合单位线法^[12]”差不多影响了水文学整整半个世纪.但是,由于这类经验关系缺乏严格的理论指导,因此不仅精度难以得到保证,而且也不便外延和移用.

从理论上揭示水文过程与下垫面因子的因果关系,是水文学家向往并长期为之奋斗的目标,但直到 20 世纪 70 年代末,这个问题才有了突破性的进展.就流域汇流而言,现在至少有三种具有明确物理概念的理论可用来解释和建立它与流域地形地貌因子之间的因果关系^[13]:

a. “粒子理论”.它是以 Rodriguez-Itube^[14] 和 Gupta^[15] 为代表的学派于 20 世纪 70 年代末创立的流域汇流理论.根据“粒子理论”,人们可得出瞬时均

匀降落到流域上的雨滴之间呈弱相互作用时,流域瞬时单位线就是雨滴的流域汇流时间的概率密度函数的结论,即

$$u(t) = f_B(t) \quad (2)$$

式中: $u(t)$ 为流域瞬时单位线; $f_B(t)$ 为雨滴的流域汇流时间的概率密度函数.

b. “扩散理论”.它是 Rinaldo^[16] 于 1991 年首创的流域汇流理论.根据“扩散理论”,人们可得出流域汇流是地貌扩散和水动力扩散共同作用的结果,且可导出流域瞬时单位线的表达式为

$$u(t) = \int_0^\infty g(x,t) N(x) Z^{-1} dx \quad (3)$$

式中: $g(x,t)$ 反映了水动力扩散作用,实用上由于坡面汇流作用常可忽略不计,故可用河道响应函数来代替它; $N(x)$ 为宽度函数,它是用来表示地貌扩散作用的; Z 为宽度函数的总面积.

c. “水动力学理论”.它是计算河流水力学发展的一个结果.根据“水动力学理论”,人们可以将流域出口断面过程线理解为流域上的净雨过程经由坡面和河网组成的传播场的作用而形成的,这样,流域汇流问题就转化为坡面和河网水动力学计算问题.

这些物理概念清晰的理论途径显然与传统的基于系统分析和综合统计分析的“黑箱子”途径不同,它们不仅是一种通过揭示流域汇流的机理来建立流域汇流计算方法的途径,而且可以看出据此导出的流域瞬时单位线公式均已包含了有关地形地貌因子^[14~19].而由“黑箱子”途径给出的流域汇流计算方法充其量是一些以模拟流域汇流的宏观表现为基础的方法^[20].

4 未来发展的展望

分布式水文模型,尤其是具有物理基础的分布式水文模型,由于它们明显优于传统的集总式水文模型,能为真实地描述和科学地揭示现实世界的降雨径流形成机理提供有力工具,因此是一种发展前景看好的新一代水文模型.

地理信息系统是用数字化方法描述具有复杂空间变化的水文过程的必要技术支撑.加强水文学与地理信息系统技术的结合,不断开发地理信息系统技术在水文学理论与应用中的领域是水文学家的一项重要任务,谁欲占领水文学研究的前沿阵地,谁就应当在水文学与地理信息系统技术结合上加倍努力.

由于描述降雨径流形成机理的微分方程和定解条件一般为非线性,十分复杂,数学上至今无法求得其解析解.虽然计算数学理论和计算机技术的发展为解这类微分方程的数值解奠定了基础,但数值解

的前提是必须将原来的微分方程离散化成代数方程.这是一种以带来截断误差为代价换取微分方程的解的方法,因此,为了保证数值解的收敛性和稳定性,应当使空间步长和时间步长之间满足某种条件,否则就会出现背离物理图景的不合理结果,甚至得不出结果.随着分布式水文模型研究的深入,研究这类微分方程组的数值解理论和技术将会提到议事日程上来.

分布式水文模型因涉及到缺乏水文气象资料情况下确定模型参数的问题,故必将激发水文学家应用实验手段和数理分析手段研究水文学基本理论的兴趣.尤其是降雨径流形成机理与地形、地貌、土壤、植被、地质、水文地质和土地利用之间定量关系的揭示将受到水文学家的格外重视.这反过来又会有力地促进定量地貌学的发展.人们目前已能通过随机模拟理论和分形理论揭示河系生成中的分叉规律,证明 Horton 河数、河长和面积三个地貌定律的正确性;数字高程模型技术的快速发展,更为定量地貌学研究增添了新的生机.一门属于水文学与地貌学相互交叉的新学科——地貌水文学有望形成.

确切地掌握降雨量的空间分布,是使用分布式水文模型的重要先决条件.传统的定点测雨的雨量站是难以给出复杂多变的降雨空间分布的.测雨雷达则不同,它可以直接测得降雨的空间分布,提供流域或区域的面雨量,并具有实时跟踪暴雨中心走向和暴雨空间变化的能力.尽管在当前科学水平下,测雨雷达的精度还有待提高,但它仍然是测雨技术必然的发展方向之一.目前,美国已建成了由 120 多台高质量多普勒雷达组成的称为 NEXRAD 系统的覆盖全美的测雨雷达网^[21],能够提供时段小至 5 min 和空间分辨率小于 1 km² 的雨量估计值.中国目前已在长江三峡区间和黄河小浪底——花园口区间等重点防洪地区建成了测雨雷达系统,全国性的测雨雷达系统也在筹建之中.雷达测雨只是遥感测雨技术中的一种,应用卫星遥感测雨技术也在研究之中.大力发展雷达和卫星遥感测雨技术已势在必行.

当前,对于松散型分布式水文模型,应着重研究其适用条件和与新技术的结合,对于具有物理基础的耦合型分布式水文模型,应就有关的重要理论问题着力加以探索.可以预示,随着一系列理论和技术的进一步完善,分布式水文模型在水资源开发、利用、保护、洪水预报、人类活动对水文影响等方面,必将得到越来越广泛的应用.

参考文献:

[1] Rosso R. An introduction to spatially distributed modeling of

- basin response [A]. In: Rosso R. Advances in Distributed Hydrology [C]. Bergamo: Water Resources Publication, 1992. 3 ~ 30.
- [2] 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.
- [3] 芮孝芳,朱庆平.分布式流域水文模型研究中的几个问题[J].水利水电科技进展,2002,22(3):56~58.
- [4] Linsley K, Crawford N H. Computation of synthetic streamflow record on a digital computer[J]. Int Assoc Sci Hydrol Publ, 1960,51:526~538.
- [5] 赵人俊.流域水文模拟[M].北京:水利电力出版社,1984.31~40.
- [6] Beven K J, Kirkby M J. Toward a simple physically-based variable contributing area of catchment hydrology[R]. Working paper No.154, School of Geography, Univ Leeds, UK, 1979.
- [7] 于维忠,芮孝芳.国外汇流理论若干进展[J].水文,1981(5):68~76.
- [8] Singh V P, Woolhiser D A. Mathematical modeling of watershed hydrology[J]. J of Hydrologic Engineering, 2002,7(4):270~292.
- [9] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al. An introduction to the European Hydrologic System-System Hydrologique European, SHE[J]. J of Hydrol, 1986,87:45~77.
- [10] Garrote L, Bras R L. A distributed model for real-time flood forecasting using digital elevation models[J]. J of Hydrol, 1995,167:279~306.
- [11] Ciarpica L, Todini E. TOPKAPI: a model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales[J]. Hydrological Processes, 2002,16(2):207~229.
- [12] Snyder F F. Synthetic unit hydrographs[J]. Trans Am Geophys Union, 1938, (19)1:447~454.
- [13] 芮孝芳.地貌瞬时单位线研究进展[J].水科学进展,1999,10(3):345~350.
- [14] Rodriguez-Iturbe I, Valdes J B. The geomorphological structure of hydrologic response[J]. Wat Resour Res, 1979(15):1409~1420.
- [15] Gupta V K, Wagnire E, Wang C T. A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology[J]. Wat Resour Res, 1980(16):855~862.
- [16] Rinaldo A, Marani A, Rigon R. Geomorphological dispersion[J]. Wat Resour Res, 1991(27):513~525.
- [17] Cunge J A, Holly F M, Verway A. Practical aspects of computation river hydraulics [M]. Boston: Pitman, 1980.
- [18] 芮孝芳.应用流路长度分布律和坡度分布律确定地貌瞬时单位线的研究[J].水科学进展,2003,14(5):602~606.
- [19] 芮孝芳,石朋.基于地貌扩散和水动力扩散的流域瞬时单位线研究[J].水科学进展,2002,13(4):439~444.
- [20] 芮孝芳.产汇流理论[M].北京:水利电力出版社,1995.
- [21] Maidment D R. Handbook of hydrology [Z]. New York: McGraw-Hill, Inc, 1992.

(收稿日期:2003-11-25 编辑:熊水斌)