

水文模型研究进展及发展方向

金 鑫¹,郝振纯¹,张金良²

(1. 河海大学水资源环境学院,南京 210098;2. 黄河水利委员会防汛办公室,郑州 450003)

摘 要:概述了水文模型的发展历程,着重对分布式水文模型等现状研究重点进行了介绍。通过对水文模型研究现状的分析,指出 GIS、RS 技术与水文模型研究有机结合、水文过程物理规律、水文尺度问题及水文模型与其他系统模型的耦合研究是今后水文模型研究的重要发展方向。

关键词:水文模型;研究进展;发展方向

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)04-0197-03

Research Evolution and Development Direction of Hydrological Models

JIN Xin¹,HAO Zhen-chun¹,ZHANG Jin-liang²

(1. College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. The Office of Flood Control, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The progress course of hydrological models and research evolution of distributed hydrological models are presented. In the foundation of analyzing actuality about research in hydrological models, it is point out that the combination of hydrological models and GIS, RS, study of hydrological physics rules, hydrological scale question, the coupling of hydrological models and other system are development directions of study about hydrological models in the future.

Key words: hydrological models; research evolution; developing directions

1 引 言

水文模型是对自然界中复杂水文现象的近似模拟,是水文科学研究的一种手段和方法。描述水文过程的模型,是一切与水文过程有关的过程模拟的基础。从 20 世纪 30 年代 Horton 提出著名的下渗理论^[1]至今,在近一个世纪以来,各国水文学家在水文规律研究及水文过程模拟方面做了大量的研究工作,获得了丰硕的成果,也提出了众多的水文模型。按模型的性质和建模技术,水文模型可分为:实体模型、类比模型和模拟模型。其中,模拟模型是最常用的一类水文模型,也是各国学者着力研究的重点。该类模型的特征是运用数学的语言和方式描述水文原型的主要特征关系和过程,因此也称为水文数学模型。

2 水文数学模型的发展历程

水文模型是水文学发展的产物,并伴随着水文学的发展而发展。现代水文模型出现于应用水文学兴起的 20 世纪 30 年代^[2],特别是 Sherman 提出水文单位线过程的概念^[3]和 Horton 提出下渗理论以后。在 50 年代以前,水文模拟大多是针对某一个水文环节(如产流、汇流等)进行的。进入 50 年代以后,随着人们对入渗理论^[4]、土壤水运动理论^[5]和河道理论^[6]等的综合认识,以及将计算机引入水文研究领域,开始把水文循环的整体过程作为一个完整的系统来研究,在 50 年代后期提出了“流域模型”的概念。著名的 Stanford 模型就是在 1959 年提出的。20 世纪 60 年代初到 80 年

代中期,是水文模型蓬勃发展的时期^[7]。先后提出了一些比较著名的水文模型,如 Stanford 模型^[8]、SR - FCH 模型、API 模型^[9]、新安江模型^[10]、SSARR 模型、ARNO 模型^[11]、SCS 模型^[12]、HEC - 1 模型^[13]等。

Freeze 和 Harlan 于 1969 年首先提出了分布式水文模型的概念^[14]。由于模型对资料的要求很高,要从有限的观测站点的有限资料中找到在质量上符合要求,且在空间和时间分辨率上合适的资料是十分困难的,加之对计算机的要求较高,使得分布式水文模型在 70 年代末以前发展较慢。分布式水文模型的大量出现开始于 20 世纪 70 年代末以后。主要的分布式水文模型有 SHE 模型^[15]、IHDM 模型^[16]、SWAM 模型^[17]等。

80 年代后期至今,流域水文模型的发展处于缓慢阶段,大多数的水文模型是在原模型的基础上,为适应不同的用途进行改进。由于计算机计算能力的提高,以及地理信息系统、遥感技术等新技术引入水文模型的研究和应用中,使得资料的获取和模型的运行更加方便,分布式水文模型得到了较快的发展,致使原有的水文模型在处理降雨和下垫面条件的不均匀性方面得到了改进,也更重视对水文过程物理基础的描述。

3 水文模型研究现状

由于生产实践对水文模型的要求日益提高,以及水文学本身的发展和新技术与水文模型的研究不断结合,水文模型的研究已从单位线模型、经验相关模型发展到概念模型,特别是以分布式概念模型的研究为重点研究阶段。

* 收稿日期:2005-09-26

基金项目:国家科技攻关项目—水安全保障技术研究专题项目:水库水沙调控关键技术研究(专题任务编号:2004BA610A - 03 - 04)

作者简介:金 鑫(1967 -),男,北京人,河海大学水资源环境学院博士研究生,从事水文水资源研究。

3.1 分布式水文模型研究

分布式水文模型用严格的数学物理方程表述水文循环的各子过程,在参数和变量中充分考虑空间的变异性,并着重考虑不同单元间的水平联系,对水量和能量过程均采用偏微分方程模拟。参数一般不需要通过实测水文资料来率定,解决了参数间的不独立性和不确定性问题,便于在无实测水文资料的地区推广应用。

完全分布式的水文模型指的是具有严格物理基础的分布参数水文模型,因此,该类模型的两个显著特点就是“具有严格物理基础”和“参数是分布的”。而反映流域水文过程的具有严格物理基础的水文模型在流域各处的参数也应该是不同的,即具有物理基础的流域水文模型必然是分布式参数模型^[18]。由于水文过程的复杂性、下垫面的多变,以及人类对水文过程认识的限制,目前尚没有任何一种模型能够完全描述实际的水文物理过程,而是或多或少地基于一定的假设。因此,目前的分布式水文模型基本都是将具有一定物理基础的概念性水文模型参数分布化,而分布的概念一般是相对于集总而言的。

传统的集总式模型由于忽略了参数和下垫面条件的时空变化,将参数和变量都取流域的平均值,而这与实际流域的情况并不相符,因为不仅降雨具有随时变化的空间分布,流域的土壤、植被、地形、地貌、地质、水文地质及人类活动的影响等在空间上也是时空变化的。因此,将下垫面条件本不均匀的流域硬性作为一个空间均化的整体来处理,显然只能提供流域产汇流过程空间均化的结果,造成集总式流域水文模型的精度往往不能令人满意^[19]。因此,分布式流域水文模型就成为了当今水文研究的重点。

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,包括建立在经验模型和概念性水文模型基础上的分布式水文模型。其中 1986 年丹麦水力学研究所、英国水文研究所和法国的 SOGREAH 合作开发的系统水文欧洲 SHE 是最早为人所知的,也被认为是最成功的分布式水文模型^[20]。SHE 模型以水动力学为基础,模拟水文循环的所有重要环节,模型中涉及到的融雪、截留、蒸散发、坡面漫流、河道径流、非饱和带竖流和地下水流等物理过程均由微分方程来描述,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,将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;模型的地面水流根据圣维南方程的二维扩散波近似计算,地下水流根据三维控制方程计算。

另外以地形为基础的半分布式流域水文模型 TOPMODEL 也在水文领域获得了广泛的应用^[21]。TOPMODEL 是一个以地形为基础的半分布式流域水文模型,其主要特征是利用地貌指数 $\ln(-\tan \beta)$ 来反映流域水文现象,特别是径流运动的分布规律。该模型结构简单、优选参数少、物理概念明确,在集总式和分布式流域水文模型之间起到了一个承上启下的作用。

3.2 GIS 和 RS 技术与水文模型的结合

分布式水文模型的概念从提出至今已有 30 多年了,而成为国际上水文研究的热点^[22]是由于 GIS 和 RS 技术与水文研究的结合。

GIS(地理信息系统)是在计算机软硬件的支持下,基于系统工程和信息科学理论,科学管理和综合分析具有空间内涵的地理数据,为规划、管理、决策和研究提供所需信息的技术系统^[23]。与流域产汇流有关的地理数据主要有地面高程和反映土壤、植被、地质、水文地质特性的参数等,其中以 DEM(数字高程模型)在水文研究中的应用最为广泛。DEM 不仅表达了地面

高程的空间分布,而且可以自动生成流域水系和分水线、自动提取地形坡度和其它地貌参数。将 DEM 与表达土壤、植被、地质、水文地质特性参数的空间分布叠加在一起,还可以描述这些下垫面参数与地面高程之间的关系。GIS 对于分布式水文模型的作用主要体现在分布式水文模型的相关数据处理和与分布式水文模型的系统集成两个方面。对数据的处理指的是将不同投影和比例尺的数字地形数据转换为标准格式的数据并提供复杂的地图叠加分析和空间分析功能为水文模型处理输入数据,并将水文模型输出可视化 and 再分析^[24]。

RS(遥感)技术是 20 世纪 60 年代以来发展起来的新兴边缘科学,是一门先进而实用的探测技术。由于水文模型,特别是分布式水文模型的发展,极大地提高了对空间数据的要求,而传统的观测站网密度远远不能满足模型对数据的要求,而遥感方法被认为是花费较少的数据获取方法^[25]。作为一种信息源,遥感技术可以提供土壤、植被、地质、地貌、地形、土地利用和水系水体等许多有关下垫面条件的信息,也可以获取降雨的空间变化特征、估算区域蒸发、监测土壤水分等,这些信息是确定产汇流特性和模型参数所必需的。和传统的数据收集方法相比,遥感技术获取数据的优点主要有:面状数据,无需要再进行点面的转化;直接获取或经转换后为数字化形式,便于应用;可提供相对高分辨率的时间和空间信息;可获取偏僻的无人可及的区域资料^[26]。目前,由于遥感技术不能直接提供水文模拟所需的数据,需要把遥感获得的信号转换成相应的水文数据,而将遥感数据解译成水文信息的可行性技术仍在发展中,其转换的过程仍存在很多困难。

4 水文模型的发展方向

纵观水文模型发展的历程和研究现状,以下几个方面应该是今后一段时期水文模型研究的重点及发展方向:

(1) GIS 和 RS 应用于水文模型的研究。分布式水文模型之所以能成为近年来的研究热点,一是因为 GIS 技术的不断完善,使得描述下垫面因子复杂的空间分布有了强有力的工具;二是计算机技术和数值分析理论的进一步发展,为数值方法求解描述复杂流域产汇流过程的偏微分方程奠定了基础;三是包括雷达测雨技术和卫星云图技术在内的遥感技术的进步,为获取时空分布的数据创造了条件^[19]。GIS 和 RS 在水文领域的应用给水文模型的研究思路和技术方法带来了创新和革命,就目前的研究看,水文模型和 GIS 的集成,有的是“相互独立”形式的集成,有的是松散或相对紧密型的集成,还都不是完全意义上的耦合。要实现水文数值模拟模型和 GIS 的“完全”集成,尚需并进一步研究集成技术的实施途径。RS 技术对于水文模型能够提供流域空间特征信息,是描述流域水文变异性的最为可行的方法,尤其是在地面观测缺乏地区。但由于遥感资料还没有完全融入水文模型的结构中,直接应用还有很大的困难,又缺乏普遍可用的从遥感数据中提取水文变量的方法,使得遥感技术在水文模型中的应用水平还比较低。因此,加强遥感技术与水文模型的集成和从遥感数据中提取水文数据的方法研究,对于水文模型的创新十分必要。

(2) 水文过程物理规律的进一步研究。水文过程的物理规律是对水文过程进行准确描述的基础,而目前还远未完全掌握,这也限制了水文模型的发展。因此,充分利用新技术和新手段,加强水文物理规律的研究仍是今后水文研究的重点。

(3) 水文尺度问题的研究。水文尺度问题自 20 世纪 90 年代初被正式提出后,尺度问题在水文科学中一直受到国内外学者的广泛的关注和重视^[27]。水文的理论与实践证明,不同时间和空间尺度的水文系统规律通常有很大的差

异。不同尺度的水文循环的机理是不相同的,水文模型的结构也就不尽相同。由在微观尺度水文实验中获得的“物理”参数,如土壤饱和含水率往往不能直接应用到流域尺度的水文模拟。宏观尺度的水文气象背景值变化也不能直接套用到时空变异十分突出的微观水文模拟预报,如大气环流模式所采用的空间分辨率是数百公里,甚至更大,而在中尺度(10^2 km^2)或更小尺度的水文系统模拟中,需要的是分辨更高的气候信息。显然,小尺度所需的气候信息从全球气候模型中是得不到的。对于不同时间尺度的研究,如以地质时期为时间尺度建立的水文系统气候变化模型,只能为较小时间尺度的气候变化模型提供一个“大背景”,无法提供所需要的更详细(即小分辨率)的信息。

目前,由于水文变量时空分布的不均匀性和水文过程转换的复杂性,以及水文尺度问题和不同尺度之间水文信息转换的研究还存在很多困难,尺度问题还远未得到解决。因此,在现代水文模拟研究中,无论是从宏观综合还是微观研究,尺度问题始终是关注和研究的焦点。

(4) 水文模型与其他系统模型耦合研究。由于没有足够的

输入数据,限制了分布式水文模型模拟的精度。大气模型的不断地开发,为水文模型提供了可选择的数据源。研究表明^[28~30],水文模型和大气模式中模拟的资料互相应用,可以取得较好的结果。而大气环流模型不适合模拟边界层的变量,如蒸发和径流,它没有包括陆地水文循环中水的横向迁移,对蒸发的模拟完全是根据垂直方向的水量平衡。因此,加强水文模型与大气环流模型的耦合研究,在今后仍是研究的热点。

水循环深刻地影响着全球水资源系统和生态系统的结构和演变,影响自然界中一系列的物理过程、化学过程和生物过程,也影响着人类社会的发展和生产活动,在地圈-生物圈-大气圈的相互作用中占有显著的地位。因此,水文模型不仅在水循环研究领域有着重要的地位,在与水循环有关的其他系统的模拟研究中,水文模型也应发挥应有的作用。目前,水文模型除了在水资源评价、地表水污染、水环境预测中有较好的应用外,在农业灌溉、水土流失、地下水污染、土地利用变化影响、水生生态系统、气候变化影响等方面的研究及应用都较为欠缺^[20]。因此,加强水文模型与其他系统模型的耦合研究,以充分利用水文模型的研究成果,是值得研究的工作。

参考文献:

- [1] Horton R E. The role of infiltration in the hydrological cycle[J]. Trans. A. m. Geophys. Union, 1933,14: 446 - 460.
- [2] Anderson M G, Burt T P. Process studies in hill slope hydrology: an overview[A]. Anderson M G, Burt T P. Process studies in hill slope hydrology: an overview[C]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1990, 2.
- [3] Sherman L K. Stream flow from rainfall by the unit hydrograph method[J]. Engineering News Record, 1933,14:446 - 460.
- [4] Philip J R. An infiltration equation with physical significance[J]. Soil Sci., 1954,77: 153 - 157.
- [5] Richards L A, Grander W R, Ogata G. Physical processes determining water losses form soil[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1956,20:310 - 314.
- [6] McCarthy G T. The unit hydrograph and flood routing[R]. Proc. Conf. North Atlantic Division, US Army Corps of Engineers, 1938.
- [7] Singh V P. Computer Models of Watershed Hydrology [M]. USA: Water Resources Publications, 1995.
- [8] N H, Crawford, R K Linsley. Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model [R]. Technial Report, Dept of Civil Engineering, Stanford University, 1966.
- [9] 袁作新. 流域水文模型[M]. 北京:水利电力出版社, 1990.
- [10] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型与陕北模型[M]. 北京:水利电力出版社, 1984.
- [11] Marco Franchini, Michele Pacciani. Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models[J]. Hydrol., 1991, 122:161 - 219.
- [12] Richard H McCuen. A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Methods[M]. Prentice - Hall, Englewood Cliff's, 1982.
- [13] U. S. Corps of engineers[M]. HEC - 1 User's Manual, 1982.
- [14] Freeze P A, Harlan R L. Blue print for a physically-based digital simulated hydrologic response mode[J]. Hydro. Sci., Bull., 1969,9:237 - 258.
- [15] Jonch - Clausen T. System Hydrologique European: a short description [A]. Danish Hydraulics Institute. SHE Report [C]. Horsholm, Denmark, 1979.
- [16] Morris E M. Forecasting flood flows in grassy and forested basins using a deterministic distributed mathematical model [A]. Hydrological Forecasting[C]. IAHS Publication, 1980,129:247 - 255.
- [17] DeCoursey D G. ARS small watershed model[A]. Paper-American Society of Agricultural Engineers[C]. ASAE, St. Joseph, Mich, USA, 1982.
- [18] 陈仁升, 康尔洒, 等. 水文模型研究综述[J]. 中国沙漠, 2003,23(3): 221 - 229.
- [19] 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.
- [20] M B Abbott, J C Refsgaara. Distributed Hydrological Modelling[M]. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [21] Beven KJ, Kirkby MJ. A physically based variable contributing area model of basin hydrology[J], Hydrol. Sci. Bull., 1979, 24(1): 43 - 69.
- [22] Wood E F, Sivapalan M, Beven K, et al. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling [J]. Hydrol. 1988,102:29 - 47.
- [23] Storm B, Jensen K H. Experiences with field testing of SHE on research catchments[J]. Nordic Hydrology, 1984,15: 283 - 294.

几内亚)比较,古老的全缘叶比例都高于不同干扰尺度,而次生的锯齿叶都低之。与浙江常绿阔叶林比较,古老的全缘叶比例都低于不同干扰尺度,而次生的锯齿叶都高之。从中说明不同干扰强度加大和愈往南古老的全缘叶所占比重较少,锯齿叶则反之。

(4)叶型分析。不同干扰尺度叶型(表 5)以具单叶的种类为主,具复叶的种类较少。单叶随着干扰尺度加大逐渐呈“S”下降,而复叶逐渐呈“S”上升。与热带雨林(新几内亚)比较,单叶比例都低于不同干扰尺度,而复叶都高之。与浙江常绿阔叶林比较,单叶除了 B 级以外比例都低于不同干扰尺度,而复叶都高之。从中说明不同干扰强度加大单叶的种类所占比重较少,复叶的种类则反之;愈往南复叶的种类所占比重较大^[10],单叶则反之。

(5)常绿和落叶分析。不同干扰尺度都以常绿种类占绝对优势,落叶种类比例较少。根据哈钦松提出植物形态进化原则^[15],常绿为原始,而落叶为次生;原始的常绿种类随着干扰尺度加大逐渐略呈“S”型下降,即 CK 为 96%、A 级为 94%、B 级为 95%、C 级为 90%和 D 级 88%,而次生的落叶种类略呈“S”上升,即 CK 为 4%、A 级为 6%、B 级为 5%、C 级为 10%和 D 级为 12%。

参考文献:

- [1] 中国林学会森林生态学会. 人工林地力衰退研究[M]. 北京:中国科学技术出版社,1992. 1 - 334.
- [2] 游水生,杨玉盛,梁一池,等. 福建武平火烧前米槠种群动态分析[J]. 福建林学院学报,1995,15(3): 1 - 4.
- [3] 游水生,饶英豪,罗水发,等. 福建武平帽布米槠林择伐经营策略初探——年龄结构和生长过程分析[J]. 福建林学院学报,1996,16(3): 14 - 18.
- [4] 游水生,何育城,林德喜,等. 福建武平帽布米槠林火烧前后植物种类组成变化研究[J]. 福建林学院学报,1997,17(4): 348 - 357.
- [5] 游水生,张志翔,李如泽,等. 福建武平帽布米槠林火烧前后种类组成变化研究——火烧前后重要值和物种多样性变化[J]. 福建林学院学报,1998,18(1): 65 - 68.
- [6] 林德喜,游水生,何育城,等. 不同更新方式林地土壤物理性状的研究[J]. 福建林学院学报,1997,17(4): 336 - 339.
- [7] 林德喜,游水生,等. 炼山后不同更新方式林地土壤化学性状的研究[J]. 福建林学院学报,1997,18(4): 327 - 330.
- [8] 王伯荪. 南亚热带常绿阔叶林取样技术研究[J]. 植物生态学与地植物学丛刊,1982,6(1): 51 - 61.
- [9] Raunkiaer C. The life forms of plant and statistical plant geography[M]. New York:Oxford University Press,1932. 2 - 104.
- [10] 胡舜士. 广西常绿阔叶林的群落学特征[J]. 植物学报,1979,21(4): 362 - 370.
- [11] 宋永昌,张绅,王献溥,等. 浙江泰顺县乌岩岭常绿阔叶林的群落分析[J]. 植物生态学和地植物学丛刊,1982,6(1): 14 - 35.
- [12] 彭少麟. 森林群落稳定性与动态测定[J]. 广西植物,1987,2(1): 67 - 72.
- [13] 刘金林,周秀佳,顾咏洁,等. 浙江省午潮山次生植被恢复过程中的群落学剖析[J]. 植物生态学和地植物学丛刊,1983,7(1): 8 - 19.
- [14] 武吉华,张绅. 植物地理学[M]. 北京:高等教育出版社,1983. 100 - 101.
- [15] 汪劲武. 种子植物分类学[M]. 北京:高等教育出版社,1985. 59 - 61.

3 小 结

本文从群落外貌探讨不同人为干扰尺度对福建武平米槠林的影响。结果表明:CK、A 级、B 级和 C 级的外貌是由革质叶、单叶、小型叶为主的常绿高位芽植物所决定的,而 D 级是由革质叶、单叶、中型叶为主的常绿高位芽植物所决定的。随着不同人为干扰尺度的加大各大类群中蕨类植物科、属和种数略上升,裸子植物科、属和种数变化不大,双子叶植物逐渐上升或呈“S”型上升到 C 级后下降,单子叶植物略上升至 B 级或 C 级后下降;生活型中矮高位芽植物和地面芽植物变化不大,大高位芽植物、中高芽位植物、小高位芽植物逐渐下降或呈“S”型下降,藤本植物、地下芽植物和地上芽植物逐渐上升或呈“S”型上升;叶级中随着干扰尺度加大小型叶上升至 B 级后呈“S”型下降,中型叶上升至 C 级后下降,而大叶和微叶逐渐呈“S”型上升;叶质中随着干扰尺度加大革质叶随着干扰尺度加大逐渐下降,而革质叶随着干扰尺度加大逐渐上升;叶缘中全缘叶逐渐略下降,而锯齿叶与此相反;常绿或落叶中常绿逐渐略下降,而落叶与此相反;叶型中单叶逐渐呈“S”下降,而复叶与此相反。与其它地区比较,愈往南高位芽植物、中型叶、革质叶、全缘叶和复叶所占比例加大,与此反之。

(上接第 199 页)

- [24] Ross M A, Tara P D. Integrated hydrologic modeling with geographic information system[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1993,199:129 - 139.
- [25] Kolinsky C. J., Gasper p, Lagerlof G. The future of spaceborne altimetry: Ocean and climate change[M]. Washington, D. C.:Joint Oceanographic Institution Incorporated,USA.
- [26] 吴险峰,刘昌明. 流域水文模型研究的若干进展[J]. 地球科学进展,2002,21(4): 341 ~ 348.
- [27] Gupta V K, Waymine E. Multiscalling properties of special rainfall and river flow distribution[J]. J. Geophysical Res, 1990, 95(3): 1999 - 2009.
- [28] Miller J R, Russell G L. Investigating the interactions among river flow, salinity and sea ice using a global coupled atmosphere-ocean-ice model[J]. Annals of Glaciology, 1997, 25: 121 - 126.
- [29] Kite G W. Simulating Columbia River flows with data from regional - scale climate models[J]. Water Resour. Res, 1997, 33: 1275 - 1285.
- [30] Liston G E, Sud Y C, Wood E F. Evaluating GCM land - surface hydrology parameterizations by computing river discharges using a runoff routing model: Application to the Mississippi basin[J]. J Appl Meteorol, 1994, 33: 394 - 405.