

山东科技大学学术著作出版基金
山东省自然科学基金 (ZR2014DM004)
国家自然科学基金 (41471025)
国家自然科学基金 (40971021)

资助

分布式水文模型参数 空间变异模拟研究

张升堂 著



黄河水利出版社

分布式水文模型参数 空间变异模拟研究

张升堂 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书是分布式水文模型新的研究领域参数空间变异性基础研究方面的一本专著,关注于分布式水文模型对现代流域坡面流过程模拟中的参数变异性处理,针对坡面流汇流过程的基础理论问题进行了探讨分析,对影响坡面流分布式水文模拟精度的主要输入参数降水量、流域特征参数地表糙率的空间变异性进行理论探索及部分实验验证。

本书可以作为水文学及水资源、水利工程、气象科学、环境科学、土地管理等专业的高年级本科生、研究生以及相关领域科技工作者的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

分布式水文模型参数空间变异模拟研究/张升堂著.
郑州:黄河水利出版社,2015.8
ISBN 978-7-5509-1200-7

I. ①分… II. ①张… III. ①水文模型—参数
分析 IV. ①P334

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 199002 号

策划组稿:简 群 电话:0371-66026749 E-mail:w_jq001@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsclchs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开 本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印 张:14.5

字 数:253 千字

印数:1—1 000

版 次:2015 年 8 月第 1 版

印次:2015 年 8 月第 1 次印刷

定 价:36.00 元

前 言

目前,全球范围的气候变暖以及与我国经济腾飞相随的城市化进程,影响着我国不同尺度范围的流域面水文过程,各种流域面水文过程在这种无处不在、无时不在的影响下悄然发生着深刻而反常的变化。快速增长的弱透水面、不透水面大范围代替了自然坡面,降水与坡面径流的响应关系变得异常,坡面流形成及汇流过程反常,越来越多的像北京“7·21”那样的超大频率灾害性暴雨洪水在各地出现,甚至引发水文地质灾害,全国范围内每年发生的暴雨洪水灾害以及由水文地质灾害造成的直接经济损失数以万亿元计,并危及人民生命安全。而同时西北地区部分河流年径流量逐年超出正常变幅而锐减,最终成为季节性河流,甚至完全干涸。

因此有必要研究坡面流特征及其运动规律,揭示降水及流域特征参数的空间变异与产汇流的响应更新,精确模拟流域坡面上降水及下垫面特征参数随大气环境及人类经济活动影响而不断变化条件下的降水径流过程,为区域灾害性暴雨洪水预测防治、流域水土治理及水利工程建设提供科学依据。

分布式水文模型,尤其是具有物理基础的分布式水文模型,由于能够科学地揭示降水径流形成机制,成为目前探索和认识复杂流域水文过程的有效手段,也成为认识气候变化、地理环境变化下的流域水文、生态响应和演变规律的有效工具。因此,在全球变暖呼声强烈、我国城市化浪潮汹涌的背景下,采用实验和数理分析手段探索、分析分布式水文模型的模型参数在降水径流形成机制与地形、地貌和土地利用之间定量关系的影响作用,受到水文学家的格外重视。

进行上述探索与分析需要解决两个重要问题:其一,确切地掌握降水量的空间分布,传统的雨量站定点观测难以给出复杂多变的降水空间分布;测雨雷达理论上虽可以直接测得降水空间分布,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,但目前精度还有待提高,而且在一般情况下流域没有测雨雷达设施。其二,对流域地表特征参数的空间变异性的把握和描述,需要将流域特征参数按对降水、径流的影响显著程度进行分类排序,由于研究方法和目的不同,分布式水文模型选取的参数不同,总体而言,坡度、坡向、高程、植被、坡面糙率等是分布式水文模

型研究降水、径流必备的特征参数。如何在分布式水文模型栅格单元内体现这些参数对径流的汇集和分配，是分布式水文模型模拟流域坡面径流路径和流量分配的关键。实际上，坡度、坡向、高程等在流域面的分布已内含于目前的 GIS 等各类应用软件中，但这些参数对坡面径流的路径和流量分配不同软件有不同的处理算法，因而结果不尽相同，甚至大相径庭。

目前的分布式水文模型理论上借助测雨雷达、GIS 软件等能够精细观测并模拟流域降水径流过程，但在实际应用中总存在许多不足，甚至模拟结果不一定优于集总式水文模型。

本书分析、梳理分布式水文模型在以上两点的发展和欠缺，总结多年在降水分布和流域坡面特征参数的空间分布领域的研究成果，侧重于建立插值模型生成分布式降水数据，满足分布式水文模型的降水数据的需求；建立水力学模型，研究地表糙率矢量属性对坡面流流向及流量分配的影响作用，改进目前忽略或简单处理地表糙率空间变异对坡面水流过程的影响作用的做法，使分布式水文模型对处于不断变化气候条件和地表类型及植被分布的现代流域上降水径流的模拟更贴近现实，以期对推动分布式水文模型理论和技术的发展有所裨益。

在本书文字整理过程中，研究生梁博、宋词、王丽君付出了大量辛勤的劳动，同时在成书过程中我的同事陈艳、谢鲲、刘音、陈军涛提出过不少修改建议，陕西省水文水资源勘测局的张楷提供过部分水文数据，山东科技大学测绘学院的王瑞富提供了部分 GIS 技术支持，水力学实验中得到过田红、赵杰、李红等很多帮助。另外，研究生姜昀、李苗苗、迟鹏、冯正、张景洲、刘元臣、卞慧娟也做了不少工作，在此表示感谢！

由于分布式水文模型目前种类繁多，研究模拟的目的指向各异，不同研究所考虑和重视的因素不同，所得结论也不尽相同。同时，书中涉及的部分理论和概念目前尚存争议，加之作者水平所限，书中不足之处，甚至谬误，敬请读者批评指正！

张升堂
2015 年春于青岛

目 录

前 言

第 1 章 水文模型概述	1
1.1 水文模型发展历程	3
1.2 现代水文模型的发展和特点	7
1.3 现代水文模型面临的主要问题	13
1.4 分布式水文模型介绍	16
第 2 章 水文模型主要模块	21
2.1 降水模块	23
2.2 产流模块	28
2.3 汇流模块	35
第 3 章 分布式水文模型对流域特征参数的处理	41
3.1 流域特征参数	43
3.2 现代流域特征参数空间变异的加剧	50
3.3 分布式水文模型对流域特征参数空间变异处理	59
3.4 分布式水文模型处理流域特征参数面临的问题	68
第 4 章 降水数据的分布式处理	73
4.1 自然界降水	75
4.2 降水数据获取	76
4.3 分布式水文模型对降水数据的要求	83
4.4 空间插值理论基础	86
4.5 分布式降水模型介绍	93
4.6 分布式降水模型实例分析比较	102
第 5 章 分布式水文模型中流量分配算法问题	113
5.1 流向及流量分配算法分类	115
5.2 流向及流量分配算法在分布式水文模型中的应用	126
5.3 流向及流量分配算法存在的问题	129
5.4 流域坡面特征对流向及流量分配算法的影响	135

第 6 章 分布式水文模型坡面糙率问题	139
6.1 糙率的历史渊源	141
6.2 坡面糙率的影响因素	150
6.3 流向及流量分配算法对糙率影响的考虑	156
6.4 矢量糙率理论	162
6.5 矢量糙率理论实验验证	167
第 7 章 阻力与坡度共同作用下的分布式水文模型建立探索	179
7.1 坡面流阻力的表征	181
7.2 阻力对坡面流影响作用	192
7.3 目前分布式水文模型对坡面流阻力作用的处理	196
7.4 考虑阻力作用的坡面径流流向及流量分配算法	202
参考文献	212

第 1 章

水文模型概述

水是地球上最常见的自然物质，也是人类最早了解的自然物质之一。水与我们的生活息息相关，水作为一种资源，通常是从量和质两个方面来衡量其可利用性的。水量涵盖了包括地表和地下一切人类可以利用的水资源总量，水质则涉及水环境和水生态等多个领域，不同化学及生物学指标可衡量其可供利用性及可供利用分类。水最大的物理特性是常温、常压下的三态变化，水在自然界中的循环即为水分循环。水分循环的存在，是地球上生生不息最重要的条件。水分循环最主要的体现形式有蒸发、降水和径流。整个水分循环包括蒸发、降水、截留和下渗等过程，流域坡面的水分循环又包括产流、汇流和水汽蒸散发、传输等过程。随着人类社会的发展进步，对水分循环的各个细节的探索也随之深入。

水文模型是利用数学和物理理论或原理来描述与模拟水分循环过程中水量、水质变化过程的系统工具。水文模型可以描述出自然系统内降水、径流、下渗、蒸发等水文过程，并充分考虑其下垫面条件的异质性，而且还可以将水量、水质或某一范围内水文过程的变化情况展现出来。

水文模型的研究和应用，为人们提供了一种科学认识与合理开发、利用水资源的重要工具，可为水资源管理和决策提供重要科学依据。

1.1 水文模型发展历程

水文模型从模拟水文过程的方式方法角度可分物理模型和数学模型两大类。

物理模型又可以称作实体模型，是指一个原型水文系统的代用系统，此代用系统与原型水文系统相比进行了一定的抽象和概化，即将真实的水文过程按比例缩小或放大后按原理近似到可以掌握的环境条件中。物理模型又可以分为实验室水文模型和相似水文模型。实验室水文模型是将原型水文系统适当缩小或扩大到实验室概化形成；相似水文模型不一定在物理机制上与原型相似，相似水文模型的建立取决于原型水文系统与相似水文模型的相似程度。

数学模型是表示变量和模型参数之间逻辑关系的数学方程式，即用数学符号和公式来抽象地描述水文过程。数学模型可以分为确定性水文模型

和随机性水文模型。确定性水文模型应用遵循一定物理原理的数学方程式等描述水文过程，按照其发展过程，进一步划分为黑箱模型、概念模型和基于物理机制的水文模型。黑箱模型基于传输函数，几乎没有任何物理意义；概念模型处于完全物理描述和经验式黑箱分析的中间位置；基于物理机制的水文模型建立在人们对控制流域响应的水文过程的物理认识的基础上。而随机性水文模型应用概率理论和随机性过程描述水文过程，其结果多为条件概率的形式，可以用于模拟资料不足或无资料地区的水文过程和水文现象。由于本书主要关注确定性水文模型，所以对随机性水文模型不做过多介绍。

根据在描述水文过程中对空间划分方式的不同，又可以将确定性水文模型分为集总式水文模型和分布式水文模型。集总式水文模型将流域下垫面特征参数看作是均匀不变的，而分布式水文模型充分考虑了流域特征参数的空间异质性。集总式水文模型有线性和非线性之分，一般其预测结果不存在不确定性；分布式水文模型根据模拟水文过程时对流域地表单元的划分方式不同，又可以分为栅格单元水文模型、坡面单元水文模型、自然子流域单元水文模型以及响应单元水文模型。

1.1.1 确定性水文模型的起源

公认的确定性水文模型的雏形是1851年莫万尼（Mulvaney）提出的汇流和径流系数的概念并得出的合理化公式。合理化公式是最早的确定性水文模型。该公式可以根据降水强度推导洪峰流量，其隐含的假设是降雨强度与下垫面特征在时空分布上是均匀的，因此只能用于较小的城市流域。

20世纪20年代经济发展对水文工作提出了新的要求。为了处理降雨强度和流域特性的不均匀性问题，人们对最初的合理化公式做出了改进，借助等高线和曼宁（Manning）公式对汇流时间进行估计。20世纪30年代，水文模型有了较大发展。1932年，谢尔曼（Sherman）为了确定从净雨到径流的过程提出了单位线的概念。1935年，霍顿（Horton）提出下渗公式，该公式是纯经验性的，没有物理意义，在具体应用时要进行必要的修正。20世纪40年代，水文模型发展依然只是由降水推求径流。1948年，彭曼（Penman）提出计算蒸发能力的半理论半经验公式。20世纪50年代掀起了水文模型发展的浪潮，这一阶段的水文模型主要应用线性统计理论，并以最终推导出普适的单位线理论而达到顶点。此时，水文学家们了解到单位线可

以通过时不变方程推导出来，而单位线是输入—输出的系统响应函数。但是，离散形式的单位线推导仍然很困难，主要是输入和输出的误差问题。1951年，林斯雷根据非线性多元回归的图解分析方法提出次暴雨径流深多变数水文特征合轴相关图，又称前期降水指数模型。1957年，纳西提出瞬时单位线与线性水库理论，用几个流域特征参数表征的函数表示这一简化的偏微分函数，其中瞬时单位线是对谢尔曼单位线的发展与补充，也是单位线长足的进步。这一时期出现了不少此类模型，例如串联线性水库、非线性水库、线性河道等模型。

1.1.2 概念性水文模型

概念性水文模型是介于经验性黑箱模型和完全物理机制模型（白箱模型）之间的确定性模型，这类水文模型采用概化和推理的方法对流域水文现象进行数学模拟，有较为明确的物理意义，现在已知的大多数模型都属于概念性水文模型。20世纪50年代后期出现了流域水文模型概念。流域水文模型是为流域尺度范围上发生的水文过程进行模拟计算所建成的概念性水文模型，一般输入为降水，输出为流量过程。

20世纪60年代，数字化革命使全流域水分循环过程的模拟成为可能，水文学家开始思考用不同的方法模拟降水径流过程。此时提出了子系统的概念，即用一系列子系统来模拟整个水循环过程，各流域模型表示各个子系统及其相互关系的方式各有不同。1966年，世界上第一个流域水文模型诞生于斯坦福大学，即斯坦福流域模型（Stanford Watershed Model，简称SWM）。确切的说，这是第VI号斯坦福模型，该模型从1959年开始研制，历时7年，以水量平衡为基础，小流域采用集总式模型，大流域采用分块模型。

20世纪70年代，流域水文模型的发展迎来了一个蓬勃时期。萨克拉门托（Sacrament，简称SAC）模型是由美国国家天气局萨克拉门托预报中心的Burnash R C和Ferral R L以及加利福尼亚州水资源部的Mcguire R A研发的。SAC模型属于集总参数型的概念性水文模型，该模型以土壤水分的储存、渗透、排水、蒸散发特性为基础，设置了变动不透水计算单元，即把全流域分为永久不透水面积、可变不透水面积和透水面积三部分，按土壤水分状况分为张力水和自由水，并且把土壤含水量与产流量直接联系起来。在美国，该模型对不同大小流域在湿润及干旱地区均有较好的适应性，属于功能比较完善的流域水文模型。我国引入该模型后，分别对牡丹江流域和南盘江

流域的径流进行模拟，适用性良好。

1.1.3 分布式水文模型

传统概念性水文模型在许多环节上依赖经验性数学关系，存在较大的经验性，当气象因素和流域下垫面特征参数变化较大时，模拟精度难以满足需求。集总式水文模型建立在下垫面均匀的假设上，这无疑减少了计算量，可是却忽视了具体水文过程的真实性。为解决集总式水文模型和传统概念性水文模型在结构上与实际水文过程空间上的不匹配性，基于物理机制的分布式水文模型应运而生。从大类上分，分布式水文模型属于确定性水文模型中的概念模型或基于物理机制的水文模型，分别可称为概念性分布式水文模型和基于物理机制的分布式水文模型，区别于传统的概念性水文模型和基于物理机制的水文模型。分布式水文模型将研究的流域下垫面进行单元划分，能体现空间异质性，分别在每个单元里计算降水、产流的过程，然后进行不同单元的汇流。各单元的植被和土壤状况明显影响产流过程；而汇流过程主要受到高程的影响，高程对产流的流向和产流分配起决定性作用，各单元的坡向、糙率和土壤情况也对汇流起间接作用。经过降水、产流和汇流过程，流域的径流量就可以在出口断面处通过汇流之和得出。

分布式水文模型的研究最早开始于 20 世纪 60 年代。1969 年，Freeze 和 Harlan 在《一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝图》中提出了分布式水文物理模型的基本概念和框架，但由于计算机水平的限制，观测站点难以满足模型对资料的要求，分布式水文模型发展缓慢。

20 世纪 70 年代出现基于地形的半分布式模型。1979 年，Bevenh 和 Kirbby 提出基于地形的水文模型 (TOPographic MODEL, 简称 TOPMODEL)。TOPMODEL 的核心是地形指数概念，即不考虑其所在的位置，假定相同地形指数的水文单元有相似的水文学特征，地形指数可以反映下垫面的空间变化对流域水文循环过程的影响。TOPMODEL 模型不仅能够进行水文过程的模拟，而且可以提供水文过程与水文化学的信息，这是传统的概念性模型无法相比的，但是该模型并未考虑降水、蒸发等因素的空间分布对流域产汇流的影响，具有集总式水文模型的部分特征，因此并不是严格意义上的分布式水文模型。

20 世纪 80 年代计算机的普遍应用和计算能力的大幅度提高，极大地推动了分布式水文模型的发展。基于物理机制的分布式水文模型开始受到人们

关注。1980年,英国 Morris 提出分布式水文研究模型 (Institute of Hydrology Distributed Model, 简称 IHDM), 该模型主要考虑流域的地形特征, 将流域按坡面划分成不同单元。1985年, 美国农业部研究中心设计了小流域模型 (Small Watershed Model, 简称 SWAM), 该模型考虑了土地的管理对流域水文循环的影响。1986年, 欧共体资助开发欧洲水文系统 (System Hydrological European, 简称 SHE) 模型掀起了分布式水文模型研究和开发的热潮。SHE 模型是最广为人知的分布式水文模型, 该模型致力于模拟水文循环的所有重要环节, 对流域的产流、产沙及水质问题均有涉及。但是, 由于 SHE 模型按规则矩形网格对流域下垫面进行划分, 在精度和计算量上难以取得平衡, 对于较大流域计算量过大, 该模型在欧洲应用较多。

20世纪90年代以来, 随着地理信息系统 (Geographic Information System, 简称 GIS) 技术的不断发展, 土壤和水评估工具 (Soil and Water Assessment Tool, 简称 SWAT) 模型应运而生。SWAT 模型是分布式模型的一个典型代表, 该模型以日为时间单位进行连续计算, 主要利用遥感和地理信息系统提供的空间信息模拟多种不同的水文物理化学过程, 如水量、水质以及水中某种特定污染物的输移与转化过程。

1.2 现代水文模型的发展和特点

目前, 随着世界范围内经济建设发展, 城市化水平日益提高, 大量出现的人工铺装硬化路面、大面积广场、密集聚居区、人工草地、人工林地、农田等组成了现代流域面, 区别于人类活动影响小的自然流域, 现代流域地表被不同形式的土地利用类型分割成纵横交错的破碎斑块状条带, 导致流域特征参数空间变异性剧增, 从而使地表径流的流向和流量分配变得复杂。同时, 由于现代流域具有较大比例的弱透水面, 甚至不透水面, 因而导致洪水灾害频发。借助于目前计算机技术、GIS 等技术建立起来的能够适应并模拟大气环境条件和地表特征参数不断变化流域面上水文过程各类水文模型, 可视为现代水文模型。

现代水文模型也可根据应用中对流域面的处理分为集总式水文模型和分布式水文模型两种。集总式水文模型不考虑气象要素的时空分布, 也不考虑下垫面条件的空间变化, 将整个流域作为一个整体来考虑, 即假设流域内降水强度相同, 地表植被和土壤状况相同, 推求径流与洪水。分布式水文模型

则把下垫面通过子流域、地貌或网格划分成小的不同部分,从而对整个流域做到更精确的模拟,相对于集总式水文模型,分布式水文模型更加真实、具体地反映了现代流域的水文现象,计算也更加复杂。集总式水文模型最基本的特征是将流域作为一个整体,即使不同模型有不同的结构和参数,但本身都没有从机制上考虑气象和下垫面空间上的不均匀,模拟只追求结果的可靠度,而忽视了其中过程的真实性,与之相对的分布式水文模型基于对产汇流理论的深入探索,能够真实、有效地模拟现实中径流的形成规律。现代水文模型正在经历由集总式水文模型到基于物理机制的分布式水文模型的过渡,基于物理机制的分布式水文模型将占据现代水文模型的主导地位。

1.2.1 国际水文模型发展

随着城市化进程的不断推进,传统概念性水文模型越来越难以模拟大循环中人工和自然两种模式的流域水文循环,基于物理机制的分布式水文模型对空间异质性的充分考虑,更能真实、准确地对流域的水文规律进行模拟。

20世纪70年代初,世界气象组织分别从世界各地选出了10个流域水文模型进行模拟精度方面的世界性对比。这10个模型分别如下:

(1) 澳大利亚气象局模型,该模型的输入为降水,根据损失率计算净雨,再使用单位线求洪水。

(2) 日本水箱 I 模型 (Tank I Model, 简称 TANK I), 该模型将不同的蓄水层当作串联的水箱,多个排水孔出流代表不同的损耗,即将降水形成径流的过程概化为水箱的蓄水与出流。

(3) 日本水箱 II 模型 (Tank II Model, 简称 TANK II), 可以理解为两个或多个 TANK I 模型串联,每组串联代表了流域内不同的分区。

(4) 罗马尼亚洪水预报模型,该模型假设两个水库代表模拟土壤的上下层,输入为降水,通过水量平衡计算得到净雨,用于预报洪水。

(5) 苏联水文气象研究中心 (Hydrology and Meteorology Center, 简称 HMC) 模型,该模型的输入为降水和气象要素,通过数学公式求得地表和地下基流,再利用 Γ 函数求出流过程。

(6) 法国吉拉德 (Girard) 模型,该模型是分散参数模型,利用线性数学公式求径流。

(7) 意大利约束性线性系统 (Constrained Linear System, 简称 CLS) 模型,该模型是用二次规划进行估算的约束性参数模型,使用一组核函数计算

出流过程。

(8) 美国国家天气局模型, 该模型的输入为降水和蒸发, 利用分配曲线模拟流域特征和水文条件的变化。

(9) SAC 模型, 该模型共设计了 5 种径流, 涉及两种土壤水——自由水和张力水的水量交换, 通过渗透函数实现上层和下层自由水的转换。

(10) 美国流量综合与水库调节 (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation, 简称 SSARR) 模型, 该模型的输入为降水和蒸发, 用水量平衡计算径流。

这次世界性对比从不同流域角度, 分析了不同模型, 这些模型结构有很大差异, 模拟降水径流的途径也各不相同。此次对比发现: 对于湿润流域, 简单模型和复杂模型的效果同样好; 而对于干旱地区, 计算土壤含水量的模型, 包括美国国家天气局模型、SSARR 模型、SAC 模型、HMC 模型和 Girard 模型, 能较好地模拟河川径流; 对于资料缺乏的地区, CLS 模型、罗马尼亚洪水预报模型和澳大利亚气象局模型较之其他模型能给出更好的预测结果。

20 世纪 80 年代出现了一系列分布式水文模型, 例如 IHDM 模型、SWAT 模型、地形运动学近似与整合 (TOPographic Kinematic Approximation and Integration, 简称 TOPKAPI) 模型和可变下渗能力 (Variable Infiltration Capacity, 简称 VIC) 模型等。90 年代以后随着水文科学的发展, 大尺度流域水循环过程的物理概化及整体模拟成为国际水文研究的重点领域之一。从研究流域尺度到研究全球尺度, 水文模型开始与全球气候模式 (Global Climate Model, 简称 GCM) 相耦合, 研究大尺度下的水文气象问题。在此基础上, 越来越多的水文模型功能更加强大, 不但包括水文循环的整个过程, 而且可以得到土壤侵蚀、地貌变化、污染物和营养物质运移的过程。水文模型的界面也越来越友好, 很多模型甚至可以直接在 GIS 平台上开发应用。

进入 21 世纪之后, 国际水文协会于 2002 年提出了关于水文学研究的十年计划——无观测资料地区水文预测 (Prediction of Ungauged Basin, 简称 PUB), 以解决缺乏观测资料地区水文预测问题。在无观测资料或缺乏观测资料的流域, 可以使用即时气象数据, 土壤、植被和地形数据, 但由于无法使用历史观测资料, 在预测各种水文过程的技术和预测精度方面还有很大的进步空间。2009 年, 水文模型国际研讨会在北京召开, 会议讨论了功能越来越强大、结构越来越复杂的新一代水文模型。目前新一代的分布式水文模型具有更多的模拟功能, 能够把单一水量变化的模拟推向更加广泛的水文水

资源生态环境问题的模拟，大大拓宽了模拟领域，如水量水质联合评价、非点源污染、土壤侵蚀与水土流失、洪水预报预警、土地覆盖与土地利用变化影响、农业灌溉与城市工业用水模拟，以及通过尺度转换与大气环流模式耦合，模拟气候变化对水文水资源的影响等。

1.2.2 国内水文模型发展

相比国际水文学界，我国在水文模型的开发和研究方面相对滞后。例如美国几乎每个州都有自己的流域水文模型，而我国截至 20 世纪 80 年代中期，仅有新安江模型等少数几个模型能够模拟降水径流过程，并且大部分还仅能模拟个别水分循环过程。1991 年美国垦务局出版的流域水文模型目录，就包含了 4 类、64 个水文模型。而至今我国在分布式水文模型的研究方面还有很大的发展空间，最近 20 余年来，我国水文工作者致力于对分布式水文模型的开发与研究。一方面，积极引进国外相关流域水文模型；另一方面，也针对我国多样性的地形地貌和气候进行新的基于物理机制的水文模型的开发，努力缩小我国与国外的差距。

为了实现以 GIS 为基础的坡面产汇流和河道汇流模拟，国内一些专家 1995 年开始思考建立基于 DEM 的动态分布式降水径流流域模型。为描述森林坡地饱和与非饱和带水流运动规律，黄平于 1997 年首先建立了一种二维分布式水文数学模型。为了考虑产流随空间和时间变化的分布特征，李兰于 2000 年将分布式流域水文模型按子流域的形式进行划分，该模型由各小流域的产汇流模型组成，其特点是能计算多种径流成分产流的物理过程，从而大大提高了模拟精度。为了模拟小流域降水径流的时空变化过程，郭生练于 2000 年提出了一个基于数字高程模型（Digital Elevation Model，简称 DEM）的分布式流域水文模型，其特点是：模型认为降水径流的系统关系是非线性的，既可以表达为时变和非线性系统的概念性参数模型，又可以表达为整体非线性系统响应模型。2002 年，夏军建立了基于 DEM 的分布式时变增益水文模型，该模型是在基于流域 DEM 划分的栅格单元或子流域的空间分布水文单元上应用分布式时变增益水文模型来计算地表水产流。2003 年，夏军和王纲胜等结合单元水文模拟，将集总式水文流域模拟模型通过 GIS 平台拓展到分布式流域水文模拟。该模型可以吸纳局部高强度降水信息，通过考虑时变增益因子的空间变异性，对分布式空间降水输入产生积极的响应，获得比集总式水文模型更好的峰值模拟效果。2004 年，熊立华提出了一个基于