

# 分布式水文模型 理论与方法

郝振纯 李 丽 王加虎 罗 健◎著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 分布式水文模型理论与方法

郝振纯 李丽 王加虎 罗健 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书为作者多年从事水文规律模拟及分布式水文模型研究过程中所积累的一些研究成果总结,研究内容涉及分布式水文模拟的空间信息提取、尺度、资料时空分布的影响等问题,以及产汇流过程自身的一些理论研究。全书共十三章,可分为三大部分,第一部分主要介绍基于 DEM 的流域特征提取研究,涉及单一信息和复合信息的流域特征提取、集水面积阈值确定等内容;第二部分针对分布式水文模型中的尺度问题和资料空间分布情况对水文过程的影响进行了初步的研究;第三部分主要介绍了分布式模型的结构,针对土壤水再分布、土壤热传导、蒸发、产流、汇流等分布式水文模拟中的细节进行了描述和研究。

本书可供水文学、水资源、气象、水利工程等学科的科研人员、从事水资源管理的技术人员以及高等院校相关专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

分布式水文模型理论与方法/郝振纯等著. —北京:科学出版社,2010  
ISBN 978-7-03-027595-0

I. ①分… II. ①郝… III. ①水文-模型 IV. ①P33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 088708 号

责任编辑:沈 建/责任校对:张小霞

责任印制:赵 博/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010 年 5 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 5 月第一次印刷 印张:19 1/2

印数:1—2 000 字数:380 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

水文科学是关于地球上水的起源、存在、分布、循环、运动等变化规律，以及运用这些规律为人类服务的知识体系。水文模型就是以水文循环过程为研究对象的模型，目前的流域水文模型广泛应用于水文模拟、水文预报、水资源规划与管理、产沙输沙、污染物运移等领域的科研和生产中。随着高新技术的引进、相关学科的渗透以及水文科学研究的深入，分布式水文模型近些年来取得了极大的进步和发展，其应用范围也逐渐扩大，并因其对水文过程及其影响因素的空间描述而广受水文研究者的青睐。

分布式水文模型通过将研究区域划分为大量的基本单元（如栅格网、不规则三角网等）来考虑各种水文响应影响因素的空间分布，并以 GIS、RS、雷达等空间分布的信息为数据源，可以在一定程度上解决无资料或缺资料地区的水文模拟问题。分布式水文模型以其信息源的优势，可以较为方便地用于研究下垫面变化（包括地表覆被、人类活动等）的时空变异性）对水循环过程以及水资源的影响；以其结构的优势，便于与气候模式和气象模型耦合，进一步研究气候变化对水资源的影响；同时，由于分布式水文模型的数据源输入多为分布式的，它可以充分考虑降水、气温等气象因素的空间分布，进一步确定径流、水资源的空间分布，为水资源的管理和水灾害的防治提供科学的时空信息和参考。然而，在目前分布式水文模型的研究和应用中，还面临着非线性、尺度、唯一性、等效性和不确定性等问题。

本书为作者多年从事水文规律模拟及分布式水文模型研究过程中所积累的一些研究成果，研究内容涉及分布式水文模拟的空间信息提取、尺度、资料时空分布的影响等问题，以及产汇流过程自身的一些理论研究。另外魏林宏博士、池宸星硕士等也参与了本书的部分研究和编写工作。

全书共十三章，可分为三大部分，第一部分包括第 2~5 章，主要介绍基于 DEM (digital elevation model) 的流域特征提取研究，涉及单一信息和复合信息的流域特征提取、集水面积阈值确定等内容；第二部分包括第 6~8 章，该部分针对分布式水文模型中的尺度问题和资料空间分布情况对水文过程的影响进行了初步的研究；第三部分包括第 9~13 章，主要介绍了分布式模型的结构，针对土壤水再分布、土壤热传导、蒸发、产流、汇流等分布式水文模拟中的细节进行了描述和研究。

本书也是多年来课题组研究项目的成果积累，包括国家自然科学基金“九五”

重大项目“淮河流域能量和水分循环试验和研究”（编号：49794030）中第三课题“区域气候-水文模式的研制及数值模拟研究”，“九五”重中之重科技攻关项目“我国短期气候系统预测研究”中“气候异常对我国水资源及水分循环影响的评估模型研究”（编号：96-908-03-02），国家重点基础研究发展规划项目（“973”）“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”（编号：G1999043404），教育部高等学校骨干教师资助计划“全国大尺度数字水文模型”等。

本书的出版得到国家自然科学基金重点项目“气候变化下黄河源区区域水循环模型与不确定性研究”（编号：40830639），国家自然科学基金项目“地形对水文过程影响的实验研究及其分布式模拟”（编号：50879016）、“分布式水文模拟中的尺度问题及其不确定性影响研究”（编号：40801012），水利部公益性项目“中国极端洪水干旱预警与风险管理关键技术”（编号：200801027），水文水资源与水利工程科学国家重点实验室团队项目“气候变化对流域水循环过程及水文极端事件的影响”（编号：1069-50985512）的资助。

由于作者水平有限，书中还存在着不完善和需要改进的地方，也难免会存在一些问题，希望与国内外水文界的专家学者共同探讨，恳请读者批评指正，以便更好的完善和进步。

作者

2009年12月于南京

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 流域水文模型 .....	1
1.2 分布式水文模型 .....	2
1.3 全球变化与分布式水文模型 .....	6
1.3.1 气候变化与分布式水文模型 .....	8
1.3.2 LUCC 研究与分布式水文模型 .....	9
1.3.3 PUB 研究与分布式水文模型 .....	10
1.4 关键技术和科学问题 .....	11
1.4.1 数字流域的构建 .....	11
1.4.2 物理过程的描述 .....	12
1.4.3 水文要素时空变化的精确描述 .....	12
1.4.4 水量、能量耦合计算 .....	12
1.4.5 空间尺度问题 .....	13
1.4.6 降尺度分析技术 .....	13
1.5 本书研究内容和结构 .....	13
<b>第 2 章 空间数据分析方法</b> .....	16
2.1 空间数据的统计特征描述 .....	16
2.1.1 空间数据的传统统计学特征 .....	16
2.1.2 数据的空间统计学特征 .....	18
2.1.3 精度统计 .....	19
2.2 空间数据插值技术 .....	20
2.2.1 插值方法 .....	21
2.2.2 由插值技术带来的不确定性及评价方法 .....	23
2.3 空间数据的聚合方法 .....	24
2.4 实例研究 .....	25
2.4.1 DEM 的聚合 .....	25
2.4.2 DEM 插值 .....	34
2.4.3 降雨插值 .....	38

<b>第 3 章 基于 DEM 的流域特征提取</b> .....	47
3.1 数字高程模型 .....	47
3.1.1 数字高程模型的定义 .....	47
3.1.2 DEM 数据源及格式 .....	48
3.2 基本地形因子的数学计算方法 .....	50
3.2.1 坡度和坡向 .....	51
3.2.2 地形起伏特征 .....	54
3.2.3 地形曲面 .....	55
3.3 数字流域地形特征提取 .....	56
3.3.1 水流流向判断 .....	56
3.3.2 数字水系提取 .....	60
3.3.3 分布式子流域统计特征 .....	66
3.4 基于 ArcHydro 的数字河网提取 .....	69
3.4.1 ArcHydro 模块及工具集 .....	69
3.4.2 ArcHydro 水文模块命令 .....	70
3.4.3 ArcHydro 数字流域信息提取实例 .....	72
<b>第 4 章 多源信息提取流域特征方法研究</b> .....	78
4.1 标量河道法理论 .....	78
4.2 标量河道矢量化方法研究 .....	80
4.2.1 源头追索模型 .....	80
4.2.2 深泓演进模型 .....	83
4.2.3 两种方法比较 .....	88
4.3 标量河道法的应用与比较 .....	88
4.3.1 引入自然水系前后比较 .....	89
4.3.2 同类方法比较 .....	92
4.4 小结 .....	95
<b>第 5 章 集水面积阈值研究</b> .....	96
5.1 流域汇流对阈值的敏感性 .....	96
5.1.1 汇流时间对阈值的敏感性 .....	96
5.1.2 流域坦化作用对阈值的敏感性 .....	102
5.2 常用阈值确定方法分析 .....	106
5.3 根据数字化的实际水系确定阈值 .....	109
5.3.1 河网密度和河源密度 .....	109
5.3.2 水系分形和分维数 .....	110
5.3.3 实际水系处理 .....	112

5.3.4 阈值选取 .....	114
5.4 阈值空间分布规律的初步分析 .....	116
5.5 小结 .....	119
<b>第6章 空间分辨率与取样方式对DEM流域特征提取的影响 .....</b>	<b>120</b>
6.1 流域特征的提取 .....	121
6.2 空间分辨率对DEM流域特征提取的影响 .....	122
6.2.1 平均取样的空间分辨率分析 .....	122
6.2.2 中心取样的空间分辨率分析 .....	125
6.3 取样方式对DEM流域特征提取的影响 .....	128
6.4 DEM的信息熵评价 .....	131
6.5 分辨率改变与信息损失 .....	135
6.6 小结 .....	136
<b>第7章 DEM分辨率的变化对径流模拟的影响 .....</b>	<b>138</b>
7.1 研究进展 .....	138
7.2 不同分辨率DEM对提取的流域水文特征的影响 .....	140
7.3 基于DEM的分布式水文模型 .....	143
7.3.1 模型结构 .....	143
7.3.2 分布式水文模型中网格划分和数据资料、参数的处理 .....	148
7.3.3 模型参数的率定和验证 .....	149
7.4 DEM分辨率对径流模拟的影响 .....	152
7.4.1 水文参数相同时DEM分辨率变化对径流模拟的影响 .....	152
7.4.2 水文参数变化时DEM分辨率变化对径流模拟的影响 .....	154
7.5 小结 .....	159
<b>第8章 降雨的时间和空间变化对径流模拟的影响 .....</b>	<b>161</b>
8.1 相关研究 .....	161
8.1.1 降雨的空间变化 .....	161
8.1.2 雷达应用 .....	161
8.2 水文模型 .....	162
8.3 数据资料和研究方法 .....	163
8.3.1 流域和输入数据 .....	163
8.3.2 降雨特征分析 .....	163
8.3.3 降雨资料处理 .....	165
8.4 降雨空间变化对模拟结果的影响 .....	169
8.4.1 雨量计密度变化的影响 .....	169
8.4.2 雷达测雨空间变化的影响 .....	172



8.5	降雨时间分辨率变化对径流模拟的影响 .....	177
8.6	小结 .....	179
<b>第9章</b>	<b>考虑土壤水再分布的混合产流模型 .....</b>	<b>180</b>
9.1	产流模型 .....	180
9.1.1	入渗研究概述 .....	181
9.1.2	土壤水及其数学描述 .....	182
9.1.3	模型设计方案 .....	184
9.2	土壤水垂向运动数学模型 .....	185
9.2.1	差分方案 .....	186
9.2.2	三对角方程组的自动求解 .....	188
9.2.3	土壤特性 .....	190
9.2.4	四种边界条件 .....	191
9.3	蓄满/超渗混合产流模型 .....	194
9.3.1	冠层截留计算 .....	194
9.3.2	产流计算 .....	197
9.3.3	敏感土层厚度与空间步长 .....	198
9.3.4	模型产流特性分析 .....	200
9.4	模型检验 .....	201
9.4.1	数学模型的定性检验 .....	201
9.4.2	数学模型的定量检验 .....	201
9.5	小结 .....	204
<b>第10章</b>	<b>土壤热传导模型 .....</b>	<b>205</b>
10.1	土壤热特性描述 .....	205
10.1.1	比热容 .....	205
10.1.2	热导率 .....	206
10.1.3	导温率 .....	207
10.2	土壤热流及求解 .....	207
10.2.1	解析解与土壤温度变化特性 .....	208
10.2.2	数值解概述 .....	209
10.2.3	求解方法的选择 .....	210
10.2.4	上边界条件 .....	212
10.2.5	模型验证 .....	213
10.3	关于水热耦合的讨论 .....	215
10.3.1	温度对土壤水的影响 .....	215
10.3.2	土壤水对温度的影响 .....	216

10.4	地表热通量对蒸发能力的影响	216
10.5	小结	218
<b>第 11 章</b>	<b>流域蒸散发分布式计算</b>	<b>219</b>
11.1	蒸发模型	219
11.1.1	概述	219
11.1.2	陆面蒸发的直接计算	220
11.1.3	陆面蒸发的间接计算	221
11.2	参照蒸散发量计算方法	222
11.2.1	FAO 的 $E_{T_0}$ 计算方法	222
11.2.2	在中国的适应性分析	225
11.2.3	参照蒸散发计算的检验	226
11.3	实际蒸散发计算	228
11.3.1	植被系数校正	228
11.3.2	土壤系数校正	229
11.4	蒸发的空间分布研究	230
11.4.1	算法	231
11.4.2	单元辐射量校正	232
11.4.3	校正公式的敏感性分析	234
11.4.4	实用性检验	235
11.5	模型的下渗-蒸发机理检验	237
11.6	小结	240
<b>第 12 章</b>	<b>概念性逐网格汇流模型</b>	<b>241</b>
12.1	空间描述与汇流架构	241
12.1.1	地表水汇流	241
12.1.2	壤中流汇流	243
12.1.3	地下水汇流	243
12.2	逐单元概念性地表水汇流模型	245
12.2.1	逐单元水流描述	245
12.2.2	过境水的概化处理	246
12.2.3	汇流框架	248
12.2.4	尺度与单元滞蓄作用	249
12.3	模型的检验与讨论	250
12.3.1	模型特性分析	252
12.3.2	次洪模拟应用分析	254
12.3.3	拓展前景	257

---

12.3.4	逐网格的慢速径流汇流模型 .....	259
12.4	小结 .....	259
<b>第 13 章</b>	<b>基于圣维南方程组的逐网格汇流演算 .....</b>	<b>260</b>
13.1	圣维南方程组及其求解 .....	260
13.1.1	圣维南方程组 .....	261
13.1.2	圣维南方程组的简化 .....	262
13.1.3	圣维南方程组求解 .....	265
13.2	数字流域上的坡面汇流 .....	272
13.2.1	坡面汇流的数学描述 .....	272
13.2.2	单坡面汇流 .....	274
13.2.3	串联坡面汇流 .....	277
13.3	数字流域上的河道汇流 .....	279
13.3.1	Muskingum-Cunge 法 .....	279
13.3.2	数字水系中的汇流演算 .....	280
13.4	逐网格流域汇流 .....	281
13.4.1	数字流域中汇流网络的概化 .....	281
13.4.2	流域栅格计算排序 .....	283
13.4.3	全流域逐网格汇流 .....	284
13.5	次尺度的时空迭代步长选择 .....	285
13.5.1	坡面汇流的次尺度迭代步长选择 .....	286
13.5.2	河道汇流的次尺度迭代步长选择 .....	288
13.6	小结 .....	292
<b>参考文献</b>	.....	<b>293</b>

# 第 1 章 绪 论

水文科学是关于地球上水的起源、存在、分布、循环、运动等变化规律，以及运用这些规律为人类服务的知识体系。水文科学的研究领域十分宽广，从大气中的水到海洋中的水，从陆地表面的水到地下水，都是水文科学的研究对象；水圈同大气圈、岩石圈和生物圈等地球自然圈层的相互关系，也是水文科学的研究领域；水文科学不仅研究水量，而且研究水质，不仅研究现时水情的瞬息动态，而且探求全球水的生命史，预测它未来的变化趋势。水文学发展在经历了公元 1400 年以前的萌芽时期、1400~1900 年的奠基时期和 1900~1950 年的应用水文学兴起时期以后，进入了现代水文学阶段。流域水文模型是现代水文学最重要的研究领域，已从经验模型、概念性集总模型发展到基于物理基础的分布式水文模型。

## 1.1 流域水文模型

水文系统是一个高度非线性的复杂系统，而流域水文模型则是以封闭流域内的水文循环过程为研究对象的模型。1674 年，法国的佩罗出版《泉水之源》一书，提出了水量平衡的概念，这是水文科学最基本的原理之一，流域对降雨的水文响应就逐渐成为地表水文学的中心问题。特别是 20 世纪 50 年代以来，出现了大量描述流域水循环过程的水文模型，目前全世界有一定使用价值的流域水文模型至少有 70 个，并广泛应用于水文模拟、水文预报、水资源规划与管理、产沙输沙、污染物运移等领域的科研和生产中。

若按水文计算基本单元来划分，现有的流域水文模型可分为集总式模型和分布式模型两大类。集总式模型以整个流域为一个基本单元进行水文计算，该类模型又以概念性模型为主，其输入、输出是流域平均的水文响应过程，其参数所描述的是流域整体的水文循环特性；而分布式模型则根据一定的规则将流域进行空间上的划分，该类模型具有一定的物理基础，各基本单元具有不同的输入、输出和参数，能够描述流域水文过程的空间不均匀性。

若按对水文过程的描述划分，流域水文模型一般分为确定性模型、随机模型和随机-确定耦合模型。在确定性模型中又有经验模型（黑箱子模型）、概念性模型和物理模型。经验模型又称“黑箱子”模型，是在对流域输入输出序列进行经验性分析的基础上建立的模型；概念性模型是将流域内水文过程进行集总描述，

以概化的概念性元素模拟水文过程的模型，它所模拟的不完全是真的物理实体，其参数具有一定的物理意义，但并不一定相互独立；物理模型是从水循环的本质规律入手建立的模型，能够细致地描述水文过程的各个环节，每个参数都具有明确的物理意义，但由于水文过程的复杂性，现有的物理模型中往往包含着一些经验性或概念性的成分，尚无法实现对水文过程进行真正意义上的物理性描述。就目前成熟的、应用较多的随机模型而言，可以归纳为 3 类：① 回归类模型。这类模型结构简单，概念清晰，参数不多，易于实现。其代表为单、多变量平稳和非平稳 ARMA ( $p, q$ ) 模型；② 解集类模型。其特点是能够同时保持总量和分量的统计特性和协方差结构，且分量之和等于总量；③ 具有物理基础类模型。所谓物理基础，指在建模时，将统计上的推论与水文水资源过程形成的物理机制的合理分析有机结合起来，使得模型具有一定物理意义。

在现代计算机出现之前的 100 多年里，人们用实验手段和野外观测来了解水文过程，所建立的水文模型主要为黑箱子模型、概念性模型和“点”水文物理模型，为后来水文模型的发展和应用奠定了坚实的基础。20 世纪 50 年代，随着电子计算机科学技术的发展及系统论的成熟，出现了流域水文模拟的数学模型，数学模型易于使用，又能经得起复杂水文系统的检验，在之后的几十年里取得了长足的发展，出现了许多著名的流域水文模型，如美国斯坦福模型（1966 年）、萨克拉门托模型（1971 年）、日本 TANK 模型（1951 年）和华东水利学院（现为河海大学）在蓄满产流理论基础上提出的新安江模型（1973 年研制，1980 年发表）等。

20 世纪 80 年代以来，随着信息技术的发展，GIS、RS、雷达等信息观测技术能够为水文模型提供越来越多的可用信息，包括空间分布的地形、覆被、降水等，促进了分布式水文模型的发展。并且，随着全球变化问题受到越来越广泛的关注，分布式水文模型因其自身的优势也逐渐成为研究热点。

## 1.2 分布式水文模型

集总式模型是对流域产汇流机制的高度概化，对水循环影响因子的异质性和变异性无充分考虑，由于技术水平的限制，即便是进行了分散性处理的模型，也往往是根据下垫面（植被类型、土壤等）或自然水系将大流域划分为若干个子流域或具有一定空间相似性的水文响应单元分别率定参数，力求减小下垫面因素（覆被、土壤、地形等）和气象因素（降水、气温等）空间不均匀性的影响。并且由于模型自身的限制，集总式模型无法提供水文变量在空间上的分布，满足不了水资源规划管理和流域内各处水情预报和模拟的需要。于是，1969 年 Freeze 等提出了一个分布式流域水文模拟的蓝本，为水文模型的发展开辟了新的道路。

之后,计算机水平的快速提高和信息技术的发展为分布式水文模型的发展提供了新的契机,以各种形式的空间信息为基础的分布式水文模型应运而生。

分布式水文模型通过将研究区域划分为大量的水文计算基本单元(如栅格、不规则三角网、水文相似单元、子流域等)来考虑各种水文响应影响因素的空间分布,并以GIS、RS、雷达以及全球气候模式(global climate model, GCM)、数值天气预报等空间分布的信息为数据源(图1.1),可以在一定程度上解决无资料或缺资料地区的水文模拟问题。分布式水文模型以其可以充分利用多源信息的优势,可以较为方便地用于研究下垫面变化(包括地表覆被、土地利用等的时空变异性)对水循环过程以及水资源的影响;以其结构的优势,便于与气候模式和气象模型耦合,进一步研究气候变化对水资源的影响;同时,由于分布式水文模型的数据源输入多为分布式的,它可以充分考虑降水、气温等气象影响因素的空间分布,进一步确定径流、水资源的空间分布,为水资源的管理和水灾害的防治提供必要的信息和参考。

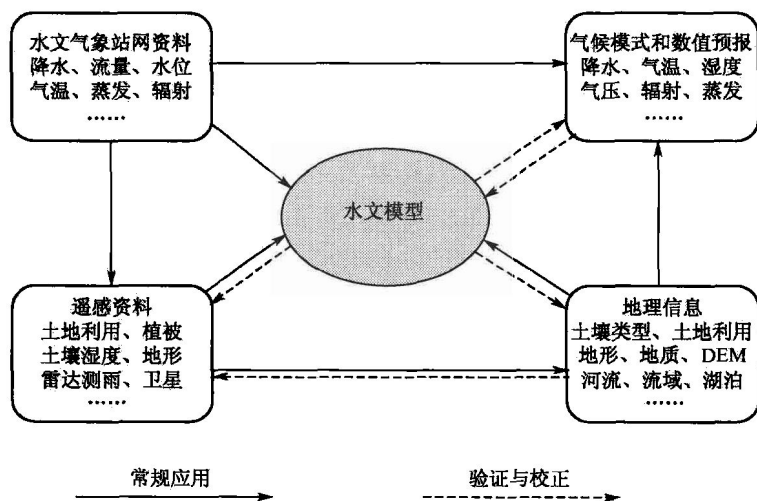


图 1.1 水文模型的信息环境

分布式水文模型一般建立在 DEM 基础上。通过 DEM 可以提取包括流域网格单元的坡度、坡向以及单元之间拓扑关系等大量的陆地表面形态信息,同时根据一定的算法可以确定出地表水流路径、河流网络、流域的边界和划分子流域。在 DEM 所划分的流域网格单元上建立水文模型,根据遥感、地理信息、土地利用、植被、土壤、地质、水文气象信息,综合考虑模型的物理参数,通过参数优选技术确定所有模型参数。

国外的分布式水文模型研究可以认为起始于 1969 年 Freeze 和 Harlan 发表的“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。随后, Hew-

lett 和 Troenale 在 1975 年提出了森林流域的变源面积模拟模型（简称 VSAS）。在该模型中，地下径流被分层模拟，在坡面上的地表径流被分块模拟，初步实现了水文过程的分布式模拟。

1979 年 Beven 和 Kirkby 提出了以变源产流为基础的 TOPMODEL 模型（top graphy based hydrological model）。该模型基于 DEM 推求地形指数  $\left(\ln\frac{\alpha}{\tan\beta}\right)$ ，并利用地形指数来反映下垫面的空间变化对流域水文循环过程的影响，模型的参数具有物理意义，能用于无资料流域的产汇流计算。Famiglietti 等（1992）将修改的 TOPMODEL 和一个表面能量平衡模型耦合在一起，计算整个流域范围内的蒸散发空间变化。但 TOPMODEL 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，因此，它不是严格意义上的分布式水文模型，这类模型也称半分布式水文模型。

由丹麦、法国及英国的水文学者 Abbort 等（1986）、Bathurst 等（1995）等联合研制及改进的 SHE 模型（system hydrologic european）则是一个典型的分布式水文模型。在 SHE 模型中，流域在平面上被划分成许多矩形网格，这样便于处理模型参数、降雨输入以及水文响应的空间分布性；在垂直面上，则划分成几个水平层，以便处理不同层的土壤水运动问题。SHE 模型为研究人类活动对于流域的产流、产沙及水质等影响问题提供了理想的工具。SHE 模型应用数值分析来建立相邻网格单元之间的时空关系，这类模型也称紧密耦合型分布式水文模型，即人们所指的具有物理基础的分布式水文模型。

1994 年，Arnold 为美国农业部（USDA）农业研究中心（ARS）开发了 SWAT 模型（soil and water assessment tool）（Arnold et al., 1998）。SWAT 是一个具有很强物理机制的、适用于长时段的流域水文模型。它能够利用 GIS 和 RS 提供的空间信息，模拟复杂大流域中多种不同的水文物理过程。模型可采用多种方法将流域离散化（一般基于栅格 DEM），能够响应降水、蒸发等气候因素和下垫面因素的空间变化以及人类活动对流域水文循环的影响。SWAT 模型应用现有的概念性模型在每一个网格单元（或子流域）上进行产流计算，然后再进行汇流演算，最后求得出口断面流量，这类模型也称松散耦合型分布式水文模型。

1995 年，Grayson 等提出了 THALES 模型，它是一个基于矢量高程数据的分布式参数模型。Yao 等（2001）提出了基于网格的集降雨空间输入估计、降雨-蒸发-径流过程模拟、河流演算和空间参数校准为一体的分布式水文模型。此外，USGS 模型（Dawdy et al., 1970、1978）、WATFLOOD 模型（Kouwen et al., 1993、2000）、IHDM 模型（Beven et al., 1987；Calver et al., 1988、1995）、SLURP 模型（Kite, 1995）和 PRM 模型（Leavesley et al., 1990）等

都属于分布式水文模型的范畴。

相对国际水文学界,我国在分布式水文模型方面的研究起步晚一些。1995年,沈晓东等(1995)在研究降雨时空分布与下垫面自然地理参数空间分布的不均匀性对径流过程影响的基础上,提出了一种在GIS支持下的动态分布式降雨径流流域模型,实现了基于栅格DEM的坡面产汇流与河道汇流的数值模拟。2000年,黄平等(2000)建立了描述森林坡地饱和与非饱和带水流运动规律的二维分布式水文数学模型,并用伽辽金有限元数值方法求解模型。同年,郭生练等(2000)建立了一个基于DEM的分布式流域水文物理模型,用来模拟小流域的降雨径流时空变化过程;任立良等(2000)在数字高程模型(DEM)的基础上成功开发了分布式的新安江模型;胡建华等(2001)建立了一个按子流域划分的分布式流域水文模型。夏军等(2003)建立了基于DEM的分布式变增益水文模型(DTVGM)。杨大文等(2004)建立了全黄河流域的分布式水文模型,采用了大格网离散化方法,并在大网格内根据地貌学原理进行地形参数化处理,从中抽出山坡单元;然后利用数字高程模型(DEM)建立河网和山坡单元的水力联系,从而建立流域的分布式水文模型结构。贾仰文等(2005)在黄河“973”项目研究中建立了分布式天然-人工二元水循环模拟模型,模型中考虑了灌溉用水和水库调节,从而使分布式水文模型可以用于辅助流域的水资源管理。刘昌明等(2003)运用SWAT模型模拟分析了气候变化和土地覆被变化对黄河河源区的径流影响。刘志雨(2004)尝试应用分布式TOPKAPI模型模拟了东江和淮河流域洪水过程。河海大学郝振纯教授所进行的分布式水文模型研究始于2000年的淮河流域大尺度分布式月水文模型,近几年来,在分布式水文模型及其应用方面有大量研究成果。研究的内容涉及流域特征提取、尺度转换、尺度影响分析、气候变化影响等方面,研究区域包括小流域(如岔巴沟)、大中流域(如淮河流域、黄河源区)、大区域(如山西省)、特大区域(如北方十三省)。

在众多分布式水文模型中,有些模型细致描述了各基本单元及其相互之间的水文物理过程,即通常所说的具有物理机制的分布式水文模型;有些以现有的概念性模型为基础,通过输入、输出和参数的空间变化实现对流域水文变量的时空描述;有些则利用由DEM提取的地形信息模拟水文响应的特性,如地貌单位线、地形指数、宽度函数等,用统计方法求出口断面流量,这类模型并非严格意义上的分布式水文模型,故又称半分布式水文模型。虽然建模思路不尽相同,但这些模型多是构建在DTM(数字地形模型)或DEM(数字高程模型)基础之上的,是依据地形资料寻求水文模拟物理基础的一种现代技术途径。它们所应用的数据源基本上包括:DEM、TIN等地形信息;地表覆被、土地利用、城镇、水域等遥感信息;雷达测雨资料、气象模型输出等气象信息;以及土壤空间分布信息和用于研究全球变化条件下水资源情景的气候情景和土地利用情景的输出等。



其中,具有物理基础的分布式水文模型因其对水循环内在机制的揭示而受到青睐,并成为研究热点。同时,由于空间分布的可用信息源的增加,具有物理基础的分布式水文模型所需要的庞大资料问题在一定尺度上不再成为难题,这也促进了这类模型的研究和发展。这类模型水文物理动力学机制突出,便于研究水文循环对自然和气候变化的响应,能及时地模拟人类活动和下垫面因素变化对流域水文循环过程的影响,在研究流域下垫面变化影响和无资料地区应用方面具有独特的优越性。但其结构复杂、计算繁琐,所需要的资料种类较多,并且对于数据的处理也有较高的要求,当前还很难适用于较大的流域。然而并不能否认,这种理论清晰、对水文响应机制有着客观全面描述的分布式模型将成为未来发展的必然。

以概念性模型为基础的分布式水文模型属于对集总式模型的分布式应用,它具有资料的空间分散性,但却不一定具有分布式的参数和模型结构。这一类模型与传统模型类似,其参数(尤其是产流参数)依然是对特定子流域综合下垫面特征的反映,未能反映不同植被、不同土壤组合下的下垫面对降水的拦截和入渗过程,也不能反映各种植被和土壤各自对蒸散发的作用。故一旦模型参数确定,它所反映的就是特定区域、特定情形下的降水径流关系,几乎不存在地区之间的移植性,也不能考虑下垫面的时变性。但由于建模简单方便,所需要的资料相对于物理机制的分布式模型而言大大减少,这类模型近年来取得了较为广泛的应用。目前的研究趋势表明,以概念性模型为基础的分布式水文模型正在逐步改进,使其模型结构中水文过程的物理基础不断加强,最终也会逐步完善成为具有一定物理基础的分布式水文模型。

科技的发展使数字和遥感资料的可利用性日益增加,更为分布式水文模型提供了有力的技术支持。在信息采集和存储方面,人们借助卫星遥感等高新技术手段获得的地理信息迅速增长。目前已实现对地球进行全天候的监视,建立了具有无边无缝的分布式数据层结构,包括多源、多比例尺、多分辨率、历史和现时、矢量和栅格格式的数据,涉及农业、资源、环境、灾害、人口、全球变化、气候、生物、地理、生态系统、水文、军事、工业等领域的海量数据库。新的信息采集技术,获取了大量过去不可能或难以获得的与水文相关的空间数据,这些空间信息将为分布式水文模型的研究和应用提供更强有力的支持。

### 1.3 全球变化与分布式水文模型

由于与RS和GIS的有机结合、对海量的气象和下垫面空间数据的处理与利用,分布式水文模型(包括分布式参数的地下水数值模拟)在研究人类活动和自然环境变化对流域水文循环时空过程的影响、区域水资源生成与演变规律方面具有独特的优势。随着水文与相关学科研究的深入,分布式水文模型所揭示的水文