

---

# 不同地形中小尺度流域 分布式水文模型的 开发及应用

---

黄金柏 著

游外借



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 不同地形中小尺度流域 分布式水文模型的 开发及应用

黄金柏 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

·北京·

## 内 容 提 要

本书依托平原区中尺度流域——阿伦河流域，山区小尺度流域——Bukuro 流域以及沟壑区小尺度流域——六道沟流域，分别构建了具有物理基础的分布式水文模型；在检验模型实用性的基础上，通过对数值计算结果的解析，推求了阿伦河流域的径流系数、融雪对年径流的贡献率以及六道沟流域的年径流系数；在研发 Bukuro 流域耦合融雪的分布式水文模型过程中，着重论述了模型的参数率定过程。基于筛选不同地形条件分布式水文模型的结构共性，研发了具有结构通用性适用于不同地形条件中小尺度流域的分布式水文模型，对模型的不足和应用上的限制进行了说明。

本书可供水文学与水资源及相关学术领域从事分布式水文模型研究的科研人员、高等学校教师及研究生作为专业研究上的参考书使用。

### 图书在版编目 (C I P) 数据

不同地形中小尺度流域分布式水文模型的开发及应用/  
黄金柏著. — 北京：中国水利水电出版社，2017.9  
ISBN 978-7-5170-5895-3

I. ①不… II. ①黄… III. ①水文模型—研究 IV.  
①P334

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第233490号

书 名	不同地形中小尺度流域分布式水文模型的开发及应用 BUTONG DIXING ZHONGXIAO CHIDU LIUYU FENBUSHI SHUIWEN MOXING DE KAIFA JI YINGYONG
作 者	黄金柏 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市密东印刷有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 13.5印张 265千字
版 次	2017年9月第1版 2017年9月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	68.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换  
版权所有·侵权必究

# 前言

## FORWARD

水资源是自然资源的一个重要组成部分，可以被人类直接或间接利用。天然水资源包括河川径流、地下水、积雪和冰川、湖泊水、沼泽水、海水。与其他自然资源不同，水资源是可再生的资源，可以重复多次使用，并表现出年内和年际量的变化，具有一定的周期和规律。水资源的储存形式和运动过程受自然地理因素和人类活动所影响。流域水资源不仅是基础性自然资源和战略性经济资源，也是国家资源安全体系中最重要和核心的安全问题。随着我国经济社会的不断发展，水资源不足和水质污染引起的水危机已成为许多地区可持续发展的重要制约因素。我国的重要流域都不同程度地出现了水土流失、水污染严重、水生态环境持续恶化的现象。随着流域水资源短缺的日益严重和流域水环境污染的加剧，如何实现水资源的合理开发和高效利用，以及水生态环境的改善已成为一个被广泛关注的焦点问题。

水文现象是由众多因素相互作用的复杂过程，它与大气圈、地壳圈、生物圈都有十分密切的关系，属于综合性的自然现象。水文科学从以研究陆地水循环过程为核心的地表水文学、土壤水动力学、地下水动力学以及为生产实践服务的工程水文学已逐渐发展成为综合研究水分、能量与物质（如泥沙、污染物等）耦合循环及陆面与大气相互作用、水文过程与生态过程相互作用为主要内容的综合性、交叉性的学科。

流域水文模型是为模拟流域水文过程所建立的数学结构，被模拟的水文现象称为原型，模型则是对原型的物理和逻辑过程的描述。迄今为止，人们还不可能对水文现象用严格的物理定律来描述。常见的研究方法是将复杂水文现象加以概化，忽略次要的与随机的因素，保

留主要因素和具有基本规律的部分，建立具有一定物理意义的数学物理模型。水文模型在进行水文规律研究和解决生产实际问题中起着重要的作用。随着现代科学技术的快速发展，以计算机技术为核心，结合通信和“3S”技术（Geographic Information System, GIS, 地理信息系统；Global Positioning System, GPS, 全球定位系统；Remote Sensing, RS, 遥感技术）在水文学及水资源以及水利工程科学领域的广泛应用，使水文模型的研究得到了迅速发展，并被广泛地应用于水文基本规律的研究、水旱灾害防治、水资源评价与开发利用、水环境和水生态系统保护、气候变化及人类活动对水资源和水环境影响分析等领域，因此，水文模型的开发研究具有重要的科学意义和应用价值。

流域分布式水文模型（指完全分布式水文模型）的研究在近年来得到了迅速发展，其基本思路是：按照流域河网的空间连接关系，将流域划分成由各级小流域连接而成的形式，采用物理性方程式描述水文要素动态过程，每个小流域控制的区域根据实际物理条件输入降雨，下垫面信息如蒸散发、入渗、坡面面积、坡面及河道长度和坡度等数据以及率定计算所需要其他物理性参数，对每个分布式小流域进行产汇流计算并将其径流演算到流域出口断面得到流域出口断面的径流过程。分布式水文模型最基本的特征是根据流域各处气候信息和下垫面特性要素信息的不同，将流域划分为若干个单元，在每一个单元上用一组参数反映其流域特征，具有从机理上考虑降水和下垫面条件空间分布不均匀对流域降雨-径流形成影响的功能。它具有强大的模拟功能，从而能够把单一水量变化的模拟扩展到更加广泛的水文水资源相关问题模拟中。利用分布式水文模型对流域降雨-径流过程计算是分布式水文模型最常见的应用，随着分布式水文模型研究的不断发展，耦合陆面过程如融雪、输沙以及污染物运移等过程分布式水文模型的研究和应用近年来发展迅速。数字流域建设的核心是分布式水文模型，当前，以构建流域水文模型平台为基础的需要大数据支撑的数字流域的研究迅速发展，水文模拟技术趋向于将水文模型与地理信息系统集成，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。分布式水文模型的研究，也更加注重模型尺度的问题以及对水文

过程物理规律的描述。在当前和今后相当长一段时间内,具有物理基础的耦合陆面过程的分布式水文模型的研究仍然是水文及水资源学科领域研究的热点之一。

本书所述主要研究内容为以所选3个中小尺度流域为依托,该3个研究流域分别为流经内蒙古自治区东部和黑龙江省西部位于平原区的中尺度流域——阿伦河流域,位于山区的 Bukuro 小流域(日本鸟取县)和位于黄土高原北部沟壑区的六道沟小流域。基于各研究流域的地形及基础水文地质条件以运动波理论的基础方程式结合 GIS 技术分别构建了各研究流域具有物理基础的分布式水文模型,并通过数值模拟检验了模型的实用性;基于能量平衡法构建了融雪过程计算模块并与分布式水文模型耦合,耦合融雪的分布式水文模型的适用性在位于积雪融雪区的阿伦河流域和 Bukuro 流域进行了检验。在基于针对单一地形条件的流域(平原区的阿伦河流域,山区的 Bukuro 流域,沟壑区的六道沟流域)研发分布式水文模型的基础上,筛选模型的结构共性,研发了具有结构通用性和核心模块易调节性的适用于不同地形条件中小尺度流域的分布式水文模型。本书的有关研究方法和结果,以期待为处于不同地形条件下的中小尺度流域地表水资源的准确推求提供数值计算方法,为不同地形及水文地质条件下的中小尺度流域耦合陆面过程分布式水文模型的深入研究提供方法上的参考以及为中小尺度流域数字流域的研究提供部分研究基础。

全书共分为6章,第1章主要介绍了分布式水文模型的研究现状和发展趋势;第2章主要介绍了分布式水文模型的基础知识,即构建分布式水文模型所需的基础资料、数据常用处理方法以及运动波理论的基础知识等内容;第3章阐述了依托流经内蒙古东部和黑龙江西部位于平原区的阿伦河流域构建耦合融雪分布式水文模型、模型检验、数值计算以及结果解析的过程,并推求了阿伦河流域2012—2015年的年径流系数和融雪对径流的贡献率;第4章介绍了依托日本鸟取县境内的山区流域构建耦合融雪分布式水文模型的过程,重点论述了主要参数值变化对模型计算结果的影响以及参数率定过程;第5章阐述了依托黄土高原北部沟壑区的六道沟小流域开发分布式水文模型,模型验

证以及数值计算结果解析的有关内容，并基于对 2005—2009 年模型计算结果的分析近似地推求了六道沟流域所在地区的年径流系数；第 6 章主要介绍了适用于不同地形及水文地质条件具有结构通用性分布式水文模型的研发过程，并对模型的不足和应用上的局限性进行了说明。

本书的有关研究工作以及出版工作，得到了以下基金或项目研究经费的联合资助，作者在此深表谢意。

基金项目：国家自然科学基金项目“耦合融雪的分布式流域降雨-径流过程数值模型的研究”（No. 41271046；2013 年 1 月至 2016 年 12 月）；2016 年国家留学基金委公派访问学者项目（201608320019；2016 年 11 月至 2017 年 4 月）；中日合作项目“中国内陆部沙漠化防止及其开发利用”项目（项目主持单位：中国科学院水利部水土保持研究所，日本鸟取大学干旱地研究中心，2001 年 1 月至 2010 年 12 月）；中国博士后科学基金（海外学人：87328）和黑龙江省博士后科研启动基金项目（LRB10-170）“流域水文循环数值解析方法的研究及应用”（2010 年 7 月至 2012 年 6 月）；黑龙江省教育厅海外学人科研项目“黑龙江省西部半干旱区降雨-径流数值解析方法的研究”（No. 1251H017；2011 年 6 月至 2015 年 5 月）；扬州市“绿扬金凤计划”优秀博士项目（No. yzlyjfh2013YB105）；扬州大学科研启动基金项目“适用于不同地形小尺度流域分布式水文模型的研究”（No. 5015-137010583；2013 年 6 月至 2016 年 5 月）；扬州大学新世纪人才“优秀青年教师”项目（No. 5015-137050209）；扬州大学科技创新培育基金项目“基于分布式水文模型的东北寒旱区中尺度流域输沙特性研究”（No. 2016CXJ034；2017 年 1 月至 2018 年 1 月），扬州大学出版基金项目（2017）。

本书有关研究活动的开展过程中，得到了以下单位和研究者的热心支持和帮助：中国科学院水利部水土保持研究所张兴昌研究员、郑继勇副研究员等；日本鸟取大学大学院工学研究科桧谷治（Osamu Hinokidani）教授、梶川勇树（Yuki Kajikawa）助教；日本鸟取大学干旱地研究中心安田裕（Hiroshi Yasuda）副教授；三峡大学水利与环境工程学院朱士江副教授；东北农业大学水利与建筑学院官兴龙副

教授、侯仁杰博士等，作者在此深表谢意。感谢中国科学院水利部水土保持研究所神木试验站，阿伦河流域那吉水文站和黑龙江省甘南县气象站，以及 Bukuro 流域 Tochimoto 雨量站（日本）提供的基础资料和数据。

本书在撰写过程中，参阅和借鉴了国内外大量学术论文及相关学科的专业书籍，在此向各位作者表示诚挚的谢意。

本书所述依托各研究流域的下垫面物理条件针对不同地形条件构建的分布式水文模型，是基于大量的野外调查和水文、气象观测的基础上，以运动理论基础方程式结合 GIS 技术依托作者所在科研团队力量自主进行的分布式水文模型的研发结果，但由于对各研究区水文地质条件、土地利用方式等的调查尚不够翔实，加之编者的研究能力和水平所限，针对各单一地形（平原、山区、沟壑区）流域研发的分布式水文模型依然存在物理性不足、模型在相似地形流域的同类研究中可推广性不强等问题。对于具有通用性结构适用于不同地形和水文地质条件中小尺度流域的分布式水文模型，是针对中小尺度流域通用性分布式水文模型研发技术的一次大胆尝试，现模型只具“雏形”，难言“成熟”。分布式水文模型的研究，涉及水文学、气象学、河流动力学、土壤学、数学、计算机语言等多学科知识的综合运用，需要研究和探讨的内容有很多。由于作者的科研水平和能力所限，加之前期研究中基础数据和资料的积累相对不足，本书所述内容只作为针对中小尺度流域研发具有物理基础分布式水文模型和应用的一次探索。书中内容涉及的观点、研究思路和方法的不足以及错误之处在所难免，敬请同行专家和广大读者批评指正并多提宝贵意见，我们将在今后的科研工作中加以改进。

全书共 6 章，黄金柏撰写了第 3、4、5、6 章，并参与撰写了第 1、2 章，以及负责全书的统筹定稿；温佳伟参与了第 1、2 章的撰写工作；王斌撰写了第 2 章的部分内容并承担了全书所用数据及参考文献的复核工作。

作者

2017 年 4 月

# 目 录

## CONTENTS

### 前言

第 1 章 分布式水文模型研究综述	1
1.1 概述	1
1.2 水文模型发展阶段和分类	2
1.3 分布式水文模型的研究现状及发展趋势	4
参考文献	12
第 2 章 分布式水文模型的基础知识	17
2.1 DEM 及其特点	17
2.2 降雨数据	19
2.3 分布式水文模型的基础理论	22
2.4 蒸散发	24
2.5 降雨-径流过程计算	29
2.6 本章总结	34
参考文献	34
第 3 章 平原区中尺度流域分布式水文模型的构建	38
3.1 中小尺度流域的概念	38
3.2 阿伦河流域概况	38
3.3 水文气象观测及水文地质情况调查	41
3.4 基础方程式	45
3.5 融雪计算方法	47
3.6 有限差分方法	51
3.7 定解条件	54
3.8 模型结构	56
3.9 参数率定	58

3.10	参数灵敏度分析 .....	65
3.11	模型验证 .....	66
3.12	计算结果及讨论 .....	70
3.13	模型应用上的限制 .....	75
3.14	本章总结 .....	76
	参考文献 .....	78
<b>第4章</b>	<b>山区小流域耦合融雪的分布式水文模型构建及应用 .....</b>	<b>81</b>
4.1	概述 .....	81
4.2	Bukuro 流域简介 .....	82
4.3	计算区域的 DEM 与河网 .....	83
4.4	流域的尺度参数 .....	86
4.5	流域土壤垂直剖面模型化 .....	88
4.6	基础方程式及计算条件 .....	88
4.7	参数对模型结果的影响分析 .....	94
4.8	参数率定 .....	110
4.9	数值计算及结果解析 .....	115
4.10	本章总结 .....	124
	参考文献 .....	125
<b>第5章</b>	<b>沟壑区小流域分布式水文模型的构建及应用 .....</b>	<b>128</b>
5.1	概述 .....	128
5.2	研究区简介 .....	129
5.3	水文气象观测 .....	131
5.4	沟壑地形降雨特征分析 .....	132
5.5	六道沟流域分布式水文模型 .....	139
5.6	模型计算及结果分析 .....	153
5.7	沟谷部潜水模拟 .....	157
5.8	土壤水分模拟 .....	164
5.9	本章总结 .....	170
	参考文献 .....	171
<b>第6章</b>	<b>具有结构通用性中小尺度流域的分布式水文模型 .....</b>	<b>176</b>
6.1	概述 .....	176
6.2	模型的结构通用性 .....	177
6.3	核心模块的易调节性 .....	183
6.4	模型的物理基础与应用上的局限性 .....	189

6.5 本章总结 .....	190
参考文献 .....	190
附录 1 相关论文 .....	192
附录 2 结构通用性分布式水文模型 (源程序) .....	195

# 第 1 章 分布式水文模型研究综述

## 1.1 概述

水文学是研究地球大气层、地表及地壳内水的分布、运动和变化规律，以及水与环境相互作用的学科，其通过测验、分析、计算和模拟等手段，预报自然界中水量和水质的变化及发展趋势，为开发利用水资源、控制洪水和保护水环境等方面提供科学依据，属于地球物理学和自然地理学的分支学科。水文学与气象学、海洋学、地质学、自然地理学等学科关系密切。水文现象的时间变化过程存在着有周期而又不重复的性质，一般称为“准周期”性质。水在循环过程中的存在和运动的各种形态，如蒸发、降水、河流和湖泊中的水位涨落、冰情变化、地下水的运动和水质变化等，统称水文现象。水文现象在各种自然因素和人类活动影响下，在空间分布或时间变化上都显得十分复杂。水文学是一门古老的科学，长期以来人们一直在努力实现水文研究的定量化，尤其是近几十年来，随着人口的增加和工农业的快速发展，生活用水、生产用水日趋紧张，水质污染，水资源的不合理应用，地区用水的不平衡，极端洪灾、旱灾事件的频繁出现等，要求对各种水文现象在机制和过程进行研究，这就需要构建模拟功能强，计算精度高的水文模型（陈仁升等，2003）。

水文模型是水文学发展的产物，它是水文科学研究的一种方法和手段，是对复杂水文系统的一种简化体现，是用一种特定的表达方式来描述一定的水文系统，其能够更大程度上代表实际的水文系统，并在一定的目标下代替实际的水文系统（Diskin 1970；Clarke, 1973；金鑫等，2006）。

流域，指由分水线所包围的河流集水区，分地面集水区和地下集水区两类。如果地面集水区和地下集水区相重合，称为闭合流域，如果不重合，则称为非闭

合流域。通常所说的流域，一般都指地面闭合的集水区域。流域特征包括流域面积、河网密度、流域形状、流域高度、流域方向或干流方向等。对各种水文现象的研究，常以流域为单元开展，而流域水文模型是研究流域水文过程的重要手段。流域水文模型是水文科学与计算机科学相结合的产物，是信息技术的快速发展造就的水文科学的一个充满生机的研究领域。流域水文模拟旨在综合应用物理、数学、水文学、计算机科学、气象学等知识，在流域尺度范围内，对降雨径流形成的过程以及与之耦合的陆面过程进行局部或综合模拟，从而达到确定流域水文响应的目的（徐宗学，2010）。水文模型用数学语言或物理模型对现实水文系统进行刻画和描述，并对水文变量在时间和空间上的变化情况进行模拟和预报（芮孝芳等，2006）。自流域水文模型产生以来，得到了越来越广泛的应用，其在水文学中扮演的角色也越来越重要。水文模型在解决水文预报、水资源规划与管理、水文分析与计算、揭示污染物运移规律及特性等实际问题的研究中发挥着重要的作用。流域水文模型的不断发展，使从机制和过程上实现对各种水文现象的研究成为可能。

自从现代水文学建立以来，分支学科不断产生，各种新技术、新手段逐渐被应用到水文学研究中，水文模型也相应蓬勃发展起来。现代水文模型出现于水文学兴起的20世纪30年代（Anderson and Burt, 1990）。在20世纪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（Philip, 1954）、土壤水运动理论（Richards, 1956）和河道理论（Mc Cathy, 1938）等的综合认识不断加深以及将计算机技术引入到水文研究领域，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（严登华等，2004；金鑫等，2006），水文模型将流域概化成一个系统，该系统根据输入条件求解输出结果，其实质是对流域上发生的水文过程进行模拟、计算。水文模型的出现是对水循环规律研究和认识的必然结果，在水资源开发利用、防洪减灾、水库规划与设计、道路与桥梁设计、城市规划、非点源污染模拟与评价、人类活动的流域响应等诸多方面都得到了十分广泛的应用。当前的水文学与水资源领域的研究热点问题，如生态需水量研究、水资源可再生性维持机理等均需要水文模型的支持。

## 1.2 水文模型发展阶段和分类

水文模型的研究和应用经过了漫长的时期，总结多年来水文模型的发展历程，可以将水文模型的发展按阶段概括为初期阶段、概念性水文模型阶段和分布式水文模型阶段。早期水文模型的出现是基于洪峰预报的需要，1851年，Dooge提出了传统的洪峰预报方法（Ciriani等，1977），这是具有标志性意义的萌芽阶

段的水文模型。在此之后,现代水文模型出现,并伴随着应用水文学的发展逐渐兴起,1932年, Sherman 提出了水文单位过程线的概念,以及1933年 Horton 提出了经典的地表径流入渗理论,虽然 Sherman 和 Horton 模型在流域径流模拟方面契合度很高,但二者在模型构建的基础上有本质的区别,前者属集总式经验模型,而后者是具有一定物理基础的物理性模型 (Anderson 等, 1990)。最初的分布式水文模型的概念是由 Freeze 和 Harland 在 1969 年提出的。当时,由于模型对资料的要求很高,但要从水文观测站点的有限资料中找到质量上符合要求,而且在空间和时间分辨率上合适的资料是十分困难的,加之分布式水文模型计算对计算机性能的要求较高,导致分布式水文模型在 20 世纪 80 年代以前发展缓慢。20 世纪 60 年代以后计算机技术的快速发展为水文模型的研究发展提供了物质保障和技术支撑。分布式水文模型的快速发展开始于 20 世纪 80 年代以后,有代表性的如欧洲学者在 20 世纪 80 年代初期开发的 SHE 模型 (System Hydrologic European) (Abbott 等, 1986), 不规则三角形节面模型 (Irregular triangular facets) (Oscar 等, 1992), 美国农业部农业局开发的 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型等, 这些模型被广泛地应用于流域的河网汇流, 土壤水分模拟及计算, 融雪径流, 地表和地下水水分交换, 流域水文循环等过程的研究。

从时间的角度考查水文模型的发展,其大致可以划分为原始、近代、现代 3 个阶段。原始阶段,即水文模型起步阶段,大约在 20 世纪 50 年代后期至 70 年代初期;近代发展阶段大约为随后的 80 年代;从 20 世纪 90 年代至今是水文模型发展的现代阶段,也是水文模型突破性发展阶段,该阶段由于地理信息系统和卫星遥感技术的广泛应用,分布式水文模型成为世界各国水文科学家研究的主流,其主要特点是模型基于流域的数字高程模型,以流域面上分散的水文参数和变量来描述流域水文时空变化的特性 (吴贤忠, 2011)。

根据水文模型各发展阶段结合水文模型的结构特点,大体可以将水文模型分为 3 类,即黑箱模型、灰箱模型和白箱模型。

(1) “黑箱型”模型。黑箱模型的基础是传输函数,几乎没有任何物理意义 (王书功等, 2004), 其研究水文系统与外界的信息交换情况,而不研究水文系统内部的性质与结构,此种模型称为“黑箱型”模型,即输入-输出型模型。这种模型对水文系统的输入、输出有明确的限定,但不能在过程上对水文过程进行研究,其内部结构主要为一系列函数的转换,比较典型的有人工神经网络模型、统计模型等。

(2) “灰箱型”模型。亦称概念模型,其结构和性质介于黑箱和白箱型模型之间,传统上主要指灰色系统模型,此类模型虽然具有一定的物理基础但又在某些方面只能设置概念或概化型参数来实现对模型的表达,灰箱模型可以实现某种

程度上的对水文过程的研究。

(3)“白箱型”模型。也称物理性模型,研究水文系统本身的性质与结构的模型,它对水文系统进行明确的物理定义,参数具有明确的物理意义,可以对水文过程在机制和过程上进行研究,代表性的模型为物理性分布式水文模型。

### 1.3 分布式水文模型的研究现状及发展趋势

#### 1.3.1 分布式水文模型的研究现状

随着计算机技术和交叉学科的发展,分布式流域水文模型被广泛提出,逐渐成为21世纪水文学研究的热点课题之一(郑长统等,2009)。进入20世纪90年代以来,随着地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)以及卫星遥感技术(RS)在水文上的应用,考虑水文变量空间变异性的分布式流域水文模型的研究日益受到重视(宋萌勃等,2007),分布式水文模型得到了快速的发展,以下介绍的是几个具有代表性且被广泛应用的分布式水文模型。

##### 1.3.1.1 TOPMODEL

TOPMODEL (Topography Based Hydrological Model) 是 Beven 和 Kirkby 于 1979 年提出的,是以地形为基础的流域水文模型。在结构上, TOPMODEL 是一种基于物理过程的半分布式水文模型(王润等, 2005)。变源面积理论是 TOPMODEL 的理论基础,该理论指出,流域上产生的地表径流并不均匀,地表径流仅仅产生于由于降水使土壤达到饱和的一小部分流域面积上,这部分面积称为饱和地表面积或源面积,一般位于河道附近,而且这一源面积是在不断变化的,流域源面积的空间位置受流域地形、土壤水力特性和流域前期含水量等诸多因素控制(Hewlett and Hibbert, 1967)。TOPMODEL 结构简单,参数较少,并且每个参数都具有一定的物理意义,原始数据容易获得。与传统集总式流域水文模型相比, TOPMODEL 对实际水文过程的模拟更贴切,考虑了下垫面地形的空间变异性对水文响应的影响,实现了产流面积的空间可视化,并与地理信息系统结合,易于实现数据的更新,能够实时反映下垫面的变化(刘青娥等, 2003)。TOPMODEL 不仅适合于坡地集水区,还能用于无资料流域的产汇流计算(余新晓等, 2002)。另一方面,因为结构简单, TOPMODEL 对水文要素的空间变异性及水文单元的相互联系考虑得不够全面,模型仅仅考虑了下垫面地形的空间变异性,其他水文要素,如降水、蒸发及产流等,都被假定为空间上均一,而且除了计算地形指数,网格并没有实际的意义(Beven, 1997),这也是 TOPMODEL 有别于完全分布式水文模型主要特征。近 30 年来, TOPMODEL 在水文模拟、生态监测、气候变化、地球物理化学等领域得到了广泛的应用。谢帆等(2007)将 TOPMODEL 和新安江模型分别应用于淮河息县以上流域的洪水模拟,并在

径流深相对误差、洪峰相对误差、确定性系数等方面进行了比较；Choi 和 Beven (2007) 提出了一种降低多阶段、多准则的 TOPMODEL 预测不确定性方法；Gallart 等 (2008) 通过粗化分散的观测数据来推求模型参数。TOPMODEL 仍存在一些问题，在干旱半干旱地区的适用性较差，又因为地下水流动情况与模型描述的不相符合，不是所有数据资料地形指数都能成功地预测源面积的分布，现在还没有一种能够通过调查、等高线或栅格 DEM 数据来推导地形指数的理想方法，DEM 对洼地处理问题及与此相关的河流网格问题一直没有得到很好的解决 (刘青娥等, 2003)。

### 1.3.1.2 SHE

SHE (System Hydrological European) 是由 Danish Hydraulic Institute (丹麦水利研究所)、the British Institute of Hydrology (英国水文研究所) 和 SOGREAH (法国索格利公司) 联合提出的，是最早的分布式水文模型的代表。该模型考虑了流域尺度的截留、下渗、土壤蓄水量、蒸散发、融雪径流、地表径流、壤中流、地下径流、含水层与河道水交换等水文过程，并在不断的发展过程中增加了土壤侵蚀、溶质运移等模块。模型中，流域参数、降水及水文响应的空间分布垂直方向用分层结构表示，水平方向用矩形网格表示，这样便于对模型参数、降雨输入以及水文响应的空间分布性进行处理。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。模型还包括一个二维的地表径流计算部分，该部分通过一个一维的非饱和水流模型与一个二维的地下水水流模型连接在一起 (Sahoo and Ray, 2006)。模型参数具有一定的物理意义，可以通过观测或资料分析得到。模型采用一维 Saint-Venant 方程模拟坡面流、一维 Richards 方程模拟不饱和带流、二维 Boussinesq 方程模拟饱和带流 (王文志等, 2010)。由于应用 SHE 模型模拟所需资料多，模型的参数确定困难，所以投入实际应用的难度较大。该模型的主要水文过程可由质量、动量和能量守恒偏微分方程的有限差分表示，也可由经验方程表示。该模型的特点是：①参数具有物理意义，可由流域特征确定它的物理基础，计算的灵活性使其适用于多种资料条件；②模型可用于水资源的管理如供水、流域规划、灌溉与排水、气候变化与土地利用改变后的水文响应，也可用于环境规划如工农业污染物迁移、土壤侵蚀、湿地生态保护等，其实用性在欧洲和其他地区得到了广泛的应用和验证；③由于模型按规则矩形网格对流域下垫面进行划分，在精度和计算量上相对难以取得平衡，对于较大流域来说计算量较大，存在参数化难以克服的问题 (吴险峰等, 2002；刘昌明等, 2004)。

### 1.3.1.3 SWAT

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型是美国农业部 (United States Department of Agriculture, USDA) 农业研究局 (ARS) 开发的基于流

域尺度的一个长时段分布式流域水文模型，是在 SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) 模型基础上发展起来的 (Arnold 等, 1998; Neitsch 等, 2001)。SWAT 模型的径流模拟通常将流域划分成若干个单元流域，以减小流域下垫面和气候要素时空变异对模拟精度的影响。流域离散的方法有自然子流域、山坡和网格 3 种。根据不同植被覆盖和土壤类型，单元流域进一步细分为若干个 HRU。每个 HRU 都单独计算径流量，最后得到流域总径流量。SWAT 模型提供 Green-Ampt 方法或 SCS (Modified SCS Curve Number Method) 曲线法计算地表径流；度-日因子模型计算融雪量；动态存储模型计算壤中流；Hargreaves 法、Priestley-Taylor 法或 Penman-Monteith 法计算潜在蒸散发。SWAT 将地下水分为浅层和深层地下水，浅层地下径流汇入流域内河流，深层地下径流汇入流域外河流。河道水流演算采用变动存储系数模型或马斯京根法 (孙瑞等, 2010)。SWAT 以日为时间步长，可同时连续长时段模拟流域的水文过程、水土流失、化学过程、农业管理措施和生物量变化，并能预测在不同土壤条件、土地利用类型和管理措施下人类活动对上述过程的影响，其中，径流模拟是 SWAT 模型最基本、最重要的功能，基于 SWAT 模型的径流模拟是 SWAT 研究的焦点。SWAT 模型以其强大的功能、先进的模型结构及高效的计算，在世界各国得到了广泛应用。SWAT 能够利用地理信息系统和遥感提供的空间数据信息模拟地表水和地下水的量与水质，长期预测土地管理措施对于具有多种土壤类型、土地利用和管理条件的大面积复杂流域的径流、泥沙负荷和营养物流失的影响。模型中产沙计算采用的是修正通用土壤流失方程 MU-SLE (Modified Universal Soil Loss Equation) 方法 (Watson 等, 2007)。该模型在美国、加拿大、欧洲等国家和地区得到较广泛的应用，近年来在我国也越来越受到重视，成为一个热点研究模型，并在国内的很多地区得到检验校正，如西北黑河莺落峡以上流域 (王中根等, 2003)、黄河中游三川河流域 (罗睿等, 2008)、青海湖 (舒卫先等, 2008) 等。鉴于我国自然条件和资料特点，国内学者针对不同研究区特点以及研究问题的不同对 SWAT 模型进行了有针对性地改进以提高其模拟精度，如任启伟 (2002) 为研究西南岩溶流域表层岩溶带和岩溶浅层水的调蓄功能，改进了 SWAT 模型的产流模块；王宏等 (2005) 为克服 SWAT 地下水模块的弱势，应用 SWAT 和地下水模型 GAM 对华北平原地下水系统进行了联合模拟；张东等 (2005) 针对模型在黑河流域和汉江流域水文模拟中存在的问题，增加了土壤粒径转换模块，改进了模型的 WGEN、潜在蒸散量模拟算法以及气象参数的空间离散方法；Luo 等 (2008) 考虑到黄河流域的干旱情况，对叶面积指数曲线和地下水蒸发的计算方法进行了修改，改进了模型的植物、土壤水和地下水模块。针对高海拔地区的空间差异大，气象站资料空间插值后代表性较差等因素对 SWAT 模型应用产生的问题，需对气温和降水资料进行高度校正，刘吉峰等