

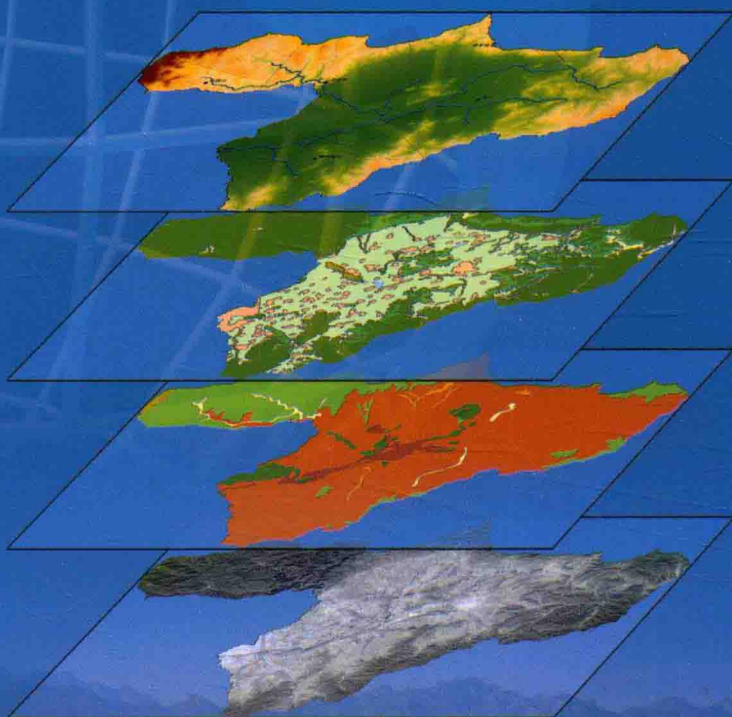
国家自然科学基金 (41271004, 40901026)

北京市科技新星项目 (2010B046)

变化环境下纳水河流域

生态水文过程模拟

张静 郭彬斌 郑震 宫辉力 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

国家自然科学基金 (41271004, 40901026)

北京市科技新星项目 (2010B046)

变化环境下的水河流域 生态水文过程模拟

张静 郭彬斌 郑震 宫辉力 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以北京市妫水河流域为研究对象,从揭示流域水文过程的角度出发,基于流域最新的水文气象数据,运用3种水文模型(HSPF、SWAT和MIKE SHE)对妫水河流域进行模拟,并对妫水河流域水文模拟的不确定性以及人类活动和气候变化对水文过程的影响进行了分析研究。

本书可供从事水文水资源、水土保持、工程水文学以及相关专业研究领域的科学技术人员、高等院校教师及研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

变化环境下妫水河流域生态水文过程模拟 / 张静等著. — 北京:中国水利水电出版社,2015.10
ISBN 978-7-5170-3763-7

I. ①变… II. ①张… III. ①河流—生态环境—水文环境—演变—过程模拟—北京市 IV. ①P344.21

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第250283号

书 名	变化环境下妫水河流域生态水文过程模拟
作 者	张静 郭彬斌 郑震 宫辉力 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 (发行部)
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	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 11.25印张 214千字
版 次	2015年10月第1版 2015年10月第1次印刷
印 数	001—500册
定 价	36.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

| 前 言 |

水是人类赖以生存和发展的重要物质基础，随着社会的发展和进步，人类活动和气候变化导致越来越严峻的水资源问题，流域水文模拟是研究水文自然规律和解决水文工程问题的主要手段。

本书以北京市妫水河流域为研究对象，共分为9章。第1章介绍研究的背景、意义以及国内外相关研究的进展。第2章介绍研究所用的主要手段——流域水文模型。第3章介绍研究区的概况和本书所用的研究数据。第4~6章分别介绍 HSPF、SWAT 和 MIKE SHE 3 种水文模型在妫水河流域的应用，利用研究区土地利用类型、土壤类型、数字高程模型等空间数据和长时间序列水文、气象数据建立研究区时空数据库，构建妫水河流域水文过程模型，并根据研究区特征及相似区域土壤特征对模型参数进行率定，对模型进行验证以探讨模型在研究区的适用性。第7章介绍妫水河流域水文模拟中的不确定性，并对水文模拟中的不确定性进行了分析。第8章介绍人类活动对妫水河流域水文循环的影响，定量地分析和讨论人类活动对妫水河流域产流的直接与间接影响。第9章概述气候变化对流域水文循环影响的研究方法，运用统计降尺度方法对妫水河流域未来气候变化情景进行预估，并在此基础上分析气候变化对该流域水文循环的影响。

本书在撰写过程集中了课题小组成员郭彬斌、程晓光、李谦、刘玉明和郑震在硕士期间的研究成果，参阅和借鉴了同行专家的专业书籍和学术论文，在此向各位作者表示诚挚的谢意。另外，感谢课题小组成员宋林蕊、李倩楠、邹天远、宋雨萌、王旭、梁展和赵敬在本书撰写过程中所给予的帮助。

本书系国家自然科学基金（编号：41271004、40901026）和北京市科技新星项目（编号：2010B046）的研究成果。

由于作者的科研能力水平所限，以及基础数据积累相对不足，本书仅对所选实验流域的水文过程和水文循环进行了一些初步探索，书中所提观点、研究思路和研究方法的不足之处在所难免，许多方面还有待进一步深入分析和完善，敬请同行专家和广大读者多提宝贵意见，我们将在今后的科研工作中加以改进。

作者

2015年5月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 研究进展	3
1.3 研究内容	4
参考文献	7
第2章 流域水文模型概述	8
2.1 流域水文模型研究进展	8
2.2 流域水文模型的基础	9
2.3 流域水文模型的分类	12
2.4 各类流域水文模型介绍	13
2.5 流域水文模型的局限性	27
2.6 流域水文模型的发展前景	29
参考文献	30
第3章 研究区概况及研究数据	32
3.1 研究区概况	32
3.2 空间数据	34
3.3 时间序列数据	36
3.4 其他数据	38
参考文献	41
第4章 奶水河流域 HSPF 水文过程模拟	42
4.1 HSPF 模型	42
4.2 HSPF 模型构建	47
4.3 模型参数率定	50
4.4 结果分析	54
4.5 结论	58

参考文献	58
第 5 章 奶水河流域 SWAT 模型水文过程模拟	60
5.1 SWAT 模型	60
5.2 SWAT 模型构建	63
5.3 模型参数率定	69
5.4 结果分析	72
参考文献	75
第 6 章 奶水河流域 MIKE SHE 模型水文过程模拟	78
6.1 MIKE SHE 模型	78
6.2 MIKE SHE 模型构建	83
6.3 模型参数率定	87
6.4 参数敏感性及率定分析	89
6.5 结果分析	91
参考文献	91
第 7 章 奶水河流域水文模拟的不确定性分析	93
7.1 不确定性分析方法简介	93
7.2 不确定性分析	96
7.3 参数相关性	100
7.4 “异参同效”现象分析	102
7.5 模型预报不确定性分析	106
参考文献	108
第 8 章 人类活动对奶水河流域水文循环的影响	111
8.1 人类活动对水文循环影响的概述	112
8.2 研究区基础数据库建立	115
8.3 近 30 年土地利用变化的水文响应分析	121
8.4 人类活动对水文循环的直接影响和间接影响分析	124
8.5 总结	131
参考文献	132
第 9 章 气候变化对奶水河流域水文循环的影响	134
9.1 研究背景及意义	134
9.2 气候变化对水文及水资源系统的影响研究方法概述	136
9.3 统计降尺度方法的比较研究	147

9.4 奶水河流域未来气候变化下水文响应研究	154
9.5 结论及展望	163
参考文献	165

第 1 章

绪 论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

水是生命之源，是人类赖以生存和发展的重要物质基础，也是生态环境的控制因素之一。有用的或者潜在有用的水的来源统称为水资源，它的用途涵盖广泛，包含了工业、农业、家庭、娱乐和环保活动等方面，几乎所有这些人类活动都与水资源紧密相关。

自 19 世纪末以来，随着科技的进步和社会生产力的提高，人类创造了前所未有的财富，推进了整个社会文明的进步。然而，人类在改造自然的同时，也使得生存环境受到了巨大干扰，自然环境的演化也产生了巨大的变化。水是人类赖以生存和发展的必不可少的重要资源之一，确保水资源的可持续利用，是实现社会经济可持续发展的重要前提条件（左其亭，2009）^[1]。但是，由于人类活动的影响，地球上的水文过程不断加速，突出表现在：淡水资源量减少、水旱灾害频繁、生态环境恶化等。目前，许多国家和地区已发生了严重的水危机（夏军等，2002）^[2]，水问题作为制约区域经济发展的关键性因素之一，引起了全人类社会的广泛关注。

随着社会的发展和进步，水资源问题已经成为全世界共同面临的严峻问题之一，同时我国水资源短缺问题愈发显得突出，水资源的重要性被越来越多的人所认识。我国是一个干旱缺水严重的国家。我国的淡水资源总量为 $2.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，占全球淡水资源总量的 6%，居世界第 4 位。但是，我国的人均水资源量只有 $2.3 \times 10^3 \text{ m}^3$ ，仅为世界平均水平的 1/4，是全球人均水资源最贫乏的国家之一。在某些地区，水资源缺乏对农业和国民经济的稳定发展以及环境、人类的健康都产生了严重的影响（黄金柏等，2013）^[3]。生态环境和水的关系，始终是密不可分的。水多成洪，植被受淹；地下水水位过高，盐碱灾害；地下水水位过低，旱情加重。

随着人口密度的增加，生产生活用水逐渐增加，留给生态环境的水资源逐

渐减少；上游的用水增加，导致下游的水资源减少（李秀彬，2002）^[4]。从统计数据来看，人口和生活用水总量每年都在增长，人均用水量呈现一种增长趋势，即生活用水量的增长成为一种必然趋势，其原因并不仅限于人口的增长（靳润芳等，2011）^[5]。

另外，气候条件的变化，也会直接导致流域水循环过程发生改变，进而对流域以后的水资源形成条件造成影响。由于人口的增加和工业的发展，二氧化碳的排放量急剧增加，进而导致了温室效应的出现，全球气温不断升高。由此带来的我国降水量的影响，特别是针对我国区域降水的变化波动较大（赵振国，1996）^[6]。由于我国特殊的地理位置、气候系统与地形特征，使我国成为一个洪涝灾害严重的国家。洪涝灾害对国民经济和社会发展的影响十分严重，据统计，20世纪90年代我国洪涝多年平均年经济损失达1250多亿元。此外，我国是一个水资源相对短缺的国家，水资源人均占有量低，地区分布不均，与此同时，降水的时间分布也非常不均，夏秋多，冬春少，年际变率大，供求矛盾严重制约社会和经济的可持续发展（郭彬斌等，2014）^[7]。

近30年来，我国沿海海平面总体上升了90mm，略高于全球平均水平，我国极端天气与气候事件的频率和强度发生了明显变化。当前由于气候变化所引起的系列全球性环境问题已经严重困扰着人类社会，并且逐渐威胁到了生态系统和人类社会的发展。加之人们对水资源的认识不足、浪费及污染等问题，水资源供需矛盾更加紧张，水资源的合理利用和规划管理迫在眉睫。

综上所述，以水问题为纽带，通过对区域进行水文模拟和不确定性分析，从而预估区域的水循环、水环境和水灾害等情况，已经成为了当前水文水资源学科领域的重要研究课题（夏慧平，2001）^[8]。

1.1.2 研究意义

北京市属于资源型重度缺水地区，且近几年气候日益干旱，加上人口急剧增长，地下水过度开采，水资源瓶颈日显突出。北京市延庆县城位于研究区内，近20年来城市化发展较为迅速，妫水河流域下游建有水利工程官厅水库。官厅水库建于1954年，曾经是北京市生活和农业的重要水源，但由于污染严重，在发挥40多年作用之后退出饮用水体系，已于1997年丧失水源地功能，导致北京市水资源问题更加严峻，官厅水库重新启用对缓解北京市水资源现状具有重要意义，研究区妫水河流域的水资源规划管理迫在眉睫（程晓光等，2013）^[9]。

显著的气候变化也对妫水河流域产生了较为明显的影响。气候变化直接或间接影响着水文要素（如降水、蒸发和径流等）的变化，改变区域的水量平衡，影响区域水资源的空间分布，是影响水文水资源循环与演变的最重要驱动

因素之一。开展奶水河气候变化对水文水资源的影响研究,对于理解与解决其可能造成的与农业、工业、城市发展等经济领域密切相关的水文水资源、环境、生态等问题具有重要的理论与现实意义。

气候变化是多方位、多层次的,不仅影响整个自然生态系统,而且也影响着社会经济系统。一方面气候变化必然引起水循环过程的改变,导致水资源在时空上的重新分配以及水资源数量的改变;另一方面气候条件是生态系统最基本的生存要素之一,如温度、适度和降水对生态类型有直接影响,气候变化间接或直接地影响着区域生态系统和自然环境,这些都对人类的生存和发展有显著的影响。同时,气候变化也会影响水文模拟的准确性。将奶水河的气候变化纳入水文模型的研究,不仅有助于减少模型的不确定性,也有助于对奶水河流域做出正确的水资源评价。

奶水河流域土地利用变化作为区域水文水资源变化的重要影响因素之一也纳入水文模型的研究,主要体现在流域蒸散发、产汇流过程及洪涝灾害方面。土地利用类型变化通过改变流域植被截留、下渗、蒸散等水文要素影响流域产汇流特性。不同土地利用类型由于其植被覆盖度等的差异使其存在不同的蒸散发速率。土地利用变化还将影响地表粗糙度和土壤的理化特征诸如疏松程度、透水性等,从而改变流域产汇流特性。早期常用的土地利用变化水文响应方法是对比分析法,但该方法为经验统计法,存在很大局限性。计算机、GIS(地理信息系统)和RS(遥感)技术的发展促进了分布式水文模型的诞生,使水文模拟法成为评估土地利用变化水文响应的主要方法。分布式水文模型具备极强的物理机制,以水文响应单元的概念表达流域空间异质性,在定量分析土地利用变化对水循环的影响上十分有效可信。因此,采用分布式水文模型模拟下垫面变化的水文响应也逐渐成为现今水文过程模拟的热点,研究土地利用变化的水文响应应对区域水资源规划和管理有重要指导意义(谢平等,2010)^[10]。

1.2 研究进展

水文模拟始于20世纪50年代,它是对流域上发生的水文过程进行模拟,建立数学模型,并利用计算机进行数值模拟、图形显示,实时预测各种水体的存在、循环和分布,以及物理和化学特征,从而提高人类对水文现象规律的认识。流域水文模拟是研究水文自然规律和解决水文工程问题的主要手段,随计算机技术的进步而取得了长足的发展,它在水利水电工程规划设计、洪水预报、水环境影响评价、水资源开发利用中发挥着巨大的作用。

流域水文模型主要分为概念性模型和分布式模型,概念性模型将流域概化为一个整体研究,模型简单,具有较强的实用性;分布式水文模型充分考虑了

降雨空间分布、土地利用等下垫面状况的不同对水文过程影响也不同,与实际水文过程比较吻合,能更准确地反映流域的真实情况,代表了更先进的水文模型。

目前针对妫水河流域开展了较丰富的基础性研究,主要表现在生态监测及基于遥感技术支持的植被演替研究方面。宫兆宁等(2006)^[11]基于RS和GIS技术,研究了该区湿地景观的演变趋势及其演变原因;丁连靖等(2007)^[12]研究了延庆地区地热开发对环境的影响,结果证明地热的开发不会引起地面沉降、地震等灾害;崔天翔等(2013)^[13]采用不同模型提取了植被覆盖度,对生态环境研究具有重要意义。

然而,流域水文模型是将极度复杂的水文过程进行概念化和抽象化,运用数学公式、方程和流程来描述真实的水文过程。这种概念化模型是在实际应用流域水文模型进行预测和模拟时得出的,通过气象、水文多种不同资料的输入,并利用实测值进行模拟效果的判断,应用流域水文模型时存在着诸多不确定性。但是针对模型不确定的研究却鲜有展开。

模型不确定性主要包括模型输入、模型参数、模型结构和流域响应。经分析表明:模型输入直接影响着模型模拟效果,并影响模型参数的选择,为模型模拟带来不确定性;模型参数存在着明显的“异参同效性”现象,给选择适合的参数组进行模型的模拟带来困难;流域响应主要指实测值的误差,它影响着模型的模拟效果和参数分布,给选择反映流域特征的参数带来不确定性。

不确定性分析是一种定量分析方法,它分析各个因素对模型模拟值的影响,得出的主要结果有模型参数的分布和模拟值的置信区间。通过水文模型的不确定性分析,可分析不同环节的不确定性对模型模拟的影响,为改进模型和提高模拟效果提供丰富的信息(杜新忠,2011)^[14]。

由于水文系统的复杂性和不确定性,流域水文模拟研究一直是水文科学中重要的前沿研究领域(康玲,2004)^[15]。

1.3 研究内容

妫水河是官厅水库重要入库水源,该流域的水文研究对水库重新启用具有重要意义。妫水河流域开展了较丰富的基础性研究,然而,基于人类活动和气候变化的区域尺度的水文过程研究及模型参数不确定性研究目前还鲜有开展。

本书以妫水河流域为研究对象,利用研究区土地利用类型、土壤类型、数字高程模型(DEM)等空间数据和长时间序列水文、气象数据建立研究区时空数据库,并根据研究区特征及相似区域土壤特征对模型参数进行率定,构建妫水河流域水文过程模型,对模型进行验证以探讨模型在研究区的适用性。

本书建立了妫水河流域的水文响应模型,是延庆地区妫水河流域水文模拟水资源管理的重要辅助手段,对妫水河径流进行模拟是水文响应建模的重要方向。成功地建立该地区的流域水文响应模型,离不开符合要求的径流模拟,也需要对诸多的参数进行不确定性分析,最终构建具有地区适用性的水文响应模型。本模型采用 2005—2008 年气象数据和人文观测数据,能够获得一个比较接近现状的模型。因此,本书可以为妫水河流域现阶段的水土保持、经济发展、生态环境开发和利用等提供重要的参考意见。

本书第 4 章介绍了妫水河流域 HSPF 水文过程模拟。HSPF 流域水文水质模型属于半分布式水文模型,模型既具有分布式模型的特点,根据降雨、土地利用等空间异质性,把流域划分为若干小单元;同时,模型也具有概念性水文模型的特点,对每个小单元内的水文过程概化,提高了模拟精度的同时也降低了模型计算的复杂度。目前,该模型内嵌于基于 GIS 技术的 BASINS 系统下,BASINS 系统为数据处理及流域可视化提供了方便。半分布式水文模型 HSPF 集合了概念性水文模型结构简单和分布式水文模型考虑流域空间异质性的特点,功能强大且具有较高模拟精度,被大量应用于模拟人为因素对水文过程以及水质的影响。

本书第 5 章介绍了妫水河流域 SWAT 水文过程模拟。SWAT 模型是一个具有很强物理机制的长时段的流域分布式水文模型。SWAT 模型有 3 个特点:①具有物理机制;②分布式;③长时间序列。利用 SWAT-CUP 对妫水河流域 SWAT 模型进行率定和不确定性分析,采用 SUFI-2 迭代式率定算法,高效地对 SWAT 模型进行不确定性分析,从而对妫水河流域构建具备适用性的水文模型。

本书第 6 章介绍了妫水河流域 MIKE SHE 水文过程模拟。MIKE SHE 是一个功能强大、以物理过程为基础、充分集成的模型,用于水文系统的三维模拟。MIKE SHE 模型利用空间分布的、连续的气象数据模拟湿润和较干旱地区的综合水文学、水力学和运移的问题。模型将研究流域分成若干方格或矩形格。这些网格是模型最基本的计算单元,网格之间在进行模拟时通过不同的水分物理方程建立联系,采用有限元的方法解决地表水、地下水运动的数学模拟问题。该模型不仅符合现代的软件结构化设计的思想,而且应用灵活:子模块可单独使用,也可根据需要进行耦合或者叠加。

本书还对妫水河流域水文模拟的不确定性进行了分析。虽然随着地理信息系统、遥感技术及卫星定位系统的发展,水文气象数据及下垫面情况的获取变得相对容易且精度较高,这在一定程度上减少了模型的不确定性,但没有从根本上解决不确定性的问题,水文模型的模型输入、模型结构和模型参数等 3 个方面仍然存在着诸多的不确定性。本书分析了流域水文模型不确定性分析的来

源,以及各不确定性对模型模拟的影响。首先,分析了模型参数不确定性来源,参数不确定性来源主要是指参数的“异参同效性”,不同参数组得出相似的模拟结果,给模型参数的选择和模拟带来不确定性。其次,分析了模型输入不确定性来源,模型输入不确定性主要来自降雨数据,包括其测量误差及点雨量观测与降雨的时空变异性之间的矛盾,直接影响着模型模拟效果。分析了降雨数据对径流输出值敏感性和降雨输入对模型参数分布的影响。结果表明,在假设存在“最优参数组”的情况下,降雨的输入对径流模拟值有很大的影响,而降雨的输入对参数分布也有一定影响,参数的高概率密度取值空间随降雨输入数据变化而改变,给模型参数的选择带来不确定性。再次,分析了流域响应的不确定性,预报量实测值不仅直接影响模型的模拟程度,还影响参数取值和分布。分析表明,在实测值发生变化的情况下,参数分布及高概率密度区间发生了改变,给选择代表流域特征的参数组带来不确定性。最后,分析了模型结构带来的不确定性,并介绍了常用的降低模型结构不确定性的多模型综合方法。

人类活动和气候变化是影响流域水文循环过程和水资源演变规律的两大驱动因素,所引起的水文效应已成为当前全球变化研究领域的焦点问题(宋晓猛等,2013)^[16]。人类活动方面本书以妫水河流域 SWAT 模型为基础,对人类活动对水文状况的直接影响与间接影响进行分析。结合地类的具体变化情况进行分析,截取特定的研究时段,将模拟值与实测值相结合,分析人类活动对径流量的直接影响和间接影响。妫水河流域同时受人类活动的直接与间接影响共同作用,致使其产流、汇流机制发生变化,径流量出现明显差异。人类活动的间接影响通过改变土地利用状况,使流域的产流机制发生改变,间接增加了径流量,在汛期增加尤为明显,枯水期变化较小。同时,人类活动的直接影响作用于水体,通过截蓄、漫灌等措施,使径流量直接发生改变,全年径流量明显减少,峰值基本消失(刘玉明,2013)^[17]。气候变化方面本书主要应用 HadCM3 全球气候模式和优选统计降尺度模型,对妫水河流域 6 个气象站点 21 世纪降水、气温及蒸散发的变化进行预估,对比分析气象水文要素在 3 个时期(2011—2040 年、2041—2070 年、2071—2099 年)相对于基准期(1961—1990 年)的变化,并将对降水、气温及蒸散发的预测作为 HSPF 流域水文模型的输入,探讨妫水河流域未来气候变化情景下的水文水资源响应。

开展气候变化和人类活动对水文水资源的影响研究,对于理解与解决可能造成的与农业、工业、城市发展等经济领域密切相关的水文水资源系统的规划与管理、环境保护、生态平衡等问题具有重要的理论与现实意义。

参 考 文 献

- [1] 左其享. 水资源利用与管理 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2009.
- [2] 夏军, 谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战 [J]. 资源科学, 2002 (3).
- [3] 黄金柏, 温佳伟, 王斌. 流域水文过程数值解析——以黄土高原北部六道沟为例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [4] 李秀彬. 土地覆被变化的水文水资源效应研究——社会需求与科学问题 [C] // 土地覆被变化及其环境效应学术会议论文集, 2002.
- [5] 靳润芳, 王文波, 王芃芦, 等. 基于生活用水量的预测模型及其应用 [J]. 河南科学 ISTIC, 2011, 29 (9). DOI: 10.3969/j.issn.1004-3918.2011.09.031.
- [6] 赵振国. 厄尔尼诺现象对北半球大气环流和中国降水的影响 [J]. 大气科学, 1996 (4).
- [7] 郭彬斌, 等. 妫水河流域未来气候变化下的水文响应研究 [J]. 人民黄河, 2014 (01): 48-51.
- [8] 夏慧平. 气候与土地利用变化对水文水资源的影响研究 [J]. 地球科学进展, 2001 (03).
- [9] 程晓光, 张静, 宫辉力. 基于 PEST 自动校正的 HSPF 水文模拟研究 [J]. 人民黄河, 2013 (12): 33-36.
- [10] 谢平, 窦明, 朱勇, 等. 流域水文模型——气候变化和土地利用/覆被变化的水文水资源效应 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [11] 宫兆宁, 赵文吉, 宫辉力, 等. 基于遥感技术北京湿地资源变化研究 [J]. 中国科学 (E 辑: 技术科学), 2006.
- [12] 丁连靖, 冉伟彦, 柯柏林, 等. 北京延庆地区地热开发对水文地质条件的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2007 (1).
- [13] 崔天翔, 宫兆宁, 赵文吉, 等. 不同端元模型下湿地植被覆盖度的提取方法——以北京市野鸭湖湿地自然保护区为例 [J]. 生态学报 ISTIC PKU, 2013, 33 (4). DOI: 10.5846/stxb201204270604.
- [14] 杜新忠. 流域水文模型的不确定性分析 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.
- [15] 康玲. 流域水文模拟理论与方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [16] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展 [J]. 水利学报, 2013 (7).
- [17] 刘玉明. 北京市妫水河流域人类活动的水文响应研究 [D]. 北京: 首都师范大学, 2013.

第2章

流域水文模型概述

2.1 流域水文模型研究进展

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,特别是在 Sherman 提出水文单位线过程的概念和 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、土壤水运动理论和河道理论等的综合认识,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。60年代初到80年代中期,是水文模型蓬勃发展的时期,先后提出了一些比较著名的水文模型,如 Stanford 模型、SR-FCH 模型、API 模型、新安江模型、SSARR 模型、ARNO 模型、SCS 模型和 HEC-1 模型等。

Freeze 和 Harlan 于1969年首先提出了分布式水文模型的概念。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20世纪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70年代末以后,主要的分布式水文模型有 SHE 模型、IHDM 模型和 SWAM 模型等。

20世纪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、遥感等新技术引入到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(金鑫等,2006)^[1]。

水文模型是现代水文科学中对水循环规律研究的重要手段,模型将研究对象概化为一个水文系统,模型采用一定的数学方法计算降水量等数据在水文系统中的分配,并输出水文过程的计算结果,如径流、蒸发等信息。水文模型经

历了概念性模型和分布式水文模型发展阶段。

2.2 流域水文模型的基础

流域被定义为“地表水及地下水的分水线所包围的集水区或汇水区”，也称为“地表水的集水区”。流域一般包括上游、中游、下游和河口等地理单元，涵盖淡水生态系统、陆地生态系统以及海洋和海岸带生态系统。水是流域不同单元与生态系统之间相互联系的最重要的纽带。

自然界中的水体处于不断运动中。海洋和大陆的水受到太阳辐射的作用，蒸发上升变成水汽进入大气，且随着大气而运动；在一定条件下凝结形成降水，重新降落到地球表面；降落到地球表面的水一部分被蒸发，另一部分则经过河网再次汇入海洋。水的这种周而复始的运动过程称为水循环。水循环的动力是太阳辐射和地心引力。水循环示意图如图 2.1 所示。

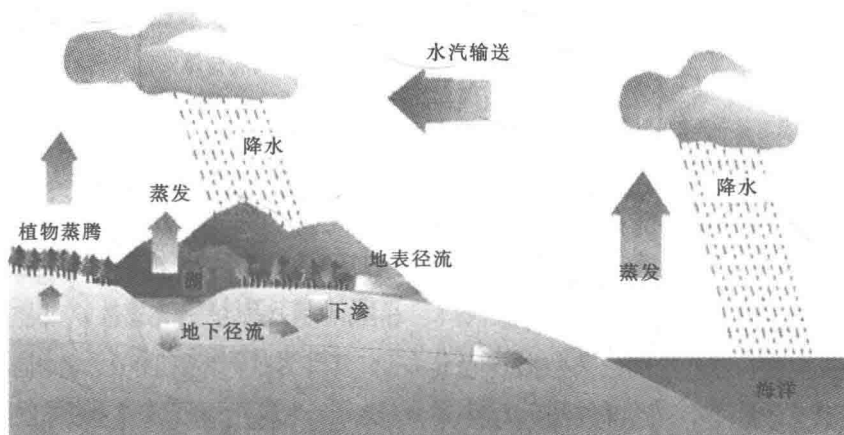


图 2.1 水循环示意图

流域水循环实际上就是流域内降雨径流的形成过程。落到流域上的雨水，首先满足截留、填挖和下渗的要求，剩余部分成为地表径流，汇入河网，再流达流域出口断面。流域或区域水文循环的空间尺度一般为 $1 \sim 10000 \text{ km}^2$ 。流域水循环系统指在某个流域范围内的水迁移转化过程形成的局部陆地水循环系统。流域水循环包括大气水循环、地表水循环和地下水循环。大气水循环主要受太阳辐射的影响，水分由水面、陆面和植物的叶面蒸发蒸腾进入大气圈。水蒸气受大气环流的影响，形成凝聚和远距离输送。大气环流也受到来自宇宙多方面的影响，如气压、气温、海水温度分布等。水蒸气凝聚到一定程度就会由空中坠落，形成降雨。