

国家自然科学基金项目“流域生态水文过程随机模拟及其对环境变化的响应——以潮白河流域为例”（41301019）

# 流域生态水文过程随机模拟 及其对环境变化的响应

潘兴瑶◎著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

国家自然科学基金项目“流域生态水文过程随机模拟及其对环境变化的响应——以潮白河流域为例”（41301019）

# 流域生态水文过程随机模拟 及其对环境变化的响应

潘兴瑶◎著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

·北京·

## 内 容 提 要

本书系统介绍了流域生态水文过程随机模拟相关技术、理论和应用研究成果。作者系统阐述了土壤水分动态随机模型理论假设及其数学内涵；基于修正的模型量化分析了我国北方典型林地和灌溉农田生态系统土壤温度概率分布、水量平衡、植被水分胁迫等生态水文特征；构建了综合超渗产流过程的土壤水分动态随机模型和径流历时曲线模型，量化环境变化条件下的流域降雨产流分布特征，提出了基于超渗产流过程的流域水热耦合平衡理论，并在潮白河流域进行了模型验证，为密云水库水资源安全提供技术支撑。

本书可供从事水文、水资源、水生态、水土保持、地理、资源、环境及有关专业的科技工作者和管理人员参考。

### 图书在版编目（C I P）数据

流域生态水文过程随机模拟及其对环境变化的响应 / 潘兴瑶著. — 北京：中国水利水电出版社，2016.12  
ISBN 978-7-5170-5114-5

I. ①流… II. ①潘… III. ①区域水文学—研究  
IV. ①P343

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第324259号

书 名	流域生态水文过程随机模拟及其对环境变化的响应 LIUYU SHENGTAI SHUIWEN GUOCHENG SUJJI MONI JIQI DUI HUANJING BIANHUA DE XIANGYING
作 者	潘兴瑶 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	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京九州迅驰传媒文化有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 7.75印张 184千字
版 次	2016年12月第1版 2016年12月第1次印刷
定 价	64.00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

生态水文学是探究流域生态系统格局和水文过程相互关系的一门交叉学科。它以陆地表层生态系统中的水和养分循环为研究对象,探究不同时空尺度上生态系统中水文过程及其对植被生长的影响,特别在相对干旱地区,水是控制生态系统格局和生态过程的关键因子。土壤水作为联系大气、土壤和植被动态的关键变量,控制着地表的蒸散发和植被的养分吸收过程。土壤水分动态受降雨、蒸散发、深层渗漏以及产流过程的综合影响。水文过程对生态过程的影响也主要是通过土壤水分的变化实现。土壤水分动态随机模拟研究是定量理解植被对水分胁迫响应、土壤养分循环的水文控制、植物水分竞争等生态系统动态、土壤和流域水量平衡过程的关键。

基于土壤水分动态随机模拟的生态水文学研究是目前国际上的研究前沿,而土壤水分随机模型吸收了成熟的非线性科学思想以及早期发展的降水模型随机理念,提出了一种在解释各种生物物理过程时既能保证其简单性又不失系统非线性本质的低维模型,为水文过程和生态过程找到了一个交叉点,也为学科发展创造了一个全新的学科增长点。北京市水科学技术研究院在国家自然科学基金项目的支持下,基于土壤水分动态随机模型方法,阐明北方干旱半干旱地区林地植被系统和农田作物系统土壤水分分布特征与水量平衡过程、植被水分胁迫、气候波动的响应机制;基于土壤湿度随机分布的动态变化规律结合流域径流过程观测资料,通过土壤水分模型的参数简化构建并检验流域随机生态水文模型,模拟、分析径流和蒸散发对流域植被变化和气候变化的响应过程,对流域内水文、植被生长和气候系统之间的关系进行定量化的描述。

本书以作者博士论文和国家自然科学基金项目“流域生态水文过程随机模拟及其对环境变化的响应——以潮白河流域为例”的成果为基础编写,全书分为8章。第1章为绪论,主要介绍研究背景和意义,从生态水文学内涵分析入手,通过对不同生态水文模型建模思路和生态水文过程模拟的尺度分析,特别介绍了土壤水分动态随机模型的一系列研究进展,分析存在的科学问题,确定研究目标和内容。第2章深入分析土壤水分动态随机模型理论和内涵,重新审视其模型理论假设,并推导该类随机模型土壤湿度概率密度函数和水量平衡。第3章选择北方常见的三种林地生态系统:元宝枫、油松、侧柏的土壤水分监测数据和气象数据,基于土壤水分动态随机模型,探究北方林地生态系统的不同植被土壤水分分布特征,量化其水量平衡过程以及水分胁迫。第4章应用土壤水分动态随机模型,模拟栾城站灌溉农田土壤湿度概率分布、水量平衡、作物水分胁迫响应和降雨波动和灌溉情景下平均土壤湿度分布特征,对该理论方法在农业生态系统中的适用性进行综合评价。第5章建立了超渗产流过程影响的土壤水分动态随机模型,分析超渗产流对土壤水分动态和水量平衡的影响。第6章基于提出的超渗产流修订的土壤水分动态随机理论方法,用超渗产流修正了基于该随机模型理论建立的流域地下径流历时曲线模型,应用不同降雨径流特征流域的观测资料,验证修正后的径流历时曲线模型对不同环境条件下流域地下径流分布的模拟

能力。第7章基于水热耦合模型方法，分析了潮河、白河流域水循环要素相应于不同土地覆被类型结构变化和水平衡的特征。通过对未来10年流域下垫面状况的预估，预测了未来变化环境条件下流域径流量的变化情况。第8章对前述工作进行了概括与总结，综述主要的研究成果和创新之处。

本书的完成非常感谢博士生导师夏军院士在作者攻读博士期间在生态水文选题、理论方法创新等方面的指导。感谢CSIRO张橹教授在土壤水分动态随机模型理论方面的指导。感谢CSIRO的Nickolas J. Potter博士在土壤水分动态随机模型方法和数学计算方面的指导。感谢张永强博士、孙宏勇博士、牛勇博士提供了不同生态系统的降雨、土壤湿度监测数据。借本书出版之际，特向支持和帮助过作者研究工作的所有领导、专家和有关人员一并表示感谢。感谢中国水利水电出版社编辑为本书出版付出的辛勤劳动。

由于流域生态水文过程随机模拟及其对环境变化的响应研究问题十分复杂，涉及范围广，工作任务重，特别是土壤水分随机模拟理论与实践处于发展阶段，再加上作者水平有限，时间也比较仓促，虽几易其稿，书中错误和缺点在所难免。欢迎广大读者批评指正！

作者

2016年10月

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 生态水文学研究进展 .....	3
1.2.1 生态水文学研究内涵 .....	3
1.2.2 生态水文模型建模思路 .....	5
1.3 生态水文随机动力方法研究进展 .....	9
1.3.1 Rodriguez - Iturbe 模型提出之前 .....	10
1.3.2 Rodriguez - Iturbe 模型提出及其研究进展 .....	10
1.3.3 基于生态水文随机动力方法的径流历时曲线模型 .....	14
1.3.4 生态水文随机动力方法研究展望 .....	15
1.4 研究目标与内容 .....	18
1.4.1 研究目标 .....	18
1.4.2 研究内容 .....	18
第 2 章 土壤湿度概率密度函数的数学推导 .....	20
2.1 土壤水分动态随机模型理论 .....	20
2.2 土壤湿度概率密度函数 .....	22
2.2.1 Milly 模型 (Step Model) .....	23
2.2.2 Porporato 模型 (Linear Model) .....	24
2.2.3 Shuttleworth and Ellis 模型 (Ramp Model) .....	25
2.2.4 Rodriguez - Iturbe 模型 .....	26
2.2.5 Laio 模型 .....	27
2.3 土壤水量平衡 .....	28
2.3.1 Milly 模型 (Step Model) .....	29
2.3.2 Porporato 模型 (Linear Model) .....	29
2.3.3 Shuttleworth and Ellis 模型 (Ramp Model) .....	31
2.3.4 Rodriguez - Iturbe 模型 .....	31
2.3.5 Laio 模型 .....	32
2.4 本章小结 .....	33
第 3 章 我国北方典型林地土壤水分动态和水平衡随机模拟研究 .....	35
3.1 模型方法 .....	36
3.1.1 土壤水分随机模型构建 .....	36
3.1.2 模拟结果评价方程 .....	36

3.2	数据获取和模型参数确定 .....	37
3.2.1	数据获取 .....	37
3.2.2	模型参数确定 .....	37
3.3	模拟结果分析 .....	39
3.3.1	土壤湿度概率分布特征分析 .....	39
3.3.2	水量平衡分析 .....	40
3.3.3	水分胁迫分析 .....	41
3.4	模型应用研究 .....	42
3.4.1	土壤水分动态和土壤水量平衡随机模拟 .....	42
3.4.2	降雨量对动态水分胁迫的影响 .....	43
3.5	本章小结 .....	44
<b>第4章</b>	<b>典型灌溉农田生态系统土壤水分动态和水量平衡随机模拟 .....</b>	<b>45</b>
4.1	模型方法 .....	45
4.2	应用研究 .....	48
4.2.1	研究区简介 .....	48
4.2.2	实验数据 .....	49
4.3	模型参数确定 .....	50
4.3.1	降雨和灌溉参数 .....	50
4.3.2	土壤水力参数 .....	51
4.3.3	蒸散发和深层渗漏参数 .....	51
4.3.4	模型参数率定及模拟结果评价方程 .....	53
4.4	模拟结果分析 .....	53
4.4.1	土壤湿度概率分布特征 .....	53
4.4.2	水量平衡 .....	56
4.4.3	作物水分胁迫 .....	57
4.4.4	年际降雨波动和灌溉影响下的年平均土壤湿度概率分布 .....	58
4.5	模型应用研究 .....	60
4.5.1	土壤水分动态和土壤水量平衡随机模拟 .....	60
4.5.2	灌溉水量对动态水分胁迫的影响 .....	61
4.5.3	平均土壤湿度概率分布 .....	61
4.6	本章小结 .....	62
<b>第5章</b>	<b>考虑超渗产流过程的土壤水分动态和水量平衡随机模拟 .....</b>	<b>64</b>
5.1	模型方法 .....	65
5.1.1	土壤水量平衡 .....	65
5.1.2	土壤湿度概率函数 .....	68
5.1.3	水量平衡方程 .....	69
5.2	模型敏感性分析 .....	70
5.2.1	土壤水分动态 .....	70

5.2.2	水量平衡	73
5.3	模型应用研究	77
5.4	本章小结	81
<b>第6章</b>	<b>考虑超渗产流过程的流域地下径流历时曲线模型</b>	<b>83</b>
6.1	模型方法	84
6.1.1	流域径流概率分布模型	84
6.1.2	超渗产流系数修订的地下径流概率分布模型	86
6.2	模型应用研究	88
6.2.1	Jacob Fork 流域 (美国)	90
6.2.2	Glendhu 流域 (新西兰)	91
6.2.3	Salmon 流域 (澳大利亚)	93
6.2.4	Stewarts Creek 流域 (澳大利亚)	94
6.3	本章小结	95
<b>第7章</b>	<b>潮白河流域平均水平衡特征研究</b>	<b>96</b>
7.1	研究方法 with 数据	97
7.1.1	模型方法	97
7.1.2	研究区概况	98
7.1.3	研究数据	98
7.2	参数确定	99
7.2.1	模型适用性	99
7.2.2	参数确定	100
7.3	模拟结果分析	100
7.3.1	流域水循环要素变化曲线	100
7.3.2	预测径流	101
7.4	模型应用研究	103
7.5	本章小结	104
<b>第8章</b>	<b>结论</b>	<b>105</b>
	<b>参考文献</b>	<b>107</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究背景

水文循环包括了一系列水文过程，涵盖了地球表层空间多种状态的水文界面系统（刘昌明，1993）。1966年 Philip 提出了土壤—植被—大气连续体（SPAC）的研究，它耦合了由土壤到植物，由植物到大气的多个界面过程。伴随应用水势和阻力来计算水分通过界面的通量，逐步奠定了对水文循环的微观研究的基础。后来进行田间土壤水分循环和水量平衡、土壤—植物水分关系以及地下水—土壤水—地表水—大气水转化都是以 SPAC 连续体为基础。近年来水文循环界面过程研究，特别是水文过程与生态过程的耦合日益成为水文学或生态水文学研究的重点和难点。

土壤水通过一种非线性的方式控制着降雨在地表转化成地表产流、蒸散发、土壤入渗等。同时土壤水动态变化过程直接或者间接控制着地表微气象过程、植被生存条件、土壤生物化学条件、地下水动态过程和 SPAC 系统中营养元素及污染物质的运移与储存（图 1-1）。土壤水作为联系陆地水文过程与生态过程的纽带，仅占地球上水的总量很小的一部分，但是，它是控制陆地水循环过程的决定性因子（刘昌明，1997a）。由于土壤水受多种物理、化学和生物过程以及多个时空上具有不确定性的变量，如降水、土壤质地、地形、温度等的影响，使得土壤水分动态变化表现出极大的随机特性（Rodriguez - Iturbe and Porporato, 2004）。

土壤水量平衡过程包括了多种物理和生物作用以及降雨、气象、土壤、地形、植被等因素的不确定性，使得对它的研究极其困难。目前对此问题的研究涉及大气水、地表水、土壤水、地下水和植物水之间的相互转化，简称五水转化。对于降水、径流、蒸散发与土壤含水量的关系已经建立了基于物理基础的多个入渗、非饱和土壤水运动和植物根系吸水模型等，由于这些模型考虑了很多生物、物理、化学过程，模型需要测定的参数过多，模型非常复杂（雷志栋等，1988，1999）。因此，如何实现对多个水文过程和生态过程的耦合，用尽量简单的方法描述这个复杂过程是未来土壤水分变化研究的热点和难点。近年来伴随不确定研究方法日趋丰富，将降雨看作是一个随机过程，由于降雨是土壤水分的输入项，对土壤水分动态和土壤水量平衡过程进行

随机模拟，也许会得到比传统确定性模型更多的土壤水分运动信息。目前在国内相关研究报道还很少，因此，在我国开展土壤水分随机模拟的方法研究具有十分重大的科学理论及实际应用价值。

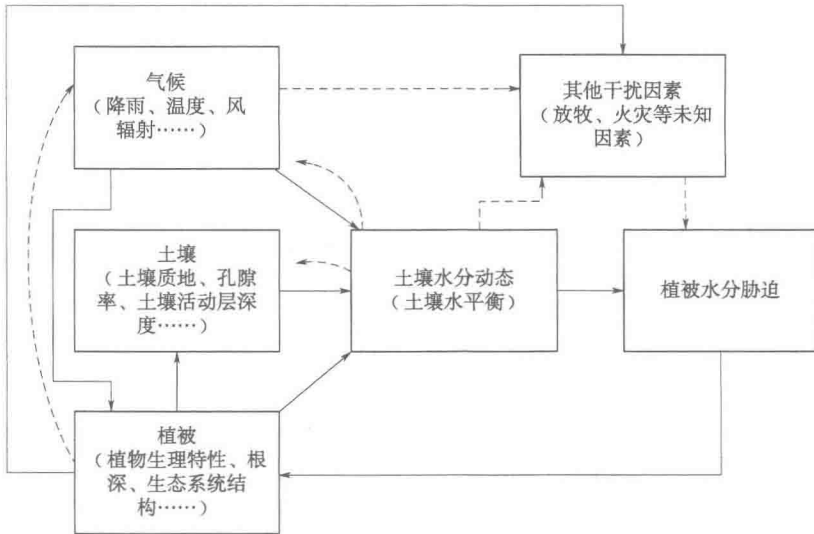


图 1-1 土壤水与土壤-植被-大气连续体动态响应 [实线表示直接重要的影响；虚线表示间接次要的影响 (Rodriguez - Iturbe et al., 2004)]

近年来水与生态关系研究得到了广泛关注。国际水文计划第五阶段 (IHP-V, 1996 - 2001) 和第六阶段 (IHP-VI, 2002 - 2007) 都把陆地表层水循环过程研究作为其核心研究内容, 国际地圈与生物圈研究计划中, 水循环的生物圈方面 (IGBP/BAHC) 也作为其核心项目。刘昌明 (1997b) 在他主持的自然科学基金“八五”重大项目中就已经提出了 SPAC (Philip, 1966) 水热传输与生态过程水分耗散的协同研究。Rodriguez - Iturbe (2000) 认为生态水文学作为一门学科, 是探求生态格局和生态过程背后水文学机制的一门科学。土壤水作为陆地水循环过程的关键环节, 是联系陆地水文过程与生态过程的纽带。土壤水分动态综合了土壤水量平衡过程对气候、土壤、生态等多种过程的响应以及土壤水量平衡对植被耗水的影响 (图 1-1)。土壤水分与植物蒸散发过程研究是生态水文学研究的核心内容, 是水文过程与生态过程耦合的关键 (Rodriguez - Iturbe and Poporato, 2004; 赵文智, 程国栋, 2001)。

流域水循环与水量平衡研究是最基本的水文问题, 许多其他自然资源的管理也依赖于准确的水文循环模拟。非湿润区主要是指干旱指数大于 1 的气候区, 含半湿润、半干旱和干旱地区。这些区域水资源缺乏, 是水资源研究、水利工程建设、生态与环境保护和气候变化研究的共同关心的区域。然而由于气候变化、土地覆被变化和工农业用水需求的不断增加, 新问题不断出现使得水文循环过程越发的复杂, 目前人们对流域水循环和水量平衡过程的理解还很不够。土壤水是综合气候、土壤、植被对水量平衡的响应和水量平衡对植

被动态影响的关键，在陆地水循环过程中扮演着重要的角色。特别在非湿润区土壤水分动态直接制约着地表生态系统的维系以及陆地水文过程。因此，本研究首先选择了北方典型林地生态系统的土壤水分动态和水量平衡过程，分析模型的适用性，并量化林地生态系统的水量平衡和水分胁迫等生态水文特征。其次还选择中国科学院生态监测网络站点——栾城站为典型灌溉农业区的代表，模拟栾城站在降雨和灌溉共同影响下的土壤水分动态和土壤水量平衡过程，以及作物对这种生态水文环境的相应。又进一步改进了 Rodriguez - Iturbe et al. (1999a) 建立的土壤水分动态随机模型，使其更适宜干旱环境的土壤水分动态和土壤水量平衡的模拟。最后，基于水热耦合模型方法，分析了潮河、白河流域水循环要素相应于不同土地覆被类型结构变化和水平衡的特征。

## 1.2 生态水文学研究进展

水资源是维持人类生存和自然生态系统平衡的主要因素。自然界的发展是人类社会发展的前提和基础，由于以往的人类经济活动忽视了自然再生产，导致社会再生产运行扭曲，难以引导合理开发利用资源和保护生态与环境以及补偿资源存量减少与环境转化。近年来淡水资源短缺逐渐成为全球问题，人类对水资源的过度开发利用造成生态系统退化，从而对社会经济的可持续发展形成了威胁，使得生态系统的格局发生重组。同时，生态系统格局和过程的改变又对区域水循环和水平衡过程造成显著影响。在这种背景下，生态水文学于 1992 年在 Dublin 国际水与环境大会上作为一门独立的学科被提出来。生态水文学一经提出就广受关注，对水文循环和生态系统之间时空上的动态关系研究被认为是 21 世纪前 20 年最有发展潜力的前沿领域 (Rodriguez - Iturbe, 2000; Georg, 2000)。

### 1.2.1 生态水文学研究内涵

生态水文学是 20 世纪 90 年代以来兴起的一门边缘学科，它是一门生态学和在水文学交叉领域的研究科学。生态学是研究生态系统格局和生态过程演化的一门科学，而水文学则主要研究自然和人类社会中的水文循环和水量平衡过程。生态水文学与传统水文学的区别在于它吸收了很多生态系统研究的方法理论，最终目的是通过研究水文过程和生态过程在时间和空间上的联系，探讨和理解生态过程和格局与水文过程的一门学科。“生态水文学”概念的提出虽然只是 20 世纪 80 年代，其实生态水文学的思想的形成从 20 世纪 50 年代就已经开始。

进入 21 世纪以来，关于生态水文学的研究逐渐体系化，值得一提的是近年来随着人们对水与生态关系的研究更加关注，其中包括土壤水分与植物耗水之间关系的研究，生态与环境的改变对水文循环过程影响的研究，特别是生态需水、绿水等新概念的提出，这些概念的本质都是为了更好的寻求水与生态系统之间的平衡关系。近年来生态水文学的研究

成果以 (Hydrological Sciences Journal) 的 2002 年第 5 期生态水文学专刊 “Special Section on Ecohydrology” (Kundzewicz, 2002)、Baird and Wilby (1999) 编著的《Ecohydrology plants and water in terrestrial and aquatic environment》、Eagleson (2002) 编写的《Ecohydrology》和 Rodriguez - Iturbe and Porporato (2004) 编著的《Ecohydrology Water - Controlled Ecosystems》四本生态水文学专著为代表。最近, 生态水文学杂志 (Ecohydrology) 的创刊表明了这一学科的重要性及其迅速发展要求。

由于生态水文的多学科综合及其过程的复杂性使得不同学科背景的专家对生态水文学概念理解的侧重点不同, 下面给出国际上几个典型的对生态水文学的定义:

(1) 生态水文学是一门多学科交叉的应用科学, 主要研究控制湿润环境自然生态系统发展的水文因素 (Wassen and Grootjans, 1996)。

(2) 生态水文学是研究植被和水之间的相互关系和影响植被生长水文过程的学科 (Baird and Wilby, 1999)。

(3) 生态水文学是研究控制生态格局和过程水文学机理的一门学科 (Rodriguez - Iturbe, 2000)。

(4) 生态水文学是生态学和水文学共同的分支学科, 它研究水文过程对生态系统分布、格局、功能, 以及生物过程对水循环过程影响的学科 (Nuttall, 2002)。

国内, 夏军 (2003) 在总结近年来国内外研究成果的基础指出生态水文学应理解为生态学和水文学交叉领域的内容, 即水文过程 (降水、径流等) 对生态系统结构、分布、格局、生长状况和物质循环、能量流动等的影响, 同时研究生态系统 (生态系统中植被类型、格局、配置等) 变化及非生命物质 (降雨、气温、风速, 土壤) 变化对水文循环 (产汇流机制) 的变化规律, 是一个相互影响的过程。

归纳起来对生态水文学的理解可以分为三种: 一是研究生态系统对水文过程影响的科学, 二是研究水文过程对生态系统格局和过程影响的科学, 三是生态系统和水文过程的交叉研究。生态水文学是综合了生态过程和水文过程的一门交叉学科。从水文学的研究角度认为生态水文学是通过对水文学和生态学的交叉研究, 探求流域生态系统格局和过程背后水文学机制的一门交叉学科, 其最终的目的是为了更好的协调区域 (流域) 内人类社会活动和自然生态系统的关系, 寻求流域水资源合理可持续利用。

由此可见生态水文学自诞生以来就存在两个发展方向: 一是由生态学家发起的集中于植被对微气候响应的研究, 另一类是由水文学家发起的不同复杂程度水文模型与植物模型耦合研究 (刘鹗和赵文智, 2006a)。国际著名生态学杂志期刊 Ecological Engineering (生态工程) 在其 2000 年 16 卷的第 1 期为生态水文学特刊 (Special Issue), 从对生态水文学的定义、关键性研究问题等方面展开论述。生态学家强调通过增加观测试验分类是生态水文学未来发展的主要途径。

而水文学家则认为生态水文学研究的核心是水文模型和生态模型的耦合。Maciej

Zalewski (2000) 认为生态水文学是基于生态过程实现区域水资源可持续利用的工具, 是解决当前水资源短缺、水环境问题日益严重的有效方法。Georg (2000) 指出生态水文学研究当前最紧迫的是在进一步明确生态水文学概念下的尺度研究, 即如何将生态学的尺度和水文学上的尺度耦合起来是生态水文学面临的最大问题。

自 20 世纪 90 年代以来, 国内开展了大量的对生态水文学的研究 (黄奕龙等, 2003; 严登华等, 2001; 赵文智等, 2001; 刘鹤等, 2006b; 潘兴瑶等, 2008); 然而多数研究仍停留在定性描述阶段, 定量研究较少 (黄明斌等, 2000a; 2000b; 刘鹤等, 2007); 作为生态水文研究的重要手段, 目前在国际上已经建立了多个生态水文模型。

### 1.2.2 生态水文模型建模思路

生态水文学研究的主要手段是建立生态水文模型。由于生态水文学是生态学和水文学的交叉学科, 生态水文过程是多种生态过程和水文过程的综合, 在建模过程中如何对这些过程进行取舍是生态水文模型建立成功与否的关键。生态水文模型的建模思路一般可以分为自上而下 (Top-Down) 和自下而上 (Bottom-Up) 两种。

#### 1. 自上而下 (Top-Down) 的建模方法

自上而下 (Top-Down) 的建模思路是指在建模过程中首先在简化真实过程的基础上建立一个简单的模型, 随后根据获得的数据情况不断增加模型的复杂程度, 逐步使模型趋于完善。Klemes (1983) 将这种自上而下的建模方法应用到水文研究中并得到广泛认同。Dooge (1986) 提出了在模型建立过程中随着研究对象 (或者系统) 的复杂程度和不确定性因素的增加需要采用自上而下的建模思路。自上而下建模的关键是所建模型的复杂程度完全取决于数据的获得情况, 如果数据精度不够, 即使复杂程度很高的模型也无法得到满意的结果。Sivapalan et al. (2003) 强调数据精度才是决定模型结构和模型应该包括哪些过程以及如何对这些过程进行模拟的关键, 而不是凭主观想象来决定模型结构。自上而下的建模方法的关键在于考虑模型尺度问题对于模型结构的影响, 在某一尺度下重要的水文过程在另一尺度下有可能可以忽略不计 (Eder et al., 2003)。自上而下的建模思路实际是根据不同的研究尺度, 确定其重要的水文过程, 并且这些过程可以通过实测数据验证。

对于生态水文模型的建立还存在一个生态尺度和水文尺度在时间和空间上的匹配问题, 要使数据同时适用于生态尺度和水文尺度是生态水文学需要解决的重大问题。一般水文学家多关注流域尺度, 而生态学家更偏向于生态系统尺度, 而气候学家多关注区域大尺度甚至全球尺度。研究气候、水文和生态系统的相互作用问题, 需要不同尺度间的转换和适应。尺度转换往往导致时空数据信息的丢失, 在某一尺度上十分重要的参数和过程在另一尺度上往往并不重要, 这对于生态水文研究尤其需要注意。大多数生态水文模型都具有高度的尺度依赖性, 如何建立生态水文研究尺度使得小尺度实验研究中建立起来的模型能推广应用到大尺度, 是生态水文模型应用研究中需要解决的关键问题之一。

Budyko (1948, 1974) 模型是一个最为典型的基于自上而下思路建立的水文模型。对于大尺度流域水量和能量平衡来说流域蒸散发量主要由大气对陆面的水分供给 (降雨量) 和能量需求 (净辐射量或者潜在蒸散发量) 之间的平衡决定。将降雨量和潜在蒸散发量分别代表水分和能量供应条件, 则流域蒸散发比 (年平均蒸散发量同年平均降雨量的比) 和流域平均干旱指数 (年平均潜在蒸散发量同年平均降雨量的比) 之间满足经验关系的水热耦合平衡方程的一般表达式为

$$\frac{\overline{ET}}{\overline{P}} = f(\phi) = \{\phi[1 - \exp(-\phi)] \tanh(1/\phi)\}^{0.5} \quad (1-1)$$

式中:  $\overline{P}$  为平均降雨深度;  $\overline{ET}$  为平均实际蒸散发速率;  $\phi = \frac{\overline{ET}_{\max}}{\overline{P}}$  为干旱指数;  $\overline{ET}_{\max}$  为平均潜在蒸散发速率。

式 (1-1) 中的经验关系是基于两个限制条件: 在极端干旱条件下, 降水全部转化为蒸散发, 此时水分供应是其主要限制因素即  $\phi \rightarrow \infty$  时,  $\overline{ET} \rightarrow \overline{P}$ ; 在极端湿润条件下, 蒸散发接近潜在蒸散发, 此时蒸散发能力供应是其主要限制因素即  $\phi \rightarrow 0$  时,  $\overline{ET} \rightarrow \overline{ET}_{\max}$ 。一般地区的实际情况则在这两种极端情况之间变化 (Budyko, 1958)。

自 Budyko 假设提出以来, Schreiber (1904)、Budyko (1974)、Pike (1964) 等通过建立一系列降水和热辐射平衡间的经验模型, 来估算区域蒸散发量。Turc (1955) 根据全球 254 个流域的水量平衡数据, 提出了与 Budyko 曲线类似的经验公式, 后经 Pike (1964) 修正发展为国际公认的 Turc-Pike 曲线, 即

$$\frac{ET}{P} = \frac{1}{\sqrt{0.9 + (1/\phi)^2}} \quad (\text{Turc 曲线}) \quad (1-2)$$

$$\frac{ET}{P} = \frac{1}{\sqrt{1 + (1/\phi)^2}} \quad (\text{Turc-Pike 曲线}) \quad (1-3)$$

上述各种模型的缺点是没有考虑流域下垫面特征因素的影响, 有些情况下会产生误差。随后出现了一系列考虑下垫面因素的 Budyko 经验公式, 并用于分析长期平均水量平衡的地区间差异。Milly 认为区域实际蒸散量取决于降水和潜在蒸散发能力, 这个过程受到下垫面水分存储因素的影响, 即

$$\frac{\overline{ET}}{\overline{P}} = \frac{e^{a(1-1/\phi)} - 1}{e^{a(1-1/\phi)} - 1/\phi} \quad (1-4)$$

式中:  $a$  为流域土壤层的平均蓄水能力。

Choudhury (1999) 受 Turc-Pike 曲线的启发提出了 Choudhury 曲线, 这是含有不确定参数的曲线簇, 即

$$\frac{ET}{P} = (1 + \phi^{-a})^{-1/a} \quad (\text{Choudhury 曲线}) \quad (1-5)$$

式中:  $a$  为与流域面积有关的参数。

我国气候学家傅抱璞 (1981, 1996) 利用量纲分析和微分方程理论确定并推导了相关

计算数学模型,并考察了中国的山地、平原以及盆地等不同地貌区与地形、植被、土壤及降水性质有关的参数确定方法,提出了一组 Budyko 假设的微分形式,基于量纲分析和数学推导得出了 Budyko 假设的解析表达式为

$$\frac{ET}{P} = 1 + \frac{ET_{\max}}{P} - \left[ 1 + \left( \frac{ET_{\max}}{P} \right)^w \right]^{1/w} \quad (1-6)$$

$$\frac{ET}{ET_{\max}} = 1 + \frac{P}{ET_{\max}} - \left[ 1 + \left( \frac{P}{ET_{\max}} \right)^w \right]^{1/w} \quad (1-7)$$

严格来讲 Budyko 曲线是基于观测数据而建立的一种经验关系曲线。某些流域的水热耦合关系偏离 Budyko 曲线的事实,这表明流域平均气候条件不足以说明年水量平衡的地区间差异,必须考虑地形、植被、土壤等下垫面条件的影响,即气候—土壤—植被系统的相互作用 (Rodriguez - Iturbe and Porporato, 2004; Porporato et al., 2004)。实际蒸散发量可以通过一个概念性的土壤水量平衡模型预测,通过给 Budyko 曲线增加一个地面条件参数来实现。孙福宝等 (2007a; 2007b) 基于上述傅抱璞曲线建立了地面参数的经验公式,并将其应用到我国非湿润区,得到了令人满意的结果 (Yang et al., 2007)。目前,基于这个理论框架探讨气候—土壤—植被之间动态相互作用过程中蕴含的水文及生态机理,是生态水文学的根本问题,已成为当前最受关注的科学前沿之一。

Zhang et al. (2001) 通过收集分析全球 29 个国家 257 条流域 (以研究径流对植被变化响应的对比流域和单个流域为主) 数据资料,建立考虑下垫面因素的经验水热耦合模型,并获取了模型下垫面参数的适用值及不同植被类型代表的意义,可以用来估算流域尺度植被变化前后的蒸散发量及其他水循环要素的变化量。Zhang et al. (2001) 建立的估算区域蒸散发量的概念模型为

$$\frac{\overline{ET}}{\overline{P}} = \frac{1 + a\phi}{1 + a\phi + \phi^{-1}} \quad (1-8)$$

式中:  $a$  为植被可利用水量参数,经过 zhang et al. (2001) 对全球 257 个流域实测资料进行最小二乘法拟合分析,模型验证结果表明不同土地覆被类型其值有明显差异,草地对应的  $a$  为 0.5,森林则为 2.0。

由于土壤湿度是影响降雨在土壤蒸散发、入渗、径流之间分配的最关键的因素,可以通过模拟土壤湿度来模拟计算土壤蒸散发量。Milly (1993) 认为实际蒸散发量是受随机降雨过程和潜在蒸散发季节变化共同决定的。因此,实际蒸散发略小于年降雨量和年潜在蒸散发量中的小者,多余的能量又由于降雨的波动给消耗掉了。

Rodriguez - Iturbe et al. (1999a)、Laio et al. (2001a) 在 Milly 模型 (1993) 的基础上,耦合了随机降雨过程和土壤控制的蒸散发,提出了一套模拟土壤湿度的随机动力方法,并求解了长期平均状况下的土壤蒸散发的计算模型,极大地推动了 Budyko 曲线的研究,从生态水文学的角度对土壤水量平衡及实际蒸散发计算方法给予了更具一般性的理解。尤其是 Rodriguez - Iturbe (2000) 在其评论性文章里将此研究延伸到生态系统的动态

过程中,为生态水文学的发展创造了一个全新的学科增长点。Rodriguez - Iture et al. (1999a)提出的随机动力方法同上述 Budyko 曲线的各种经验关系或者解析解相比,更多地考虑到了客观实际的需要,既考虑了降雨的随机性又考虑了蒸散发受土壤湿度制约的必然性,因此这种随机动力方法的物理机理更牢固。如何建立随机动力方法和 Budyko 曲线之间的联系,特别在蒸散发预测方面的比较,是今后 Budyko 曲线重点研究的方向之一。

总之, Budyko 曲线的建立以及后来众多考虑不同下垫面因素的类 Budyko 曲线的提出,充分反映了自上而下的建模思路, Budyko 曲线本身就是基于自上而下方法建立的流域尺度的生态水文模型。

## 2. 自下而上 (Bottom - Up) 的建模方法

自下而上 (Bottom - Up) 的方法同自上而下的方法相反,它是通过对小尺度甚至是微尺度各种过程进行模拟,并将各模拟过程进行综合来反映大尺度的结果。这样自下而上模型存在的一个缺点就是模型一般仅适用于小尺度过程的模拟,而对于大尺度(流域和区域)的模拟能力较差(Littlewood et al., 2003)。由于只有在微尺度上才发生这样的过程,因此当研究尺度扩大为流域或更大尺度时,经常使模型模拟参数增加,同时这些参数在大尺度的估算变得非常困难,往往解决这个问题的方法是模型参数率定,然而这样有可能导致模拟结果和实际情况“过分吻合”或者是过于依赖模型参数率定使模型需要率定的参数过多。众所周知,当面对一个多过程组成的系统而言,通过增加参数和参数率定可以使模拟结果非常好,但是却增加了模型的不稳定性,直接导致模型在对于未来情景预测和应用于无资料地区时模拟结果缺乏实际意义。Jakeman and Hornberger (1993)认为模型率定参数不能超过6个。Beven (1989)认为一般降雨径流模型中模型率定的参数一般在3到5个就足够说明问题了,如果参数过多,模型模拟结果可信度就会大大降低,同时模拟结果缺乏物理意义。另外,Beven (1989)指出过多设置模型参数必然会增加不同参数的相关性,由于参数重叠增加了重叠部分对模拟结果的影响,特别在有模型参数率定情况下直接影响了模型参数的率定结果,这必将减弱模型的应用能力。

Zhanget al. (1996)等建立的 WAVES (Water Atmosphere Vegetation Energy and Solute)模型就是一个典型的自下而上的生态水文模型,该模型是基于生物物理过程模拟一维土壤—植被—大气系统中能量、水、碳和溶质平衡的综合模型,通过对 FIFE 和 HA-PEXMOBILHY 两套实验数据进行模拟, WAVES 模拟结果同实测的日净辐射、蒸散发以及土壤含水量数据相关性很好。对我国黄土高原地区农田和草地生态系统土壤水量平衡的模拟, WAVES 模型已经取得了很好的效果(Connolly, 1998; 陈洪松等, 2005; 黄明斌等, 2000b)。

中国科学院地理科学与资源研究所莫兴国研究组开发的 VIP (Vegetation Interface Processes)模型,是基于生物地球物理—化学过程、融合遥感地理信息系统的生态水文模型。该模型综合考虑了陆地生态系统能量收支、水文循环和碳氮等生命元素的吸收转化等

诸多过程,在农业生态系统模拟中已经取得了很好的应用(莫兴国等,2005,2006;Mo et al.,2005)。

Eagleson (1978a) 从植物气孔和植被个体研究尺度出发,在对植被和生态系统的水量和能量平衡各个物理过程深刻理解的基础上,将随机统计方法应用于土壤—植被—大气连续体 (Soil-Plant-Atmosphere Continuum: SPAC) 水量转化过程的模拟,建立了一个随机动力学模型。提出了一个基于生长季平均土壤含水量的生态系统均衡理论。该模型可用于气候变化、植被生长和土地生产力水平变化过程对水量平衡的影响研究。Eagleson (2002) 的生态水文模型是基于自下而上思路建立的最典型的生态水文模型之一。虽然该模型是基于自下而上思路建立的模型,通过将随机和动力方法很好的结合,使得该模型成功避免了基于这种思路建立模型时会产生的一些问题,但是另一方面模型存在的主要问题是由于基于这种随机动力方法给出的水量平衡和生态系统最优化理论过于复杂,理解起来非常困难,导致其实际应用成果非常少 (Hatton et al., 1997)。

因此,在生态水文模型建模过程中必须根据实际的研究需要和研究目的确立不同生态水文模型的建模思路。如何解决生态过程研究和水文过程研究尺度之间相互适应的问题,同时要保证其模型的简单性和应用性是生态水文学当前面临的难题。Rodeiguez-Iturbe et al. (1999a) 提出了一个全新的生态水文模型——土壤水分随机动力学模型,就像他对生态水文学的定义一样,从土壤水分动态随机模拟的角度,分析控制生态系统过程和格局的土壤水分动态变化,并预测其水文过程变化对生态系统的影响。这个模型最大的特点在于将生态微观过程和水文循环宏观过程通过确定和随机两种数学方法很好的结合,并给出了土壤水平衡方程的解析表达式,可以说为生态水文学的发展开辟了一个全新的领域。目前,这个模型作为国际生态水文学研究的重点日渐受到广泛的关注。

### 1.3 生态水文随机动力方法研究进展

水文现象受众多因素的影响,在其发生、发展和演变过程中包含着必然性的一方面,也包含着随机性的另一面。水文现象的随机描述主要是用来探究水文现象长期变化规律,其实质在于用统计数学方法理论,来研究和分析随机水文现象的统计变化特性,并以此为基础对水文现象未来可能的长期变化做出在概率意义下的定量预测,以满足工程计算、生态规模建设等的各种需要。

生态水文学研究的关键问题是土壤含水量同生态系统之间的动态制约关系 (Rodriguez-Iturbe and Porporato, 2004; 赵文智和程国栋, 2001), 它包括植被对水分胁迫的适应 (Porporato et al., 2001), 水文循环对溶质运移作用 (Porporato et al., 2003), 生态系统内部的水分竞争等 (Eagleson, 2002)。同时,这种动态关系也可用于研究土壤水分动力学过程,土壤大气之间的水分关联,土地生产力以及土壤中气体的转移等过程。