



塔里木河

下游河岸生态水文演化模型

ECOHYDROLOGICAL EVOLUTION MODEL ON
RIPARIAN VEGETATION IN LOWER TARIM RIVER

刘登峰 田富强 著



科学出版社

塔里木河下游河岸生态 水文演化模型

刘登峰 田富强 著

科学出版社

· 北京

内 容 简 介

本书以干旱区河岸生态水文演化模型为中心,介绍了生态水文模型的发展,阐述了塔里木河下游河岸植被生态水文演化模型的原理和结构,以及模型应用的方法,把模型用于分析塔里木河下游英苏断面和阿拉干断面,分析了生态输水的生态水文效应。从参数敏感性分析、系统稳定态、植被数据的质量、生长期的影响、双物种的模型等方面分析了该模型的基本特性。针对生态水文系统中可能存在的多重定态现象及其原因,构建了概念性流域生态水文模型,分析了多重定态现象出现的原因和现实意义。

本书供从事生态水文、生态治理、流域管理等工作的专业技术人员参考,也可以作为生态水文等专业本科生和研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

塔里木河下游河岸生态水文演化模型/刘登峰,田富强著. —北京:科学出版社,2015.1

ISBN 978-7-03-043000-7

I. ①塔… II. ①刘… ②田… III. ①塔里木河—生态环境—水文环境—演变—水文模型 IV. ①X321.245

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 008323 号

责任编辑:张卓磊 祝 洁 杨向萍/责任校对:韩 杨
责任印制:肖 兴/封面设计:红叶图文

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>

三河市骏志印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2015年1月第一次印刷 印张:9 1/2

字数:165 000

定价:60.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

流域生态水文系统是一个多过程耦合的复杂非线性系统,其生态、水文、地形等组成要素的演化过程紧密耦合,相互之间的反馈使流域演化可能表现出多重定态等复杂动力学行为。气候变化或流域下垫面突然改变将造成流域生态水文系统整体的耦合演化,从而影响流域水文过程,在流域水文模拟中如采用固定不变的生态或地形条件将限制其预测能力和应用范围。在全球气候变化和人类活动加剧的背景下,多过程耦合的流域系统演化模型的研究逐渐成为国内外学术研究的前沿和热点。

全书共 6 章。第 1 章是研究背景和生态水文演化模型等相关领域研究进展的综述。第 2 章针对塔里木河下游河岸地区的主导性生态水文过程,构建了塔里木河下游河岸植被生态水文演化模型(ERV 模型),该模型可以连续模拟河岸的地下水位和植被覆盖度,实现了生态与水文的双向耦合模拟,可以对变化条件下流域生态水文系统的长期演化趋势进行预测。第 3 章在塔里木河的英苏和阿拉干,分别应用 ERV 模型模拟了 2000~2006 年输水条件下的生态水文演化过程。使用地下水位观测值和遥感数据计算的植被覆盖度验证了模拟结果,评价结果表明模型具有较高的模拟精度。在植被覆盖度明显增长的情况下,在长期模拟中使用植被覆盖度模拟值作为对植被状况的描述较为准确的模拟了地下水位的变化过程。英苏生态输水效果的情景分析表明,在给定的 46 个长期间歇性输水情景下,30 年后地下水和植被都明显恢复且基本达到稳定状态。对于相同的地下水补给量,不同输水方式对应的稳态植被覆盖度存在明显差异。给定生态用水量,可以选择较优的输水方式使得稳定状态的植被覆盖度最高,或者给定植被覆盖度目标值,选择较优的输水方式使得耗水量最小。以英苏作为代表性断面,人工输水的生态水文效果研究对于流域的水资源配置和生态修复具有重要的指导意义。第 4 章分析了 ERV 模型的特性,以英苏为例,ERV 模型的参数敏感性分析表明曲线形状参数 λ_k 、 λ_g 、 λ_m 和死亡率 m_2 对模拟结果不敏感,临界水位参数 D_c 和生长率 g_0 则较为敏感。英苏生态水文系统稳定态的全局收敛性分析表明,在确定的输水方式下、给定的状态空间范围内此系统只有单一定态,此定态在给定范围内具有全局收敛性。

另外分析了用于模型验证的归一化植被指数(NDVI)数据的质量控制对植被覆盖度计算值的影响、植被的非生长期和双植被变量对 ERV 模型性质的影响。为了分析一般流域的生态水文演化特性,第 5 章用给定的植被生长本构关系构建了一个概念性流域生态水文模型,其具有两个非零的稳定态。此模型下的流域系统出现了多重定态,系统演化能达到的平衡态依赖于模型的初始值。平衡态的年平均植被覆盖度随着年降雨量的变化发生了典型的鞍结分岔,系统的非零稳定态的个数及其收敛域发生了明显的变化。第 6 章总结了本书的主要成果并展望了今后的研究方向。

本书研究工作是在胡和平教授的悉心指导下完成的,在此表示衷心地感谢。同时,感谢 Murugesu Sivapalan 教授、倪广恒教授、杨大文教授、王忠静教授和丛振涛副教授给予的多方面的帮助,感谢钟瑞森博士、林木博士和胡宏昌博士在数据整理和模型分析上的协助。

在研究过程中,MODIS 遥感数据由美国国家航天局(NASA)提供,塔里木河流域综合治理项目提供了塔里木河的地下水位数据,对此一并表示感谢。

本书受到水利部公益性行业科研专项“塔河流域水量分配关键技术研究”(201101049)和国家自然科学基金项目(51309188)资助,在此表示感谢。

限于作者的能力和水平,书中难免存在错误和纰漏,恳请读者斧正,并希望通过邮件交流讨论,电子邮箱 ervmodel@126.com。

作 者

2014 年 5 月 20 日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 水文模型的研究进展	5
1.3 生态水文优化模型的研究进展	9
1.4 生态水文演化方程和模型的研究进展	11
1.4.1 生态水文学中的种群数量演化方程研究进展	11
1.4.2 生态水文演化模型的研究进展	20
1.5 流域生态水文学中的非线性动力学研究	23
1.5.1 非线性动力学的基本概念	23
1.5.2 生态水文学中非线性动力学的研究进展	25
1.6 小结	29
第 2 章 塔里木河下游河岸植被生态水文演化模型	31
2.1 模型的框架	32
2.2 模型的控制性方程	32
2.2.1 地下水运动	33
2.2.2 裸土蒸发	33
2.2.3 植被蒸散发	33
2.2.4 植被生长	34
2.2.5 植被死亡	35
2.3 模型基础数据和模型参数的确定方法	35
2.4 模型的边界条件	38
2.5 模型的初始条件	39
2.6 模型的数值计算	39
2.7 小结	40
第 3 章 塔里木河下游河岸植被生态水文演化模型的应用	41
3.1 模型在塔里木河英苏的应用	42

3.1.1	地形地质数据	43
3.1.2	气象数据	43
3.1.3	河道输水数据	44
3.1.4	植被数据	45
3.1.5	模型参数的确定	47
3.1.6	模型的初始条件和边界条件	48
3.1.7	地下水位的模拟结果	49
3.1.8	植被覆盖度的模拟结果	54
3.1.9	讨论	58
3.2	英苏生态输水效果的情景分析	59
3.2.1	生态输水情景的设置	60
3.2.2	周期输水情景的生态水文效果分析	61
3.2.3	自动输水情景的生态水文效果分析	65
3.2.4	合理生态输水方式的讨论	68
3.3	模型在塔里木河阿拉干的应用	71
3.3.1	模型的基础数据	71
3.3.2	模型参数的确定	72
3.3.3	模型的初始条件和边界条件	73
3.3.4	地下水位的模拟结果	74
3.3.5	植被覆盖度的模拟结果	77
3.4	小结	80
第4章	塔里木河下游河岸植被生态水文演化模型的特性分析	82
4.1	塔里木河下游河岸植被生态水文演化模型的参数敏感性分析	82
4.1.1	参数敏感性分析的方法	82
4.1.2	参数敏感性分析的结果	83
4.2	英苏生态水文系统稳定态的全局收敛性分析	86
4.2.1	初始条件的设置	87
4.2.2	边界条件的设置	87
4.2.3	全局收敛性的分析	88
4.3	NDVI数据的质量控制	91

4.3.1	NDVI 数据的质量控制字段	91
4.3.2	实施质量控制的 NDVI 数据和植被覆盖度	92
4.4	植被生长期与非生长期的区别模拟的探讨	95
4.4.1	塔里木河下游的气象条件和植被	95
4.4.2	区分植被生长期和非生长期的模型构建	96
4.4.3	区分植被生长期和非生长期的模型在英苏的参数设置	96
4.4.4	区分植被生长期和非生长期的模型在英苏的模拟	97
4.5	双物种塔里木河下游河岸植被生态水文演化模型的探讨	101
4.5.1	双物种塔里木河下游河岸植被生态水文演化模型的构建	101
4.5.2	模型在英苏的参数设置	103
4.5.3	模型在英苏的应用	104
4.6	小结	109
第 5 章	流域生态水文系统出现多重定态的参数条件	112
5.1	概念性流域生态水文模型的构建	113
5.2	模型的边界条件	115
5.3	生态水文系统长期演化中的多重定态	117
5.4	植被覆盖度动力学方程性质的探讨	121
5.5	小结	125
第 6 章	总结与展望	127
6.1	主要研究成果	127
6.2	主要创新点	131
6.3	展望	132
参考文献	134

第 1 章 绪 论

流域是水文学的基本研究对象，流域的下垫面条件包括地质、地貌、地形、土壤和植被等，其物理特征（如地形指数、土壤孔隙度、饱和导水率、植被覆盖度等）是流域水文模型中的基本参数。当前流域水文模拟的方法往往是先根据资料和经验确定模型中的一部分参数，然后用人工调参或自动优化的方法在率定期内进行评价指标的优化，确定模型的其余参数。通过验证期验证的模型可以用于水文过程、水资源管理等领域的研究，包括对未来水循环过程和水资源时空分布的预测。

1.1 研究背景

当前的流域水文模拟往往有一个隐含的前提假设——“稳态流域”假设，即认为流域下垫面是稳定不变的，至少在没有大规模人类活动（如砍伐森林、植树造林、农业活动、城市化等）的条件下是稳定不变的。“稳态流域”假设具体是指，流域的地质、地形和地貌条件是不变的，土壤类型和特性是不变的，植被条件往往也是不变的或者平稳变化的（按照平稳的方式以年为周期进行循环变化，在多年的尺度上可以认为是“稳态”的）。也有学者在评价下垫面变化对水资源影响时考虑到系统的改变，但只是在模型参数率定的基础上根据下垫面变化的历史资料，经验性地改变某些参数。在这里，流域发生的变化是“突变”，是外界突然强加的，不是系统自身在外界作用下逐步演化的结果，流域在“突变”之后依然“停滞”，所以本质上依然是“稳态流域”。

实际上，流域往往处于动态演化的过程中。自然界的水循环动力系统是多个独立动力过程复杂平衡的结果，这些动力过程组成了一个相互协作的动力过程网络（Kumar, 2007）。而全球水循环系统是由多个互相联系的循环过程构成的大

系统，这些循环过程包括了地球系统的多种物理过程和生态过程，并受到人类活动的影响。流域内的水文、生态、地貌、土壤等动力过程则是全球水循环的一部分，以降水、蒸发、流域出口流量和二氧化碳同化等通量构成了流域系统与外界的联系。流域生态水文系统内的主要生态水文过程如图 1.1 所示。在流域生态水文系统内，山坡和河道上的主导性生态水文过程不同，空间尺度特征存在显著差异，所以一般把流域分为两个单元，即山坡单元和河道单元。

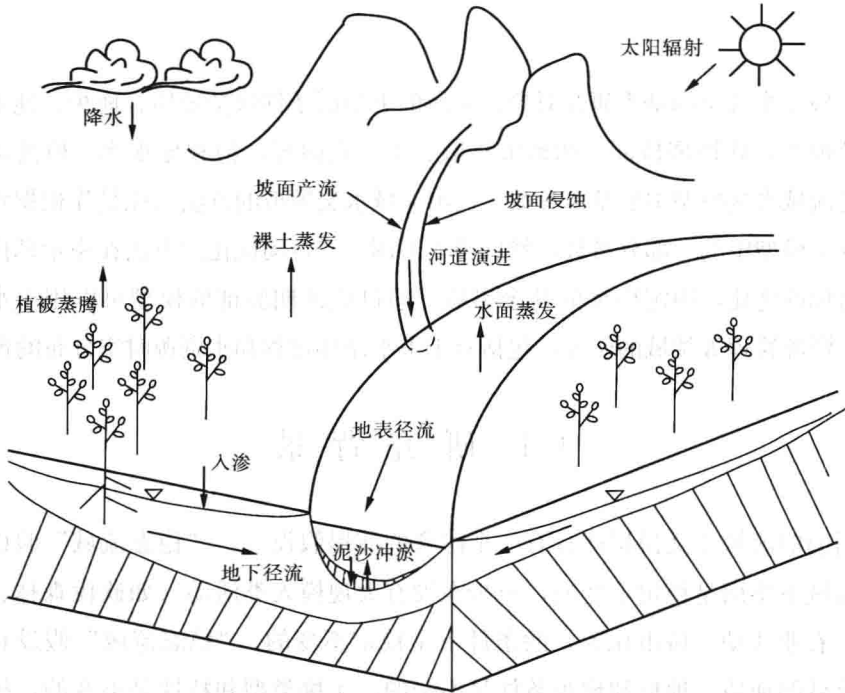


图 1.1 流域生态水文系统示意图

在山坡单元上，主要水文过程包括降水、植被截留、地表填洼、蒸散发、入渗、地表产流、壤中流和地下径流等。植被参数在植被截留和蒸散发过程中具有重要的作用。植被的截留能力和植被的长势密切相关，一般用叶面积指数 (leaf area index, LAI) 进行描述，截留能力越大，降雨的前期损失越大，从而将减小地表产流。在蒸散发过程中，植被覆盖区域的蒸散发包括植被蒸腾和植被下土壤蒸发。由于蒸散发显著大于裸土蒸发，随着植被覆盖度 (vegetation coverage) 的增大，流域的蒸散发损失的水分将增大，但是由于植被的遮阴作用，表层土壤的含水率可能会大于裸土区域。叶面积指数和植被覆盖度是水文模型中描述植被

特征的重要参数,一般使用遥感数据反演得到(Carlson et al., 1997)。但是遥感数据的时间序列一般较短,且不是所有流域的遥感数据都有很好的时间和空间分辨率,在水文模拟中经常存在代替和插补。例如,用某一年的数据代替整个模拟期的植被数据,用现在的数据代替将来的植被数据,这些代替都暗含了植被分布和长势稳定不变的假设,即“稳态流域”假设。忽视了以植被为代表的生态过程和水文过程的耦合和演化,是水文模拟和预报中不确定性的重要来源,特别是气候变化条件下的水文预报。

在河道单元上,主要的水文过程包括河道汇流和河道演进,同时也存在降水和蒸发。在河道洪水演进计算中,河道断面形状和纵坡是重要的地形参数。但是在多沙河流,河道断面形状和纵坡随着泥沙的冲刷和淤积会发生较大的改变,水文模拟中大多还是假定河道断面形状和纵坡不随时间变化。因此,固定不变的河道断面形状和纵坡参数在多沙河流的水文模拟中成为水文模拟和预报不确定性的来源。

“稳态流域”假设在环境条件基本稳定的情况下是合理的,可以简化水文模型,对于较短时间的预测是有价值的。但在当前全球气候变化日益显著、人类活动日益加剧,从而流域下垫面演化相对迅速的条件下不再具有合理性。例如,人类在干旱区大规模生态输水改变了水文状况,水文情势的改变可以导致植被状况发生快速演化,2000年开始的塔里木河应急输水就是生动的例子。现场调查显示,塔里木河英苏断面河岸植被的总覆盖度经过五年的时间从27.00%迅速恢复到了40.66%(陈亚宁等,2006),使植被蒸腾消耗的地下水逐年增加(高凡等,2010),在这种条件下如果不考虑植被的动态演化将会带来水文模拟和预测的较大误差。

因此,在实际的流域综合管理中,水文过程和生态过程耦合下的流域生态水文系统演化趋势成为亟须研究的重要问题。在北方干旱半干旱地区,由于受过度放牧、过度引水灌溉、乱砍滥伐等人类活动的影响,近年来沙漠绿洲急剧萎缩,水土流失严重,土地荒漠化加快,由此产生的生态环境问题受到了普遍关注,如黑河下游的额济纳绿洲(张丽等,2003;王根绪等,2000)。由于生态环境问题的凸显,荒漠化治理工作已经在北方展开,不适宜耕种的地区在国家的扶持下开展了“退耕还林”“退耕还草”等生态修复工作(孟林等,2003;朱自安等,2003)。在北方半干旱流域的特定水文地质条件和气象条件下,植被的类型及其

覆盖度是否能够维持当地的生态环境而稳定的存在，都成为需要解决的重要问题。在新疆维吾尔自治区沙漠绿洲灌区内部，由于大量引水灌溉造成局部地下水位太高，土壤盐碱化问题突出，如何有效解决灌区盐碱化问题、保护绿洲生态环境、保证绿洲灌区农业的可持续发展成为亟待解决的现实问题（陈小兵等，2007；董新光等，2005）。

在全球气候变化的大背景下，降水量的变化趋势则呈现出很强的区域特征。根据《气候变化国家评估报告》的结果，近 100 年和近 50 年中国的年降水量变化趋势不明显，但是 1956 年以来出现了微弱增加的趋势，未来 20~100 年，中国年降水量将呈现增加趋势（丁一汇等，2006）。基于 1951~2002 年我国约 730 个气象站的观测数据，中国的年降水量变化呈现显著的区域特征：华北、华中、东北南部地区持续下降；长江流域以南地区明显增加；而新疆北部、东北北部和青藏高原西部 20 世纪 60 年代到 70 年代下降，80 年代后期有所回升（王英等，2006）。虽然大范围的气象因素变化趋势缓慢，但是局部的气象因素可能呈现出较显著的变化趋势。Yu 等（2006）利用植被-土壤-大气碳交换模型（carbon exchange between vegetation、soil and the atmosphere, CEVSA）模拟显示，由于气候变化，21 世纪末我国总植被覆盖度相对基准值将增加 19%，相对基准值森林增加 8%，相对基准值沙漠和裸地将减少 13%，与森林、荒漠、裸地相比，灌木和草地对气候变化更加敏感。在全球气候变化的背景下，年降水量的变化必然引起流域下垫面植被条件的改变，从而增加了水文预报的不确定性，使得忽视下垫面变化的流域水文模拟受到了挑战。

“稳态流域”已经不复存在，流域系统在外界作用下不断发生演化，增加了对流域未来水文状态预测的不确定性（Milly et al., 2008）。要深入开展变化条件下流域水循环和水资源问题的研究，首先要回答这样几个科学问题：流域内部各种子系统之间的相互作用和反馈将导致系统如何演化？演化的动力学特性如何？由于流域系统包括水文、生态、土壤、地质、地形和地貌等多个子系统，各子系统的演化速率也不同，所以该科学问题实际上包括一系列复杂的多学科交叉问题。

流域内的生态过程和水文过程密切耦合，但是传统水文模型把植被条件作为外部参数输入。因此，对流域未来的水文过程进行预测时，植被条件不变的假设更是增加了水文预报的不确定性。本书把演化速度较快的生态过程与水文过程耦

合建立生态水文模型，加深对生态水文系统演化复杂性的理解，增强对生态和水文耦合下生态水文系统演化的认识，推动单一水文模型的研究向流域多过程耦合模型研究的发展。

塔里木河下游地区是典型的内陆干旱区，针对这类干旱区的生态水文演化模型的研究具有重要的实践价值和科学意义。在实践价值方面，塔里木河下游形成了穿越塔克拉玛干沙漠的绿色走廊，对于新疆地区的政治、经济、交通和生态具有重大的战略意义。但是，绿色走廊生态水文系统十分脆弱，极易受到气候变动和人类活动的影响，2000年以前绿色走廊面临严重的植被退化问题，极易造成严重的生态灾难。目前，塔里木河综合治理和生态修复工作正在试验中展开。干旱区生态水文演化模型的研究可以为维持和恢复绿色走廊提供技术支撑，为生产实践服务，其研究结果也可以扩展到黑河、石羊河等内陆河。在科学意义方面，干旱区河岸植被生长所需水分的唯一来源就是河流侧向渗漏形成的地下水，其主导性生态水文过程十分明确，生态和水文耦合关系比较简单。干旱区生态水文演化模型及其隐含的生态水文相互作用的基本假设，比较容易得到实测数据的验证，从而可以推动生态水文学基本理论的发展。

流域是一个多过程耦合的复杂非线性系统，内部子过程间存在大量的反馈关系。但是，在水文科学的非线性研究中，对描述流域系统的动力学方程的非线性特性分析极少。在合适的时间尺度和空间尺度上建立描述流域系统的动力学方程组，对其非线性特征进行分析，将有助于从理论上认识流域系统的非线性特征，促进水文科学的非线性研究。

1.2 水文模型的研究进展

水文模型一般是指使用数学方法对流域内的水文过程进行模拟，是研究水文水资源等问题的重要工具。在水文过程的机理描述上，水文模型经历了系统模拟模型、概念性模型和物理性模型的发展过程，同时在空间信息的描述上，经历了集总式模型和分布式模型的发展过程（杨大文等，2004）。由于集总式水文模型不能反映水文过程的物理机制、不能描述空间分布的不均匀性等自身缺陷，分布式水文模型的出现成为必然（芮孝芳等，2006）。

计算机软硬件技术和遥感技术的发展决定性地推动了以 Freeze 等（1969）

提出的以“蓝本”为基础的分布式物理性水文模型的发展。国内外出现了很多分布式物理性水文模型(贾仰文等, 2005a; Singh et al., 2002)。国外学者开发的代表性水文模型有 HBV (hydrologiska byrans vattenavdelning) (Bergstrom, 1995)、IHDM (institute of hydrology distributed model) (Beven et al., 1987)、SHE (systeme hydrologique europeen) (Abbott et al., 1986)、TOPMODEL (topography based hydrological model) (Beven and Kirkby, 1979) 等。国内学者也开发了很多水文模型, 黄平等 (1997) 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模型, Yang 等 (2002, 1998) 依据流域的地貌特征建立了以山坡为基本单元的物理性分布式水文模型 GBHM (geomorphology-based hydrological model), 郭生练等 (2000) 建立了基于 DEM 的模拟小流域的降雨径流时空变化过程分布式水文模型, 李兰等 (2003) 采用子流域划分计算单元提出了变动生态产流模式的 LL-II (lilan-II 模型) 分布式降雨径流模型。分布式水文模型为了描述流域的空间变异性, 采用不同的方式对流域进行离散, 如子流域单元不规则三角网 (王蕾等, 2010)、规则网格 (water and energy transfer processes, WEP) (Jia et al., 2001)、山坡单元 (Yang et al., 2002; Yang et al., 1998)、水文响应单元 (soil and water assessment tool, SWAT) (Arnold et al., 1998) 等。也有学者尝试把集总式模型发展为分块式模型, 如分布式新安江水文模型 (徐宗学等, 2010; 俞鑫颖等, 2002)、分布式时变增益水文模型 (王纲胜等, 2004; 夏军等, 2003) 等。

由于气象、地质等条件的特殊性, 在干旱地区、寒冷地区、岩溶地区等特殊流域, 特殊的生态水文过程成为主导性水文过程, 所以出现了流域特性针对性很强的水文模型, 如干旱区平原绿洲散耗型水文模型 (胡和平等, 2004; 汤秋鸿等, 2004)、寒区流域水文模型 (Mou et al., 2008; 李志龙, 2006; 关志成, 2002; 俞鑫颖等, 2002)、岩溶地区水文模型 (赵旭峰等, 2007; 张健云等, 1988)、黄土沟壑区产流计算模型 (沈冰等, 1984; 沈冰, 1983) 等。

近年来, 随着全球气候变化和人类活动影响的加剧, 只对水文过程进行模拟的流域水文模型开始从生态、人类活动等过程耦合向流域多过程耦合模型发展。流域内的这些运动过程包括能量传输 (Jia et al., 2001; Wigmosta et al., 1994)、泥沙运移 (唐莉华, 2009; 刘卓颖, 2005; 唐莉华等, 2002)、生态演化 (孙鹏森等, 2003)、大气 (陆桂华等, 2006)、人类活动 (许继军, 2007; 刘昌

明等, 2006; 王忠静等, 2003)、水资源利用 (Jia et al., 2006; 贾仰文等, 2005b) 等。同时, 分布式水文模型也开始被用于流域水资源演变规律研究 (王浩等, 2005) 和水资源评价 (王忠静等, 2008; 王浩等, 2006)。

经过几十年的发展, 逐步发现以“无需率定”为优势之一的物理性水文模型仍然很强的依赖于模型率定来确定参数, 而且由于参数众多使得异参同效的问题十分严重。究其根源, 认为 Freeze 等 (1969) 提出以“蓝本”为基础的分布式物理性水文模型在于模型的尺度问题 (胡和平等, 2007), 即模型中数学物理方程的非线性和流域地形地貌特征及气象强迫的不均匀性所导致的模型应用尺度与方程适用尺度之间的不匹配。实际上, “蓝本”模型所依据的数学物理方程均为在点尺度或代表性单元体积尺度 (representative elementary volume, REV) 上, 依据牛顿质点力学理论建立的非线性方程。这些方程固有的非线性性质加上流域下垫面条件和气象强迫的高度变异性, 使得求解方程所需要的参数和初始边界条件均需要在点尺度或 REV 尺度上提供, 但是目前水文观测能力难以达到。因此, 模型参数的确定最终只能依靠率定来解决, 过参数化等问题是难以避免的。

对“蓝本”模型内在尺度不匹配问题的思考成为当代水文学理论研究的重要内容, 目前主要有三个研究方向: 准物理性水文模型, 基于不规则网格的物理性水文模型, 尺度协调的物理性水文模型 (胡和平等, 2007)。胡和平等 (2007) 认为, 准物理性水文模型的特征是, 根据产汇流特点对流域空间和水文过程进行某种形式的“集总”, 从而降低计算负担, 如 THIHMS (Tsinghua integrated hydrological modeling system) (王蕾等, 2006)、SWAT (Neitsch et al., 2005) 和 GBHM (Yang et al., 2002) 等。基于不规则网格的物理性水文模型的特征是, 采用“蓝本”中的物理性方程来描述水文过程, 在进行流域空间离散时采用不规则网格, 希望用较少的网格更好地描述气象和下垫面条件的空间变异性, 如 TPModel (triangulated irregular network based physical watershed hydrological model) (王蕾, 2007) 和 PIHM (Penn State integrated hydrological model) (Qu, 2004); 尺度协调的物理性水文模型是指从基本的物理原理出发在模型应用的尺度上直接建立数学物理方程的模型, 这类模型有 SAHM (spatial averaging hydrological model) (杨志勇等, 2008)、THModel (thermodynamic hydrological watershed model) (田富强, 2006)、CREW (cooperative community catchment model based on the representative elementary watershed approach) (Lee et al., 2007) 和 WEHY

(watershed environmental hydrology)(Kavvas et al. ,2004)等。

THModel 是以代表性单元流域 (representative elementary watershed, REW) 水文模拟方法为基础的水文模型 (田富强, 2006)。基于代表性单元流域的水文模拟方法最早由 Reggiani 等 (1999, 1998) 提出, 随后 Lee 等 (2005) 对其中的本构关系进行了深入研究, 建立了 CREW 模型 (Lee et al. , 2007)。Tian 等 (2006) 对模型结构进行了扩展, 重新定义了 REW, 建立了包括积雪、冰川、冻土、植被等复杂下垫面条件的 THModel (牟丽琴, 2008; Tian et al. , 2008; 田富强, 2006), 现在称为 THREW 模型 (Tsinghua hydrological model based on representative elementary watershed)。REW 方法是水文模型的新一代蓝本, 以 REW 方法为基础的 THREW 模型直接在宏观尺度上建立描述水文过程的数学物理方程, 解决了流域水文模拟中方程适用尺度和模型应用尺度不一致的问题, 将流域水文模拟的重点转向代表性单元流域尺度本构关系的建立, 有利于水文学建立学科自身的理论基础 (Beven, 2002)。

概括来讲, 分布式物理性水文模型的基本框架都可以用图 1.2 表示。水文模型以描述流域水文过程的方程组为模型的核心, 以降水和潜在蒸发的时间序列数据作为外部的天气强迫输入模型, 生态过程只是用代表植被条件的植被覆盖度和 LAI 等参数以历史时间序列的形式进入模型, 一般数据的时间精度比较低, 地形地质条件也是以参数的形式进入模型, 而且一般假定在水文模拟的时间范围内保持不变。水文模型在时间序列形式的天气强迫作用下开始运行, 提供水文状态变量的变化过程和边界通量过程, 即流域出口流量过程。

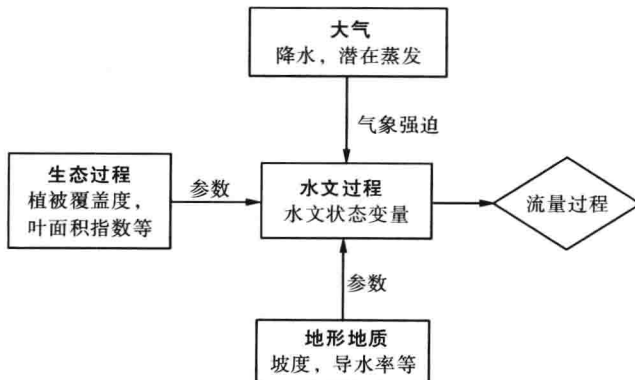


图 1.2 流域水文模型的基本框架

在植被和地质地形等下垫面条件基本不变的情况下，水文模型表现出较好的预报能力，但是在人类活动和气候变化的条件下，水文模型对历史植被条件资料的依赖和对地形不变的假设使得水文模型的预报能力受到了质疑。水文模型必须考虑把以前假设不变的外界条件引入到模型中，即把植被和地质地形条件的变化过程引入水文模型，使这些过程成为模型内部的演化过程，从本质上反映流域内多过程耦合下的演化，使数学模型中的流域也成为动态演化的客观对象，从而提高水文模型在变化条件下的预报能力。

1.3 生态水文优化模型的研究进展

生态水文模型作为研究生态和水文相互作用的有效工具，反映了生态对水文过程的影响和水文对生态过程的影响，使得生态水文系统成为有机整体。但目前文献中所称的生态水文模型对生态过程和水文过程的抽象概化程度，差异较大 (Peterson et al., 2009; Baudena et al., 2007)。在研究尺度上，对生态过程和水文过程进行抽象概化的程度主要由研究需要决定。

已有的生态水文模型可以分为两类：第一类着重考虑植被如何对现实的水文过程尤其是土壤水分过程做出响应，是考虑不同目标函数的流域生态水文优化模型；第二类在更大的空间尺度和更长的时间上考虑植被、水文和气象系统之间的反馈机制，是基于过程模拟的流域生态水文演化模型。

在流域生态水文优化模型研究方面，Peter Eagleson 等建立的以“净初级生产力” (net primary production, NPP) 为目标的植被优化模型 (Eagleson, 1982)，Ignacio Rodriguez-Iturbe 等 (1999) 以土壤含水率的概率表达为中心建立的以“植被缺水度” (vegetation water stress, VWS) 为目标的植被优化模型等 (Rodriguez-Iturbe et al., 1999a, 1996)，Schymanski 等 (2009) 建立的以“净碳同化量” (net carbon profit, NCP) 为目标的植被优化模型。

Eagleson (1982) 在流域生态水文优化模型研究方面做出了开创性的工作，考虑了土壤和植被的水文参数后研究了平均年水量平衡的统计动力学模型解空间。在模型精度范围内，当冠层密度和物种趋向于最小化平均需水胁迫时，水分受限自然植被系统在所处气候和土壤环境中处于稳定平衡状态。他建立的生态最优性理论认为气候对这个平衡状态存在限制，假设生态压力趋向于生物量生产的