

森林流域水文模拟模型的概念、作用及其在中国的应用

孙 阁¹ 张志强² 周国逸³ 魏晓华⁴

(1 美国农业部林务局南方全球变化研究中心 2 北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室
3 中国科学院华南植物园 4 加拿大大不列颠哥伦比亚大学)

摘要:在全球变化的背景下,研究森林植被与水资源相互作用的森林水文学和流域管理科学在国际上得到迅猛发展.作为一种新型的水文研究和流域管理工具,流域水文模拟模型在中国越来越为森林水文和流域管理工作所接受和使用.该文在总结了中国在森林水文研究中的主要问题后,介绍了森林流域水文模拟模型的基本概念、分类方法以及开展森林与水关系研究中的主要作用,总结了流域水文模拟模型的主要功能.并以分布式水文模型 MIKE SHE 为例介绍了模型的结构组成、开发和应用过程.最后提出该模型在中国应用中要注意的问题,包括中国土地利用的独特性、历史水文气象数据的可靠性和共享性.

关键词:森林水文,模拟模型,MIKE SHE

中图分类号:S715 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1522(2007)03-0178-07

SUN Ge¹; ZHANG Zhi-qiang²; ZHOU Guo-yi³; WEI Xiao-hua⁴. **Forest watershed hydrological simulation models: Concepts, use and application problems in China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2007) **29**(3) 178-184 [Ch, 38 ref.]

1 Southern Global Change Program, USDA Forest Service, Raleigh, NC, 27606, USA;

2 Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing Forestry University, 100083, P.R. China;

3 Southern China Botany Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510650, P.R. China;

4 University of British Columbia-Okanagan, 3333 University Way, Kelowna, British Columbia, V1V 1V7, Canada.

Mathematical models are simplified representations of the real world. Computer simulation models have been well accepted in the international hydrologic community for various reasons. This paper explored the role of simulation models in forest hydrological research and watershed management by using the MIKE SHE model as one example. Modeling concepts and the modeling procedures were reviewed. The authors stress that modeling is a powerful tool, but can not replace empirical investigations, and it should be used as an integral part of modern hydrological studies and comprehensive watershed management. The authors also discussed the needs of hydrologic modeling studies in China under the current nationwide reforestation campaign.

Key words forest hydrology, computer simulation model, MIKE SHE

由于森林的生命周期很长,不同尺度上的人工林植被的水文作用需要几年或几十年的时间才能观测到,因此这类实验研究常常需要几代人的努力和一个稳定的财力支撑才能成功.从总体上来讲,国内森林水文研究多为小尺度(径流小区、径流场)对个别水文过程(如蒸发散、降水入渗、地表径流)的研究^[1-4].尽管“配流域”实验研究方法被公认为是森林水文学研究最有效的手段^[5-6],但是中国国内

严格按照国际上通用的“配流域”方法,以小流域为单元系统地研究植树造林、退耕还林和水土保持措施对流域水文影响的报导并不多见.国内流域研究的传统办法是选择 2 个除了植被以外其他条件都“相似”的流域,通过对比观测到的水文资料来确定、解释植被对 2 个流域水文影响的差异^[7-9].但是所选择的 2 个流域的水文地质、地貌、土壤条件很难确定是否“相似”,尤其大流域的这种相似性更难确定.

收稿日期:2006-03-17

<http://journal.bjfu.edu.cn>

基金项目:中美碳联盟 USCCC 国际合作项目、北京市自然科学基金项目(6032017).

第一作者:孙阁,博士,副教授.主要研究方向:森林水文、全球变化研究.电话:010-62338097 Email: Ge-Sun@ncsu.edu 地址:27606 美国农业部林务局南方全球变化研究中心.

流域特征的不同、降水量分布的差异很有可能掩盖植被本身对水文的影响^[6]。这种办法常常会使研究者得出自相矛盾或者错误的结论。国内另一种比较常用的研究方法是采用“单一流域”法,通过对某一个流域不同时段长系列水文气象资料进行统计分析,从而检验植被变化对水文的影响。但是,这种方法常受到植被历史不清、植被变化不明显或对比时段气候变化太大等条件的限制^[10]。

作为一种新型的水文研究和流域管理工具,流域水文模拟模型越来越为森林水文工作者所接受和使用^[11]。适合中国流域环境条件的流域水文模型不断涌现^[12-14]。流域水文模拟模型的应用在一定程度上弥补了“配对流域”实验缺乏的不足。

本文根据作者在中国和北美模型研究的实践撰写而成,主要内容包括3个方面:①简要介绍国内外森林水文模拟模型的基本概念和研究进展;②利用实例探讨水文模拟模型的主要作用;③探讨模拟模型在中国森林水文学研究上的应用前景和存在的问题。

1 森林流域水文模拟模型的基本概念及其在研究中的作用

1.1 水文模拟模型的基本概念

同任何其他科学领域的数学模型一样,森林流域水文模拟模型是使用数学符号对自然界流域尺度的水文过程的简化和抽象。简单地讲,水文模型就是根据生态系统质量、动量、能量守恒原理,或根据

经验观测,采用数学公式表达整个水分循环过程,包括从大气降水至流出流域的时空动态过程。单一水文过程的数学模型较为简单,如经典的描述植被蒸发散的模型——Penman-Monteith 方程,描述降水入渗、土壤水分再分布的 Richard 方程,以及描述地下水运动的 Darcy 定律,都属于早期开发的、在很大程度上有物理意义的水文模型。一个完整的流域水文模型就是把这些单一过程模型整合起来,综合表达大气降水在植被、土壤、岩石层中的传输动态过程及各种状态水分在流域中的时空分布。森林水文模型模拟中最主要的水文变量包括:林冠降水截留、林木蒸腾、土壤含水量、地下水位深度以及某一河流断面径流流量。这些变量比较容易观测,因此也常被用于模型校正和模型验证。模型校正是指通过调整不随时间而变化的模型参数而使模型模拟的变量结果与观测数据匹配达到最佳。而模型验证是指采用另外一组新的独立观测数据对已经较正好,参数已优化的模型进行检验来确定模型的精度和可靠性。模型敏感性检验就是检查输入变量和模型参数对模型输出结果的相对影响力。敏感的模型输入变量或参数在模拟资料准备工作中最为重要。

从20世纪60年代中期以来,随着电子计算机在水文科学领域的普及,世界各地开发了数目与种类繁多的流域模型^[15-16]。了解流域模型的分类方法有助于对各种不同类型模型比较,从而正确地选择和使用模型(表1)。

表1 流域水文模型的类型及特点

TABLE 1 Classification of hydrological models and their characteristics

分类方法	模型类型	特 点
主要研究领域	森林水文模型	森林占土地利用的主体,考虑到森林林冠截留、林地土壤大空隙、管流等林地特殊水文过程, Hortonian 地表径流非主要产流机理,模型多基于 Hewlett“变水源概念”
	农业水文模型	农地占土地利用的主体, Hortonian 地表径流多为主要产流机理
	城市水文模型	透水性差的城市用地占土地利用的主体, Hortonian 地表径流为暴雨洪水产流机理,包括城市排水系统汇流过程
	水质(泥沙、养分)模型	比单纯水量模型更复杂;主要目的是模拟径流污染物浓度、排放总量;这类模型同样需要正确地模拟水文过程
	生态系统模型	主要目的是模拟生态系统生产力, C、N 循环及蒸发散;流域产水量多定义为径流流出根系层的水分总量,不考虑地下水和沟道汇合过程
模拟空间、时间尺度	空间	集总式
		分布式
	时间	日或更短时段
		月
模拟手段		年
	基于自然规律和水文过程机理的理论模型	假定流域空间性质均一;所需模型参数较少,但必须校正
	经验性,基于历史资料	考虑流域空间异质性,将流域网格化处理
模型参数	确定性	用于模拟洪峰或日水量平衡;需要日或更短时段气象输入数据
	随机、非确定性	主要用于区域或全球长时间水量平衡计算
		用于长时间区域或全球水资源计算
		构建较复杂、有物理意义、有利于揭示影响大气-土壤-水文要素之间的因果关系
		较简单、需要流域参数少、预测结果较好,但是不能反映变化条件下的水文规律
		模型输入、输出结果确定;这类模型可以基于物理过程,也可基于经验,如回归模型
		模型输入、输出结果有随机性,包含概率论分布

1.2 水文模拟模型的作用

作为一种现代、新型的水文研究手段,与传统的基于野外水文观测的方法相比,流域模拟模型具有互补功能,并拥有其特殊的作用,主要表现在以下几方面:

1.2.1 流域模拟模型是野外数据综合分析、尺度转换的有效手段

流域模拟模型是采用系统的观点把非线性的水文方程用数学公式串联起来的一个综合系统,所以任何单一水文要素的观测结果都可用于模型检验,而模型也可模拟各个水文分量.野外水文观测多以单一水文过程或要素进行.只有把流域作为一个系统,通过综合分析各个水文变量,才能确定某一要素在整个水文系统中的作用.但是,在实际的流域实验研究中,即使世界上最完善的森林水文实验站也很少能够对所有水文过程或要素进行观测.借助模型可在观测变量的基础上对非观测或数据零星的变量进行补充.在模拟-数据检验的过程中,很容易发现哪些数据是无效的(由于人为或仪器失灵),哪些变量是极为敏感和关键的或者哪些变量漏测了,从而对野外水文观测提供指导作用.

模拟模型也许是水文尺度转换的唯一手段.目前,森林水文观测多在点、山坡、小流域尺度上进行,大流域和区域尺度的经验观测研究较少.可以说,我们对森林与水的关系在大尺度上的相互作用知之甚少.但是,许多宏观管理措施是建立在大尺度上的.大流域和区域尺度模型是建立在简化的小尺度水文过程原理基础上的,考虑水文循环与大气的水、能量交换和相互作用.这类模型需要大量的遥感和地理信息系统资料作为输入.

1.2.2 流域模拟模型可用于检验科学假设,深入了解水文机理

具有物理意义的模型可以揭示因果关系,因此,在建模过程中就可以充分发挥人们的想象力,通过模型验证来确定科学假设的正确性.如著名的“变水源概念”^[17]的最初提出就是由于野外水文观测结果(暴雨径流)与传统的水文计算模型不符. Hewlett 等^[18-19]随后建立了一个山坡实体土壤模型,回答了山坡尺度的暴雨径流来源.随着计算机技术的发展, Bernier 等^[20]又开发了小流域尺度的暴雨径流模型,来验证“变水源概念”在山麓森林地区的适用性. Beven 等^[21]采用类似理论开发了第1代基于变水源理论的计算机模型.真正具有物理意义的模拟模型可用于各种地理类型,如平坦的湿地和陡峭的山地,

也不受降水强度特征的限制.这样将1个模型应用到自然环境条件不同的多个流域,对于深入了解这些流域水文机理的差异有很大帮助.

1.2.3 流域模拟模型预测干扰条件下的水文响应,为流域管理服务

传统的水文模型主要用于预报极端水文事件(洪水、干旱).模型的这种作用对无观测条件的地区更为重要.模型的另一作用是预测未来在人为或自然干扰条件下的水文响应.比如预测人工造林、水土保持措施对水量和水质的影响,对目前的大规模流域生态重建有着重要的指导意义.据 Sun 等^[22]研究,退耕还林、植被完全恢复在中国北方的局部地区会降低陆地产水量达50%.这项模拟预报研究与 Jackson^[23]和 Scott^[24]对世界范围内的造林对流域产水影响的结论相吻合.

流域干扰来自许多方面,包括生物(如病虫害、植被演替、土地利用)和非生物(如气候变化、大气化学成分(臭氧、CO₂)、火灾)等因素.在流域出口某一站点观测到的河川径流量和水质反映了流域内诸多因素(如气候、植被)的综合影响.要想辨别单一因素的独特作用需要具备长系列的水文观测资料或采用费用昂贵的“对比流域”研究.水文模型可以模拟许多假想的情形,通过固定某个或几个输入变量来分辨,确定某一种因素对流域水文的影响.比如通过模型可以确定植被恢复中植被本身和土壤改良分别对河川径流的影响^[25].

1.2.4 水文模型是培训水文研究工作者的有效手段

一个完整的流域水文模型会跟踪大气降水从降落到地表,直至流出沟口或返回大气的全部水文过程.准确描述流域多种因素对水分运动途径和通量的影响,量化水分库之间的关系,需要水文研究者清楚地了解影响水分在陆地生态系统各个成份中运动的主要机理,并综合已有的研究文献,研发一系列数学方程以反映水文变量与影响因子之间的关系.同时,大量时间将用于资料输入,从而迫使研究者必须熟悉模型输入(如气候、植被、土壤)是如何得到的.模型参数化的过程使研究者能够更加深入地了解参数的物理意义.另外,通过分析计算机模型输入-输出的响应关系,为系统定量理解水文动态过程提供了一个直观、有效的教学工具.

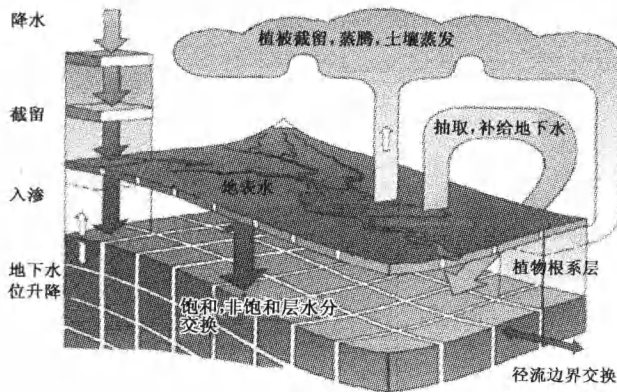
2 森林流域水文模拟模型的开发和应用过程

开发模型首先要明确模型要解决的主要问题、

主要目标是什么,是为了实用预测还是过程机理研究?预测模型不能有太多的输入变量或要求的模型参数,否则就失去了预测模型的意义.而为研究水文过程和机理的流域模型要尽可能采用物理意义明确的数学方程来表达水文过程.同时,分布式水文模型比集总式模型对模拟过程机理显得更有优势.另外,水文模型应包含所有的关键水文过程,如地下水运动、地表水-地下水交换、植物蒸腾、不同层次土壤含水量的变化;其次,要明确模型所要模拟的空间和时间尺度,大流域、区域模型需要大量大尺度的空间和长时间数据,因此,受输入资料分辨率的限制,不太可能模拟小尺度的水文过程,常需要简化小尺度水文过程^[27].而小尺度模型多用于研究单一因素对点、山坡或有一级沟道的小流域水文规律的影响.

目前,这类水文学模型的发展日趋成熟,逐渐与生物地球化学模型耦合,如 REHSSys 生态水文模型^[27].本文以国际上流行的 MIKE SHE 模型为例,介绍分布式模型的构成及其在中、小流域尺度上的应用.

MIKE SHE 是 20 世纪 80 年代中期出现的第 1 代流域尺度的分布式水文模型^[28-30](图 1).近年来,丹麦水利研究所(DHI)^[31]将其商业化,已被广泛应用于水文学研究^[25-26,32]和水资源管理^[33].该模型的主要优点为:①大部分子模型具有物理意义;②综合模拟整个流域的水文过程,包括地下水与地表水的相互作用;③以网格为单元模拟水文变量在空间和时间上的分布;④完全与 GIS 数据库耦合,并有用户友好输入-输出界面.



a MIKE SHE 模型三维示意图



b MIKE SHE 模型侧面示意图

图 1 MIKE SHE 模型结构示意图

FIGURE 1 Structure of MIKE SHE model

2.1 蒸发散

实际蒸发散计算以潜在蒸发散为基础,考虑叶面积指数以及土壤含水量的动态变化对植物蒸腾、植物降水截留、土壤蒸发的影响^[34].潜在蒸发散作为最大可能流域蒸发损失,可采用 FAO-Penman-Monteith 或其他方法预先估算作为模型输入.叶面积指数需预先由遥感估算或实地测量,土壤含水量由模型模拟.

2.2 降水入渗、非饱和流在土壤中的运动

从理论上讲,水分在土壤中的运动是由土壤总水势决定的. MIKE SHE 根据模型使用者的需要和水文系统特点,提供 3 种选择计算非饱和流在土壤中的垂直运动.如果非饱和土层深厚,土壤含水量对蒸发散影响较大,可选择 Richard 方程.这种方法充分描述了水分在土壤中运动的非线性过程,需要

计算的时间最长;为降低非饱和流运动计算的时间,假定水力梯度为 1.0,即只考虑水分的重力作用.对于湿地系统,非饱和层常较薄,因此,没有必要采用计算复杂的 Richard 方程.为此,MIKE SHE 提供了简单的两层土壤水量平衡法(水箱法).

2.3 饱和流和地下水运动

森林流域地表径流通常占总径流的比例很小,流域径流主要来源于浅层地下水. MIKE SHE 采用类似于著名地下水模型 MODFLOW 的办法来模拟饱和流在地下水中的三维运动.蒸发散、非饱和流过程都会影响地下水的补给,从而影响地下水位在空间和时间上的变化. MIKE SHE 模拟地下水的功能对于以湿地为主的流域最为重要.

2.4 地表水和地下水的交换及相互作用

MIKE SHE 模拟地表-地下水相互作用,除了表

现在蒸发散、非饱和流对地下水位的影响外,还体现在陆面(山坡)地下水位与沟道地表水的相互影响上. MIKE 11 作为一个独立的沟道汇流模型(圣维南 Saint-Venant 方程),与 MIKE SHE 耦合后,可以有选择性地对河流断面的水文过程线进行演算.

美国东南区包括海岸平原、山麓地带和山区. 为了检验 MIKE SHE 在不同类型流域(地形、气候、植被)应用的可靠性, Lu^[25] 和 Sun^[26] 对该区包括 Coweeta 水文实验站在内的 4 个典型森林小流域进行了模拟对比研究. 结果表明, MIKE SHE 能够反映 2 种不同类型的水文过程: 在海岸平原湿地区, 浅层地下水位控制河流源头流域产流过程, 河流总径流以地表径流为主; 而在山地区, 由于山坡坡度大, 浅层地下水位很难达到地表, 河流源头流域产流过程以地下径流为主.

同时, 采用 MIKE SHE 模型模拟了砍伐森林、气候变化对两种地理类型流域水文的影响. 结果表明, 由于砍伐森林降低了生态系统的能量收入(净辐射减少), 叶面积指数降低, 导致生态系统总蒸发散量降低, 从而导致湿地地下水位比有林地高, 流域总径流量增加了 100 ~ 400 mm, 约为径流的 40% ~ 60%. 流域水文对气候变化有直接的响应. 温度升高 2℃ 或降水量降低 10%, 可降低 10% ~ 30% 的河川径流. 模拟表明, 由于美国东南区气候湿润, 土壤含水量通常较高, 潜在蒸发散与实际蒸发散差距不大. 再加上树木有较深的根系, 其生长即使在干旱年份也不会受到水分胁迫, 这样森林对地下水位、河流流量的相对影响在旱季或干旱年份更为明显. 这种情形与干旱、半干旱地区有所不同. 干旱、半干旱地区潜在蒸发散与实际蒸发散差距较大. 森林植被在较湿润的年份对水文的影响可能会更明显.

3 模拟模型在中国森林流域水文研究中的探讨

探讨森林与水资源的关系在当前流域生态恢复实践中有重要的指导意义. 经典的“配对流域”实验方法是研究造林、再造林及水土保持措施对河流水文影响的最佳手段^[35]. 然而, 以森林为主体的植被恢复达到明显影响水文过程的程度需要几年或几十年的时间. 因此, 采用“配对流域”的方法会受到人力、物力的限制, 这可能是此类研究在国内较难开展的主要原因.

水文模拟模型为探讨植被变化对水文的影响提供了另外一种研究工具. 正确使用好这一现代水文

学计算手段能达到经济、快速、高效的目的. 以新安江模型为代表, 中国本土开发的水文模型在水资源管理方面起到了很大作用. 目前, 在北美较为流行的有一定物理基础, 模型参数属分布式, 对土地利用敏感的水文学模型如 DHVSM^[36-37]、MIKE SHE^[31] 或 SWAT2000^[33], 在中国都有很好的应用前景. 从我国林业生态工程建设的实践来看, 立地水平的造林技术和流域尺度的优化合理配置技术是两大关键问题, 流域尺度的优观测数据化配置则必然要依赖于以土地利用为单元的水文物理模型^[2].

在模型应用中要注意以下几个方面:

1) 模型必须在充分检验后才能用于生产实践以预测未来水文响应. 盲目地使用模型百害而无一利. 实际上, 许多模型都有其最佳的使用范围, 受气候(湿润或干燥)、地形(坡地或平地)、植被(森林或农地)的限制. 中国土地利用复杂(如各种类型的梯田), 水土流失造成的景观破碎、人为活动(抽取地下水、修坝、河流改道)对水文过程的干扰很大. 因此, 建立在自然生态系统之上的外来模型需要本地化, 才能反映真实的水文过程.

2) 开发新的模拟模型或验证现有的模型都需建立在充分观测数据资料的基础之上. 与发达国家相比, 中国的水文观测站点较少, 且人员素质和设备较差, 从而造成了历史水文资料奇缺. 仅有的有限水文气象资料也尚未电子化, 还没有公开为研究人员所用. 所有这些都成为流域水文和区域水文模型开发研究的障碍.

3) 森林水文学模型和生态水文模型与其他类型的水文模型(如工程水文模型、流域水文水资源模型)的区别在于, 森林水文学模型需要反映植被在水分循环中的作用. 植被的水文作用表现在改变蒸发散和降水入渗速率上. 但是, 量化这种作用需要从叶面至流域尺度进行. 蒸发散模型需要与生物地球化学(C、N 循环)模型耦合后才能正确反映植物生长在空气污染(CO₂、O₃ 浓度增加)和全球气候变化环境条件下的用水过程.

4 结 论

森林水文学研究在全球变化(土地利用变化、空气污染、气候变化)的大环境下, 研究领域不断拓宽. 受气候和地形的控制和强烈的人为干扰, 中国森林生态系统种类繁多, 流域水文循环呈现出明显的生物地理梯度和复杂性. 无论从应用角度还是从认知(理论水文学)角度看, 以 MIKE SHE 模型为代表的

基于物理过程的流域水文模型,作为一种新型的研究手段,在水文学研究和当前中国探讨森林植被恢复与水资源的关系中有广泛的应用前景。

从理论水文学的角度看,水文模拟模型有助于研究水文学中的尺度问题(如分布式模型栅格大小变化即可分析尺度效应);可以为研究流域径流形成机制提供理论上的阐释;可以用来深入研究流域或区域(生态系统)生物地球化学循环中水文动力学机理。

水文模拟模型为流域水资源管理提供了科学的决策工具。但是,模型开发必须建立在大量的经验性研究基础之上,模型在应用到流域管理实践中之前必须经过观测数据严格检验,避免盲目使用模拟模型来预测未来水文响应。当前,共享历史水文气象资料将有利于推动中国流域水文和区域水文模型的开发研究,从而较为客观、准确地评价森林植被的水文学作用。

参 考 文 献

- [1] YU X. Forest hydrologic research in China[J]. *Journal of Hydrology*, 1991, 122: 23-31.
- [2] 张志强,王礼先,王盛萍. 中国森林水文学研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(2): 68-73.
ZHANG Z Q, WANG L X, WANG S P. Forest hydrology research in China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(2): 68-73.
- [3] FFOLLIOTT P, GUERTIN D P. Proceedings of a workshop on forest hydrologic resources in China: an analytical assessment, Harbin, China, August 18-23, 1987[C]. New York: United States Man and Biosphere Program, 1987: 143.
- [4] WEI X, LIU S, ZHOU G Y, et al. Hydrological processes of key Chinese forests[J]. *Hydrological Process*, 2005, 19(1): 63-75.
- [5] BROWN A E, ZHANG L, MCNAHON T A, et al. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 10: 28-61.
- [6] 魏晓华,李文华,周国逸,等. 森林与径流关系:一致性和复杂性[J]. 自然资源学报, 2005, 20(5): 761-770.
WEI X H, LI W H, ZHOU G Y, et al. Forest and streamflow: Consistence and complexity[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(5): 761-770.
- [7] 刘昌明,钟骏襄. 黄土高原森林对年径流影响的初步分析[J]. 地理学报, 1978, 33(2): 112-126.
LIU C M, ZHONG J X. The influence of forest cover upon annual runoff in the Loess Plateau of China[J]. *Acta Geographical Sinica*, 1978, 33(2): 112-126.
- [8] 李昌哲,郭卫东. 森林植被的水文效应[J]. 生态学杂志, 1986, 5(5): 17-21.
LI C Z, GUO W D. The hydrological effects of forest[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1986, 5(5): 17-21.
- [9] 孙阁,张增哲. 杉木植被小流域产流特征研究[J]. 北京林业大学学报, 1989, 11(2): 55-63.
SUN G, ZHANG Z Z. A study of the runoff characteristics of *Cunninghamia lanceolata* forest watershed [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1989, 11(2): 55-63.
- [10] 王盛萍,张志强,孙阁,等. 黄土高原流域土地利用变化水文动态响应[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(1): 48-54.
WANG S P, ZHANG Z Q, SUN G, et al. Effect of land use change on hydrological dynamics at watershed scale in the Loess Plateau—a case study in the Lu'ergou Watershed, Gansu Province[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(1): 48-54.
- [11] 吴险峰,刘昌明. 流域水文模型研究的若干进展[J]. 地理科学进展, 2002, 21(4): 341-348.
WU X F, LIU C M. Progress in watershed hydrological models[J]. *Progress in Geography*, 2002, 21(4): 341-348.
- [12] 邓慧平,李秀彬,陈军锋,等. 流域土地覆被变化水文效应的模拟——以长江上游源头区梭磨河为例[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 53-62.
DENG H P, LI X B, CHEN J F, et al. Simulation of hydrological response to land cover changes in the Suomo Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 53-62.
- [13] 余新晓,陈根伟,赵玉涛,等. 森林流域分布式水文模型研究[J]. 中国水土保持科学, 2003, 11(1): 35-40.
YU X X, CHEN G W, ZHAO Y T, et al. Study on distributed hydrological model in forest watershed[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2003, 11(1): 35-40.
- [14] 杨大文,李翀,倪广恒. 分布式水文模型在黄河流域的应用[J]. 地理学报, 2004, 59(1): 143-154.
YANG D W, LI C, NI G H. Application of a distributed hydrological model to the Yellow River Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(1): 143-154.
- [15] SINGH V P, FREVERT D K. *Mathematical models of small watershed hydrology and applications* [M]. Littleton, Colorado: Water Resources Publications, 2002a.
- [16] SINGH V P, FREVERT D K. *Mathematical models of large watershed hydrology* [M]. Littleton, Colorado: Water Resources Publications, 2002b.
- [17] TROENDLE C A. *A variable source area model for stormflow prediction on first order forested watersheds* [D]. Atlanta, USA: University of Georgia, 1979: 115.
- [18] HEWLETT J D. *Soil moisture as a source of base flow from steep mountain watersheds* [G]. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, 1961: 132.
- [19] HEWLETT J D, HIBBERT A R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas [M] // Sopper W E, Lull H W. *Forest hydrology*. New York: Pergamon Press, 1967: 275-290.
- [20] BERNIER P Y, HEWLETT J D. *Test of a revised source area simulator (VSAS2)* [G]. Federation, N. B: Can Hydrol Symp Assoc

- Committee on Hydrol Natl Res Counc Can, 1982.
- [21] BEVEN K, KIRKBY M J. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology[J]. *Hydro Sci Bull*, 1979, 24:43-69.
- [22] SUN G, ZHOU G, ZHANG Z, *et al.* Potential water yield reduction due to reforestation across China[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328: 548-558.
- [23] JACKSON R B, JOBBAGY E G, AVISSAR R, *et al.* Trading water for carbon with biological carbon sequestration[J]. *Science*, 2005, 310: 1 944-1 947.
- [24] SCOTT D F, BRUIJNZEEL L A, MACKENSEN J. The hydrologic and soil impacts of reforestation[M]//BONELL M, BRUIJNEZZL L A. *Forests, water and people in the humid tropics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004:622-651.
- [25] LU J. *Modeling hydrologic responses to forest management and climate change at contrasting watersheds in the Southeastern United States* [D]. Raleigh: North Carolina State University, 2006: 147.
- [26] SUN G, LU J, MCNULTY S G, *et al.* Using the hydrologic model MIKE SHE to assess disturbance impacts on watershed processes and responses across the southeastern US[C]// *Proceedings of the Second Interagency Conference on watershed research*. Otto, NC: USDAFS, 2006.
- [27] BAND L E, TAGUE C L, GROFFMAN P, *et al.* Forest ecosystem processes at the watershed scale: Hydrological and ecological controls of nitrogen export [J]. *Hydrologic Processes*, 2001, 15: 2 013-2 028.
- [28] ABBOTT M B, BATHURST J C, CUNGE J A, *et al.* An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique Européen “SHE” 1: History and philosophy of a physically based distributed modeling system [J]. *Journal of Hydrology*, 1986, 87:45-59.
- [29] ABBOTT M B, BATHURST J C, CUNGE J A, *et al.* An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique Européen “SHE” 2: Structure of a physically based distributed modeling system[J]. *Journal of Hydrology*, 1986, 87: 61-77.
- [30] GRAHAM D N, BUTTS M B. CHAPTER 10: Flexible integrated watershed modeling with MIKE SHE[M]//SINGH V P, FREVERT D K. *Watershed models*. New York: CRC Press, 2005.
- [31] Danish Hydraulic Institute (DHI). *MIKE SHE: An integrated hydrological modeling system*[G]. Copenhagen: DHI, 2004.
- [32] TAGUE C L, MCMICHICHAEL C, HOPE A, *et al.* Application of the RHESys model to a California semiarid shrubland watershed[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40:575-589.
- [33] ARNOLD J G, FOHRER N. SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling[J]. *Hydrologic Processes*, 2005, 19(3):563-572.
- [34] KRISTENSEN K J, JENSEN S E. A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration [J]. *Nordic Hydrology*, 1975, 6:170-188.
- [35] ANDREASSIAN V. Waters and forests: From historical controversy to scientific debate[J]. *Journal of Hydrology*, 2004: 291: 1-27.
- [36] WIGMOSTA M, VAI L, LETTENMAIER D. Distributed hydrology: Vegetation model for complex terrain[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(6): 1 665-1 679.
- [37] BECKERS J, ALILA Y. A model of rapid preferential hillslope runoff contributions to peak flow generation in a temperate rain forest watershed[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40: 1-19.
- [38] WEI X, ZHOU X, WANG C. The influence of mountain temperate forest on the hydrology in northern China [J]. *The Forestry Chronicle*, 2003, 79: 297-300.

(责任编辑 冯秀兰 李 契)