

# 分布式水文模型的误差分析

夏积德<sup>1</sup>, 吴发启<sup>1</sup>, 姚志宏<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 分布式水文模型以其具有明确物理意义的参数结构和对空间分异性的全面反映, 能够准确详尽地描述和模拟流域内真实的降水径流过程而被广泛需求和关注。在模拟土地利用、土地覆盖、水土流失等各种变化过程的水文响应, 面源污染、陆面过程、气候变化影响评价等诸多领域都有广泛的应用。模型的预报精度和误差至关重要, 决定了模型的应用和推广。在分析分布式水文模型建立和验证过程的基础上, 提出了模型的 4 类误差来源: 被排除在外的因素引起的误差, 实测历史记录资料的随机或系统误差, 参数误差和模型结构误差, 讨论了各类误差的分析与计算方法, 为模型的发展和成长提供了依据。

**关键词:** 分布式; 水文模型; 误差分析; 参数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)04-0105-06

中图分类号: TV124, P334+92

## Error Analysis of Distributed Hydrological Model

XIA Ji-de<sup>1</sup>, WU Fa-qi<sup>1</sup>, YAO Zhi-hong<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment Science, Northwest A & F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation,

Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** With the clear physical meaning of parameter structure and the full reflection of spatial heterogeneity, a distributed hydrological model can describe and simulate the real process of runoff induced by rainfall in a basin, accurately and sufficiently. The model is widely needed and concerned recently. Non-point source pollution, land surface process, and climate change impact assessment have a wide range of applications in the simulation of land use, land cover, soil erosion, and other changes in hydrological responses. Accuracy and error are critical to model forecast, which determine the application and extension of the model. On the basis of the analysis of model construction and verification process, the four kinds of model error sources are identified as follows: error caused by the factors being excluded, random or systematic error in a measured historical record, parametric error, and error caused by model structure. The analysis of each error and its calculation method are discussed and a basis for the model development and growth is provided.

**Keywords:** distributed model; hydrological model; error analysis; parameter

水文模型是水文科学中最重要的分支之一, 是研究水文自然规律和解决水文实践问题的重要工具。在水利工程规划设计、洪水预报、水资源评价、水土保持、水环境预测、水生生态系统、气候变化等方面的研究和发展中得到广泛的应用。近年来, 随着社会的进步、科技的发展, 传统的水文经验模型、概念模型已经不能满足需要, 对先进的分布式模型的需求在不断增长。分布式水文模型 (distributed hydrological model) 以其具有明确物理意义的参数结构和对空间分异性的全面反映, 可以更加准确详尽地描述和反映流域

内真实的水文过程, 帮助人们更加深入地了解水文循环在不同时间和空间尺度上的演变规律和过程, 获得流域内所有相关信息和情况, 从而成为水文研究的热点和前沿问题<sup>[1]</sup>。

早在 1969 年 Freeze 和 Harlan<sup>[2]</sup> 提出了分布式水文模型概念和框架, 1986 年由英国水文研究所、法国 SOGREAH 咨询公司和丹麦水力学研究所联合研制出了一个比较完整的分布式数学物理流域水文模型 SHE (système hydrologique européen) 模型<sup>[3]</sup>。在此之后又出现了诸如 IHDM<sup>[4]</sup>, THALES<sup>[5]</sup>, MIKE

SHE<sup>[6]</sup>, TOPMODEL<sup>[7-8]</sup>, SHETRAN<sup>[9]</sup>, DHS-VM<sup>[10]</sup>等许多分布式模型。

尽管分布式水文模型的研究已经有 30 多年的历史,但是模型的应用和推广还不够成熟<sup>[11-21]</sup>。其主要原因<sup>[13]</sup>如下:(1) 缺少完整的流域观测资料<sup>[14]</sup>; (2) 模型科学性和技术水平有待提高; (3) 水文专家和工程师的知识局限性和传统观念限制了分布式水文模型的发展和推广<sup>[15]</sup>; (4) 参数过多难以率定<sup>[16]</sup>。诸多原因致使模型预报精度偏低、误差偏大,限制了模型的应用和推广。为降低模型预报误差,提高模型预报精度,对模型进行误差分析是必要和可行的。本文在分析和研究分布式水文模型建立、校准和验证过程的基础上,对分布式水文模型进行了误差分析,提出了 4 类误差来源,为模型优化、应用和推广提供了依据。

### 1 分布式水文模型

#### 1.1 分布式水文模型的概念

所有的水文模型都是真实世界的概化,是自然系统的抽象<sup>[17]</sup>。从水文信息学的角度来讲,水文模型是符号的综合体。从反映水流运动的空间变化能力而言,水文模型可分为集总式模型和分布式模型两类。分布式水文模型是充分考虑了模型中变量和参数空间变异性的基于自然物理过程的水文模型。其全面考虑了降雨和下垫面空间的不均匀性,能够充分反映流域内降雨和下垫面要素空间变化形成的影响。模型全面地利用了降雨的空间分布信息,模型参数的空间分布能够反映下垫面自然条件的空间变化。目前分布式流域水文模型主要有两类:一为紧密耦合型分布式流域水文模型,又称分布式数学物理流域水文模型;二为松散耦合型分布式流域水文模型,又称分布式概念性流域水文模型<sup>[18]</sup>。

#### 1.2 建模原则

水文模型的建立和使用必须按照一定的步骤和顺序进行,即是建模原则。建模原则在原则上是灵活的,适用的,即使形式化后,也应该是易改变的<sup>[19]</sup>。分布式水文建模一般原则如图 1 所示。

#### 1.3 建模思路

分布式流域水文模型建模主要思路是:将整个流域划分成足够多的若干网格,每个网格降雨、植被、土壤和高程(DEM 提取)等均有差异,对每个网格采用不同的产流计算参数分别计算产流量;通过比较相邻网格的高程(DEM 提取)确定各网格的流向,根据各网格的坡度、糙率和土壤等因素确定参数,将其径流演算到流域出口断面得到流域出口断面的径流量。模型的参数一部分由物理意义直接标定,另一部分由

地形、地貌数据结合实测历史洪水资料率定得到。模型不考虑流域内蓄水单元网格内部的水量交换,水量和能量流动是直接通过连续控制方程计算得到的。

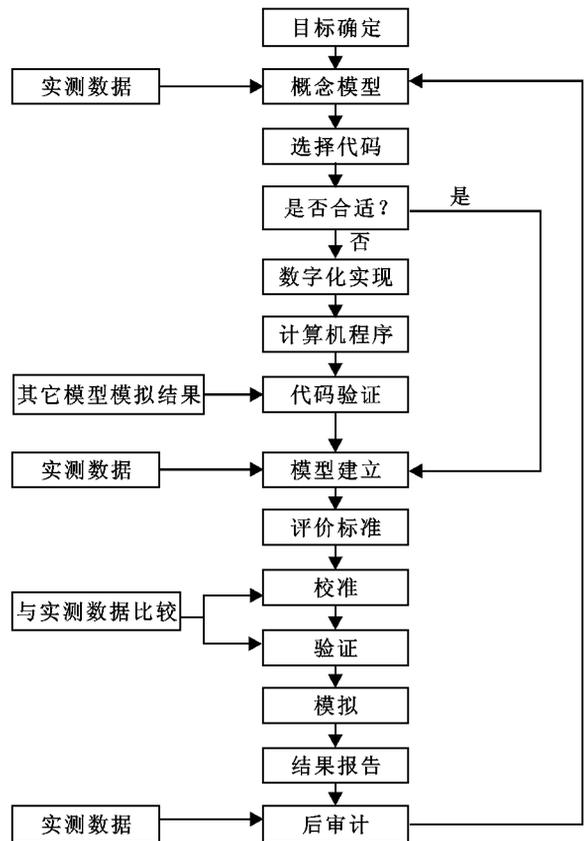


图 1 水文模型的建模原则

#### 1.4 分布式水文模型的一般结构

分布式水文模型的结构较复杂,但过程严密,有比较清晰的物理解释,能客观地反映水文循环的各个子过程。分布式水文模型一般可分为纯物理模型和半物理模型两种形式<sup>[20]</sup>。从功能上来说,分布式水文模型包括功能不同且相对独立的子系统,每一个子系统从数学上描述水文循环的一个子过程。尽管可用不同的方式描述水文过程,但模型的基本构架大同小异。模型所涉及的水文物理过程主要包括降水、截留、蒸散发、融雪、下渗、渗漏、地表径流、壤中流和地下径流。模型的主结构可归结分如下。

- (1) 输入模块为水文模型提供空间分布式输入数据和确定模型参数的信息。
- (2) 单元水文模型,计算坡面产汇流可以基于网格单元建立水文物理模型。
- (3) 河网汇流模型采用圣维南方程组或马斯京根水文学方法。

#### 1.5 模型验证

分布式模型参数多,数据输入量庞大,计算时间

长,模型验证困难。严格地说模型验证原则上是不可行的。我们所说的模型验证即证明特定的模型可得出符合特定性能标准精度要求的模拟结果<sup>[21]</sup>,实际上是观测模型成功验证的数量和概率,进而确定模型的可靠性。为了证明校准后模型的实用性,必须用不同于校准的数据来进行验证。根据 Klemes 于 1986 年提出的水文模型系统验证的等级方案, M. B. Abbott<sup>[22]</sup>将典型模型的验证归纳为 4 类:分样本验证,差别分样本验证,替代流域验证和替代流域。比较模拟结果和流域出口断面流量的传统验证方法是不适用于分布式水文模型的。分布式水文模型需要多标准、多尺度验证。对于每个输出变量都应该进行有效性检验,对于空间分布预测,需要多点的校准和验证,流域各个子系统的行为预测需要多变量的检验。

## 2 分布式水文模型误差分析

模型预测精度是评价和衡量一个模型质量好坏的关键性指标,也是一个模型能否被同行业人员认可和接受的决定性因素。模型误差分析是研究和分析模型建立和预报过程中误差来源、产生、传播规律,评价各类误差对模型预报精度的影响的一种方法。分布式水文模型涉及参数和影响因素较多,对分布式水文模型进行误差分析不但可以优化模型参数,而且可以更加清楚建模目的、原理和建模思路,优化模型结构,提高模型预测精度。分布式水文模型误差分析是建模和应用不可或缺的一部分,是模型发展成长进而成熟起来必经之路。

任何模型均伴有误差和不确定性。模型模拟结果与历史观测资料的差异称为模型预报误差。模型

建模工作中,误差源是大量的。分布式水文模型的误差来源主要有以下几个方面。

### 2.1 被排除在外的因素引起的误差

在建模时,需要考虑降水—产流—汇流整个水文过程的每个环节,每个环节都有许多影响因子,把每个因子都引入到模型中是不现实的,也是不可能做到的。所以就要对影响因子有所选择,有所抛弃,被抛弃的因子会给模型预报带来一定的影响,产生一定量的预测误差。此类误差是不可能完全消除和避免的,减小和降低此类误差必须保证在参数选择方面做到最佳。此类误差主要的分析方法有主成分分析法和专家打分法。

**2.1.1 主成分分析法** 主成分分析法是指通过对一组变量的几个线性组合来解释这组变量的方差和协方差结构,以达到数据的压缩和数据的解释的目的。在模型输出的分析研究中,我们常常会遇到影响模型输出的很多变量,这些变量有一定的相关性,我们从中综合出一些主要的指标,这些指标所包含的信息量很多。使我们在研究复杂的问题时,容易抓住主要矛盾。若有一些指标  $X_1, X_2, \dots, X_p$ , 取综合指标即它们的线性组合  $F$ , 当然有很多,我们希望线性组合  $F$  包含很多的信息,即  $\text{var}(F)$  最大,这样得到  $F$  记为  $F_1$ , 然后再找  $F_2$ ,  $F_1$  与  $F_2$  无关,以此类推,我们找到一组综合变量  $F_1, F_2, \dots, F_m$ , 这组变量基本包含了原来变量的所有信息。区域土壤侵蚀模型中参数和影响因素较多,可以用主成分分析的方法进行压缩和精简影响因子。

**2.1.2 专家打分法** 专家打分法是通过建立专家打分模型的方法以确定模型中各因子的敏感性评价价值和权重,进而确定选取的敏感性因子。表 1 表示的是一土壤侵蚀模型在参数选择时建立的专家打分模型。

表 1 专家打分法确定参数敏感性

编号	模型因子	评价标准	分级	敏感性评价价值	权重
1	降雨	雨强,雨量,历时	200,400,600	7,5,3,1	0.30
2	植被	覆盖度,郁闭度	10,40,70	7,5,3,1	0.15
3	地形	坡度,起伏度	5,15,25	7,5,3,1	0.20
4	土壤质地	土质属性	3.0,7.0,10.0	7,5,3,1	0.25
5	沟谷密度	数值大小	2.0,5.5,8.0	7,5,3,1	0.10

通过各位专家单独确定的各模型因子的敏感性评价价值和权重,进行汇总和分析,即可确定各个模型因子的敏感性强弱,为模型参数的选择提供依据和参考。

### 2.2 实测历史记录资料的随机或系统误差

流域或区域尺度径流量的观测和调查需借助 GIS 技术、RS 技术和 DEM<sup>[23]</sup>。实测数据精度的高低、误差的大小决定于测量技术的先进和成熟程度,影响模型模拟的拟合度<sup>[24]</sup>,从而影响模型的预测精度。大部分

流域降雨径流资料由于测量技术受到限制,其精度可能无法反映真实水文现象。另外人类活动的影响会导致某些水文因素的变化,使历史资料无法直接与现状资料统一应用,而无论是修正历史资料还是还原现状资料都有一定的难度。对实测数据进行分析,确定所产生的误差大小,进而计算出调整系数,是减小此类误差的主要方法。分析时,要考虑实测数据的代表性、一致性和连贯性<sup>[25]</sup>。由于建立、验证和应用分布式水文

模型需要大量的资料,这些资料不但包括传统的水文气象资料,还包括地质、植被、农业、土壤和人为活动因素等。这些资料在一般流域或机构很难得到满足。所以能反映系统区域尺度分布式响应的数据收集技术比其它尺度的测量方法更加重要。在依靠先进测量技术不断提高水文数据质量的同时,加强气候变化和人类活动对土壤侵蚀过程影响的理论研究,利用获取的信息对原资料进行修正和还原,是解决分布式水文模型资料误差的关键。

### 2.3 参数误差

参数误差包括每个参数的取值非最优产生的模型预报误差和各个参数组合在一起非最优产生的模型预报误差。通常模型参数的选择需要遵循 3 个原则,即科学性、实用性和可行性。科学性指的是所选择的参数要客观地揭示区域水土流失发生的规律性<sup>[26]</sup>,能够反映或代表区域水土流失发生的某一具体方面的意义。实用性指的是所选择的参数要获取技术上具有可行性和经济性,而且要适合所研究的尺度<sup>[27-28]</sup>。

2.3.1 参数误差研究目的 模型的参数作为模型结构的支撑点,影响着模型的模拟结果<sup>[29]</sup>。但不同的参数对于模拟结果的影响是不同的,有的参数直接影响模拟结果,有的则是许多参数共同作用,来反映对结果的影响。与集总式水文模型相比,分布式水文模型的参数确定具有以下特点。模型参数具有明确的物理意义,易于估计参数比变化范围,但是参数最优值难以确定;模型涉及参数较多,确定参数需要大量多方面的观测数据和资料;模型参数受尺度问题的影响;参数优化需要新方法、新技术,难度较大。所以确定的模型参数蕴含误差是不可避免的,对参数进行误差分析,确定最优参数取值,尤为重要。

#### 2.3.2 参数误差研究方法

(1) 扰动分析法。扰动分析法是一种最简单的参数灵敏度分析方法。即是在参数最佳估计值附近给定一个人工干扰(如增减 10%),并计算所导致模型输出的变化率。扰动分析方法的计算思路十分简单,按因素逐项替换,逐一分析各个因素变化时所引起的模型输出结果的变化,进而确定各个因素(参数)的敏感性强弱和次序,为更加准确的确定参数取值提供参考和依据。由于优化算法决定了最佳参数估计值,并得到具有特定收敛特征的参数样本。所以基于“最佳”估计参数值的扰动分析不能完整地描述模型参数的空间分布形态。

(2) 遗传算法(genetic algorithm,简称 GA)。遗传算法<sup>[30]</sup>是分布式水文模型中面向全局优化的参数率定方法。主要特点是直接随机寻优,不存在函数

连续性和可导性限制;具有内在的隐并行性和更好的全局寻优能力<sup>[31]</sup>。采用概率化的寻优方法,能自动获取和指导优化的搜索空间。目前 GA 求解多目标问题中常用的是: 权重法,即将多目标通过加权生成待优化的单一目标; 目标规划法,即确定每个目标函数所要达到的值,把这些要求作为额外的约束条件,目标函数转化为求目标函数值与相应要求值之间的最小差距; 目标达成法<sup>[32]</sup>,即给出各个目标函数值低于或高于预期值时的权重向量,最优解表示预期的目标是否可以得到。

(3) 单纯形法。该方法是分析模型输出结果的一种方法,其原理是将模型输出结果和实测资料做差构造线性规划问题,线性规划问题的最优解存在于可行域的顶点中,因此可以从可行域的某一顶点开始进行搜索,并且在搜索过程中保证目标函数值得到逐步增大,当目标函数值达到最大时,就得到了问题的最优解<sup>[33]</sup>。也就找到了最优的参数组合和各参数最优取值,将得到的参数取值和单因素法确定的参数最优值相比较,如差别在允许和合理的范围内,则认为分析正确。否则还须进行分析,寻求原因。

(4) 蒙特卡罗模拟(Monte Carlo simulation)。蒙特卡罗模拟<sup>[34]</sup>是追踪和评估模型误差和不确定性对模型输出影响的普通方法。蒙特卡罗模拟方法,又称随机抽样法或统计试验法,它利用随机发生器取得随机数,赋值给输入变量,通过计算机计算得出服从各种概率分布的随机变量,再通过随机变量的统计试验进行随机模拟,达到求解复杂问题近似解的一种数字仿真方法。此法的精度和有效性取决于仿真计算模型的精度和各输入量概率分布估计的有效性,此法可用来解决难以用解析方法求解的复杂问题,具有极大的优越性。如一个模型中有一变量 A,并知道一些关于其可能值的范围和每一个值的概率,多次运行模型,显现模型输出的分布,该分布可表达该模型对 A 的敏感性的信息<sup>[35]</sup>。蒙特卡罗模拟是通过大量简单重复抽样来实现,受条件限制影响较小,故该方法简单灵活,易于实现和改进,不受状态函数是否非线性、随机变量是否非正态分布等条件限制,只要模拟次数足够多就可得到比较精确的统计特征值。但对于一些复杂问题,要想达到较高的模拟精度需要进行较多的模拟次数,消耗大量的计算资源,否则就会产生较大的误差。

(5) GLUE(generalized likelihood uncertainty estimation)方法。进行流域土壤侵蚀模型参数优选时,可以搜索到几组或者很多组不同的参数值,而使得模型的目标函数达到一样或几乎一样的水平,这种现象称为异参同效(equifinality)现象<sup>[36-37]</sup>,又叫参

数等效性。异参同效现象的存在使得在选择最优参数值上产生很大的不确定性,同时也给模型输出带来很大的不确定性。这种等效性可能来自模拟过程的错误和不确定。比如水文模型所代表的水文过程、流域特征、边界条件等错误。针对模型的异参同效现象,Beven 和 Binley(1992)提出了普适似然不确定性估计方法(GLUE)<sup>[38]</sup>用于分析分布式水文模拟的不确定性。GLUE方法认为,导致模型模拟结果好坏的不是模型的单个参数,而是模型的参数值组合。在预先设定的参数分布取值空间内,随机采样获取模型的参数值组合,运行模型。选定似然目标函数,计算模拟结果与观测值之间的似然函数值,再计算这些函数值的权重,得到各个参数组的似然值。在所有的似然值中,设定一个临界值,低于该临界值的参数组似然值被赋值为零;对高于临界值的所有参数组似然值重新归一化,即将这些似然值处理为0~1之间的分布,按照似然值归一化处理后的大小,求出在某置信度下模型预报的不确定性范围。

#### 2.4 模型结构误差

模型结构由描述水文过程的方程、公式、数据输入输出及结果显示等模块对应的代码构成。一个模型一旦完成,其模型结构不会因应用的流域不同而改变。分布式流域水文模型中将一个流域划分成足够多的不嵌套的单元面积,以考虑流域降雨输入和下垫面条件客观上存在的空间分布不均匀性。认为任一单元面积内的降雨输入和下垫面条件都呈空间均匀分布,每个单元面积的产汇流过程按空间分布的条件来分析和计算,进而再确定整个流域的产汇流过程。不完善的模型结构带来的误差在模型校准和验证阶段难以发现,所以在模型构建阶段需要对模型结构的正确性进行充分的讨论。模型结构不完善的原因主要是由于对水文过程理解不够而造成的模型框架结构不能真实地反映水文实际过程,模型用大量简化的数学物理方程近似地模拟水文过程各环节之间复杂的确定性联系,忽略了产汇流的随机性,模型较少甚至不考虑环境变化(如全球变化,人类活动影响)对流域产汇流机制的影响等。另外,在模型设计和建立过程中采用的不正确的计算方法,不合适的时间步长,不恰当的运行次序,不完整或有偏差的模型结构等,都会引起的模型预报误差。模型结构的合适与否,直接影响模型的预测精度和质量。模型结构误差可以通过模型验证阶段的工作进行发现和修正<sup>[39]</sup>。

### 3 结语

(1) 分布式水文模型的误差来源有被排除在外

的因素引起的误差、实测历史记录资料的随机或系统误差、参数误差和模型结构误差等。前两类误差必须在模型建立过程中和试运行之前进行分析将其降到最低。后两类误差不是一次性就可以降到最低的,需要在模型的建立、试运行、校准、验证、推广应用等各个阶段不断地进行分析和研究。

(2) 在对模型校准过程中,必须明确区分不同误差来源,不要用对一种误差源的调整去弥补另一种误差源的影响,如通过参数调整来弥补模型结构误差等。

(3) 随着RS技术、GIS技术和DEM进一步发展和成熟,分布式水文模型的未来发展在于直接基于大尺度测量的子网格参数化,而不是小尺度集总理论的改进及目前所用模型参数值的改进,目标是应用更简单,预报更可靠,参数更容易率定,功能更强大的分布式水文模型。

(4) 模型误差是在建模过程中产生的,是不可避免和完全消除的。在参照和借用国外较为成熟的分布式水文模型研究方法和应用的基础上,建立和使用适合我国各流域条件的分布式水文模型,通过误差分析确定各类误差的产生途径和规律,利用现有资料及处理方法减小和降低各类误差,进而提高模型的预测精度和适用性,是我国水文建模研究今后发展的方向。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Anderson J C, Refsgaard J C, Jensen K H. Distributed hydrological modeling of the Senegal River Basin: model construction and validation [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 247: 200—214.
- [2] Freeze R A, Harlan R L. Blueprint for a physically-based digitally-simulated hydrological response model [J]. *Journal of Hydrology*, 1969, 9: 237—258.
- [3] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al. An introduction to the European Hydrologic System: System Hydrologique European, SHE [J]. *J. of Hydrol.*, 1986, 87: 45—77.
- [4] Beven K J. Changing ideas in hydrology: the case of physically based models [J]. *Journal of Hydrology*, 1989, 105: 157—172.
- [5] Grayson R B, Bloschl G, Barling R D, Moore I D. Process, scale and constraints to hydrological modeling in GIS [M] // *Hydro GIS93, Application of GIS in Hydrology and Water Resources (Proceedings of the Vienna Conference, April 1993)*. IAHS, 1993, 211: 83—92.
- [6] Refsgaard J C, Seth S M, Bathurst J C, et al. Application of the SHE to catchment in India—Part 1: General results [J]. *J. of Hydrol.*, 1992, 140: 1—23.
- [7] Beven K J, Kirkby M J, Schofield N, Tagg A F. Tes-

- ting a physically based flood-forecasting model (TOPMODEL) for three U K catchments[J]. *Journal of Hydrology*, 1984, 69: 119—143.
- [8] Beven K J, Kirkby M J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology [ J ] . *Hydrological Science Bulletin*, 1979, 24(1) :43—69.
- [9] Ewen J, Parkin G, et al. SHETRAN: distributed river basin flow and transport modeling system[J]. *ASCEI Journal of Hydrological Engineering*, 2000 (5) : 250—258.
- [10] Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain[J]. *Water Resource Research*, 1994, 30(6) :1665—1679.
- [11] 黄平, 赵吉国. 流域分布式水文数学模型的研究及应用前景展望[J]. 1997, 17(5) :5—10.
- [12] 芮孝芳, 朱庆平. 分布式流域水文模型研究中的几个问题[J]. *水利水电科技进展*, 2002, 22(3) :56—58.
- [13] 任立良, 刘新仁. 基于 DEM 的水文物理过程模拟[J]. *地理研究*, 2000, 19(4) :369—376.
- [14] 郭生练, 熊立华, 杨井, 等. 分布式流域水文物理模型的应用和检验[J]. *武汉大学学报:工学版*, 2001, 34(1) : 1—5.
- [15] 王书功, 康尔泗, 李新. 分布式水文模型的进展及展望[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(1) :61—65.
- [16] Mthiemann, Mtrosset, H Gupta, et al. Bayesian recursive parameter estimation for hydrologic models[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(10) : 2521—2535.
- [17] Sanghyun Kim, Jacques W Delleur. Sensitivity analysis of extended TOPMODEL for agricultural watersheds equipped with tile drains [ J ]. *Hydrological Process*, 1997, 11(9) : 1243—1261.
- [18] James Westervelt. 流域管理的模拟建模[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2004 :12—93.
- [19] ABBOTT M B. 分布式水文模型[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2003 :10—82.
- [20] 刘昌明, 夏军, 郭生练, 等. 黄河流域分布式水文模型初步研究与进展[J]. *水科学进展*, 2004(4) :495—500.
- [21] Klemes V. Dilettantism in hydrology, transition or destiny? [ J ]. *Water Resources Research*, 1986, 22 (9) : 177—188.
- [22] Abbot M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al. An introduction to the European Hydrological System—System Hydrologique European, “ SHE ”, 2: Structure of a physically-based, distributed, modeling system [ J ]. *Journal of Hydrology*, 1986, 87 :61—77.
- [23] Freeze R A, Harlan R L. Blueprint for a physically-based digitally-simulated hydrological response model [ J ]. *Journal of Hydrology*, 1969, 9 :237—258.
- [24] Newsha K Ajami, Hoshin Gupta, Thorsten Wagener, Soroosh Sorooshian. Calibration of a semi-distributed hydrologic model for stream flow, estimation along a river system [ J ]. *Journal of Hydrology*, 2004, 298 : 112—135.
- [25] Angela Sieber, Stefan Uhlenbrook. Sensitivity analyses of a distributed catchment to verify the model structure [ J ]. *Journal of Hydrology*, 2005, 22 :216—235.
- [26] 张爱国, 张平仓, 杨勤科. 区域水土流失土壤因子研究[M]. 北京:地质出版社, 2003.
- [27] 芮孝芳, 黄国如. 分布式水文模型的现状与未来[J]. *水利水电科技进展*, 2004, 24(2) :55—58.
- [28] 杨志峰, 徐俏, 何孟常, 等. 城市生态敏感性分析[J]. *中国环境科学*, 2002, 22(4) :360—365.
- [29] 尹海伟, 徐建刚, 陈昌勇, 等. 基于 GIS 的吴江东部地区生态敏感性分析[J]. *地理科学*, 2006, 26(1) :64—67.
- [30] Kelmets V. Conceptualization and scale in hydrology [ J ]. *Journal of Hydrology*, 1983, 65 :1—23.
- [31] 王中根, 夏军, 刘昌明, 等. 分布式水文模型的参数率定及敏感性分析[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(4) :649—655.
- [32] 刘毅, 陈吉宁, 杜鹏飞. 环境模型参数识别与不确定性分析[J]. *环境科学*, 2002, 23(6) :6—10.
- [33] 刘昌明, 郑红星, 王中根, 等. 流域水循环分布式模拟[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2006 :10—136.
- [34] 徐钟济. 蒙特卡罗方法[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1985.
- [35] De Roo, A P J, R J. E O ffermans, et al. LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins II: Sensitivity analysis, validation and application [ J ]. *Hydrological Processes*, 1996, 10 : 1107—1117.
- [36] Beven K J. How far can we go in distributed hydrological modeling[J]. *Hydrol. Earth System Science*, 2001, 5:1—12.
- [37] Beven K J. Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modeling system[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16 : 189—206.
- [38] Beven K J, Binley A. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction [ J ]. *Hydrological Processes*, 1992, 6(3) :279—298.
- [39] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京:水利水电出版社, 1984 :12—122.