

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.05.011

分布式架构水文模型

王船海¹, 闫红飞², 马腾飞¹

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;2.上海勘测设计研究院规划分院,上海 200434)

摘要:为了更好地模拟流域水文循环过程,解决科学研究以及工程实际问题,提出分布式架构水文模型.该模型结构具有分布式特征,水文特征单元概念的引入是模型的精华所在,使得该模型在计算时可以根据流域特征和实际需要采用最合适的模块组合,综合运用已有模型的优秀成果,同时又很好地支持了对某些水文特征单元精确化、理论化的研究.分布式架构水文模型相较于其他水文模型具有更多的优点,是对未来分布式水文模型发展的一种探索.

关键词:分布式架构;水文模型;水文特征单元;水文计算单元

中图分类号: P338 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2009)05-0550-06

流域水文模型是模拟流域水文过程和认识流域水文规律的途径和重要手段,是流域产汇流计算、洪水分析与预报以及水资源优化配置与调度等水文分析计算的重要方法,一直是水文学和水资源领域的重要基础研究课题^[1].分布式流域水文模型最基本的特征是根据流域各处气象信息(如降水)和下垫面特性(如地形、土壤、植被、土地利用)要素信息的不同,将流域划分为若干小单元,在每一个单元上用一组参数反映其流域特征,具有从机理上考虑降雨和下垫面条件空间分布不均匀对流域降雨径流形成影响的功能.因此分布式流域水文模型有望尽可能真实地模拟流域产汇流过程的空间变化,已成为流域水文模型一个新的发展方向^[2].近年来,随着计算机、遥感和地理信息系统等信息技术的发展,人们比较容易获取流域的空间变化信息(如地形、土壤和植被类型等)^[3],分布式物理模型取得了很大的进展,国内外出现了许多不同类型的分布式物理模型,如 SHE^[4-5]、MIKE SHE^[6]、IHDM^[7]、DHSVM^[8]等.同时分布式概念模型对流域水循环过程进行不同程度的概化描述,具有结构简单、参数少、易率定、模拟预报结果一般能满足要求等优点,也得到了不同程度的发展,如基于新安江模型的分布式水文模型^[9]和 SWAT 模型^[10]等.

一直以来,水文学家们希望通过水文模型了解流域水循环过程的时空分布特征,但是目前水文模型还存在着很多问题.一方面,传统的集总式模型和分布式概念模型对流域水循环过程(尤其是产流过程)进行不同程度的概化描述,对流域非均匀性问题考虑得不完善,因此存在着空间分布成果表现不足等问题;另一方面,分布式物理模型尽管取得了很大的进展,国内外出现了许多不同类型的模型,但该类模型多数结构复杂,需要率定参数多,对缺乏资料地区难以运用,而且模拟结果并没有达到理想的效果.分布式物理模型、分布式概念模型以及集总式模型目前存在问题的解决方法有赖于水文行业和相关领域对水文过程认知水平的提高,显然不能一蹴而就,且不可能有一个统一模式的模型来解决目前流域水循环问题.因此如何在现有的认知水平和科学条件下,更好地结合各类模型,发挥各类模型的优点,是流域水文模型研究的重要方面.

在借鉴分布式流域水文模型的建模原理、模型结构以及模拟方法等成果的基础上,并结合多年的科研实践经验,本文提出了分布式架构水文模型.该模型模拟的对象是考虑人类活动影响的流域水循环系统,模型结构具有分布式的特点,考虑降雨和下垫面条件空间分布不均匀对流域降雨径流形成的影响,水文特征单元概念的引入使得模型在计算时可以根据流域特征和实际需要采用最合适的模块组合,水文计算单元对水文特征单元进一步离散,反映流域地形、地貌、下垫面和气象因素的空间变异性.该模型的提出,希望可以对分布式水文模型的发展提供有价值的探索.

收稿日期:2009-04-08

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)(2008AA12Z202)

作者简介:王船海(1963—)男,江苏海安人,教授,博士,主要从事计算水力学、水文水资源、地理信息系统及数字流域等研究.

1 模拟对象

分布式架构水文模型属于流域水文模型的范畴,模拟的对象为水文循环过程。在水循环的不同阶段,水的表现形式不同,迁移与转化规律不同,即使在同一地区,阶段不同,其迁移与转化规律也不相同,此外在陆面上的不同地区,其产汇流规律也是不相同的。因此,分布式架构水文模型采用分解的手段来描述复杂的水文循环过程。

对于整个水文循环,根据水分运行过程中媒介的不同,分为大气水分迁移和陆地水流运动 2 个过程,这 2 个过程在垂向和横向上可以进一步详细划分,形成垂向和横向水循环过程,分别如图 1 和图 2 所示。

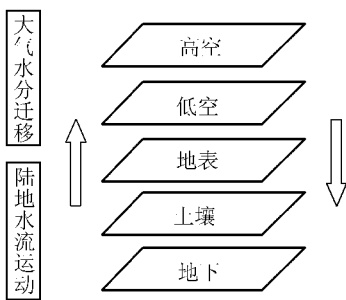


图 1 垂向水循环示意图

Fig. 1 Vertical hydrological cycle

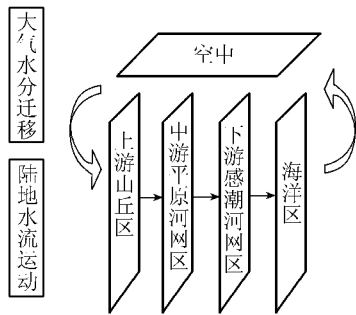


图 2 横向水循环示意图

Fig. 2 Horizontal hydrological cycle

垂向水循环过程在垂向上对水文循环过程进一步细分,其中大气水分迁移可以继续分为高空和低空 2 层的水分迁移过程,陆地水流运动可继续分为地表、土壤和地下 3 层的水流运动。横向水循环过程在横向上对水文循环过程进一步细分,其中水分在空中的迁移与转化过程相对来说运行规律单一,所处的介质也是一致的,因此将大气水分迁移作为一个整体,而陆地水分迁移在陆面的转化过程中,主要受陆面的地形、地貌及下垫面植被等影响,因此根据河系形态、水流状态、地貌特征等,可以将其分解为 4 个部分:上游山丘区、中游平原河网区、下游感潮河网区和海洋区。需要指出的是横向水循环过程分解为上游山丘区、中游平原河网区、下游感潮河网区及海洋区是一种概念化的划分,在一个流域内并非截然区分开,也不完全按照这样的次序出现,有时候是相互交替存在的,这个要根据具体的流域特征来划分。

分布式架构水文模型模拟的对象是考虑人类活动影响的流域水循环系统,除了模拟天然的水循环过程外,还必须模拟人类活动的影响,包括人工建筑物运行调度、引排水信息等,因此模型结构中必须将这些因素完整考虑在内,而且有效地组织起来。

2 模型结构

分布式架构水文模型借鉴现有优秀的分布式模型的模块化结构来模拟整个流域水循环过程,对于垂向水循环过程采用分层模拟,目前主要关注陆面水流运动过程,不模拟水分在大气中的迁移和转化,直接使用气象模型或者实际测量得到降雨和降雪资料作为模型的输入资料。未来如果要将大气水分迁移和陆地水流运动联合起来模拟,建立陆-气耦合的模型,可以在该模型基础上进一步扩充。对于横向水循环过程采用分块模拟,划分为上游山丘区、中游平原河网区和下游感潮河网区,目前暂时不模拟海洋区的水流运动。模型的结构如图 3 所示。在上游山丘区、中游平原河网区和下游感潮河网区 3 个不同的区域,根据流域产汇流机理不同可以划分为很多不同的“水文特征单元”。水文特征单元概念的提出是该模型结构的精华所在,模型在水文特征单元内可以采用不同的模拟方法,既可以采用概念性的公式,也可以采用严格物理意义的方程描述。水文特征单元之间耦合起来完整地描述了整个流域的陆面水文循环过程。在水文特征单元内部可以根据需要进一步划分为水文计算单元来考虑下垫面以及降雨的空间不均匀性。模型中所有过程的描述都采用与水文过程的时间尺度最相宜的时间步长,并且当某个过程的时间步长与邻近过程不一致时,均可进行调整。

分布式架构水文模型结构考虑了蒸散发、植物截留、融雪径流、坡面流和河网流、土壤非饱和流、饱和地下水、地表和地下水交换等水文过程,用模块化的结构比较完整地描述了整个水文循环过程。在陆面上利用“马赛克”土地的分类方式,考虑不同下垫面水流的产流、汇流过程,并且还考虑了闸坝等人工建筑物的影响。在流域

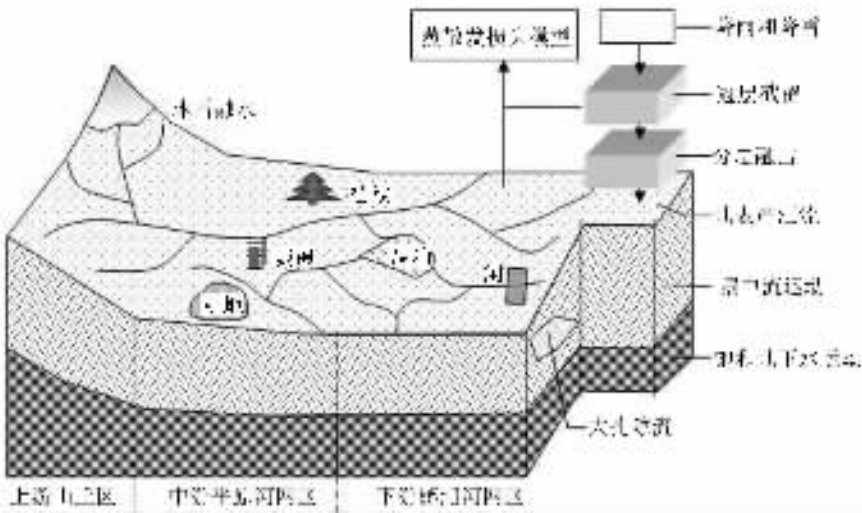


图 3 分布式架构水文模型结构示意图

Fig. 3 Structure of distributed hydrological model

面上通过模拟水流运动和水量平衡描述人类活动对整个水文循环的影响,模拟了较完整的流域水循环系统。

3 水文特征单元

分布式架构水文模型“水文特征单元”概念的引入是该模型结构的精华所在,使得该模型结构区别于其他模型结构,且大大优于其他模型结构。流域水文过程根据水流在下垫面运行的不同阶段,可以分解为 2 个过程:产流过程与汇流过程。而新的概念——水文特征单元可以表述为:流域产汇流机理相同的水文地理区域。水文特征单元可以再分为产流型水文特征单元、汇流型水文特征单元以及混合型水文特征单元。如在产流过程中,下垫面植被类型不同,影响蒸散发的规律是不同的,可以将一种种类的下垫面植被区域称之为为一类水文特征单元。又如河道中水流运动规律与行洪区中水流演进规律是不同的,因此可以分为两类水文特征单元:河道特征单元与行洪区特征单元。

在流域水循环的垂直方向与水平方向上,在流域水循环过程的不同阶段、不同区域上,流域的产汇流规律是不尽相同的,因此本文提出了水文特征单元的概念,它与传统划分水文单元的概念是不同的。水文特征单元是为了反映流域产汇流机理的不同而将流域在空间三维立体上进行划分的单元。不同的水文特征单元产汇流机理不同,可在单元内采用不同的模块组合和不同的模拟方法;而水文单元是为了反映流域地形、地貌、下垫面和气象因素的空间变异性而将流域进行离散的单元。水文特征单元里可以继续划分水文单元(称之为水文计算单元),来反映参数的空间变化。在进行水文单元划分时要考虑模型离散尺度的影响,选取合适的离散尺度。

a. 产流规律空间分布。影响产流的主要因素是气象因素和下垫面情况。气象条件一方面控制降水量的多少,即直接影响模型的输入;另一方面通过蒸散发影响模型的产流量。不同下垫面蒸散发量不相同,因此蒸散发量除了和气象条件有关外,还与下垫面状况有关。由此可见,产流过程主要作用在垂向方面(图 1),因此在进行产流水文特征单元的划分时应重点考虑下垫面影响因素。

b. 汇流规律分布。汇流规律在地表、壤中与地下以及它们之间是不相同的。地表中的河道、湖泊、水库及行蓄洪区等水流运动规律也各不相同。在坡面地表产汇流方面,上游山丘区下垫面由于人类活动较少,下垫面在年内的变化较小,且子流域可以由一个出口断面控制,相对比较简单;而在中下游平原河网区,由于人类活动影响频繁,下垫面在年内变化较大,且平原区的子流域没有一个严格的子流域出口断面控制,可能有多个流域出口断面,因此平原区产汇流问题的复杂性决定了不能采用与上游山丘区相同的水流循环规律来描述。壤中流问题也具有多种复杂性,如喀斯特区多大孔隙流问题等。产汇流规律的不同决定了在这些区域内部不能使用相同的方法来描述。

根据引进的水文特征单元的概念,结合图 3 所示的分布式架构水文模型结构,将整个流域分解为如表 1 所示的几大类水文特征单元,并且这些类型的水文特征单元可以随着研究的逐步深入进一步增加。

表 1 流域主要水文特征单元组成

Table 1 Description of main hydrological feature units

名称	类型	产汇流机理 考虑因素	模型离散尺度		所属垂向 循环层	所属横向 循环分区
			时间尺度	空间尺度		
冠层截留区	产流型	树木、灌木等类型	小时为佳,最多到天	按照实际的种类分布即可,不再划分计算单元	冠层截留	上游山丘区、中游平原河网区、下游感潮河网区
融雪区	产流型	常年积雪区、多年平均气温	1 d	按照实际的种类分布即可,不再划分计算单元	分层融雪	上游山丘区
山丘区坡面	产流型 汇流型 产汇流型	自然子流域或自然集水区域、下垫面分布、土地利用类型	1 ~ 24 h	以时间尺度对应的流程长作为空间尺度,并结合下垫面分布进行水文计算单元剖分	地表产汇流、壤中流运动、饱和地下水运动	上游山丘区、中游平原河网区
山丘区河道	汇流型	在河道中以水流流态作为主要考虑因素	1 h	以时间尺度对应的在河道中流程长作为空间尺度,按照此尺度进行河道断面划分	地表产汇流	上游山丘区、中游平原河网区
平原区坡面	产流型 汇流型 产汇流型	自然子流域或自然集水区域、下垫面分布、土地利用类型	1 ~ 24 h	以时间尺度对应的流程长作为空间尺度,也可以按照下垫面空间分布划分水文计算单元	地表产汇流、壤中流运动、饱和地下水运动	中游平原河网区、下游感潮河网区
平原区河道	汇流型	在河道中水流动态作为主要考虑因素	5 ~ 30 min	时间尺度对应的在河道中流程长作为空间尺度,按照此尺度进行河道断面划分,一般取 500 m ~ 5 km	地表产汇流	中游平原河网区、下游感潮河网区
湖泊、水库、行蓄洪区、圩区	汇流型	天然特征	5 ~ 30 min	根据模型计算情况划分,如采用二维算法,其尺度在 50 m ~ 1 km 间,若采用的是零维,则不需要划分网格	地表产汇流	上游山丘区、中游平原河网区、下游感潮河网区
闸坝工程	汇流型	工程类型	与相连的水文特征单元的时间尺度相同	与工程的尺度相当	地表产汇流	上游山丘区、中游平原河网区、下游感潮河网区
不饱和土壤水运动区	产流型	地表面以下饱和地下水以上的区域	1 h	根据地下土壤特征进行网格剖分	壤中流运动	上游山丘区、中游平原河网区、下游感潮河网区
喀斯特区	汇流型	喀斯特地区大孔隙流及地下暗河区域	1 h	以时间尺度对应的在大孔隙区域的流程长作为空间尺度,并据此进行水文计算单元的剖分	壤中流运动	上游山丘区
饱和地下水运动区	汇流型	按地下水埋深进行分类,分为深层地下水单元、浅层地下水单元	1 ~ 30 d	根据地下岩层的分布进行网格剖分	饱和地下水运动	上游山丘区、中游平原河网区、下游感潮河网区

通过引进水文特征单元的概念,将整个流域水循环的各个阶段、各个区域从三维结构上进行了分解,将整个流域概化为各种类型水文特征单元组成的耦合体,并在此基础上针对每一类水文特征单元采用最合适的模型算法进行求解,在对每一类水文特征单元的求解过程中,可以根据具体要求选择合适的模型离散时空尺度,将水文特征单元进一步剖分为水文计算单元进行模型计算。

本文提出的水文特征单元分类并不是唯一的分类,随着研究的深入及对流域水循环机理的进一步认识,水文特征单元可进一步细分,且随着研究区域的扩大,还可增加水文特征单元类型,如大气水分的迁移与转化单元及海洋水循环区域单元等类型。

4 水文计算单元

分布式架构水文模型在水文特征单元进行模型计算时涉及水文计算单元的概念。水文计算单元概念等同水文单元的概念,但它是对水文特征单元的离散而不是对流域的离散。水文特征单元的离散方法即水文计算单元的表现形式主要有 3 种:网格、山坡和子流域,这与水文单元相同。还有很多其他离散方法,如水文响应单元 HRU(hydrological response unit)等^[11]。如在山丘区采用新安江模型,整个山丘区就是一个水文特征单元,对山丘区进行子流域划分,那么各个子流域就是水文计算单元;在平原区,可以有河道一维特征单元、河道二维特征单元、湖泊零维特征单元、湖泊二维特征单元、堰闸特征单元、坡面特征单元等。在水文特征单元

内部可以进一步细分区域,这些区域就是水文计算单元,例如,对于河道一维特征单元来说,断面就是水文计算单元;对于河道二维特征单元来说,网格就是水文计算单元。

5 模型的构建

当流域的水文特征单元以及相应的求解模型选定后,就可以根据模型的结构构建具体流域的分布式架构水文模型。分布式架构水文模型的构建实质上就是水文特征单元耦合。水文特征单元耦合时主要考虑各特征单元交界面上的水量交换问题。某些特征单元交界面上的水量交换,在某一时间段是单向的或者变化的时间尺度较大,可以采用显式连接方式进行耦合,如垂向分层之间以降雨、蒸散发及下渗作为特征单元界面的交换方式时,可以采用显式连接的耦合方式,即产流型单元间、产流与汇流单元间可以采用显式连接的耦合方式。但对于汇流单元间的耦合,在同一垂向层中,由于特征单元间的界面水量交换频繁,且交换水量的时间尺度小(尤其是地表的特征单元间的耦合,如中下游区域的平原区河道单元、湖泊行蓄洪区单元、闸坝单元间的耦合),必须采用隐式耦合的方式。对于不同垂向分层汇流特征单元间的耦合,由于地下水运行的时间尺度较大,且其交换一般在同一时间是单向的,在现有的认知尺度下,可采用显式连接的耦合方式。分布式架构水文模型特征单元间的信息交换如图4所示。图4所示的各水文特征单元选择的模型以及求解算法可参考文献[12-13]。

由于水文特征单元的求解模型可以根据需要采用最合适的模型,可以是局部分布式的,也可以是集总式的,可以是概念性模型,也可以是物理基础的动力学模型,甚至可以是黑箱子的统计相关模型。本文所介绍的分布式架构水文模型,实际上是一个混合型的模型,能够吸收已有模型成果,同时又很好地支持了对某些水文特征单元精确化、理论化的模型研究。分布式架构水文模型实际上引进了水文模型库的概念,水文特征单元间的有效耦合实际上是不同模型库间的耦合。分布式架构水文模型参数率定、软件系统构建以及数据流设计等详细介绍可参考文献[13]。

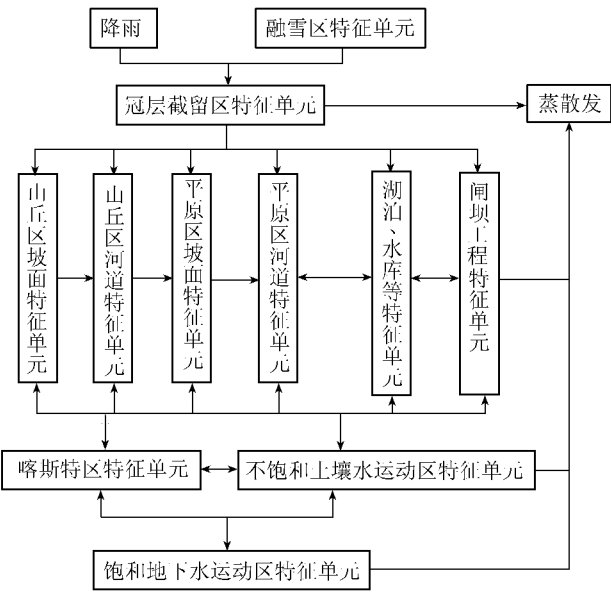


图4 分布式架构水文模型各特征单元信息交换示意图
Fig. 4 Information exchange among hydrological feature units of distributed hydrological model

6 结 语

分布式架构水文模型提出了水文特征单元的概念,可以有效地运用现有流域水文模型的优秀成果,有效地解决实际工程问题,是对分布式水文模型未来发展的一种探索。该模型与其他模型相比较具有以下优点:(a)能够吸收多种模型结构(集总式、分布式)、多种类型(黑箱、概念、物理基础、地形因素)的模型;(b)可以根据实际需要采用多种类型求解方法,多种离散尺度;(c)模型参数多数具有物理意义,能够根据下垫面信息率定;(d)模型模拟的对象是考虑人类活动影响的流域水循环系统,对于人类活动影响频繁的区域,模型的适用性更强;(e)具有强大的可扩展能力,不仅能够吸收其他优秀模型研究成果,而且研究区域在时间和空间尺度上都能进一步扩展。但该模型模拟时涉及一些概念性的模型、经验关系,甚至是黑箱模型,尽管目前可以取得很好的模拟结果,但是这只是对流域未知规律的概化处理,未来应进一步加强水文规律的探索。目前该模型主要模拟的尺度为中尺度即流域尺度,未来需要将模拟尺度向上、向下发展,建立多尺度水文模型,并且要与气候模型结合开发大气水文双向耦合模型系统,更加真实模拟流域水循环过程,满足实践和科研的需要。

参考文献:

[1] 赵人俊. 流域水文模拟: 新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
[2] 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. (RUI Xiao-fang, ZHU

Qing-ping. Some problems in research of distributed watershed hydrological model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources 2002 ,22(3) :56-58.(in Chinese))

[3] 张金存 ,芮孝芳. 分布式水文模型构建理论与方法述评[J]. 水科学进展 ,2007 ,18(2) :286-292.(ZHANG Jin-cun ,RUI Xiao-fang. Discussion of theory and methods for building a distributed hydrologic model[J]. Advances in Water Science ,2007 ,18(2) :286-292.(in Chinese))

[4] 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(a) :45-59.

[5] 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(b) :61-77.

[6] REGSGAARD J C ,STORM B ,MIKE S. The HBV model[M]//SINGH V P. Computer Models of Watershed Hydrology . Littleton :Water Resources Publication ,1995 .

[7] CALVER A ,WOOD W L. The instituted of hydrology distributed model[M]//SINGH V P. Computer Models of Watershed Hydrology . Littleton :Water Resources Publications ,1995 .

[8] WIGMOSTA M S ,VAIL L W ,LETTENMIER D P. A distributed hydrology vegetation model for complex terrain[J]. Water Resources Research ,1994 ,30(6) :1165-1679.

[9] LU M ,KOIKE T ,HAYAKAWA N. Distributed Xinanjiang model using radar measured rainfall data[R].[s. n.] :Water Resources & Environmental Research :Towards the 21st Century(Proc Int Conf) ,1996 :453-460.

[10] NEITSCH S L ,AMOLD J G ,KINIRY J R ,et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation ,Version 2000[EB/OL].[2008 -20-30]. [http ://www. brc. tamus. edu/ swat/ soft-model. html](http://www.brc.tamus.edu/swat/soft-model.html).

[11] 王中根 ,刘昌明 ,吴险峰. 基于 DEM 的分布式水文模型研究综述[J]. 自然资源报 ,2003 ,18(2) :168-173.(WANG Zhong-gen ,LIU Chang-ming ,WU Xian-feng. A review of the studies on distributed hydrological model based on DEM[J]. Journal of Natural Resources 2003 ,18(2) :168-173.(in Chinese))

[12] 程文辉 ,王船海 ,朱琰. 太湖流域模型[M]. 南京 :河海大学出版社 ,2006.

[13] 王船海. 数字流域二元结构体系与原型实现[D]. 南京 :河海大学 ,2007 :59-99.

Distributed hydrological model

WANG Chuan-hai¹ , YAN Hong-fei² , MA Teng-fei¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. Planning Branch of Shanghai Investigation , Design & Research Institute , Shanghai 200434 , China)

Abstract : In order to simulate the process of hydrologic cycle in river basins and to solve the scientific research and project problems , a distributed hydrological model was put forward. The distributed structure and hydrologic feature units are the main characters of the proposed model so that the most suitable modules will be employed for its calculation according to the characteristics of the river basin and the project requirements. As a consequence , the excellent achievements in the existing models can be comprehensively employed , and the accurate and theoretical researches on some hydrological feature units are satisfactorily supported. The distributed hydrological model is better than some other hydrological models and is an exploration in the development of distributed hydrological models in the future.

Key words : distributed structure , hydrological model , hydrological feature unit , hydrological calculating unit