

文章编号:1672-3031(2013)03-0210-06

分布式水文模型在短期水文预报中应用的可行性探讨

梁犁丽¹, 冶运涛², 龚家国², 李 匡¹

(1. 中国水利水电科学研究院 北京中水科水电科技开发有限公司, 北京 100038;

2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 针对目前基于物理机制的分布式水文模型在短期水文预报业务中尚未推广应用的事实, 论证了分布式水文模型在短期水文预报中的可行性。以第二类分布式水文模型SWAT为例, 分析了水文过程的模拟原理、方法和基本步骤, 提出了其在短期水文预报中应用所需的降水预报技术、降水数据的空间展布技术、“3S”技术、流域坡面离散技术、对人工侧支水循环的处理技术等关键技术, 并指出了分布式水文模型应用于短期水文预报时存在输入资料不足、模型自身缺陷、计算精度和效率的权衡等局限性和不足, 提出需要进一步加强水循环过程的机理研究, 加强与气象模型的耦合研究及对“3S”技术的应用研究。

关键词: 水文预报; 分布式水文模型; SWAT模型; 预见期

中图分类号: P338

文献标识码: A

水文预报即根据已知信息, 运用水文学、气象学、水力学等原理和方法对某一流域或水文站未来一定时期内的水文状态做出定性或定量的预测, 它是防汛抗旱、水资源管理和高效利用等重大决策的重要依据, 长期以来受到防汛抗旱、水库管理、发电等部门及企业的广泛关注。按水文预报预见期的长短可分为短期水文预报与中、长期水文预报, 习惯上把主要由水文要素做出的预报称为短期预报, 一般预见期在3d以内, 主要指短期或实时洪水预报, 要求预报精度和合格率高。

在短期水文预报中, 传统的水文预报模型一方面在流域水文站网密度低、缺少或无法获得观测资料的区域预报精度降低, 洪水预报合格率不高; 另一方面在近期气候变化和剧烈人类活动双重因素交织影响下, 历史观测资料因不能准确反映现状而形成了新的“缺资料地区”, 使传统水文预报模型的率定和验证受到限制, 影响了短期水文预报精度。具有一定物理机制的分布式水文模型是模拟变化环境下流域水循环过程的重要工具, 能够较精确反映流域降雨-入渗-产流-汇流等水文过程, 是水文预报物理模型发展的必经过程。目前, 分布式水文模型在短期洪水预报业务中应用较少, 本文以美国农业部农业研究所开发的第二类分布式水文模型SWAT为例, 在分析其水文过程模拟原理、方法和基本步骤的基础上, 探讨基于物理机制的分布式水文模型在短期水文预报中应用的关键技术、难点、优势及不足。

1 分布式水文模型应用于短期水文预报的可行性分析

分布式水文模型在短期水文预报中的主要瓶颈是模型计算精度和效率问题, 从这两个角度出发, 主要在分布式水文模型的应用、遥感和GIS技术、防洪抗旱指挥系统建设、雷达测雨技术、高性能计算技术、实时校正技术等六个方面论证分布式水文模型在短期水文预报中应用的可行性。

(1) 分布式水文模型水资源管理方面的成功应用, 证明其在短期水文预报中具有巨大潜力。国内

收稿日期: 2013-01-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51209223, 51079160); “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAB05B01); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金项目(2011491911); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201101026)

作者简介: 梁犁丽(1982-), 女, 河南许昌人, 工程师, 博士, 主要从事水资源配置、水文预报与水库调度研究。

E-mail: liangli0921@163.com

外学者已开发出多个分布式水文模型,如国外的SWAT模型、TOPMODEL、TOPKAPI模型、THALES模型和HEC模型等;国内的半分布式和分布式新安江模型、GBHM、WEP和EasyDHM等,这些模型在水资源管理方面已经发挥了重要作用,近年来国内已有学者改进和修正已有模型,使其更适用于我国不同流域的洪水特性,这些较为成功的案例证明了分布式水文模型在短期水文预报中具有应用潜力。

(2)遥感技术和GIS技术的迅猛发展,为分布式水文模型在水文预报中的应用注入了新的活力。遥感技术为分布式水文模型提供了多元、更为可靠和更高时空分辨率的DEM、土地利用、雪盖等数据源,还可以用来获取降雨时空分布、反演蒸散发和土壤含水量等水文信息,为水文模型验证提供了新方法;GIS为分布式水文模型数据制备提供了强大处理工具。遥感和GIS技术的不断发展为分布式水文模型的推广应用奠定了基石。

(3)国家防汛抗旱指挥系统工程实施,为分布式水文模型参数的率定与实时校正提供了丰富的数据源。国家防汛抗旱指挥系统工程建设中,6个流域机构、31个省共建224个水情分中心、3171个中央报汛站以及改造3171个中央报汛站测验和报汛设施,4个流域机构、24个省共建228个工情分中心和927个工情采集点,除此之外,全国已建成各类水情报汛站5429个,基本形成了覆盖全国较完整的报汛站网体系,这些站网能够将实时雨情、水情信息准确、及时传递到各有关防汛指挥部^[1]。完整准确及时的雨情、水情、工情信息为建立科学可靠的分布式洪水预报模型提供了重要支持,为利用动态实时监测数据实时校正模型计算过程,提高模拟精度和降低模拟预测的不确定性提供了可能。

(4)雷达测雨技术为获悉降雨时空分布提供了新的信息来源,为提高洪水预报能力提供了一条有效途径。降雨是造成分布式水文模型不确定性来源的最主要因素^[2],而传统的站点观测降雨无法同时满足时间和空间分辨率的要求,更会在数据时空处理过程中带入如地形等不确定性因素的影响。随着雷达技术及其产品订正方法的提高和改进,各种陆基和空基雷达能够获取区域以至全球降雨的高分辨率时空四维分布,在国际上已广泛应用于天气预报、气候分析和水文预报等领域^[2]。上述新技术新方法对于分布式水文模型在洪水预报的应用具有重要意义。

(5)高性能计算技术的飞速发展,为提高分布式水文模型的洪水预报效率提供了重要技术支撑。分布式水文模型要划分多个计算单元和利用丰富的数据源准确反映流域实际情况,从而能最大限度地提高径流的模拟预测精度。然而大范围高分辨率空间尺度的分布式水文模拟计算效率还不能满足短期洪水预报的要求。目前若将在其他领域如数值天气预报应用较为成功的高性能计算技术引入分布式水文模型中,能够极大地提高模型计算效率,适应短期水文预报的需要^[3]。

(6)实时校正技术能够在模型计算过程中实时调整模型参数或状态变量,降低模型计算误差,提高模型计算精度。分布式水文模型应用于短期水文预报时存在模型自身误差(如模型结构、模型参数及模型初始状态等造成的误差)和输入资料的误差(如降雨、蒸发等实测误差),随着预报时间的推移,预报误差可能会逐渐累积,从而影响预报精度^[4]。因此,引入先进的实时校正技术在发布实时洪水预报之前利用新信息对预报值误差进行实时校正,使后续时刻预报结果逐步逼近真值,更准确地反映未来洪水过程。误差自回归法、递推最小二乘法及卡尔曼滤波法等校正技术在分布式水文模型中的成功应用为其在短期水文预报中进行推广提供了示范^[5]。

2 基于分布式水文模型的短期水文预报理论与方法

2.1 基于分布式水文模型的水文预报原理 分布式水文预报模型将流域分为若干个子流域或基本计算单元进行产汇流计算和河道演算,它与集总式水文预报模型的本质区别是根据下垫面的异质性将水文参数进行离散化处理,分布式物理模型的参数具有明确的物理意义。国际上分布式水文模型有三种建模思路^[6]:一是利用DEM生成子流域及水系,在每个子流域上应用概念性集总模型推求径流,再进行汇流演算,最后求得某断面径流,这类模型也称松散耦合型分布式水文模型,如SWAT

模型；二是基于DEM推求地形空间变化信息，利用地形信息模拟相应的水文特性，并利用统计方法求得需要的断面流量，如TOPMODEL等；三是应用数值分析建立相邻网格单元的时空关系，这类模型也称紧密耦合型分布式水文模型或具有物理基础的全分布式水文模型，如SHE及其改进模型、TOPKAPI模型等。流域水文预报包括产流、汇流、河道洪水演进3个基本组成部分；若河道上建有水库，还应包含水库洪水演进部分。短期水文预报的理论基础是径流形成原理和洪水演算原理，径流形成与预报包括流域产流和汇流部分，既根据流域面上的一场降雨预报流域某断面的洪水过程线，其理论依据是流域降雨径流形成规律；洪水演算包括河道和水库洪水演算，即根据河段上断面的来水情况预报河段下断面的水情，其理论依据是洪水波在河道中的运动规律^[7]。

2.2 基于分布式水文模型的短期水文预报过程 大部分分布式水文模型的径流预报过程类似，其本质即径流模拟过程，本文将其概括为模型数据准备、数据处理、模型运行过程、模型校核与验证四个主要部分(见图1所示)；从水文循环的角度可划分为：水文参数离散-基本计算单元上的产汇流-河道洪水演算-河道某断面或流域出口径流计算四个基本过程。本文以SWAT模型为例，简单介绍分布式水文模型的短期水文预报过程。

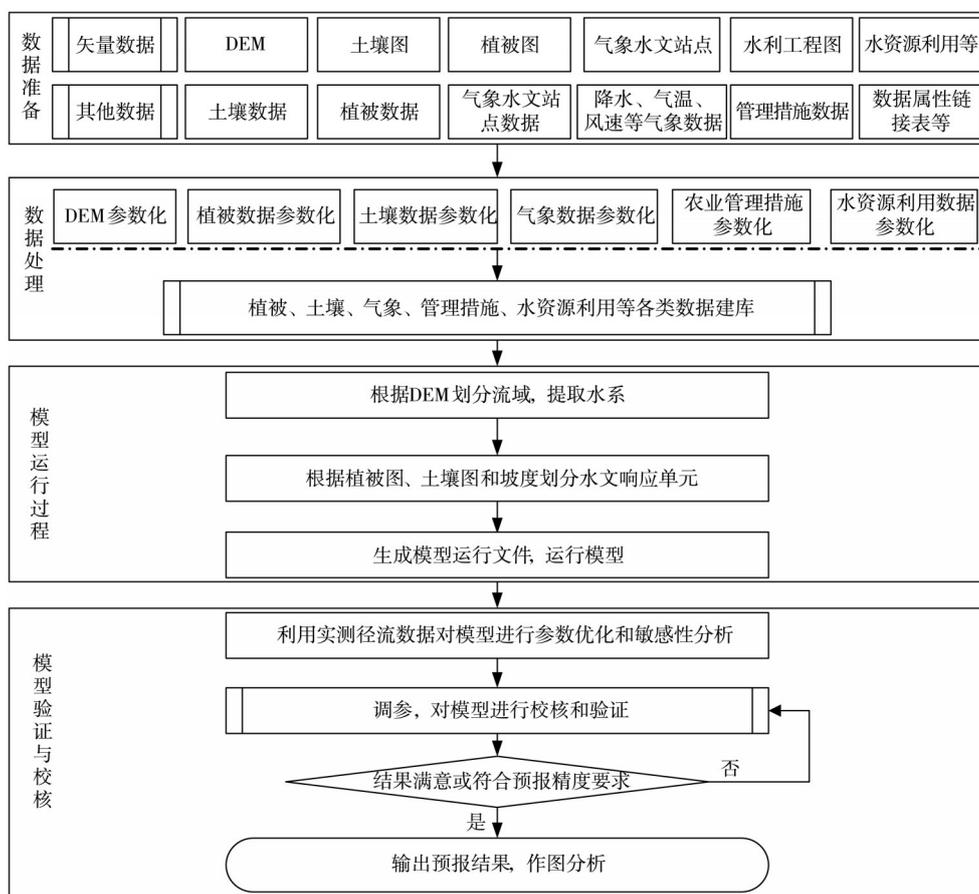


图1 基于SWAT模型的短期水文预报过程

在数据准备阶段，主要收集和准备分布式水文模型所需要的各类输入数据；在数据处理阶段，将模型所需数据制备成模型可读取的各类数据或数据库；在模型运行阶段，在保证模型输入可靠的情况下，根据模型运行步骤生成模拟结果：首先根据DEM，利用D8等算法确定水流流向，提取流域和水系，而后依据下垫面土壤、植被、坡度划分子流域，根据径流形成原理推求各子流域内水文响应单元在时段内的重要水文要素值，再经过坡面汇流和河道洪水演算得到计算断面的径流量；在模型校核和验证阶段，SWAT模型主要利用实测断面径流数据及LH-OAT算法、SCE-UA(Shuffle Complex Evolution-University of Arizona)算法等，进行模型参数敏感性分析和优化，根据径流形成和河道洪水演算原理调整相关模型参数，再次模拟直至得到满意的模拟结果。

值得说明的是,理论上讲,具有明确物理意义的水文预报模型参数值不需要率定,直接由测量值或实验结果得到^[6],但由于不同流域间的差异性,这些值不具有普适性,加之有些参数难以通过实测或实验来确定^[8],因而在实际应用中仍需要参数率定。

2.3 分布式水文模型在水文预报中应用的关键技术 通过分布式水文模型,可以充分表达流域水文参数、下垫面等影响产汇流因素的时空异质性,在一定程度上反映流域下垫面及水文气象等环境要素的空间变化对水文过程的影响,从而准确模拟和预报河道洪水的演进过程。利用具有物理机制的分布式水文模型进行水文预报的关键技术包括以下几个方面。

(1)降水预报技术。降水是影响水文过程模拟和水文预报精度的主要和最不确定的因素之一,在水文预报中引入定量降水预报技术是延长预见期、提高预报精度的重要手段和方法^[9]。传统的降水预报多采用统计方法,如多元统计分析、时间序列分析和判别分析等,由于受天气物理因子及地形等众多因素影响,预报效果一直不太理想。随着数值天气预报产品及其新技术的应用,以及数值天气预报时间、精度和空间分辨率的提高,利用定量降水预报提高水文模型预报精度已成为可能^[10],近期发展起来的集合数值天气预报技术可有效提高降水预报精度^[11-12],而数值预报模式与流域水文模型的双向耦合是水文预报的重要发展方向。

(2)降水数据的空间展布技术。降水时空分布是影响流域产汇流和河道径流的最重要因素,确切地掌握降水量的空间分布是使用分布式水文模型的先决条件。模型中若使用传统雨量站的数据就涉及到降水数据的空间展布,无论是利用早期的面积平均法、反距离加权平均法(IDW),还是泰森多边形、改进的泰森多边形法,以及样条插值函数法、克里金(Kriging)插值法等,无疑都是为了得到与实际情况最相符的降水量空间分布状况。在水文模型中,水文学者对数据空间展布技术的引入和应用从未间断。近年来,雨量观测手段由传统的雨量站向雷达、卫星云图等高科技方向转变,测雨雷达被逐渐运用到天气预报中,它可以直接测得降雨的空间分布,提供区域的面雨量,并具有实时跟踪暴雨中心走向和暴雨空间变化的能力。因此,在分布式水文模型中直接利用高分辨率的雷达测雨数据可以很好地解决降水数据的空间展布问题,同时推动了水文预报模型由集总式向分布式的过渡和转变。

(3)遥感与GIS技术。遥感作为信息采集的重要手段,为水文建模提供了丰富的空间属性数据,并且为模型验证提供了新方法;GIS技术为水文模型的数据管理和模型应用带来了较大便利,因此,在水文建模过程中充分利用遥感和GIS技术已成为水文建模的重要研究方向。由于流域下垫面高度的空间异质性,大多数遥感数据获取的水文属性参数与物理观测值之间并没有很好的相关性,给模型的验证带来较大困难;在建模中,数据的分辨率、误差和参数提取方法都直接影响参数化的结果,如何选择空间基础数据并进行遥感数据参数化和特征值提取、流域离散方式及水文模拟方法之间的不确定性等方面,还有不少问题亟待进一步研究和探讨。GIS成熟的空间和非空间数据的获取、存储、分析和显示功能,能够为分布式水文模型提供强大的数据存储、显示、描述、分析能力,极大地促进了分布式水文模型的发展。近年来,GIS技术与分布式水文模型的嵌套与集成逐步深入,几乎所有新开发的模型均使用或带有空间数据分析功能,在分布式水文建模的空间数据管理、水文特征提取、模型水文参数获取和计算过程与结果可视化等4个方面发挥着不可替代的作用。

(4)流域坡面离散化技术。分布式水文模型的基础空间数据、尺度问题、分布式输入的特点以及计算处理等多方面的因素决定了流域需要进行离散化处理,流域坡面离散方式主要有3种:网格单元、地貌单元和自然子流域。网格划分方式有较强的物理基础,能够严格地考虑网格内及网格间水文要素的相互作用及水分运动过程;地貌单元离散方式能够较好地反应流域地貌特征;基于自然子流域的划分是按照天然汇水网络对流域进行离散,最大的优点是便于结合成熟的集总式水文模型,能够从DEM快速、自动提取河网和子流域等参数,离散单元之间的水文联系清晰明了。此3种离散方式在分布式水文模型中均有应用,各模型根据所需分别选择不同的方式,如WEP模型选择了网格单元和“子流域+等高带”方式,SWAT模型以自然子流域为主要方式,同时也具备子流域+等高带的离散方式等。

(5)对人工侧支水循环的处理技术。随着人类活动对流域水文循环过程干扰程度的加深,大面积引水灌溉、取用地表水和地下水、水库闸坝调度等对水文过程都产生了巨大影响,人工侧支水循环

在水文模型模拟过程中不容忽视。从当前分布式水文模型的应用和发展趋势来看,对灌溉、水库闸坝调度运行和取用水等水资源利用活动的模拟是现代分布式水文模型开发必须考虑的因素。而模型对人工侧支水循环的考虑程度和处理方式决定着此部分水文循环模拟的精度,目前大部分分布式水文模型对人工侧支水循环的处理处于简单给出取用水量、输入水库闸坝调度过程、输入灌溉制度等水资源利用信息的阶段,未来还需要深入研究人工侧支水循环与天然水循环的紧密耦合技术。

3 分布式水文模型在短期水文预报中的局限性

分布式水文模型具有分布式参数和输入输出数据,能够充分利用雷达、卫星等遥感资料,耦合高分辨率数值天气预报模式;对水文过程描述更细致、更复杂,并提供水文过程及其要素的时空分布,但模型理论方法的完善与实用效果并不完全一致,目前在洪水预报业务中的应用较少,其原因除输入资料不充分或资料代表性不好、模型自身的缺陷和计算偏差外,还有模型计算精度和效率间的权衡,以及固有的不确定性等影响因素^[13]。对分布式水文模型建模来说,是获取更多的数据和参数来提高模拟精度,还是加强水文现象和机理的研究以简化模型结构,仍存在较大争议。

分布式水文模型需要数据众多,模拟精度受模拟对象数据精度和数据量的影响巨大。水文循环过程具有高度的非线性和复杂性,与时空尺度高度相关,无论简单还是复杂的分布式水文模型都需要大量的观测数据或水文过程参数,不仅包括DEM、土壤、植被、气象和地质等大量的自然环境要素数据,而且还有复杂的生活生产取用水、灌溉、水库闸坝调度、污染物排放等社会经济用水数据。虽然有些流域已积累了大量的站点观测数据和遥感数据,但与建模过程、尺度相匹配的观测数据还很难满足分布式水文模型的需求,而且随着人类活动对天然水循环过程影响的不断加深,使得新的缺资料或无资料地区形成。因此,输入数据选择和多源数据同化与利用问题成为了分布式水文模型建模过程中的难点和关键问题之一,制约着模型的进一步应用。

分布式水文模型的精度与模型的参数有着直接的关系,参数的多少和获取的难易程度既决定着模型的模拟精度,同时也是模型不确定性的来源之一。如SHE和李兰模型在汇流阶段均采用动力波或近似解,模型结构复杂、参数众多,并不适用于较大尺度的水文模拟,尤其是流域尺度的洪水预报;TOPMODEL作为多参数的概念性水文模型虽都有一定的精度,且全面考虑了水源在水平和垂直方向上的运动,但模型的地形指数对DEM的分辨率相当敏感,且参数众多,获取麻烦,限制了其在水文预报中的应用与推广。

此外,由于分布式水文模型结构复杂、经坡面离散后计算单元多、参数率定和验证难度较大,常需要在模拟效率和精度之间做出取舍,且存在不同尺度上水文变量和参数的空间变异性问题,故很难确保对大、中、小各种洪水都有高精度的模拟预报结果。

4 结论和建议

本文首先立足于制约分布式水文模型在短期水文预报推广应用的原因:模型计算精度和效率问题,从分布式水文模型的应用、遥感和GIS技术、防洪抗旱指挥系统建设、雷达测雨技术、高性能计算技术和实时校正技术等六个方面进行了探讨,论证结果为:分布式水文模型在短期洪水预报中各项技术已较为成熟,在短期洪水预报中具有应用潜力;其次论述了基于分布式水文模型的水文预报基本原理,解析了分布式水文模型在短期水文预报中的应用流程,提出了分布式水文模型在短期洪水预报中亟需攻克的关键技术;最后识别了分布式水文模型在短期水文预报中的局限性。

为促使分布式水文模型在短期水文预报领域尽早实现大规模的应用,还需在以下几个方面加强研究:(1)加强水循环过程的机理研究。通过增加观测站点密度、改善观测手段来获取更丰富的实测资料,进而从物理学的角度和深度认识流域水文过程,解决水文过程中的非线性和空间变异性问题;(2)加强与气象模型的耦合研究。在分布式水文模型中充分利用雷达测雨技术以及中小尺度暴雨

预报技术,耦合中尺度的气象天气预报模式来描述和预报水文输入资料(降雨等)的时空变异性,并通过开展降尺度方法研究,逐步缩小气象与水文数据之间的时空尺度差异性;(3)加强对“3S”技术的应用研究。提高RS、GIS数据在分布式水文模型的处理能力和应用水平,如利用遥感手段获取降水时空分布信息、遥测水位和水面变化、反演陆面蒸散发和土壤水等水文信息,丰富模型基础数据获取的手段和数据量;借助GIS功能处理和利用多源时空分布数据,提高模型的交互能力等。

参 考 文 献:

- [1] 胡亚林,付成伟,马涛.国家防汛抗旱指挥系统工程[J].中国水利,2003(11):26-30.
- [2] 杨传国,余钟波,林朝晖,等.基于TRMM卫星雷达降雨的流域陆面水文过程[J].水科学进展,2009,20(4):461-466.
- [3] 刘家宏.黄河数字流域模型[D].北京:清华大学,2005.
- [4] 钟伟.流域水文模型参数优选及模拟结果实时校正问题的研究[D].天津:天津大学,2005.
- [5] 陆波.流域水文模型与卡尔曼滤波耦合实时洪水预报研究[D].南京:河海大学,2006.
- [6] 刘志雨.我国洪水预报技术研究进展与展望[J].中国防汛抗旱,2009(5):13-16.
- [7] Jia Yangwen, Ni Guangheng, Yoshihisa Kawahara, et al. Development of WEP Model and its application to an urban watershed[J]. Hydrological Processes, 2001, 15: 2175-2194.
- [8] 刘志雨.基于GIS的分布式托着卡匹水文模型在洪水预报中的应用[J].水利学报,2004(5):70-75.
- [9] 赵琳娜,包红军,田付友,等.水文气象研究进展[J].气象,2012,38(2):147-154.
- [10] 崔春光,彭涛,沈铁元,等.定量降水预报与水文模型耦合中的中小流域汛期洪水预报试验[J].气象,2010,36(12):56-61.
- [11] 张俊,郭生练,陈桂亚,等.大气水文耦合模式在洪水预报中的应用研究[J].水电能源科学,2010,28(9):37-40,81.
- [12] 包红军,赵琳娜.基于集合预报的淮河流域洪水预报研究[J].水利学报,2012,43(2):216-224.
- [13] 徐华,薛恒新,钱鹏江.基于进化学习的视觉模糊系统模型在水文预报中的应用[J].水利学报,2011,42(3):290-295.

Feasibility analysis of the application of the distributed hydrological model in the short-term hydrological forecast

LIANG Li-li¹, YE Yun-tao², GONG Jia-guo², LI Kuang¹

(1. Beijing IWHR Technology Co., Ltd, Beijing 100038; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle In River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In view of the fact that the distributed hydrological model based on physical mechanism has not been popularized in the short-term hydrological forecast, its feasibility of the application in the short-term hydrological forecast is demonstrated in detail. Taking one of the distributed hydrological models---Soil and Water Assessment Tool (SWAT) as an example, this paper presents its principles, methods and basic steps of the hydrological processes simulation, and discusses the application of distributed hydrological model in the short-term hydrological forecast in connection with key techniques, for example, the precipitation forecast techniques, the spatial distribution techniques of precipitation data, the GIS, RS and GPS techniques, the slope discretization techniques of a watershed, and the processing techniques of man-made water cycles. Then difficulties and disadvantages are summarized when it is used in the short-term hydrological forecast, such as the insufficient input data, the deficiency of the model itself, the tradeoff of model calculation efficiency and accuracy. Finally, it is proposed that it is necessary to strengthen the mechanism research of the water cycle and the research on the coupled meteorological model and “3S” technology.

Key words: hydrological forecast; distributed hydrological model; SWAT model; forecasting period

(责任编辑:王成丽)