

文章编号: 1007-6301 (2002) 04-0341-08

流域水文模型研究的若干进展

吴险峰¹, 刘昌明^{1,2}

(1. 北京师范大学环境科学研究所, 北京 100875; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 计算机技术和一些交叉学科的发展, 给水文模拟的研究方法带来了根本性的变化。文章阐述了分布式物理水文模型、地理信息系统 (GIS) 和遥感 (RS) 技术在流域模拟中的应用等方面的进展。指出分布式模型具有良好的发展前景, 应用 GIS 的水文模型尽管有诸多优点, 但并不能代表模型本身的高质量, 遥感资料还没有完全融入水文模型的结构中, 给直接应用带来较大的困难。提出立足于产汇流机理研究, 建立基于 RS 和 GIS 的耦合水文模型是研究的趋势, 尺度问题仍然是关注的焦点。

关 键 词: 水文模型; 分布式模型; 遥感; 地理信息系统; 尺度

中图分类号: P343 **文献标识码:** A

1 引言

用数学的方法去描述和模拟水文循环的过程, 产生了水文模型的概念^[1], 水文模型的产生是对水文循环规律研究的必然结果。水文模型在水资源开发利用、防洪减灾、水库、道路、城市规划、面源污染评价、人类活动的流域响应等诸多方面得到了广泛的应用, 当今的一些研究热点, 如生态环境需水、水资源可再生性等均需要水文模型的支持。流域水文模型是在计算机技术和系统理论的发展中产生的, 20 世纪 60、70 年代是蓬勃发展的时期, 涌现出了大量的流域水文模型, Stanford 流域模型 (SWM)、Sacramento 模型、Tank 模型、Boughton 模型、前期降水指标 (API) 模型、新安江模型等是这一时期的典型代表^[2]。其后一段时期, 相对处于缓慢的发展阶段。随着计算机技术和一些交叉学科的发展, 流域水文模拟的研究方法也开始产生了根本性的变化。流域水文模型研究的突出趋势主要反映在计算机技术、空间技术、遥感技术等的应用方面, 分布式物理模型被广泛提出, 遥感 (RS)、地理信息系统 (GIS) 在水文模拟中的应用给传统的研究方法带来了创新。但由于受到技术等原因的制约, 分布式模型目前的应用还较困难, 应用 GIS 的水文模型尽管有诸多优点, 但并不能代表模型本身的高质量, 遥感资料还没有完全融入水文模型的结构中。

2 分布式水文模型

流域水文模型根据不同的标准有多种分类^[3], 根据模型结构和参数的物理完善性, 目前

收稿日期: 2002-04; 修订日期: 2002-05

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (1999043601)

作者简介: 吴险峰 (1970-), 男, 湖北武穴人, 博士研究生, 主要从事水资源水环境研究。Email: xianfwu@263.net

常用的可分为概念性模型和分布式物理模型。概念性模型用概化的方法表达流域的水文过程,具有一定的物理基础,也具有相当的经验性,模型结构简单,实用性强。分布式物理模型的优点是模型的参数具有明确的物理意义,可以通过连续方程和动力方程求解,可以更准确的描述水文过程,具有很强的适应性。与概念性模型相比,分布式水文模型用严格的数学物理方程表述水文循环的各子过程,参数和变量中充分考虑空间的变异性,并着重考虑不同单元间的水平联系,对水量和能量过程均采用偏微分方程模拟。因此,在模拟土地利用、土地覆盖、水土流失变化的水文响应及面源污染、陆面过程、气候变化影响评价等方面应用显出优势。参数一般不需要通过实测水文资料来率定,解决了参数间的不独立性和不确定性问题,便于在无实测水文资料的地区推广应用。

自 1969 年 Freeze 和 Harlan^[4]第一次提出了关于分布式物理模型的概念,分布式模型开始得到快速发展。三个欧洲机构提出的 SHE 模型^[5]是最早的分布式水文模型的代表。SHE 模型考虑了截留、下渗、土壤蓄水量、蒸散发、地表径流、壤中流、地下径流、融雪径流等水文过程。流域参数、降雨及水文响应的空间分布垂直方向用层表示,水平方向用方形网格表示。该模型的主要水文过程可由质量、动量和能量守恒偏微分方程的有限差分表示,也可由经验方程表示。模型有 18 个参数,部分具有物理意义,可由流域特征确定。它的物理基础和计算的灵活性使它适用于多种资料条件,在欧洲和其它地区得到了应用和验证^[6]。这期间还有一些考虑流域空间特性、输入、输出空间变化的分布式物理模型,如,CEQUEAU 模型^[7],将流域分为方形网格,输入所有网格的地形、地貌、雨量等特征,对每一个网格进行计算,在水质模拟、防洪、水库设计等诸多方面有适用性;Susla 流域模型^[8]强调地表水和地下水的合成,除可模拟径流外,还可以用于预测土地利用的水文效应;还有一些 SHE 模型的不同版本及 IHDM 模型^[9]等。国内这方面的研究开展较晚,但也进行了有益的探索和研究。李兰等^[10,11]提出了一种分布式水文模型,模型包括各小流域产流、汇流、流域单宽入流和上游入流反演、河道洪水演进四个部分。水源分坡面流、壤中流和地下径流,考虑了产流随空间和时间变化的分布特征,能计算产流的多种径流成分的物理过程。将数学物理反问题与洪水预报结合,给出了流域产流、河道汇流、水库洪水演进三个动态分布预报耦合模型,不仅可以用于分析降水径流规律,还可以用于洪水预报。该模型在丰满、龙河口和陆浑等水库流域得到应用^[12];张建云等^[13]建立了参数网格化的分布式月径流模型,并应用模型进行了华北、江淮流域的水资源动态模拟评估。

郭生练等^[14]提出了一个基于 DEM (Digital Elevation Model) 的分布式流域水文物理模型,该模型将流域划分为网格单元,详细描述了网格单元的截留、蒸散发、下渗、地表径流、地下径流、融雪等水文物理过程,在每一个网格上用地形高程来建立地表径流之间的关系。模型的结构中,植物截留过程引入了描述植物截留能力的物理参数-植物蓄积容量;流域的蒸散发主要考虑了太阳辐射、日云量、反射率、植物叶面指数、可供土壤水、大气温度等因素;用一维圣维南方程的运动波近似法模拟坡面水流运动,用运动波模型模拟地下径流。不同网格单元之间水流流向的确定是模型的关键,该模型采用多流向法确定从较高单元到相邻的较低单元的流量,数学公式为:

$$f_{j-i} = s_{j-i}^p / s_{j-i}^p \quad (1)$$

其中

$$s_{j-i} = (z_j - z_i) / [(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2]^{1/2} \quad (2)$$

式中 f_{ji} 表示从 j 单元分配给 i 单元的流量部分; s_{ji} 表示从 j 单元到 i 单元的方向坡度; p 是无量纲常数; z 为地面高程; x 、 y 为单元的平面直角坐标。将式 (2) 高程用土壤水水头表示来计算地下径流的流量分配。模型作者应用美国缅因州BBMW 流域验证模型的结构和精度^[15], 将流域划分为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的网格单元, 选用了五场洪水。模型仅优化调整了一个参数, 即下渗能力校正系数, 其它参数均可从基础资料中分析求得。计算得出, 模型的效率系数平均值为 85.2%, 水量守恒指数平均值为 0.98, 与新安江模型的计算结果相比 (分别为 83.48%、1.10), 精度略高。

3 GIS 在水文模型中的应用

GIS 是运用系统工程和信息科学的理论, 科学管理和综合分析具有空间内涵的地理数据, 以提供对规划、管理、决策和研究所需信息的技术系统^[16]。近年来, GIS 在水文模拟中得到了广泛的应用。借助于 GIS 强大的空间数据分析处理功能, 水文模型的研究手段得到了根本性的转变。GIS 不仅可以管理空间数据, 用于模型的输入、输出, 而且还可以将水文模块植入 GIS 系统, 用户只需要根据 GIS 开发的界面操作, 不需要涉及水文模型的本身。就目前的研究及应用看, GIS 与水文模型的结合主要表现为三种方式, 即 GIS 软件中嵌入水文分析模块、水文模型软件中嵌入部分 GIS 工具 (松散型结合) 及相互耦合嵌套的形式 (紧密型结合)。

水文陆面模拟中, 地形是十分关键的因素, GIS 用于水文模拟, 可以用来获取、操作、显示这些与模型有关的空间数据和所得的成果, 使模型进一步细化, 从而深入认识水文现象的物理本质^[17]。当今以数字地形模型 (DTM)、数字高程模型 (DEM) 存储的地形信息, 为流域水系信息参数的自动化提取提供了可能^[18]。通过 GIS 可以提取流域的基本特征, 包括下垫面特征、水系、河网等, 并可以依据河网等级对流域进行任意的子流域的划分或者进行网格化划分, 不仅可以与传统的概念性流域水文模型相结合, 管理提供基本的数据信息, 并实现输入输出功能, 更重要的是为分布式的水文物理模型研制提供了平台。由 GIS 可以实现不同数据的可视化结合、数据转换, 并可以减少模型输入时的数据误差。GIS 在流域水文模拟中得到广泛的应用, 出现了许多商业化的集成软件和专业软件。如 ESR I 提供的 Hydro 模块, 可以在 Arc/info、Arcview 中直接调用; RSI 提供的 River Tools, 目前发展到 2.4 版本, 它的一个特点是可以处理很大的 DEM 数据; Garbrecht J, Martz W. 的 TOPAZ 工具等, 这些工具在流域地形处理方面功能非常强大。还有一些基于 GIS 的专业水文处理软件, 如 WMS (Watershed Modeling System) 模型系统, 它是美国 Brigham Young 大学环境模型研究实验室 (EMRL) 开发的专业水文模拟处理软件, 提供水文模拟全过程的工具, 包括流域、子流域的自动生成、几何参数的计算、水文参数 (如汇流时间、降雨深等) 的计算等, 并能实现模拟结果的可视化。WMS 可以使用矢量地图、DEM、TIN 等格式的数据来进行地形分析和水文模拟。嵌入了多种传统的概念性水文模型, 包括 HEC-1、NFF、TR-20、TR-55、Rational Method、HSPF 等, 根据自动提取的流域参数进行水文模拟, 可以用于洪水预报、水库设计、城市规划等。

以地形空间变化为主要结构, 用地形信息模拟水文响应的 TOPMODEL 概念提出后, 国外已有多方面的研究应用^[19], 国内也有较多的应用和研究报道。如, 郭方等^[20]将 TOP-

MODEL 应用在淮河流域史河水系。任立良等^[21, 22]建立了基于DEM 的数字流域水文模型, 该模型的基本结构是: 在流域栅格DEM 数据上, 应用数字高程流域水系模型(DEDNM)^[23]的原理和方法自动提取流域水系, 构建数字流域, 主要过程包括凹陷区的识别处理、平坦部位水流流向设定、子流域集水单元勾划、河网生成、河网与子流域编码及河网拓扑关系的建立; 然后对生成的每一集水子流域应用新安江模型建立产流模型, 再根据河网结构拓扑关系, 采用分段马斯京根法, 建立数字河网汇流模型, 构成了数字水文模型, 并在淮河流域进行了实例应用研究, 计算的黄泥庄站时流量过程和蒋集站日流量过程均能与实测过程较好的拟合。

4 遥感水文模型

遥感(RS)技术是20世纪60年代以来发展起来的新兴边缘学科, 是一门先进的、实用的探测技术^[24]。在水循环领域, 作为一种信息源, 遥感技术可以提供土壤、植被、地质、地貌、地形、土地利用和水系水体等许多有关下垫面条件的信息, 也可以获取降雨的空间变化特征、估算区域蒸发、监测土壤水分等, 这些信息是确定产汇流特性和模型参数所必需的。流域水文模拟的结果很大程度上依赖于输入数据, 而往往由于缺乏足够的、合适的的数据而不能很好的描述水文过程, 并且只有获得详细的地形、地质、土壤、植被和气候资料, 对大范围流域气候变化和土地利用产生的水文影响研究才有可能。通过遥感技术, 能够弥补传统监测资料的不足, 在无常规资料地区可能是唯一的数据源, 大大丰富了水文模型的数据源。和传统的数据收集方法相比, 遥感技术获取数据的优点主要有: 面状数据, 不需要再进行点面的转化; 直接获取或经转换后为数字化形式, 便于应用; 可提供相对高分辨率的时间和空间信息; 可获取偏僻的无人可及的区域资料。

就目前的研究情况, 刘昌明等^[25]将应用遥感信息的水文模型粗略的分成三类: 第一类是遥感信息和地面同步实测资料的回归模型; 第二类是将遥感信息作为水文模型中参数的输入与估计或者是调整水文模型结构后与具有空间特征的遥感资料相耦合的遥感水文模型; 第三类是应用遥感资料的水量平衡模型。国外早期的研究主要是利用遥感资料提取流域地物信息、估算水文模型的参数等, 如进行土壤分类、应用一些经验性的模型估算融雪径流、估算损失参数等, 后期注意适应遥感信息的模型结构的改造和设计。国内也有这方面的应用尝试, 主要集中在运用遥感资料获取流域水文模型的输入和率定有关的参数方面。如王燕生^[26]利用陆地卫星影像获取流域的下垫面资料, 将流域按植被和土壤、土地利用分区, 并应用气象雷达探测雨区及相应的面雨量, 采用USDAHL 水文模型, 进行了少冷河的洪水预报研究; 魏文秋等^[27]通过改进SCS模型并应用遥感资料确定模型的土地利用和土壤类型, 以安徽城西径流试验站进行了实例研究, 结果表明产流模拟的精度是满意的; 徐雨清等^[28]应用GIS与RS技术研究了黄土高原半干旱地区降雨径流关系问题, 应用GIS提取流域边界、水道、地形和下垫面特征, 应用卫星遥感(NOAA AVHRR 卫星数据)获取植被和土地利用状况, 建立了流域多年平均径流量与降雨量、植被等因素的关系模型。

王腊春等^[29]将遥感资料应用到新安江模型的参数提取。用泰森多边形将流域分块, 每一个分块用双层新安江模型计算产流, 用遥感资料提取产流参数。其实质是根据SCS模型通过遥感资料确定CN(Curve Number)值从而确定流域最大可能土壤蓄水量 S 。关系式为:

$$R = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) \quad (3)$$

$$S = 25400 / \sqrt{CN} - 254 \quad (4)$$

式中 R 为径流量, mm; P 为降雨量, mm。该模型应用 Landsat TM 数字磁带和黑白航空像片来分析研究区地表覆盖状况和辅助常规土壤图确定水文土壤类型, 从而确定每一个分块面积上的 CN 和 S 值。新安江模型的其它参数用常规优化方法获取。该模型在浙江溪西流域 6 次洪水的产流计算结果, 计算值与实测值相对误差在 -6.5%~8.3% 之间, 精度是满意的。

5 结论

(1) 水文模型是在研究水文现象和水文规律中产生的, 并在不断的发展和完善。目前广泛使用的绝大多数仍为概念性的水文模型, 既具有一定的物理基础, 又有良好的适用性, 在水文模拟中发挥了巨大的作用, 但在越来越受水文界关注的尺度问题、生态水文过程、人类活动及气候变化的水文响应等热点问题上缺乏有力的解决方案, 有待进一步的发展和完善; 分布式物理水文模型有坚实的物理基础, 且具有反映流域响应的空间特征等诸多优点, 但目前存在资料输入、参数的尺度、能否反映产汇流机理及模型本身的算法等问题, 虽然目前的技术水平还不足以解决诸多的问题, 在实用上受到较大的限制, 但是随着计算机技术、遥感技术及其它交叉学科的发展, 分布式水文模型的发展前景光明, 是研究的趋势; 应用中对水文模型的选择, 应该首先取决于要解决的问题和地区的实际资料情况, 并非是越复杂的模型越能得出精确的结果, 有时候经验性的简单模型可能更能取得好的模拟效果。

(2) GIS 和 RS 在水文循环领域的应用给水文模型的研究思路和技术方法带来了创新和革命, 就目前的研究看, 商业化软件的开发是一种趋势。应用 GIS 的水文模拟软件具有友好的人机交互功能, 操作简单方便, 包装漂亮, 使用中不需要涉及水文模型的本身, 很方便于实际的应用。但是, 这些优点并不能表示模型本身的高质量, 水文现象的复杂性决定了水文模型很难通用, 这些模型不一定较好的反映了应用地区的产汇流特征, 在不同的地区可能很难取得理想的模拟结果。而通常对模型的本身进行改进是非常困难的, 因为不仅涉及到复杂的水文学知识, 关键还是因为涉及到软件系统的原代码问题, 对用户而言这些代码通常是不公开的。遥感的影像解译也有专门的软件, 但是遥感资料还没有完全融入水文模型的结构中, 直接应用还有很大的困难, 不断出现新的卫星系统的水文循环数据也需要新的模型来分析和处理, 因此, 立足于产汇流机理研究, 运用新的技术方法, 不断改进水文模型结构和水文模型创新十分必要。

(3) 建立基于 GIS、RS 的耦合水文模型有着广阔的发展前景。RS 是 GIS 的重要的数据来源, GIS 是处理应用 RS 数据的重要工具。GIS 与 RS 的处理软件一般是相互独立的, 数据的格式往往需要经过处理后才能匹配, 首先就需要对 GIS 和 RS 之间的信息进行复合处理, 包括格式、坐标、投影、比例尺等, 这些数据源是确定水文模型的核心-产汇流基本结构的基础, 并为模型的进一步网格化和单元化提供支持; 其次还需要与传统的地面资料匹配复合, 涉及到单元的划分、时间尺度的统一等, 因为传统的资料是验证模型的唯一途径, 充分利用常规资料对保证模型的精度有着重要的作用; 最后, 需要与传统模型结构的耦合, 也就是模型的结构既要考虑反映区域的产汇流机制, 又要考虑如何融入丰富的数据

源,并使数据源与模型在尺度及参数结构上匹配,获取数据的支持。这样能够极大的丰富建模信息,更好的反映产汇流特征。通过GIS、RS与水文模型的集成,建立结构上匹配、机制上合理的耦合模型。图1是耦合模型的示意图,核心就是将GIS、RS的数据源与传统水文模型的结构相匹配,并运用GIS的功能模块经二次开发后实现模型的运行及输入输出。

(4) 尺度问题仍然是关注的热点。不同尺度的水文循环的机理是不相同的,水文模型的结构也就不尽相同,如何考虑流域水文过程的时空不均匀性和变异性是尺度问题的关键,影响这种不均匀性和变异性的主要因素有流域的地形、植被覆盖、土壤及降雨、蒸发等气候因素,而采用新技术,如GIS、RS,获取更多的信息源是水文模拟发展的一个趋势^[30],由于尺度问题的存在,就涉及到这些信息源的时空分辨率的问题。因此,对尺度问题的研究

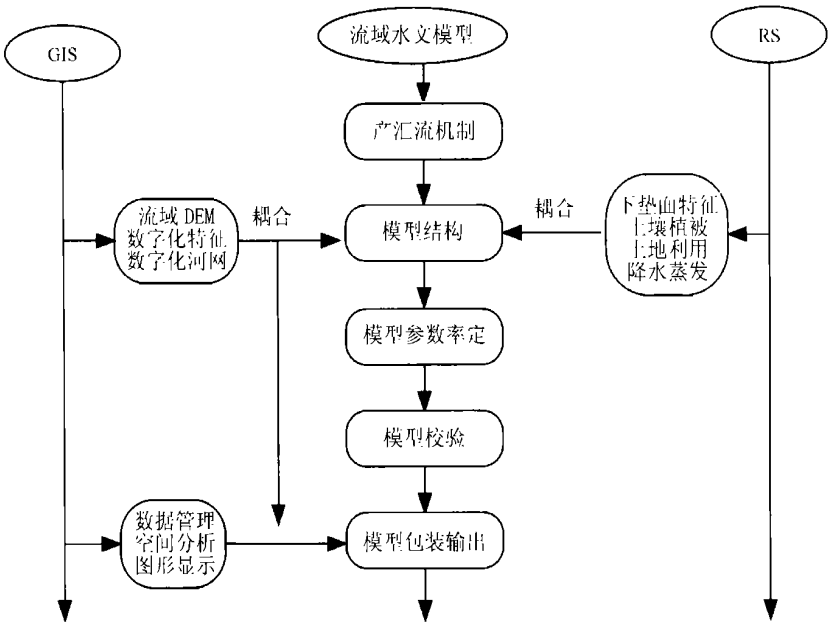


图 1 RS、GIS 耦合的流域水文模型结构示意图

Fig. 1 Illustration of the watershed hydrological model soundled with RS and GIS

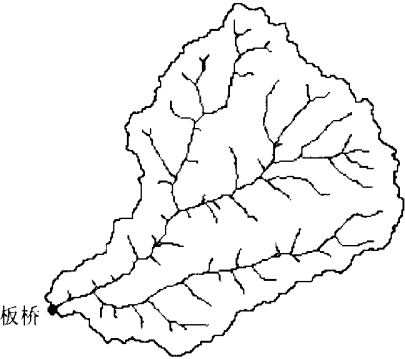


图 2 1 25 万DEM 生成的板桥流域水系图

Fig. 2 Drainage network of Banqiao basin generated by 1 250 000 DEM

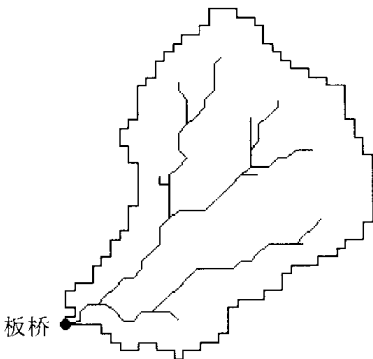


图 3 1 100 万DEM 生成的板桥流域水系图

Fig. 3 Drainage network of Banqiao basin generated by 1 1 000 000 DEM

可以确定采集信息源的分辨率, 如DEM 的空间分辨率、遥感数据源的时空分辨率等, 而分辨率的不同直接影响着水文模拟的精度。图2、图3为两种不同空间分辨率的DEM 生成的同一流域的水系图, 该流域为径河流域马莲河的支流板桥流域, 面积 807 km^2 , 河网水系的生成采用 J. Garbrecht、L. Martz 的 DEDNM 模型, 该模型的原理和方法文献 [21~ 23] 有了详细的介绍。对这样一个流域尺度, 从形状看, 两种分辨率生成的河网水系与实际是一致的, 但很明显看出分辨率高的DEM 的结果更精确, 具体到流域分块或网格化模拟中, 高分辨率的将肯定具有精度高的模拟结果。不同的尺度对数据源的时空分辨率有不同的要求, 但就具体的一般流域尺度而言, 如果流域的时空不均匀性和变异性大, 对反映这些特性的信息源的精度就有更高的要求, 这里又同时涉及到计算机的处理能力问题。由于水文变量时空分布的不均匀性和水文过程转换的复杂性, 水文尺度问题和不同尺度之间水文信息转换的研究还存在很多困难, 尺度问题还远未得到解决^[31]。因此, 在现代流域模拟中, 无论是从宏观综合还是微观研究, 尺度问题始终是关注和研究的焦点。

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]. 水利电力出版社, 北京, 1984
- [2] Singh V P. 水文系统 流域模拟[M]. 赵卫民 等译 郑州: 黄河水利出版社, 2000
- [3] 袁作新 流域水文模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990
- [4] Freeze R A, Harlan R L. Blueprint of a physically-based digitally-simulated hydrological response model[J]. *Journal of Hydrology*, 1969, **9**: 237-258
- [5] Abbott M B, Bathurst J C et al. An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique European, "SHE "1: history and philosophy of a physically based distributed modeling system [J]. *Journal of Hydrology*, 1986a, **87**: 45-59
An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique European, "SHE "2: structure of a physically based distributed modeling system [J]. *Journal of Hydrology*, 1986b, **87**: 61-77.
- [6] Storm B, Jensen K H. Experiences with field testings of SHE on research catchments[J]. *Nordic Hydrology*, 1984, **15**: 283-94
- [7] Charbonneau R, Fortin J P, Morin G. The CEQUEAU model: description and examples of its use in problems related to water resource management[J]. *Hydrological Science Bulletin*, 1977, **22**(1/3): 193-202
- [8] Refsgard J C, Hansen E. A distributed groundwater/surface water model for the Susa-catchment, Part I——model description[J]. *Nordic Hydrology*, 1982, **13**: 299-310
- [9] Benven K J. A discussion of distributed modeling[A]. In: Abbott M B, Refsgard J-C eds. Distributed Hydrological Modelling[C]. Kluwer, Dordrecht, 1996 255-278
- [10] 李兰 等 流域水文数学物理耦合模型[A]. 见: 朱尔明 编 中国水利学会优秀论文集[C]. 北京: 中国三峡出版社, 2000 322-329.
- [11] 李兰 等 流域水文分布动态参数反问题模型[A]. 见: 朱尔明 编 中国水利学会优秀论文集[C]. 北京: 中国三峡出版社, 2000 48-54
- [12] 郭生练 等 分布式流域水文物理模型的研究现状与进展[A]. 见: 刘昌明 等编 黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究和进展[C]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001 51-57.
- [13] 张建云 等 气候异常对我国水资源及水分循环影响的评估模型研究[D]. 国家“九五”重中之重科技攻关项目, 2000
- [14] 郭生练 等 基于DEM 的分布式流域水文物理模型[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, **33**(6).
- [15] 郭生练 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).
- [16] 周成虎 地理信息系统概要[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992
- [17] 魏文秋, 于建营 地理信息系统在水文学和水资源管理中的应用[J]. 水科学进展, 1997(9): 296-300

- [18] Martz W, Garbrecht J. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models[J]. *Computers & Geosciences*, 1992, **18**(6): 747-761.
- [19] Beven K J. Distributed Hydrological Modelling Applications of the TOPMODEL Concept[M]. WILEY, 1997.
- [20] 郭方等. 以地形为基础的流域水文模型——TOPMODEL 及其拓宽应用[J]. *水科学进展*, 2000(9): 296-301.
- [21] 任立良, 刘新仁. 数字高程模型在流域水系拓扑结构计算中的应用[J]. *水科学进展*, 1999(6): 129-134.
- [22] 任立良. 流域数字水文模型研究[J]. *河海大学学报*, 2000(7): 1-7.
- [23] Martz W, Garbrecht J. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models[J]. *Computers & Geosciences*, 1992, **18**(6): 747-761.
- [24] 胡著智等. 遥感技术与地学应用[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999.
- [25] 刘昌明等. 水文循环过程理论与方法的研究进展[A]. 见: 刘昌明等. 黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究和进展[C]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001. 22-33.
- [26] 王燕生. 遥感水文模型及其应用[J]. *水文*, 1989(5): 20-24.
- [27] 魏文秋, 谢淑琴. 遥感资料在SCS模型产流计算中的应用[J]. *环境遥感*, 1992(4): 243-250.
- [28] 徐雨清等. 遥感和地理信息系统在半干旱地区降雨——径流关系模拟中的应用[J]. *遥感技术与应用*, 2000.
- [29] 王腊春, 熊江波. 用遥感资料建立分块产流模型[J]. *地理科学*, 1997(2): 76-80.
- [30] 夏军. 水文学科发展与思考[A]. 见: 21世纪中国水文科学研究的新问题新技术和新方法. 北京: 科学出版社, 2001. 18-27.
- [31] 陈喜, 陈永勤. 水文过程中的尺度问题[A]. 见: 21世纪中国水文科学研究的新问题新技术和新方法. 北京: 科学出版社, 2001. 28-37.

Progress in Watershed Hydrological Models

WU Xian-feng¹, LIU Chang-ming^{1,2}

(1. Institute of Environmental Science, Beijing Normal University, Beijing 100875 China;

2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101 China)

Abstract: With the development of computer technology and intercross subjects, the methods of hydrology simulation have great advances. The remarkable trends of watershed hydrological models are the research of physically distributed based models and the use of Geography Information System (GIS) and Remote Sensing (RS) technology. The hydrological model integrated with GIS has many advantages, but it does not mean that the model itself is with high quality. The data arrived from RS is difficult to use in hydrological model directly. Study on mechanism of runoff and streamflow has great foreground to build hydrological model coupled with GIS and RS, and hydrological scale problems should always be paid attention to.

Key words: Hydrological model; physically distributed based model; RS; GIS; Scales