

基于 GIS/RS 的流域水文过程分布式模拟 ——模型的校检与应用

郑红星^{1,2}, 王中根¹, 刘昌明^{1,2}, 赵为民³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;
2. 北京师范大学环境科学研究所, 北京 100875; 3. 黄河水利委员会水文局, 河南 郑州 450003)

摘要: GIS/RS 是流域水文过程分布式模拟的重要技术支撑。结合泾河流域的实例研究, 探讨了 GIS 支持下, 基于栅格 DEM 流域水文特征的获取, 降水、气温等资料的空间插值, 以及土壤、植被等下垫面信息在水文模拟单元上的耦合。在此基础上, 应用分布式水文模型对泾河流域的水文过程进行模拟。结果表明: 所建模型结构上是合理的, 在产流计算中泾河 25 个子流域在水量平衡方面误差均小于 5%。潜在蒸发的模拟在趋势上与实测过程基本一致。径流模拟在 4 个检验站点上与实测过程的相关系数达到 0.84~0.93。模型基本能够满足水资源规划与管理的需要。

关键词: 地理信息系统; 遥感; 分布式水文模拟; 泾河流域

中图分类号: P333.2; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2004)04-0506-05

地理信息系统(GIS)在分布式水文模拟中的应用可概括为: 由数字高程模型(DEM)提取流域特征,包括水流的流向、河网的拓扑结构、子流域的连接关系、河道特征参数、流域边界等数字特征。同时,应用GIS技术,还可将流域进一步细分,网格化或者单元化,作为分布式模型的地形基础。通过GIS技术,一方面可以将把空间点上的数据(如降水、气温等)通过插值方法给出各个水文单元的相应信息;另一方面可把土地利用、土壤类型等下垫面信息耦合到以分布式水文模拟单元上,提供水文模拟的基本输入。此外,应用GIS强大的空间表达手段可进一步将模拟的结果通过图表、三维显示、虚拟景观等技术表现出来,有助于更好地理解和分析水文现象和水文过程。本文重点就前两方面的内容,结合泾河流域的分布式水文模拟加以研究。

1 资料预处理

泾河位于六盘山东,全长450 km,流域面积为45 421 km²,为渭河的一级支流、黄河的二级支流。泾河流域范围内包括泾源、彭阳、固原县东南部和盐池县的麻黄山地区。流域内年降水量由南向北递减,平均510 mm,平均年径流深为70 mm,平均年输沙量为2 170万t^[1,2]。

在对泾河流域进行分布式水文模拟时,应用了以下几方面的资料:流域的地形、植被、土壤等下垫面信息;降水、气温、流量等地面观测站的水文气象资料。本文采用的地形资料为中国科学院地理科学与资源研究所提供的1:25万的DEM;植被和土壤为国家测绘院1:400万的地图资料;气象资料主要来自国家气象局,流域内气象站点共6个;水文资料由黄河水利委员会水文局提供。此外,本次研究中还采用了美国国家海洋大气管理局的高级十分高分辨率雷达(NOAA AVHRR)的标准化差示植被指数(NDVI)影像,分辨率为1 km × 1 km。

1.1 基于DEM的流域特征信息提取

流域水文模型从集总式向分布式模型转变,需要更详细的流域空间分布特征参数信息,应用GIS技术软件,如ESRI的ArcInfo和ArcView、RSI的River Tools以及TOPAZ等等,从DEM自动提取这些参数已变得十分容易。

收稿日期:2003-09-10;修订日期:2003-12-10

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(G19990436-01)

作者简介:郑红星(1973-),男,福建永春人,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zhenghx@igsnrr.ac.cn

河网的拓扑关系是进行河道汇流演算和模型空间循环控制的主要依据。流域水系拓扑关系的建立采用集水单元数法。首先，对流域 DEM 进行平滑与填洼处理，生成无洼地 DEM、水流方向矩阵和水流累积矩阵 3 个基本水文数字矩阵。本例取最小集水面积阈值为 100 km²，采用单流向法生成泾河流域水系。

在流域分布式水文过程模拟中，为了考虑气象因素(如降水、气温、辐射等)和下垫面(如地形、土壤、植被覆盖等)的空间变异性需要将流域进行离散化。本文采用子流域离散方法，该方法最大优点是子流域之间的水文过程十分清晰。本例子流域划分为 25 个。

本文模型的产流计算采用基于地形指数($\ln(\frac{1}{\tan \alpha})$)的方法。本例中基于栅格 DEM(100 m ×100 m) 分别计算出泾河 25 个子流域的每个网格单元的地形指数值。结果表明，泾河流域平均高程为 1 390 m，平均坡度为 6.3。地形指数变化范围为 7.9 ~ 11.2，按面积加权均值为 8.2。图 2 表明，靠近下游、坡度较缓的地区地形指数较大。按照从大到小的次序将地形指数分为 28 类，绘制出每个子流域的“地形指数 ~ 面积分布曲线”。由图 2(b)可以看出，在 25 个子流域中有 23 个子流域的“地形指数 ~ 面积分布曲线”近似为伽玛分布。

1.2 流域水文参数化

流域分布式水文过程的模拟除了基于 DEM 提取的基本地形信息

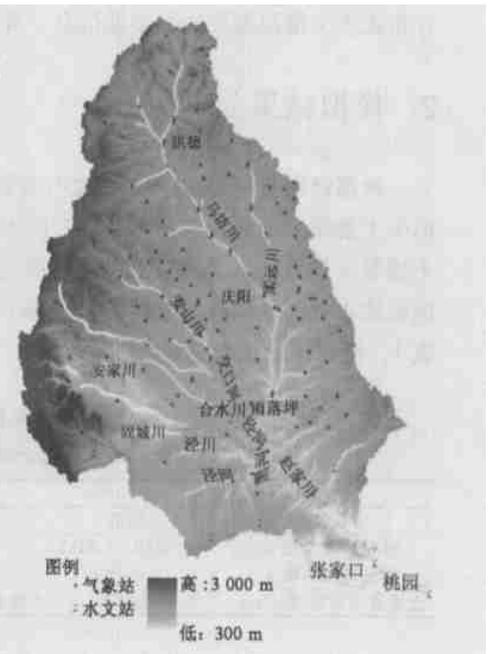


图 1 泾河流域 DEM 与水文气象站点
Fig.1 DEM and hydro-meteorological stations of Jinghe basin

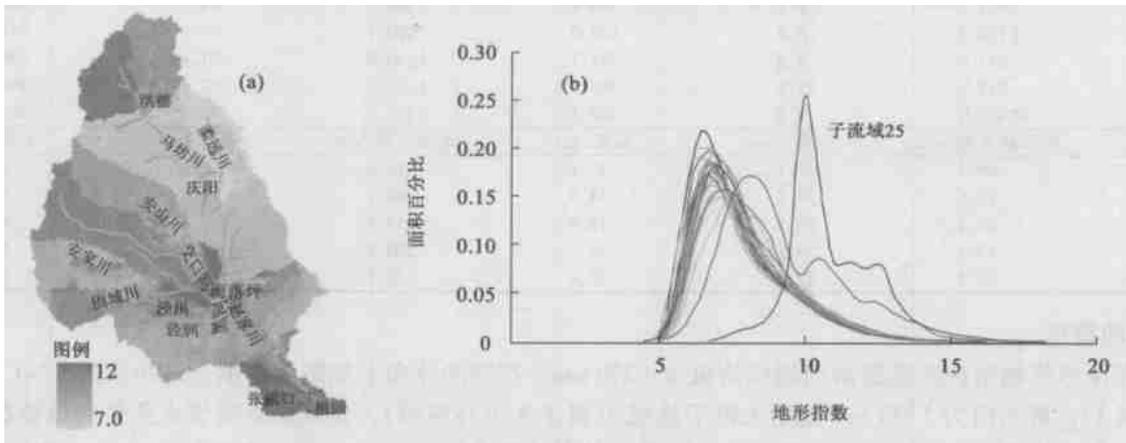


图 2 (a) 泾河地形指数均值空间分布；(b) 子流域地形指数 ~ 面积分布曲线
Fig.2 Topographic index (a) and TFarea curves (b) of sub-basins in the Jinghe basin

外，还有两类重要的信息。一是流域的气象水文信息，在本文中主要包括降水、气温等信息。这一类的信息通常都是由于流域内有限观测点的信息构成的，不足以反映各子流域的气象水文特征。对于这类信息，目前主要采用插值的方法以获取空间分布信息。关于降水的空间插值，采用线性空间插值从最邻近的三个雨量数据中生成一个单元的降水数据。在高程起伏较大的地区(如山区)，气温的变化有时更依赖于高程而不是水平的位置。气温的插值分 3 步进行。首先把已知测站的观测值根据其所在的高程按环境温度下降率(平均 - 0.65 /100 m)转化到相同高程平面上的值,在此基础上用特定的方法进行空间插值，然后再结合各单元网格的高程，按温度下降率对空间插值结果进行高程修正。

另一类信息则是植被、土壤等下垫面信息。植被和土壤等空间信息的离散是基于划分的子流域边界，应用 GIS 软件的分析统计功能，求子流域内各不同类型植被或土壤所占的面积比，由此得到的面积百分比即为流域

分布式水文模拟重要的下垫面信息，并进而确定相关的模型参数。

2 模拟结果分析

根据泾河流域 1996 年的水文气象资料，对文献[1]中所提出的模型进行分布式水文过程的模拟与检验。模拟中主要输入项为：泾河流域逐日降水、最高与最低气温，以及前文中基于 DEM 获取的流域特征信息和植被土壤等下垫面信息。模型主要输出项为：1996 年泾河流域逐日的蒸发、冠层截留、产流(坡面流和基流)、土壤饱和缺水量的空间分布数据，以及各个子流域出口断面的径流过程线。经过初步调试，模型的主要参数取值见表 1，模拟统计结果见表 2。

表 1 泾河流域分布式水文过程模拟主要参数

Table 1 Some parameters of distributed hydrological modeling in the Jinghe basin

蒸发模拟		产流模拟		汇流模拟	
参数	取值	参数	取值	参数	取值
潜在蒸发参数 a	0.0030 ~ 0.0032	地形指数	7.9 ~ 11.2	分段数 n	2 ~ 5
潜在蒸发参数 b	0.5 ~ 0.6	参数 m	6 ~ 8	蓄量常数 K	3 ~ 7
土壤蓄水容量 Wm/mm	120 ~ 200	土壤饱和导水率 $T0/(m^2 h^{-1})$	8.0 ~ 10.5	流量比重因子 X	0.1 ~ 0.2

表 2 1996 年泾河流域分布式水文过程模拟统计结果

Table 2 Statistics of distributed hydrological modeling results in the Jinghe basin, 1996

子流域	面积/ km^2	地形指数	降水/ mm	潜在蒸发/ mm	冠层截留/ mm	实际蒸发/ mm
1	2441.2	8.2	349.9	1287.7	78.1	318.1
10	1128.7	8.6	628.0	1260.1	95.7	561.0
17	841.0	8.2	711.7	1240.9	101.1	536.3
25	513.3	11.2	597.9	1277.4	67.1	494.9
泾河流域	45421.0	8.2	561.1	1270.4	94.4	482.3 子流域
子流域	饱和缺水量/ mm	下渗/ mm	基流/ mm	地表径流/ mm	总产流量/ mm	径流系数
1	26.4	24.7	10.7	11.3	22.0	0.063
10	23.6	27.2	14.3	61.7	76.0	0.121
17	24.3	34.5	19.4	157.7	177.1	0.249
25	13.8	29.1	15.5	100.8	116.3	0.195
泾河流域	25.4	27.5	13.4	70.7	84.1	0.149

2.1 蒸发的模拟

1996 年泾河流域潜在蒸发按面积加权均值为 1270 mm。在空间分布上如图 3 所示，最小值为 1241 mm 位于中游子流域 17，最大值为 1314 mm 处于上游子流域 3(属于支流马连河)。实际蒸发受供水条件和植被覆盖等因素的影响，在空间分布上不同于潜在蒸发。实际蒸发的年均值为 482 mm，占潜在蒸发的 37.9%。最小值为 318 mm 位于上游子流域 1，最大值为 570 mm 处于中游子流域 19。

2.2 产流的模拟

产流模拟主要涉及蒸发、下渗、饱和坡面流、基流和土壤饱和缺水量等几个环节。水量平衡分析结果表明，25 个子流域的水量平衡系数为 1.01 ~ 1.05。其中，“(下渗量 - 基流 - 深层蒸发)/土壤饱和缺水量的变化量”得到的水量平衡误差均小于 1%。说明模型产流计算满足水量平衡的要求。如表 1 所示，1996 年泾河流域总产流量为 84 mm，其中，基流占 16%。径流系数为 0.149。产流量空间分布如图 4 所示，最大产流区集中在低纬度地区，如茹河、洪河、达溪河、三水河等支流区。

$$\text{水量平衡系数} = (\text{总蒸发量} + \text{总产流量} + \text{土壤饱和缺水量的变化量}) / \text{总降水量}$$

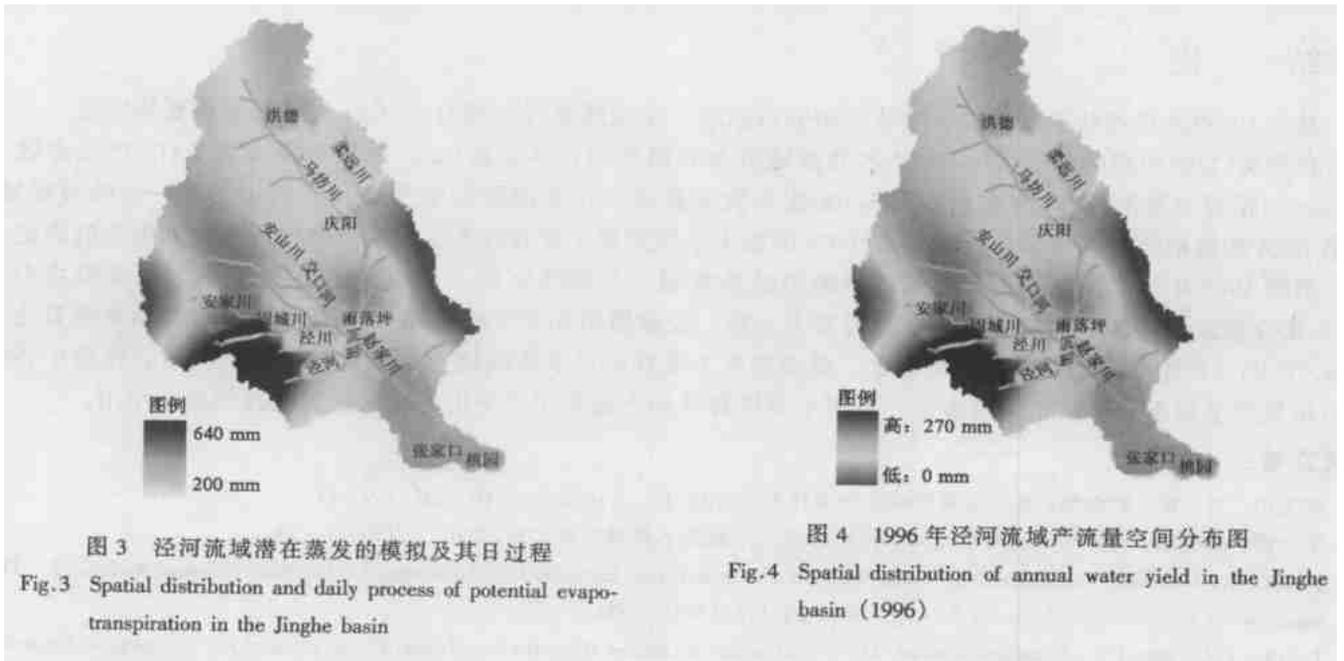


图 3 泾河流域潜在蒸发的模拟及其日过程

Fig.3 Spatial distribution and daily process of potential evapotranspiration in the Jinghe basin

图 4 1996 年泾河流域产流量空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of annual water yield in the Jinghe basin (1996)

2.3 径流过程的模拟

1996 年泾河流域河网汇流演算中 25 个子流域的主河道分别被分为 2~5 段不等。径流模拟结果中(图 5) ,4 个检验站点的模型确定系数均在 0.7 以上, 日径流模拟与实测过程线之间的相关系数达到 0.84~0.93。

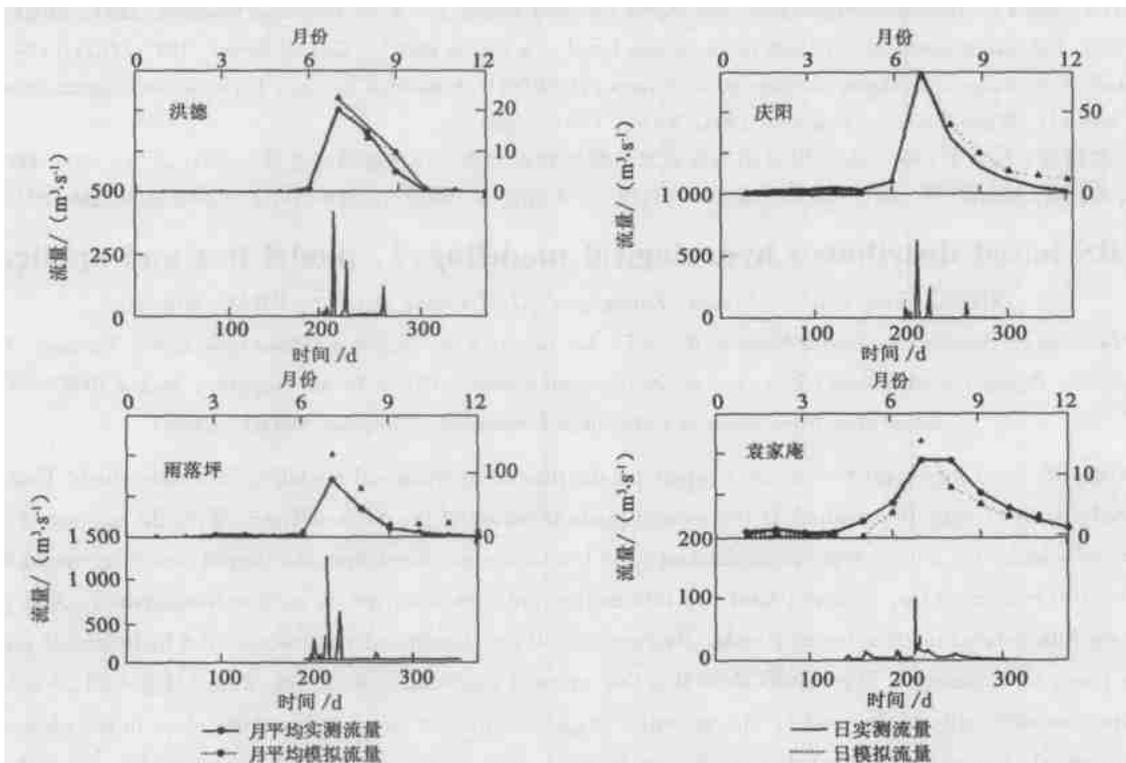


图 5 1996 年泾河部分子流域径流的模拟与实测过程线

Fig.5 Comparing simulation runoff and observed runoff of sub-basins in the Jinghe basin

3 结 论

基于 GIS/RS 技术获取流域水文循环空间分布信息,是成功进行流域分布式水文模拟的重要环节之一。为此,在论文(1)中构建的基于 GIS/RS 技术的流域分布式模型的许多参数(如,冠层截留参数 LAI、产流参数 $\ln(1/\tan \alpha)$ 、汇流参数河长等)能够利用 GIS/RS 技术快速获取。在实例研究中文结合黄河中游区——泾河流域,利用 DEM 的提取流域特征信息、基于 GIS/RS 的技术手段实现了分布式水文模型空间输入数据和参数的确定。

根据 1996 年泾河流域分布式水文过程模拟结果表明,产流部分 25 个子流域在水量平衡方面误差均小于 5%。潜在蒸发的模拟在趋势上与实测过程基本一致。径流模拟在 4 个检验站点上与实测过程的相关系数达到 0.84~0.93,模型确定系数均在 0.7 以上。模型基本上能够满足水资源规划与管理的需要。同时,模型中还包含与植被类型和土地覆被相关的参数,可用于分析森林和土地利用的变化对流域径流过程的影响作用。

参考文献:

- [1] 冉大川,刘 斌,罗全华,等. 泾河流域水沙变化水文分析[J]. 人民黄河,2001,23(2):9-11.
- [2] 王小艳,高建恩,安梦雄. 泾河水沙基本特性分析[J]. 西北水资源与水工程,2001,12(3):21-24.
- [3] Jenson S K, Domingue J O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54(11):1593-1600.
- [4] Tarboton D G, Bras R L, I Rodriguez-Iturbe. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data[J]. Hydrological Processes, 1991, 5: 81-100.
- [5] Nelson E J, Smemoe C M, Zhao B. A GIS Approach to Watershed Modeling in Maricopa County[A]. Arizona American Society of Civil Engineers. Water Resources Planning and Management Conference[C]. American Society of Civil Engineers, USA, 1999, 6-10.
- [6] Fairfield J, Leymarie P. Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models[J]. Water Resources Research, 1991, 30(6):1681-1692.
- [7] Freeman T G. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid[J]. Comput Geosci, 1991, 17(3):413-422.
- [8] Costa-Cabral M C, Burges S J. Digital elevation model networks (DEMOM): A model of flow over hill slopes for computation contributing and dispersal areas[J]. Water Resources Research, 1994, 30(6):1681-1692.
- [9] 王中根,刘昌明,左其亭,等. 基于 DEM 的分布式水文模型构建方法[J]. 地理科学进展,2002,21(5):430-439.
- [10] 王中根,郑红星,刘昌明,等. 基于 GIS/RS 的流域水文过程分布式模拟——模型的原理和结构[J]. 水科学进展,2004,15(4):501-505.

GIS/RS based distributed hydrological modeling, 2, model test and application^{*}

ZHENG Hong-xing^{1,2}, WANG Zhong-gen¹, LIU Chang-ming^{1,2}, ZHAO Wei-min³

(1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Key Lab. of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Institute of Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Yellow River Water Resources Conservation Commission, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: GIS/RS is an important technology support for distributed hydrological modeling in a watershed. This paper carries out a case study on the Jinghe River which is the second grade tributary of the Yellow River. With the support of GIS, the watershed characters including slope, river networks and river length are extracted from the digital elevation model with a resolution of 100-by-100 meters. Also, soil and land use information are parameterized to each sub-watershed. And precipitation, temperature are interpolated to all sub-watersheds. By coupling all the distributed parameters, the hydrological processes of the Jinghe River basin are simulated. The results show that the errors of water balance are less than 5% for all 25 sub-watersheds, which indicates the rationality of the model. The potential evapotranspiration simulated is quite close to the observation. As for the four hydrological stations, the correlation coefficient between daily runoff observed and simulated is about 0.84~0.93.

Key words: GIS; RS; distributed hydrological modeling; Jinghe basin

^{*} The project is supported by the National Basic Research Program of China(No. G19990436-01).