

HEC - HMS 水文模型系统在汉江 褒河流域的应用研究

雍斌¹, 张万昌², 赵登忠¹, 朱求安¹

(1. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093;

2. 中国科学院 大气物理所 全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029)

摘要: 基于地理信息系统和遥感技术的水文模型集成系统将成为未来水文循环过程研究的发展趋势。基于 HEC - HMS 水文模型系统, 采用多种方案对位于汉江上游的褒河流域进行了降雨径流模拟。研究表明: 基于 DEM、遥感影像和土壤资料, 并结合 GIS 技术推求反映流域下垫面特征的关键水文参数的方法可以与 HEC - HMS 水文模型系统很好地耦合。该模型对于我国湿润、半湿润山区的次洪模拟具有较好的适用性。

关键词: 汉江流域; 水文模型; HEC - HMS 模型系统

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 288X(2006)03 - 0086 - 05

中图分类号: P333

Application of Hydrological Modeling System HEC - HMS to Baohe Catchment of Hanjiang Basin

YONG Bin¹, ZHANG Wan-chang², ZHAO Deng-zhong¹, ZHU Qiu-an¹

(1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu Province, China;

2. Regional Climate Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmosphere Physical, CAS, Beijing 100029, China)

Abstract: The integration of hydrological model system with GIS and remote sensing technology will be the prevailing trend in the study of hydrological cycle or processes in the future. The main purpose is to simulate the productive mechanism of runoff over the Baohe catchment located in the upstream of the Hanjiang River using hydrologic modeling system HEC - HMS, which includes several kinds of modules. Then DEM, soil data, landuse and landcover are processed synthetically using Geo-HMS (extended module of HEC - HMS), which can be embedded in ArcView3.2 software, and some important parameters in this hydrologic model system could be gotten. In succession, a sort of watershed modeling scheme with network elements is established after selecting and integrating the simulated algorithms of each hydrologic process. The result shows that the simulated flow agrees well with the observed flow at the Jiangkou station, the outlet of the Baohe catchment.

Keywords: Hanjiang basin; hydrologic model; HEC - HMS model system

水文模型的实质就是用数学方法进行水循环的描述和模拟, 它为水资源管理和决策提供了最为基础的技术手段和参考依据^[1]。近年来, 随着遥感和 GIS 技术的日益成熟, 可以方便地获取不同时空分辨率的大量水文、气象、植被、土壤数据等模型重要参数^[2-4], 特别是基于 DEM 的水文模型系统的应用和研究已成为现代水文模型的发展趋势之一。由于各个水文过程有着不同的模拟方法, 因而根据研究区的地形、土地利用、土地覆盖、土壤特性, 对这些方法进行优选搭配, 针对该研究区建立最佳的模拟方案, 对

于陆表水文循环研究有着非常重要的意义。本文就是基于美国陆军工程团水文工程中心发布的 HEC - HMS 水文模型系统, 对位于汉江上游的褒河流域进行了暴雨径流模拟。根据相关文献资料以及实地考察数据, 针对该流域, 本研究建立了包括 19 种土壤类型的土壤数据库和径流曲线数表。在对水文过程各种模块进行优选搭配之后, 建立了一种具有网络要素特征的松散耦合型的半分布式流域模拟方案^[5], 以该流域 1980—1984 年间 5 次洪水作为模拟对象, 以小时为时段进行了暴雨径流过程模拟。

收稿日期: 2005-09-12

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2006CB400502, 2001CB309404); 中国科学院“百人计划”启动项目 (8 - 047401); 教育部科学技术重点项目 (2001)

作者简介: 雍斌 (1975 -), 男 (汉族), 安徽省马鞍山市人, 博士研究生, 主要从事遥感与地理信息系统及其在水文学中的应用方面的研究。
E-mail: yongbin@tea.ac.cn.

1 研究区概况和数据预处理

研究区在陕西省南部汉江上游襄河流域,经度 106°48'15" — 107°25'34", 纬度 33°38'03" — 34°11'08", 流域集水面积约为 2 500 km², 海拔 900 ~ 3 400 m。流域属于温暖带湿润气候区, 具有气候温和, 雨量充沛的特点。流域内植被覆盖度较高, 自然植被保护良好, 其中大部分为温带落叶阔叶林和温带落叶灌丛, 剩余的是少量的温带亚热带针叶植物及一些温带草丛和草甸等^[6]。研究区的原始数据资料主要有: 由 1:250 000 比例尺的地形图数字化生成的 USGS 标准格式 60 m 分辨率的 DEM 文件; 由 2001 年 7 月 28 日的 Landsat ETM+ (Pass36, Raw128) 遥感影像经过监督分类解译得到的流域的土地利用/覆盖图; 由 1:250 000 比例尺的土壤类型图数字化生成的研究区土壤图; 由研究区内 10 个雨量站和 3 个气象站提供的气象水文资料; 由流域的断面流量控制站点江口站提供的小时段洪水实测流量资料^[7]。

在数据预处理过程中, 本文首先运用内嵌于 ArcView 软件中的 Geo-HMS 数据处理模块对研究区的 DEM 数据进行流域提取、河网生成以及水文过程所需的地形参数计算等。

通过填凹、流向计算、有效积水面积计算、河道提取、边界提取、子流域划分、流域出口定义等 GIS 技术手段进行处理, 最后得到了有关整个流域的地形特征和河流特征参数。接着, 将研究区划分为 15 个子流域, 并对各个子流域进行了坡度计算、流域中心位置计算、最长水流路径计算、水力参数计算及 HMS 水文模型网络要素的设定等。

然后根据土壤图及相关文献资料^[8], 建立了包括棕壤、黄棕壤、褐土等 19 种土壤类型的流域土壤数据库。基于陕西土壤的类型、性状和理化性质的定量化分析, 计算出每一种土壤中砂土、壤土、黏壤土和黏土的百分比含量。

另外, 由遥感影像解译得到的土地利用/覆盖图包括了 6 种植被类型: 湿地森林、落叶森林、灌木丛、常绿森林、密松杨林和疏松杨林等。在 ArcView 软件中对土地利用/覆盖层和土壤层进行空间叠合分析, 得到了整个流域的 60 m 分辨率的 CN 曲线数栅格图如附图 1 所示。

最后利用 Geo-HMS 数据处理模块生成输出 HEC-HMS 所需要具有网络要素特征的子流域划分图, 并基于图 1 计算出各个子流域土壤湿度为中等湿润条件下的平均 CN 值, 从而进一步推求其它条件下的 CN 值及相关水文参数^[9]。

2 模拟方案的选择与建立

HEC-HMS 水文模型系统是美国水文工程中心降雨径流模型 HEC 的新一代软件产品, 模型主要由 C、C++ 和 Fortran 语言混编而成。该模型系统由 3 套组件构成: 气象模式、流域模式与模拟控制^[10]。

气象模式主要对气象数据进行分析处理, 包括降水与蒸散发过程。在该模式中有 6 种不同的计算降水的方法和一种计算蒸散发的方法可供选用。关于降水空间插值处理, 本文采用以距离为权重的插值方法, 对研究区内的每个子流域均匀选取若干插值点。对每个插值点则采用插值公式(1)进行计算。

$$P_w = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2} \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} \quad (1)$$

式中: n ——参与计算的气象站点数; d_i ——第 i 个站点到待测站点的距离; P_i ——第 i 个站点所对应的观测数据; P_w 即为插值后的结果。最后基于这些插值点获取各子流域的降水空间分布图。由于本文研究对象是短时段洪水过程, 因此蒸散发过程对研究结果影响很小, 本文没有单独考虑, 而是作为降水损耗在流域模式中, 与下渗、截流等过程一并计算。

流域模式将每个子流域中的水循环划分为降水损耗、直接径流、基流和河道汇流 4 个部分。模式中降水经植被截留、地表填洼、植物蒸发蒸腾以及下渗的损失量和能否产流的计算称为损失计算过程; 随着降雨进行, 地面积水形成地面径流, 沿着流域表面或土壤表层流入河道, 最终到达子流域出口, 模式中将这个直接径流形成的过程表述为转移过程; 地下水、壤中流对河道流量的补偿过程为基流过程; 最后是河道汇流过程^[11]。

流域模式中提供了 7 种估算降水损耗的方法: 盈亏常数法 (deficit and constant)、格林—安普特法 (Green and Ampt)、栅格 SCS 曲线数法 (gridded SCS curve number)、栅格土壤湿度法 (gridded soil moisture accounting)、初损常数法 (initial and constant)、SCS 曲线数法 (SCS curve number)、土壤湿度法 (soil moisture accounting)^[11]。其中 SCS 曲线数法是经验型的降雨径流计算方法, 它避开了纯粹的干旱区超渗产流和湿润区蓄满产流 2 种极端的产流机制, 而是通过经验关系来计算各个子流域或水文响应单元的产流, 关键参数 CN 是从研究区土壤类型、植被覆盖度、地表状况、植被类型以及前期土壤湿度条件计算而来的。这一方法简单合理, 为许多国家的研究人员所接受并加以运

用。本文就是选用 SCS 曲线法作为降水损耗的计算模块。

满足了下渗、截流、蒸发、蒸腾损失,剩余的降水成为地表径流,模拟进入转移过程。本文首先选取了由各个子流域下垫面特性计算出来的子流域滞后时间作为参数输入的 SCS 单位线模型来模拟地表径流过程,以检验 CN 值的有效性;然后又选取了比较适合中等尺度流域的 Snyder 单位线模型与之对比,以寻求最佳模拟方案。

本文在流域的基流模拟中选用指数衰减模型。指数衰减模型能够很好地描述流域中蓄含水量在无雨期向流域河流进行水量补充的过程。该模型运行中需要率定的参数有 3 个:初始基流;衰减常数;衰减阈值^[11]。

由于马斯京根河道汇流演算模型的计算方法简单,模拟效果好,需要率定的参数少,因此在国内外水文模拟研究中有极为广泛的应用^[12],本文就是选取马斯京根演算模型作为河道汇流模型。

3 模拟结果与分析

汉江上游降雨量年际变化很大,年内分配不均。本文在模拟之前对降水数据进行了初步的统计分析,结果发现 1980 年与 1981 年降水多、流量大,明显为丰水年,而 1983—1984 年降水相对少很多,为枯水年。因此,本文首先利用 1980 年和 1981 年两丰水年实测径流数据对 SCS 曲线法的关键参数 CN 值进行探索性验证,以检验通过 DEM 数据、遥感数据和土壤数据计算获取 CN 值的方法的可靠性。

3.1 方案一模拟结果与分析

本文的模拟方案一所选用的模块组合是:SCS 曲线法、SCS 单位线法、指数衰减基流模型、马斯京根

河道汇流演算模型。SCS 曲线法的相关水文参数已由数据预处理获得。SCS 单位线法只有一个参数即流域滞后时间参数,它可以通过流域特性在 Geo-HMS 模块中直接计算得到。在暴雨过程中基流参数的贡献不大,因此最需要率定的只有马斯京根演算参数:蓄量常数 K 和流量比重因子 X 。本文首先对 1980 年洪水参数进行率定,然后基于以上率定结果直接对 1981 年洪水进行校验。实验结果发现率定期的 Nash 系数(确定性系数)达到 0.79,而基于率定后的参数对 1981 年洪水直接校验也达到了 0.72;峰现时间滞后均为 1 h。

模拟方案一的研究结果表明,该研究的数据综合预处理的方法是合理可行的,估算的水文参数是准确有效的。

3.2 方案二模拟结果与分析

基于以上初步的验证过程,本文拟定了更适合研究区特点的模拟方案二对 1980—1984 年间 5 次洪水进行了暴雨径流模拟,模拟的流量过程线如图 1 所示。模拟方案二的模块组合是:SCS 曲线法、Snyder 单位线法、指数衰减基流模型、马斯京根河道汇流演算模型。大量实验研究表明 SCS 单位线法比较适合较小流域(一般小于 8 km^2)的径流模拟,而 Snyder 单位线法对于中尺度的流域更为适合^[1]。因此为了提高模拟精度,本方案在各子流域地表径流汇入河道过程中采用 Snyder 单位线法。

本文利用模拟方案二对 1980—1983 年间 4 次洪水进行了参数率定,率定期的 Nash 系数(确定性系数)分别为 0.823,0.806,0.732 和 0.856;而基于率定后的参数对 1981 年洪水直接校验也达到了 0.789;5 次模拟的峰现时间均在正负 1 h 以内,洪峰流量和总洪量相对误差也比较小(如表 1 所示)。

表 1 襄河流域(江口站)HEC-HMS 模拟方案二次洪模拟结果

模拟精度指标	洪 号				
	1980062800	1981081500	1983092000	1983100302	1984070900
确定性系数	0.823	0.806	0.732	0.856	0.789
洪量相对误差	-0.170	-0.050	-0.082	-0.009	-0.075
洪峰流量相对误差	-0.190	0.130	-0.100	-0.017	-0.009
峰现滞时/h	1	1	-1	0	1

从以上次洪模拟结果中可以看出:方案二的模拟精度比方案一要稍好一些,但研究区最小的子流域远远大于 8 km^2 ,因而模拟方案二所采用的 Snyder 单位线法无论理论还是实际都更为合理。以上 2 种模拟方案的模拟结果表明:基于 DEM、遥感影像和土壤资料,并结合 GIS 技术推求反映流域下垫面特征的关

键水文参数的方法可以与 HEC-HMS 水文模型系统很好地耦合,进行流域次洪模拟;根据研究区特征确定相关水文参数,然后选择合理的水文过程模块进行优选搭配的方法能够进一步提高模拟精度,从而使构建的模型更准确地描述研究区复杂地形条件下的降雨径流机制。

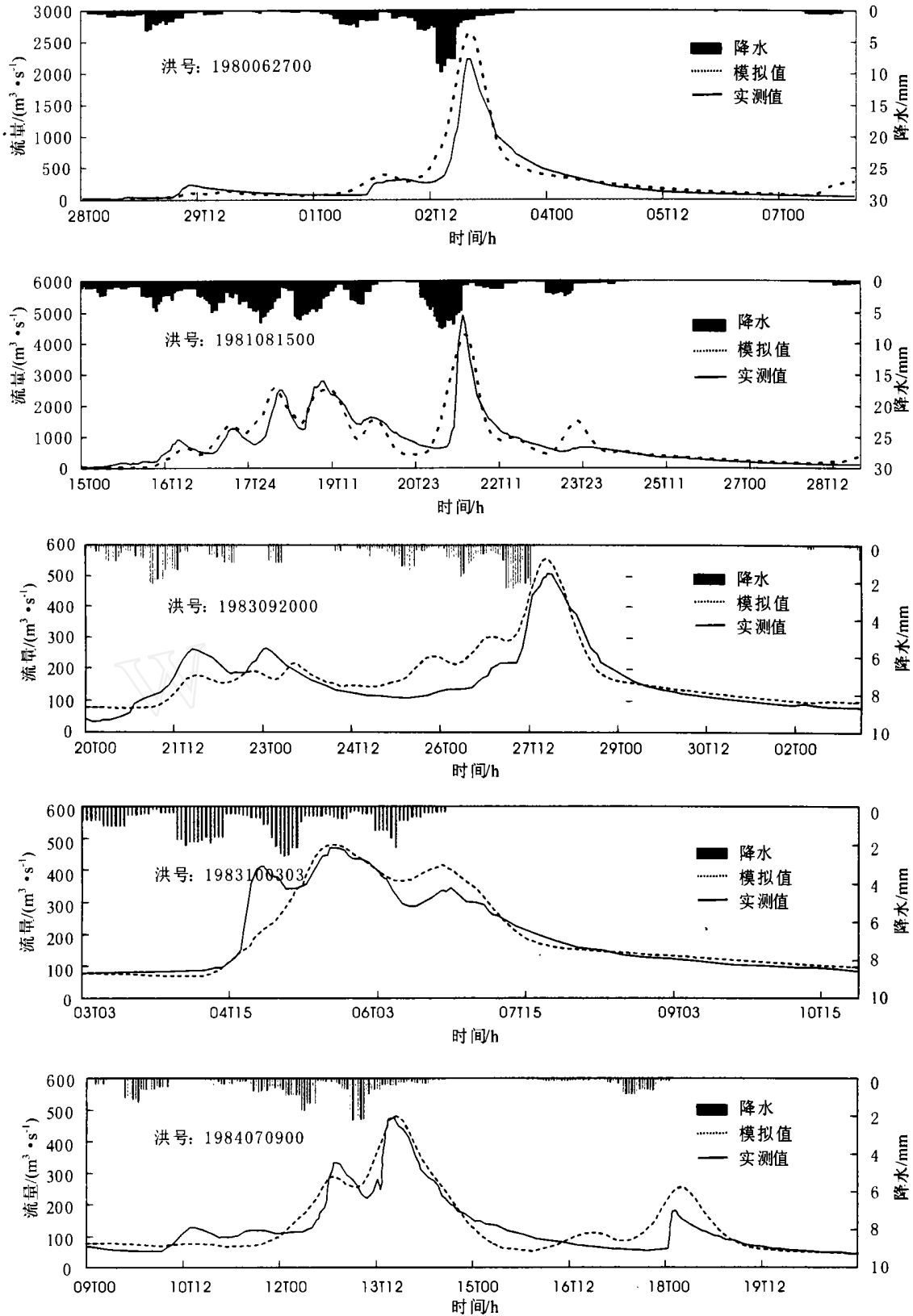


图 1 襄河流域(江口站) HEC- HMS 模拟方案二次洪模拟流量过程线

3.3 方案二与其它模拟方案的对比研究

此外,模型系统提供的另外 2 个较为常用的产流模块是:初损常数法和格林—安普特法。本文分别采

用以上 2 个产流模块替换方案二中的 SCS 曲线数法,做对比性研究,产流模块为初损常数法和格林—安普特法的次洪模拟结果见表 2。

表 2 产流模块为初损常数法(IC)和格林—安普特法(GA)的次洪模拟结果

序号	洪号	确定性系数		洪量相对误差		洪峰流量相对误差		峰现滞时/h	
		IC	GA	IC	GA	IC	GA	IC	GA
1	1980062700	0.731	0.590	-0.171	0.250	0.344	0.663	-2	4
2	1981081500	0.622	0.410	-0.283	0.250	0.520	0.721	0	-1
3	1983092000	0.726	0.780	-0.201	0.031	0.202	0.313	-8	-3
4	1983100302	0.747	0.610	0.029	0.139	0.286	0.376	18	19
5	1984070900	0.609	0.610	-0.195	-0.151	0.408	0.432	-7	-2
误差均值		0.687	0.600	0.176	0.164	0.352	0.501	7	5.8

以上研究表明:模拟方案二所采用的 SCS 曲线数法的模拟精度明显要高于其它 2 种模拟方案,而初损常数法产流方案要优于格林—安普特法产流方案。其原因主要是 SCS 曲线数法充分考虑了流域下垫面细节,其重要参数是通过遥感、GIS 技术从研究区地形、植被、土地利用/覆盖、土壤等信息中计算得到的,因而模型参数准确,方法合理,模拟结果较为精确。初损常数法最为简单,所需要率定的参数少,但它不能很好地反映流域地形、土壤、植被等重要陆面信息,因而模拟效果要差一些。格林—安普特法比较复杂,而且缺少相关资料,参数初值选定及其范围变化会出现一定程度的偏差,因而模拟精度相对最低。模拟方案二对洪水的峰现时间最为准确,5 次模拟均在 1 h 以内。此外,进一步分析发现模拟方案二对雨量丰沛、径流量大的暴雨洪水模拟效果要好,对单峰或少峰的洪水模拟效果要好,而对较小的洪水和多峰的洪水模拟效果相对要差一些。

4 结论与展望

基于遥感、GIS 技术提取流域下垫面地形、植被、土地利用/覆盖、土壤等信息,并将计算结果与 HEC - HMS 水文模型系统相耦合的半分布式水文模拟方案为陆表水文循环研究提供了新的方法和思路。该方法模拟精度较高,在我国降水丰沛、径流量较大的湿润、半湿润山区的次洪模拟方面具有广泛的应用和发展前景。

在本文的研究基础之上,进一步的研究工作需要从以下几方面展开:(1) 将 HEC - HMS 水文模型系统应用到其它不同类型流域,寻找敏感参数的内在联系,研究其适应性;(2) 深入研究 HEC - HMS 水文模型系统所提供的其它模块的水文特性,掌握模型的模拟特点和规律,以便为模型的优选搭配提供理论依据;(3) 研究其在时间尺度和空间尺度上的变化特性,扩展模型的使用范围;(4) 将模型系统与合适恰当的大气模式、生态模式相耦合,从而将模型运用到整个陆面循环研究中去。

致谢:本文工作得到了南京大学国际地球系统科学研究所张万昌教授的博士、硕士的帮助和指导,在此表示由衷的感谢。

[参 考 文 献]

- [1] Warren Viessman, Jr., Gary L. Lewis. Introduction to hydrology[M]. Harper Collins College Publishers, 1996.
- [2] Olioso A, Chauki H, Courault D, et al. Estimation of evapotranspiration and photosynthesis by assimilation of remote sensing data into SVAT models[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 68(3): 341—356.
- [3] Biftu G F, Gan T Y. Semi-distributed, physically based, hydrologic modeling of the Paddle River Basin, Alberta, using remotely sensed data [J]. Journal of Hydrology, 2001, 244: 137—156.
- [4] Boegh E, Thorsen M, Butts M B, Hansen S, et al. Incorporating remote sensing data in physically based distributed agrorhydrological modeling [J]. Journal of Hydrology, 2004, 287: 279—299.
- [5] 熊立华,郭生练. 分布式流域水文模型[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2004. 3—4.
- [6] 雷明德. 陕西植被[M]. 北京:科学出版社, 2002.
- [7] 长江流域水文资料·汉江区(汉江上游水系)[Z]. 中华人民共和国水文年鉴(1981—1985). 武汉:水利电力部长江流域规划办公室, 1982—1986.
- [8] 郭兆元. 陕西土壤[M]. 北京:科学出版社, 1992. 68—161.
- [9] Kottegoda N T, Natale L, Raiteri E. Statistical Modeling of Daily Streamflows Using Rainfall Input and Curve Number Technique[J]. Journal of Hydrology, 2000, 234: 170—186.
- [10] User's Manual of Hydrologic Modeling System HEC - HMS. Version 2.1: US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center.
- [11] Technical Reference Manual of Hydrologic Modeling System HEC - HMS: US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, March 2000.
- [12] 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.