

流溪河模型 II : 参数推求*

陈洋波^{1,2}, 黄锋华¹, 徐会军¹, 任启伟¹

(1. 中山大学自然灾害研究中心, 广东 广州 510275; 2. 中山大学水资源与环境系, 广东 广州 510275)

摘要: 流溪河模型是一个主要用于流域洪水预报的分布式物理水文模型, 包括流域划分、蒸散发计算、产流计算、汇流计算、参数推求 5 个模块。针对流溪河流域上游的流溪河水库流域建立了空间分辨率为 100 m 的流溪河模型, 对流域进行了单元划分, 估算了河道断面尺寸, 依据 1 场实测洪水推求出了模型参数, 对实测的 12 场洪水, 采用推求的模型参数进行了洪水模拟, 取得了较好的模拟效果。将研究流域划分成了 52 853 个单元流域, 进行一个时段的洪水模拟计算, 在普通桌面 PC 机上平均只需要 12 s。研究表明, 饱和含水率、土壤层厚度和河道糙率为高度敏感的模型参数, 田间持水率、土壤特性参数 b 、饱和水力传导率、边坡糙率为模型的敏感参数, 凋萎含水量、蒸发系数、潜在蒸发率和地下径流消退系数是模型的不敏感参数。

关键词: 流溪河模型; 河道断面尺寸估算; 洪水模拟; 参数推求; 敏感性分析

中图分类号: TV124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2010)02-0105-08

Liuxihe Model II: Parameter Deriving

CHEN Yangbo^{1,2}, HUANG Fenghua¹, XU Huijun¹, REN Qiwei¹

(1. Natural Disaster Research Center,

2. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The Liuxihe Model is a physically based distributed hydrological model for catchment flood forecast which consists of 5 components, including catchment dividing, evaporation, runoff production, runoff routing and parameter deriving. The Liuxihe Model was set up in the Liuxihe Reservoir basin of upstream Liuxihe catchment at a spatial resolution of 100 m. The grid type was categorized and the river channel cross-section size was estimated, and also the model parameters were derived referring to the simulation results from an observed flood event. Twelve observed flood events were simulated with the derived model parameters and reasonable results were acquired. The studied basin was divided into 52853 grids. It only took 12 seconds to simulate one stage flood discharge on a general desktop PC. The results show that water content at saturation, soil thickness and channel Manning's coefficient are highly sensitive model parameters, water content at field condition, soil porosity parameter b , hydraulic conductivity and hillslope Manning's coefficient are sensitive model parameters, while water content at wilting condition, potential evapotranspiration, evapotranspiration coefficient and underground water recession coefficient are insensitive model parameters.

Key words: Liuxihe Model; channel cross-section size estimation; flood simulation; model parameter deriving; sensitivity analysis

分布式物理水文模型 (Physically based distributed hydrological model) 将流域按一定方法划分成

很多个细小的单元, 并从物理意义上直接推求模型参数, 因而可以充分利用目前已经大量出现并可免

* 收稿日期: 2008-12-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50479033, 50179019); 欧盟第五框架计划基金资助项目 (EVK1-CT2002-00117)

作者简介: 陈洋波 (1964年生), 男, 教授, 博士生导师; E-mail: eescyb@mail.sysu.edu.cn

费或低价获取的高时空分辨率的流域特性数据,并对每个单元赋予不同的模型参数,从而可以更好的模拟流域水文过程。但是,如何根据流域物理特性数据直接推求模型参数仍然是分布式物理水文模型的一大技术难题,特别是对于无资料和少资料流域,目前还没有任何一个分布式物理水文模型可以实现对任意流域的模型参数的推求,因而限制了分布式物理水文模型的推广应用。

流溪河模型是由本文作者提出的一个主要用于流域洪水预报的分布式物理水文模型^[1],包括流域划分、蒸散发计算、产流计算、汇流计算、参数推求5个模块,该模型提出了一整套对流域进行单元划分及对河道单元断面尺寸进行估算的方法,因而使其可以应用到无资料或少资料的流域。该模型将参数分成不可调参数和可调参数,对不可调参数根据DEM直接计算,对可调参数提出了一个逐步迭代求精的推求方法,解决了模型参数推求的难题。

本文针对流溪河流域上游的流溪河水库流域,采用100 m的空间分辨率建立了流溪河模型,对流域进行了单元划分,将流溪河水库流域划分成了52 853个单元,在此基础上估算了河道断面尺寸,根据3场实测洪水,推求出了模型参数,对实测的13场洪水,采用推求的模型参数进行了模拟计算,

得到了较好的模拟计算结果,平均进行一个时段的洪水模拟计算在桌面PC机上只需要12 s。结果表明饱和含水率、土壤层厚度和河道糙率为高度敏感的模型参数,田间持水率、土壤特性参数 b 、饱和水力传导率、边坡糙率为模型的敏感参数,凋萎含水量、蒸发系数、潜在蒸发率和地下径流消退系数是模型的不敏感参数。

1 研究实例及数据分析处理

1.1 研究实例简介

流溪河流域位于广州市北部,东经 $113^{\circ}10'12''-114^{\circ}2'00''$ 、北纬 $23^{\circ}12'30''-23^{\circ}57'36''$ 之间,发源于广州从化市吕田镇的桂峰山。流域呈东北至西南向的狭长形,南北长116 km,东西宽20 km,主流长156 km,流域面积2 300 km²。流溪河流域地处亚热带,气候温湿,暴雨频繁,洪水多发。流域内降雨以锋面雨和台风雨为主,其它是对流(热雷)雨和地形雨。图1是流溪河流域简图。

流溪河水库大坝位于流溪河干流上游,控制流域面积539 km²,图1中的阴影部分为流溪河水库流域在流溪河流域中的位置。流溪河水库是一个不完全多年调节水库,以防洪发电为主的综合利用水库,按50 a年一遇标准设计,千年一遇标准校核。

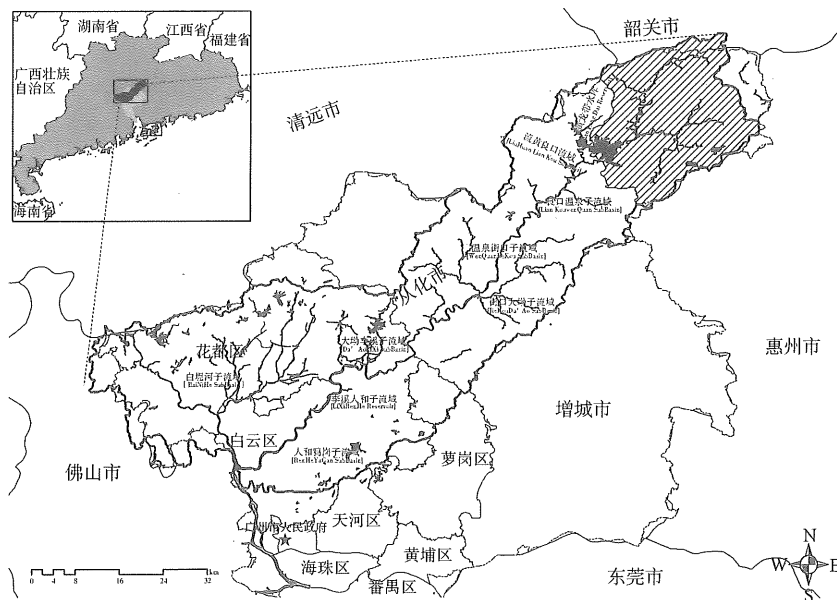


图1 流溪河流域简图

Fig. 1 Outline of the Liuxihe River Basin

1.2 流域属性数据收集与分析

收集了流溪河流域100 m分辨率的DEM数据,如图2(a)所示。从美国马里兰大学全球观测实验室与中国科学院地理科学与资源研究所联合实验室

网站的全球土地覆盖数据库(<http://glcf.geodata.cn>)截取了流溪河流域土地利用类型数据,原数据的空间分辨率为1 000 m,通过重采样技术得到了流溪河水库流域100 m分辨率的土地

利用类型数据, 如图 2(b)。

从有关部门获取了流溪河流域的土壤类型数据, 原数据的空间分辨率为 1 000 m, 通过重采样

技术得到了流溪河水库流域 100 m 分辨率的土壤类型数据, 如图 2(c)。

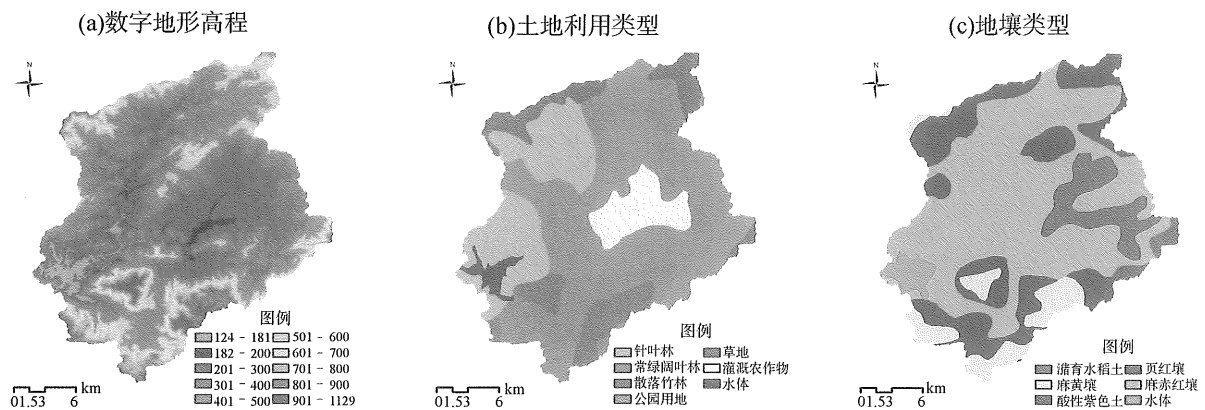


图 2 流溪河水库流域属性数据

Fig. 2 Properties of the Liuxihe reservoir basin

1.3 实测洪水资料收集与整理

为了对模型参数进行调整及对模型进行验证, 收集整理了流溪河水库的实测入库洪水过程 13 场, 包括了大、中、小型洪水。流溪河水库流域有 3 个雨量站, 本文对于各场洪水雨量站的实测降雨, 采用泰森多边形法进行流域降雨的空间插值, 得到基于网格的空间分辨率为 100 m 的流域降雨。从计算结果来看, 降雨在流域上的空间分布非常不均匀。

2 单元划分与河道断面尺寸估算

2.1 单元划分

在流溪河模型中, 根据 DEM 将流域划分成正方形的单元流域, 本文将流溪河水库流域分成了 52 853 个单元流域。根据流溪河模型中提出的单元划分方法, 首先采用基于河道分级的单元划分方法进行边坡单元和河道单元的划分。

针对流溪河水库流域, 对 FA_0 的值, 取了大量值进行河道单元的划分, 最多将河道分成了 7 级, 各级对应 FA_0 的临界值及河道单元划分的个数如表 1 所示, 相应的河道的划分及分级结果如图 3 所示。限于篇幅, 图 3 中仅绘出了河道分级为 3、4、5 级的结果。

从图 3 结果可以看出, 随河道分级的增加, 河道单元的数量急剧增加, 河网密度增大。当河道分级达到 5 级时, 河网已很密, 划分的河段较多, 估算河道断面尺寸的工作量很大。根据下载的 Google Earth 遥感影像看到, 当河流取 4 级时, 对 1 级河流在图上基本上可以分辨和量取河道断面尺寸, 而

表 1 同临界 FA_0 值时的河道单元划分统计表

Table 1 Statistics of river cell classification with different FA_0

河道级数	临界 FA_0 值	河道单元个数	河道单元比例/%
7	1	6 312	11.94
6	12	4 536	8.58
5	75	2 002	3.79
4	353	999	1.89
3	990	440	0.83
2	3 680	322	0.61
1	18 397	139	0.26

河流分 5 级时, 第 1 级河道已基本无法量取河道断面尺寸, 因此, 在本文计算中, 以 FA_0 (4) 的值进行流域单元划分和河道提取。

对流溪河水库, 以设计洪水位作为划分水库单元的控制性高程, 划分出了流溪河水库的水库单元。将图 3 中包含于水库单元中的河道单元和边坡单元剔除后, 得到了最终的全流域单元划分结果, 如图 4 所示。图 4 中也同时标出了河流结点设置及河流分级分段结果。

2.2 河道断面尺寸估算

在进行河道断面尺寸估算之前, 需对河道进行分段。从图 4 结果可出, 第 4 级河道大部分被水库单元所覆盖, 只有一小段还属于河道单元, 因此, 对第 4 级河道, 不再分段。对于第 3 级河道, 根据图 4 中的河网结构, 对照库区的 Google Earth 遥感

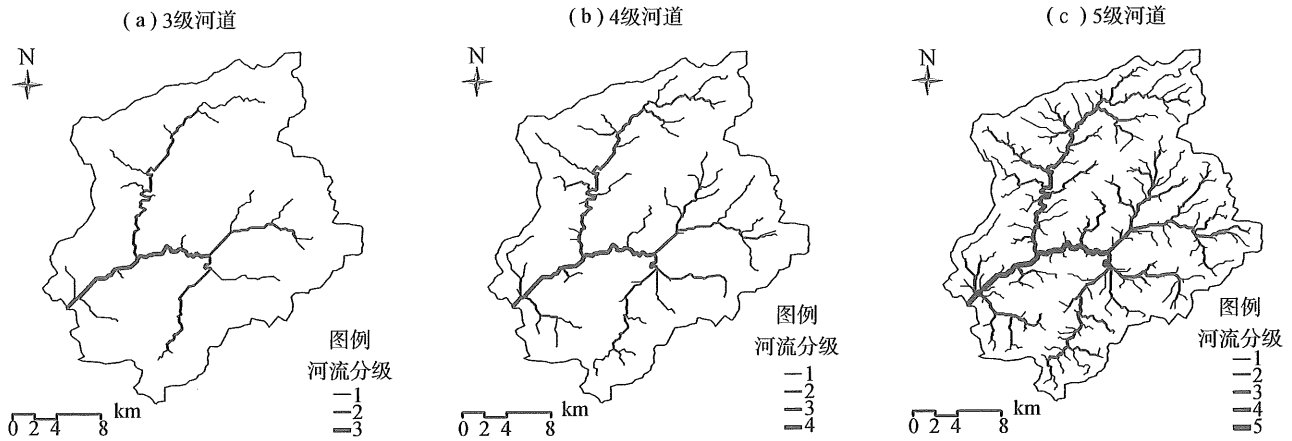


图 3 流溪河水库流域不同临界 FA_0 值河道单元划分结果图

Fig. 3 River cell classification results of Liuxihe Reservoir Basin with different FA_0

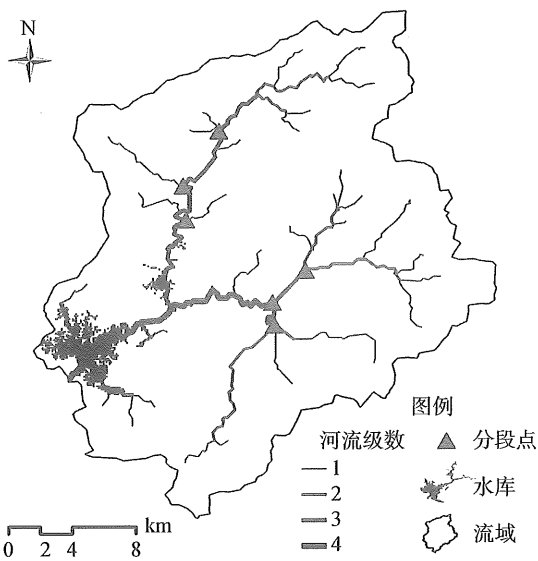


图 4 单元划分、结点设置及河流分级分段结果

Fig. 4 Cell classification, node setting and channel ordering

影像和 DEM 的变化, 在有较大支流汇合处、河道宽度变化较大处及河底坡降变化较大的地方, 进行结点设置, 共在 3 级河道中设置了 4 个结点, 将 3 级河道分成了 10 个虚拟河段, 如图 4 所示。对于 2 级河道, 设置了 2 个结点, 将 2 级河道分成了 6 个虚拟河段, 对于 1 级河道, 都是分布在河道的末端, 不再分段, 统一作为一个虚拟河段。

根据上述划分, 将流溪河流域的河道划分成 4 级, 共 18 个虚拟河段 (本文将断面尺寸相同的单元河道称为虚拟河段), 如表 2 所示。对第 4、3 和 2 级河段, 从 Google Earth 遥感影像图中量取了河道的平均尺寸, 对于第 1 级河段, 根据 Google Earth 遥感影像量取河道的平均尺寸, 列于表 2。

各河段的侧坡无法直接估算, 本研究曾对库区进行了考察, 根据考察的目估结果, 对各河段估算了一个侧坡。各河段的底坡则是根据各河段单元的 DEM 进行估算所得, 结果列于表 2。

表 2 河道分级分段及断面尺寸估算结果

Table 2 Channel ordering and channel cross-section estimation

编号	级号	段号	河道底宽 m	河道底坡 弧度	河道侧坡 (°)	糙率初值 (n)
101	1	1	3	0.086 7	35	0.048
201	2	1	3	0.100 3	35	0.048
202	2	2	3	0.086 8	35	0.048
203	2	3	3	0.078 8	35	0.048
204	2	4	5.6	0.050 6	35	0.030
205	2	5	9.9	0.072 4	35	0.024
206	2	6	8.6	0.042 0	35	0.030
207	2	7	3	0.094 5	35	0.048
208	2	8	7	0.040 6	40	0.030
209	2	9	3	0.002 3	35	0.048
210	2	10	3	0.017 3	35	0.048
301	3	1	3.8	0.078 8	35	0.036
302	3	2	4.5	0.077 0	35	0.030
303	3	3	9	0.079 6	35	0.024
304	3	4	10	0.092 0	35	0.024
305	3	5	18	0.042 0	30	0.024
306	3	6	17.3	0.129 5	35	0.018
401	4	1	15	0.050 7	30	0.024

3 流溪河模型参数推求

3.1 不可调参数确定

流溪河模型中的不可调参数包括流向和坡度。在流溪河模型中，流向根据 DEM，采用 D8 法计算^[2-4]。本文在 ArcGIS 9.2 软件中推求流向^[3-4]，得到了根据流溪河水库流域 100 m 分辨率的 DEM 推求的流向，如图 5 所示。

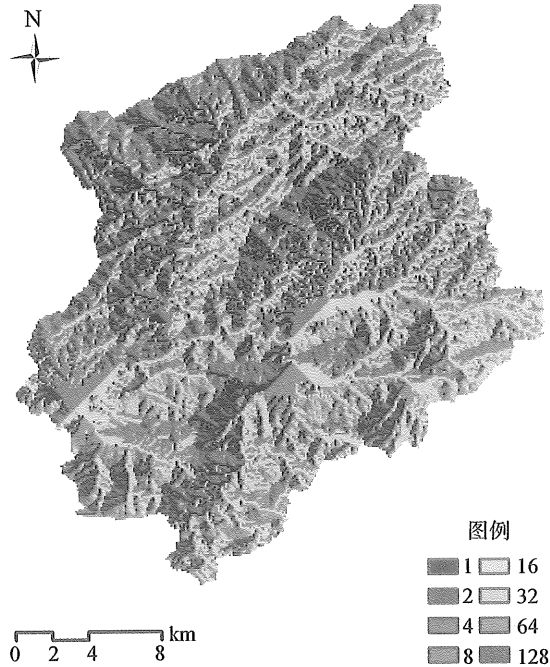


图 5 各单元的流向
Fig. 5 Flow direction

在流溪河模型中，边坡单元的坡度在 ArcGIS 9.2 软件中直接计算，而对于河道单元的底坡，根据表 2 中的结果确定。流溪河水库流域各单元的坡度如图 6 所示。

3.2 可调参数初值确定

对于河道单元的参数，即糙率，根据参考文献 [5] 确定初值，如表 2 所示；对于土地利用类型参数中的边坡单元糙率，根据参考文献 [6] 确定初值，而对于蒸发系数则统一取为 0.7，如表 3 所列；土壤类型参数包括土壤层厚度、饱和含水率、田间持水率、凋萎含水率和饱和水力传导率。根据经验，对于土壤层厚度，各单元统一取为 1 000 mm，对于 b ，根据参考文献 [7-8] 各单元统一取为 2.5。对于饱和含水率、田间持水率和饱和水力传导率则采用由 Arya 等人提出的土壤水力特性计算器进行计算^[9]，该计算器的程序由 Keith E. Saxton 等人开发，并可实现在线计算 ([http://](http://www.bsyse.wsu.edu/saxton)

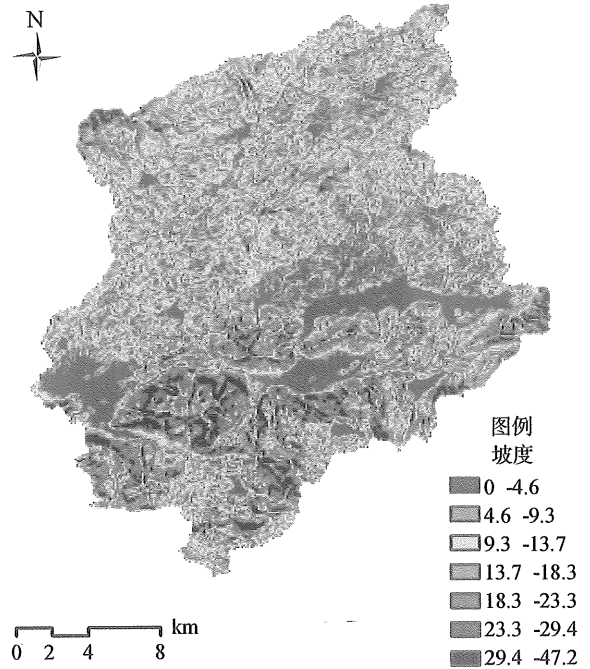


图 6 各单元的坡度
Fig. 6 Cell slope

表 3 土地利用类型参数初值表

Table 3 Initial parameters related to land use type

土地利用类型	边坡单元糙率初值	蒸发系数初值
针叶林	0.4	0.7
常绿阔叶林	0.6	0.7
竹林	0.4	0.7
灌木丛	0.2	0.7
草地	0.4	0.7
灌溉农作物	0.5	0.7

www.bsyse.wsu.edu/saxton)，而凋萎含水率则按照田间持水率的 30% 计算。确定的土壤类型参数初值如表 4。潜在蒸发率根据流域的气候条件决定，整个流域采用一个值。根据流溪河大坝气象站 1997 年 8 月至 1998 年 7 月的观测资料，确定流溪河流域的潜在蒸发率为 5 mm/d。对于地下径流消退系数，采用陈洋波等对流溪河水库流域率定的新安江模型的地下径流消退系数^[10]，其值为 0.985。

3.3 可调参数调整

在上述可调参数初值的基础上，对模型的参数进行调整。模型参数逐个进行调整，调整顺序是：饱和含水率、田间持水率、饱和水力传导率、边坡单元糙率、河道糙率、土壤层厚度、凋萎含水量、土壤特性参数 b 、蒸发系数、潜在蒸发率和地下径

表4 土壤类型参数初值表
Table 4 Initial parameters related to soil type

土壤类型	土壤层厚度/mm	饱和含水率/%	田间持水率/%	凋萎含水率/%	饱和传导率	<i>b</i>
潴育水稻土	1 000	52.8	28.9	17.2	17	2.5
麻黄壤	1 000	50.8	27.5	16.5	10	2.5
麻红壤	1 000	54.1	33.7	18.9	14	2.5
麻赤红壤	1 000	52.3	33.3	19.1	6	2.5
酸性紫色土	1 000	55.6	34.6	19.1	24	2.5

流消退系数。对参数进行调整的依据是参数调整后对模型模拟结果的改进情况,本文采用第20010716号洪水对模型参数进行调整,选择使这场洪水的模拟结果与实测结果拟合情况较好的参数作为模型的最佳参数。对洪水进行模拟时,需要设定土壤初始含水率,本文先取为80%进行计算。

3.3.1 第1轮参数调整 本轮参数调整时,对所有的11个参数均进行调整。同时,为了对参数的敏感性进行分析,在第1轮参数调整时,对各个参数,均以初值为中心,从初值的10%~200%范围(对不同的参数范围有所不同,见图7)内各取了一些值进行了洪水模拟计算,根据对实测洪水的拟合程度对参数进行调整。参数调整是逐个进行的,在后面的参数调整时,对前面的参数取调整后的值,对还未调整的参数则取初值。图7绘出了各参数调整计算时第20010716号洪水的模拟计算结果。

3.3.2 参数的敏感性分析 根据第1轮参数调整时的计算结果,对模型参数的敏感性进行分析,可得到下述的结论:①饱和含水率、土壤层厚度和河道糙率为高度敏感参数;②田间持水率、土壤特性参数*b*、饱和水力传导率、边坡糙率为敏感参数;③凋萎含水量、蒸发系数、潜在蒸发率和地下径流消退系数是不敏感参数。

3.3.3 第2轮参数调整 对1轮参数调整计算的结果发现,第1轮参数调整后,模拟的洪水过程的形状与实测洪水过程较为相似,但总水量两者有一定差异,作者认为这可能与土壤初始含水量的设置有关,通过调整洪水初始含水率的大小,模拟的洪水过程与实测洪水过程有了一定程度的改善。

在对洪水初始含水率进行调整的基础上,对参数进行了第2轮调整,本轮仅对高度敏感参数和敏感参数进行调整,包括饱和含水率、土壤层厚度、河道糙率、田间持水率、土壤特性参数*b*、饱和水力传导率和边坡糙率。对不敏感参数不再进行调整。

第2轮参数调整时,模型的模拟效果改进不明

显,因此,不再对参数进行调整,故本文以第2轮参数调整后的参数作为最终的模型参数。

4 模型验证

为了验证确定的模型参数的有效性,本文采用经调整后的最终的模型参数,对其它的13场洪水进行了模拟计算,得到了相应的模拟计算结果,如图8所示。限于篇幅,图8仅列出了对其中6场洪水的模拟计算结果。在对上述的12场洪水进行模拟计算时,各场洪水的初始含水率也是首先取为80%,再根据计算结果进行调整,调整后的结果列于表5。

表5 模型模拟效果评价指标
Table 5 model simulation results

洪水编号	土壤初始含水量/%	<i>R</i>	<i>C</i>	<i>A</i> /%	<i>B</i> /%	<i>H</i> /h
19900601	48	0.882	0.950	48.1	1.4	-1
19970802	80	0.517	0.863	61.5	4.3	0
19980514	65	0.858	0.940	28.7	2.7	1
19980621	80	0.623	0.826	18.9	2.3	2
19990822	70	0.842	0.943	23.8	14.1	-3
20000901	75	0.707	0.878	39.8	22.5	1
20010520	60	0.632	0.928	44.9	1.9	-2
20010604	65	0.804	0.951	29.2	1.2	1
20030609	70	0.272	0.911	67	2.5	2
20030626	67	0.310	0.875	31.1	9.3	-2
20040513	83	0.609	0.950	123.3	2.1	0
20050508	58	0.895	0.959	23	1.4	1
20050616	67	0.807	0.908	23.3	17.6	-5

本文对13场洪水的模拟计算结果,统计了5个评价指标,包括相关系数*R*、确定性系统*C*、过程相对误差*A*,洪峰相对误差*B*和峰现时间误差

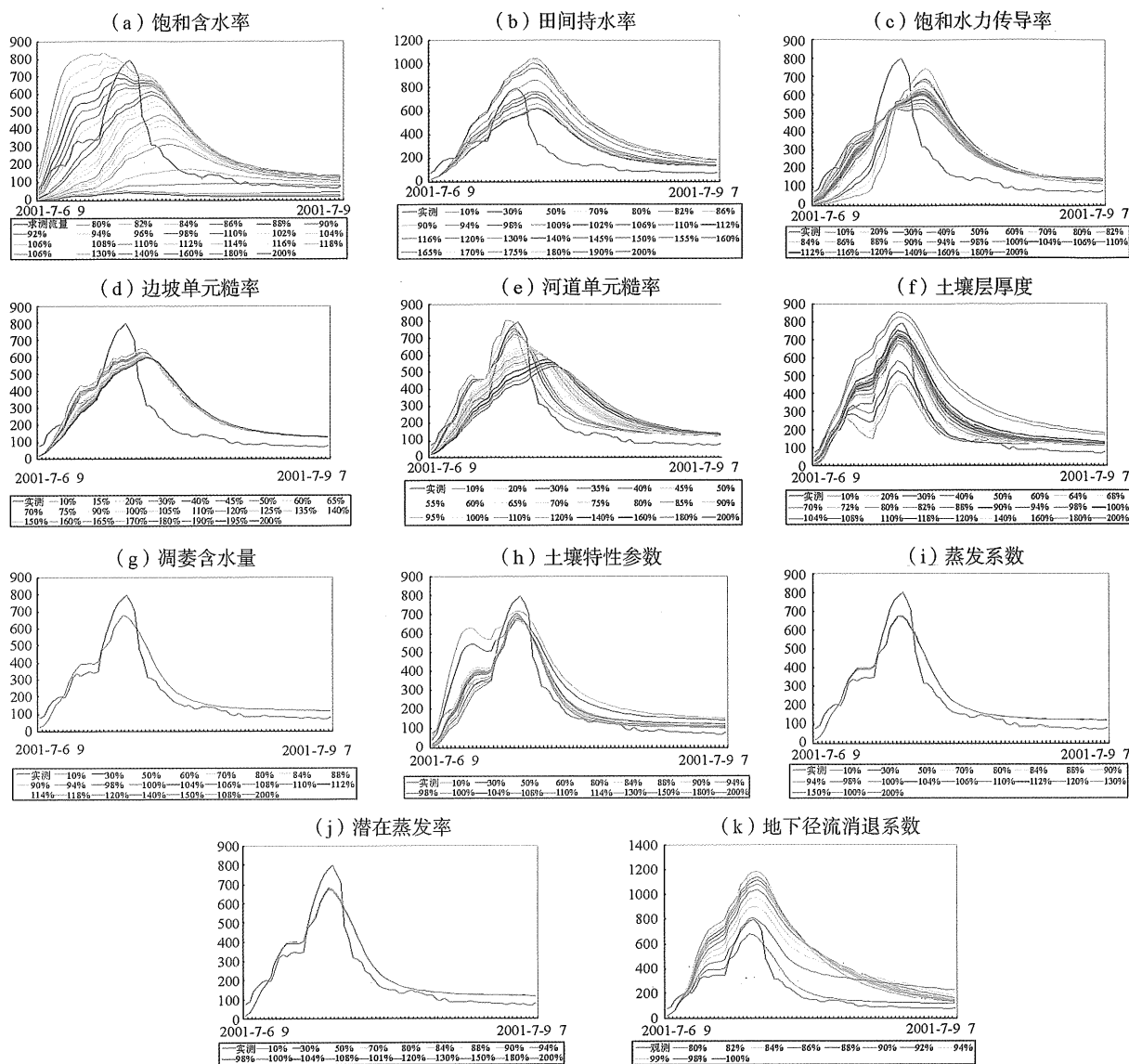


图 7 第 20010716 场洪水参数调整时的模拟计算结果

Fig. 7 Simulation results of parameter adjusting for flood event 20010716

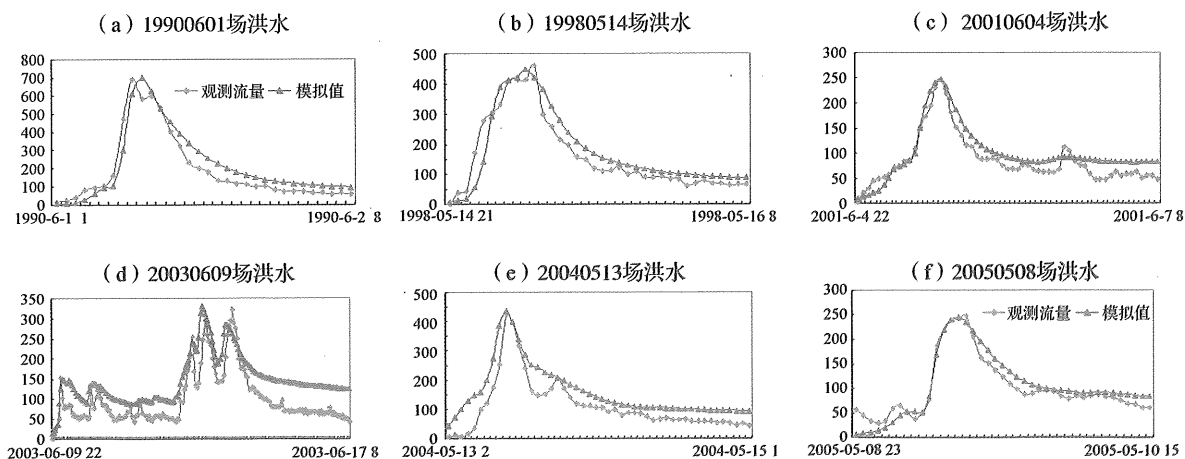


图 8 模拟洪水过程及其与实测洪水过程对比

Fig. 8 Comparison of model simulation and observation

H , H 为正值代表模拟的洪峰出现时间比实测时间提前, 负值则表示模拟的洪峰出现时间比实测时间滞后。

从表5中的结果看到, 各场洪水的统计指标均较好, 特别是各场洪水模拟的洪峰流量的误差较小, 其中, 9场洪水模拟的洪峰流量的误差低于5%, 占69.2%; 一场为9.3%, 小于10%, 两场在10%~20%之间, 一场为22.5%。另外, 模拟的峰现时间误差有11场没有超过2h。可以说, 模型参数对洪峰流量的模拟精度非常高。

对上述的各场洪水的模拟, 确定性系数除一场为0.826外, 其它的都在0.85以上, 有9场超过0.9; 相关系数大部分场次也较高, 除2场较低外, 其它也均在0.6以上。模拟的洪水过程误差则相对大了一些, 这是可以理解的。从图8及其它的计算结果看出, 实测洪水过程的流量变化有明显的上下跳跃的情况, 这反映出实测洪水过程存在着明显的测量误差, 这就可能给过程误差的评判带来了失真, 因此, 表5中的洪水过程误差不能完全反映实际情况。另外, 由于流溪河水库流域是一个中型流域, 洪水陡涨陡落情况非常明显, 一场洪水的过程较短, 要准确模拟洪水过程还有一定难度, 这也是流溪河模型需要进一步改进的地方。从总体上来说, 绝大部分洪水过程的模拟效果较好, 特别是对洪峰的模拟, 这对于中小流域的洪水预报是最重要的指标, 因此, 可以说明本文建立的流溪河模型具有较好的模拟效果。

5 结 论

通过本文的研究, 可以得到如下的结论。

(1) 流溪河模型将流域划分成一系列的单元, 可以充分利用现有的高时空分辨率的流域属性数据和降雨数据, 从而可以较好的模拟流域洪水过程;

(2) 流溪河模型具有较高的计算效率。本文计算中, 将流溪河水库流域划分成了52 853个单元, 在桌面机上的运行时间, 平均模拟计算一个时段只需12s, 速度非常快, 可以预计, 对于更大的流域, 流溪河模型也可以满足实时洪水预报计算的时效性要求;

(3) 流溪河模型提出了一整套基于DEM及遥感影像对流域进行单元划分及对河道单元断面尺寸进行估算的方法, 由于该方法所采用的数据可通过国际互联网公开免费获取, 因此可在一般流域应用, 解决了目前在少资料和无资料流域不能应用分

布物理水文模型的难题, 计算结果也较好地达到了洪水模拟的精度要求, 具有实用性;

(4) 流溪河模型提出了完整的, 可操作的模型参数推求方法, 该方法不受任何条件的限制, 可应用于仅有少量实测数据的流域, 有效解决了分布式物理水文模型参数确定的难题。同时也说明, 对分布式物理水文模型参数进行调整, 而不是对模型参数根据流域物理特性一次性确定是合理的, 在分布式物理水文模型参数推求时是必须的。

(5) 饱和含水率、土壤层厚度和河道糙率为高度敏感的模型参数, 田间持水率、土壤特性参数 b 、饱和水力传导率、边坡糙率为模型的敏感参数, 凋萎含水量、蒸发系数、潜在蒸发率和地下径流消退系数是模型的不敏感参数。

参考文献:

- [1] 陈洋波, 任启伟, 徐会军, 等. 流溪河模型 I: 理论与方法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2010, 49(1): 107-112
- [2] 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.
- [3] ESRI Inc. ArcGIS 9 using arcgis spatial analyst [R]. Redland, CA, 2004.
- [4] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 429-445.
- [5] 郑邦民, 文信, 齐鄂荣. 洪水水力学[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2000.
- [6] LIU Y B, SMEDT F D. WetSpa Extension, A GIS-based Hydrologic Model for Flood Prediction and Watershed Management Documentation and User Manual[R]. Brussels: Vrije Universities Brussel, 2004.
- [7] ANDERSON A N, McBRATNEY A B, FITZPATRICK E A. A soil mass, surface and spectral fractal dimensions estimated from thin section photographs[J]. Soil Sci Soc Am J, 1996, 60: 962-969.
- [8] ZARADNY H. Groundwater flow in saturated and unsaturated soil[M]. Rotterdam: A A Balkema, 1993: 49-65.
- [9] ARYA L M, PARIS J F. A physioempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[J]. Soil Sci Soc Am J, 1981, 45: 1023-1030.
- [10] 陈洋波. 广州市三防决策支持系统模型系统设计[R]. 广州: 中山大学科研报告, 2006.