

# 流溪河模型在白盆珠水库入库洪水模拟中的应用与研究\*

范正行<sup>1</sup>, 郝振纯<sup>1</sup>, 陈洋波<sup>2</sup>, 王加虎<sup>1</sup>, 黄锋华<sup>2</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098;  
2. 中山大学自然灾害研究中心, 广东广州 510275)

**摘要:** 利用流溪河模型对广东省内白盆珠水库的入库洪水进行模拟计算与分析研究。采用 200 m 精度的 DEM 数据、1 km 的土地利用类型和土壤类型数据构建了模型, 并将流域水系分为 5 级不同的河道, 通过在河道上设置结点将河道分为 48 条虚拟河段, 对不同的虚拟河段赋予不同的河道参数。在给定模型参数初值的基础上, 分别用 3 场和 11 场洪水对模型参数进行了调整和验证。结果表明, 流溪河模型对白盆珠水库入库洪水的模拟效果较好, 推求的参数具有物理基础, 对于洪水模拟具有广泛的适用性, 在洪水模拟及预报方面有巨大的潜力。

**关键词:** 洪水模拟; 分布式水文模型; 流溪河模型; 参数调整; 白盆珠水库

中图分类号: P33 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2012)02-0113-06

## The Application and Research of Income Flood Simulation of the Baipenzhu Reservoir with the Liuxihe Model

FAN Zhenghang<sup>1</sup>, HAO Zhenchun<sup>1</sup>, CHEN Yangbo<sup>2</sup>, WANG Jiahu<sup>1</sup>, HUANG Fenghua<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Natural Disaster Research Center of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** The LMS (Liuxihe Model) is a complete distributed physics-based hydrological model, which is used to simulate and analyze the income flood of the Baipenzhu Reservoir in Guangdong province. The model is set up with DEM of precision of 200 m, landuse and soiltype of precision of 1 km. The basin is divided into five different watercourses which contain 48 virtual reaches according to crunodes set artificially, and then different reaches are given different initial parameters. Based on these given parameters, three floods and 11 floods are used to adjust and validate these initial parameters, respectively. The results indicate that parameters adjusted are of physical-base. The LMS model can simulate the income flood of the Baipenzhu Reservoir well and has extensive applicability and huge potential for floods simulation.

**Key words:** floods simulation; distributed hydrological model; Liuxihe Model; parameters adjustment; Baipenzhu Reservoir

20 世纪 50 年代后期, 水文研究者提出了流域水文模型的概念。由于水文循环系统的复杂性, 最

初的流域水文模型大多采用简单的降雨-径流响应关系来描述流域降雨后的出流响应, 也即经验性的

\* 收稿日期: 2011-05-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2010CB951101); 国家自然科学基金项目(40830639, 41101015); 中国科学院战略性先导科技专项基金资助(XDA05110102); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项基金资助项目(1069-50985512)

作者简介: 范正行(1987年生), 男, 硕士研究生; E-mail: kingfzh@163.com

“黑箱”模型,主要是满足洪水预报的需要。这类模型是建立在对流域降雨和河道径流观测数据的统计分析基础上的。20 世纪 60-80 年代,流域水文模型由经验性的“灰箱”模型发展为集总式概念模型,也即“灰箱”模型。具有代表性的“灰箱”模型主要有美国的 Stanford IV<sup>[1]</sup> 和 HEC-1 模型<sup>[2]</sup>,我国的新安江模型<sup>[3-4]</sup>,日本 Tank 模型<sup>[5]</sup> 等。这些模型中的参数都有明确的物理意义,根据流域的物理水文过程进行产汇流计算及流域出口断面流量演算,但这些计算都是基于全流域进行的,对于流域内的具体的水流运动方式却没有表达出来。鉴于此,Freeze 和 Harlan<sup>[6]</sup> 提出了以水动力学偏微分方程来描述流域内水流运动的分布式水文模型,这可以算得上是分布式物理水文模型的雏形。20 世纪 80 年代以后,为了解决“黑箱”模型以及“灰箱”模型不能反映流域水文循环的时间和空间尺度变化以及水文过程空间变异性等问题,“白箱”模型,也即分布式物理水文模型便应运而生。第一个完整的分布式物理水文模型是 SHE 模型<sup>[7-8]</sup>,由英国、法国和丹麦的科学家联合研制而成。该模型从水文循环的机理出发,对下垫面进行垂直分层,在水平方向用网格划分为相互联系的单元,并联立产汇流、蒸散发、土壤水和地下水运动等过程进行求解。

虽然分布式水文模型充分反映了流域物理特性的空间变化,填补了集总式模型的不足,但分布式水文模型对流域物理特性数据的精度要求相当高,加之计算效率太低,因此分布式水文模型没有得到推广应用。20 世纪 90 年代,随着计算机技术、3S 技术(GIS、GPS、RS)和数字高程模型(DEM)的迅速发展,为研制和建立分布式物理模型提供了强大和及时的技术支撑和数据支持,从而涌现出一些知名的分布式水文模型,如 VIC 模型<sup>[9]</sup>,WATERFLOOD 模型<sup>[10]</sup>,CASC2D 模型<sup>[11]</sup>,Vflo 模型等<sup>[12]</sup>。

本文采用基于物理意义的全分布式水文模型-流溪河模型进行研究<sup>[13]</sup>,该模型是中山大学水灾害与水利信息化联合实验室在研究开发少资料和无资料流域暴雨洪水预报的分布式物理水文模型的工作基础上,在开发流溪河流域洪水预报方案时,研究提出的一个全分布式物理水文模型。由于模型的代表性成果是结合流溪河流域的实际情况而提出的,故命名为流溪河模型。模型通过 DEM 进行流域单元网格的划分,利用土地利用类型及土壤类型数据来反映流域物理特性的空间差异。流域上的蒸

散发及产流量的计算采用单元网格独立计算,而汇流方式则是逐单元汇流直至出口单元。

## 1 流域概况与数据准备

### 1.1 流域介绍

白盆珠水库位于广东省惠东县境内,控制流域面积为 858 km<sup>2</sup>,约占西枝江流域面积的 21%。范围为 115°2'11" - 115°24'56"E, 23°0'5" - 23°23'15"N,流域海拔 53 ~ 1 296 m。属亚热带季风气候区,雨量充沛,汛期(4-9 月)雨量占全年雨量的 82% 以上,暴雨中心在上游高潭-石涧一带<sup>[14]</sup>。库区地处莲花山暴雨中心区,多年平均降雨量为 2 008 mm,多年平均来水量为 11.8 亿 m<sup>3</sup>。降雨年内年际分布极不均匀,降雨多集中在汛期,汛期降雨以台风雨为主,降雨量的多少一般取决于台风登陆地点、路径、次数以及外围影响的强度,多为阵性降雨,雨量大而且集中,洪水过程表现为峰高量大,水库水位暴涨,由于此时水库起调水位较高,加上下游河道过水能力的限制,给汛期防洪加大了难度。

### 1.2 水文气象资料

本文收集了 1986-1999 年之间 14 场降雨以及对应的洪水资料,其中 3 场洪水用于调整参数,这 3 场洪水综合考虑了不同洪水量级、不同径流系数以及单双洪峰的情况。剩余 11 场洪水进行参数的验证。具体情况如表 1 所示。

白盆珠水库流域上有 7 个雨量观测站,各雨量站的相关信息如表 2。雨量站的密度较高,平均约 123 km<sup>2</sup> 就有一个雨量站,如图 1 所示。

### 1.3 流域基础属性数据的收集与整理

本文利用了 SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) 90 m 分辨率的数字地形高程数据,通过对其中重采样得到了分辨率为 200 m 的 DEM 数据,再利用 ARCGIS 中的水文分析模块进行填洼并生成流向、累积流和坡度数据。流域内的 DEM 如图 2 所示。流域内的土地利用和土壤类型数据来源于中山大学水灾害与水利信息化联合实验室。通过分析得知研究区域内的土地利用类型共有 4 种,包括针叶林、常绿阔叶林、灌木丛和草地,所占流域面积比例分别是 38.18%、2.46%、49.54% 和 9.82%。而土壤类型共有 9 种,包括潜育水稻土、麻黄壤、页黄壤、麻红壤、页红壤、麻赤红壤、页赤红壤、侵蚀赤红壤和山地灌丛草甸土,所占流域面积比例分别为 7.86%、3.33%、4.47%、16.25%、9.72%、32.58%、19.12%、5.30%、1.36%。

表 1 白盆珠水库流域洪水过程特征表

Table 1 The flood hydrograph property list of the Baipenzhu reservoir basin

洪水编号	开始时间	持续时间/h	总降雨量/mm	洪峰流量/(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	径流系数	备注							
19860710	19860710 T 00	97	540.6	3 681.3	0.81	验证洪水							
19880719	19880719 T 03	62	188.5	1 669.4	0.57	验证洪水							
19890517	19890517 T 00	172	318.6	977	0.65	验证洪水							
19900409	19900409 T 18	62	187.1	1 339.3	0.41	验证洪水							
19900616	19900616 T 08	97	289.9	2 065.5	0.61	用于参数调整							
19900909	19900909 T 00	45	171.4	1 452.5	0.50	验证洪水							
19910906	19910906 T 12	68	265.3	2 825.1	0.62	验证洪水							
19920410	19920410 T 19	59	106.3	758.9	0.50	验证洪水							
19940805	19940805 T 10	119	399.5	2 597.9	0.70	验证洪水							
19950811	19950811 T 16	92	278.8	1 558.6	0.74	用于参数调整							
19960621	19960621 T 21	199	523.2	2 502.7	0.66	用于参数调整							
19970801	19970801 T 21	171	370.5	3 017.6	0.80	验证洪水							
19980624	19980624 T 02	78	204.3	1 264.1	0.63	验证洪水 </tr <tr> <td>19990915</td> <td>19990915 T 00</td> <td>107</td> <td>329.9</td> <td>1 285.4</td> <td>0.59</td> <td>验证洪水</td> </tr>	19990915	19990915 T 00	107	329.9	1 285.4	0.59	验证洪水
19990915	19990915 T 00	107	329.9	1 285.4	0.59	验证洪水							

表 2 白盆珠水库流域上雨量站相关信息

Table 2 The information of precipitation stations of the Baipenzhu reservoir basin

序号	雨量站名	东经	北纬
1	禾多布	115°16'	23°19'
2	马山	115°14'	23°16'
3	宝口	115°12'	23°16'
4	新塘	115°11'	23°07'
5	石涧	115°08'	23°02'
6	高潭	115°18'	23°11'
7	双下	115°02'	23°04'

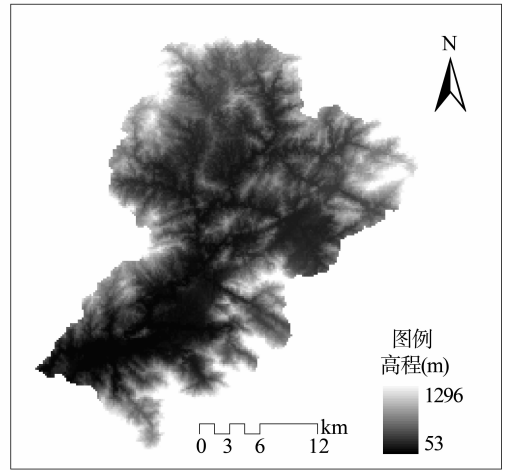


图 2 流域 DEM

Fig. 2 The DEM of watershed

## 2 流溪河模型构建

利用 200 m 精度的 DEM 将白盆珠水库流域划分为 21 452 个网格单元，由临界高程值（正常蓄水位）75 m 提取了水库单元，在此基础上，取累积流阈值为 100 进行边坡单元、河道单元的划分，同时将河道划分为 5 个不同的分级（如图 3）。根据已划分的河网结构、形态与河道底坡的变化<sup>[15]</sup>，分别在 2、3、4 级河道上设置了 4、3、5 个结点（1 级河道不设结点，全部看作一条虚拟河段，5 级河道处于水库范围，不设结点）（如图 3），共生成 48 条虚拟河段。

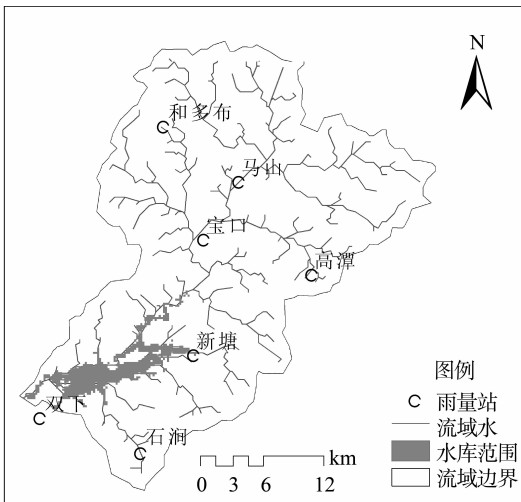


图 1 水系及雨量站点分布图

Fig. 1 River system and precipitation stations

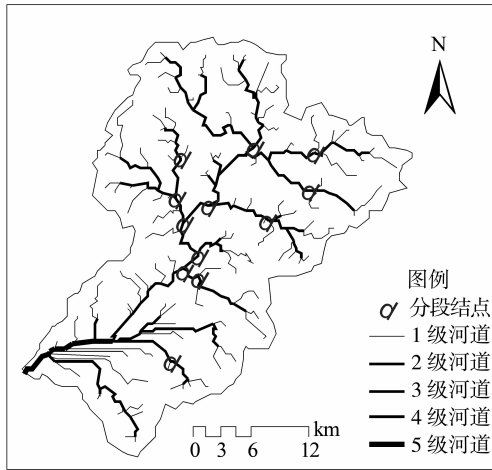


图 3 五级河道及 12 个河道分段点

Fig. 3 Five riverways and 12 break points

### 3 模型参数推求

流溪河模型中可调参数分为 2 类, 一类是敏感参数, 主要有土壤厚度, 土壤饱和含水率, 田间持水量, 饱和水力传导率, 土壤曼宁系数, 河道糙率, 土壤特性系数。另一类为不敏感参数, 主要有地下水消褪系数、凋萎含水率, 蒸发系数、蒸发能力, 河道底宽和河道边坡<sup>[15]</sup>。

#### 3.1 不敏感参数值的确定

对于不敏感参数, 由于对模拟效果的影响不大, 采用模型设定的默认值。虚拟河段底宽利用 Google earth 进行遥感估测, 河道边坡一律采用 30, 地下水消褪系数均取 0.995, 蒸发系数均取 0.7。凋萎含水率通过土壤特征软件“SPAW Hydrology”计算而来。

#### 3.2 敏感参数初值的确定

针对敏感参数初值, 据前人研究与经验, 土壤层厚度  $z_s$  统一取初值为 1 000 mm, 对于土壤特性系数  $b$ , 根据经验统一取初值为 2.5<sup>[16]</sup>。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“SPAW Hydrology”进行计算。该软件的原理是将土壤分成 4 种成分的组合构成的, 分别为 C-Clay 粘土, L-Loam 粘砂土, Sa-Sand 砂土以及 Si-Silt 粉沙; 根据土壤成分组成、有机质含量、盐度、土壤结构情况等计算出饱和含水率、田间持水率、凋萎含水率以及饱和水力传导率的值<sup>[17]</sup>。对于土壤组成成分, 可通过中国科学院南京土壤研究所提供的中国土壤数据库获得<sup>[18]</sup>。而河道糙率的初始值则在使用

Google earth 量测河宽时根据河道形状, 光滑程度以及河道的岩土性质进行估计。对于土地利用类型的边坡单元的糙率初值, 主要采用相关文献的推荐值: 针叶林 0.4, 常绿阔叶林 0.6, 灌木丛 0.2, 草地 0.4<sup>[16, 19]</sup>。土壤类型的参数初值见表 3:

表 3 土壤类型参数初值表

Table 3 Initial values of soil type parameters

土壤类型	土壤厚度/mm	饱和含水率/%	田间持水率/%	饱和传导率/(mm·h <sup>-1</sup> )	土壤特性系数
潴育水稻土	1 000	0.527	0.289	17	2.5
麻黄壤	1 000	0.508	0.275	10	2.5
页黄壤	1 000	0.531	0.364	8	2.5
麻红壤	1 000	0.541	0.337	14	2.5
页红壤	1 000	0.523	0.333	6	2.5
麻赤红壤	1 000	0.541	0.341	13	2.5
页赤红壤	1 000	0.523	0.333	6	2.5
侵蚀赤红壤	1 000	0.510	0.330	38	2.5
山地灌丛					
草甸土	1 000	0.573	0.353	40	2.5

#### 3.3 敏感参数的调整

虽然流溪河模型中的敏感参数都有明确的物理意义, 但由于所收集的数据口径不一致, 时间上不统一, 测量时的误差累积以及其他一些人为主观因素所造成的影响, 致使所给定的参数初值并不一定准确。因此需要先确定参数的初始值, 再在此基础上, 对参数进行逐个调整, 通过对调整参数进行扰动分析来确定模型的最佳参数组合。模型敏感参数调整的顺序依次为: 土壤饱和含水率 (cast), 土壤田间持水量 (cfc), 土壤饱和水力传导率 (ks), 土壤糙率 ( $n$ ), 河道曼宁系数 (mannning), 土壤层厚度 ( $z_s$ ), 土壤特性系数 ( $b$ )。

对 19900616、19950811 和 19960621 三场洪水进行人工扰动逐步迭代调参, 最终得出一组较优的敏感参数值, 其中调整后的土地利用类型参数值分别为: 针叶林 0.484, 常绿阔叶林 0.726, 灌木丛 0.242, 草地 0.484。调整后的土壤类型的参数如表 4 所示。

### 4 模型参数的验证及结果分析

为了检验参数的有效性, 利用调整所得的最优参数组合对 19860710、19880719 等 11 场洪水过程进行了模拟计算, 结果如图 4 所示:

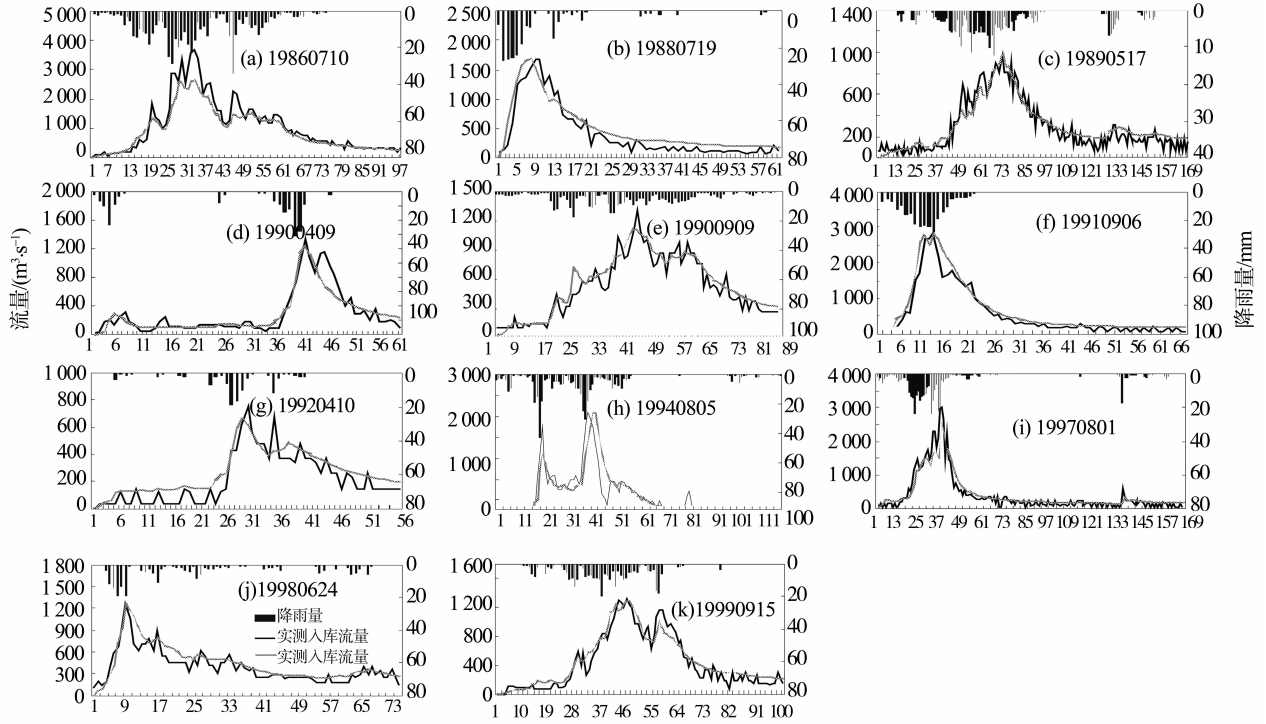


图 4 11 场洪水的验证结果

Fig. 4 The validation results of 11 floods

表 4 调整后的土壤类型参数

Table 4 The adjusted parameters' values of soil type

土壤类型	土壤厚度/mm	饱和含水率/%	田间持水率/%	饱和传导率/(mm·h <sup>-1</sup> )	土壤特性系数
潴育水稻土	1 100	0.422	0.286	18.4	2.7
麻黄壤	1 100	0.406	0.272	10.8	2.7
页黄壤	1 100	0.425	0.360	8.6	2.7
麻红壤	1 100	0.433	0.334	15.1	2.7
页红壤	1 100	0.418	0.330	6.5	2.7
麻赤红壤	1 100	0.433	0.338	14.0	2.7
页赤红壤	1 100	0.418	0.330	6.5	2.7
侵蚀赤红壤	1 100	0.408	0.327	41.0	2.7
山地灌丛					
草甸土	1 100	0.458	0.349	43.2	2.7

根据流溪河模型模拟的结果，统计了模型对 11 场验证洪水的模拟结果及其效果指标。如表 5 所示。

根据图 4(a) - (k) 和表 5 的结果，对流溪河模型的模拟作如下分析：

1) 模型对洪水整体过程的模拟效果较好。在验证模拟的 11 场洪水中，确定性系数均大于 75%，均值为 86.28%，其中大于 80% 的比例为 72.7%，而相关性系数全部大于 85%，均值为 94.74%。平均洪峰误差为 7.85%，平均峰现时间误差为 0.18 h，总的来讲，流溪河模型对白盆珠水

库的模拟误差小，模拟精度高。

2) 峰现时间模拟结果较好，但少数洪峰模拟值偏低。在峰现时间的模拟上，11 场验证洪水中，只有 19940805 洪水出现 2 h 误差，其他 10 场的峰现误差均在 1 h 之内，占总验证洪水的 90.9%，可以看出，模型对峰现时间的模拟效果较为理想。在峰值的模拟上，有 7 场洪水洪峰误差小于 5%，只有 19860710 洪水的洪峰误差略大，另外 3 场洪水的峰值误差不大。

## 5 结 论

通过本文的研究，可得出以下结论：

1) 本文采用的流溪河模型是全分布式物理水文模型，模型中的所有参数都有明确的物理意义，同时用较少的敏感参数即完整地表达了整个流域的流域特征，参数初值的确定与推求都较集总式概念模型要简单得多，也较其他现有分布式物理水文模型要快得多，因此，该模型在流域洪水模拟与预报方面有一定优势。

2) 本文采用 ARCGIS 基于高精度网格 (200 m × 200 m) 的数据提取方式进行流向、累积流、坡度以及子流域等数据的生成，并将流域单元划分为河道单元、边坡单元和水库单元，各单元采用不同的产汇流方式，与实际情况相符。就本研究流域而

表 5 参数验证结果的评价指标

Table 5 Evaluation indicator of the parameters validation results

洪水编号	实测峰值	模拟峰值	确定性系数	相关系数	洪峰误差	峰现时间误差
	( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )			%		h
19860710	3 691.3	2 624.6	87.1	97.2	28.7	0
19880719	1 669.4	1 705.5	86.9	95.3	2.2	1
19890517	977.0	977.5	90.0	95.3	0.1	0
19900409	1 339.3	1 224.9	86.3	93.3	8.5	0
19900909	1 321.3	1 118.1	90.3	95.7	15.4	1
19910906	2 825.1	2 799.1	91.9	97.6	0.9	0
19920410	758.9	664.3	77.4	92.7	12.5	1
19940805	2 597.9	2 605.7	78.0	88.8	0.3	-2
19970801	3 017.6	2 552.9	92.3	97.6	15.4	1
19980624	1 264.1	1 261.8	76.5	92.1	0.2	0
19990915	1 308.6	1 281.6	92.4	96.5	2.1	0
平均值	1 888.2	1 710.5	86.28	94.74	7.85	0.18

言, 平均 123  $\text{km}^2$  就有一个雨量站, 这样的高密度监测站点, 使模拟结果能达到较高的精度, 实用性强, 这对于该流域未来洪水预报和水库调度都具有很好的指导作用。

3) 在参数调整的过程中, 采用的 19900616、19950811 和 19960621 三场洪水, 综合考虑了洪水量级, 单双峰洪水等情况, 根据这三场洪水调整后的流域参数对于该流域的洪水具有较好的代表性和适用性, 验证模拟的结果也正说明了这一点。

4) 从验证结果可以看到, 流溪河模型对于白盆珠水库入库洪水的模拟效果较好, 平均确定性系数达到 86.28%, 平均相关性系数达到 94.74%, 平均洪峰误差只有 7.85%, 平均峰现时间误差只有 0.18 h, 说明流溪河模型在该流域上模拟精度高, 误差小, 具有很好的应用前景, 为进一步的洪水预警预报提供了理论依据。

#### 参考文献:

[1] CRAWFORD N H, LINSLEY R K. Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV. Technical Report NO. 39[R]. Stanford University, 1966: 210.

[2] FELDMAN AD. HEC-1 flood hydrograph package[C]// Singh V P. Computer Models of Watershed Hydrology. Colorado: Water Resources Publications, 1995: 133 - 150.

[3] ZHAO R J. The Xinjiang model applied in China[J]. Journal of Hydrology, 1992, 135(1): 371 - 381.

[4] 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.

[5] SUGAWARA M. Tank model[C]// Singh V P, ed. Computer Models of Watershed Hydrology. Colorado: Water Resources Publications, 1995: 165 - 214.

[6] FREEZE R A, HARLAN R L. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model[J]. Journal of Hydrology, 1969, 9(3): 237 - 258.

[7] ABBOTT M B, BATHURST J C, CUNGE J A, et al. An

introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen[J]. Journal of Hydrology, 1986, 87(1/2): 45 - 59.

[8] ABBOTT M B, BATHURST J C, CUNGE J A, et al. An introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen, 'SHE', 2: Structure of a Physically-based, distributed Modelling System[J]. Journal of Hydrology, 1986, 87: 61 - 77.

[9] LIANG X, WOOD E F, LETTENMAIER D P. Surface soil moisture parameterization of the VIC - 2L model: Evaluation and modification [J]. Global and Planetary Change, 1996, 13(1/4): 195 - 206.

[10] KOUWEN N. WATFLOOD: a micro-computer based flood forecasting system based on real-time weather radar[J]. Canadian Water Resources Journal, 1988, 13(1): 62 - 77.

[11] JULIEN PY, SAGHAFIAN B, OGDEN FL. Raster-based hydrologic modeling of spatially-varied surface runoff[J]. Water Resources Bulletin, 1995, 31(3): 523 - 536.

[12] VIEUX BE, VIEUX JE. VfloTM: A Real-time Distributed Hydrologic Model [C] // SPceedings of the 2nd Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, Nevada, 2002.

[13] 陈洋波. 流溪河模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[14] 刘金凤, 刘涌辉. 白盆珠水库安全鉴定的校核洪水计算[J]. 广东水利水电, 2000, (2): 17 - 20.

[15] 陈洋波, 黄锋华, 徐会军, 等. 流溪河模型 II: 参数推求[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2010, 49(2): 105 - 112.

[16] 黄善和, 陈洋波, 蒋华波. 基于流溪河模型的武江流域洪水预报方案初探[C]//中国水利学会第四届青年科技论坛. 北京, 2008: 255 - 260.

[17] 陈洋波, 黄锋华, 徐会军. 连江流域洪水预报分布式物理水文模型初步研究[C]//2008 中国水利学会学术年会, 海口, 2008: 955 - 960.

[18] 元数据检索: 按土壤类型查询[Z] <http://www.soil.csdb.cn/> (中国科学院南京土壤研究所). 2009 - 5 - 1.

[19] 舒晓娟, 陈洋波, 徐会军, 等. Wetspa 模型在流溪河水库入库洪水模拟中的应用[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(1): 17 - 20.