

基于流溪河模型的湘水流域洪水预报方案研究

李国文¹, 陈洋波², 覃建明², 向奇志¹, 李明亮³

(1. 江西省水文局, 江西 南昌 330002; 2. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275;
3. 江西省赣州市水文局, 江西 赣州 341000)

摘要: 为了探讨流溪河模型在中小河流洪水预报中的适用性, 本文以湘水流域构建了流溪河模型. 在研究中, 根据河道分级的不同分别构建了基于1级河道、1~2级河道、1~3级河道的流溪河模型, 采用1场洪水进行参数优选, 以50场洪水进行洪水模拟精度验证. 研究表明, 河道分级对流溪河模型模拟精度有较大影响, 基于1~3级河道构建的流溪河模型可以很好地模拟洪水过程; 采用1场实测洪水进行参数优选的流溪河模型, 在实测资料系列不长的我国中小河流洪水预报中应用具有明显优势; 研究建立的模型, 模拟效果良好, 可用于湘水流域的洪水预报.

关键词: 中小河流; 洪水预报; 湘水流域; 流溪河模型

中图分类号: TV124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4701(2017)05-0335-05

0 引言

湘水流域是江西省典型的中小河流, 也是江西省中小河流洪水监测系统中的重要中小河流. 湘水流域面积小, 洪水陡涨陡落特征明显, 从造峰雨出现到洪峰产生往往只有3~4小时的时间. 湘水流域上游山丘区山洪灾害频繁、中下游地区洪涝交织, 灾情惨重^[1]. 洪水预报是湘水流域防洪减灾的一项重要非工程措施. 分布式物理水文模型是新一代流域洪水预报模型, 汇流计算采用具有物理意义的水动力学方法进行计算, 可以精细化地计算河道汇流, 为中小河流洪水预报提供了新的模型. 代表性的分布式物理水文模型有 SHE 模型^[2]、VIC 模型^[3]、WetSpa 模型^[4], 流溪河模型^[5~7]等. 其中, 流溪河模型假定流域河道断面为矩形, 采用卫星遥感数据估算河道断面尺寸, 为模型在无河道断面尺寸资料的山区性河流洪水预报中应用提供了条件. 流溪河模型提出了基于 PSO 法的模型参数自动优选方法^[8], 实际应用中只要有一场具有代表性的实测洪水就可以优选模型参数. 流溪河模型已经成功应用于多种规模的流域洪水预报^[9].

2 研究区概况

湘水亦称雁门水, 属赣江支流, 呈南北流向. 发源于赣闽交界、武夷山脉笔架山南麓的寻乌县罗珊乡天湖下, 自东南向西北流经寻乌县罗珊乡, 在筠门岭镇元兴村入会昌境, 至筠门岭折向正北流经会昌县腹地, 于会昌县湘江镇和绵江汇合后注入贡水. 湘水流域处于亚热带季风气候区, 3~6月常受北方冷空气南下影响, 出现锋面雨, 锋面雨持续时间较长, 多则达半月之久, 一次降雨过程多在3~5天, 降雨量大; 7~9月时有台风影响, 台风雨持续时间较短, 一般在3天左右, 降雨强度大. 流域呈方形, 植被尚好, 麻州站多年平均流量47.3 m³/s, 多年平均降雨量1560 mm, 多年平均蒸发量为1069 mm(蒸发能力). 水位流量关系高水时尚稳定. 警戒水位为96.00 m. 麻州水文站位于湘水流域出口处, 1958年1月设立于会昌县麻州乡. 测验河段大致顺直, 河床由细砂组成, 上游200 m处有大弯, 下游500 m处也有弯道. 湘水麻州以上流域面积1758 km², 主河长86 km, 主河道比降1.53‰. 本文以麻州水文站以上流域开展研究, 以下简称湘水流域, 流域简图如图1.

收稿日期: 2017-05-05

项目来源: 江西省水利厅重大科技项目(KT201407), 国家自然科学基金项目(50479033), “十二五”科技支撑计划项目(2012BAK10B06-04)

作者简介: 李国文(1964-), 男, 硕士, 高级工程师.

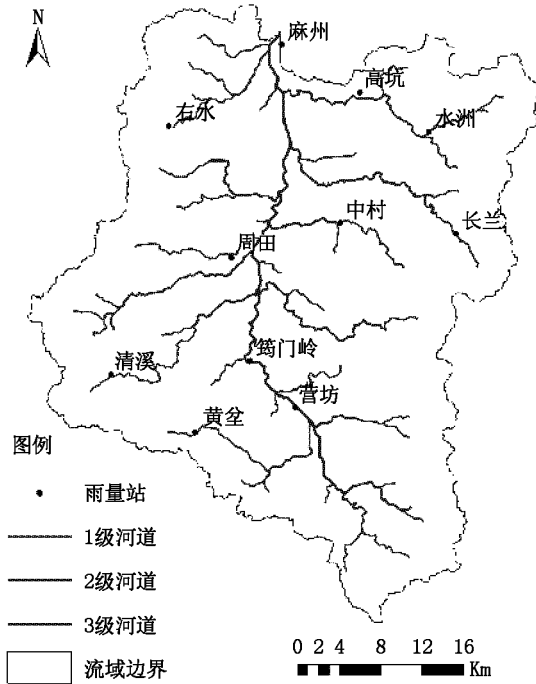


图1 湘水流域简图

2 模型构建

2.1 流溪河模型

流溪河模型^[10]采用正方形网格的DEM从水平方向将流域划分成网格,也称为单元流域,并分成边坡单元、河道单元和水库单元。在单元流域上进行蒸散发量及产流量的计算,各单元流域上产生的径流量通过汇流网络进行逐单元汇流至流域出口,汇流分成边坡汇流和河道汇流,分别采用运动波法和扩散波法进行计算。流溪河模型根据DEM数据,采用D8法^[10]推求河道拓扑结构,采用Strahler法^[11]进行河道分级。通过在河道上设置虚拟结点,将各级河道分成虚拟河段,假定同一虚拟河段内的所有河道断面具有相同的形状和尺寸,以简化对河道断面形状与尺寸的估算。流溪河模型假定河道断面形状为梯形,河道断面尺寸用三个指标来描述,包括底宽、底坡和侧坡。河道底宽采用卫星遥感影像进行估算,底坡则根据虚拟河段内各单元的高程进行估算。对侧坡目前没有好的估算方法,主要根据经验,是目前流溪河模型中还没有较好方法估算的指标。流溪河模型河道汇流计算方法是流溪河模型的一大特点和优势,解决了分布式模型河道汇流计算时数据难以获取的难题,使流溪河模型具备了较强的应用生命力。

2.2 模型基础数据

流溪河模型建模所需基础数据主要包括:DEM数

据、土地利用数据和土壤类型数据。

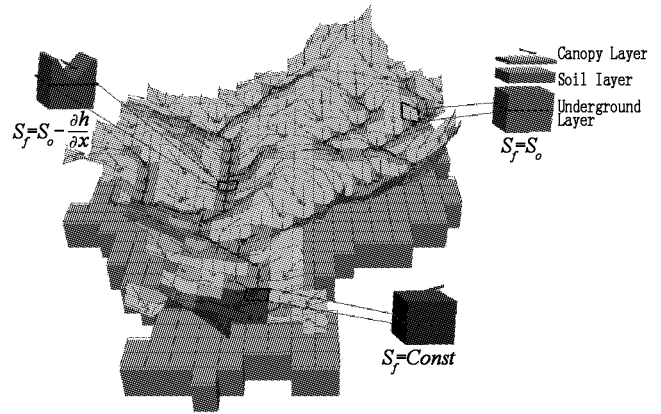


图2 流溪河模型原理图

(1)DEM数据采用SRTM^[12]公共数据库中的数据,空间分辨率为90 m×90 m。

(2)土地利用数据采用美国地质调查局全球土地覆盖数据库^[13]中的数据,空间分辨率为1 000 m×1 000 m,经重采样转换为90 m×90 m的空间分辨率。有包括常绿针叶林、常绿阔叶林、矮树丛、湖泊和耕地在内的5种土地利用类型,面积占比分别22.4%、47.4%、20.9%、0.2%和9.1%。

(3)土壤类型采用国际粮农组织的土壤数据^[14],空间分辨率为1 000 m×1 000 m,经重采样转换为与DEM相同的空间分辨率。有12种土壤类型,主要土壤类型有CN10033、CN10047和CN10097,所占比例分别为30.9%、14.4%和17.1%,其余单种类型土壤不超过15%,CN10033所占比例最大,达到流域面积的25%以上。

2.3 模型构建

湘水流域的流溪河模型基于90 m×90 m的DEM进行构建。为了分析河道汇流对流域洪水过程模拟的影响,分别将流域内河道划分成1~4级河道。当河道划分等于4级时,通过卫星遥感影像发现4级河道的河道形态不明显,故本文采用的最高级河道为3级。与之相应,在本项研究中,分别建立基于1级河道、1~2级河道和1~3级河道的3个流溪河模型(下文分别简称为1级河道模型、2级河道模型、3级河道模型)。针对不同河道分级的模型,分别设置结点,划分虚拟河段,如图3。对于不同的河道分级,划分的边坡单元和河道单元个数不同,设置的结点和虚拟河道数也不相同,如表1所列。参照Google Earth遥感影像,估算了各个虚拟河道的断面宽度和底坡。

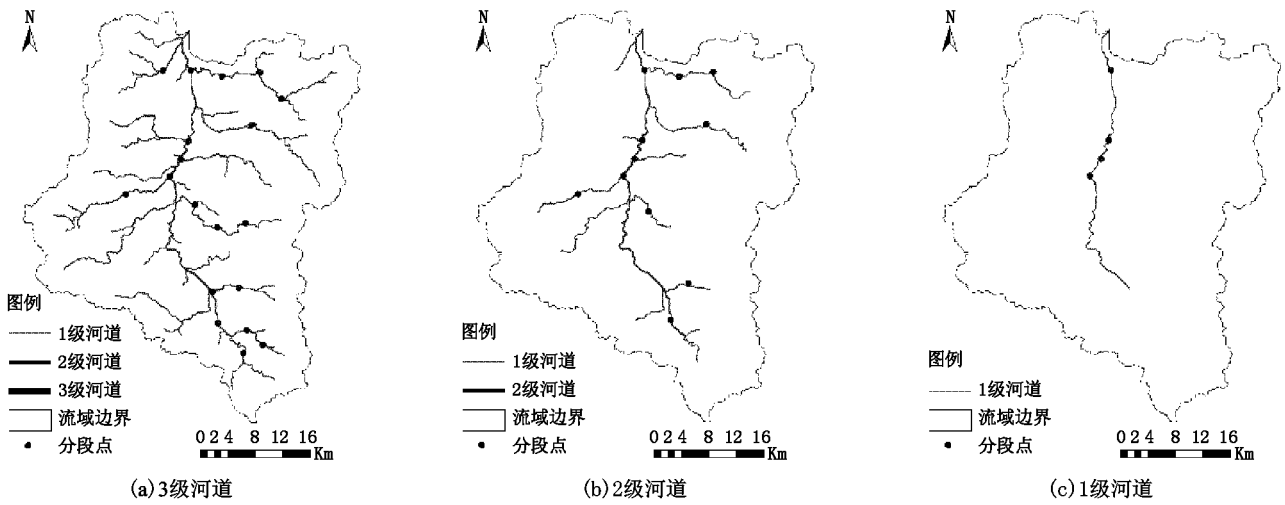


图 3 流溪河模型结构示意图

表 1 模型结构信息表

河道分级	河道单元数	边坡单元数	结点数	虚拟河段数
1	466	219 288	4	5
2	1 856	217 898	11	14
3	4 163	215 591	19	33

表 3 土壤类参数初值

土壤编号	厚度 /mm	饱和含水率	田间持水率	饱和水力传导率/(mm/h)	凋萎含水率
CN10033	1 000	0.451	0.300	8.630	0.176
CN10039	600	0.515	0.422	2.030	0.296
CN10047	1 000	0.455	0.319	6.350	0.192
CN10051	1 000	0.508	0.411	2.280	0.280
CN10065	1 000	0.491	0.315	0.580	0.315
CN10097	700	0.455	0.314	7.110	0.187
CN10169	1 000	0.470	0.284	19.500	0.110
CN10515	1 000	0.444	0.160	54.102	0.806
CN10647	1 000	0.454	0.337	4.060	0.214
CN10793	1 100	0.436	0.249	15.748	0.149
CN30135	1 000	0.435	0.207	28.448	0.121
CN30149	1 300	0.429	0.211	24.130	0.132

3 模型率定

3.1 初始参数推求

由于流溪河模型是基于各单元上的流域物理特性确定模型初始参数,相应参数值不会因为河道分级的不同而不同。因此,本项研究的 3 个模型采用相同的模型初始参数。流溪河模型初始参数分为 4 大类,包括:地形类参数、气象类参数、土壤类参数和土地利用类参数。

(1) 地形类参数包括流向和坡度。地形参数根据 DEM 直接计算确定,不再调整,是不可调参数。

(2) 气象类参数主要是蒸发能力,根据经验,所有单元均取 5 mm/d。

(3) 土地利用类型参数是蒸发系数和边坡糙率。蒸发系数是个非常不敏感的参数,根据流溪河模型参数化经验,统一取为 0.7。边坡糙率根据文献^[15]推荐值确定,如表 2。

表 2 土地利用类参数初值表

土地利用类型	蒸发系数	糙率
常绿针叶林	0.7	0.40
常绿阔叶林	0.7	0.60
矮树丛	0.7	0.40
湖泊	0.7	0.20
耕地	0.7	0.15

(4) 土壤类参数包括土壤厚度、饱和含水率、田间持水率、饱和水力传导率、凋萎含水率和土壤特性。饱和含水率、田间持水率、饱和水力传导率和凋萎含水率采用由 Arya 等人提出的土壤水力特性计算器^[15]计算,结果如表 3。土壤特性统一取 2.5。

3.2 参数优选

对不同的河道分级,本文统一以 2012061007 场次洪水进行模型参数优选。本文图 4 仅列出了 3 级河道参数优选过程中适应值和参数值的进化结果。据图所示,经过 26 次的进化后,适应值和参数值基本保持不变,模型参数值收敛到最优。

4 模型研究

4.1 不同河道分级时的洪水模拟

分别使用 1 级河道模型、2 级河道模型、3 级河道模

型及对应的模型初始参数,对 1987062613、1999052508 两场洪水进行模拟,结果如图 5。对模拟结果进行统

计,统计指标如表 4。表中“+”表示峰现时间滞后,“-”表示峰现时间提前。

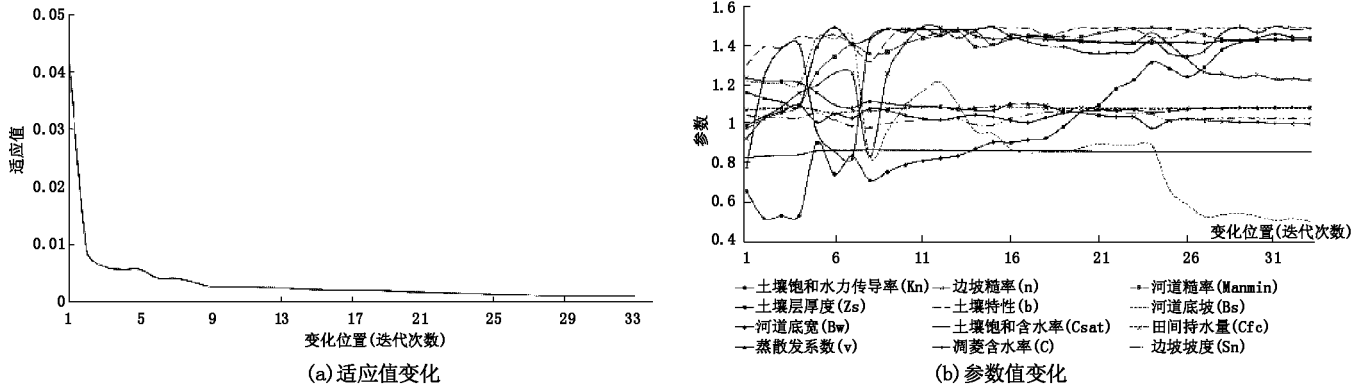


图 4 参数优选过程中参数进化图(3 级河道)

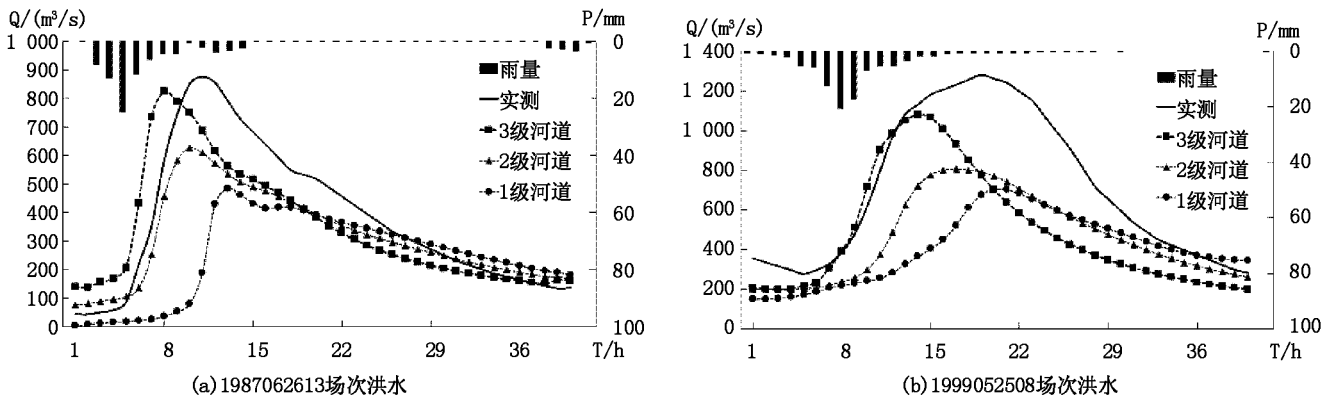


图 5 不同河道分级时的洪水模拟结果

表 4 不同河道分级洪水模拟结果统计指标

模型	1987062613					1999052508				
	确定性系数	洪峰误差/%	峰现时间差/h	径流系数	洪峰流量/(m³/s)	确定性系数	洪峰误差/%	峰现时间差/h	径流系数	洪峰流量/(m³/s)
3 级河道	0.78	6.0	-3	0.93	825	0.67	15.7	-5	0.94	1 079
2 级河道	0.84	28.7	-1	0.90	626	0.67	37.1	-2	0.64	805
1 级河道	0.27	44.7	2	0.72	485	0.42	44.9	1	0.43	706

4.2 不同河道分级对流域洪水的影响

从模拟结果可以看出,河道分级对模拟的洪水过程的形状、峰值、峰现时间都有影响,可归纳如下:

(1)河道分级越多,模拟的洪水的洪峰流量越大、次洪径流系数越大、洪峰出现时间提前。对于 1987062613 号洪水,1 级河道的模型模拟的洪峰流量为 485 m³/s、次洪径流系数为 0.72;2 级河道的模型模拟的洪峰流量为 626 m³/s、次洪径流系数为 0.90,洪峰流量比 1 级河道时增大 29.07%,次洪径流系数增加

18%,洪峰出现时间提前 3 小时;3 级河道的模型与 2 级河道的模型模拟结果相比,洪峰流量增大 31.78%,次洪径流系数增加 3%,洪峰出现时间提前 2 小时。对于 1999052508 号洪水,模拟结果也有此趋势(表 4)。河道分级对洪峰流量及洪水过程形状的影响显著。

(2)1 级河道的模型模拟结果与实测值有明显不同,不仅峰值流量与实测值有较大误差,洪水过程的形状与实测值也明显不同。其中,1987062613 号洪水模拟的洪峰流量与实测值的误差达到 44.7%,峰现时间

滞后 2 小时。1999052508 号洪水模拟的洪峰流量与实测值的误差达到 44.9%，峰现时间滞后 1 小时；2 级河道的模型模拟结果的效果与 1 级河道的相比有明显提高，洪水过程的形状与实测结果较为接近，峰值误差明显降低；3 级河道的模型的模拟结果与实测值较为接近，模拟的洪水峰值误差明显降低，洪水过程的形状也与实测结果趋于一致。可以得出结论，1 级河道划分不能充分模拟河道汇流过程，影响了模型的模拟精度，在实际中不宜采用。

5 模型验证

5.1 洪水资料

湘水流域内有 11 个雨量站，流域出口处的麻州水文站有较长期的水文观测资料。本文收集了湘水流域内 1985 年以来的 50 场实测洪水过程的数据，包括雨量站降雨及水文站流量，均以小时为时段。将洪峰流量小

于 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水定义为小洪水，洪峰流量大于 $800 \text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水定义为大洪水，其它洪水定义为中洪水。则共有小洪水 10 场，中洪水 24 场，大洪水 16 场，具有较好的代表性。

5.2 验证方法及结果

采用三个模型及相应的优选参数，分别对 50 场洪水进行了模拟，统计所模拟的各场洪水的 6 个评价指标。由于数据较多，表 5 仅列出了各级模型的平均统计指标，图 6 仅绘出了其中 6 场洪水的模拟结果。

从上述的模拟结果来看，3 级河道时的流溪河模型洪水模拟效果最好。不仅在各个统计指标中效果最优，模拟的洪水过程与实测的洪水过程的吻合程度也最好。2 级河道时的流溪河模型洪水模拟效果也不错，但与 3 级河道的模型相比，总体性能差一些。1 级河道时的流溪河模型洪水模拟效果较差，大部分情况下，模拟的洪峰流量较实测值偏低，峰现时间滞后，洪水过程也不理想，基本上不能将实测洪水过程模拟出来。

表 5 不同河道分级的流溪河模型洪水模拟结果统计指标表

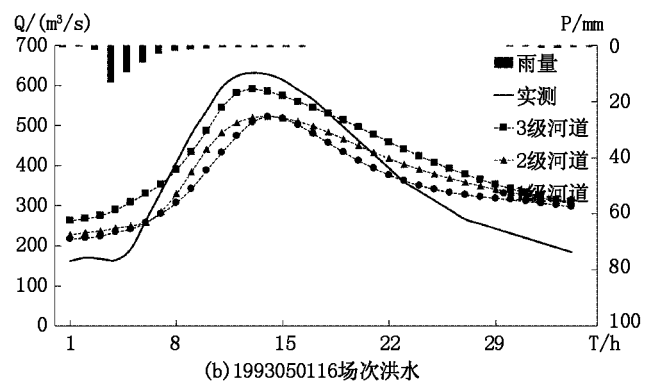
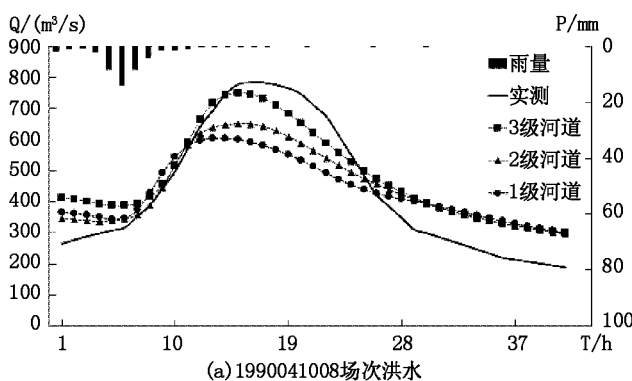
模型	确定性系数	相关系数	过程相对误差 /%	洪峰误差 /%	水量平衡系数	峰现时间差 /h
3 级河道模型	0.73	0.94	29	5.95	1.11	-2.90
2 级河道模型	0.65	0.92	30	9.79	1.10	-2.02
1 级河道模型	0.59	0.86	30	11.84	1.05	-1.72

6 结论

本文针对湘水流域的特性，基于流溪河分布式水文模型构建湘水流域洪水预报模型。在模型构建过程中，针对河道分级对洪水预报结果的影响进行了重点研究。通过麻州水文站 50 场洪水的验证分析，可得到如下结

论：

(1) 在流溪河模型中，河道分级对模型模拟精度有很大影响。采用 1~3 级河道时构建的模型洪水模拟精度最好，可很好地模拟实测洪水过程；采用 1~2 级河道构建的模型洪水模拟精度较差；仅采用 1 级河道构建的模型不能模拟实测洪水过程。针对中小河流进行模型建模洪水预报时，河道划分以 3 级为适宜。



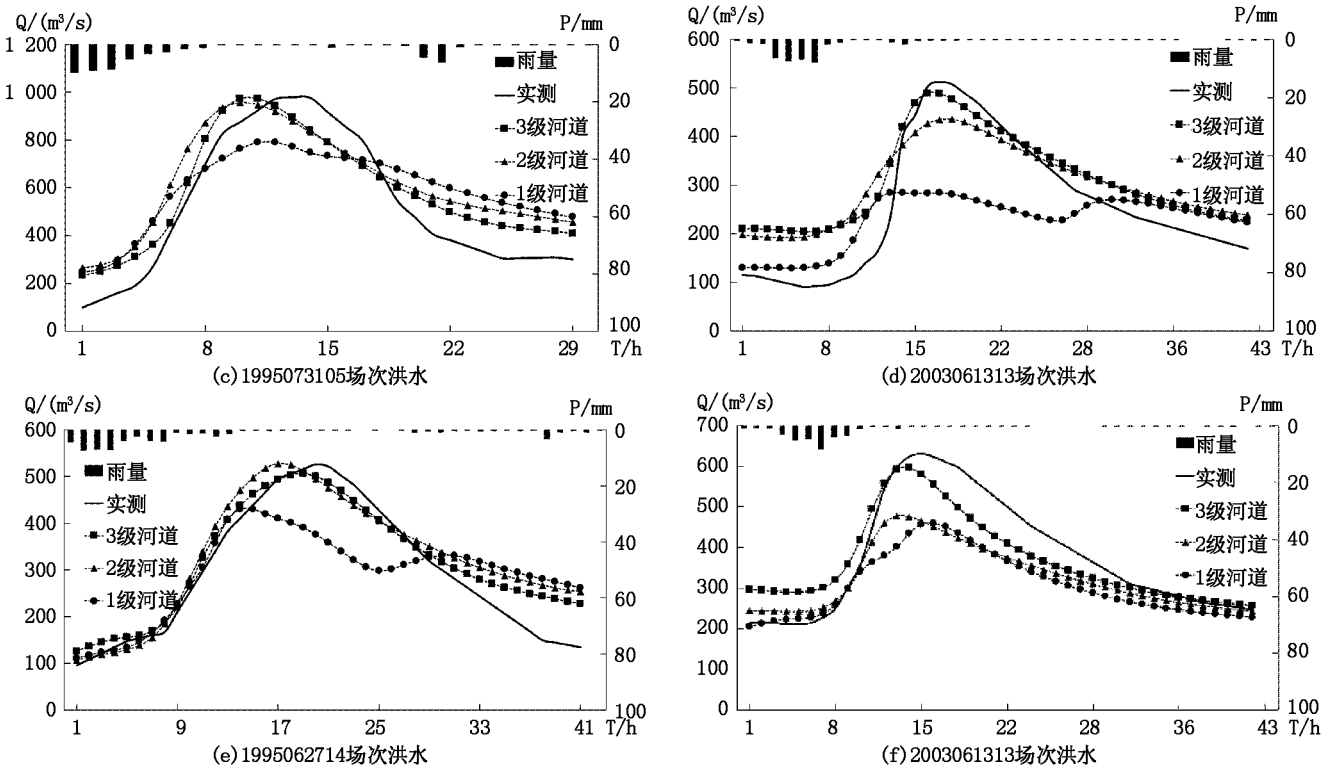


图6 湘水流域不同河道分级的流溪河模型洪水模拟结果

(2) 基于麻州站点 50 场洪水进行验证,按照 1~3 级河道建立的流溪河模型,洪水过程模拟结果与实测值吻合很好。洪峰流量是评价中小河流洪水预报方案等级的主要指标,当模拟的洪峰误差小于 20% 时,认为洪水模拟场次合格。文中 3 级河道的流溪河模型对 50 场洪水进行模拟,模拟的洪峰误差均值为 5.98%,49 场洪水模拟的峰值误差低于 20%,只有 1 场不合格,合格率高达 98%,模拟效果很好。根据我国水文情报预报规范,该预报方案等级可评定为甲等,可用于湘水流域实时洪水预报。

(3) 流溪河模型采用 1 场洪水进行参数优选的方式,能够取得很好的模型模拟精度,在实测资料系列不长的我国中小河流洪水预报中应用具有明显优势。

(4) 以湘水流域为例,流溪河模型在进行中小河流洪水预报时,性能非常稳定,对绝大多数场次洪水的模拟效果均较好,特别是对洪峰流量的模拟精度很高。

参考文献:

[1] 尹树斌,湘水流域近数十年洪涝灾害特性分析[J]. 湖南师范大学自然科学学报,2006(04):93~96.
 [2] Abbott, M. B. et al., 1986, An Introduction to the European Hydrologic System - System Hydrologique Europeen, 'SHE', 2: Structure of a Physically based [J]. distributed modeling System, Journal of Hydrology, 87

(1986).

[3] Liang, X., D. P. Lettenmaier, E. F. Wood, and S. J. Burges, 1994, A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models, J. Geophys. Res., 99 (D7), pp. 14415 ~ 14428.
 [4] Wang, Z., Batelaan, O. & De Smedt, F., 1996, A distributed model for Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere (WetS-pa). Phys. Chem. Earth, 21, 189 ~ 193.
 [5] 陈洋波,流溪河模型[M]. 北京:科学出版社,2009.
 [6] 陈洋波,任启伟,徐会军,等. 流溪河模型 I: 原理与方法[J]. 2010, 中山大学学报(自然科学版), 49(1):105~112.
 [7] 陈洋波,任启伟,徐会军,等. 流溪河模型 II: 参数确定[J]. 2010, 中山大学学报(自然科学版), 49(2):105~112.
 [8] Chen, Yangbo, Ji Li, Huijun Xu. Improving flood forecasting capability of physically based distributed hydrological model by parameter optimization. Hydrology & Earth System Sciences, 2016, 20:375~392.
 [9] 黄家宝,董礼明,陈洋波,等. 基于流溪河模型的乐昌峡水库入库洪水预报模型研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(4):1~7.
 [10] O' Callaghan, J., and Mark, D. M., 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data, Comput. Vis. Graph. Image Process, 1984, 28(3):323~344.
 [11] Strahler, A. N. Quantitative Analysis of watershed Geomorphology, Transactions of the American Geophysical Union, 1957, 35(6):913~920.
 [12] [http://srtm.csi.cgiar.org/\[DB/OL\]](http://srtm.csi.cgiar.org/[DB/OL]).
 [13] [http://Landcover.usgs.gov/\[DB/OL\]](http://Landcover.usgs.gov/[DB/OL]).
 [14] [http://www.isric.gov/\[DB/OL\]](http://www.isric.gov/[DB/OL]).

- [15] Wang, Z., Batelaan, O. & De Smedt, F., 1996, A distributed model for Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere (WetS-pa) [J]. Phys. Chem. Earth, 1996, 21: 189 ~ 193.
- [16] Arya, L. M., and J. F. Paris. 1981. 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.

编辑: 张绍付

Flood forecasting of small and medium sized watershed based on Liuxihe model in Xiangshui river basin

LI Guowen¹, CHEN Yangbo², QIN Jianming², XIANG Qizhi¹, LI Mingliang³

(1. Jiangxi Provincial Hydrology Bureau, Nanchang 330002, China;

2. School of Geography and Planning, Sun Yat - sen University, Guangzhou 510275, China;

3. Ganzhou Municipal Hydrology Bureau of Jiangxi Province, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In order to study the applicability of the Liuxihe model in the flood forecast for the small and medium sized watershed, the flood forecasting system based on Liuxihe model in Xiangshui River Basin of Jiangxi province was set up. In the study, according to the classification of different river were constructed based on level 1 channel, 1 ~ 2 grade, 1 ~ 3 model of the flow of the river channel; Parameter optimization using 1 a flood; Verified with 50 flood flood simulation accuracy. The results show that the classification has a great influence on accuracy of Liuxihe model simulation, based on level 1 ~ 3 channel the flow of river model can well simulate the flood process; The Liuxihe model can effectively optimize the model's parameters with only one measured flood, thus it takes great advantages in the application of real - time flood forecasting of small and medium sized watersheds in China. Liuxihe model, the simulation effect is good, can be used in meijiang river basin flood forecasting.

Key words: Small and medium sized watershed; Flood forecasting; Xiangshui River Basin; Liuxihe model

翻译: 李国文

更 正

《江西水利科技》2017年第4期目次《混合植物人工浮岛修复富营养化水体试验》一文作者方媛媛应为方媛。特此更正!

《江西水利科技》编辑部