

# 太湖流域湖西山丘区小流域 水文模型适用性研究

唐 仁, 汪院生, 钟 栗, 李卫东, 秦 灏

(江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215128)

**摘要:**选取太湖流域湖西山丘区具有代表性的洛阳河流域,收集了 2016—2017 年的实测洪水资料,采用 API 水文模型、新安江模型和太湖流域水文模型进行洪水模拟,分析各模型的适用性和模拟精度。研究表明,各模型在洛阳河流域的适用性较好,均取得了良好的效果,其中新安江模型模拟精度总体优于 API 模型和太湖流域水文模型,为湖西山丘区其他小流域的洪水模拟提供了参考。

**关键词:**API 模型; 新安江模型; 太湖流域水文模型; 适用性

**中图分类号:**TV124 **文献标识码:**B **文章编号:**1007-7839(2020)04-0026-07

## Research on the applicability of hydrologic models in hilly areas of Huxi District in Taihu Basin

TANG Ren, WANG Yuansheng, ZHONG Li, LI Weidong, QIN Hao

(Jiangsu Taihu Planning and Design Institute of Water Resources Co., Ltd, Suzhou 215128, Jiangsu)

**Abstract:**The Luoyang river watershed, a representative part of the hilly areas of Huxi District in Taihu Basin, was selected to collect the measured flood data from 2016 to 2017. The API hydrological model, Xin'an river model and Taihu basin hydrological model were used for flood simulation to analyze the applicability and simulation accuracy of each model. The results showed that the models all had good applicability in Luoyang river watershed. The Xin'an-jiang model performed better than API model and Taihu hydrological model, which provided a reference for flood simulation of other watersheds in hilly areas of Huxi district.

**Key words:**API model; Xin'anjiang model; the hydrological model of Taihu basin; applicability

## 1 概 述

我国山丘区面积约占国土面积的 67%, 山丘区分布范围广、数量众多,地形地貌条件复杂。随着气候变化和人类活动影响加剧,越来越多的短历时强降雨、强对流等极端天气致使山洪灾害频发。由于山丘区洪水具有陡涨陡落、突发性强、汇流速度快等特点,洪涝灾害程度往往较重。为有效应对山

洪灾害的威胁,一方面通过工程措施提高山洪防治能力,另一方面,运用水文模型实现对山丘区洪水的模拟预报已成为有效的非工程措施之一。

国内外学者研发了各类水文模型用于山丘区洪水模拟预报,包括 API 模型、新安江模型、TOP-MODEL 和 HEC-HMS 模型等。由于不同地区的气候特征和下垫面存在差异,以及水文模型结构、原理的差异和参数取值的不确定性等因素,各类模型

收稿日期:2019-12-09

基金项目:江苏省水利科技项目(2016018);江苏省水利科技项目(2017016)

作者简介:唐仁(1991—),男,工程师,主要从事水利规划工作。E-mail: kof-tangren@sohu.com

应用于不同地区的适用性和模拟精度有所不同。一方面,同一水文模型在不同地区的适用性及洪水预报精度存在差异,王璐等<sup>[1]</sup>选取5种常用水文模型在全国14个典型山丘区小流域开展模拟对比分析,研究表明HEC-HMS模型综合模拟效果最优,大伙房水文模型在植被覆盖良好、水系较发达的小流域效果有限,API、TOPMODEL和新安江模型在湿润小流域取得了较好的效果。另一方面,不同水文模型在同一地区的适用性及洪水预报精度也有差异,崔杰石等<sup>[2]</sup>将SWAT模型和VIC模型应用于汤河流域,研究表明SWAT模型更适合于汤河流域水文模拟;刘佩瑶等<sup>[3]</sup>采用新安江模型和改进后的BP神经网络模型进行了闽江富屯溪流域水文预报,发现新安江模型在丰水年模拟效果较好,BP模型总体精度更优;王婕等<sup>[4]</sup>以长江上游支河沿渡河流域为研究对象,对比分析了新安江模型、TOPMODEL、BP神经网络模型对场次暴雨洪水过程的模拟效果及适用性,结果表明新安江模型的适用性更好。因此,选择合适的水文模型进行山丘区洪水预报具有重要的意义。

太湖流域湖西区位于流域上游、太湖西北部,区域西、南部为山丘区,山丘区约占区域总面积的1/3,山丘区洪水是太湖及区域洪水的主要来源。长期以来,湖西山丘区流域缺乏系统的实测流量资料,对山丘区洪水过程及河道水位的模拟缺乏资料验证,山丘区洪水的模拟及其精度的提高一直是该地区水文分析的难点问题。本文选取太湖湖西山丘区具有代表性的洛阳河流域,收集了2016—2017年实测场次洪水资料,应用API水文模型、新安江模型和太湖流域水文模型进行洪水模拟,分析研究其适用性和模拟精度。

## 2 资料与方法

### 2.1 流域概况

洛阳河流域位于茅山东侧,太湖流域湖西区西北部,北接宁镇山脉,西以北山水库南分干渠为界,南临茅山余脉,东至洮滂平原边缘,集水面积153.7 km<sup>2</sup>。流域地处北亚热带季风气候区,全年平均气温15.4℃,多年平均降水量1 102 mm,降水量年际变化较大,年内分配不均,汛期降水量约占全年的51.5%。洛阳河发源于高骊山、凉帽山,流域汇水至南宫附近的丁角桥、吴村桥处分为通济河、胜利河两支。流域内有白兔、东昌街、旧县和春城4座雨量代表站,旧县、吴村桥2处水位站,以及江苏

省水文局镇江分局于2016年新设的通济河丁角桥、埭坡桥和胜利河吴村桥、拖板桥4个测流断面<sup>[5]</sup>。由于缺乏长系列水文观测资料,本文利用洛阳河流域2016—2017年共4个场次洪水资料进行参数的率定,对比分析各水文模型对实测洪水的模拟精度。

### 2.2 API水文模型

API水文模型根据经验性的次降雨径流相关关系和瞬时单位线模拟山丘区洪水的产汇流过程。以《江苏省暴雨洪水图集》<sup>[6]</sup>根据实测雨洪资料(次降雨量 $P$ 和径流深 $R$ )建立的 $P + P_a \sim R$ 相关关系,采用双曲线方程拟合降雨径流关系计算山丘区产流,其中土壤前期影响雨量 $P_a$ 采用降雨资料从第一次洪水日期往前推20 d以上计算得到, $C_p$ 、 $C_i$ 为常数。

$$R = \sqrt[3]{(P + P_a - C_p)^3 + C_i^3} - C_i \quad (1)$$

山丘区汇流计算采用瞬时单位线法,该方法认为流域对地面净雨的调蓄作用可以用 $n$ 个串联的线性水库的调节作用来模拟<sup>[7-8]</sup>,由此推导出瞬时单位线公式:

$$u(t) = \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} \frac{e^{-\frac{t}{k}}}{k\Gamma(n)} \quad (2)$$

式中: $\Gamma$ 为伽马函数; $n$ 为线性水库个数; $k$ 为有关流域汇流时间的参数; $h$ ;  $u(t)$ 为相应于时间变量 $t$ 的瞬时单位线。

### 2.3 新安江模型

基于蓄满产流的新安江模型由河海大学赵人俊等<sup>[9]</sup>提出并逐步完善,在国内湿润和半湿润地区的洪水预报中得到了广泛应用。新安江模型是一个结构分散的概念性模型,分为蒸散发计算、产流计算、分水源计算、汇流计算4个层次结构,模型计算流程,见图1。

新安江模型有17个参数,根据物理意义与在模型中的作用分为4类:

(1)蒸散发参数 $K$ 、 $WUM$ 、 $WLM$ 、 $C$ 。其中, $K$ 为蒸散发折算系数, $WUM$ 为上层张力水容量, $WLM$ 为下层张力水容量, $C$ 为深层散发系数。

(2)产流参数 $WM$ 、 $B$ 、 $IM$ 。其中, $WM$ 为流域平均张力水容量, $B$ 为张力水蓄水容量曲线指数, $IM$ 为不透水面积比例。

(3)水源划分参数 $SM$ 、 $EX$ 、 $KG$ 、 $KI$ 。其中, $SM$ 为表层自由水蓄水容量, $EX$ 为自由水蓄水容量曲线指数, $KG$ 为地下水出流系数, $KI$ 为壤中流出流系数。

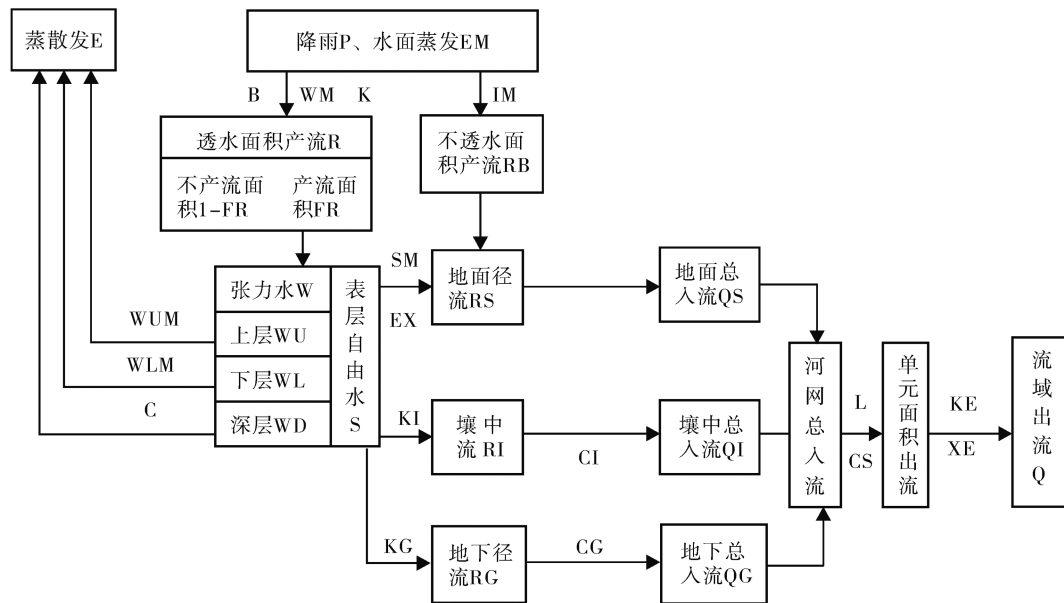


图1 新安江模型计算流程

(4) 汇流参数  $CG$ 、 $CI$ 、 $CS$ 、 $L$ 、 $KE$ 、 $XE$ 。其中,  $CG$  为地下水消退系数,  $CI$  为壤中流消退系数,  $CS$  为河网蓄水消退系数,  $L$  为单元流域汇流滞时,  $KE$  和  $XE$  为马斯京根法演算参数。

## 2.4 太湖流域水文模型

太湖流域数学模型由河海大学程文辉等<sup>[10]</sup>研制开发, 主要由水文模型和河网水动力模型 2 个模块构成。水文模型根据降雨、蒸发和下垫面情况, 针对平原区、湖西丘陵区及浙西山区等不同分区产汇流特点, 分别进行降雨径流模拟。湖西山丘区按水面、水田、旱地和城镇建成区 4 类下垫面分别计算产流, 下垫面资料一般由最新土地利用调查数据或遥感影像解译获取。水面产流由降雨扣除蒸发得到; 水田产流考虑水稻不同生长期的灌溉水深、需水系数、水田下渗及灌排方式, 逐时段进行水量调节计算, 推求水田产流过程; 旱地产流采用一水源一层蒸发的新安江模型, 采用蓄满产流机制, 降雨过程中直到土壤包气带含水量达到田间持水量时才能产流, 在达到田间持水量之前, 所有来水均被土壤吸收而不产流; 城镇及其它不透水面产流采用降雨乘以径流系数。汇流计算采用瞬时单位线法, 对大型水库进行调洪演算, 并考虑其他塘坝的调蓄作用。

太湖流域水文模型共有 16 个产汇流参数: 产流参数包括水面产流参数蒸发皿折算系数  $\beta$ ; 水田产流参数灌溉时间  $T$ 、耐淹水深  $H_m$ 、适宜上限  $H_{max}$ 、适宜下限  $H_{min}$ 、需水系数  $\alpha$ ; 旱地产流参数蒸发折算

系数  $K$ 、蓄水容量曲线指数  $B$ 、初始土壤含水量  $W_0$ 、流域平均蓄水量  $W_m$ ; 城镇产流参数综合径流系数  $C$ ; 以及塘坝初始蓄水量  $V_0$ 、塘坝面积比例  $BIf$ 、塘坝库容  $Bvr$ 。汇流参数包括瞬时单位线参数  $n$ 、 $k$ 。

## 2.5 评价指标

根据水文预报精度评定标准, 采用径流深、洪峰流量、峰现时间和确定性系数 4 个指标评价实测洪水的模拟精度:

(1) 径流深预报以实测值的 20% 作为允许误差, 当该值大于 20 mm 时, 允许误差取 20 mm。

(2) 洪峰流量以实测值的 20% 作为允许误差。

(3) 峰现时间以预报根据时间至实测洪峰出现时间之间时距的 30% 作为许可误差, 当许可误差小于 3 h 或者一个计算时段长, 则以 3 h 或者一个计算时段长为许可误差。

(4) 洪水预报过程与实测过程之间的拟合程度以确定性系数作为指标:

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [y_c(i) - y_0(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [y_0(i) - \bar{y}_0]^2} \quad (3)$$

式中:  $DC$  为确定性系数;  $y_0(i)$ 、 $y_c(i)$  分别为实测值、预报值;  $\bar{y}_0$  为实测值的均值;  $n$  为序列长度。

(5) 当一次预报的误差小于允许误差时, 判别为合格预报, 合格预报场次与洪水预报总场次之比的百分数为合格率 ( $QR$ ), 洪水预报的精度按合格率和确定性系数的大小分为 3 个等级, 详见表 1。

表 1 洪水预报精度等级

精度等级	甲	乙	丙
合格率 $QR/\%$	$QR \geq 85.0$	$85.0 > QR \geq 70.0$	$70.0 > QR \geq 60.0$
确定性系数 $DC$	$DC > 0.90$	$0.90 \geq DC \geq 0.70$	$0.70 > DC \geq 0.50$

3 结果与讨论

3.1 参数率定

利用 2016—2017 年实测洪水资料进行 API 水文模型、新安江模型和太湖流域水文模型参数率定。

API 模型参数  $C_p$  为降雨径流相关曲线与纵轴交点的坐标,  $C_i + C_p$  为相关曲线的渐近线在纵轴上的截距; 汇流计算采用的瞬时单位线参数  $n$ 、 $k$  表示线性水库个数和水库滞时, 对洪水过程线有坦化和偏移作用, 属于敏感参数。本文对产流参数  $C_i$ 、 $C_p$  和汇流参数  $n$ 、 $k$  进行率定。

根据赵人俊等<sup>[11-12]</sup>对 新安江模型参数的分析和客观优选法, 参数  $WUM$ 、 $WLM$ 、 $C$  都是不敏感的, 一般根据经验取常用值, 本文取  $WUM = 20\text{ mm}$ ,  $WLM = 60\text{ mm}$ ,  $C = 0.15$ ;  $W_M$  与  $B$  有关, 也都不敏感, 根据物理概念和经验, 南方湿润地区  $W_M$  为  $120 \sim 150\text{ mm}$ , 本文取  $W_M = 120\text{ mm}$ ,  $B$  与单元面积有关, 在  $0.1 \sim 0.4$  之间, 本文取  $B = 0.1$ ;  $EX$  反映自由蓄水分布不均匀程度, 一般为  $1 \sim 1.5$ , 取  $EX = 1.5$ ; 马斯京根法演算参数  $KE$  一般取时段长  $\Delta t$ ; 其余参数  $K$ 、 $SM$ 、 $KI$ 、 $KG$ 、 $CG$ 、 $CI$ 、 $CS$ 、 $L$ 、 $XE$  均为敏感参数, 需通过率定得到, 本文采用约束  $KG + KI = 0.7$ ;  $IM$  对于天然流域一般为  $0.01 \sim 0.02$ , 但由于洛阳河流域城镇化程度较高, 不透水面积比例较大, 本文也参与率定。

根据程文辉等对太湖流域水面、水田、旱地、城镇 4 种产流模型参数的分析, 蒸发皿折算系数  $\beta$  参考毛锐等<sup>[13]</sup>的研究成果获得; 灌溉时间  $T$ 、耐淹水深  $H_m$ 、适宜上限  $H_{\max}$ 、适宜下限  $H_{\min}$ 、需水系数  $\alpha$  根据太湖流域水稻田灌溉经验取值; 蓄水容量曲线指数  $B$ 、流域平均蓄水量  $W_M$  均不敏感, 采用经验值  $B = 0.1$ 、 $W_M = 120$ , 蒸发折算系数  $K$  为敏感参数, 需通过率定得到; 城镇综合径流系数  $C$  根据相关规范确定取值范围, 进一步通过率定得到; 塘坝初始蓄水量取  $V_0 = 50\text{ mm}$ , 塘坝面积比例  $Blf$ 、塘坝库容  $Bvr$  控制山丘区的总产水量, 对产流较为敏感, 本文参与率定。对汇流计算采用的瞬时单位线参数  $n$ 、 $k$  也进行率定。

各模型产汇流参数率定结果详见表 2~4。

表 2 API 水文模型参数率定结果

参数	$C_i$	$C_p$	$n$	$k$
率定结果	98	25	1.6	11.1

3.2 结果分析

(1) API 水文模型。洛阳河流域 4 场次实测洪水 API 模型模拟情况如表 5 所示。

从径流深模拟来看, 有 1 场(170610)较实测偏大超过 20%, 其余场次均偏小, 合格率为 75%, 平均径流深相对误差为 12.4%。从洪峰流量模拟来看, 有 1 场(160701)相对误差大于 20%, 合格率为 75%, 平均洪峰流量相对误差为 11.8%。从峰现时差来看, API 模型计算与实测相差 1~2 h, 峰现时间接近。从确定性系数来看, 有 3 场达到了 0.8 以上, 最低为 0.65, 均值为 0.82, 与实测洪水过程拟合程度较好。综合来看, API 模型洪水模拟的合格率为 75%, 确定性系数均值为 0.82, 达到乙级精度。

(2) 新安江模型。洛阳河流域 4 场实测洪水新安江模型模拟情况如表 6 所示。

从径流深模拟来看, 新安江模型计算的相对误差均小于 20%, 合格率为 100%, 平均相对误差为 6.3%。从洪峰流量模拟来看, 计算较实测均偏小, 相对误差均小于 10%, 合格率为 100%, 平均相对误差为 4.4%。从峰现时差来看, 有 1 场(160701)与实测一致, 其余场次与实测相差 1~3 h。从确定性系数来看, 有 2 场达到了 0.8 以上, 最低为 0.65, 均值为 0.82, 与实测洪水过程拟合程度较好。综合来看, 新安江模型洪水模拟的合格率为 100%, 确定性系数均值为 0.82, 达到乙级精度。

(3) 太湖流域水文模型。洛阳河流域 4 场实测洪水太湖流域水文模型模拟情况如表 7 所示。

从径流深模拟来看, 太湖流域水文模型计算的相对误差均小于 20%, 合格率为 100%, 平均相对误差为 10.7%。从洪峰流量模拟来看, 有 1 场(160701)较实测偏小 13.5%, 其余场次相对误差均小于 10%, 合格率为 100%, 平均相对误差为 4.7%。

表 3 新安江模型参数率定结果

参数	$K$	$WUM$	$WLM$	$W_M$	$C$	$B$	$IM$	$SM$
率定结果	0.80	20	60	120	0.15	0.10	0.11	16
参数	$EX$	$KI$	$KG$	$CS$	$CI$	$CG$	$L$	$KE/XE$
率定结果	1.5	0.40	0.30	0.864	0.873	0.953	0	1.0/0.077

表 4 太湖流域水文模型参数率定结果

参数	$K$	$C$	$Blf$	$Bvr$	$n$	$k$
率定结果	1.04	0.88	0.54	94	1.4	12.9

表 5 洛阳河流域 API 模型模拟结果

洪水 场次	降雨量/ mm	径流深/mm			洪峰流量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )			峰现时差/ h	确定性 系数
		实测	模拟	相对误差/%	实测	模拟	相对误差/%		
160701	381.8	309.8	298.6	-3.6	161.5	125.8	-22.1	-2	0.86
160915	99.2	29.8	26.4	-11.2	43.2	44.1	2.1	-1	0.94
170610	210.6	114.8	146.5	27.7	196.4	230.7	17.5	-1	0.84
170923	215.4	124.0	115.3	-7.0	194.2	183.3	-5.6	1	0.65

表 6 洛阳河流域新安江模型模拟结果

洪水 场次	降雨量/ mm	径流深/mm			洪峰流量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )			峰现时差/ h	确定性 系数
		实测	模拟	相对误差/%	实测	模拟	相对误差/%		
160701	381.8	309.8	349.2	12.7	161.5	147.7	-8.5	0	0.79
160915	99.2	29.8	26.8	-10.0	43.2	42.2	-2.3	-2	0.85
170610	210.6	114.8	116.6	1.6	196.4	190.6	-3.0	1	0.97
170923	215.4	124.0	122.9	-0.9	194.2	186.4	-4.0	3	0.65

表 7 洛阳流域太湖流域水文模型模拟结果

洪水 场次	降雨量/ mm	径流深/mm			洪峰流量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )			峰现时差/ h	确定性 系数
		实测	模拟	相对误差/%	实测	模拟	相对误差/%		
160701	381.8	309.8	290.6	-6.2	161.5	139.7	-13.5	-2	0.64
160915	99.2	29.8	33.7	13.3	43.2	43.7	1.2	-3	0.94
170610	210.6	114.8	130.2	13.4	196.4	197.5	0.6	0	0.97
170923	215.4	124.0	136.0	9.7	194.2	187.7	-3.3	2	0.68

从峰现时差来看,有1场(170610)与实测一致,其余场次与实测相差2~3 h。从确定性系数来看,有2场达到了0.9以上,最低为0.64,均值为0.81。综合来看,太湖流域水文模型洪水模拟的合格率为100%,确定性系数均值为0.81,达到乙级精度。

洛阳河流域4场洪水模拟对比见图2。

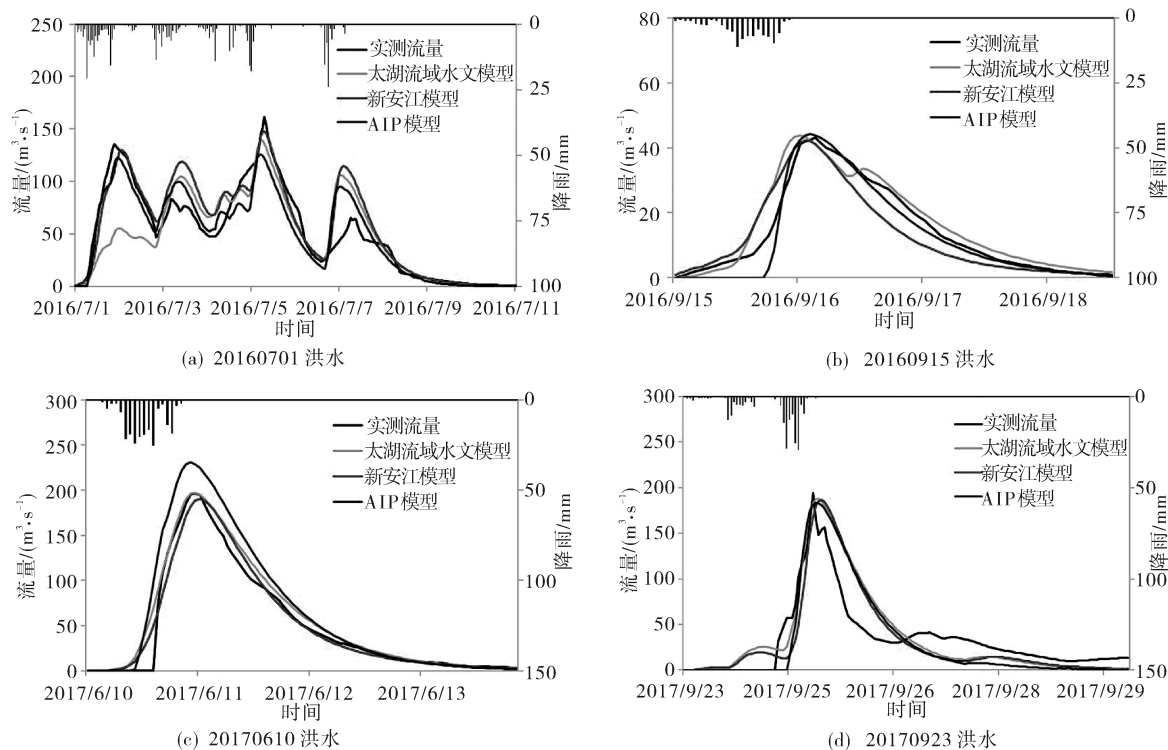


图2 洛阳河流域4场洪水模拟对比

API模型是基于暴雨洪水图集集中的降雨径流关系曲线和汇流瞬时单位线建立的一种简单水文模型,广泛应用于山丘区河道洪水过程及设计流量的推求,从模拟结果来看,API模型洪峰流量计算的平均误差小于20%,基本可以满足工程设计所需的精度要求。本文选取的洛阳河流域年平均降水量在1 000 mm以上,属于湿润地区,基于蓄满产流的新安江模型适用性较好,4场次洪水的径流深、洪峰流量预报合格率均为100%,与实测洪水拟合程度也较好,效果最优。太湖流域水文模型考虑水面、水田、旱地和城镇4类下垫面不同的产流规律和特点,实现了不同类别下垫面产流的模拟,由于水稻田灌溉制度、塘坝调蓄等经验性参数对产汇流过程的影响较大,该模型对实测洪水的拟合程度较新安江模型略差。

## 4 结 论

本文选取太湖流域湖西山丘区的洛阳河流域

作为典型研究区域,分别采用API水文模型、新安江模型、太湖流域水文模型进行山丘区洪水模拟计算。研究表明,上述方法在洛阳河流域的适用性较好,均取得了良好的效果。其中,新安江模型模拟精度总体优于API模型和太湖流域水文模型,径流深、洪峰流量相对误差最小,平均相对误差小于

10%,确定性系数均值达0.82,实现了洛阳河流域洪水过程的准确模拟,为推广应用至湖西山丘区其他小流域的洪水模拟提供了参考。

洛阳河流域仅为太湖流域湖西山丘区总面积的约6%,且实测洪水场次较少,资料年限也较短,湖西山丘区基本上仍属于无资料地区,需持续开展山丘区水文观测,扩大观测范围,丰富观测资料,以进一步探究湖西山丘区的产汇流机理,验证各类模型的适用性和产汇流参数获取的可靠性,从而为湖西山丘区洪水预报方案的建立提供理论基础和参考依据。

## 参考文献:

- [1] 王璐,叶磊,吴剑,等. 山丘区小流域水文模型适用性研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(2): 78-90.
- [2] 崔杰石. 两种水文模型在汤河流域水文模拟中的对比分析[J]. 水利规划与设计, 2016(6): 44-46.
- [3] 刘佩瑶,郝振纯,王国庆,等. 新安江模型和改进BP神经网络模型在闽江水文预报中的应用[J]. 水资源

- 与水工程学报, 2017, 28(1):40-44.
- [4] 王婕, 宋晓猛, 张建云, 等. 中小尺度流域洪水模型模拟比较研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(7):72-76.
- [5] 江苏省水文水资源勘测局镇江分局. 镇江实验流域(通胜流域)工作方案[R]. 2016.
- [6] 江苏省水文总站. 江苏省暴雨洪水图集[M]. 1984.
- [7] CLARK C O. Storage and the unit hydrograph [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1945, 110(6):1419-1446.
- [8] NASH J E. A unit hydrograph study, with particular reference to British catchments [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1960(17):249-282.
- [9] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型和陕北模型[M]. 北京:水利电力出版社, 1984.
- [10] 程文辉, 王船海, 朱琰. 太湖流域模型[M]. 南京:河海大学出版社, 2006.
- [11] 赵人俊, 王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988(6):2-9.
- [12] 王佩兰, 赵人俊. 新安江模型(三水源)参数的客观优选方法[J]. 河海大学学报, 1989(4):65-69.
- [13] 毛锐, 高俊峰. 太湖地区湖泊水面蒸发[M]. 北京:科学技术文献出版社, 1993.
- 