

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2019.0080

马亚楠,李致家,刘墨阳,等.洪泽湖以上流域洪水预报研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(4):19-26,36. MA Y N, LI Z J, LIU M Y, et al. Watershed flood forecasting for the Hongze Lake[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 19-26, 36. (in Chinese)

## 洪泽湖以上流域洪水预报研究

马亚楠,李致家,刘墨阳,徐杰,童冰星

(河海大学水文水资源学院,南京 210098)

**摘要:**为了给洪泽湖及整个淮河下游地区的防汛抗旱决策提供技术支持,基于API模型和三水源新安江模型,采用各区分单元、入湖分单元分区的方法,考虑水利工程以及大洪水期蓄滞洪区的应用情况,进行降雨径流预报与洪水过程研究。选取洪泽湖以上2000—2018年实测数据,对蚌埠控制区、蚌埠以下淮北控制区、蚌埠以下淮南控制区进行场次洪水模拟;基于水量平衡法,以反推入湖流量作为实测入流,各区采用马斯京根法预报洪水,构建入湖洪水预报方案。结果表明:各区两种模型模拟效果比较接近,均取得较好的预报精度,且对于流域内大洪水的模拟效果更理想。在涨洪段,分单元分区间的API模型和新安江模型在大洪水期均能有效的预报入湖洪水,模拟精度相当;在退水段且预报时段较长时,分单元分区间的新安江模型模拟精度高于API模型,并且模拟的洪水过程与反推入流过程更接近。

**关键词:**分单元分区;新安江模型;API模型;入湖洪水模拟;反推入湖流量;淮河流域

中图分类号:P333 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Watershed flood forecasting for the Hongze Lake

MA Yanan, LI Zhijia, LIU Moyang, XU Jie, TONG Bingxing

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to provide technical support for flood control and drought relief decision-making in the Hongze Lake and the lower reaches of Huaihe River, a simulation model is needed. The API model and Xin'anjiang model by a unit-block method-dividing units for sub-catchments and unit-block for lake-inflow were used in this study. The rainfall runoff and flood hydrograph were produced based on the current situation of hydro-projects and flood retarding areas in the river basin. The model parameters were calibrated with observation from 2000 to 2018 at sub-catchments of Bengbu, the north and south areas of the Huaihe River basin above Hongze Lake. Lake-inflow which was calculated by water balance method was regarded as the measured inflow into the Hongze Lake. The Muskingum method was used in flood confluence process of sub-catchments, and flood forecasting model into Lake was built. The results showed that the two models performed well for sub-catchments in terms of rainfall-runoff simulation, especially for flood events. At rising limb, the prediction results of both models were of high accuracy. At falling limb and a long forecast periods, the prediction accuracy of the Xin'anjiang model was higher than that of the API model, and the simulated flood process was closer to the reversed deduction of lake-inflow.

**Key words:** unit-block; Xin'anjiang model; API model; lake-inflow flood simulation; reverse deduction of lake-inflow; Huaihe River basin

收稿日期:2019-01-27 修回日期:2019-03-12 网络出版时间:2019-03-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190322.1616.006.html>

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0402705);国家自然科学基金(51679061;41130639)

作者简介:马亚楠(1994—),女,陕西渭南人,主要从事流域水文过程模拟方面研究。E-mail: mayanan9506@163.com

通信作者:李致家(1962—),男,山西运城人,教授,主要从事水文模型与水文预报方面研究。E-mail: zjli@hhu.edu.cn

流域洪水预报是防洪减灾最重要的非工程措施之一<sup>[1-2]</sup>,近几十年来流域洪水预报取得了重大进展<sup>[3-4]</sup>。程桂鑫<sup>[5]</sup>根据降雨径流相关关系,建立淮河入洪泽湖的洪水预报模型。李致家等<sup>[6]</sup>提出采用水文学与水力学、确定性与随机性相结合的方法,对大流域进行洪水预报与调度管理。宋玉等<sup>[7]</sup>根据降雨和流域内水利工程的现状应用情况,对洪泽湖以上流域进行降雨径流与洪水过程预报。包红军等<sup>[8-10]</sup>采用分布式概念性水文模型、水力学方法,同时考虑蓄滞洪区的影响,对鲁台子以上流域进行洪水预报。常露等<sup>[11]</sup>采用三水源新安江模型对王家坝至小柳巷区间进行子流域降雨径流预报。刘开磊等<sup>[12]</sup>构建一维水动力学模型,结合实时校正方法对淮河流域吴家渡至小柳巷区间进行洪水预报。黄金凤等<sup>[13]</sup>采用可公度和灰关联模式识别法对鲁台子、蚌埠站进行中长期洪水预报。万新宇等<sup>[14]</sup>分析大型水库群对鲁台子断面洪水过程的影响。芮孝芳<sup>[15]</sup>对流域水文模型建模中复杂的形成机理和时空变化规律,提出一种“分解”和“集成”的科学思维。3S 技术及其他交叉学科的发展,大大地促进了分布式水文模型的开发和应用<sup>[16-17]</sup>,如 VIC 模型<sup>[18-19]</sup>、SWAT 模型<sup>[20-21]</sup>、HEC-HMS 模型<sup>[22-23]</sup>、WFO 模型<sup>[24]</sup>等丰富了流域洪水预报研究工作。这些方法给水文模型的研究思路和技术方法带来了创新和革命,但在实用上受到较大限制<sup>[25-26]</sup>。由于分布式水文模型是在网格尺度上计算水文过程,如果模型空间分辨率要求较高,运行模型所需的计算时间会较长,这可能会使模型运行成本变高;如果大流域预报需要用分布式水文模型,那么使用较粗分辨率的数据,模型预报结果会受到影响。总之,国内外对大流域洪水预报研究较少,对几十万平方公里洪水预报研究更少<sup>[27]</sup>。因此,本文根据流域内水利工程、大洪水期蓄滞洪区的应用情况,进行流域降雨径流与洪水过程预报,其中降雨-径流预报采用 API 模型和新安江模型,根据各区分单元,入湖分单元分区间方法,探究不同模型结构在蚌埠控制区、蚌埠以下淮北控制区、蚌埠以下淮南控制区以及入湖场次洪水模拟中的差异,研究洪泽湖入湖洪水预报方案。

## 1 流域概况

淮河流域南部属副热带湿润区,年降水量在 1 500 mm 以上,北部属暖温带半湿润区,年降水量仅 600~700 mm,干流全长约 1 000 km。淮河流域发生洪水的主要原因是暴雨,一种是 6、7 月的由低

空急流和切变线等天气系统形成的流域性大暴雨,另一种是 8 月份的台风型暴雨。洪泽湖以上流域面积 15.8 万 km<sup>2</sup>,是淮河中下游水量调节的枢纽。入湖主要是淮河干流、徐洪河、濉河、老濉河、怀洪新河、新汴河、池河,主要控制站是蚌埠、金锁镇、泗洪、泗洪老、双沟、团结闸、明光;出湖主要是入江水道、苏北灌溉总渠、分淮入沂河道,主要控制站是三河闸、高良涧闸(电站)、二河闸(见图 1)。研究区水文资料主要来源于江苏省防汛抗旱指挥部办公室。水文资料主要包括洪泽湖以上流域 2000—2018 年 68 个雨量站、大型水库、闸坝放水和水文站的实时降雨径流数据。蒸发数据采用鲁台子站、三河闸站的 E601 型蒸发皿的蒸发数据。考虑洪泽湖汇水时间,洪泽湖入湖洪水预报预见期有 6 d 以上,因此计算时段采用 1 d<sup>[7]</sup>。

## 2 预报方案构建

### 2.1 预报方案

#### (1) 分单元分区间

根据洪泽湖以上流域特点,设计洪水计算时,将洪泽湖的入湖洪水过程概化为蚌埠控制区、蚌埠以下淮北控制区、蚌埠以下淮南控制区、湖滨控制区及洪泽湖湖面共 5 个区间,各区间内采用降雨径流预报组成的分布式结构——分单元 API 模型和分单元新安江模型,区间河道汇流采用分段马斯京根法。

三水源新安江模型在我国湿润和半湿润地区的洪水预报中得到广泛的应用,使用效果良好<sup>[28]</sup>。三水源新安江模型蒸散发计算采用三层蒸散发模型;产流计算利用蓄水容量曲线计算单元面积总径流;径流划分采用自由水蓄水容量曲线划分地表、壤中、地下三种径流成分;地面径流直接汇入河网、壤中流和地下径流采用线性水库;河网汇流采用滞后演算法;单元面积出口的总径流采用马斯京根分段连续演算。新安江模型根据降雨特征和下垫面条件,将研究区域划分为 23 个单元,见图 1。蚌埠控制区面积占洪泽湖以上流域面积的 76.8%,存在较多水库水闸及蓄滞洪区(编号 1—13);蚌埠以下淮北控制区属于平原区,多年来由于人工开挖、河流变迁等,河系之间相互连通,划分 6 个单元(编号 15—20);蚌埠以下淮南控制区属于皖东江淮丘陵,划分 1 个单元(编号 14);湖滨控制区划分洪泽湖南、北 2 个单元(编号 21—22);湖面 1 个单元(编号 23)。

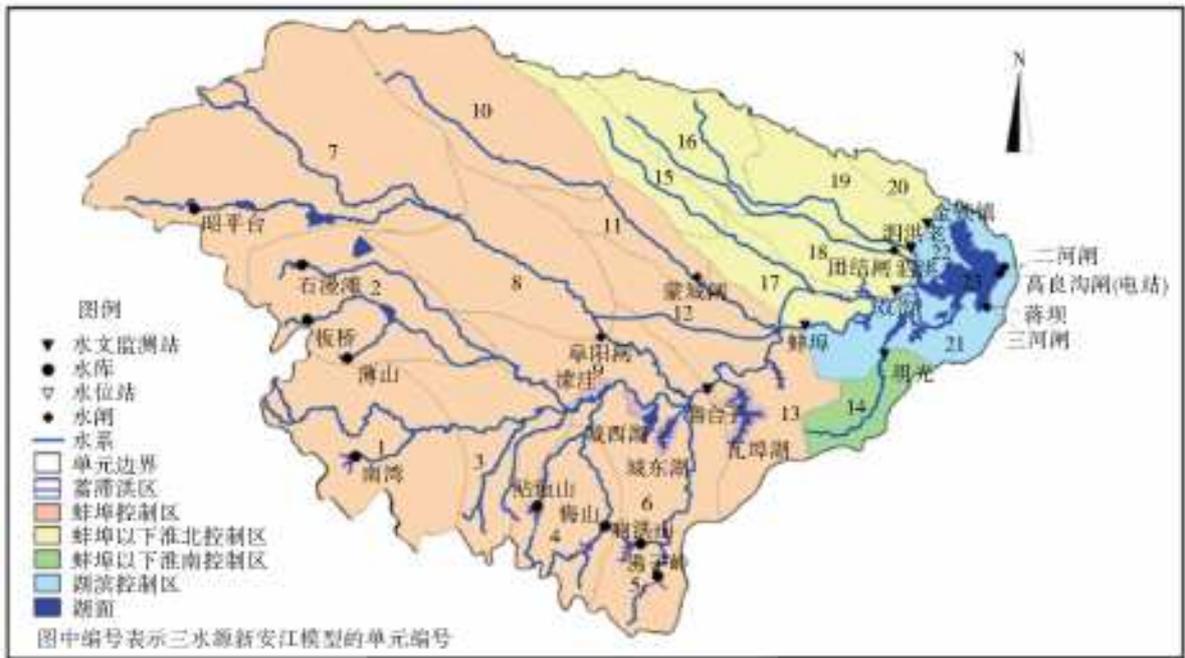


图 1 洪泽湖以上流域

Fig. 1 Upper reaches of the Hongze Lake

API 模型参数简单,适应性强,模拟效果好<sup>[29]</sup>,目前生产上还在继续使用。根据子流域的历史降雨径流相关图(Pa-P-R)计算产流,汇流计算分地面径流和地下径流。其中,地面径流采用综合单位线,地下径流采用退水指数方程。API 模型根据淮河流域淮河水系实用水文预报方案<sup>[30]</sup>,在图 1 基础上将研究区域重新划分为 16 个单元,其中蚌埠控制区 11 个单元(编号 1—13,其中 5—6 合并、10—11 合并);蚌埠以下淮北控制区 3 个单元(编号 15—20,其中 15—17 合并、16—18 合并、19—20 合并);蚌埠以下淮南控制区 1 个单元(编号 14);湖滨控制区及湖面 1 个单元(编号 21—23,其中 21—23 合并)。

(2) 水库、水闸处理

蚌埠以上水库来水考虑流域 9 座大型水库(昭平台、石漫滩、板桥、溥山、南湾、鲇鱼山、梅山、佛子岭、响洪甸),水库以上控制流域面积的产流量以水库放水作为计算结果,采用分段马斯京根法进行汇流计算至鲁台子断面。其中考虑当地工农业用水,汛前淮干与淮南 5 个水库放水流量之和大于 500 m<sup>3</sup>/s 才能汇流到蚌埠。具体体现:模型计算中从第一个计算时刻开始,判断水库放水流量是否有大于 500 m<sup>3</sup>/s,如果整个预报过程中实测水库放水之和小于 500 m<sup>3</sup>/s,则水库放水不纳入计算;如果某个时刻大于 500 m<sup>3</sup>/s,则从此时刻开始将水库放水值作为输入进行汇流计算。阜阳闸、蒙城闸考虑闸门启闭对蚌埠流量的影响,由人工判断过闸流量

为计算流量的百分比。

(3) 蓄滞洪区处理

实测大洪水或特大洪水过程出现明显削峰和坦化现象,是由于中游淮干蓄滞洪区的启用,导致预报洪水过程与实测洪水过程的吻合程度受到影响。淮河中游蓄滞洪区分别为蒙洼、城西湖、城东湖、瓦埠湖,其设计进洪流量分别为 1 626、6 000、1 074、1 500 m<sup>3</sup>/s,库容分别为 7.5 亿、29.5 亿、15.9 亿、12.8 亿 m<sup>3</sup>。因此,河道洪水演算时考虑到支流来水汇入干流的流量,蓄洪滞区口门与干流的交换流量,为此将干流河道上蓄滞洪区合起来进行处理<sup>[31]</sup>,在蚌埠洪峰流量计算值达到 8 000 m<sup>3</sup>/s 时,全过程采用滞后演算法考虑蓄滞洪区的影响。此时,蚌埠预报流量 Q<sub>B</sub> 表示为

$$Q_{B_t} = C_R \cdot Q_{B_{t-1}} + (1 - C_R) \cdot Q_{C_t} \quad (1)$$

式中:Q<sub>B<sub>t</sub></sub> 为 t 时刻考虑蓄洪后的预报流量(m<sup>3</sup>/s);Q<sub>C<sub>t</sub></sub> 为 t 时刻未考虑蓄洪的预报流量(m<sup>3</sup>/s);C<sub>R</sub> 为消退系数。若洪峰流量在 8 000~10 000 m<sup>3</sup>/s,C<sub>R</sub> 取 0.95;大于 10 000 m<sup>3</sup>/s,C<sub>R</sub> 取 0.98。

2.2 参数率定

API 模型单元内前期影响雨量采用递推公式,初始值选用最大初损值的 0.5 倍,提前 30 d 计算。单元降雨径流相关图以及蚌埠、蚌埠以下淮北、蚌埠以下淮南控制区经验单位线均来自于淮河流域淮河水系实用水文预报方案<sup>[28]</sup>。新安江模型各单元内一共涉及 17 个参数,对 WM、WUM 及 WLM 等相

对不敏感的参数根据流域特征和经验使用人工优选法进行率定；K、SM、KG、KI、CG、CS 和  $L$  共 7 个敏感参数采用 SCE-UA 自动优选法进行率定，其参数及范围见表 1。

表 1 新安江模型参数及范围

Tab. 1 Parameters and their ranges of Xin'anjiang model

意义	参数	范围
流域蒸散发折算系数	K	1~1.2
深层蒸散发系数	C	0.12~0.16
张力水蓄水容量曲线指数	B	0.4
不透水面积占全流域面积比例	IM	0.01~0.02
自由水蓄水容量/mm	SM	20~60
自由水蓄水容量曲线指数	EX	0.12~0.15
地下水出流系数	KG	0.15~0.45
壤中流的日出流系数	KI	0.25~0.55
地下水消退系数	CG	0.90~0.98
壤中流消退系数	CI	0.85
河网蓄水消退系数	CS	0.3~0.8
河网汇流滞时/d	LAG	0~2
河段传播时段/h	KE	24
马斯京根法演算参数	XE	0.1~0.5

以往新安江模型计算只考虑降雨分布的不均匀性，对每个单元取相同的模型参数，本文考虑了降雨分布不均匀性以及淮南、淮北地形特征的影响，对每个单元取不同的模型参数。流域平均张力水容量 WM、上层蓄水容量 WUM 及下层蓄水容量 WLM 在淮河以南取 120、20、40 mm；淮河以北取 180、60、60 mm。湖滨区间以南和池河紧邻，移用明光参数值；湖滨区间以北与双沟单元相邻，移用双沟参数值；湖面降雨直接转化为流量过程。模型自场次洪水模拟开始时间前 30 d 计算，作为模拟计算的初始值。蚌埠、蚌埠以下淮北/淮南、淮滨区间分段马斯京根汇流参数  $k, x$  取 24、0.1，分段演算数  $n$  除蚌埠断面取 2 外，其余取 1。

### 2.3 评价指标

本研究选取洪量相对误差 (VR)、洪峰相对误差 (PR)、纳什效率系数 (NSE) 作为目标函数，分别表示为

$$VR = (w_y - w_o) / w_o \times 100\% \quad (2)$$

$$PR = (p_y - p_o) / p_o \times 100\% \quad (3)$$

式中： $w_y$  为场次洪水洪量的预报值， $m^3$ ； $w_o$  为场次洪水洪量的实测值， $m^3$ ； $p_y$  为场次洪水洪峰流量的预报值， $m^3/s$ ； $p_o$  为场次洪水洪峰流量的实测值，

$m^3/s$ 。VR (PR) 控制在  $\pm 20\%$  表示合格，反之，不合格。QVR (QPR) 描述多场洪水预报的总体水平，用合格预报次数与预报总次数之比表示。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_{y,i} - q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (q_{o,i} - \bar{q}_o)^2} \quad (4)$$

式中： $q_{y,i}$  为序列  $i$  流量的预报值 ( $m^3/s$ )； $q_{o,i}$  为序列  $i$  流量的实测值 ( $m^3/s$ )； $\bar{q}_o$  为实测序列流量的平均值 ( $m^3/s$ )； $n$  为资料序列长度。NSE 描述模型模拟序列与实测序列之间偏差的大小，NSE 值越接近 1，表明模拟序列偏离实测序列的程度越小，模拟精度越高。MNS 描述总体精度水平，用多场洪水预报结果均值表示。

## 3 结果与分析

本文根据峰高量大、降雨径流关系良好的原则，从 2000—2017 年降雨径流数据中挑选多场次洪水过程进行参数率定，并利用 2018 年洪水进行验证。

### 3.1 各区间洪水模拟结果

选取洪量相对误差、洪峰相对误差、纳什效率系数作为模型模拟结果精度评价标准，分别对蚌埠控制区 (I 区)、蚌埠以下淮北控制区 (II 区)、蚌埠以下淮南控制区 (III 区) 分别选取 12、11 和 8 场典型洪水过程进行模拟，各区两种模型模拟结果见图 2。

由图 2 可知，两种模型模拟均能有效控制洪峰流量、洪量和纳什效率系数。分单元新安江模型从洪量角度看，I、II、III 区的 QVR 分别为 91.6%、90.9%、87.5%，达到甲级标准；从洪峰角度看，QPR 分别为 83.3%、90.9%、87.5%；从纳什效率系数角度看，MNS 分别为 0.83、0.77、0.79。分单元 API 模型从洪量角度看，I、II、III 区的 QVR 分别为 83.3%、63.6%、87.5%；从洪峰角度看，QPR 分别为 83.3%、90.9%、87.5%；从纳什效率系数角度看，MNS 分别为 0.74、0.73、0.73。对于洪峰和纳什效率系数，分单元 API 模型各区的模拟效果与分单元新安江模型模拟效果类似，而洪量上存在差异是因为根据多年洪水预报经验，水量预报是洪泽湖洪水预报的关键，因此在分单元新安江模型率定时优先考虑洪量。各控制区模拟效果整体上看，II、III 区略差，是因为 II 区属于平原区，河道闸坝居多，人类活动对洪水过程影响大；III 区属于山区，小型水库数量多，资料无或者残缺，影响洪水模拟效果。

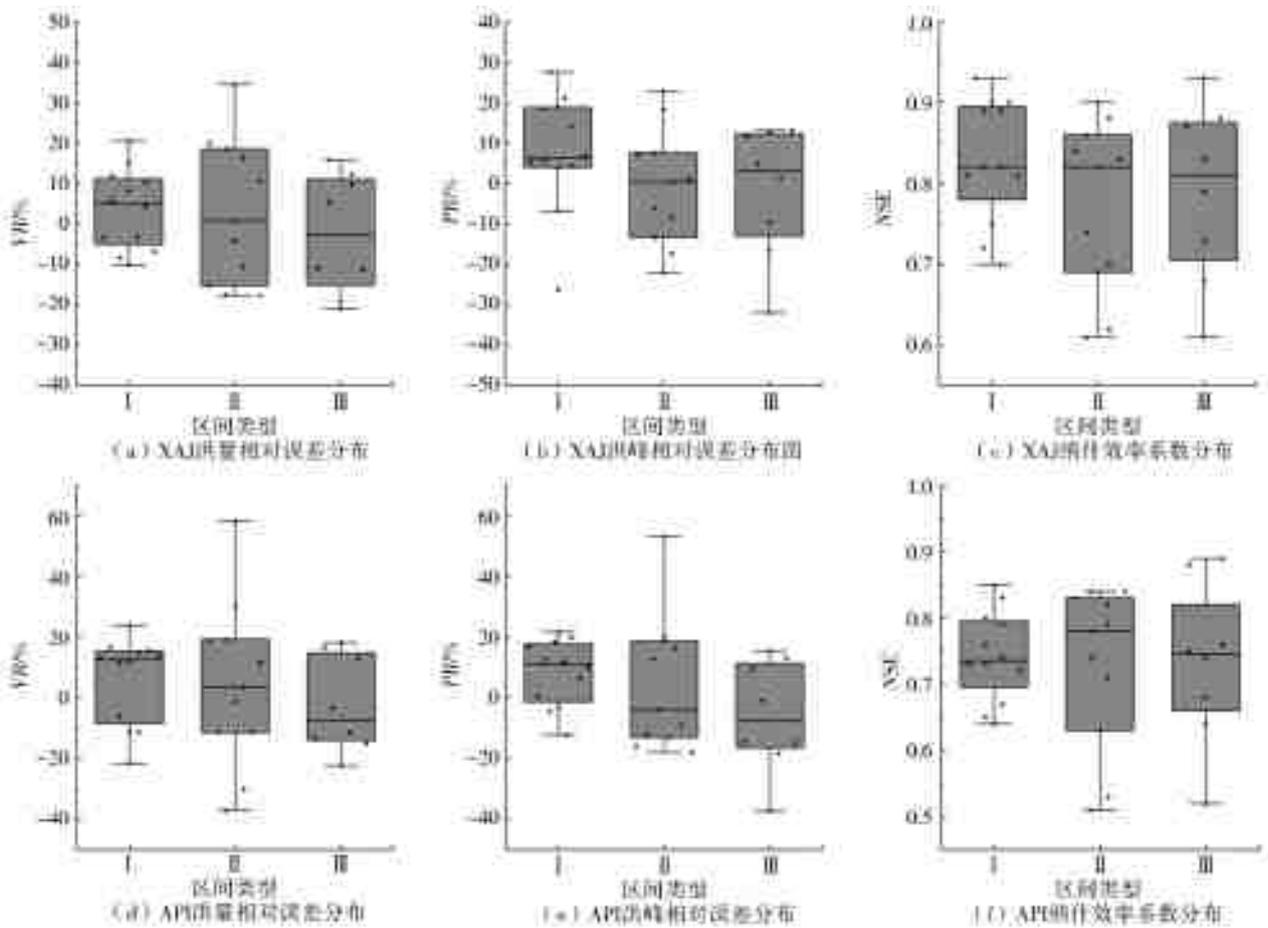


图2 各区模型场次洪水模拟结果

Fig.2 Simulation results for flood events of sub-catchments

我国学者采用三水源新安江模型,对蚌埠控制区12场洪水进行模拟<sup>[7]</sup>。其中4场洪水预报的VR大于20%,7场洪水预报的PR大于20%,QVR、QPR分别为66.6%,41.7%。由图2的分析结果可知,考虑蓄滞洪区的影响,两种模型均提高了蚌埠控制区的模拟精度。特别是大洪水过程预报效果均较好,以20030610、20070510、20150616场次洪水为例;对于小洪水过程两种模型模拟效果略差,主要是降雨强度、土壤干湿程度等下垫面条件对结果有显著影响。

### 3.2 入湖洪水模拟结果

淮河流域2000年以来,主汛期平均降水影响较大的3场洪水分别出现在2003、2007和2015年。由于湖泊没有真正意义上实测的流量数据,此处基

于水量平衡原理,以湖泊水位反推入湖流量作为标准,用两种模型模拟这3次主汛期入湖洪水,见表2、图3。

由表2、图3可知,从洪量和洪峰角度看,两种模型模拟精度大体相当,VR、PR均控制在±20%内。从纳什效率系数角度看,分单元分区的新安江模型模拟洪水过程与反推入湖流量过程较为接近,分单元分区间的API模型模拟效果略差,主要是模拟洪水退水过程与反推流量退水过程相差较大。因为API模型汇流采用汇编的综合单位线,受人为主观因素影响大,而新安江采用优化算法寻参,拟合效果更好。

### 3.3 2018年洪水验证

选取2018年大洪水场次,对各区分单元,入湖

表2 入湖场次洪水模拟结果

Tab.2 Simulation results for flood events of lake-inflow

洪水编号	实测洪量/亿 m <sup>3</sup>	实测洪峰/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	VR/%		PR/%		NSE	
			XAJ	API	XAJ	API	XAJ	API
030620	589.21	13 930	-7.48	-16.6	9.09	-1.78	0.85	0.48
070510	443.98	12 580	16.90	-9.6	17.60	2.08	0.92	0.88
150616	168.73	7 480	1.71	-14.6	13.50	12.70	0.75	0.72

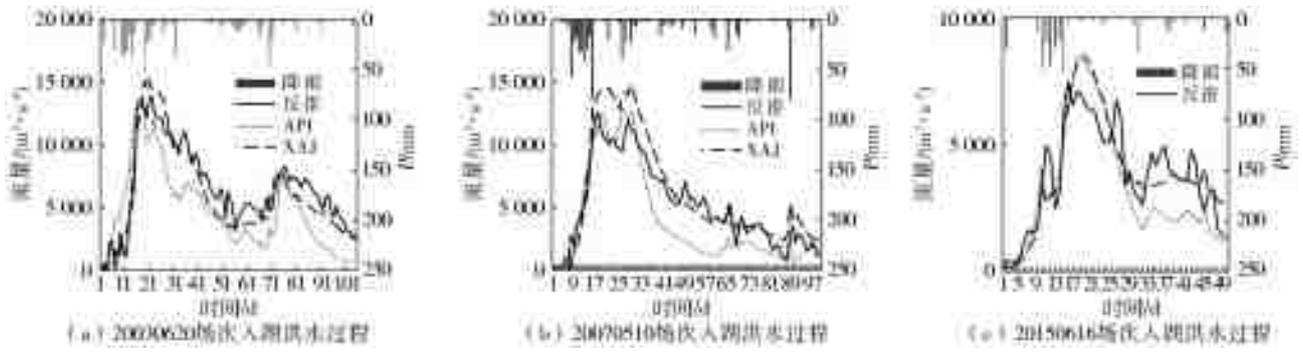


图 3 API 模型和新安江模型模拟与实测(反推)流量过程线

Fig. 3 Hydrographs of model simulations and actual discharge(reverse deduction)

分单元分区间方法进行验证。20180808 场次洪水入湖洪峰流量超过 9 000 m<sup>3</sup>/s, 为 2018 年唯一一场入湖流量大于 5 000 m<sup>3</sup>/s 的洪水。表 3 为 I 区、II

区、III 区以及入湖的预报特征值表。图 4 为 I 区、II 区、III 区以及入湖预报与实测流量过程线。由表 3、图 4 可以得出如下结论。

表 3 20180808 场次洪水模拟结果

Tab. 3 Simulation results of 20180808 flood event

控制区	实测洪量/亿 m <sup>3</sup>	实测洪峰/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	洪量相对误差/%		洪峰相对误差/%		纳什效率系数	
			XAJ	API	XAJ	API	XAJ	API
I 区	48.29	4 390	4.21	8.56	17.00	8.27	0.91	0.86
II 区	44.90	4 592	-19.60	1.66	9.03	-2.62	0.85	0.93
III 区	1.84	653	66.30	21.20	36.30	6.28	-0.35	0.33
洪泽湖入湖	98.51	10 070	-3.11	-2.14	-10.10	-7.12	0.86	0.91

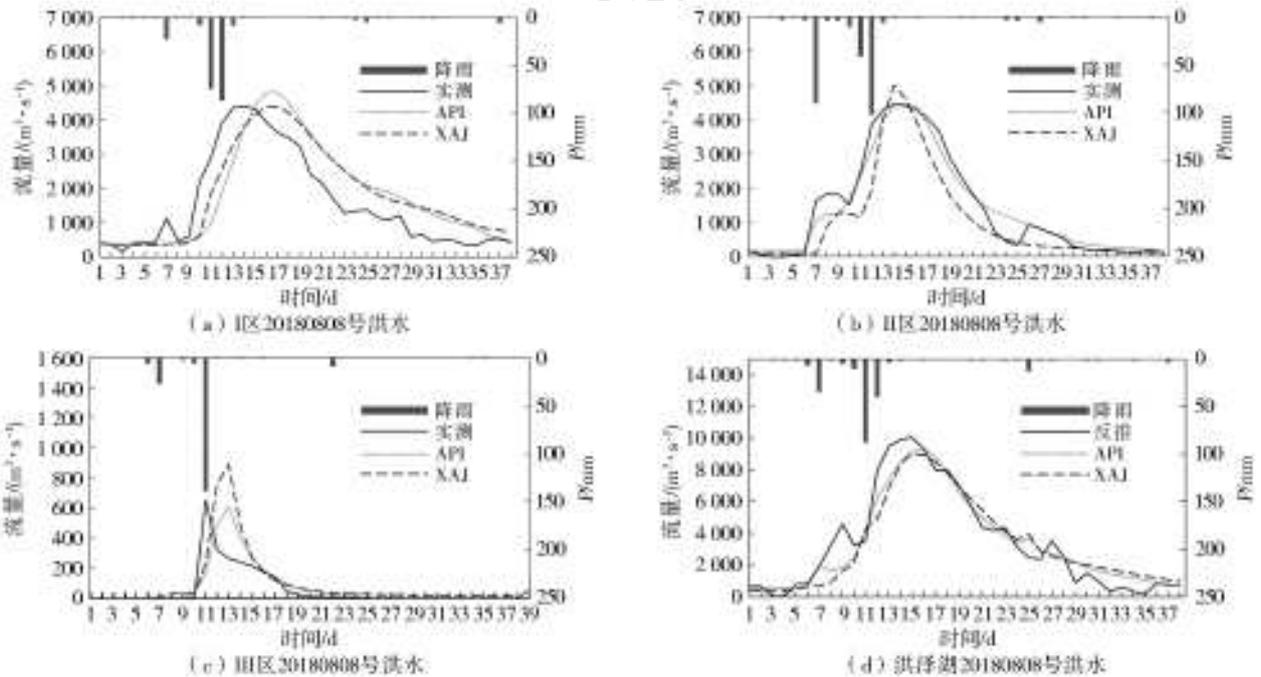


图 4 20180808 API 模型与新安江模型模拟与实测流量过程线

Fig. 4 Hydrographs model simulation and actual discharge of 20180808 flood event

(1) I 区、II 区和入湖洪水模拟精度较高。洪峰流量和洪量误差均控制在 20% 以内, 纳什效率系数在 0.85 以上。

(2) III 区两种模型模拟效果较差。经调查发现, 明光站在 8 月 17 日 8:00、16:21, 8 月 18 日 8:00、

10:30, 8 月 19 日 8:00 的实时流量分别为 0、8、485、653、286 m<sup>3</sup>/s, 洪水起涨后迅速回落。池河中上游的定远县中小型水库数量多, 水库拦蓄洪水, 人为干扰洪水过程导致模拟效果不理想。

(3) 从图 4(a) 看出, I 区两种模型模拟过程线均

滞后于实测流量过程线,这是由于城市化建设加快,水泥地等不透水面积不断增多,汇流时间缩短。

(4)从图 4(d)看出,两种模型模拟洪水过程与反推入湖流量都比较接近。这是因为此次台风型暴雨为局部暴雨,形成单峰型洪水过程,洪水陡涨陡落,两种模型拟合均较好。其次入湖洪量中 I 区、II 区、III 区的水量占比分别为 49%、45.5%、1.8%,III 区占比水量较少,对入湖流量过程影响较小。

综合以上分析,考虑水库、蓄滞洪区的影响,洪泽湖以上流域洪水预报方案具有较高的预报精度。

## 4 结 论

为提高洪泽湖以上洪水预报水平,基于 API 模型和新安江模型,采用各区分单元,入湖分单元分区间的方法,考虑水利工程、蓄滞洪区影响下各区以及入湖洪水预报,分析结论如下。

(1) I 区考虑水利工程、蓄滞洪区的应用,分单元 API 模型和分单元新安江模型场次洪水模拟的 QVR 分别为 83.3%、91.6%;QPR 均为 83.3%;MNS 分别为 0.74、0.83。II 区 QVR 分别为 63.6%、90.9%;QPR 均为 90.9%;MNS 分别为 0.73、0.77。III 区 QVR 均为 87.5%;QPR 均为 87.5%;MNS 分别为 0.73、0.79。表明两种模型均能够反映研究区的水文过程,在实际应用中可根据降雨、下垫面特征,选择不同模型进行预报。

(2)对入湖洪水预报,API 模型和新安江模型采用分单元分区间的方法模拟场次洪水,VR 和 PR 均控制在 $\pm 20\%$ 内,而 API 模型 NSE 值普遍低于新安江模型。表明两种模型在大洪水期能有效预报水量和洪峰流量;对入湖洪水过程而言,分单元分区间的新安江模型效果更好,与反推入湖流量过程线更为接近。

模型在实际应用过程中,限于中小型水库无资料或资料残缺,流域内仅考虑大型水库的蓄泄作用。因此,对于小洪水过程模拟效果差,在无资料地区如何考虑中小型水库等水利工程对洪水预报的影响,更好地为流域防汛服务是下一步要解决的问题。

### 参考文献(References):

[1] TINGSANCHALI T. Urban flood disaster management [J]. Procedia Engineering, 2012, 32(3): 25-37.  
 [2] 魏子钧,梁国华,葛于晋,等.考虑上游水利工程影响的产流预报方法研究[J].南水北调与水利科技,2014,12(6): 49-52. (WEI Z J, LIANG G H, GE Y J, et al.

Study on runoff prediction in consideration of the impact of water conservancy project in upstream basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(6): 49-52. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2014.06.011.  
 [3] MORENO H A, VIVONI E R, GOCHIS D J. Limits to flood forecasting in the colorado front range for two summer convection periods using radar nowcasting and a distributed hydrologic model[J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14(4): 1075-1097.  
 [4] HAN D, KWONG T, LI S. Uncertainties in real-time flood forecasting with neural networks[J]. Hydrological Processes, 2007, 21(2): 223-228.  
 [5] 程桂鑫.淮河入洪泽湖洪水预报模型[J].江苏农学院学报, 1991, 12(2): 63-68. (CHENG G X. The Flood forecasting model of the Hongze Lake[J]. Journal of Jiangsu Agricultural College, 1991, 12(2): 63-68. (in Chinese))  
 [6] 李致家,董增川,梁忠民,等.大流域洪水预报与洪水调度管理方法研究[J].水力发电, 2004, 30(1): 12-15. (LI Z J, DONG Z C, LIANG Z M, et al. Flood forecasting and flood management of large watershed[J]. Water Power, 2004, 30(1): 12-15. (in Chinese))  
 [7] 宋玉,李致家,杨涛.分布式水文模型在淮河洪泽湖以上流域洪水预报中的应用[J].河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(2): 127-131. (SONG Y, LI Z J, YANG T. Application of distributed hydrological model to flood forecasting for upper reaches of the Huaihe River above Hongze Lake[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(2): 127-131. (in Chinese))  
 [8] 包红军,李致家,王莉莉.淮河鲁台子以上流域洪水预报模型研究[J].水利学报, 2007(S1): 445-453. (BAO H J, LI Z J, WANG L L. Study of flood forecasting for upper reaches of the River above Lutaizi[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(S1): 445-453. (in Chinese))  
 [9] 包红军,赵琳娜,李致家.淮河具有蓄滞洪区河系洪水预报水力学模型研究[J].湖泊科学, 2011, 23(4): 635-641. (BAO H J, ZHAO L N, LI Z J. Hydraulic model for flood forecast of river basin with flood diversion and flood retarding areas of Huaihe River[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(4): 635-641. (in Chinese))  
 [10] 包红军,张珂,魏丽,等.淮河流域 2016 年汛期洪水预报试验[J].气象, 2017, 43(7): 831-844. (BAO H J, ZHANG K, WEI L, et al. Test on flood forecasts for Huaihe River in the 2016 flood season[J]. Meteorological monthly, 2017, 43(7): 831-844. (in Chinese)) DOI:CNKI:SUN:QXXX.0.2017.07.007.  
 [11] 常露,刘开磊,姚成,等.复杂河道洪水预报系统研

- 究—以淮河王家坝至小柳巷区间流域为例[J]. 湖泊科学, 2013, 25(3): 422-427. (CHANG L, LIU K L, YAO C, et al. Real-time flood forecasting system for complicated river channels; A case study from Wangjiaba to Xiaoliuxiang section in the Huaihe River basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(3): 422-427. (in Chinese))
- [12] 刘开磊, 姚成, 李致家, 等. 水动力学模型实时校正方法对比[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 124-129. (LIU K L, YAO C, LI Z J, et al. Comparison of real-time correction methods of hydrodynamic model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(2): 124-129. (in Chinese)) DOI: 10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2014. 02. 006.
- [13] 黄金凤, 夏军, 杜鸿, 等. 基于可公度和灰关联模式识别法的鲁台子、蚌埠站中长期洪水预报[J]. 武汉大学学报, 2015, 48(5): 622-626. (HUANG J F, XIA J, DU H, et al. Mid-long-term prediction of floods at Lutaizi and Beng bu stations with commensurability method and grey relating analysis and pattern recognition method [J]. Journal of Wuhan University, 2015, 48(5): 622-626. (in Chinese)) DOI: 10. 14188/j. 1671-8844. 2015. 05. 005.
- [14] 万新宇, 管秀峰, 钟平安, 等. 大型水库群对流域洪水过程影响分析[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 66-71. (WAN X Y, GUAN X F, ZHONG P A, et al. Impact of large-scale multiple reservoirs on basin flood hydrograph[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3): 66-71. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 10067647. 2017. 03. 011.
- [15] 芮孝芳. 对流域水文模型的再认识[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(2): 1-7. (RUI X F. More discussion of watershed hydrological model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(2): 1-7. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1006-7647. 2018. 02. 001.
- [16] 刘昌明, 李道峰, 田英, 等. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5): 437-445. (LIU C M, LI D F, TIAN Y, et al. An application study of DEM based distributed hydrological model on macroscale watershed[J]. Progress in Geography, 2003, 22(5): 437-445. (in Chinese))
- [17] YANG B C, JI L, HUAN Y W, et al. Large-watershed flood forecasting with high-resolution distributed hydrological model[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(2): 735-749. DOI: 10. 5194/hess. 21. 735. 2017.
- [18] LIANG X, LETTENMAIER D P, WOOD E F, et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1994, 99(D7): 14415-14428.
- [19] LOHMANN D, NOLTE-HOLUBE R, RASCHKE E. A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes [J]. Tellus Series A-dynamic Meteorology Oceanography, 1996, 48(5): 708-721.
- [20] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79-86. (WANG Z G, LIU C M, HUANG Y B. The theory of SWAT model and its application in Heihe basin[J]. Progress in Geography, 2003, 22(1): 79-86. (in Chinese))
- [21] MISHRA A, FROEBRICH J, GASSMAN P W. Evaluation of the SWAT model for assessing sediment control structures in a small watershed in India [J]. Transactions of the Asabe, 2007, 50(2): 469-477.
- [22] SHAHID M A, BOCCARDO P, USMAN M, et al. Predicting peak flows in real time through event based hydrologic modeling for a Trans-Boundary River catchment [J]. Water Resources Management, 2017, 31(3): 793-810. DOI: 10. 1007/s11269-016-1435-2.
- [23] 廖如婷, 胡珊珊, 杜龙刚, 等. 基于 HEC-HMS 模型的温榆河流域水文模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 15-20. (LIAO R T, HU S S, DU L G, et al. Hydrological simulation of Wenyu River basin based on HEC-HMS model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 15-20. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. ns-bdqk. 2018. 0147.
- [24] MAUSSION F, SCHERER D, FINKELNBURG R, et al. WRF simulation of a precipitation event over the Tibetan Plateau, China—an assessment using remote sensing and ground observations [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(6): 1795-1817.
- [25] 吴险峰, 刘昌明. 流域水文模型研究的若干进展[J]. 地理科学进展, 2002, 21(4): 341-348. (WU X F, LIU C M. Progress in watershed hydrological models [J]. Progress in Geography, 2002, 21(4): 341-348. (in Chinese))
- [26] LI J, CHEN Y, WANG H, et al. Extending flood forecasting lead time in large watershed by coupling WRF QPF with distributed hydrological model [J]. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 2017, 21: 1279-1294. DOI: 10. 5194/hess. 21. 1279-2017.

(下转第 36 页)

- 2009JD011960.
- [21] MANTAS V M, LIU Z, CARO C, et al. Validation of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) products in the Peruvian Andes[J]. Atmospheric Research, 2015, 163 (SI): 132-145. DOI: 10. 1016/j. atmosres. 2014. 11. 012.
- [22] CAI Y, JIN C, WANG A, et al. Comprehensive precipitation evaluation of TRMM 3B42 with dense rain gauge networks in a mid-latitude basin, northeast, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 126(3-4): 659-671. DOI: 10. 1007/s00704-015-1598-4.
- [23] JIANG D, ZHANG H, LI R. Performance evaluation of TMPA version 7 estimates for precipitation and its extremes in Circum-Bohai-Sea region, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 130 (3-4): 1021-1033. DOI: 10. 1007/s00704-016-1929-0.
- [24] PRAKASH S, MITRA A K, AGHAKOUCHAK A, et al. Error characterization of TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA-3B42) products over India for different seasons [J]. Journal of Hydrology, 2015, 529 (3): 1302-1312. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2015. 08. 062.
- [25] DEO A, WALSH K J E, PELTIER A. Evaluation of TMPA 3B42 Precipitation Estimates during the passage of tropical cyclones over New Caledonia[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 129 (3-4): 711-727. DOI: 10. 1007/s00704-016-1803-0.
- [26] CHEN Y, EBERT E E, WALSH K J E, et al. Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates of tropical cyclone rainfall using PACRAIN data[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2013, 118(5): 2184-2196. DOI: 10. 1002/jgrd. 50250.
- [27] WANG Z, ZHONG R, LAI C. Evaluation and hydrologic validation of TMPA satellite precipitation product downstream of the Pearl River basin, China[J]. Hydrological Processes, 2017, 31 (23): 4169-4182. DOI: 10. 1002/hyp. 11350.
- [28] ZULKAFLI Z, BUYAERT W, ONOF C, et al. A comparative performance analysis of TRMM 3B42 (TMPA) versions 6 and 7 for hydrological applications over Andean-Amazon River basins [J]. Journal of Hydrometeorology, 2014, 15 (2): 581-592. DOI: 10. 1175/jhm-d-13-094. 1.
- [29] ZHANG Q, XU C Y, ZHANG Z. Observed changes of drought/wetness episodes in the Pearl River basin, China, using the standardized precipitation index and aridity index[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009, 98(1-2): 89-99. DOI: 10. 1007/s00704-008-0095-4.
- 
- (上接第 26 页)
- [27] 段唯鑫. 大流域洪水预报实时校正研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (DUAN W X. Reserch on real-time flood forecasting in large basin[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [28] 张露, 张佳宾, 梁国华, 等. 基于 API 模型与新安江模型的察尔森水库洪水预报[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(6): 1056-1059. (ZHANG L, ZHANG J B, LIANG G H, et al. Flood forecast of Chaersen reservoir based on API model and Xin'anjiang model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(6): 1056-1059. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2015. 06. 007.
- [29] 水利部淮河水利委员会. 淮河流域淮河水系实用水文预报方案[M]. 济南: 黄河水利出版社, 2002. (Member of Huaihe Water Conservancy, Ministry of Water Resources. Practical hydrological forecast scheme in huaihe river basin[M]. Jinan: Yellow River Water Conservancy Publishing House, 2002. (in Chinese))
- [30] 周洋洋, 李致家, 姚成, 等. 基于 SCE-UA 算法的 API 模型应用研究[J]. 水力发电, 2014, 40(4): 13-16. (ZHOU Y Y, LI Z J, YAO C, et al. Study on the application of API model based on SCE-UA algorithm [J]. Water Power, 2014, 40(4): 13-16. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0559-9342. 2014. 04. 004.
- [31] 李致家, 梁世强, 霍文博, 等. 淮河上中游复杂流域洪水预报[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 1-6. (LI Z J, LIANG S Q, HUO W B, et al. Study on the flood forecasting in complex basins of upper and middle reaches of Huaihe River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(1): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2019. 01. 001.