

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20230242

# 基于水文模型的山东半岛典型流域产流模式探讨

丁启<sup>1</sup>, 王宗志<sup>1,2</sup>, 刘克琳<sup>1</sup>, 王坤<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210024)

**摘要:**为明晰山东半岛半湿润地区流域产流模式,以龙角山水库流域为例,利用28场洪水资料,以新安江模型和垂向混合产流模型作为蓄满产流和混合产流的代表,探讨半湿润地区流域产流模式。结果表明:(1)垂向混合产流模型的洪峰流量、峰现时间和径流深三个预报项目的平均合格率,在率定期和验证期分别为81.7%和91.7%,达到甲级精度,且模拟结果地面径流与壤中流占比大,对洪峰过程的模拟吻合度高。(2)新安江模型所有预报项目的平均合格率,在率定期和验证期分别为73.3%和83.3%,达到乙级精度,其模拟结果地下径流占比大,对退水过程模拟吻合度高。本研究确定了混合产流模式在龙角山水库流域的适用性要优于蓄满产流模式,对明晰山东半岛半湿润地区产流规律具有促进作用。

**关键词:**半湿润地区;产流模式;混合产流;蓄满产流

**中图分类号:**P33;TV1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2024)03-0067-07

## 0 引言

蓄满产流与超渗产流是两种典型的产流模式,降雨量是影响产流模式的重要因素。赵人俊等<sup>[1]</sup>分析我国降雨-径流相关关系后发现,蓄满产流适用于年降雨量大于800 mm的湿润地区,超渗产流适用于年降雨量小于200 mm的干旱地区,但是年降雨量200~400 mm的半干旱地区和年降雨量400~800 mm的半湿润地区的产流模式仍不清晰<sup>[2]</sup>。我国北方大部分地区年降雨量在200~800 mm范围内,属半干旱半湿润地区,降雨量年际差异大、季节性强、产汇流过程复杂<sup>[3]</sup>、水旱灾害频发,探讨其产流模式有助于提高洪水预报精度,科学支撑流域决策。

山东半岛多年平均降雨650~800 mm,属于典型的半湿润地区,其产汇流特性复杂。詹新焕等<sup>[4]</sup>用降雨径流相关法和新安江模型模拟了山东半岛典型流域洪水过程,认为二者各有优劣;张明芳等<sup>[5]</sup>对降雨径流相关法进行了改进,使其在龙角山水库的预报精度提

高到甲级;郑从奇等<sup>[6]</sup>分析山东半岛沂河上游流域的洪水资料,认为该地区以蓄满产流为主要产流模式;李莹芹等<sup>[7]</sup>将大伙房模型应用于烟台市门楼水库,其预报结果经过修正后与实测过程拟合较好,可用于防洪调度决策。流域产流是与下垫面条件、雨强、包气带蓄水量等因素相关的复杂水文过程<sup>[8]</sup>,尽管目前山东半岛地区水文模型发展迅速,但现有研究仍以单一产流模式或经验模型为主,难以刻画山东半岛半湿润地区复杂的真实产流过程。针对半湿润地区的复杂产流特性,选择能代表当地产流模式的水文模型实施洪水预报,是保障当地防洪安全的关键。田丹等<sup>[9]</sup>构建了超渗蓄满相结合的双产流模式陕北模型,使其更加符合当前黄河地区的产流机制特点,有效提高了洪水模拟精度;王国庆等<sup>[10]</sup>对比AWBM模型、SARC模型、TANK模型、SMAR模型、SIMHYD模型和YRWBM模型在黄河中游清涧河流域的模拟效果,发现考虑蓄满产流和超渗产流两种机制的SIMHYD模型具有更强的地区适应能力;YI B等<sup>[11]</sup>分析汉江上游支流洵河流域产流模式,

收稿日期:2023-07-17

网络首发日期:2023-12-14

网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.1814.P.20231214.0807.001.html>

基金项目:水利部技术示范项目(SF-202210);南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(Y523001)

作者简介:丁启(1999—),男,贵州人,博士研究生,主要研究方向为复杂水资源系统建模与洪水预报调度。Email: 2413659640@qq.com

通信作者:王宗志(1977—),男,山东人,博士,正高级工程师,主要研究方向为水灾害防御与水资源调控利用。Email: zzwang@nhri.cn

认为混合产流模式在半湿润地区具有高度适应性；LIU Y等<sup>[12]</sup>构建了可以灵活选择产流模式的空间组合模型,在我国半湿润地区洪水模拟效果较好。相较于单一产流模式,混合产流模式适应性更强、更符合半干旱地区与半湿润地区的产流特性,是提升半干旱地区与半湿润地区洪水预报精度的可行手段。

针对山东半岛半湿润地区现有洪水预报模型主要以单一产流模式为主的问题,结合当地防洪调度的实际需求,本文以山东半岛龙角山水库流域为研究对象,分别选用新安江模型和垂向混合产流模型模拟龙角山水库入库洪水过程,探究混合产流模式在山东半岛的适用性,综合分析山东半岛半湿润地区典型流域的真实产流模式。

## 1 研究区域及数据

龙角山水库位于山东半岛南部乳山河流域中上游,控制流域面积277 km<sup>2</sup>,有龙角山、马石庄、崖子和王格庄四个雨量站(如图1)。龙角山水库于1959年开始建设、1960年建成,兴利库容5 916万 m<sup>3</sup>,总库容1.05亿 m<sup>3</sup>,为大(二)型水库。水库上游有两条支流汇入,西支发源于乳山市西北部的马石山,东支发源于烟台市牟平区王格庄。龙角山水库地处温带海洋性季风气候区;库区内多年平均降雨量为758.5 mm,其中汛期(6—9月)占比74.6%,属半湿润地区。该地区洪水皆由暴雨引起,属于雨源性河道,具有汛期洪水集中、峰高量大、陡涨陡落的特点。龙角山水库建成后,上游流域没有较大的工程活动,且有20世纪60年代至今的长序列水文监测资料,具有较好的一致性和代表性。



图1 龙角山水库流域水系图

Fig.1 Drainage map of Longjiaoshan reservoir

基于龙角山水库1961—2018年实测降雨径流数据,选用28场降雨径流关系较好的场次洪水进行洪水模拟,其中包括率定期20场,验证期8场。按照洪峰流量的大小,对各场次洪水量级进行划分,划分标准<sup>[4]</sup>如表1。当洪水过程超过一个洪峰时,即为复峰型洪水,其洪水量级以最大的洪峰进行判别。本研究选用的洪水,在率定期和验证期均包含小型、中型、中型复峰、大型和大型复峰洪水,体现洪水资料的合理性和代表性。率定期及验证期各场次洪水信息如表2。

表1 洪水量级划分标准

Table 1 Classification standard of flood magnitude

洪峰流量 $Q_m/(m^3 \cdot s^{-1})$	$Q_m \leq 300$	$300 < Q_m \leq 600$	$Q_m > 600$
洪水量级	小型	中型	大型

表2 各场次洪水信息

Table 2 Flood information

时期	序号	洪水编号	洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	洪水类型
率定期	1	19610907	601.53	大型
	2	19640901	176.65	小型
	3	19640911	403.73	中型
	4	19650727	1229.42	大型
	5	19650804	784.11	大型
	6	19650818	260.92	小型
	7	19680809	162.03	小型
	8	19690807	392.74	中型
	9	19710902	575.12	中型复峰
	10	19720817	1128.93	大型
	11	19730821	489.03	中型
	12	19730830	1937.46	大型
	13	19740810	369.53	中型
	14	19760812	541.43	中型
验证期	15	19850813	842.66	大型
	16	19870903	467.08	中型
	17	20030822	1 198.00	大型复峰
	18	20050804	447.60	中型
	19	20070809	752.36	大型复峰
	20	20080723	296.85	小型
	21	19640704	462.44	中型复峰
	22	19740813	1 306.11	大型
	23	19780811	624.48	大型复峰
	24	19850909	501.25	中型
	25	20020805	118.14	小型
	26	20050807	790.31	大型
	27	20130716	286.00	小型
	28	20170804	636.00	大型

## 2 研究方法

分别采用新安江模型和垂向混合产流模型模拟流域洪水过程,综合对比两种模型的模拟效果,以探讨山东半岛地区典型流域的产流模式。其中,新安江模型采用蓄满产流模式,是我国南方湿润地区应用最为广泛的水文模型之一;垂向混合产流模型兼具蓄满产流与超渗产流两类经典产流模式。

### 2.1 模型选择

(1)新安江模型<sup>[13]</sup>由河海大学赵人俊教授及其团队提出,其产流模式为蓄满产流,广泛适用于我国南方湿润地区。三水源新安江模型分为四个模块:蒸散发计算模块采用三层蒸散发模型;产流计算模块采用蓄满产流模型;水源划分模块用自由水蓄水容量将总径流划分为地表径流、壤中流和地下径流三种径流成分;汇流计算模块采用线性水库和分段马斯京根连续演算法计算坡面及河道汇流。

(2)垂向混合产流模型<sup>[14]</sup>由河海大学的包为民教授提出,其产流模式包括蓄满产流和超渗产流。该模型将流域蓄水容量分布曲线和下渗能力分布曲线在垂向上组合起来,降雨到达地面后经过下渗能力分布曲线,划分为超渗地面径流和下渗水量,下渗水量再按照蓄满产流的模式进行产流计算。包为民教授提出的垂向混合产流模型采用敞开式自由水箱将地面以下径流划分为壤中流和地下径流,刘轶<sup>[15]</sup>在此基础上进行了改进,采用三水源划分结构将地面以下径流划分为饱和地面径流、壤中流和地下径流,本研究采用改进后的垂向混合产流模型,其径流划分方法见图2。

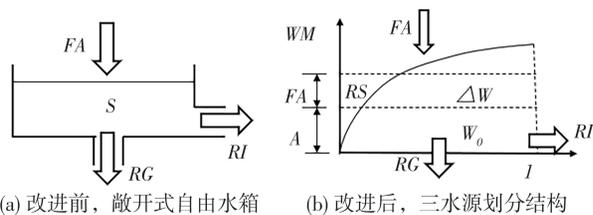


图2 改进前后地面以下径流划分方法对比

Fig.2 Comparison of classification method for runoff components before and after improvement

相较于新安江模型,改进后的垂向混合产流模型多了下渗计算模块,水源划分多了超渗地面径流,以改进的Green-Ampt公式计算流域平均下渗率,其形式见式(1)。

$$FM = FC \left( 1 + KF \frac{WM - W}{WM} \right) \quad (1)$$

式中:FM为流域平均下渗率,mm/h;FC为稳定下渗率,mm/h;KF为渗透系数,反映土壤含水量对下渗的影响;WM为流域张力水蓄水容量,mm;W为流域土壤蓄水量,mm。

### 2.2 模型率定

本研究采用实码加速遗传算法(Real coding based Accelerating Genetic Algorithm,简称RAGA)进行模型参数率定。遗传算法(Genetic Algorithm,简称GA)主要基于进化论、物种选择学说和遗传学说,通过模拟自然界生物种群内部染色体信息交换机制搜索最优解,具有高度的鲁棒性和极佳的全局搜索能力<sup>[16]</sup>。金菊良<sup>[17]</sup>在遗传算法的基础上提出了加速遗传算法,可根据子代优秀个体信息更新搜索范围,其控制参数包括种群数量n、优秀个体数目s、交叉概率ph、变异概率pv。其中n太小则不能充分反映目标函数在最优点附近的信息,n太大则会增加计算量;s与n的配置则反映了加速遗传算法对搜索范围变化的适应能力;ph与pv反映了个体向其他参数网格点随机变迁的概率。依据参考文献[18],加速遗传算法参数取值如表3所示。

表3 加速遗传算法参数值

Table 3 Parameters of accelerating genetic algorithm				
参数符号	n	s	ph	pv
参数意义	种群数量	优秀个体数目	交叉概率	变异概率
参数值	300	20	0.9	0.1

以洪峰预报误差合格率、峰现时间预报误差合格率、径流深预报误差合格率的均值作为模型参数率定的目标函数,见式(2)。

$$\max F = (QR_{(Q)} + QR_{(T)} + QR_{(H)})/3 \quad (2)$$

式中:QR<sub>(Q)</sub>为洪峰预报误差合格率,QR<sub>(T)</sub>为峰现时间预报误差合格率,QR<sub>(H)</sub>为径流深预报误差合格率。结合人工经验优选,得到的新安江模型和垂向混合产流模型参数值如表4所示。

### 2.3 精度评定方法

根据《水文情报预报规范》(GB/T 22482-2008),以确定性系数DC、洪峰预报误差、径流深预报误差、洪峰出现时间预报误差四项评价指标对各模型进行模型精度评定。确定性系数DC的计算见式(3)。

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

式中:DC为确定性系数;y<sub>o</sub>(i)为实测值;y<sub>c</sub>(i)为预报

表4 垂向混合产流模型与新安江模型参数值  
Table 4 Parameters of vertical mixed runoff model and Xin'anjiang model

参数符号	参数值		参数意义
	垂向混合产流模型	新安江模型	
<i>K</i>	0.2	1.13	蒸散发折算系数
<i>WM</i>	50.2	46.5	流域平均土壤蓄水容量
<i>WUM</i>	10.0	9.3	流域上层土壤蓄水容量
<i>WLM</i>	30.1	27.9	流域下层土壤蓄水容量
<i>C</i>	0.01	0.01	深层蒸散发系数
<i>IMP</i>		0.01	不透水面积比例
<i>FC</i>	4.4		稳定下渗率
<i>KF</i>	17.6		渗透系数
<i>BF</i>	0.31		下渗分布曲线指数
<i>B</i>	1.21	0.24	流域蓄水容量分布曲线指数
<i>SM</i>	11.5	22	自由水蓄水容量
<i>EX</i>	0.1	0.45	自由水蓄水容量分布曲线指数
<i>KI</i>	0.44	0.23	壤中流出流系数
<i>KG</i>	0.26	0.47	地下径流出流系数
<i>CS</i>	0.51	0.14	地面径流消退系数
<i>CI</i>	0.65	0.50	壤中流消退系数
<i>CG</i>	0.95	0.95	地下径流消退系数
<i>KE</i>	1	1	河段传播时间
<i>XE</i>	0.34	0.35	流量比例因子
<i>N</i>	3	3	河段数

值; $\bar{y}_0$ 为实测值的均值; $n$ 为资料序列长度。

洪峰预报误差、径流深预报误差以实测流量的20%作为许可误差,洪峰出现时间预报误差以3 h作为许可误差;一次预报误差小于许可误差为合格预报,合格预报次数与预报总次数之比为合格率。

### 3 结果及讨论

#### 3.1 模拟精度评价

两模型的各项评价指标如表5所示。

(1)确定性系数 $DC$ 。新安江模型与垂向混合产流模型模拟的确定性系数 $DC$ 的均值接近,但是新安江模型的极差较大,且在率定期和验证期垂向混合产流模型的合格率均大于新安江模型,垂向混合产流模型模拟结果更为稳健。

(2)洪峰流量误差。新安江模型的洪峰流量误差合格率在率定期和验证期均为75%,达到乙级精度;垂向混合产流模型洪峰流量误差合格率在率定期和验证期分别为75%和87.5%,均达到乙级精度。在率定期和验证期,垂向混合产流模型的洪峰流量误差均值和极差均小于新安江模型,说明垂向混合产流模型对洪峰流量的模拟效果要优于新安江模型。

(3)径流深误差。新安江模型在率定期的径流深误差合格率为50%,达到丙级精度,在验证期的合格率为87.5%,达到乙级精度;垂向混合产流模型在率定期的径流深误差合格率为70%,验证期合格率为87.5%,均达到乙级精度。结合径流深误差的平均值、极差,垂向混合产流模型的径流深误差更小且更加集中,说明垂向混合产流模型对径流深的模拟效果也优于新安江模型。

(4)峰现时间误差。垂向混合产流模型的峰现时间误差合格率在验证期和率定期均为100%,模拟精度均达到了甲级标准;新安江模型在率定期和验证期各有一个不满足精度要求的离群值,合格率分别为95%和87.5%,这两个离群值都是复峰型洪水,新安江模型

表5 模型精度评价指标  
Table 5 Accuracy evaluation indexes

预报项目	特征值	率定期		验证期	
		新安江模型	垂向混合产流模型	新安江模型	垂向混合产流模型
确定性系数	均值	0.75	0.73	0.72	0.75
	极差	0.55	0.43	0.44	0.29
	丙级及以上精度场次	19	20	7	8
洪峰流量误差	均值	15.5	14.2	14.1	12.1
	极差	45.4	36.4	36.8	32.2
	合格率	75%	75%	75%	87.50%
径流深误差	均值	25.4	20.0	11.5	17.3
	极差	53.6	50.1	24.1	35.7
	合格率	50%	70%	87.50%	87.50%
峰现时间误差	最大值	1	1	0	1
	最小值	-14	-3	-20	-2
	合格率	95%	100%	87.50%	100%

注:洪峰流量误差和径流深误差为相对误差,单位为%;峰现时间误差为绝对误差,单位为 $h$ 。

错误地将副峰模拟为主峰,导致了离群值的出现,说明垂向混合产流模型对峰现时间的模拟效果也优于新安江模型。

新安江模型洪峰流量、峰现时间以及径流深三个预报项目的平均合格率在率定期和验证期分别为73.3%和83.3%,达到乙级精度;垂向混合产流模型的三个预报项目平均合格率在率定期和验证期分别为81.7%和91.7%,达到甲级精度,垂向混合产流模型的总体预报精度较高。

### 3.2 径流成分分析

不同产流模式下流域降雨引起的径流成分不同,而产流模式与降雨量息息相关。本文分析两种产流模式下不同场次洪水中各径流成分占比与最大1 h降雨量的关系,判断蓄满产流与混合产流的合理性,结果如图3所示。

(1)地下径流。新安江模型和垂向混合产流模型中的地下径流占比分别为40%~60%和10%~30%,且均有随着最大1 h降雨量的增加而减小的趋势。混合产流模式下地下径流的占比与文献[19]中“多年平均降雨量400~800 mm的半湿润地区的地下径流占比约为10%”的结论较为吻合。

(2)壤中流。两模型中壤中流占比均有随着最大1 h降雨量的增加而减小的趋势;新安江模型中,壤中流占比在20%~35%左右,变化较小;垂向混合产流模型中壤中流占比在20%~60%范围内,且随着最大1 h降雨量的增加而迅速减小,导致该结果的原因是随着最大1 h降雨量的增加,雨强大于地面下渗能力,超渗产流增多、蓄满产流减少,从而引起壤中流的减少。

(3)地面径流。新安江模型中,饱和地面径流有随

着最大1 h降雨量增大而增大的趋势,最大1 h降雨量越大,土壤越容易被蓄满,饱和地面径流占比也越大。垂向混合产流模型中,饱和地面径流的占比有随着最大1 h降雨量的增大而先增大后减小的趋势,而超渗地面径流的占比随着最大1 h降雨量的增大迅速增大;当降雨量较小时,下渗率大但总水量小,土壤不容易蓄满,超渗地面径流和饱和地面径流占比均较小;随着降雨量增加,下渗率降低但总水量增大,土壤更容易蓄满,超渗地面径流与饱和地面径流均增加;当降雨量继续增加,下渗率降至稳定下渗率,使得超渗地面径流增多,饱和地面径流减少。

### 3.3 洪水过程分析

从28场洪水中选择小型、中型、大型、复峰型洪水各2场洪水的模拟结果,与实测洪水过程对比,如图4所示。

由图4可知,对于小型洪水,两种模型的模拟效果均比较差,但新安江模型模拟效果要略优于垂向混合产流模型,随着洪水量级增大,两种模型的模拟效果变好。对于中型洪水,两种模型的模拟效果接近。

对于大型洪水,垂向混合产流模型对洪峰部分的模拟吻合效果要优于新安江模型,新安江模型中地下径流占比较大,而地下径流的涨退过程都比较缓慢,对洪峰做出主要贡献的是地面径流和壤中流;垂向混合产流由于考虑了超渗产流,当雨强较大时更容易形成超渗地面径流,使得洪峰增加、洪水过程加快,与研究流域洪水集中、峰高量大、陡涨陡落的特点相吻合。而在洪峰结束后的退水阶段,则是新安江模型的模拟吻合效果优于垂向混合产流模型;当洪峰过去之后,地面径流和壤中流迅速消退,退水主要以地下径流为主,垂

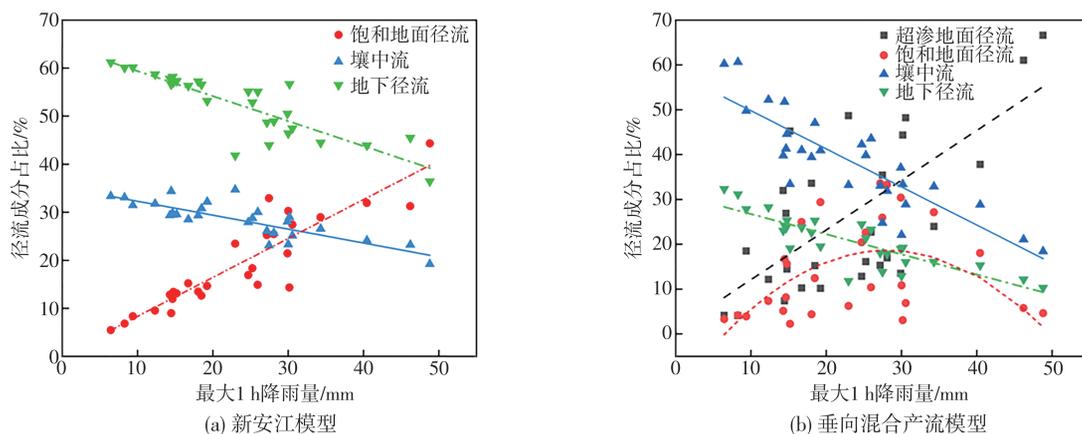


图3 径流成分占比

Fig.3 Proportion of runoff components

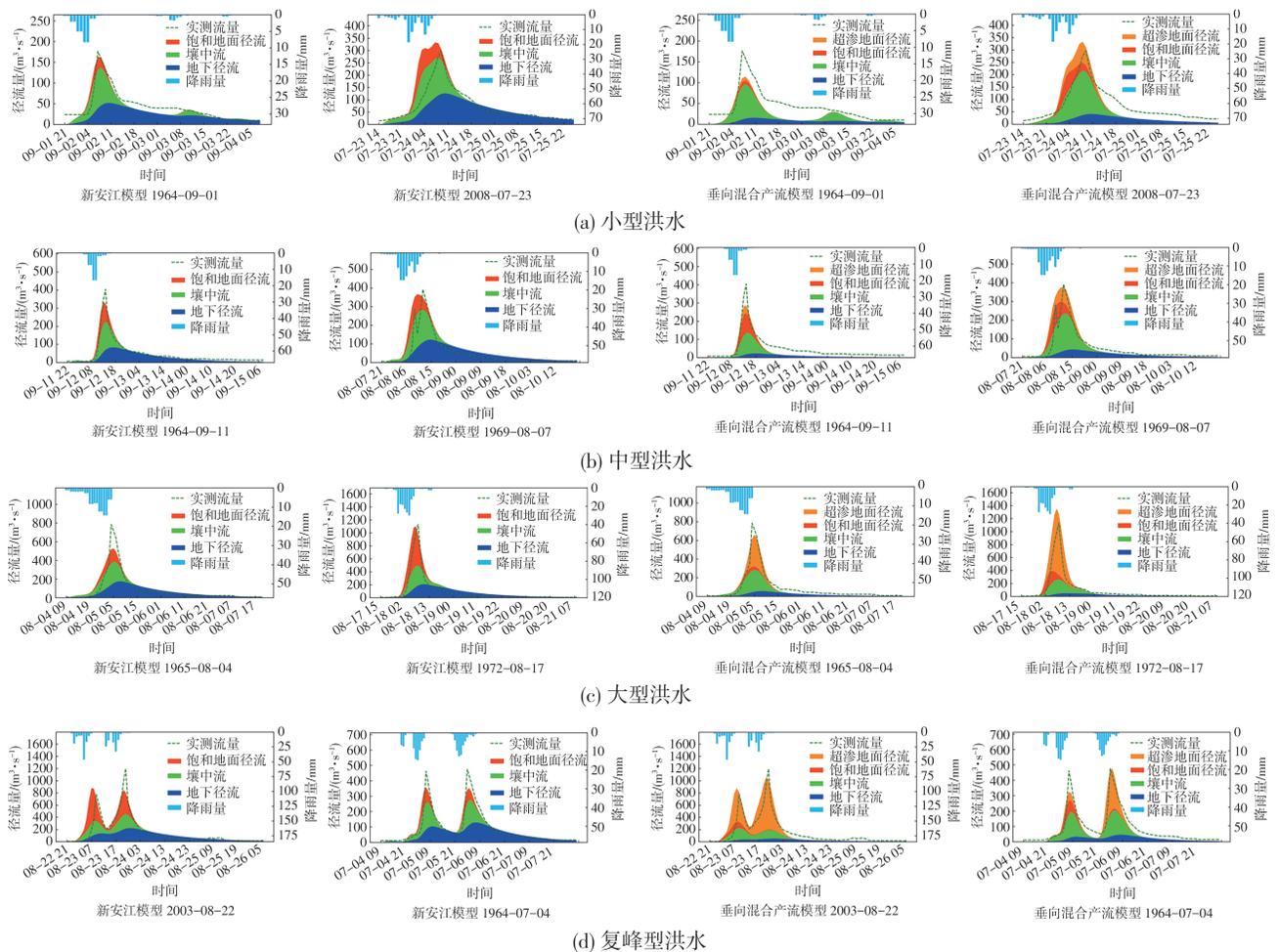


图4 典型洪水过程模拟结果

Fig.4 Simulation results of the flood processes

向混合产流模型中地下径流占比较小导致模型模拟的退水过程流量要小于实测流量。

对于复峰型洪水,新安江模型和垂向混合产流模型对第一个洪峰的模拟效果接近,而垂向混合产流模型对第二个洪峰的模拟效果更优。由式(1)可知,在垂向混合产流模型中,流域平均下渗率 $FC$ 与流域土壤蓄水量 $W$ 呈负相关。第一个洪峰过后,流域土壤蓄水量 $W$ 增大至土壤蓄水容量 $WM$ ,使得流域平均下渗率降低至稳定下渗率,导致第二个洪峰到来时,雨强大、稳定下渗率小,大部分雨强大于稳定下渗率,以超渗地面径流的形式出流,对洪峰贡献增大。

在实际洪水预报作业中,考虑防洪时,垂向混合产流模型模拟的洪峰要高于新安江模型且更接近实测洪峰,用垂向混合产流模型模拟的洪峰过程制定防洪策略更加合理、安全。考虑兴利时,新安江模型模拟的退水过程高于垂向混合产流模型且更接近实测退水过程,用新安江模型模拟的退水过程制定蓄水兴利策略

更加合理、安全。

#### 4 结论与展望

为解析适合半湿润地区产流模式,本文以山东半岛龙角山水库控制流域为例,选择28场典型洪水过程,采用新安江模型和垂向混合产流模型进行模拟对比,得出如下结论:

(1)新安江模型与垂向混合产流模型,在率定期(20场洪水)和验证期(8场洪水)的各项预报指标均满足规范要求,可以用于山东半岛典型流域的水文预报作业。

(2)垂向混合产流模型的各项精度评价指标均优于新安江模型;新安江模型中地下径流占比过大,垂向混合产流模型中各径流成分的占比及其随最大1小时降雨量的变化而产生的变化,更符合当地产流特性。

(3)垂向混合产流模型对洪峰过程的模拟吻合度

较高,而新安江模型对退水过程的模拟吻合度较高。垂向混合产流模型中地面径流占比较大,新安江模型中地下径流占比较大,使得二者分别对洪峰过程和退水过程模拟有优势。

本文是基于产流模式的理论分析不同产流模式在研究流域的适用性,为进一步揭示山东半岛半湿润地区流域产流模式,未来拟在两个方面探索:一是增加典型流域,初步考虑选择受人类活动影响程度不同、水文系列尽可能长的多个水文站,例如受人类活动影响较小的国家基本站鲍村水文站等。二是结合同位素示踪及分层观测实验,明确实际产流过程中各种径流成分的占比,尽可能事先确定模型参数。

#### 参考文献:

- [1] 赵人俊,庄一鹤.降雨径流关系的区域规律[J].华东水利学院学报(水文分册),1963(S2):53-68.
- [2] 董玉婷,穆兴民,王双银,等.产流及其研究进展[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(2):21-29.
- [3] JIN H, LIANG R, WANG Y, et al. Flood-Runoff in Semi-Arid and Sub-Humid Regions, a Case Study: A Simulation of Jianghe Watershed in Northern China[J]. Water, 2015,7(9):5155-5172.
- [4] 詹新焕,王立辉,张明芳,等.龙角山水库入库洪水实用预报方法对比研究[J].水电能源科学,2021,39(1):75-78.
- [5] 张明芳,詹新焕,刘建光,等.降雨径流相关法在水库洪水预报中的应用研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2020,41(3):56-61.
- [6] 郑从奇,庄会波,郭晓娜.山东省山丘区典型流域产流机制研究[J].山东水利,2017(4):1-2.
- [7] 李莹芹,何斌,梁国华.门楼水库洪水预报及修正方法[J].东北水利水电,2016,34(3):19-21.
- [8] 穆兴民,顾朝军,孙文义,等.植被恢复改变黄土高原产流模式问题初探[J].人民黄河,2019,41(10):31-39.
- [9] 田丹,石朋,林子珩,等.双产流模式陕北模型在半干旱地区的应用研究[J].中国农村水利水电,2020(9):117-121.
- [10] 王国庆,荆新爱,陈江南,等.流域水文模型在黄河中游清涧河流域的应用对比[J].灌溉排水学报,2005(3):53-56.
- [11] YI B, CHEN L, LIU Y, et al. Hydrological modelling with an improved flexible hybrid runoff generation strategy [J]. Journal of Hydrology, 2023,620(PA):129457.
- [12] LIU Y, ZHANG K, LI Z, et al. A hybrid runoff generation modelling framework based on spatial combination of three runoff generation schemes for semi-humid and semi-arid watersheds[J]. Journal of Hydrology, 2020,590:125440.
- [13] 赵人俊.流域水文模拟[M].北京:水利电力出版社,1984.
- [14] 包为民,王从良.垂向混合产流模型及应用[J].水文,1997(3):19-22.
- [15] 刘轶,李琼芳,邹振华,等.垂向混合产流模型的改进及应用[C]//中国自然资源学会水资源专业委员会,中国地理学会水文地理专业委员会,中国水利学会水文专业委员会,中国水利学会水资源专业委员会,中国可持续发展研究会水问题专业委员会.环境变化与水安全——第五届中国水论坛论文集.北京:中国水利水电出版社,2007:91-94.
- [16] LONG Q, WU C. A hybrid method combining genetic algorithm and Hooke-Jeeves method for constrained global optimization [J]. Journal of Industrial and Management Optimization, 2014,10(4):1279-1296.
- [17] 金菊良,杨晓华,丁晶.基于实数编码的加速遗传算法[J].四川大学学报(工程科学版),2000(4):20-24.
- [18] 杨晓华,金菊良,张国桃.加速遗传算法及其在暴雨强度公式参数优化中的应用[J].自然灾害学报,1998,7(3):71-76.
- [19] 冉广.黄河中游典型流域产流模式变化辨析研究[D].郑州:郑州大学,2021.

## Exploration of Runoff-Generating Pattern in Typical Watersheds of Shandong Peninsula Based on Hydrological Models

DING Qi<sup>1</sup>, WANG Zongzhi<sup>1,2</sup>, LIU Kelin<sup>1</sup>, WANG Kun<sup>1</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210029, China;

2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** To clarify the runoff-generating pattern in semi humid region, taking Longjiaoshan reservoir in Shandong Peninsula as a case study, the Xin'anjiang model and vertical mixed runoff model were chosen to explore the runoff-generating pattern by 28 sessions of flood data. The results shows that: (1) the vertical mixed runoff model achieves the average qualification rate of 81.7% and 91.7% for all forecast items during the calibration and validation periods, reaching Class A accuracy, and demonstrating high conformity in simulating peak flow processes. (2) The Xin'anjiang model attained the average qualification rate of 73.3% and 83.3% for all forecast items during the calibration and validation periods, achieving Class B accuracy, and demonstrating good conformity in simulating recession processes. This study shows that the applicability of the mixed runoff model in Longjiaoshan Reservoir Basin is superior to the saturation excess runoff model, contributing to a better understanding of runoff-generating pattern in the semi-humid regions of the Shandong Peninsula.

**Keywords:** semi-humid region; runoff-generating pattern; mixed runoff generation; saturation excess runoff