

# 基于径流实验的产汇流机理研究与过程模拟

许 钦<sup>1,2,3,4</sup>,袁肖琦<sup>1,3</sup>,陈 星<sup>5</sup>,蔡 晶<sup>6</sup>,金 晨<sup>2</sup>,林晓清<sup>7</sup>,周 宏<sup>1,3</sup>

(1.南京水利科学研究院水文水资源研究所;2.长江保护与绿色发展研究院;  
3.南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室;4.石河子大学水利建筑工程学院;  
5.河海大学水文水资源学院;6.皖江工学院水利工程学院;7.闽清县水利局)

**摘要:**针对产汇流机理在点尺度物理方程与流域尺度模型应用不匹配的问题,选取南大洼实验流域开展了2017—2018年降雨-径流原型实验,获取了总径流、分层径流、地下水位和土壤含水率等要素数据。在代表性单元流域(REW)理论框架下,基于质量守恒原理构建流域尺度守恒方程,建立了分布式REW水文模型,并在嵌套流域结合新安江模型开展了径流过程分层模拟与验证。结果表明:REW模型能够较好地再现汛期总径流变化过程,模拟结果与实测序列在变化趋势与量级上基本一致,误差主要集中于强降雨阶段;基于五子区结构的分层径流模拟结果与实测值吻合良好,地表径流、壤中流及地下径流均得到有效刻画;土壤含水率模拟值与实测值整体一致;基于REW模型的径流模拟方法可为小尺度流域水文过程模拟及机理分析提供新的技术路径。

**关键词:**径流实验;产汇流机理;REW模型;嵌套流域;分层径流

**Research on runoff generation and concentration mechanisms and process simulation based on runoff experiments**//Xu Qin<sup>1,2,3,4</sup>, Yuan Xiaoqi<sup>1,3</sup>, Chen Xing<sup>5</sup>, Cai Jing<sup>6</sup>, Jin Chen<sup>2</sup>, Lin Xiaoqing<sup>7</sup>, Zhou Hong<sup>1,3</sup>(1. Institute of Hydrology and Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development; 3. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute; 4. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University; 5. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 6. College of Hydraulic Engineering, Wanjiang University of Technology; 7. Mingqing County Water Conservancy Bureau)

**Abstract:** To address the mismatch between point-scale physical formulations of runoff generation and concentration and their application at the watershed scale, a prototype rainfall-runoff experiment was conducted in the Nandawa experimental catchment from 2017 to 2018. Multi-source observations, including total runoff, stratified runoff components, groundwater level, and soil moisture, were collected. Based on the representative elementary watershed (REW) theory, watershed-scale conservation equations were derived using mass conservation principles, and a distributed REW hydrological model was developed. Layered runoff simulations and validations were then performed in the nested watershed in conjunction with the Xin'anjiang model. The results show that the REW model effectively reproduces seasonal runoff dynamics, with good agreement between simulated and observed series in terms of both trend and magnitude. Errors mainly occur during extreme rainfall events. The layered runoff simulation results based on the five-subzone structure are in good agreement with the observed data, effectively capturing surface runoff, interflow, and groundwater runoff. The simulated soil moisture content is generally consistent with the measured values. The runoff simulation method based on the REW model provides a new technical pathway for hydrological process simulation and mechanism analysis in small-scale watersheds.

**Key words:** runoff experiment; runoff generation and concentration mechanism; REW model; nested watershed; layered runoff

产流与汇流过程是水文学研究的核心内容,直接关系到水循环机理的揭示,也是流域水资源管理的科学基础<sup>[1-2]</sup>。20世纪提出的超渗产流与蓄满产

流理论,为现代产汇流机制的研究奠定了理论基础<sup>[3-4]</sup>。实际观测表明,在同一降雨条件下流域内往往并存多种产流模式,产流过程受气候、地形、土壤

**基金项目:**国家自然科学基金项目(52209031,U2443202,52579005);水利部重大科技项目(SKR-2022067);山东省重点研发计划项目(2023CXGC010905);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y523008,Y522018);南京水利科学研究院研究生学位论文发展基金项目(Yy525020)

**作者简介:**许钦(1980—),男,正高级工程师,博士,主要从事产汇流理论和水文预报研究。E-mail:qinxu@nhri.cn

及下垫面等多个因子共同影响,表现出显著的非线性和空间异质性,这仍是水文学研究中的重大挑战<sup>[5-7]</sup>。深度学习模型并非“通用最优”,其相对优势取决于流域尺度的水分环境与下垫面的组成及结构特征,因而在不同水文-地表情境下呈现差异化表现<sup>[8]</sup>。如何精细刻画产流机制、定量描述产流面积的时空动态变化,已成为流域水文模型发展的关键科学问题<sup>[9-10]</sup>。

在汇流机制研究方面,学界通常采用圣维南方程来刻画流域水体运动规律,并通过平均汇流时间与汇流时间分布函数来反映水体在流域中的运移过程<sup>[11]</sup>。尽管已有研究<sup>[12-14]</sup>采用卷积方法、经验函数或概念性模型探讨汇流时间分布函数的特征,但这些方法多依赖输入-输出关系,缺乏对流域内部物理过程的显式表达,因而难以揭示真实的产汇流机制。径流过程具有显著的尺度效应,小尺度实验揭示的机理往往难以直接推广至大尺度流域模拟,因此如何实现从点尺度到流域尺度的机制转换,已成为国际水文研究的前沿与热点<sup>[15-20]</sup>。

近年来,基于代表性单元流域(REW)理论的建模方法为大尺度流域模拟提供了一种新的思路。该方法以守恒定律为基础建立流域尺度物理量守恒方程,为分布式水文模型的发展提供了理论框架<sup>[21-22]</sup>。本文依托南大洼实验流域观测数据构建了分布式REW水文模型,实现了对地表径流、壤中流、地下径流及土壤水分过程的统一模拟与验证,并通过多要素观测资料的综合检验,进一步评估了模型在不同水文过程与不同流域尺度条件下的适用性与稳定性,以期为解决点尺度物理规律与流域尺度模型之间的尺度不匹配问题提供新的建模思路,同时为复杂下垫面条件下的流域水文过程模拟与机制分析提供方法支持。

## 1 实验流域概况

南大洼实验流域是位于安徽省滁州市花山流域内部的一处天然闭合小流域,面积为7897 m<sup>2</sup>,植被类型为天然林地。为便于水文过程观测,流域边界采用混凝土密封至基岩,尽可能消除侧向渗漏影响。通过69个钻孔的岩芯分析,确认流域基底为安山岩,岩体结构完整,无明显裂隙或断层。基岩以上第四系沉积物厚度为1~7 m,平均厚度为2.46 m,高差为12.9 m,地面坡度为6.7%~17.1%,排水沟比降为6.7%。原排水沟改造为分层集水槽,用以测定地面径流、壤中流和地下径流。

为深入认识水文现象并揭示其形成机理,本文基于南大洼实验流域开展径流观测实验。模型需要

输入水文、气象、地理等众多基础资料,其中水文要素包括流量、水位、土壤含水量等,气象要素包括蒸发量、降水量等,地理要素包括地理高程等数据。水文和气象资料可以通过设计、观测径流实验获取实测数据,地理数据可通过数字高程模型(DEM)及相关软件提取。观测设备主要分为以下两类:

a. 水文要素观测设备。南大洼实验流域内具有分层径流观测系统,可分别观测地表径流、0~50 cm 壤中流(早期为0~30 cm)、50~100 cm 壤中流以及总径流。流域内布设了34套土壤水分剖面速测仪和30个压力式水位计,分别监测土壤含水率和地下水水位动态。

b. 气象要素观测设备。实验流域蒸发数据采用邻近水文站实测蒸发资料。为观测降水量,流域内架设了11个林下雨量计和131个穿透雨集水器。实验场自行设计和建造了一个面积为8.45 m×4.05 m的林下雨量站,能够更精确地测量穿透雨。

## 2 研究方法

### 2.1 REW 理论框架与模型构建

传统分布式水文模型多基于连续介质力学方程,但这些方程在微观尺度上的假设难以直接适用于流域尺度的水文模拟。为解决这一矛盾,Reggiani等<sup>[22]</sup>将流域视为开放热力学系统,在宏观尺度上建立了质量、动量、能量及熵的守恒方程,提出了REW理论框架。该理论框架将流域划分为若干个REW,每个REW进一步细分为5个功能子区:非饱和子区(u区)、饱和子区(s区)、蓄满产流子区(o区)、超渗产流子区(c区)和主河道子区(r区),各子区之间通过质量、动量、能量和熵交换相互作用。5个子区的面积随降雨、蒸散发、下渗等水文过程动态变化<sup>[23]</sup>。

在REW理论框架下,微观质点的物理量守恒方程经时空均化处理后,升尺度为宏观常微分方程。为实现方程闭合,需要建立流域水文本构关系。几何特征包括各子区面积比、u区厚度、河网密度、主河道几何参数等;物理特征则涉及下渗率、蒸散发率、地下水回灌与毛管提升系数、超渗与饱和坡面流、渗流、河道入出流、蒸发损失及地下水-河流补给等。通过建立几何与水文的关系,可为模型方程的闭合与求解提供必要支撑。

本文建立了一系列描述流域产汇流机理的方程,包括REW 5个子区的物理守恒方程和流域本构关系,并由此构建了一个由9个状态变量及其对应质量守恒方程(并结合动量约束)组成的流域尺度分布式水文模型(以下简称“REW模型”)。各子区

之间的产汇流形成分析见图 1。

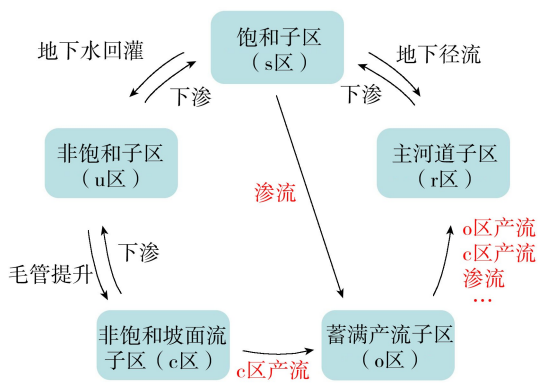


图 1 各子区产汇流机制与径流组成示意图

地表径流由超渗径流与蓄满径流组成,前者在 c 区产生并形成汇流流至 o 区,然后与后者汇聚共同流入 r 区;降水过程中随着雨水下渗,地下水位抬升,s 区范围不断扩大,该子区水分逐渐渗流至地表 o 区,形成壤中流汇入河道;部分地下水由 s 区侧向补给河流,形成地下径流。

## 2.2 REW 模型参数率定与验证

REW 模型在模拟流域产汇流时基于模拟流域的水文、气象、下垫面等特征将流域离散为若干个 REW 作为其基本计算单元,每个计算单元都必须包含独立完整的河道、坡面等流域结构组成。南大洼实验流域实测数据序列较短,直接率定出的参数可能存在不确定性。为解决此问题,采用“嵌套流域”的验证思路:先在自然地理条件相似且拥有长期水文气象观测数据的上级流域——沙河集水库流域进行模型参数率定与验证,再将参数应用于南大洼实验流域,增强模型在实验流域模拟的准确性,并检验模型在不同尺度上的适用性。

### 2.2.1 嵌套流域验证方案

沙河集水库流域(控制面积 300 km<sup>2</sup>)是南大洼实验流域的直接上级流域,两者属典型的内外嵌套关系,在水文、气象、地形、土壤等自然条件上高度相似,为参数移植提供了地理与物理基础。沙河集水库所用的降水、流量、蒸发等水文数据均来自《中华人民共和国水文年鉴》,包含 2008—2018 年的长期逐日平均降水量、逐日平均蒸发量序列。以 2008—2014 年数据作为模型率定期,2015—2018 年数据作为模型验证期,采用纳什效率系数(NSE)作为模型性能评价指标。

表 1 南大洼实验流域和沙河集水库流域 REW 模型参数率定结果

流域	地下水回灌提升系数	与 u 区渗透系数空间分布相关的尺度系数	u 区蒸散发系数	饱和坡面流产流系数	超渗坡面流产流系数	渗流系数			o 区相对面积计算系数			与毛管作用相关的系数
						$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	
南大洼	6.42	0.95	144	1.33	1.37	0.08	0.96	0.13	9.32	2.27	16	0.63
沙河集水库	6.88	0.95	154	1.30	1.32	0.10	1.12	0.15	9.45	2.55	16	0.70

南大洼实验流域面积较小且地理特征均一,可将其视为一个独立的代表性单元进行高精度水文过程模拟。模型输入数据为 2017—2018 年的实测降雨、径流、土壤含水量和地下水位数据,蒸发数据采用邻近站点逐日观测值等权重分配。该模型可输出总径流、地面径流、壤中流及土壤含水量等多种水文要素,为揭示微观产汇流机制提供支持。

### 2.2.2 参数率定结果与尺度效应分析

沙河集水库流域和南大洼实验流域的参数率定结果见表 1,与南大洼实验流域的参数率定值相比,尽管存在细微差异,但两个流域的 REW 模型参数集整体表现出高度一致性。沙河集水库流域的产流系数略小而渗流系数略大,主要源于两个流域下垫面的差异,沙河集水库流域的植被覆盖率相对较低,导致其产流能力稍强、下渗能力稍弱。参数率定结果表明模型参数值在地理空间和气象特征相似的嵌套流域中具有可移植性,揭示了 REW 模型参数具有一定的尺度不变性,同时也印证了流域相似性与水文模型参数之间存在紧密联系。

## 3 结果与分析

### 3.1 总径流过程模拟检验

以南大洼实验流域 2017 年 5 月 24 日至 10 月 20 日为率定期,总径流深为 284.24 mm;以 2018 年 5 月 3 日至 7 月 22 日为验证期,总径流深为 236.69 mm。模拟 2017—2018 年汛期径流变化过程并与观测序列进行对比,检验 REW 模型对降雨-径流过程的再现能力。

根据径流过程模拟值与实测值对比(图 2),REW 模型能够较好地再现径流过程变化特征。从整体来看,模型模拟径流过程与实测值趋势基本一致,模型在不同年份均能较好地再现实验流域尺度径流量的变化趋势。传统水文模型如新安江模型在面积小于 1 km<sup>2</sup> 的微流域中难以适用,而 REW 模型在该尺度下表现出良好的适应性,显示出其在多尺度模拟中的潜力。

在极端降雨年份,模拟误差相对较大,主要来源包括:

a. 观测响应滞后与空间代表性不足。由于实验流域面积较小(小于 0.01 km<sup>2</sup>),强降雨期间地表

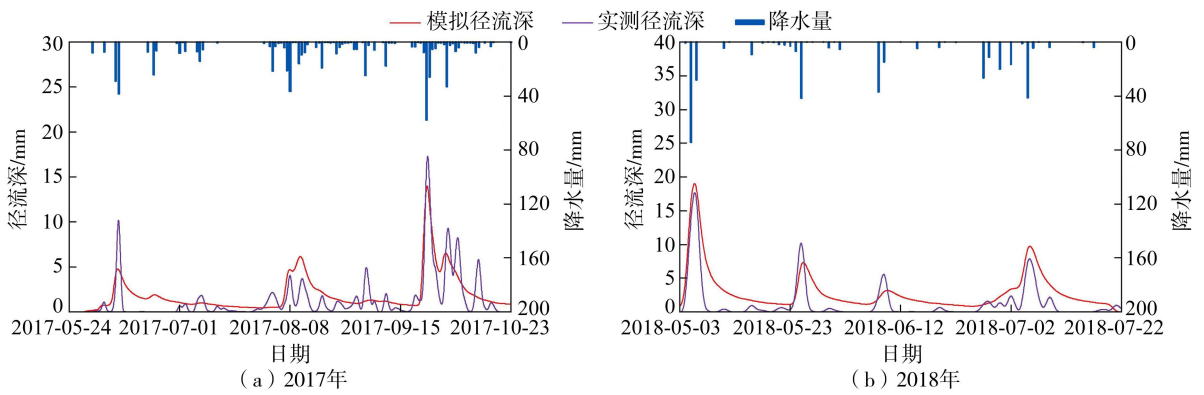


图2 2017年和2018年南大洼实验流域模拟径流与实测径流对比

径流迅速形成,但分层集水系统存在物理滞后现象(如壤中流汇集需时),导致观测峰值系统地滞后于模拟值约1~3 h。此外,11个林下雨量计在暴雨期间出现局部溅水与溢流现象,造成降雨输入低估约5%~8%,进一步放大了径流模拟误差。

**b. 模型结构机制。**REW模型当前采用固定的下渗参数,但在暴雨条件下,实际产流面积(包括超渗产流子区与蓄满产流子区)会显著大于模型初始设定的对应子区面积。未来应引入降雨强度驱动的下渗参数动态化方案,以提升极端条件下的输入精度与模型响应能力。

### 3.2 分层径流计算检验

为分析流域产汇流过程及不同径流成分的组成,本文基于南大洼实验流域2018年汛期逐日上午8:00的分层径流观测数据,分别采用地表径流深、0~50 cm土层壤中流径流深和地下水位对水文模型进行检验,模拟结果如图3所示。地表径流、壤中流、地下水位的过程线与实测值的变化趋势一致。在短时强降雨期间,模拟洪水过程线呈现尖瘦形态,实测曲线则相对圆胖,峰值相对误差明显扩大。模型对强降雨条件下产流范围扩大及汇流加速的响应偏于敏感,且采用固定参数,不能随降雨强度动态调整,致使暴雨期峰值偏高、过程偏窄,是误差的主要来源。

### 3.3 土壤含水率计算检验

土壤水分在产汇流过程中具有关键作用,其空间分布直接影响下渗、蒸散发及地表径流的分配比例<sup>[24-27]</sup>。本文选用土壤含水率作为检验模型表现优劣的第二道标准。选取2018年汛期南大洼实验流域中心位置测点24 h步长、0.1~1.5 m深土壤体积含水率的平均值作为实测参照序列。

图4对比了土壤含水率计算序列与实测序列。对比曲线显示,模拟与实测土壤平均含水率在整个汛期呈现“同升-同降”的变化特征,但形态与相位存在明显差异:暴雨陡涨段,实测峰圆润,模拟峰尖锐

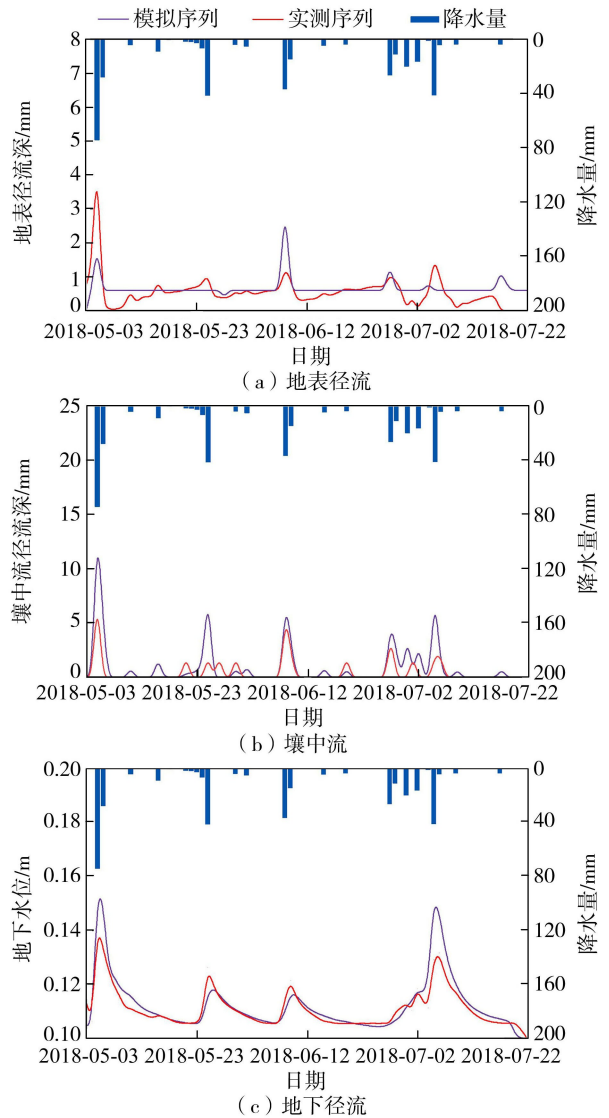


图3 2018年南大洼实验流域分层径流模拟序列与实测序列对比

且提前约半天;进入退水段后,模拟值下降更快,出现持续性低估情况,直至下次降雨前才缓慢靠拢。由此可直观判断,模型对土壤蓄水总量估计合理,但入渗速率设定过快、退水导湿率偏大,造成暴雨期湿度峰值高估、退水期湿度持续偏低的阶段性双向偏差。

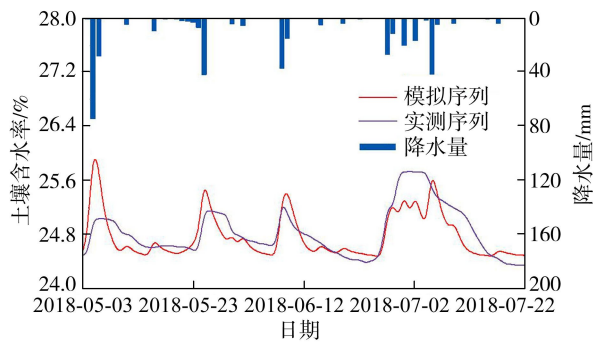


图4 2018年南大洼实验流域土壤含水率计算序列与实测序列对比

## 4 嵌套流域 REW 模型验证效果

### 4.1 日径流过程模拟及对比分析

采用 REW 模型对沙河集水库流域 2008—2018 年的逐日径流过程进行模拟,并与三水源新安江模型进行对比。逐日径流过程模拟结果特征值如表 2 所示。沙河集水库流域在率定期(2008—2014 年)和验证期(2015—2018 年)的模拟效果均达到水文模拟精度评价的基本要求,表明 REW 模型能够有效地应用于沙河集水库流域,为研究实验流域尺度与水文物理机制的关系提供了可靠工具。通过沙河集水库流域应用和检验,证明水文模型构建合理且参数率定正确,反映出 REW 模型在湿润地区小尺度天然流域应用效果较好。

表 2 REW 模型与新安江模型径流模拟精度对比

年份	REW 模型		新安江模型	
	NSE	相对误差/%	NSE	相对误差/%
2008	0.780	-9.37	0.933	3.40
2009	0.652	37.50	0.785	36.50
2010	0.539	9.15	0.419	43.50
2011	0.622	26.70	0.785	16.90
2012	0.753	16.00	0.810	5.23
2013	0.595	28.20	0.750	15.80
2014	0.728	4.30	0.880	17.30
2015	0.742	-3.10	0.892	13.20
2016	0.699	9.13	0.813	43.50
2017	0.682	27.90	0.866	17.80
2018	0.502	-7.15	0.827	2.56

### 4.2 分层径流过程模拟

对沙河集水库流域 2007—2018 年 13 场洪水过程开展地表径流、壤中流和地下径流过程分层模拟。以 161025 次和 170925 次洪水(图 5)为例分析洪水分层径流时间变化过程线特征,结果显示:沙河集水库流域壤中流一般发生在降雨初期,与降雨分配过程相似,在持续降雨-下渗驱动下非饱和子区土壤含水量达到饱和,地表发生蓄满产流现象,形成地表径流。长历时的降雨结束后,会形成曲线平缓的地下径流。部分洪水历时短、前期土壤湿度与地下水水

位偏低,其地下径流比重偏小。沙河集水库流域出流过程涨洪段主要以地表径流与壤中流为主体,退水尾部以地下径流为主体。各径流成分变化特征符合流域水文过程变化规律。

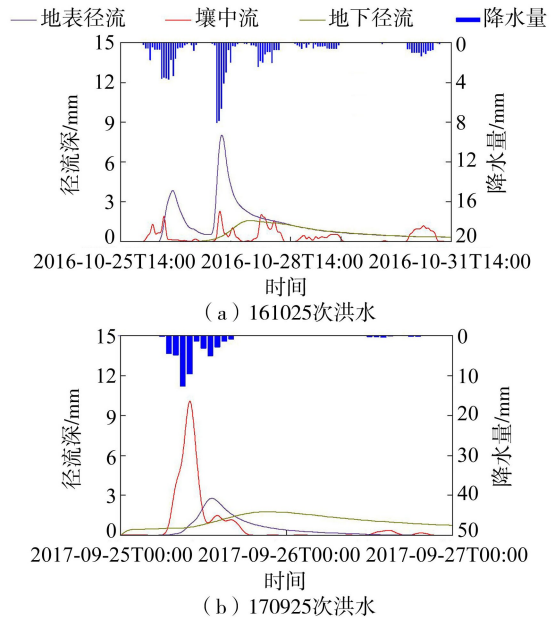


图5 沙河集水库流域洪水过程分层径流小时模拟

## 5 结论

a. REW 模型模拟的各水文要素与实测数据总体吻合,表明模型结构合理、参数稳定。通过嵌套流域参数移植验证,模型在不同尺度间仍具备较好的模拟能力,表明其参数具有一定的尺度可移植性与稳定性。

b. 基于 REW 模型实现了地表径流、壤中流及地下径流的分层模拟。地表径流由超渗产流与饱和产流共同贡献,壤中流与地下水径流在不同子区之间的水量交换过程得到合理刻画,土壤含水率模拟与实测序列高度一致。

c. REW 模型能够有效识别不同径流成分的贡献机制,较好地刻画流域水分存储与运移过程。模型在小尺度流域具备良好适用性,为缓解水文模拟中的尺度不匹配问题奠定了理论基础。

### 参考文献:

- [1] 许钦,金晨,张坤,等.耦合深度学习与水文模型的喀斯特地区径流模拟方法[J].水科学进展,2025,36(4):634-645. (Xu Qin, Jin Chen, Zhang Kun, et al. Runoff simulation in Karst regions by integrating deep learning with physically-based hydrological models[J]. Advances in Water Science, 2025, 36(4): 634-645. (in Chinese))
- [2] 许钦,张坤,叶鸣,等.基于分区耦合模型的太湖流域地表水资源量研究[J].水利水电技术(中英文),2025,

- 56(9):30-41. ( Xu Qin, Zhang Kun, Ye Ming, et al. Research on surface water resources in Taihu Lake Basin based on zonal coupling model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56 ( 9 ): 30-41. ( in Chinese ))
- [ 3 ] 赵丽平,刘晓阳,任明磊,等. 垂向混合产流模型在三峡水库洪水预报中的应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22 ( 增刊 1 ): 1-9. ( Zhao Liping, Liu Xiaoyang, Ren Minglei, et al. Application of vertical mixed runoff model in flood forecasting of Three Gorges Reservoir [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(S1):1-9. ( in Chinese ))
- [ 4 ] 芮孝芳. 论流域水文模型[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(4):1-7. ( Rui Xiaofang. Discussion of watershed hydrological model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(4):1-7. ( in Chinese ))
- [ 5 ] Sourya D A, Manikanta V, Imteaz M A, et al. Catchment features-based interpretation of performance of the conceptual hydrological and deep learning models using large sample hydrologic data[J]. Journal of Hydrology, 2025, 663:134270.
- [ 6 ] Li Congcong, Cai Yanpeng, Li Zhong, et al. Hydrological response to climate and land use changes in the dry-warm valley of the Upper Yangtze River[J]. Engineering, 2022, 19:24-39.
- [ 7 ] 陈星,余钟波,许钦. 太湖流域典型丘陵区分布式水文模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(1):19-22. ( Chen Xing, Yu Zhongbo, Xu Qin. Distributed hydrological simulation for a typical hilly watershed in Taihu Basin [J]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2012, 40(1):19-22. ( in Chinese ))
- [ 8 ] Jin Chen, Xu Qin, Chen Xing, et al. Enhancing runoff prediction accuracy of deep learning model using baseflow separation method and timestamp information[J]. Journal of Hydrology, 2025, 662:134044.
- [ 9 ] 茹希悦,张洪波,王志辉,等. 河川径流组分的分区异质性与物理影响机制解析[J]. 人民长江, 2025, 56(11):119-130. ( Ru Xiyue, Zhang Hongbo, Wang Zhihui, et al. Regional heterogeneity of river runoff components and underlying physical influence patterns[J]. Yangtze River, 2025, 56(11):119-130. ( in Chinese ))
- [ 10 ] 宋东东,牟舵,王广铭,等. 基于 GPU 的分布式水文模型汇流并行算法研究[J]. 人民珠江, 2025, 46(增刊 1):91-93. ( Song Dongdong, Mu Duo, Wang Guangming, et al. GPU-based parallel algorithm for convergence of distributed hydrological models[J]. Pearl River, 2025, 46(S1):91-93. ( in Chinese ))
- [ 11 ] 芮孝芳. 产流模式的发现与发展[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(1):1-6. ( Rui Xiaofang. The discovery and development of runoff formation models [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(1):1-6. ( in Chinese ))
- [ 12 ] Kim S, Jung S. Estimation of mean water transit time on a steep hillslope in South Korea using soil moisture measurements and deuterium excess [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(4):1844-1857.
- [ 13 ] Fovet O, Ruiz L, Hrachowitz M, et al. Hydrological hysteresis and its value for assessing process consistency in catchment conceptual models [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(1):105-123.
- [ 14 ] Wang Zhaocai, Wang Qingyu, Liu Zhixiang, et al. A deep learning interpretable model for river dissolved oxygen multi-step and interval prediction based on multi-source data fusion [J]. Journal of Hydrology, 2024, 629:130637.
- [ 15 ] 杨卫华,孙文叶,许志欣,等. 水文尺度转换问题的探讨 [J]. 人民珠江, 2016, 37(5):51-53. ( Yang Weihua, Sun Wenye, Xu Zhixin, et al. Research on problem of scale in hydrology [J]. Pearl River, 2016, 37(5):51-53. ( in Chinese ))
- [ 16 ] Giudicianni C, Di Nunno F, Granata F, et al. Pseudo multi-scaling model of intensity-duration-frequency ( IDF ) curves [J]. Journal of Hydrology, 2026, 664:134370.
- [ 17 ] 任立良,江善虎,袁飞,等. 水文学方法的演进与诠释 [J]. 水科学进展, 2011, 22(4):586-592. ( Ren Liliang, Jiang Shanhu, Yuan Fei, et al. Evolution of methodology in hydrology and its explanation [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(4):586-592. ( in Chinese ))
- [ 18 ] 林雍权,陈启慧,李琼芳,等. 基于新安江模型的老挝南俄河流域径流变化贡献率分析 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(3):21-26. ( Lin Yongquan, Chen Qihui, Li Qiongfang, et al. Analysis of contribution rate of runoff variability of Nam Ngum River Basin in Laos based on Xin' anjiang model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3):21-26. ( in Chinese ))
- [ 19 ] 董秀颖,蒋蓉,李舒宝. 水文实验研究的现状与发展探讨 [J]. 水文, 2013, 33(6):21-24. ( Dong Xiuying, Jiang Rong, Li Shubao. Discuss on development of hydrological experimental stations [J]. Journal of China Hydrology, 2013, 33(6):21-24. ( in Chinese ))
- [ 20 ] Feng Fang, Wu Siqu, Feng Qi, et al. Quantification of runoff composition of Aksu River basin in the Tianshan Mountains, northwest China, indicated by stable hydrogen and oxygen isotopes [J]. Journal of Hydrology, 2026, 664:134342.

(下转第 79 页)

- generated by three-dimensional deformable granular landslides[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(11): C11015.
- [21] Umeyama M. Coupled PIV and PTV measurements of particle velocities and trajectories for surface waves following a steady current[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2011, 137(2): 85-94.
- [22] 殷坤龙, 刘艺梁, 汪洋, 等. 三峡水库库岸滑坡涌浪物理模型试验[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2012, 37(5): 1067-1074. (Yin Kunlong, Liu Yiliang, Wang Yang, et al. Physical model experiments of landslide-induced surge in Three Gorges Reservoir [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(5): 1067-1074. (in Chinese))
- [23] Xu Weiya, Lei Jie, Tian Lei, et al. Three-dimensional geomechanics experimental investigation on potential impulse waves generated by Wangjiashan Landslide in Baihetan Reservoir, China[J]. *Physics of Fluids*, 2025, 37(2): 026601.
- [24] Cao Ting, Wang Pingyi, Hu Jielong, et al. Experimental study on the pressure of impulse waves generated by landslides on a bank slope [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 39(9): 1125-1138.
- [25] 熊琨, 何旭然, 王春喜, 等. 用于高精度准直测量的鱼眼相机标定方法[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(2): 202305. (Xiong Kun, He Xuran, Wang Chunxi, et al. Calibration method of fisheye camera for high-precision collimation measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(2): 202305. (in Chinese))
- [26] Adrian R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1991, 23: 261-304.
- [27] 黄波林, 胡刘洋, 李仁江, 等. 水库区低 Froude 数的典型涉水滑坡涌浪缩尺物理模型试验研究: 以王家山滑坡为例[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(8): 1899-1909. (Huang Bolin, Hu Liuyang, Li Renjiang, et al. Scaled experimental study on impulse wave generated by a typical semi-submerged landslide with a low Froude number in reservoir areas: taking Wangjiashan landslide as an example [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(8): 1899-1909. (in Chinese))
- [28] 万立国, 任庆凯, 田曦, 等. PIV 技术及其在两相流测量中的应用[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(12): 463-467. (Wan Ligu, Ren Qingkai, Tian Xi, et al. PIV technique and its application in two-phase flow measurement [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(12): 463-467. (in Chinese))
- [29] 蔡楚江, 沈志刚, 肖昆, 等. 一种高散射率 PIV 实验用示踪粒子的制备[J]. *实验流体力学*, 2005, 19(4): 65-68. (Cai Chujiang, Shen Zhigang, Xiao Kun, et al. The preparation of tracer particles with excellent scattering performance used in PIV experiment [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2005, 19(4): 65-68. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-08-15 编辑: 骆超)

(上接第 36 页)

- [21] 田富强, 胡和平, 雷志栋. 流域热力学系统水文模型: 本构关系[J]. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2008, 38(5): 671-686. (Tian Fuqiang, Hu Heping, Lei Zhidong. Hydrological model of watershed thermodynamic system: constitutive relations [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2008, 38(5): 671-686. (in Chinese))
- [22] Reggiani P, Sivapalan M, Hassanizadeh S M. A unifying framework for watershed thermodynamics: balance equations for mass, momentum energy and entropy, and the second law of thermodynamics[J]. *Advances in Water Resources*, 1998, 22(4): 367-398.
- [23] 梁忠民, 赵建飞, 段雅楠, 等. 微分形式新安江模型[J]. *水科学进展*, 2024, 35(3): 374-386. (Liang Zhongmin, Zhao Jianfei, Duan Ya'nan, et al. Differential-form Xin' anjiang model [J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(3): 374-386. (in Chinese))
- [24] 童冰星, 陈瑜彬, 张潇, 等. 考虑坡面沟流的土壤含水量精细化模拟及应用[J]. *水科学进展*, 2025, 36(3): 493-504. (Tong Bingxing, Chen Yubin, Zhang Xiao, et al. Elaborate simulation of dynamic soil moisture considering gully flow [J]. *Advances in Water Science*, 2025, 36(3): 493-504. (in Chinese))
- [25] 李致家, 邓帆, 张汉辰, 等. 基于遥感土壤湿度数据的分布式水文模型参数联合率定方法[J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2026, 54(1): 1-7. (Li Zhijia, Deng Fan, Zhang Hanchen, et al. Joint calibration method of distributed hydrological model parameters based on remote sensing soil moisture data [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2026, 54(1): 1-7. (in Chinese))
- [26] 何涯舟, 张珂, 晁丽君, 等. 基于多源遥感土壤湿度与模型数据同化的流域径流模拟[J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 145-151. (He Yazhou, Zhang Ke, Chao Lijun, et al. Watershed runoff simulation based on multi-source remotely sensed soil moisture and data assimilation [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 145-151. (in Chinese))
- [27] Liu Yuan, Qin Shujing, Cheng Lei, et al. Parameterization of the generalized complementary principle approach for evaporation using soil moisture measurements [J]. *Journal of Hydrology*, 2026, 664: 134344.

(收稿日期: 2025-10-11 编辑: 俞云利)