

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.03.007

基于径流模数的 LSTM 模型在无资料嵌套流域的应用

石卓¹, 史东华², 姚成¹, 孟涵¹, 张锦堂³

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;

2. 湖北一方科技发展有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 3. 安徽省水文局, 安徽 合肥 230022)

摘要: 针对 LSTM 模型参数在无资料嵌套流域移植效果不佳的问题, 以屯溪流域为研究对象, 以其嵌套子流域为参证流域, 综合考虑面积因素对参数移植法的影响, 建立了基于径流模数的 LSTM 模型(RM-LSTM 模型), 并采用参数移植法进行流域洪水过程模拟。结果表明: RM-LSTM 模型在研究流域应用效果较好, 模拟结果的确定性系数达 0.87, 洪峰、洪量及峰现时间合格率均在 85.0% 以上; 在参证子流域内, RM-LSTM 模型参数移植后模拟结果的确定性系数及洪峰、洪量、峰现时间合格率较 LSTM 模型参数移植结果均有明显提升; RM-LSTM 模型能够更好地考虑流域面积变化对参数移植方法的影响。

关键词: LSTM 模型; 径流模数; 参数移植; 无资料地区; 嵌套流域; 屯溪流域

中图分类号: P338

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)03-0051-07

Application of runoff modulus-based LSTM in ungauged nested watersheds

SHI Zhuo¹, SHI Donghua², YAO Cheng¹, MENG Han¹, ZHANG Jintang³

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Hubei Yifang Science and Technology Development Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

3. Hydrology Bureau of Province, Hefei 230022, China)

Abstract: To address the problem that the parameters of the LSTM model do not transpose well in nested watersheds with inadequate records of hydrological observations, a runoff modulus-based LSTM (RM-LSTM) was developed using the Tunxi Watershed as the study watershed and its nested sub-basins as the reference watersheds, with the consideration of the influence of area factor on the parameter transfer method. The flood simulations in the reference watersheds were carried out using the parameter transfer method. The results showed that the RM-LSTM model was well applied in the study watershed, with a determination coefficient of 0.87 for the simulation results, and a qualification rate of 85.0% or more for flood peak, flood volume and peak present time. In the reference watersheds, the RM-LSTM model showed a marked improvement in terms of the determination coefficient, qualification rate of flood peak, qualification rate of flood volume, and qualification rate of peak time after the parameter transplantation, compared to the results obtained from the LSTM model. The RM-LSTM model can better take into account the influence of watershed area changes on the parameter transfer method.

Key words: LSTM model; run modulus; parameter transfer; ungauged regions; nested watershed; Tunxi Watershed

水文预报是预防洪水灾害的有效手段之一, 然而受到水文站点覆盖率不足的影响, 我国部分地区面临资料短缺难题^[1]。2003 年国际水文科学协会发起了针对无资料或缺资料地区的水文预测及不确定性分析的科学研究计划, 并将无资料或水文观测数据在数据量或质量方面存在不足的流域定义为无资料流域^[2]。自此计划之后, 国内外多位学者围绕无资料流域参数移植方法展开了研究, 其中基于区域化方法的参数移植法为目前较为广泛应用的方法^[3-6]。

参数移植法旨在识别与无资料流域相似的有资料流域并利用该流域资料建立水文模型, 将所建立模型的参数直接移用至无资料流域以实现对该无资料流域的水文预报。流域水文相似性是参数移植法的应用前提, 而嵌套流域间往往具有一定的水文相似性^[7], 因此将嵌套流域率定出的参数移植至嵌套子流域中, 是一

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979070); 安徽省自然科学基金“水科学”联合基金项目(2208085US06)

作者简介: 石卓(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail: 211301010100@hhu.edu.cn

通信作者: 姚成(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水文模型与水文预报研究。E-mail: yaocheng@hhu.edu.cn

引用本文: 石卓, 史东华, 姚成, 等. 基于径流模数的 LSTM 模型在无资料嵌套流域的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 51-57.

SHI Zhuo, SHI Donghua, YAO Cheng, et al. Application of runoff modulus-based LSTM in ungauged nested watersheds[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(3): 51-57.

种在无资料情况下进行洪水预报的有效方法。陈利者等^[8]发现嵌套流域的降雨关系适用于嵌套流域内的任何子流域。Ayalew 等^[9]认为嵌套流域中洪峰与流域面积间存在线性指数关系,并利用最小面积嵌套子流域的实测洪峰对其他嵌套子流域的洪峰进行模拟预测。祝冰洁等^[10]发现嵌套流域间参数移植法可以取得较好的效果。在此基础上,多种传统水文模型及其参数移植方法逐渐被提出^[6,11],但仍存在模型结构复杂、参数复杂及参数率定难等问题^[12-13]。

随着计算机技术的发展,机器学习方法成为了解单个流域乃至全球范围内水文过程的一种有效方法,在径流建模^[14-17]、地下水建模^[18]及水资源管理^[19-20]等方面得到诸多应用,也为无资料地区的水文预报提供了一条有效途径。长短期记忆神经网络(long short term memory, LSTM)是一种具有记忆细胞和门控单元的神经网络^[21],作为机器学习方法的一类分支,该网络因其所具有的学习长期依赖关系的能力,在水文预报研究中得到了广泛应用,逐渐成为研究热点。Kratzert 等^[22]在 2018 年首次将 LSTM 模型应用于日径流预测中,后又于 2019 年进一步将 LSTM 模型应用于美国的 531 个流域,并进行了 *k*-fold 交叉验证,其结果验证了 LSTM 模型在无资料流域洪水预测中的适用性,且获得了优于校准 SAC-SMA 模型和国家水模型的预测结果^[23]。Arsenault 等^[24]将一套先进的依赖于水文模型的区域化方法应用于北美东北部的 148 个流域,并基于交叉验证方法将其表现与 LSTM 模型进行了比较分析,验证了在使用相同可用数据的条件下,LSTM 模型在无资料流域的表现总体上优于水文模型。

水文过程具有很强的尺度化特征^[25],不同空间尺度下的水文过程承载环境和尺度效应均存在一定差异。其中,流域面积是影响参数移植效果的重要因素之一^[26],流域面积变化会引起流域内产汇流影响因素的变化^[27],使参数移植法在面积差异较大的嵌套子流域上应用效果不佳^[11]。如何通过考虑流域面积变化对参数移植法的影响以实现更好的模拟预报已成为无资料流域洪水预报的难点和热点之一。本文通过引入径流模数(runoff modulus, RM)概念(即考虑流域面积因素变化),建立了可以实现无径流资料嵌套子流域洪水过程模拟的 LSTM 模型(RM-LSTM 模型),并将模型应用于屯溪流域及其嵌套子流域,通过模拟结果与实测数据对比分析,研究引入径流模数对 LSTM 模型参数移植结果的影响。

1 研究区域

以安徽省皖南山区的屯溪流域作为研究对象,该流域位于亚热带季风气候区,流域面积为 2 670 km²,降水主要集中在 6—9 月的汛期,多年平均降水量约为 1 800 mm,为典型的中小湿润流域。屯溪流域内嵌套月潭、万安、呈村、新亭和榆村流域。通过分析流域间拓扑关系,发现月潭流域内部嵌套呈村流域,万安流域内部嵌套新亭流域,除基本嵌套关系外,还构成了月潭-呈村嵌套流域和万安-新亭嵌套流域(图 1)。

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

采用美国太空总署(NASA)与国防部国家测绘局(NIMA)联合提供的 90 m 分辨率的 SRTM(shuttle radar topography mission)数据作为实现流域数字化过程的数字高程数据(DEM)。选取屯溪流域及其嵌套子流域的实测洪水资料作为时间序列数据,实测洪水资料主要包括实测径流资料及其对应的实测降雨资料。以屯溪流域 1986—1999 年的 30 场洪水资料作为历史资料进行模型参数训练,其中 1986—1995 年的 18 场洪水资料作为训练集以训练模型,1995—1997 年的 5 场洪水资料作为验证集以选择最优模型,1997—1999 年的 7 场洪水资料作为测试集以进行模拟验证。基于上述设置,将适用于屯溪流域的模型参数直接移用到其嵌套子流域月潭、万安、呈村、新亭和榆村等流域,并将 5 个嵌套子流域的洪水资料全部用于模拟验证,各流域的地貌特征及洪水资料见表 1。

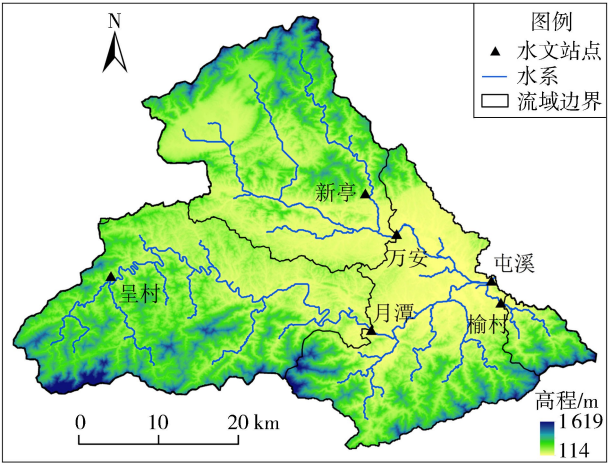


图 1 屯溪流域水系及水文站点分布
Fig.1 Drainage network and locations of hydrological stations of Tunxi Watershed

2.2 研究方法

LSTM 是一种特殊的循环神经网络 (recurrent neural network, RNN)^[21],通过提出门机制(遗忘门、输入门和输出门)并引入细胞状态来解决长期依赖问题。遗忘门用于控制前一个细胞状态的遗忘程度;输出门用于筛选当前细胞状态中所存储的信息;输入门用于决定新信息的吸收;细胞状态用于存储当前信息,并实现信息传递。通过门机制和细胞状态的引入,LSTM 可以有效传递和表达长时间序列中的信息,具有记忆长时间序列中有用信息的能力,并且还可以解决一般 RNN 中普遍存在的梯度消失和梯度爆炸问题。

径流模数亦称单位面积径流率,是流域内单位面积上单位时间内的径流量^[28],与径流量和流域面积密切相关。基于径流模数计算公式^[28]对流量时间序列进行处理获得对应的径流模数,以处理后的时间序列作为预报量,对应降雨时间序列作为预报因子进行 RM-LSTM 模型的训练。

综合考虑洪水资料数据集大小,以降水数据为预报因子,搭建了 LSTM 层数为 1,神经元数为 50,特征值数为 9 的 LSTM 模型,模型的学习率为 0.001,时间步长为 300,采用 Adam 优化算法为权重优化算法,选取 MSE 为误差函数。依据 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》,选取确定性系数(D_c)、洪量相对误差(R_{VE})、峰现时差(R_{TE})、洪峰相对误差(R_{PE})为评价指标,并结合合格率(Q_R)与相关系数(r)对模拟结果进行评价分析。

3 结果与分析

3.1 屯溪流域模拟结果

针对屯溪流域测试集中的 7 场洪水,LSTM 模型和 RM-LSTM 模型均表现较好。LSTM 模型模拟结果的确定性系数介于 0.66~0.90;峰现时差介于-2~6 h,合格率为 85.7%;洪量相对误差介于 9.5%~35.1%,合格率为 71.4%;洪峰相对误差合格率为 71.4%,除 1990622 场次洪水外,其余场次洪水的洪峰误差均介于-8.4%~29.2%。RM-LSTM 模型模拟结果的确定性系数介于 0.76~0.96;峰现时差介于-3~3 h,合格率为 100%;洪量相对误差介于 0.3%~25.0%,合格率为 85.7%;洪峰相对误差介于-4.5%~15.6%,合格率为 100%。LSTM 模型和 RM-LSTM 模型参数对屯溪流域测试集内的场次洪水过程模拟均较好,基本满足精度需求,在屯溪流域具有一定的适用性。

3.2 嵌套子流域模拟结果

为研究径流模数的引入对 LSTM 模型参数移植是否具有影响,对 LSTM 模型和 RM-LSTM 模型在 5 个嵌套子流域上的参数移植结果(表 2)进行对比分析,并对模拟结果的合格率进行统计(表 3)。

表 2 LSTM 模型与 RM-LSTM 模型在嵌套子流域的模拟结果

Table 2 Simulation results in nested watersheds by LSTM model and RM-LSTM model

嵌套子流域	$\bar{D}_c$		$\bar{R}_{VE}/\%$		$\bar{R}_{TE}/h$		$\bar{R}_{PE}/\%$	
	LSTM	RM-LSTM	LSTM	RM-LSTM	LSTM	RM-LSTM	LSTM	RM-LSTM
月潭	0.88	0.87	10.9	9.3	2.1	3.0	15.3	13.8
万安	0.41	0.87	55.1	13.3	3.8	1.5	34.7	18.2
呈村	-5.44	0.79	198.3	8.9	7.3	4.1	95.8	29.8
新亭	-25.47	0.60	406.3	24.5	3.3	4.4	252.6	41.2
榆村	-95.64	0.53	67.4	14.6	8.8	7.5	1388.5	44.5

从确定性系数的角度分析,两个模型参数在月潭流域的模拟结果均达到了乙级预报精度。在万安流域内,LSTM 模型参数表现开始下滑,平均确定性系数仅为 0.41,未达到预报要求;而 RM-LSTM 模型参数的平均确定性系数为 0.87,达到了乙级精度。在与屯溪流域面积差异较大的呈村、新亭和榆村流域,LSTM 模型参数完全失效,而 RM-LSTM 模型参数在这 3 个嵌套子流域上的平均确定性系数则分别为 0.79、0.60 和 0.53。说明径流模数的引入对于 LSTM 模型的参数移植方法产生了一定的影响,使其能够有效适应对面积差异较大的嵌套子流域内洪水过程的模拟。

由表2可知,引入径流模数后,5个测试嵌套子流域模拟结果的平均洪量相对误差和平均洪峰相对误差均有明显降低,说明径流模数的引入能够有效控制洪量误差与洪峰误差,并通过控制洪峰实现对于小面积子流域洪水过程的有效模拟。此外,5个嵌套子流域的平均峰现时差在引入径流模数前后呈现出无规律的变化过程,虽然万安、呈村和榆村流域的平均峰现时差在引入径流模数后均有明显下降,但在月潭流域和新亭流域却呈现出上升趋势。进一步对两个模型的平均峰现时差的变化规律进行对比,发现其变化规律呈现出明显的流域特性,即两个模型参数移植结果的平均峰现时差并不是单纯的随流域面积的减小而增大,而是均呈现出了类似的随流域变化而变化的规律。由此可以推测,虽然径流模数的引入对于峰现时间的模拟存在一定的作用,但峰现时间误差主要还是受流域特性和模型误差影响。

由表3可知,以洪量合格率为参考,LSTM模型在月潭流域达甲级精度,在其他4个嵌套子流域失效;RM-LSTM模型在月潭和呈村流域均达到甲级精度,在万安和榆村均达到乙级精度。以洪峰合格率为参考,LSTM模型在月潭流域达丙级精度,在其他4个嵌套子流域失效;RM-LSTM模型在月潭流域达到了甲级精度,在万安流域达到了丙级精度。同时可以发现,RM-LSTM模型的洪峰合格率随着流域面积的减小,呈现出下降趋势,并且在面积较小的呈村、新亭和榆村流域内,除个别场次洪水外,其余场次洪水的洪峰模拟值均小于实测值。综上,径流模数的引入能够明显提高模拟结果的合格率,但随着流域面积的减小,径流模数对模拟洪峰的影响逐渐减弱。从峰现时间合格率的角度分析,LSTM模型在万安流域达甲级精度,在月潭流域达到乙级精度,在新亭流域达丙级精度;RM-LSTM模型在万安流域达到甲级精度,在月潭流域达到丙级精度。虽然峰现时间合格率总体上也呈现出随流域面积减小而下降的趋势,但明显与流域相关性更高,推测其原因可能是基于屯溪流域资料训练出的模型参数无法很好地模拟嵌套子流域的降雨分布情况,从而无法较好地实现对部分流域内峰现时间的模拟。

表3 模型模拟结果合格率

Table 3 Qualified rates of simulation results

嵌套子流域	洪量合格率/%		洪峰合格率/%		峰现时间合格率/%	
	LSTM	RM-LSTM	LSTM	RM-LSTM	LSTM	RM-LSTM
月潭	86.2	93.1	62.1	82.8	76.2	62.1
万安	3.6	78.6	32.1	60.7	92.9	96.4
呈村	0.0	88.9	0.0	33.3	11.1	38.9
新亭	0.0	42.1	0.0	21.1	68.4	42.1
榆村	0.0	76.7	0.0	6.7	0.0	3.3

进一步统计并分析 RM-LSTM 模型在 5 个测试嵌套子流域内参数移植的应用结果(图2),可知 RM-

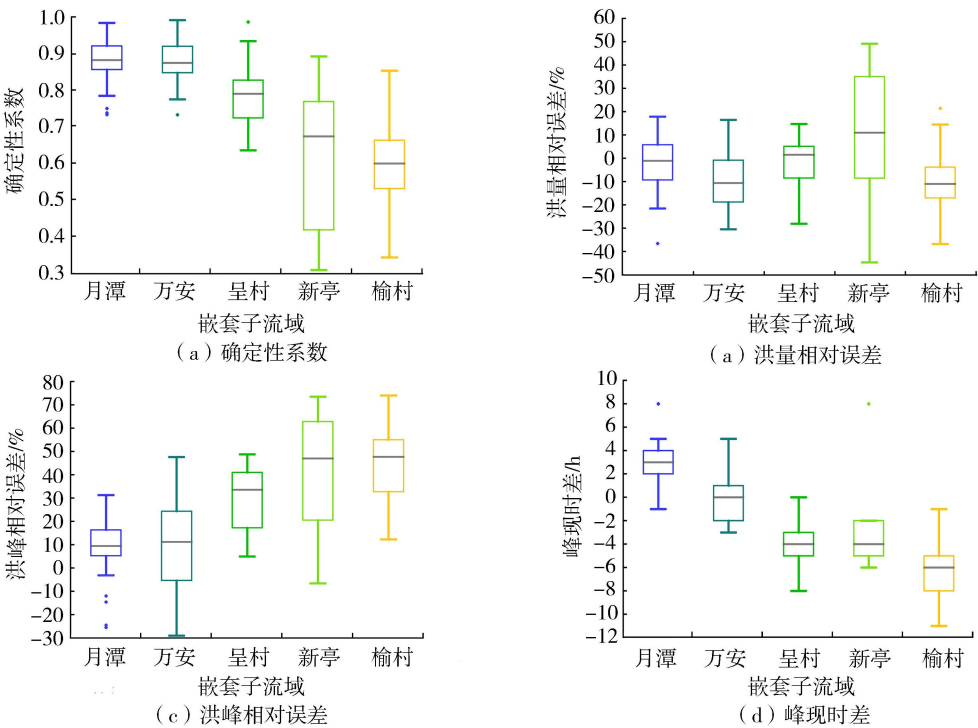


图2 RM-LSTM模型模拟结果统计箱形图

Fig.2 Statistical box plots of flood simulations by RM-LSTM model

LSTM 模型在不同面积大小的子流域内的应用效果总体较好,基本满足要求,但在不同子流域内的表现仍存在一定差异:除洪量相对误差中位数无明显变化规律外,确定性系数中位数呈现出随面积减小而降低的趋势,洪峰相对误差中位数和峰现时差中位数则均呈现出随面积减小而增大的趋势。同时,确定性系数、洪量相对误差、洪峰相对误差以及峰现时差的外限均呈现出随流域面积减小而增大的趋势。月潭和万安流域的确定性系数中位数和洪峰误差中位数基本一致,洪量相对误差中位数和峰现误差中位数也均在可接受范围内,除洪峰相对误差外限差异较大外,两个流域的确定性系数外限、洪量相对误差外限以及峰现误差外限均较为接近,而面积较小的呈村、新亭和榆村流域的中位数和外限则变化明显。综上,在面积较大的子流域内 RM-LSTM 模型表现较为稳定且模拟精度较高,而在试验流域面积差异大的小面积子流域内则表现相对欠佳,并且模拟精度随流域面积的减小而降低,同时随着流域面积的减小,流域面积变化对于模拟精度的影响逐渐增大。

3.3 讨 论

从 RM-LSTM 模型参数移植后的应用情况可以看出,该方法在参证流域的应用效果虽总体较好,但在子流域面积差异较大的情况下,面积变化对模拟精度仍存在较为明显的影响。为进一步研究 RM-LSTM 模型参数在面积差异较大的小面积嵌套子流域上表现不佳以及径流模数影响减弱的原因,对屯溪流域内的月潭-呈村嵌套流域和万安-新亭嵌套流域内洪水过程的模拟值和实测值进行进一步分析。通过对月潭-呈村嵌套流域和万安-新亭嵌套流域内同时段洪水过程的模拟结果及实测值的对比分析可以看出,流域调蓄作用是影响 RM-LSTM 模型参数移植效果的主要因素。以万安-新亭嵌套流域内的 19960624 场次洪水、19970709 场次洪水和月潭-呈村嵌套流域内的 19950520 场次洪水、19990521 场次洪水为例(图 3),分析其洪水过程。同时段内的小面积流域出口断面洪水过程与大面积流域出口断面洪水过程整体相似,但大面积流域内的洪水过程汇流时间长,对降水较不敏感,峰形平缓,坦化作用强;小面积流域内的洪水过程汇流时间短,对降水敏感,

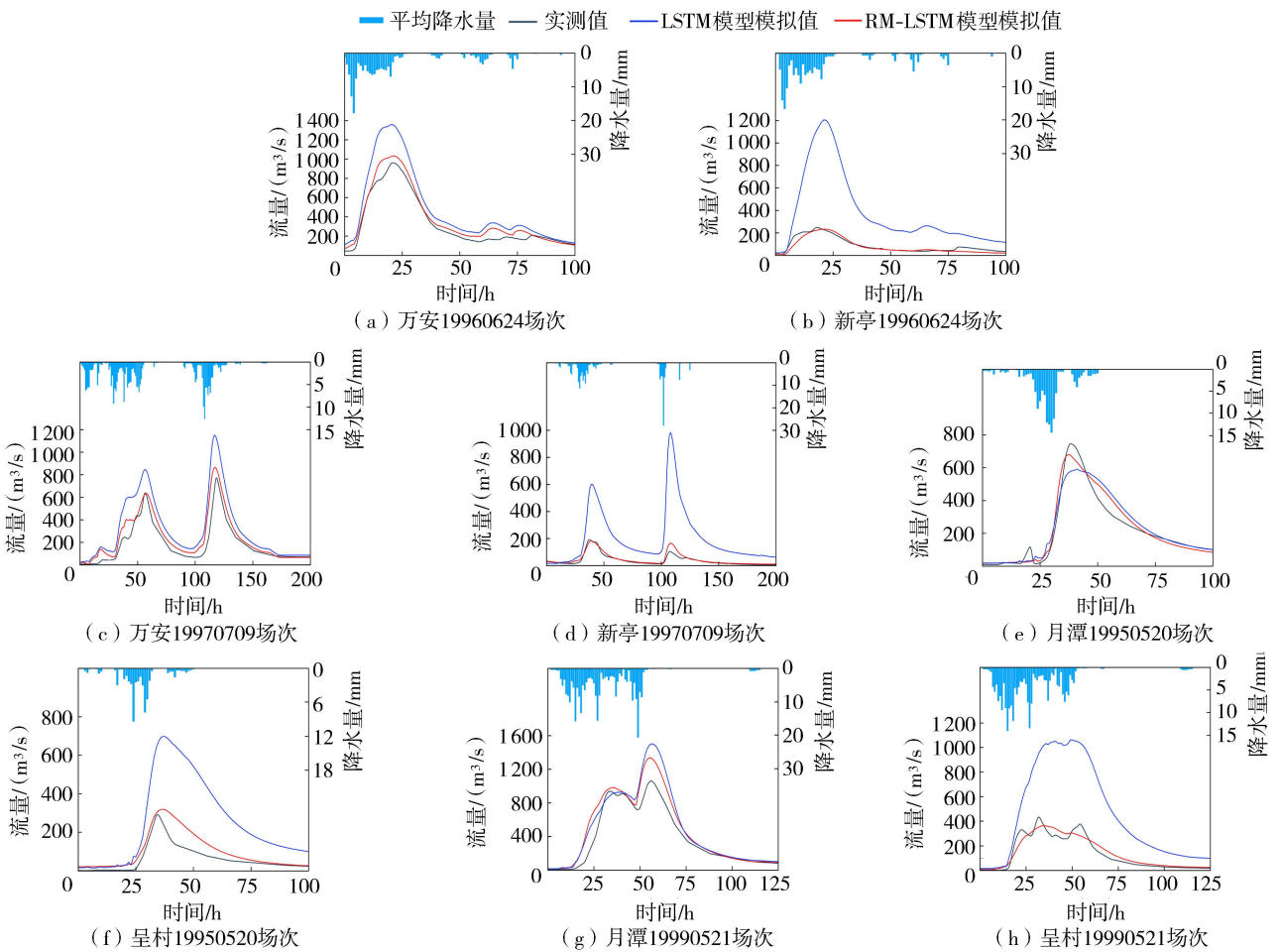


图3 万安-新亭嵌套流域与月潭-呈村嵌套流域模拟洪水过程线

Fig.3 Simulated flood hygrograph in the Wan'an-Xinting nested watershed and the Yuetan-Chengcun nested watershed

峰形尖瘦,存在复式洪峰,流域调蓄能力弱。观察月潭-呈村嵌套流域和万安-新亭嵌套流域内的其他场次洪水过程,可以发现相似规律。

由图3可知,LSTM模型和RM-LSTM模型参数在适应调蓄能力的变化,实现对复式洪峰模拟的能力上有所欠缺。分析其原因可能在于LSTM模型和RM-LSTM模型虽学习了屯溪流域的洪水过程,却缺乏对流域调蓄能力随流域面积减小而降低这一知识的学习,使其虽能够通过径流模数的引入让RM-LSTM模型适应不同面积条件下的洪峰及洪量变化,但仍然以屯溪流域的产流模式进行参证子流域的洪水过程模拟,从而无法在面积差异较大的小面积嵌套子流域上获得更好的模拟效果。

为进一步验证分析结果的合理性,计算了各流域模拟结果的确定性系数、洪量相对误差、洪峰相对误差及峰现时差与实测峰值 $Q_{\max}$ 之间的相关系数(表4),分析RM-LSTM模型参数移植结果相关性

由表4可知,5个嵌套子流域模拟结果的确定性系数与对应实测峰值大小的相关系数随子流域面积的减小而减小,由低度线性

正相关逐渐转变为低度线性负相关。说明对于面积较大的子流域,基于径流模数的参数移植方法能够较好地实现对测试子流域内极端峰值的预测,但随着测试嵌套子流域面积的减小,该方法对于极端峰值的模拟能力逐渐减弱。从相对洪量误差与对应实测峰值的相关性角度分析,屯溪、月潭、万安及呈村流域模拟结果均不存在线性相关,而在面积较小的新亭和榆村流域内则呈现出弱相关性。同时,绝对洪峰误差与实测峰值大小的相关系数明显呈现出随流域面积减小而增大的趋势,在呈村和新亭流域呈现出弱相关性,在榆村流域内表现出显著相关性。综上,随着嵌套子流域面积的减小,坦化作用对于参数移植模拟结果的影响越来越大,使模型对于洪峰及洪量的模拟能力逐渐减弱。此外,各嵌套子流域模拟结果的绝对峰现误差与对应实测峰值大小的相关系数无明显变化规律,但在新亭和榆村流域呈现出低度相关,说明随着坦化作用影响的增强,模型参数对于峰现时间的预测能力也逐渐受到了一定的影响。因此,为更好地实现对面积差异较大的子流域内洪水过程的模拟,需要增强LSTM模型对洪水产生机制的学习或者增加能够有效调节调蓄作用的参数。

4 结 论

- a. 径流模数的引入可以有效帮助LSTM模型更好地应对面积因素变化所带来的影响,从而能够实现对不同面积大小嵌套子流域内洪水过程的模拟,并提升参数移植的模拟精度。
- b. 采用RM-LSTM模型,可以较好地实现屯溪嵌套流域出口断面的洪水过程模拟,基本满足精度要求,验证了RM-LSTM模型在无资料或缺资料地区洪水过程模拟预报领域的适用性,为实现缺资料或无资料地区的洪水过程模拟提供了一种新途径。
- c. 使用RM-LSTM模型进行参数移植在面积差异较大的小面积嵌套子流域内的应用效果相对较差,可能是因为随着流域面积的减小,坦化作用的影响逐渐增大,仅考虑面积因素的RM-LSTM模型无法较好地应对调蓄能力变化所带来的影响,故需要增加对于洪水产生机制进行调节的参数以实现对此方法的进一步改进。

参考文献:

[1] 刘志雨,刘玉环,孔祥意. 中小河流洪水预报预警问题与对策及关键技术应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):1-6. (LIU Zhiyu, LIU Yuhuan, KONG Xiangyi. Problems, strategies and key technology research of flood forecasting and early warning for small and medium-sized rivers [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 1-6. (in Chinese))

[2] IVAPALAN M, TAKEUCHI K, FRANKS S W, et al. IAHS decade on predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences[J]. Hydrological Sciences Journal, 2003, 48(6): 857-880.

[3] GUO Yuhan, ZHANG Yongqiang, ZHANG Lu, et al. Regionalization of hydrological modeling for predicting streamflow in ungauged catchments: a comprehensive review[J]. WIREs Water, 2020, 8(1): e1487.

[4] GONG J, YAO C, LI Z, et al. Improving the flood forecasting capability of the Xin'anjiang model for small-sized and medium-sized ungauged catchments in South China[J]. Natural Hazards, 2021, 106(3): 2077-2109.

- [5] XU Z, WU Z, SHAO Q, et al. A two-step calibration framework for hydrological parameter regionalization based on streamflow and remote sensing evapotranspiration[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 613:128320.
- [6] 姚成, 邱桢毅, 李致家, 等. API 模型和新安江模型的参数区域化研究与应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(3):189-194. (YAO Cheng, QIU Zhenyi, LI Zhijia, et al. Parameter regionalization study and application of API model and Xin'anjiang model[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, 47(3):189-194. (in Chinese))
- [7] 刘利峰. 基于地形指数的蔡家川流域水文相似性研究[D]. 北京:北京林业大学, 2006.
- [8] 陈利者, 李致家, 李巧玲, 等. 我国降雨径流关系的区域规律研究[J]. *水力发电*, 2014, 40(3):8-11. (CHEN Lizhe, LI Zhijia, LI Qiaoling, et al. Study on hydrological similarity and parameter transplantation of datalessnested watershed[J]. *Water Power*, 2014, 40(3):8-11. (in Chinese))
- [9] AYALEW T B, KRAJEWSKI W F, MANTILLA R, et al. Can floods in large river basins be predicted from floods observed in small subbasins? [J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2017, 11(3):331-338.
- [10] 祝冰洁, 阚光远, 何晓燕. 无资料嵌套流域水文相似性及参数移植研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2020, 18(3):223-231. (ZHU Bingjie, KAN Guangyuan, HE Xiaoyan, et al. Study on hydrological similarity and parameter transplantation of datalessnested watershed[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2020, 18(3):223-231. (in Chinese))
- [11] 盛奕华, 衣学军, 黄迎春, 等. 基于多流域同步率定的 HBV 模型参数移植方法研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021, 460(2):66-70. (SHENG Yihua, YI Xuejun, HUANG Yingchun, et al. Parameter transfer based on simultaneous calibration of the HBV model[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021, 460(2):66-70. (in Chinese))
- [12] 李巧玲, 马亚楠, 李致家, 等. 无资料小水库影响下的中型水库入库洪水模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(3):213-219. (LI Qiaoling, MA Yanan, LI Zhijia, et al. Inflow flood simulation of medium reservoirs under impact of ungauged small reservoirs[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(3):213-219. (in Chinese))
- [13] 石朋, 陆美霞, 吴洪石, 等. 不同优化算法在新安江模型参数率定中的效果评估[J]. *水资源保护*, 2023, 39(4):19-25. (SHI Peng, LU Meixia, WU Hongshi, et al. Evaluation of different optimization algorithms in parameter calibration of Xin'anjiang model [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4):19-25. (in Chinese))
- [14] LIU M, HUANG Y, LI Z, et al. The applicability of LSTM-KNN model for real-time flood forecasting in different climate zones in China[J]. *Water*, 2020, 12(2):440.
- [15] YONGEN L, DAGANG W, GUILING W, et al. A hybrid deep learning algorithm and its application to streamflow prediction [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 601:126636.
- [16] FANG K, KIFER D, LAWSON K, et al. The data synergy effects of time-series deep learning models in hydrology[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(4):e2021WR029583.
- [17] 田烨, 谭伟丽, 王国庆, 等. LSTM 变体模型在径流预测中的性能及其可解释性[J]. *水资源保护*, 2023, 39(3):188-194. (TIAN Ye, TAN Weili, WANG Guoqing, et al. Performance of variant LSTM models in runoff prediction and their interpretability [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(3):188-194. (in Chinese))
- [18] JEONG J, PARK E. Comparative applications of data-driven models representing water table fluctuations [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 572:261-273.
- [19] KARIMI H S, NATARAJAN B, RAMSEY C L, et al. Comparison of learning-based wastewater flow prediction methodologies for smart sewer management[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 577:123977.
- [20] 任立良, 王宇, 江善虎, 等. 基于 GRACE 和 GRACE-FO 的黄河流域陆地水储量及影响因素分析[J]. *水资源保护*, 2022, 38(4):26-32. (REN Liliang, WANG Yu, JIANG Shanhu, et al. GRACE and GRACE-FO-based terrestrial water storage and its influencing factor analysis of the Yellow River Basin[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(4):26-32. (in Chinese))
- [21] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory [J]. *Neural Computation*, 1997, 9(8):1735-1780.
- [22] KRATZERT F, KLOTZ D, BRENNER C, et al. Rainfall-runoff modelling using long short-term memory (LSTM) networks[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(11):6005-6022.
- [23] KRATZERT F, KLOTZ D, HERRNEGGER M, et al. Toward improved predictions in ungauged basins: exploiting the power of machine learning[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(12):11344-11354.
- [24] ARSENAULT R, MARTEL J L, BRUNET F, et al. Continuous streamflow prediction in ungauged basins: long short-term memory neural networks clearly outperform traditional hydrological models[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2023, 27(1):139-157.
- [25] 孙周亮, 刘艳丽, 舒章康, 等. 水文相似理论研究进展[J]. *水利水电工程学报*, 2023(3):155-164. (SUN Zhouliang, LIU Yanli, SHU Zhangkang, et al. Review of the theories of hydrological similarity[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(3):155-164. (in Chinese))
- [26] 马珊. 河南省无资料地区产流特性及参数区域化研究[D]. 大连:大连理工大学, 2019.
- [27] 尤烽骅. 黄土丘陵沟壑区流域生态水文特征及其尺度效应[D]. 长安:长安大学, 2022.
- [28] 河海大学《水利大辞典》编辑修订委员会. 水利大辞典[M]. 上海:上海辞书出版社, 2015.