

基于 VIC 模型的柳江流域分布式水文模拟与应用

汪伟, 方秀琴, 杜晓彤, 吴陶樱, 吴小君

(河海大学 地球科学与工程学院, 南京 211100)

摘要:为了更好地为西江流域水资源合理规划与利用提供科学的依据,利用分布式水文模型 VIC(Variable Infiltration Capacity, VIC)模型对柳江流域水文气象要素的时空分布进行了模拟研究,并以 Nash-Sutcliffe 效率系数(NS)、相对偏差(BIAS)、相关性系数(r)为目标函数并结合实测流量进行了验证。在 VIC 模型的输出文件中提取了降水、蒸散发、地表径流、地下基流 4 个水文要素,同时使用 Mann-Kendall 趋势性检验方法对这 4 个要素的变化趋势进行了逐网格的计算。结果表明:在日尺度上,验证期和率定期的 NS, r 基本上都达到或超过 0.7, BIAS 均为 10%左右;在月尺度上,前两个指标均达到了 0.85 以上, BIAS 为 7%左右。空间上,柳江流域所有网格的水量平衡相对误差均不超过 1.2%。柳江流域 24%以上面积的蒸散发、48%以上面积的降水、71%以上面积的地表径流都有显著增加趋势,而地下基流则整体无明显变化趋势。研究结果表明无论是时间上还是空间上, VIC 模型在柳江流域都表现出较为良好的适用性。

关键词: VIC 模型; 柳江流域; Mann-Kendall 检验

中图分类号: TV121

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)03-0328-08

Distributed Hydrological Simulation and Application in Liujiang River Basin Based on VIC Model

WANG Wei, FANG Xiuqin, DU Xiaotong, WU Taoying, WU Xiaojun

(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to provide scientific basis for rational planning and utilization of water resources in Xijiang River Basin, the distributed hydrological model VIC (Variable Infiltration Capacity) was used to simulate the temporal and spatial distribution of hydrological processes in the Liujiang River Basin. The Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NS), relative deviation (BIAS), and correlation coefficient (r) were selected as the objective functions for calibrating and validating the parameters of VIC. The results showed that for the daily simulation, the values of NS and r were mostly greater than 0.7, and the values of BIAS were all less than 11%; for the monthly simulation, NS and r were both greater than 0.85, and BIAS was about 7%; spatially, the relative error of water balance for all the grids in the Liujiang River basin were less than 1.2%. Finally, the precipitation, actual evapotranspiration, surface runoff and underground runoff in the Liujiang River Basin were extracted according to the outputs of VIC model, and the change trends of these four factors were analyzed by using Mann-Kendall trend test method. The results showed that precipitation in over 48% of the basin area, evapotranspiration in over 24% of the basin area and surface runoff in over 71% of the basin area presented the increasing trend in Liujiang River Basin. However, the base flow has no obvious change trend on the whole. All the above results indicate the VIC model has the good performance at temporal and spatial scales in the Liujiang River Basin.

Keywords: VIC model; Liujiang River Basin; Mann-Kendall test

收稿日期: 2019-06-27

修回日期: 2019-08-12

资助项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFA0601500)

第一作者: 汪伟(1995—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要从事分布式水文模型研究。E-mail: 1115623959@qq.com

通信作者: 方秀琴(1978—), 女, 安徽池州人, 副教授, 主要从事地表参数遥感反演、分布式水文模型及山洪灾害防治研究。E-mail: kinkinfang@hhu.edu.cn

水文模型是为了模拟水循环过程而构建的。水文模型通常分为集总式水文模型^[1]和分布式水文模型^[2-4],前者的代表性模型有NAM(丹麦语,“降雨径流模型”的缩写)模型和新安江模型,后者的代表模型则有TOPMODEL(Topographic Hydrologic Model)模型^[5]、SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型^[6]、DHSVM(Distributed Hydrology Soil Vegetation Model)^[7]模型以及VIC(Variable Infiltration Capacity)模型等。得益于计算机技术的不断发展进步,将下垫面划分为大量网格的分布式水文模型具有充分考虑流域内降雨和土地覆盖在空间上分布的不均匀性特点,因此相较于用单纯物理参数来描述水文过程变化的集总式水文模型而言,分布式水文模型可以充分描述流域内降雨和下垫面要素的空间变化对径流产生的影响,从而在水文模拟过程中更具优势。除此以外,分布式水文模型还更容易与GIS(Geographic Information Science)、RS(Remote Sensing)相结合。随着GIS与RS技术的不断进步,分布式水文模型的基础数据来源更加的广泛也更加可靠,从而能更好的描述客观世界水文物理过程。

柳江是珠江水系西江的第二大支流,汛期流域内洪水灾害发生较为频繁。但由于研究区研究资料的限制以及其他原因,目前针对柳江流域的水文水资源方面的研究相对较少。因此针对柳江流域的水文物理研究对于柳江流域的水资源管理、洪水灾害防治均具有十分重要的意义^[7-9]。李泽锋等利用收集到的水文、气象资料对柳江流域不同时间尺度的降雨径流利用支持向量机模型进行了模拟分析^[10]。刘欢等基于Green-Ampt模型量化空气阻力的影响,同时结合分布式水文模型WEP-L模型对柳江流域径流进行了模拟^[11],结果表明:通过量化空气阻力的影响能够改善柳江流域的水文模拟效果,但改善效果不够显著。本研究结合现有观测资料,利用分布式水文模型VIC模型对柳江流域水文物理过程进行模拟,探索分布式水文模型(VIC模型)在柳江流域的适用性,为柳江流域水资源管理、洪水灾害的防治提供参考依据。

1 研究区概况

柳江流域地处东经 $107^{\circ}30'$ — $111^{\circ}15'$,北纬 $24^{\circ}25'$ — $27^{\circ}10'$,流域面积约 5.7 万 km^2 ,横跨湘、桂、黔三省。柳江发源于贵州省独山县,河流全长约 77 km,其主要支流有寨嵩河、古宜河、金城江、龙江、都柳江等。柳江水系属于树枝型流域,上游河道滩多且河水湍急,中下游水势较上游相对平缓。

柳江流域地势整体上为呈现西北高而东南低(图1),上游除河源地区大多属于变质岩组成的峡谷地形为

主,海拔多在 $1\ 000$ m以上;中下游以喀斯特地貌为主,山地、丘陵的占比较大,平均海拔高度为 $500\sim 1\ 000$ m,耕地集中,人口稠密。柳江流域年平均气温为 $17\sim 20^{\circ}\text{C}$,年降雨量在 $1\ 200\sim 1\ 800$ mm,降水时空分布极不均匀;在时间上主要集中在 $4\text{—}9$ 月,占全年的 70% 以上;空间上,流域降水呈现出东南高而西北低的趋势。

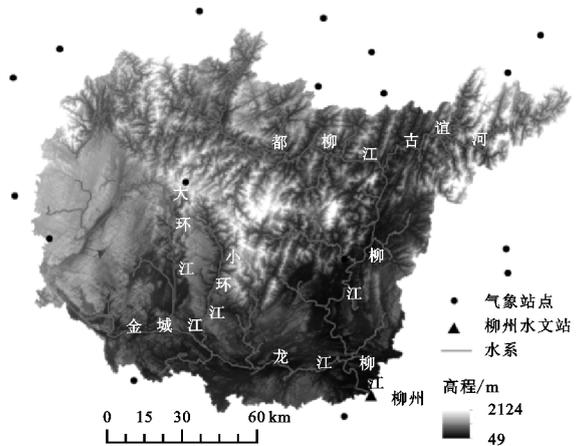


图1 柳江流域及其主要支流分布

2 模型和数据

2.1 VIC模型

VIC模型是基于物理机制的分布式水文模型,由Wood^[12]等在1992年提出,经梁旭等人^[13-14]改进。由VIC-2L模型逐渐发展到如今普遍采用的VIC-3L模型。相较于其他水文模型,VIC模型的主要特点^[15]有:(1)能够同时进行陆—气间能量平衡以及水量平衡的模拟。通过全局参数文件的参数设置可以自由决定是否开启能量平衡模拟,从而弥补了传统水文模型对能量交换过程描述的不足;(2)利用土壤下渗能力参数 B 来描述次网格内土壤的不均匀性对产流的影响;(3)产流过程的计算方式与新安江模型相同,同时考虑两种产流机制(蓄满产流和超渗产流)。除此以外,VIC模型代码开源,易于做模型的改进与发展。

VIC模型由陆面过程模型和汇流模型组成。陆面过程模型将研究区划分为若干大小相同的网格(本研究将柳江流域划分为 676 个网格),将每个网格对应的理化性质数据,作为驱动VIC模型的输入数据。VIC模型采用新安江模型的产流计算方式;假设上层土壤蓄水能力在模型网格单元内或者研究区域内变化,土壤蓄水能力的空间变化主要是土层的深度和土壤特性的各向异性产生的,土壤蓄水能力的空间变化特性表示如下^[16-17]:

$$i = i_m [1 - (1 - C)^{1/b}] \quad (1)$$

式中: i 为网格的土壤蓄水能力; i_m 为最大土壤蓄水能力; C 为土壤蓄水能力小于或者等于 i 部分的面积比例; b 为土壤蓄水能力形状特征参数,是土壤蓄水能力空间

变化的表征,可以表示土壤特性的空间变异性。

VIC 模型对基流的描述采用的是 ARNO 模型^[18],默认基流是发生在最下层土壤中。各土层间的水汽通量服从达西(Darcy)定律从而计算出基流。其计算公式为:

$$R_b = \begin{cases} \frac{D_s D_m}{W_s W_2^c} W_2^- & 0 \leq W_2^- \leq W_s W_2^- \\ \frac{D_s D_m}{W_s W_2^c} W_2^- + \left(D_m - \frac{D_s D_m}{W_s} \right) \left(\frac{W_2^- - W_s W_2^c}{W_2^- - W_s W_2^c} \right)^2 & W_2^- \geq W_s W_2^c \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_b 为基流; D_m 为最大基流; D_s 为 D_m 的一个比例系数; W_2^c 为下层土壤的最大含水量; W_s 为 W_2^c

表 1 VIC 模型输入数据

数据类型	数据来源	数据内容	分辨率
数字高程数据(DEM)	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)	SRTMDem 数字高程数据	90 m
气象驱动数据	中国气象数据网(https://data.cma.cn/)	全国 699 个气象站点的 70a 日值气象数据集	点数据
实测径流数据	柳州水文站	1981—1989,2007—2011 年逐日流量	日值
土地覆盖数据	马里兰大学土地覆盖数据集	全球土地覆盖数据集	1 km
土壤性质数据	寒区旱区科学中心(http://westdc.westgis.ac.cn/)	基于世界土壤数据库中国土壤数据集	5 km

针对不同的数据类型有不同的数据处理原则,分别为:

(1) 气象驱动数据:选取在柳江流域周围 20 个站点(图 1)的降水、最高气温、最低气温、风速 4 个气象要素,同时使用 IDW(Inverse Distance Weighted)插值方法得到柳江流域各个网格的气象数据,所得出数据作为运行 VIC 模型的气象输入数据。

(2) 土地覆盖数据:统计网格内所有的土地覆盖类型,计算网格内每一种土地覆盖类型占比,同时附

的一个比例系数,满足 $D_s \leq W_s$; W_2^- 为下层土壤计算时段开始时的土壤水分含量。

汇流模型^[19]则是以陆面过程的输出数据作为输入数据,使用单位线文件进行坡面汇流,使用线性圣维南方程来进行河网汇流。其汇流方案是先演后合,即假设每个网格的产流量对流域出口径流量的贡献相互独立,先计算每个网格到流域出口断面的流量过程,然后叠加,最终得到流域的模拟径流。

2.2 数据

VIC 模型所需的原始输入数据及其描述见表 1,所有原始数据均通过 ArcMap 平台重采样为应用在柳江流域的模型分辨率 $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$ 。

上该网格内每一种类型土地覆盖的理化性质数据。由图 2A 可知柳江流域的主要土地覆盖类型为草地、林地和耕地。

(3) 土壤性质数据:其数据处理的原则与土地覆盖数据大致相同。主要区别是根据流域网格的划分,在流域内任意一个网格内若该类土壤占比最大,则使用该类土壤的理化性质代表该网格的所有土壤理化性质。由图 2B 可知柳江流域的土壤类型以黏土、壤土和粉质壤土为主。

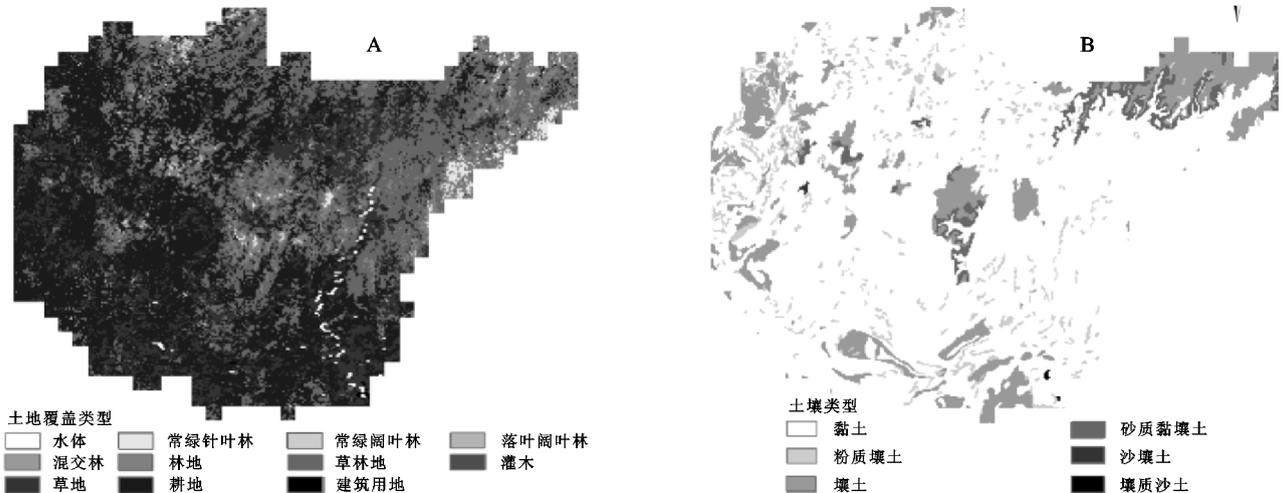


图 2 柳江流域土地覆盖和土壤性质数据

3 结果与分析

3.1 参数率定

本研究将柳江流域 VIC 模型的模拟过程划分为

率定期和验证期两个阶段。其中 1981—1989 年设为模型的率定期,2007—2011 年为模型验证期。选取 3 个目标函数^[20]作为评价 VIC 模型在柳江流域径流模拟效果的评价指标,分别是 Nash—Sutcliffe 效率系

数(NS)^[21-22]、相关性系数(r)以及相对偏差(BIAS),目标函数的具体计算公式见表 2。

其中 NS 通过对比在日尺度和月尺度上模型模拟径流量与实际径流量的差异来反映本次模拟过程的效果,其值越接近 1 表明本次模拟拟合程度越好。 r 用来评价模拟径流量与实测径流量之间的相

关性,其值越接近于 1 表示模型模拟的数据越接近实测径流数据。BIAS 用来描述模型模拟径流量与实际径流量在总量上的相似程度,其值越接近于 0,表明模型模拟的径流量越接近于实际径流量。以上 3 个评价指标分别从不同的角度对模型模拟效果进行评价。

表 2 模拟效果评价指标及其公式

评价指标名称	公式
Nash-Sutcliffe 效率系数(NS)	$NS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - \overline{Q_o})^2 - \sum_{i=1}^n (Q_{i,c} - Q_{i,o})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - \overline{Q_o})^2}$
相关性系数(r)	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - \overline{Q_o})(Q_{i,c} - \overline{Q_o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - \overline{Q_o})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{i,c} - \overline{Q_o})^2}}$
相对偏差(BIAS)	$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{i,c} - \sum_{i=1}^n Q_{i,o}}{\sum_{i=1}^n Q_{i,o}} \times 100\%$

式中: $Q_{i,c}$ 为第 i 天的日模拟径流量的值;对应的 $Q_{i,o}$ 是第 i 天的日实测径流量的值; n 为模拟历时总天数; $\overline{Q_o}$ 为实际日径流量的均值, $\overline{Q_c}$ 为模拟日径流量均值。

本研究通过编写 matlab 脚本的方式完成 VIC 模型的参数率定和验证工作。主要思路如下:将 VIC 模型的 6 个参数($B, D_s, D_m, W_s, d_2, d_3$)设置成待率定的变量,确定好待率定参数所有可能的组合方式,作为输入参数按照每种组合方式生成 VIC 模型土壤参数文件。土壤参数文件生成后调用 VIC 模型源程序生成陆面过程结果文件。将该次结果文件作为输入文件运行汇流模型源程序,最终产生该次参数组合

方式的径流量模拟结果,将该次径流结果数据与实际径流数据通过目标函数进行比较,记录每次模拟的目标函数结果,寻找目标函数最优值,直到所有的参数组合方式都运行完毕。本研究采用 Rosenbrock^[23]法来进行模拟,即每次只划定一个参数的范围,同时确定其参数变化步长,剩余 5 个参数用唯一值代替,模拟过程不变,直到所有的参数都率定完毕。柳江流域 VIC 模型参数率定结果见表 3。

表 3 VIC 模型率定的参数物理意义及其取值

参数名(单位)	物理含义	模型率定期参数范围	最优值
B	可变下渗曲线指数	[0.01,0.5]	0.35
D_s	非线性基流开始时基流值与最大基流的比值	[0.001,1]	0.07
$D_{max}(mm/h)$	最大基流流速	[0,40]	37
W_s	下层土壤最大含水量比例系数	[0.2,0.9]	0.31
$D_2(m)$	第二层土壤厚度	[0.1,0.5]	0.23
$D_3(m)$	第三层土壤厚度	[0.1,0.5]	0.31

3.2 模型模拟结果

3.2.1 基于流域断面的模拟效果分析 表 4 给出了柳江流域 VIC 模型在日、月两个时间尺度上的率定期和验证期模拟结果。在日尺度上,率定期内的 NS, r 分别为 0.74,0.86,均超过了 0.7。在径流量上的相对偏差 BIAS 为 0.10。验证期内的 NS, r 分别为 0.70,0.80,均达到或者超过了 0.70,相对偏差 BIAS 为 0.06。虽然较率定期的模拟效果均有不同程度的下降,但在径流量上的模拟甚至要优于率定期的 BIAS 的值,且达到了 NS>0.5

同时 BIAS 的绝对值小于 0.15 的要求,说明柳江流域 VIC 模型的模拟效果符合预期结果。在月尺度上无论是率定期还是验证期,对比日尺度的模拟结果,其模拟效果均要优于日尺度。其中率定期的 NS, r 分别为 0.86,0.93,而在径流量上则和日尺度的模拟效果相差不多,BIAS 的值为 0.10。而在验证期内月尺度的模拟效果与率定期相差不多,NS 出现了小幅上涨,为 0.89,而相关性系数和相对偏差出现了小幅下降趋势,其值分别为 0.93,0.07。

表 4 柳江流域模拟结果

计算时段	效率系数(NS)		相关性系数(r)		相对偏差(BIAS)	
	日尺度	月尺度	日尺度	月尺度	日尺度	月尺度
率定期	0.74	0.86	0.86	0.93	0.10	0.10
验证期	0.70	0.89	0.80	0.93	0.06	0.07

图 3 和图 4 是在日尺度和月尺度上柳江流域模拟和实测流量散点图,从这四张图中可以看出不管是率定期还是验证期,绝大部分的散点均比较均匀分布在对称线的两侧,但是在日尺度流量模拟过程(图 3)中,不管是率定期还是验证期,都有零星几个散点位于偏左上的位置,说明在日尺度流量模拟过程中 VIC

模型对于洪峰的峰值模拟偏小,但总体上还处于比较均匀的分布状态。而在月尺度流量模拟过程(图 4)中,率定期散点分布较为集中且总体处于对称线偏下一点位置说明月尺度模拟径流量稍稍偏大。验证期的散点分布稍显分散但总体均匀处在对称线的左右两侧,这也与图 3 中的数据结果相一致。

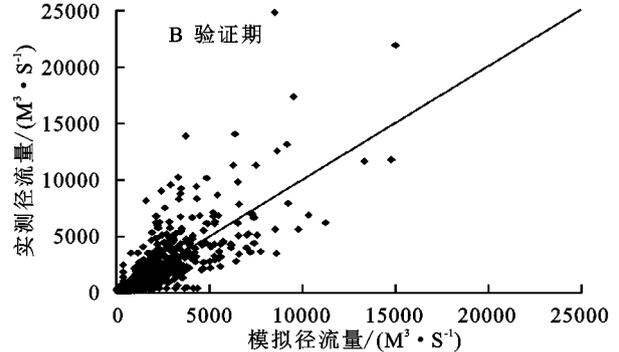
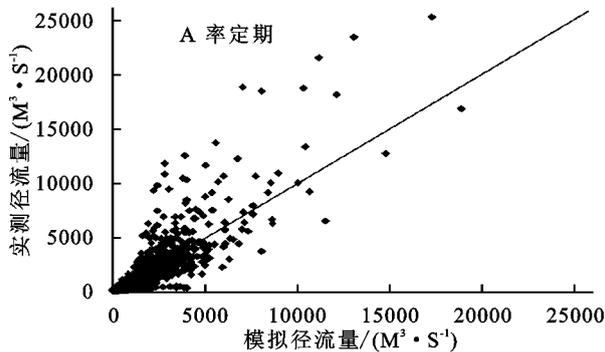


图 3 柳州站实测与模拟日流量散点图

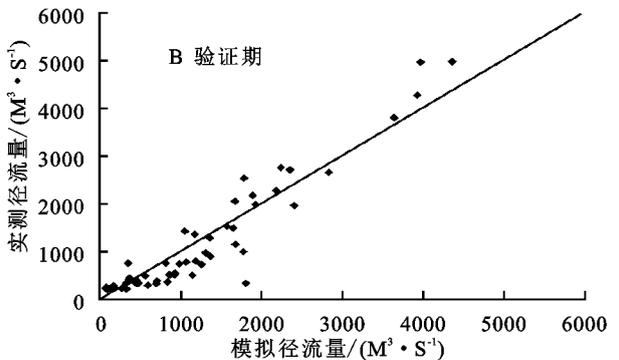
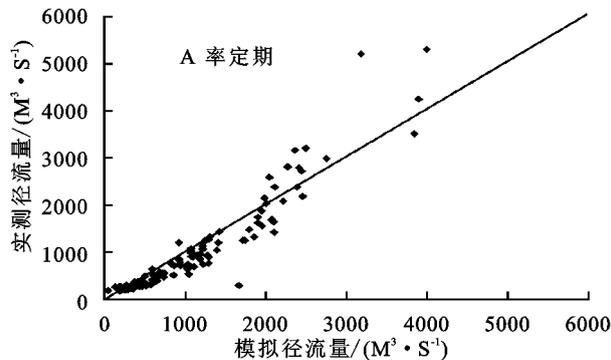


图 4 柳州站实测与模拟月流量散点图

图 5 和图 6 为柳州站率定期和验证期模拟与实测日值流量过程线对比图。从图中我们可以看出,无论是率定期还是验证期,VIC 模型都能较好的模拟出柳江流域实测径流过程线,尤其是洪峰出现时间和退水时间以及秋冬季节枯水期水量的模拟,都基本与实测径流过程保持一致。在图上可以清楚看出“1988.8”大洪水灾害的时间变化过程。但是在洪峰流量的模拟上,VIC 模型模拟的数值都出现了不同程度的偏低,这与上文图 3 散点图的日流量模拟过程中 VIC 模型对于洪峰的峰值模拟偏小的结论相一致。这可能与模型本身参数的局限性以及所收集的气象资料的局限性有关。此外无论是在率定期还是验证期,在模拟时段刚开始的时候都出现了模拟径流量的值要远大于实测径流量的值,此后随着时间的推移又快速恢复的情况。这可能是由于模拟过程中出现的“边缘效应”所导致的。

3.2.2 基于网格的流域模拟效果分析 利用 VIC 模型的输出参数文件,本研究提取了率定期模拟过程输出文件中的 4 个要素(包括多年平均降水(P)、蒸散发(E)、地表径流(R)、地下基流(B))进行可视化处理,如图 7 所示。该降水数据和驱动 VIC 模型的输入降水数据相同,所以降水分布空间变化比较均匀,流域年均降水量为 1 069.3~1 723.6 mm,空间上表现为东南多、西北少。蒸散发数据和地表径流数据的空间变化主要和土壤类型有关,同时结合图 2 的土壤类型分布可以得出:柳江流域内壤土和壤质沙土地区的蒸发量要大于黏土地区的蒸发量,相应的壤土和壤质沙土地区地表径流普遍要小于黏土地区的地表径流。柳江流域的蒸发量主要在 408.4~692.9 mm 之间,地表径流在 219~680.1 mm 之间变动。地下基流的变化则不太明显,空间分布相对均匀。其值主要在 331.1~545.8 mm 之间变动。

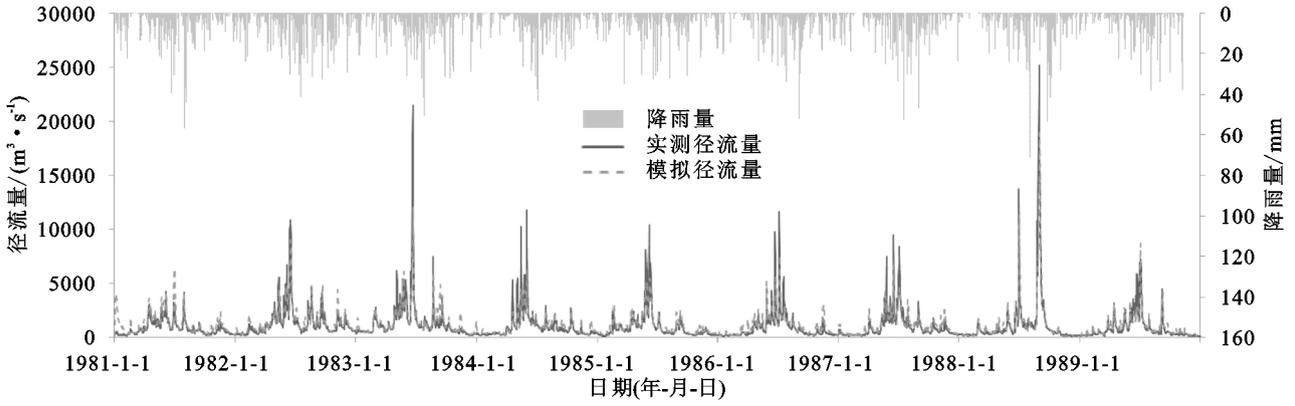


图 5 柳州站率定期(1981—1989)实测与模拟日流量过程对比

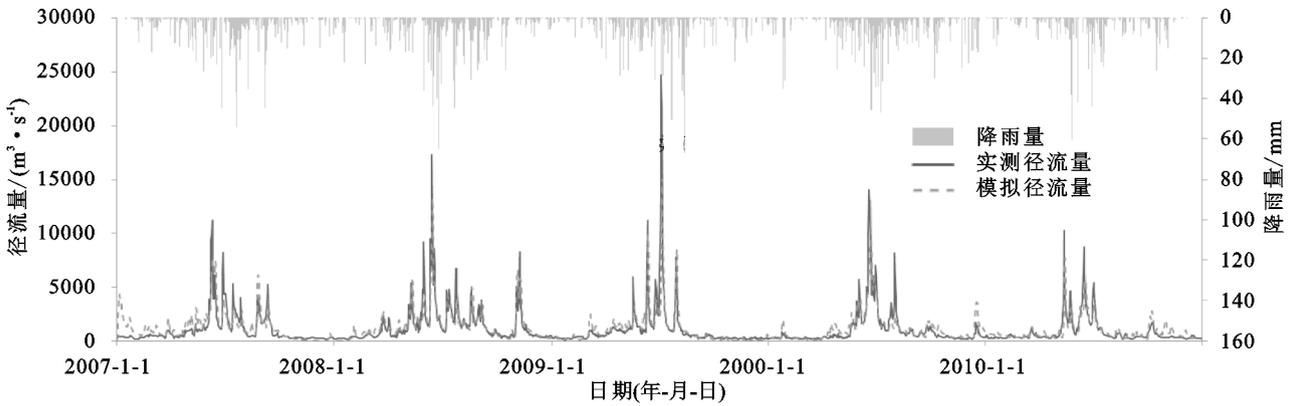


图 6 柳州站验证期(2007—2011)实测与模拟日流量过程对比

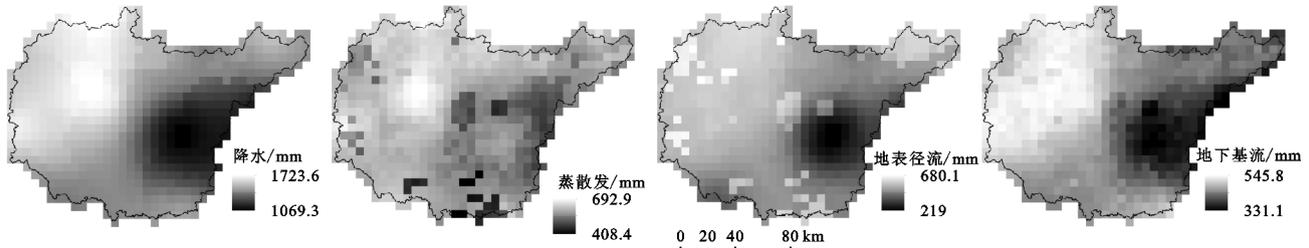


图 7 柳江流域主要水文要素空间分布

根据柳江流域 VIC 模型的输出要素(P, E, R, B),结合流域水量平衡公式:

$$\Delta W = P - E - R - B \quad (3)$$

其中 ΔW 为时段内流域水量变化,得出流域水量平衡相对误差 ΔR 为:

$$\Delta R = \left| \frac{P - E - R - B}{P} \times 100\% \right| \quad (4)$$

根据该公式可得出基于网格的柳江流域多年平均水量平衡相对误差。由图 8 我们可以看出柳江流域的水量平衡相对误差均在 1.2%以下。且在整个空间上分布较为均匀,说明 VIC 模型对柳江流域的模拟效果达到与预期。

3.3 模型应用

利用建立好的柳江流域 VIC 模型框架,以 1981—2011 年的气象数据作为驱动模型运行的输入数据,得到对应计算时段的模型输出要素,提取其中的 P, E, R, B 水文要素。以年为单位,结合 Mann-Kendall 趋势检验方法^[24-28]对柳江流域这 4 个水文

要素的变化情况进行趋势性分析。

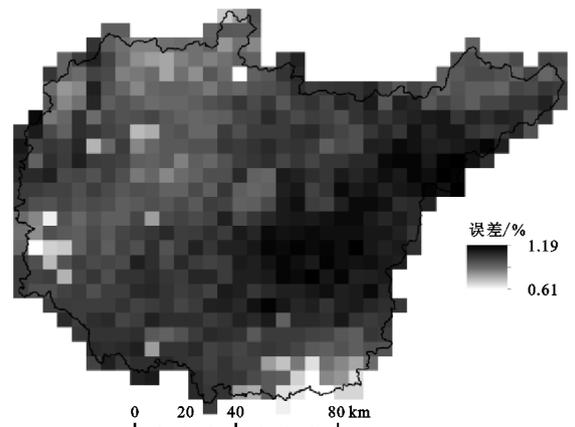


图 8 柳江流域相对误差空间分布

M-K 趋势检验是指对样本的相对大小进行比较,并对该样本是否有某种变化趋势进行定量的判断。对一个随机变量组 $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$,M-K 趋势检验方法的公式介绍见表 5。

表 5 M-K 趋势检验方法公式及其描述

公式	描述
$\text{sgn} = \begin{cases} +1, (x_j - x_i) > 0 \\ 0, (x_j - x_i) = 0 \\ -1, (x_j - x_i) < 0 \end{cases}$	式中:sgn 为符号函数,根据变量 $x_j; x_i$ 的差值而变化
$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$	式中: n 为样本个数; S 为正态分布,当 $S > 0$ 时;表式该组变量有增加趋势,反之则有下降趋势
$\sigma(S) = \sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}$	式中: $\sigma(S)$ 为标准差,当 $n > 10$ 时,标准的正态统计变量由 Z 值计算
$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma(S)}, S > 0 \\ 0, S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma(S)}, S < 0 \end{cases}$	式中: Z 表示变化趋势显著性的定量表示

本文参考曹洁萍^[29]等的研究,当 Z 的绝对值在大于 1.64 时表示通过了置信度为 95% 的显著性检验。

柳江流域的 M-K 检验结果见图 9: 栅格颜色的深浅代表变化趋势的强弱,带矩形框的栅格表示该栅格通过了显著性检验,有显著的增加或减小趋势。由图 9 可以看出地表径流通过显著性检验的栅格最多,共 480 个,占

流域总面积的 71%,覆盖了柳江流域除东北方向的绝大部分地区。降水通过显著性检验的栅格次之,共 328 个,占流域总面积的 48%。蒸发量通过显著性检验的栅格共有 162 个,占流域总面积的 24%,且主要分布在柳江流域的西部和西北部,地下基流则基本上没有明显变化的趋势,其 Z 值大于 1.64 的栅格仅 8 个,占比 1%。

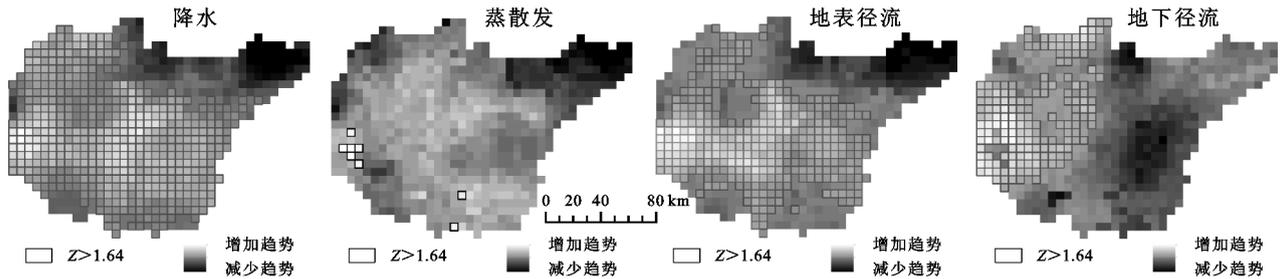


图 9 柳江流域栅格 M-K 检验结果

4 结论与展望

VIC 模型对于柳江流域水文物理过程的模拟效果无论是在时间上还是在空间上都表现出了良好的适用性。时间上:无论是验证期还是率定期,在日尺度上其效率系数 NS 的值都在 0.7 以上,相对偏差 BIAS 的绝对值均小于 0.11,月尺度上 VIC 模型的模拟效果较日尺度明显更优。空间上:柳江流域所有网格水量平衡相对误差的值均小于 1.2%。二者皆表明了 VIC 模型在柳江流域良好的模拟效果,可以为柳江流域水资源管理以及洪灾防治提供一定的依据。

针对柳江流域 VIC 模型的输出要素 (P, E, R, B) 进行了 M-K 趋势性检验,结果表明柳江流域有超过 70% 的栅格地表径流有明显增加趋势,而地下基流普遍无显著变化趋势,降水和蒸散发具有显著增加趋势的栅格均不到总栅格的 50%。

在研究的过程中我们发现 VIC 模型在模拟的起步阶段会出现模拟值远大于实测值的“边缘效应”现

象,其原因可能与模型本身的产流原理以及参数自身的局限性有关,未来可在这一方面进行进一步的探究与改进。此外本文仅对柳江流域水文要素的时空分布进行了模拟研究;其他诸如土地利用变化、水文参数变化以及其他要素变化对于模拟效果的影响并未进行深入研究。

参考文献:

- [1] 赵人俊.流域水文模拟:新安江模型与陕北模型[M].北京:水利电力出版社,1984.
- [2] 阿博特.分布式水文模型[M].郑州:黄河水利出版社,2003.
- [3] 刘金清,王光生,周砺,等.分布式流域水文模型刍议[J].水文,2007,27(5):21-24.
- [4] 王书功,康尔泗,李新.分布式水文模型的进展及展望[J].冰川冻土,2004,26(1):61-65.
- [5] 黄晴,张万昌.改进型 TOPMODEL 在不同尺度和气候条件流域上的适用性研究[J].水土保持通报,2008,28(5):50-56.
- [6] 庞靖鹏,徐宗学,刘昌明. SWAT 模型中天气发生器与数据库构建及其验证[J].水文,2007,27(5):25-30.

- [7] 石超,龚霞,张行南,等.基于分布式水文模型 DHSVM 的平通河流域水文模拟[J].三峡大学学报:自然科学版,2014,36(4):19-23.
- [8] 王建芳.柳江流域防洪减灾综合对策[J].广西师范学院学报:自然科学版,2002,19(3):52-56.
- [9] 邓世宗.从广西森林水文的研究谈柳江流域洪水的治理[J].资源科学,1992,14(2):67-73.
- [10] 丁红,吴德敏,荣杰. BP 神经网络在柳江径流预测中的应用[J].广西工学院学报,2013,24(3):78-83.
- [11] 李泽峰,陈洋波,李雪.柳江流域多时间尺度的降雨径流模拟分析[J].中国农村水利水电,2017(12):64-69.
- [12] 刘欢,甘永德,贾仰文,等.考虑空气阻力影响的流域水文过程模拟研究[J].自然资源学报,2018,33(8):175-186.
- [13] Wood E F, Lettenmaier D P, Zartarian V G. A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992,97(3):2717-2728.
- [14] 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(7):14415-14428.
- [15] Liang X, Wood E F, Lettenmaier D P. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2 L model: Evaluation and modification [J]. Global and Planetary Change, 1996,13(1/4):195-206.
- [16] 宋星原,余海艳,张利平,等. VIC 陆面水文模型在白莲河流域径流模拟中的应用[J].水文,2007,27(2):40-44.
- [17] Zhenghui X, Fengge S, Xu L, et al. Applications of a surface runoff model with Horton and Dunne runoff for VIC[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003,20(2):165-172.
- [18] Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain[J]. Water Resources Research, 1994,30(6):1665-1679.
- [19] Todini E, Bossi A. PAB(Parabolic and Backwater)an unconditionally stable flood routing scheme particularly suited for real time forecasting and control[J]. Journal of Hydraulic Research, 1986,24(5):405-424.
- [20] Lohmann D, Raschke E, Nijssen B, et al. Regional scale hydrology:I. Formulation of the VIC-2 L model coupled to a routing model[J]. Hydrological Sciences Journal/Journal Des Sciences Hydrologiques, 1998,43(1):131-141.
- [21] Jain S K, Sudheer K P. Fitting of Hydrologic Models: A close look at the nash-sutcliffe index[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008,13(10):981-986.
- [22] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970,10(3):282-290.
- [23] Rosenbrock, H. H. An automatic method for finding the greatest or least value of a function[J]. the Computer Journal, 1960,3(3):175-184.
- [24] 邓鹏,黄鹏年.基于VIC模型的淮河中上游地区水量空间分布研究[J].水电能源科学,2018,36(2):28-31.
- [25] Mann H B. Non-Parametric test against trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [26] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1990,25(1):86-91.
- [27] 吴陶樱,方秀琴,吴小君,等.基于气候区的全球干旱形势分析[J].水土保持研究,2019,26(3):166-173.
- [28] 雷璐,孙春敏. Mann-Kendall 检验方法在增江径流趋势分析中的应用[J].中国科技信息,2012(19):39-39.
- [29] 曹洁萍,迟道才,武立强,等. Mann-Kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J].农业科技与装备,2008(5):39-41.

(上接第 327 页)

- [23] 牛晓春,杜忠潮,李同昇.基于新型城镇化视角的区域城镇化水平评价:以陕西省 10 个省辖市为例[J].干旱区地理,2013,36(2):354-363.
- [24] 赵凯,王宁.陕西城镇化水平的区域差异及其变化趋势探析[J].西北农林科技大学学报:社会科学版,2012,12(1):61-65,82.
- [25] 赵静蓉,周忠学.城市土地利用效率和城市化的耦合协调关系研究:以西安市为例[J].陕西农业科学,2012,58(4):154-158,198.
- [26] 席娟,张毅,杨小强.陕西省城市土地利用效益与城市化耦合协调发展研究[J].华中师范大学学报:自然科学版,2013,47(1):117-123.
- [27] 李春燕,南灵.陕西省土地生态安全动态评价及障碍因子诊断[J].中国土地科学,2015,29(4):72-81.
- [28] 王建康,谷国锋,姚丽,等.中国新型城镇化的空间格局演变及影响因素分析:基于 285 个地级市的面板数据[J].地理科学,2016,36(1):63-71.
- [29] 左乃先,白永平,左京平,等.城市土地利用效益与城市化耦合协调发展研究:以陕甘宁 27 个城市为例[J].水土保持研究,2015,22(6):267-272,278.
- [30] 彭建,蒋依依,李正国,等.快速城市化地区土地利用效益评价:以南京市江宁区为例[J].长江流域资源与环境,2005,14(3):304-309.