

VIC 模型在西江流域的水文模拟及其应用

杜婷婷¹, 郭梦京², 张晋梅³, 田世野⁴

(1.绵阳职业技术学院, 四川 绵阳 621000; 2.西安理工大学 水利水电学院, 西安 710077;

3.江西省水利科学研究院, 南昌 330029; 4.江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室, 南昌 330045)

摘 要:流域自然水文物理过程的研究对于保障流域水安全具有重要意义,以西江为研究区结合陆面水文模型 VIC (Variable Infiltration Capacity, VIC)对流域自然水循环的水文模拟过程在不同时间尺度上的适用性情况进行了分析,无论是日尺度还是月尺度上, VIC 模型在西江流域径流模拟过程中均表现出了良好的适用性,都达到或者超过 $NS > 0.6$ 同时 BIAS 的绝对值小于 0.15 的标准要求;其次对 VIC 模型进行更深层次应用,从模型输出的众多基于栅格的水文要素中,提取地表径流(R)、地下基流(B)、降水(P)、蒸散发(E)四大要素,并结合 Mann-Kendall 变化趋势检验方法对这四大要素在 1971—2010 年共 40 年内的变化趋势进行分析,得到西江流域的蒸散发存在 37% 以上、降水存在 29% 以上、地表径流存在 65% 以上的面积有显著增加趋势,而地下基流在这 40 年内的变化趋势并不显著这一结论。

关键词:西江流域; VIC 模型; 模型应用; 水文要素; 变化趋势分析

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)05-0121-07

Hydrological Simulation and Application of VIC Model in Xijiang River Basin

DU Tingting¹, GUO Mengjing², ZHANG Jinmei³, TIAN Shiye⁴

(1. Mianyang Vocational and Technical College, Mianyang, Sichuan 621000, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower, Xi'an University Of Technology, Xi'an 710077,

China; 3. Jiangxi Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China; 4. Key Laboratory of

Poyang Lake Watershed Agricultural Resources and Ecology of Jiangxi Province, Nanchang 330045, China)

Abstract: The study of the natural hydrophysical process of the basin is of great significance to ensure the water safety of the basin. This study used the Xijiang River as the study area and combined the land surface hydrological model VIC (Variable Infiltration Capacity, VIC) to simulate the hydrological process of the natural water cycle of the basin on different time scales. The results show that the VIC model has good applicability for runoff simulation process on both daily and monthly scales in the Xijiang River Basin, and both reach or exceed $NS > 0.6$ while the absolute value of BIAS is less than 0.15 standard requirements; secondly, a deeper application of the VIC model can extract four elements such as surface runoff (R), underground base flow (B), precipitation (P), evapotranspiration (E) from the many raster-based hydrological elements output by the model; the Mann-Kendall change trend test method can be used to analyze the change trends of these four elements in a total of 40 years from 1971 to 2010. These results show that the evapotranspiration in more than 37% of the Xijiang River Basin, the precipitation in more than 29% of Xijiang River Basin, and the surface runoff in more than 65% of Xijiang River Basin have the significant increase trend, while the change trend of underground base flow in these 40 years is not significant.

Keywords: Xijiang River Basin; VIC model; model application; hydrological elements; change trend analysis

水文模型^[1]是用数学公式和物理性质来描述流域自然水循环和能量交换过程,随着计算机科学的不断发展,水文模型被广泛的应用在水文模拟预测、旱

涝灾害预警、流域水资源管理等各个方面。得益于不断进步的地理信息系统(GIS)^[2]技术与遥感技术(RS)^[3],结合了 GIS 与 RS 技术的分布式水文模型

收稿日期: 2020-09-17

修回日期: 2020-10-21

资助项目: 西北旱区生态水利国家重点实验室“黄河中游典型流域植被变化对蓝水—绿水转化的影响机制”(2019KFKT-3)

第一作者: 杜婷婷(1987—),女,河北沧州人,硕士,讲师,研究方向: 水文水资源。E-mail: 498921822@qq.com

通信作者: 郭梦京(1986—),男,山西运城人,博士,副教授,研究方向: 流域水循环与水环境保护。E-mail: 147433250@qq.com

不但考虑了传统水文模型所需要的降雨数据还重点考虑到了下垫面以及气候的变化对于流域水文生态的影响,使得分布式水文模型在流域自然水循环模拟过程中更具优势。

珠江流域主要支流有三条,分别是东江、北江以及西江,其中西江是珠海、澳门等地区城市用水最重要的上游来水源^[4]。纵观前人的研究,对于珠江流域的水文研究主要集中在流域面积较小的北江和东江,李建庆,罗显刚等人基于不同土地利用情景利用 SWAT 模型对北江流域进行了水文模拟,结果表明:城市化以及退耕还林还草等土地利用变化都会对流域自然水文过程造成较大影响^[5],綦昕瑶,刘贵花等利用 IHACRES 水文模型对东江流域径流变化的原因进行分析时发现:气候变化是引起东江流域径流变化的主要因素,人类活动是次要因素^[6]。而在西江流域水文方面的研究由于研究资料的匮乏以及其他原因相对较少,廖卫红,雷晓辉等利用分布式水文模型 EasyDHM 对西江流域径流进行模拟,结果表明该模型在西江流域具有良好的适用性^[7];曾凌,熊立华等利用 DDRM(DEM-based distributed rainfall-runoff model)模型模拟了西江流域的土壤湿度的时空分布,结合 ASCAT 卫星遥感反演土壤湿度产品作为对比,结果表明 DDRM 模型和卫星遥感土壤湿度指数具有良好的时间一致性和空间一致性^[8];赵胤懋,廖卫红等以西江为研究区利用地面雨量站的数据对比分析了 CMORPH 降水产品精度,分析结果表明:CMORPH 降水产品具有较高的产品精度,能够替代地面雨量站的数据^[9];吴志勇,林青霞等选取 1951—2010 年水文站径流数据,利用 SRDI 干旱指数研究西江流域水文干旱的空间变化特征,结果表明:西江流域轻旱发生范围有扩大趋势,极旱发生范围有减小趋势^[10]。综合来看针对西江的水文研究大都集中在某一点或者某一产品的数据精度上,对于西江流域整体的系统性水文研究则相对较少。本研究利用遥感技术获取水文分析的基础数据、利用 GIS 空间分析技术对水文数据进行转换与处理,以西江作为目标研究流域,探究分布式水文模型 VIC 模型在西江流域的适用性情况,以期为西江流域水资源科学管理及洪水灾害防治提供一定的科学依据。

1 研究区概况

西江^[11]地处北纬 21°31′—26°49′、东经 102°14′—114°48′,流域横跨云南、广西以及贵州,集水面积约 35 万 km²,占整个珠江流域总面积超过七成,年均径流量超过 2 300 亿 m³,主要支流包括左江、右

江、黔江、红水河、郁江、桂江以及柳江等。

西江流域在气候上的垂直差异和水平差异相当明显;不同海拔,不同经纬度地区之间差异明显。流域气温差异明显,年平均气温常年保持在 14~23℃。流域年均降水无论在空间上还是时间上分布都极不均匀。时间上:汛期(4—9 月)水量占到全年总径流量的 70%;空间上则呈现出东南多西北少的趋势,年均降雨量在 1 000~2 200 mm。

2 VIC 模型概述、数据来源及研究方法

2.1 VIC 模型简介

最初版本的 VIC^[12-14]模型又叫 VIC-2L 模型,其中的 2L 代表的是对土壤的分层,即将土壤分成了上下两层。随着越来越多的水文工作者对 VIC 模型研究水平不断提高,VIC 版本随之不断更迭,将第二层土壤进行了分割,划出顶薄层,新增了对于土壤表层的动态描述,提高了土壤湿度的模拟精度,最终形成了如今被广大水文研究工作者广泛采用的 VIC-3L 模型。VIC-3L 模型考虑了裸土以及不同植被覆盖类型对于降雨的动态响应。

VIC 模型在产流方式上参考新安江模型同时考虑了两种产流方式(蓄满产流和超渗产流^[15-17]),在模拟历时任意一个 Δt 内,该段时间内的降雨量会被 VIC 模型产流过程拆分为蓄满产流 R_1 、超渗产流 R_2 以及下渗到土壤的降雨 ΔW 3 个部分。 W_t 是 t 时刻的土壤含水量,而不同性质土壤的空间分布的不均匀性导致降雨的入渗产流的方式也随着空间变化而变化,从蓄满产流变成超渗产流,网格内降雨在土壤中的入渗能力也随土壤性质的变化而变化,具体如下式:

$$f=f_m[1-(1-C)^{1/B}] \tag{1}$$

式中: f 表征不同土壤的降雨入渗能力在空间上的变化; f_m 代表流域内网格降雨量的最大入渗能力大小; C 表征的是流域内降雨的入渗能力值小于或者等于 f 的网格面积占流域总网格面积的比例; B 的意义与上式类似,是表征流域内土壤入渗能力参数。

$$P=R_1(y)+R_2(y)+\Delta W(y) \tag{2}$$

式中: P 为在历时内的流域降雨量总和; R_1 为蓄满产流量; R_2 为超渗产流量; ΔW 为入渗到土壤的雨量,且 $y=R_1(y)+\Delta W(y)$ 。其中蓄满产流和超渗产流加上入渗到土壤的总水量 ΔW 可以用 y 式来进行表示,具体如下:

$$R_1(y)=\begin{cases} y-\frac{i_m}{b+1}[(1-\frac{i_0}{i_m})^{b+1}-(1-\frac{i_0+y}{i_m})^{b+1}] & 0\leq y\leq i_m-i_0 \\ R_1(y)|_{y=i_m-i_0}+y-(i_m-i_0) & i_m-i_0< y\leq P \end{cases} \tag{3}$$

$$R_2(y)=\begin{cases} P-R_1(y)-f_{mm}\Delta t[1-(1-\frac{P-R_1(y)}{f_m\Delta t})^{b+1}] & \frac{P-R_1(y)}{f_m\Delta t}\leqslant 1 \\ P-R_1(y)-f_{mm}\Delta t & \frac{P-R_1(y)}{f_m\Delta t}\leqslant 1 \end{cases}$$
$$\Delta W(y)=\begin{cases} \frac{i_m}{b+1}[(1-\frac{i_0}{i_m})^{b+1}-(1-\frac{i_0+y}{i_m})^{b+1}] & 0\leqslant y\leqslant i_m-i_0 \\ i_m-i_0-R_1(y)|_{y=i_m-i_0} & i_m-i_0<y\leqslant P \end{cases}$$

(4)

(5)

式中： f_{mm} 为流域土壤平均入渗能力，其他参数的意义与前面公式说明相同，经过上式的计算后就可以得到地下基流、地表径流以及三层土壤的含水量。

VIC 模型的一大特点是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在研究流域内同时进行能量平衡模拟以及水量平衡模拟。此外 VIC 模型将流域内气候、土壤属性、地形地貌以及植被的综合作用以数学公式的方式进行集成处理，使得 VIC 模型具备扎实的数学意义和较高的物理基础。最后 VIC 模型源码开源，方便后续研究人员做模型的改进与发展。

2.2 数据来源与处理

VIC 模型在应用过程中，模型的预处理是一个必不可少的环节，借助 Arcmap 平台，基于 STRM 90 m 高程数据对西江流域进行划分，以 2 km×2 km 模型分辨率在 Arcmap 软件中利用西江流边界将西江流域划分为 723 个网格单元。

本研究所使用的部分 VIC 模型输入数据来源如下：(1) 地表覆盖数据来源于马大 1 km 分辨率全球地表覆盖数据集。该数据集的处理方法为：在流域所划分好的所有网格中，统计网格内所有地表覆盖

类型，同时将所有类型的地表覆盖属性信息赋值到对应网格上。(2) 土壤质地数据采集自世界土壤数据库；土壤质地数据集的处理原则与地表覆盖数据大体类似，区别之处在于网格内占比最大的土壤质地的理化性质数据代表整个网格的理化性质属性数据。(3) 气象驱动数据来源中国地面累年日值数据集。该数据集包含了全国 699 个气象站点的 70 a 日值气象数据。本研究针对西江流域提取了流域周围共 88 个气象站点的气象数据进行研究，其数据处理原则为：根据流域周围共 88 个气象站点的气象要素数据，从中提取降水、最高气温、最低气温、风速 4 个子要素组成新的气象要素数据集，作为运行 VIC 模型的气象驱动数据。(4) 用于 VIC 模型模拟结果的率定和验证所需要的实际径流量数据来自于武宣水文站 1981—1989 年逐日径流量数据。

根据已经收集的数据可知，西江流域土壤主要以沙壤土、黏土以及沙质黏土为主，其中又以沙壤土占据最主要部分。土地覆盖类型主要草地、耕地和林地 3 种基本覆盖类型

2.3 研究方法

M-K^[18-19] (Mann-Kendell) 趋势检验方法是分析水文气象要素在时间上变化特点常用的一种分析方法，该方法的优势在于用于检验的时间要素序列样本无须遵循某一特定的分布规律，在进行变化特点分析时极少会受到异常值的影响，而且计算过程简单且易于分析。M-K 趋势检验方法的原理是假设有一个时间序列 X_n ，将每一个时间序列的子元素进行对比，根据其数值的大小来判断该时间序列是否具有某种变化趋势，具体见表 1。

表 1 M-K 趋势检验方法公式及其描述

公式	描述
$\text{sgn}=\begin{cases} +1 & (x_j-x_i)>0 \\ 0 & (x_j-x_i)=0 \\ -1 & (x_j-x_i)<0 \end{cases}$	sgn 为符号函数，根据变量 x_i, x_j 的差值而变化
$S=\sum_{i=1}^{k-1}\sum_{j=i+1}^k \text{sgn}(x_j-x_i)$	k 为样本集总样本个数； S 为正态分布，当 $S>0$ 时，表示该组要素具有一定的增加趋势，反之则有下降趋势。
$\sigma(S)=\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}$	$\sigma(S)$ 为标准差，当 $n>10$ 时，标准的正态统计变量由 Z 值计算
$Z=\begin{cases} \frac{S-1}{\sigma(S)} & S>0 \\ 0 & S=0 \\ \frac{S+1}{\sigma(S)} & S<0 \end{cases}$	Z 表示变化趋势显著性的定量表示

表 1 中 Z 值的正负表示该时间要素序列变化趋势为增加趋势还是减小趋势，当值大于零时为增加趋势，小于零表示该要素序列表现出减小趋势， Z 的值的大小

用来定量表征该时间序列变化趋势是否显著，参考他人研究^[20]当 $Z>|\pm 1.64|$ ，则该要素序列具有某一显著的变化趋势，正值具有显著增加趋势，反之则有减小趋势。

3 结果与分析

3.1 参数率定

VIC 模型土壤参数众多,绝大部分的参数有其固定物理意义^[21],通过不同土壤属性数据的获取,得到流域不同网格的土壤理化性质参数,而参与率定的土壤参数^[22]共 6 个,其中控制研究流域地下基流量的土壤参数变量包括: D_{\max} , D_s , W_s ,表征流域不同区域土壤蓄水能力大小的形状变量 b 以及由 VIC 模型所划分出来的土壤第二层厚度 D_2 和第三层土壤厚度 D_3 。本研究借助 Matlab 科学计算语言将待率定的 VIC 模型土壤参数设置成土壤参数变量,每次用不同的土壤参数变量的运行 VIC 模型,得到对应的模型模拟日值数据,将该次模拟数据与水文站实测径流数据进行对比,对比完成后,更改土壤参数变量的值,再次运行 VIC 模型,重复上述过程,直到所有的土壤变量组合方式都运行完毕。

根据现有的武宣水文站实测日值径流数据以及模型模拟日值径流数据通过评价指标纳什效率系数(Nash-Sutcliffe, NS)^[23]、相关性系数(r)^[24]以及相对偏差(BIAS)^[25]对 VIC 模型的在对应土壤参数变量条件下的率定结果进行评估,评价指标具体数学公式见表 2。

表 2 模拟效果评价指标及其公式

评价指标类型	公式
纳什效率系数(NS)	$NS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - \bar{Q}_o)^2 - \sum_{i=1}^n (Q_{i,c} - \bar{Q}_{i,o})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - \bar{Q}_o)^2}$
相关性系数(r)	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - \bar{Q}_o)(Q_{i,c} - \bar{Q}_{i,o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - \bar{Q}_o)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{i,c} - \bar{Q}_{i,o})^2}}$
相对偏差(BIAS)	$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{i,c} - \sum_{i=1}^n Q_{i,o}}{\sum_{i=1}^n Q_{i,o}} \times 100\%$

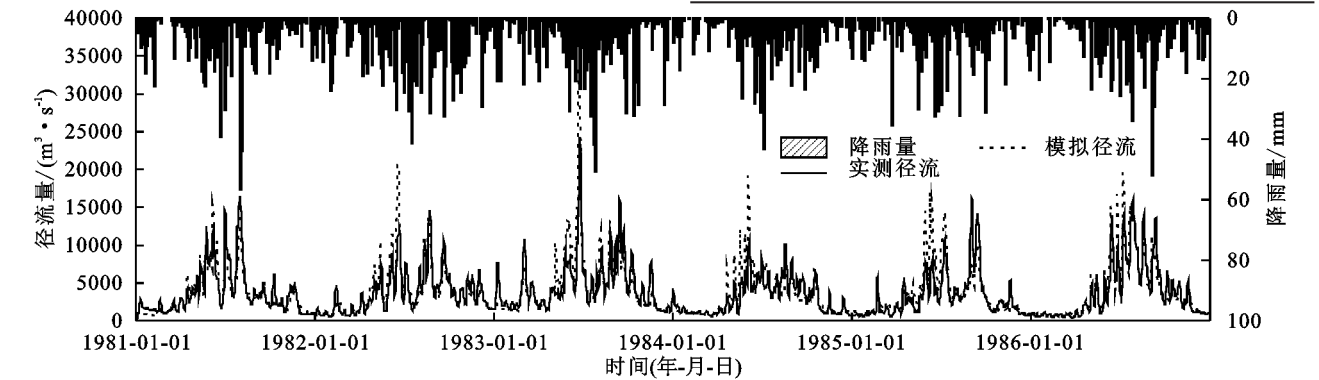


图 1 武宣站率定期(1981—1986 年)实测与模拟日流量过程对比

通过图 1 率定期与图 2 验证期实测与模拟日流量过程对比以及表 4 西江流域 VIC 模型的评价指标

在上述 3 个公式中 $Q_{i,c}$ 为第 i 天的日尺度模拟径流量; $Q_{i,o}$ 是第 i 天的日尺度实测径流量; n 为总模拟历时,单位为天; \bar{Q}_o 为实际日值观测径流量的平均值; \bar{Q}_m 为模拟日值径流量的平均值。

由于西江流域面积广阔其数据量相应的也会更大,导致每次模拟过程所需时间较长(30 min 以上),若将每种可能的组合方式均运行一次,在时间成本上是不可接受的,因此本研究参考 Rosenbrock 法^[26]通过确定参数变化步长的方法来减少模型运行所需时间成本,即对 VIC 模型土壤参数变量的变化范围进行划分,每次只使用一个变化步长范围内的土壤参数变量,输入到 VIC 模型中,运行 VIC 模型,得到一组模拟径流数据,重复上述过程直到所有的土壤参数变量组合都运行完完毕,最后根据评价指标的最优值找出最优土壤参数变量组合。

本研究将整个 VIC 模型模拟过程划分为率定期(1981—1986 年)和验证期(1987—1989 年)两个阶段。土壤参数变量的物理意义及率定工作完成后得到的土壤参数变量最优值结果见表 3。

3.2 模型适用性评估

以武宣站站率定期(1981—1986 年)和验证期(1987—1989 年)实测日值径流作为参考,VIC 模型模拟结果见图 1—2。

表 3 VIC 模型土壤参数变量物理意义及其最优值

参数名	土壤参数 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]	0.05
D_{\max}	最大基流流速(mm/h)	[0,40]	8
W_s	下层土壤最大含水量比例系数	[0.2,0.9]	0.5
D_2	第二层土壤厚度(m)	[0.1,0.5]	0.21
D_3	第三层土壤厚度(m)	[0.1,0.5]	0.31

在率定期和验证期的结果可以看出在率定期:NS 系数在日尺度上的值为 0.71,在月尺度上的值为 0.84。

在相关性系数 r 的值上,日尺度的值为 0.84,与 NS 系数的表现类似,月尺度的值较日尺度有所上升为 0.95,表现优异。在相对偏差 BIAS 上,月尺度较日尺度也有所下降,分别为 9% 以及 8%。在验证期内:3 个评价指标总体上较率定期均有不同程度的下降,其

中 NS 系数在日尺度和月尺度上的值分别为 0.65,0.85。相关性系数 r 的变化情况与 NS 系数的变化情况类似,在月尺度上的表现要优于日尺度,分别为 0.81,0.94,在相对偏差上,日尺度的值为 13% 而月尺度的值为 9% 较率定期内的表现均有不同程度的增大。

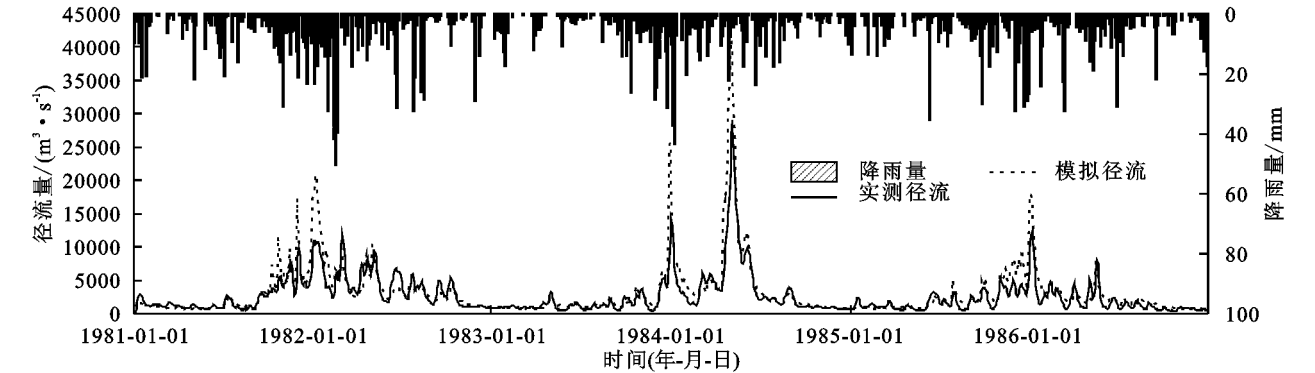


图 2 武宣站验证期(1987—1989 年)实测与模拟日流量过程对比

表 4 西江流域模拟结果

计算时段	效率系数		相关性系数		相对偏差/%	
	日尺度	月尺度	日尺度	月尺度	日尺度	月尺度
率定期	0.71	0.84	0.84	0.95	9	8
验证期	0.65	0.85	0.81	0.94	13	9

为了进一步分析 VIC 模型在西江流域年内丰水期(4—9 月)和枯水期(10—12 月、1—3 月)的模拟效果是否存在差别,本研究将整个模拟历时进行拆分,将每年的丰水期以及枯水期分别提取出来单独组成

一个径流时间序列,分析 VIC 模型在年内不同时期的模拟效果是否存在差别。

图 3 和图 4 为率定期丰水期以及枯水期的水文过程线,由图 3 可以看出在 1981—1986 年的丰水期中虽然水文过程曲线的变化趋势保持一致,但在多个年份出现了洪水峰值模拟不足。但 VIC 模型在枯水期(图 4)的表现上,其模拟效果无论是从变化趋势上看,还是对于峰值的模拟,其效果都要好于丰水期的模拟效果,部分情况下实测径流量曲线甚至与模拟径流量曲线处于重合状态。

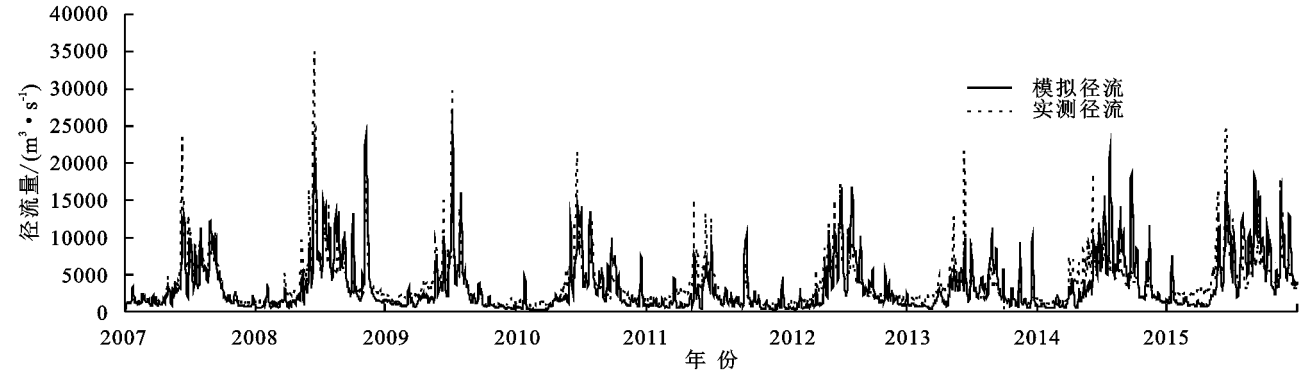


图 3 率定期西江流域丰水期水文过程线

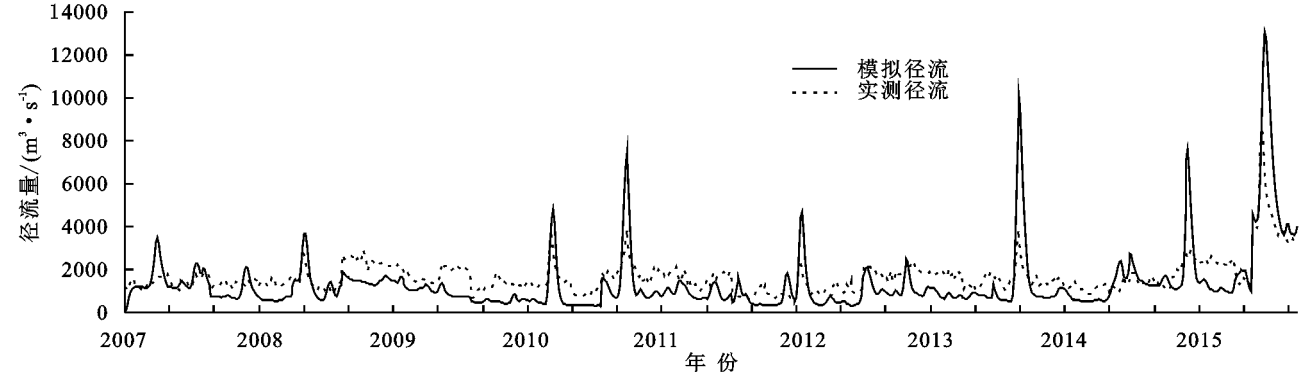


图 4 率定期西江流域枯水期水文过程线

由表 5 中可知:日尺度下,率定期 VIC 模型在丰水期的 NS 的值为 0.60,BIAS 的值为 13%,月尺度 NS 的值为 0.63,BIAS 的值为 11%,而枯水期的 NS 的值为0.89,BIAS 的值为 4%。在月尺度下,枯水期的 NS 的值为 0.91,BIAS 的值略差于日尺度为 6%。验证期的模拟结果与率定期类似,具体为在日尺度验证期的模拟结果中;丰水期 NS 的值为 0.55,略优于

表 5 西江流域模拟结果

计算时段	丰水期				枯水期			
	效率系数		相对误差/%		效率系数		相对误差/%	
	日尺度	月尺度	日尺度	月尺度	日尺度	月尺度	日尺度	月尺度
率定期	0.60	0.63	13	11	0.89	0.91	4	6
验证期	0.55	0.58	17	13	0.78	0.87	6	8

由率定期和验证期的水文过程线可以看出,VIC 模型在年内不同时期的模拟精度上枯水期的模拟精度都要优于丰水期的模拟精度,但从总体上年际模拟效果上看,对比廖卫红等人利用 EasyDHM 模型对西江流域的径流模拟结果,虽然 VIC 模型的输入数据种类更多、数据要求也更高,但该模型也有着更好的模拟效果,同时也能够对流域热量的传输过程进行模拟,这是 EasyDHM 模型所不具备的。综合来说 VIC 模型在西江流域表现良好,可以为西江流域水资源合理分配、旱涝灾害预警与防治提供一定的科学依据。

3.3 模型应用

利用经过率定与验证得出的最优土壤参数组合,对 VIC 模型进行更深层次的应用。基于已经建立好的西江流域 VIC 模型框架,单独制作了 1971—2010 年共四十年的气象数据作为 VIC 模型的气象驱动数据以驱动 VIC 模型运行,获取 1971—2010 年的 VIC 模型产流过程输出的西江流域多个水文要素数据。

VIC 模型产流过程的输出文件参数众多,内容涵盖了经过率定过程得出的最优水量性质参数以及最优能量性质参数。本研究提取了水量性质参数中的 P (多年平均降水)、 R (地表径流)、 E (蒸散发)、 B (地下基流)4 个水文要素,以 3 个月为一个时间步长,结合 M-K 趋势检验方法基于网格探究西江流域 P,R,E,B 这 4 个水文要素的近 40 a 的变化规律。

本文以基于网格的形式,对 VIC 模型所划分出的西江流域 723 个网格进行逐网格变化趋势分析,其原理是根据 VIC 模型产流过程所生成西江流域 723 个网格 1971—2010 年共 40 a 的水文要素,每一个网格单独进行 M-K 变化趋势检验分析,计算各个网格的 Z 值,在所有网格的完成 M-K 变化趋势分析后,

率定期日尺度 NS 的值,BIAS 的值为 17%。在月尺度上 NS 的值为 0.58,BIAS 的值为 13%。在枯水期的模拟中,日尺度上 NS 的值为 0.78,BIAS 的值为 6%。月尺度上 NS 的值为 0.87,BIAS 的值为 8%。因此在不同时间尺度条件下,VIC 模型在枯水期的模拟效果无论是在率定期还是验证期都要优于丰水期的模拟效果。

将所有的 Z 值进行汇总,制作成 ASCII 格式,导入 ArcMap 中进行可视化处理。

研究表明:在这 40 a 中降雨在西江流域约一半的地区有增加趋势,而 $Z>1.64$ 的网格共 213 个占西江流域总网格的 29%,主要分布在西江流域的西部云南和贵州境内以及东部广西境内,降雨表现出下降趋势的网格主要集中在西江流域中部,但其 Z 均没有大于 1.64,即增加趋势不明显。蒸散发具有增加趋势的网格集中在西江流域的中部贵州境内,而 $Z>1.64$ 的网格较降水有一定的增加,共 266 个网格,占流域总网格数的 37%;与降雨类似,蒸散发也具有部分网格具有下降趋势,但其 Z 值均没有大于 1.64。西江流域地表经流要素具有增加趋势的网格最多,其 $Z>1.64$ 的网格共 476 个,在流域总网格数中占比超过 65%,主要集中在广西境内流域部分。地下基流相较于其他 3 个水文要素变化最不明显,具有显著增加趋势的网格共 10 个,主要集中在广西境内,占比不到 2%。

4 结论

流域自然水循环过程的模拟需要综合考虑多方面的因素,尤其是大尺度的流域水文物理过程尤其复杂。本研究依托 RS 技术和 GIS 空间分析技术完成了分布式水文模型 VIC 模型的资料收集和数据处理工作,在西江流域构建了 VIC 模型数据库,利用 3 个评价指标(NS, r ,BIAS)评估 VIC 模型在西江流域径的适用性,结果表明:VIC 模型在不同的时间尺度的径流模拟过程中均表现出了良好的适用性。文章最后对 VIC 模型的输出文件做了进一步的应用,从中提取了 P,E,R,B 共 4 个水文要素,利用 M-K 变化趋势分析方法,对这西江流域这 4 个水文要素在

1971—2010年共四十年内的变化趋势进行了逐网格分析,分析结果表明:西江流域有超过65%的流域面积的地表径流 R 具有显著增加趋势,年均蒸散发 E 和年均降雨 P 具有显著增加趋势的面积占流域总面积约35%。地下基流 B 则相对稳定,具有显著变化趋势的面积占流域总面积不到2%。

尽管大尺度VIC模型在流域自然水文物理过程的模拟研究中具有众多优点,但是由于研究区数据资料的限制以及模型参数的不确定性等方面的影响,会对实际的模拟过程产生不良后果。如本研究在西江流域所采用的VIC模型分辨率为2 km,较大的模型分辨率会实测流域内很多的细节被忽略、概化,从而影响模型的模拟精度,因此在未来的研究中可以考虑采用更加精细的数据精度以提高模型的模拟精度从而更好的了解流域自然水循环过程的变化特点。

参考文献:

- [1] 周洪华,李卫红,杨余辉,等.基于DEM的分布式水文模型构建方法[J].地理科学进展,2002,21(5):430-439.
- [2] 吴悠.基于数字高程模型的矿区土地利用/覆被变化的水文模拟方法[D].太原:太原理工大学,2018.
- [3] 刘元波,吴桂平,赵晓松,等.流域水文遥感的科学问题与挑战[J].地球科学进展,2020,35(5):488-496.
- [4] 陈晓宏,陈永勤.珠江三角洲网河区水文与地貌特征变异及其成因[J].地理学报,2002,57(4):429-436.
- [5] 李建庆,罗显刚,朱双,等.北江流域土地利用/覆盖变化对水文过程影响研究[J].人民长江,2020,51(8):89-94.
- [6] 綦昕瑶,刘贵花,贺志明,等.东江源寻乌水流域径流变化特征及其原因分析[J].江西师范大学学报:自然科学版,2020,44(1):89-94.
- [7] 廖卫红,雷晓辉,张峰,等.分布式水文模型EasyDHM在西江流域的应用[J].水利水电技术,2013,44(12):8-11.
- [8] 曾凌,熊立华,杨涵.西江流域卫星遥感与水文模型模拟的两种土壤湿度对比研究[J].水资源研究,2018,7(4):339-350.
- [9] 赵胤懋,廖卫红,田雨,等.西江流域CMORPH降水产品精度评估及水文效应研究[J].水利水电技术,2019,50(2):88-94.
- [10] 吴志勇,林青霞.西江流域水文干旱时空特征分析[J].水资源保护,2016,32(1):51-56.
- [11] 陈立华,滕翔,严诚,等.西江流域水资源优化调度网络图动态构建研究[J].中国农村水利水电,2019,000(8):1-4,11.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Liang X, Wood E F, Lettenmaier D P. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2 L model: Evaluation and modification [J]. Global & Planetary Change, 1996,13(1/4):195-206.
- [15] Zheng H X, Feng G 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Mann H B. Nonparametric test against trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [19] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1990,25(1):86-91.
- [20] 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.
- [21] 刘谦. VIC大尺度陆面水文模型在中国区域的应用[D].长沙:湖南大学,2004.
- [22] 林建,谢正辉,陈锋,等.2006年汛期VIC水文模型模拟结果与分析[J].气象,2008(3):69-77.
- [23] 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.
- [24] 汪伟,方秀琴,杜晓彤,等.基于VIC模型的柳江流域分布式水文模拟与应用[J].水土保持研究,2020,27(3):328-335.
- [25] 杨晓华.参数优选算法研究及其在水文模型中的应用[D].南京:河海大学,2002.
- [26] 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.