

Regional Distribution of the VIC Model Parameters and Application in Ungauged Basins*

Yanlai Zhou, Shenglian Guo, Jiali Guo, Bo Wu

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan
Email: zyl23bulls@whu.edu.cn

Received: Apr. 10th, 2012; revised: Apr. 27th, 2012; accepted: May 8th, 2012

Abstract: A macro-scale VIC hydrological model for the Ankang basin is constructed and calibrated based on recorded data from 1980 to 1990. The relationships between VIC model parameters and climate and soil factors as well as the regional distribution pattern are analyzed. The multi-regression analysis approach is used to establish formulas that can calculate model parameters of ungauged basins. Application results show that the VIC model performs well in the Ankang, Baohe and Lanhe ungauged basins, the model efficiency reaches 91.41%, 90.01% and 86.55% respectively, which are similar to the results estimated by the calibrated parameters. It is shown that the proposed method can be used to modeling runoff in ungauged basins.

Keywords: VIC Model; Multi-Regression Analysis; Ungauged Basin; Ankang Basin

VIC 模型参数的地区分布规律及在无资料流域的移用*

周研来, 郭生练, 郭家力, 吴波

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉
Email: zyl23bulls@whu.edu.cn

收稿日期: 2012 年 4 月 10 日; 修回日期: 2012 年 4 月 27 日; 录用日期: 2012 年 5 月 8 日

摘要: 构建覆盖安康流域的大尺度网格 VIC 分布式水文模型, 利用有资料地区率定模型参数, 分析 VIC 模型参数与气候和土壤因子的关系, 探讨模型参数的地区分布规律。根据安康流域 1980~1990 年逐日实测数据, 采用多元回归方法建立了参数移用公式, 并用来推求无资料地区的水文模型参数。应用结果表明: 移用公式在安康、褒河和岚河子流域的模拟效果较好, VIC 模型率定期的确定性效率系数分别为 91.41%、90.01%和 86.55%, 接近有资料地区参数率定的结果, 可用于无资料地区的径流模拟。

关键词: VIC 模型; 多元回归分析; 无资料地区; 安康流域

1. 引言

流域水文模型在水利工程规划设计、洪水预报、水资源开发利用中得到了广泛的应用, 为解决各种工程水文问题和提高人们对水文规律的认识起到了巨

大作用^[1]。目前应用较为广泛的水文模型多为系统模型和概念性水文模型, 这些集总式水文模型的缺点在于其不能反映实际暴雨洪水产汇流的空间分布特性, 无法全面刻画水文系统分散输入集中输出的产汇流规律, 无法模拟变化环境中的陆面表面过程。分布式水文模型能够考虑水文参数和过程的空间异质性, 将流域离散成很多较小单元, 水分在离散单元之间运动和交换, 这种假设与自然界中下垫面的复杂性和降水

*基金项目: 水利部公益性项目(201001002)和国家“十一五”科技支撑计划项目(2009BAC56B02)资助。

作者简介: 周研来(1985-), 男, 湖南娄底人, 博士研究生, 从事水文学及水资源开发利用研究。

时空分布不均匀性导致的流域产汇流高度非线性的特征是相符的, 因而所揭示的水文循环物理过程更接近客观世界, 更能真实地模拟水文循环过程, 是水文模型发展的必然趋势^[2]。如 VIC 模型^[3]可同时进行陆气间能量平衡和水量平衡的模拟, 输出每个网格上的径流深和蒸发, 通过汇流模型将网格上的径流深转化为流域出口断面的流量过程, 弥补了传统水文模型对能量过程描述的不足。无论是集总式水文模型还是分布式水文模型, 模型参数的率定和验证至关重要。对有资料流域, 可通过实测水文资料对模型参数进行率定和验证; 对受资料年限限制或无资料流域, 常用临近站点信息法^[4,5]、空间插值法^[4](如克里斯金法)、平均值法^[4,5]、相关性分析法^[5-7]及应用 GIS 技术、数学回归分析建立模型参数与流域土壤因子、植被因子、气候因子和 DEM 等地理信息的相关关系, 实现对流域水文模型的参数网格化^[8-10]。

上述无资料地区水文预报研究^[4-8], 都是基于集总式或半分布式水文模型, 未开展分布式水文模型在该领域的研究工作。本文选择当前世界上得到普遍认可和广泛应用的 VIC 模型, 构建覆盖汉江流域的 5 km × 5 km 网格分布式 VIC 模型, 分析该模型参数的估计方法和区域分布规律, 采用多元回归方法推求 VIC 模型参数的移用公式, 并用于无资料地区的径流模拟。

2. 研究流域概况与实验数据

安康水库位于长江的第一大支流汉江上游, 安康流域集水面积 35,700 km², 地处副热带季风区, 流域气候温和湿润, 是南北气候分界的过度地带。安康流域 5~10 月份的降水量占年降雨量的 80%, 洪水多发生在 7~10 月份, 暴雨强度大, 历时短。

本文研究所用的实验数据主要包括: 1) 汉江上游安康流域水文数据: 1980 年 1 月 1 日~1990 年 12 月 31 日(1980~1986 年作为模型的率定期, 1987~1986 年作为模型的检验期), 118 个雨量站观测资料和 22 个子流域的径流观测资料; 2) 气象数据: 中国气象数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/index.jsp>)提供全国各气象观测站点逐日最高、最低和平均气温数据, 收集了 15 个气象站 1980 年 1 月 1 日~1990 年 12 月 31 日气象数据; 3) DEM: NASA' WIST 数据下载网(<https://wist.echo.nasa.gov/api>)提供全球 30 m 精度的离

散块状 DEM 数据, 经处理, 剪裁得到汉江上游安康流域的 DEM; 4) 植被数据: 美国马里兰大学研制的全球 1 km 精度植被覆盖图经过投影变换和空间重采样得到汉江上游安康流域植被覆盖分布; 5) 土地利用数据: 用汉江上游安康流域边界的图形文件(shapfile)截取世界粮农组织 FAO 发布的全球 1 km 精度土地利用覆盖栅格数据得到研究区域的土地利用数据。

3. 原理和方法

VIC-3L 模型原理详见文献[3]。VIC-3L 模型是一个具有一定物理概念的水文模型, 其主要特点是: 1) 同时考虑陆-气间水分收支和能量收支过程; 2) 同时考虑两种产流机制(蓄满产流和超渗产流); 3) 考虑次网格内土壤不均匀性对产流的影响; 4) 考虑次网格内降水的空间不均匀性; 5) 考虑积雪融化及土壤融冻过程。

3.1. 水文参数网格化

研究 VIC 模型参数的区域分布规律, 建立参数移用公式是 VIC 模型应用中的一个关键问题, 即进行模型参数与气候条件和流域下垫面特征等因素的关系分析, 将有资料地区率定的参数能够合理地移用到无资料地区应用。本文基于 GIS 和 ERDAS 平台, 采用多元回归分析方法建立模型参数与流域内 15 个土壤、气候因子的相关关系。其中有 9 个反映土壤特性的因子, 分别为土壤饱和水力传导变率(*Expt*)、饱和水力传导度(*Ksat*)、气泡压力(*Buble*)、含砂量(*Quartz*)、饱和含水量(*SAT*)、临界含水量比例(*WcrFT*)、凋萎含水量比例(*WpFT*)、体积残余含水量(*RESM*)和有效含水量比例(*Weff*); 其余 6 个反映气候特征(汉江流域为湿润带)的因子, 分别为多年平均气温(*T*)、多年平均降水量(*P*)、多年平均水面蒸发(*E*)、年内月气温变差系数(*Cv_T*)、年内月降水变差系数(*Cv_P*)、年内月水面蒸发变差系数(*Cv_E*)。

分别选择以下三种回归分析方法, 选取拟合效果最佳和最显著的方法, 作为水文模型参数的移用公式^[8-10]。

1) 多元线性回归方法:

$$y_j = \beta_0 + \beta_1 x_{1j} + \beta_2 x_{2j} + \cdots + \beta_m x_{mj} + \varepsilon_j \quad (1)$$

2) 多元平方根回归方法:

$$\sqrt{y_j} = \beta_0 + \beta_1 \sqrt{x_{1j}} + \beta_2 \sqrt{x_{2j}} + \cdots + \beta_m \sqrt{x_{mj}} + \varepsilon_j \quad (2)$$

3) 多元对数回归方法:

$$\log(y_j) = \beta_0 + \beta_1 \log(x_{1j}) + \beta_2 \log(x_{2j}) + \dots + \beta_m \log(x_{mj}) + \varepsilon_j \quad (3)$$

式中: $x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}$ 为可以独立的一般变量(流域的土壤、气象因子); y_j 为可以独立的变量(水文参数), 随 $x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}$ 而变, 受试验误差影响; ε_j 为相互独立且都服从 $N(0, \sigma^2)$ 的随机变量。

在 VIC 水文模型中, 共有 10 个参数需要利用流域实测资料进行率定: 1) B : 表示网格平均含水量与网格最大含水量的相对面积比。取值范围一般是 $10^{-5} \sim 0.4$ 。该值越大, 网格含水量空间分布越不均匀, 地面径流越大; 2) Dm : 最底土壤层中发生的最大基流。该值取决于水力传导度和网格平均坡度, 范围一般在 $0 \sim 30 \text{ mm/day}$; 3) Ds : 当基流非线性增长发生时, 所占 Dm 的比例。 Ds 值越大, 底层土壤在低含水量时的出流越大。取值范围在 $0 \sim 1$; 4) Ws : 基流非线性增长发生时, 底层土壤含水量与最大土壤含水量的比值。取值范围在 $0 \sim 1$ 。当 Ws 增加时, 会使产生基流非线性增长时的土壤含水量增大, 从而使洪峰延迟; 5) VIC 模型的 3 层土壤层深度 $Dep1, Dep2, Dep3$: 土壤深度直接影响着蒸散发和洪峰的计算, 取值范围一般为 $0.01 \sim 1.5 \text{ m}$; 6) 汇流参数 x, k, ckg : x 表示调蓄系数, k 表示河段平均传播时间, ckg 表示基流调蓄系数。

3.2. 水文气象数据的网格化

VIC 模型所需要的水文气象数据输入是时段累积降水量、时段最高气温和最低气温。每个网格的水文气象条件是依据附近雨量站和气象站的观测值, 采用距离倒数平方插值方法计算得到, 具体步骤如下: 1) 若网格中心离某站点足够近(如两点之间距离 $\leq 1 \text{ m}$), 则直接采用该站数据; 2) 否则取距离网格中心最近的 3 个站点, 以距离倒数平方作为权重进行插值。

距离倒数平方假定网格格点的降雨或气温值可由它周围 3 个雨量或气象站的实测值确定, 认为待估点 (x, y) 的值与 3 个参证站的实测值成正比, 与该点到参证站的距离成反比, 计算公式如下:

$$Z^*(x, y) = \sum_{i=1}^3 \alpha_i(t) Z_i(t) \quad \alpha_i(t) = \frac{1/D_i^2}{\sum_{i=1}^3 1/D_i^2} \quad (4)$$

式中: $Z_i(t)$ 为在某个时间段第 i 个参证站的实测降雨

或气温值; D_i 为待估点 (x, y) 到第 i 个参证站的距离。

3.3. 植被参数网格化

采用美国马里兰大学研制的全球 1 km 土地覆被资料, 用来描述汉江集水区域的植被覆盖分布, 该土地覆被分类将全球分为 14 种陆面覆盖类型, 第 0 类为水体, 第 1~11 类为 11 种植被类型, 第 12 类为裸土, 第 13 类为城市建筑。VIC 模型中考虑了植被的蒸发蒸腾和冠层截留, 对每种植被类型需要标定的参数有: 结构阻抗、最小气孔阻抗、叶面积指数、反照率、粗糙率、零平面位移等。首先对全球 1 km 土地覆被数据作投影转换, 然后利用流域边界从中切取出汉江流域土地覆被数据, 用建好的流域网格切割得到汉江上游安康流域土地覆被空间分布, 以上步骤在 ERDAS 和 ArcGIS 软件中实现。建立植被覆盖参数网格数据库, 包括各个网格内植被类型的总数、每种植被在该网格所占的面积比例及每种植被根区深度和所占的比例。

3.4. 土壤参数网格化

土壤质地分类采用世界粮农组织 FAO 发布的全球土壤数据, FAO 土壤数据对两种深度的土壤特性进行了描述, 其中 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 为上层, $30 \sim 100 \text{ cm}$ 为下层。研究中 VIC 模型第 1、2 层的土壤参数取上层土壤数据的值, 第 3 层土壤的土壤参数取下层土壤数据的值。用与土地覆被类似的方法提取出汉江上游安康流域上、下两层土壤的土壤类型空间分布。在土壤参数中与土壤特性有关的参数, 在模型率定后就不再改动, 如土壤饱和和体积含水量、饱和土壤水势、土壤饱和水力传导度等。以上步骤在 ArcGIS 软件中实现。选取每个网格内面积比例最大的一类土壤代表该网格土壤类型, 生成土壤类型网格参数库。

4. 研究结果与分析

首先对有资料流域进行水文参数的多元回归分析建立参数移用公式, 然后按地理位置选取汉江上游安康流域的褒河(上游)和岚河(下游)为例(汉江上游流域 22 个子流域中这 2 个子流域没有参与参数移用公式的建立)作为无资料验证流域, 检验所建立的 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 网格分布式 VIC 水文模型在无资料地区日径流过程模拟能力。

4.1. 水文参数区域规律分析

在模型的率定期内, 应用公式(1)~(3)对汉江上游安康流域 20 个有资料子流域的 10 个水文参数与流域内 15 个土壤、气候因子进行多元回归分析, 所建立的参数移用公式显著性水平都在 5% 以内, 并且需通过 5% 显著性水平的 F 检验(F 分布计算值大于理论值 $F_{\alpha}(m, n-m-1)$), 则通过 F 检验, α 为显著性水平; m 为回归因子个数; n 为样本容量)。三个汇流参数 x , k , ckg 及下层土壤层深度 $Dep3$ 与土壤、气候因子关系不显著, 未通过 F 检验。表 1 给出了其它 6 个水文参数移用公式的变量个数、显著性 F 检验、回归模型类型和确定性系数(R^2)。 R^2 表示回归方程计算结果的可信度, 系数越高越可信。表 1 显示参数移用公式的确定性系数从 62.8%~84.9%, 可信度最好的是 Ds 的移用公式, 其次是 Dm , 最差的是 $Dep2$ 。各参数移用公式均通过了 5% 显著性水平的 F 检验。6 个水文参数中有 4 个采用多元平方根模型, 水文参数与土壤、气候因子的关系为非线性为主。从中可看出水文参数与气候特征和土壤的下渗特性密切相关。图 1 给出了 6 个参数移用公式计算值和率定值的拟合效果图。图 1 显示了水文参数通过流域资料率定值和模型计算值

具有较好的一致性。可以使用参数移用公式计算无资料地区的水文参数。

图 2 给出了移用公式计算的汉江安康流域 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 网格 VIC 模型水文参数的分布。图 3 则是安康流域 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 网格 6 个气候因子分布图。与文献 [10] 所得模型参数区域规律类似, 对汉江安康流域, 其 VIC 模型参数具有如下规律:

参数 B 的取值范围从 0.15~0.45。参数 B 主要与年内月降水量变差系数(SAT)和年内月降水量变差系数(Cv_P)相关, 都为正相关。

参数 Ds 的取值范围从 0.10~0.85。参数 Ds 主要与年内月降水量变差系数(Cv_P)和年内月蒸发变差系数(Cv_E)相关, 都为正相关。

参数 Dm 的取值范围从 0.31~5.17。参数 Dm 主要与凋萎含水量($WpFT$)和多年平均降水量(P)相关, 都为正相关。

参数 Ws 的取值范围从 0.27~0.82。参数 Ws 主要与年内月降水量变差系数(Cv_P)和含沙量($Quartz$)相关, 与 Cv_P 为负相关, 而与 $Quartz$ 呈正相关。

参数 $Dep1$ 的取值范围从 0.02~0.13。参数 $Dep1$ 主要与土壤饱和水力传导变率($Expt$)和多年平均气温

Table 1. Parameter variation analysis of the VIC model
表 1. VIC 模型参数变化规律分析

序号	变量	B	Ds	Dm	Ws	$Dep1$	$Dep2$
1	$Expt$				√	√	√
2	$Ksat$				√		
3	$Buble$			√			
4	$Quartz$			√	√		
5	SAT	√					√
6	$WcrFT$			√	√		
7	$WpFT$	√		√		√	
8	$RESM$	√					
9	$Weff$						√
10	T					√	√
11	P			√			
12	Em		√			√	
13	Cv_T	√	√	√			
14	Cv_P	√	√		√	√	
15	Cv_E		√			√	√
	变量个数	5	4	6	5	6	5
	F	5.77	18.25	6.62	10.57	3.81	7.21
	回归模型	平方根	平方根	平方根	线性	线性	平方根
	确定性系数 $R^2(\%)$	66.7	84.9	75.8	69.7	76.6	62.8

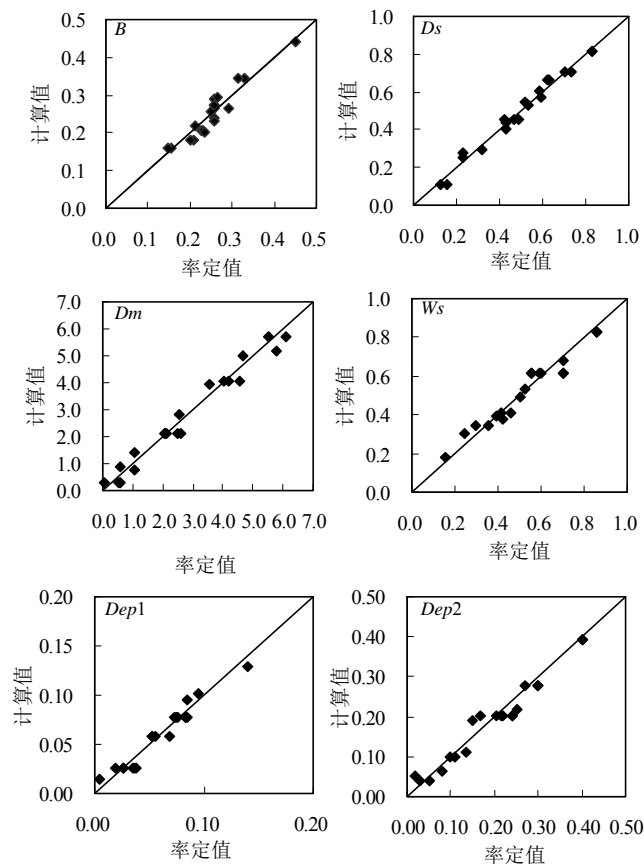
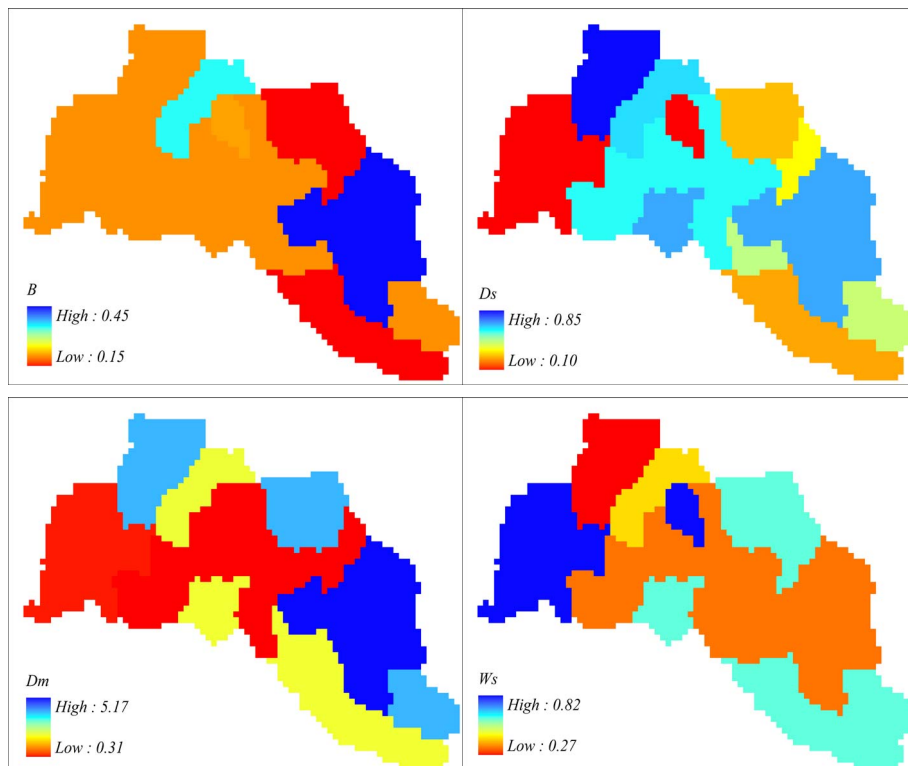


Figure 1. Comparison of calibrated and calculated parameters of the VIC model
图 1. VIC 模型水文参数率定值和移用公式计算值比较图



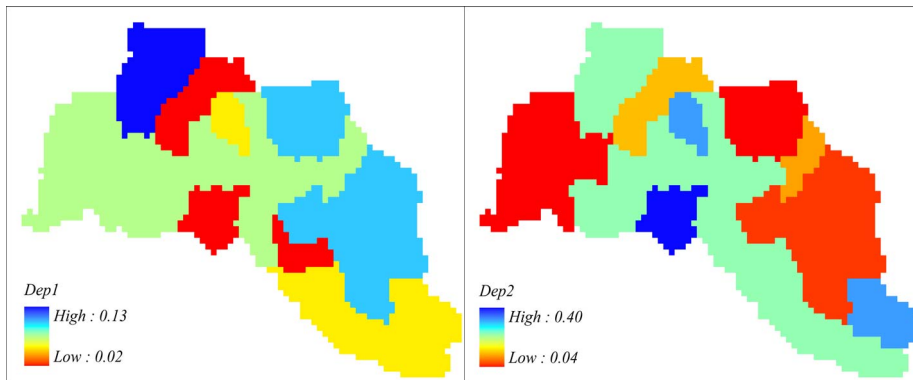


Figure 2. The parameter distribution map of the VIC model with 5 km × 5 km grid in the Ankang basin
图 2. 安康流域 5 km × 5 km 网格 VIC 模型参数分布图

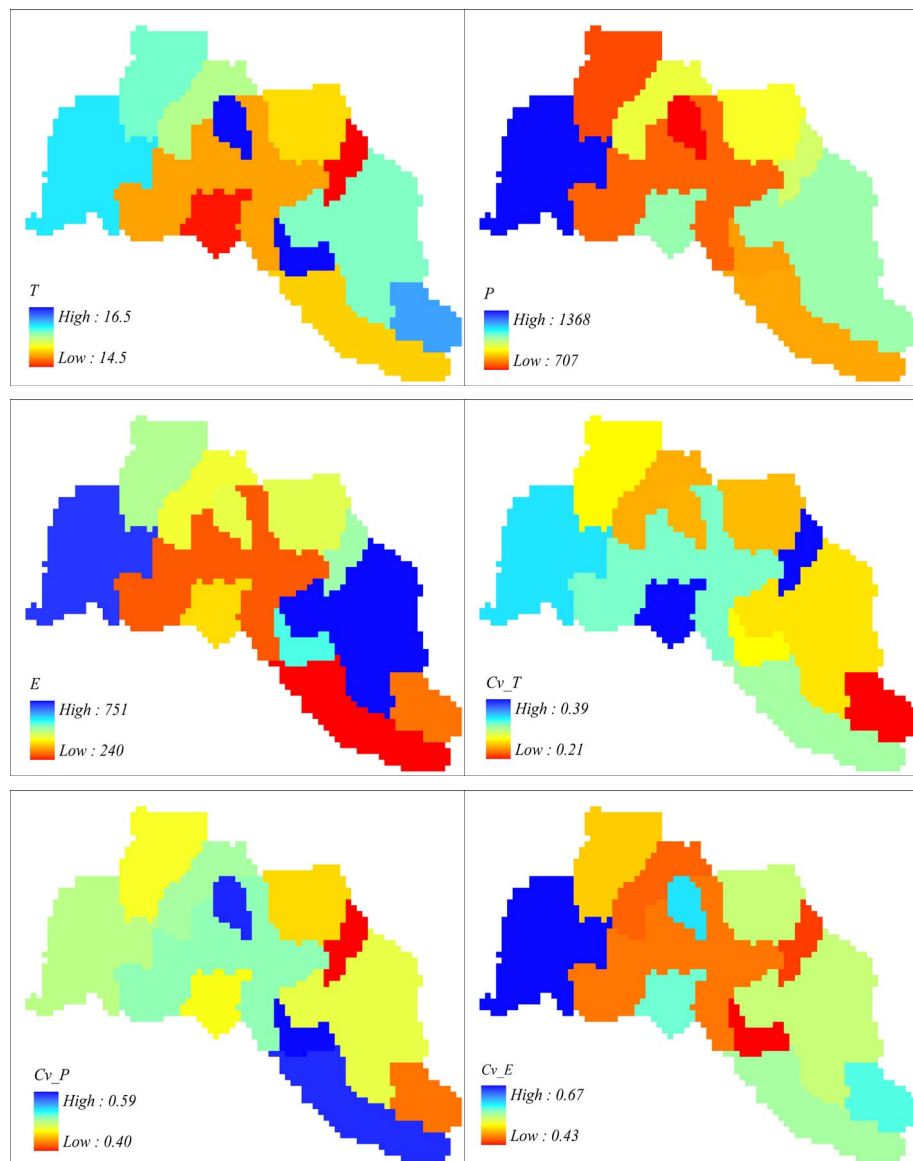


Figure 3. The climatic factor distribution map with 5 km × 5 km grid in the Ankang basin
图 3. 安康流域 5 km × 5 km 网格气候因子分布图

(T)相关, 都为负相关。

参数 $Dep2$ 的取值范围从 0.04~0.40。参数 $Dep2$ 主要与年内月蒸发变差系数(Cv_E)和多年平均气温(T)相关, 都为负相关。

4.2. 水文参数移用

在 1980 年~1990 年研究时段内, 为验证参数移用公式的效果, 将参数移用公式应用于无资料参数验证子流域, 这些子流域没有参与移用公式的建立, 具有

独立性。表 2 是移用公式计算和率定的水文参数在汉江上游安康流域逐日的径流模拟效果对比统计表。为进一步可视化对比, 图 4 给出了 1980 年~1990 年干流控制站模拟与实测逐日径流过程比较图。从验证结果来看, 移用公式在汉江安康流域湿润地区的效果较好。在褒河和岚河子流域, 采用移用公式计算的模型参数, 模拟的干流控制站日径流过程确定性效率系数分别为 91.41%、90.01%和 86.55%(率定期); 76.83%、75.04%和 76.93%(检验期), 接近有资料地区参数率定的结果。

Table 2. Comparison of simulation results with calculated and calibrated parameters
表 2. 移用公式计算和率定的水文参数在安康流域的模拟效果对比表

序号	干流 水文站	时间/年	参数由移用公式计算		参数由资料率定	
			RE (%)	R ² (%)	RE (%)	R ² (%)
1	汉中	率定期 1980~1986	91.41	8.07	94.89	7.32
2	石泉		90.01	12.97	92.42	12.54
3	安康		86.55	12.71	88.49	12.37
1	汉中	检验期 1987~1990	76.83	15.71	77.41	14.45
2	石泉		75.04	16.34	76.50	15.87
3	安康		76.93	14.26	78.17	13.75

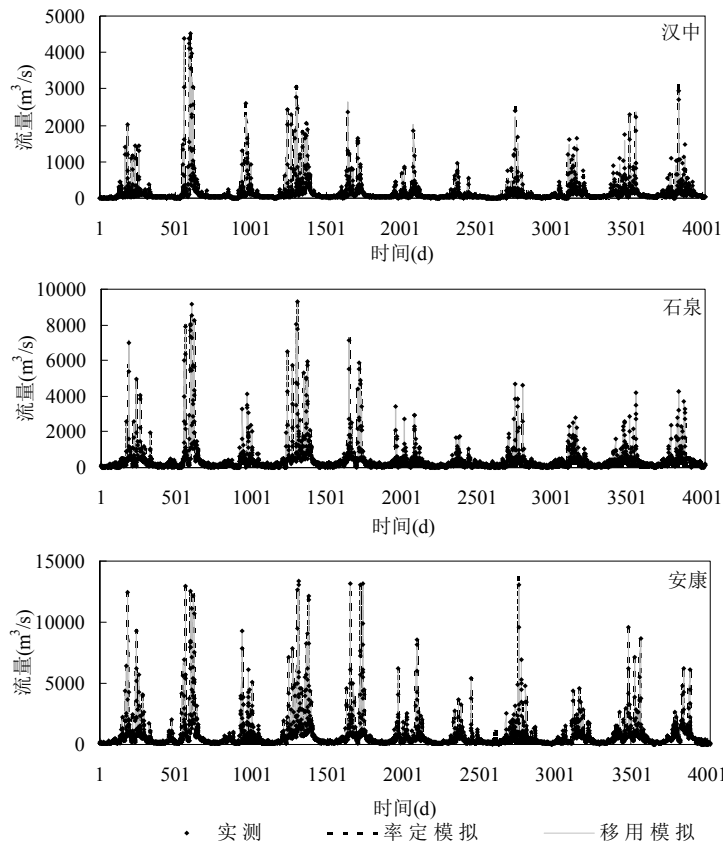


Figure 4. Comparison of observed and simulated daily flow hydrographs in the validated basins
图 4. VIC 验证流域模拟和实测日径流过程比较图

5. 结论

VIC 模型基于物理过程的蒸散发计算, 同时可考虑水量和能量平衡及网格参数空间分布不均匀性等特性。本文研究了 VIC 模型参数的确定方法和区域分布规律, 采用多元回归模型构建了 VIC 模型参数在汉江流域的移用公式, 建立了汉江流域 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 网格的 VIC 模型, 并用于无资料地区的径流模拟, 效果较好。

参考文献 (References)

- [1] 熊立华, 郭生练. 分布式流域水文模型[M]. 中国水利水电出版社, 2004.
XIONG Lihua, Guo Shenglian. Distributed hydrologic model. China WaterPower Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 徐宗学, 程磊. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报, 2010, 41(9): 1009-1017.
XU Zongxue, CHENG Lei. Progress on studies and applications of the distributed hydrological models. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(9): 1009-1017. (in Chinese)
- [3] LIANG, X., LETTENMAIER, D. P., WOOD, E. F., et al. A simple hydrologic ally based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(7): 14415-14428.
- [4] VANDEWIELE, G. L., ATLABACHEW, E. Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalization. Journal of Hydrology, 1995, 170(9): 277-291.
- [5] YOUNG, A. R. Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rain-runoff model. Journal of Hydrology, 2006, 320(6): 155-172.
- [6] 井立阳, 张行南, 王俊, 等. GIS 在三峡流域水文模拟中的应用[J]. 水利学报, 2004, 4: 15-20.
JING Liyang, ZHANG Xingnan, WANG Jun, et al. Application of GIS in simulation of river basin hydrology in Three Gorges Project reservoir. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 4: 15-20. (in Chinese)
- [7] GOSWAMI, M., O'CONNOR, K. M. and BHATTARAI, K. P. Development of regionalisation procedures using a multi-model approach for flow simulation in an ungauged catchment. Journal of Hydrology, 2007, 333(9): 517-531.
- [8] DONALD, H. B., BOORMAN, D. B. Estimation of hydrological parameters at ungauged catchments. Journal of Hydrology, 1993, 143(3): 429-454.
- [9] GUO Shenglian, WANG Jinxing, XIONG Lihua, et al. A marco-scale and semi-distributed monthly water balance model to predict climate change impacts in China. Journal of Hydrology, 2002, 268(4): 1-15.
- [10] 陆桂华, 吴志勇, 何海. 水文循环过程及定量预报[M]. 科学出版社, 2010.
LU Guihua, WU Zhiyong and HE Hai. Hydrological cycle and quantitative forecasts. Science Press, 2010. (in Chinese)