

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.05.003

考虑基岩裂隙作用的流域水文过程模拟

石清^{1,2}, 陈喜¹, 魏玲娜³, 张志才¹

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 中国水电顾问集团北京勘测设计研究院, 北京 100024; 3. 南京信息工程大学水文气象学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 利用分布式水文-土壤-植被模型(DHSVM), 根据枯期径流2段退水规律, 建立基岩裂隙水运动的计算方法, 实现了DHSVM的改进。根据东江星丰流域地形、土壤、植被及水文地质特征, 采用现场观测、遥感资料分析及室内试验等手段, 确定星丰流域植被、土壤、基岩裂隙特征参数。利用2003—2008年实测气象、水文资料进行参数率定和模型验证。采用扰动分析法分析改进的DHSVM参数对径流、蒸散发影响的灵敏度。结果表明: 改进的DHSVM实现了裂隙含水层对径流的调节, 能更好地模拟枯期基流, 提高了流域水文过程的模拟精度。

关键词: 分布式水文模型; DHSVM; 基岩裂隙水; 枯期径流; 星丰流域

中图分类号: P333.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2013)05-0389-06

Hydrological processes modeling under influence of bedrock fissure

SHI Qing^{1, 2}, CHEN Xi¹, WEI Lingna³, ZHANG Zhicai¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. HydroChina Beijing Engineering Corporation, Beijing 100024, China;

3. College of Hydrometeorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the distributed hydrology soil vegetation model (DHSVM), two-period recession curves of the hydrographs were adopted according to the characteristics of flood recessions and geological conditions. Considering the hydraulic contacts of bedrock fissure water in the water cycle, we modified DHSVM in this study. A case study was conducted in the Xingfeng Basin in the Dongjiang red-soil hilly region. Vegetation, soil, and bedrock fissure parameters were determined based on remote sensing (RS) data as well as field and laboratory experiments. Hydrological and meteorological observation data from 2003 to 2008 were used for parameter calibration and model verification. The perturbation analysis method was used for sensitivity analysis, in order to study how the changes of the model parameters influence runoff and evapotranspiration. The results show that, when the modified DHSVM is used, the fissure aquifer can be used to regulate runoff, and the model can simulate low flow better and increase the accuracy of hydrological processes simulation.

Key words: distributed hydrological model; DHSVM; bedrock fissure water; low flow; Xingfeng Basin

美国华盛顿大学开发的分布式水文-土壤-植被模型(DHSVM)包含了地表与土壤水流的描述, 可以较好地模拟洪水过程^[1]。然而, 已有研究发现在进行长期水文过程模拟时, 现有模型对枯期径流拟合普遍较差^[2]。国内新安江模型用于流量过程模拟时, 退水段的流量过程主要受地下水消退系数控制, 该系数对退水段影响较大^[3,4]。在参数调试过程中, 退水段的拟合精度有时与整个流量过程的拟合精度相矛盾, 故在模

收稿日期: 2012-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(51079038, 51190090, 40930635)

作者简介: 石清(1987—), 男, 江苏盐城人, 助理工程师, 硕士, 主要从事水文循环与模拟研究。E-mail: shiqing_13@126.com

通信作者: 陈喜, 教授。E-mail: xichen@hhu.edu.cn

拟过程中需综合考虑两者之间的关系,尽量做到兼顾两者的拟合精度^[5]。

在我国南方广大山丘区,枯期径流不仅来源于土壤层,还来源于下覆基岩裂隙水。基岩裂隙水是我国分布最广泛的地下水类型之一,浅部裂隙地下水都与上覆土壤水有不同程度的循环交替^[6],进而影响产汇流过程。笔者以东江流域内星丰流域为研究区,基于 DHSVM 2.0 版本,根据流域地形、土壤、植被覆盖率动态变化特征以及基岩裂隙水对径流的调节作用,建立考虑植被-土壤-基岩裂隙作用的分布式水文模型,模拟红壤丘陵区流域水文过程。

1 流域概况及观测资料

星丰流域地处东江上游,为高丘陵山区,面积 42.6 km²,海拔 150 ~ 508 m,平均比降为 3.14%。流域内土壤主要为麻赤红壤、页赤红壤和潜育水稻土,其中麻赤红壤占 72%,土层较厚。按国际制土壤分类标准,流域土壤概化为壤土、砂壤土和黏土 3 种类型。经室内实验分析,土壤密度为 1.32 ~ 1.45 g/cm³,孔隙率为 41% ~ 45%,土壤含水率为 12.3% ~ 32.7%。

星丰流域位于地下水二级功能区东江河源和平地下水水源涵养区,基岩裂隙水是枯期径流的主要来源^[7]。研究区内基岩多属变质岩类裂隙含水岩组,石英砂岩占 77.4%,粉砂岩占 22.6%。花岗岩风化后形成的风化壳比较深厚,一般在 10 m 以上,深厚者可达 30 ~ 40 m。风化壳含有很多石英砂,其黏结力差、透水性强、结构松散^[8]。

星丰流域林地占流域面积的 91%,耕地占 8%,其余为建筑用地和水面。野外实地考察发现,星丰流域现状覆被以松、杉混杂的针叶林为主。基于 2001 年 1 月 8 日至 2008 年 12 月 18 日共 184 期 250 m×250 m 空间分辨率的 MODIS 植被指数 EVI 数据(MOD13Q1),利用 Mu 等^[9]2007 年提出的算法,反演不同类型的植被覆盖率 F (图 1(a))。基于 MODIS 数据(MOD13Q1,MOD15A2,MOD09A1),求得不同类型的植被覆盖率 F (图 1(a))、典型覆被叶面积指数(L)的月变化曲线(图 1(b))以及各种植被类型的短波冠层反射率 A (图 1(c))。

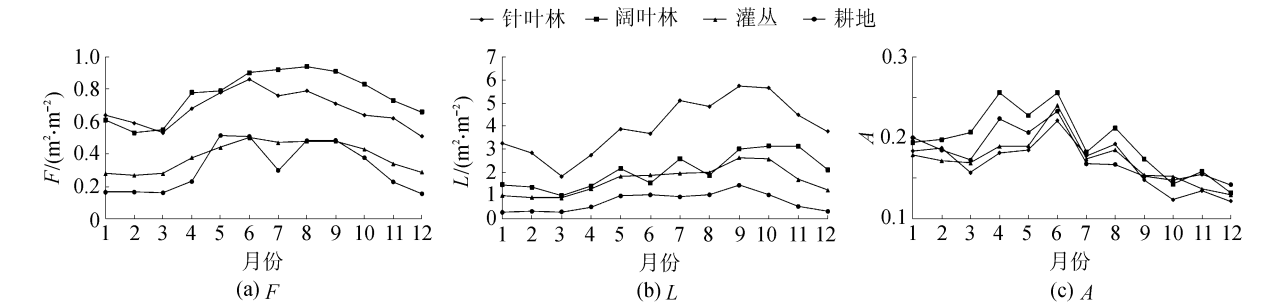


图1 不同植被的 F, L 和 A 月变化过程
Fig. 1 Monthly variations of fractional coverage F , leaf area index L , and canopy reflection A for different types of vegetation

采用流域内 4 个雨量站和 1 个水文站 2004—2008 年实测逐日降雨和流量观测资料,并移用研究区附近河源气象站气温、风速、相对湿度、长短波辐射等气象资料进行模型计算。

2 DHSVM 及改进

2.1 DHSVM 结构

DHSVM 以地面高程模型 (DEM) 栅格节点为中心,将流域划分为若干计算栅格单元。根据栅格单元地形特征,描述短波辐射、降雨、气温、坡面流及栅格单元土壤和植被特性时空变化,在每一个计算时段内,根据各栅格的能量和质量平衡方程联立解、栅格单元间坡面流和壤中流汇流演算方法,建立栅格单元水文联系。根据河道分级演算,计算河网汇流过程。DHSVM 实现了栅格尺度上流域水文过程及其与下垫面植被、土壤等影响因素的系统描述。

DHSVM 中降雨分别被上、下冠层植被截留,直至最大截留能力 I_{ej} :

$$I_{ej} = r_j L_j F_j \tag{1}$$

式中: r_j ——冠层截留系数; F_j ——冠层覆盖率。下标 j 若为 o 则表示上冠层,若为 u 则表示下冠层。

冠层截留量变化为

$$S_{t+\Delta t} = S_t + P - E_{lj} \tag{2}$$

式中： S_t —— t 时刻冠层截流量； P ——降雨量； E_{lj} ——植被潮湿部分蒸发量（即截留雨量蒸发）。

采用双层 Penman-Monteith 方法模拟上、下冠层散发量，结合土壤水分条件计算土壤实际蒸发量^[10]，三部分之和作为实际总蒸散发量。

a. 植被潮湿部分蒸发量：

$$E_{lj} = E_{pj} A_{wj} \Delta t_w \tag{3}$$

其中

$$E_{pj} = \begin{cases} E_{po} & \text{上冠层} \\ E_{po} - (E_{lo} + E_{To}) & \text{下冠层} \end{cases}$$

式中： E_{pj} ——潜在蒸散发量； A_{wj} ——潮湿部分面积，干燥部分则为 $(1 - A_{wj})$ ； Δt_w ——以 E_{pj} 蒸发截留雨量所需时间。

b. 植被干燥部分散发量：

$$E_{Tj} = E_j [(1 - A_{wj}) \Delta t + A_{wj} (\Delta t - \Delta t_w)] \tag{4}$$

$$E_j = \frac{E_{pj} (\zeta + \gamma)}{\zeta + \gamma \left(1 + \frac{r_{ej}}{r_{aj}} \right)}$$

式中： E_j ——植被表面蒸腾量； ζ ——饱和水汽压 ~ 气温关系曲线的斜率； γ ——空气湿度常数； r_{ej} ——冠层阻力； r_{aj} ——空气动力学阻力； Δt ——计算时段长。

c. 土壤实际蒸发量：

$$E_s = \min(E_{ps}, F_e) \tag{5}$$

其中

$$E_{ps} = E_{po} - (E_{lo} + E_{To})$$

式中 F_e 为土壤解吸率，由土壤对表层的输水速率确定，是土壤类型和上层土壤含水量的函数。

d. 土壤层水量平衡采用 3 层根带模式模拟水分在上、中、下非饱和土壤层中的运动：

$$d_1(\theta_{1,t+\Delta t} - \theta_{1,t}) = I_f - Q_v(\theta_1) - (f_{o,1}E_o + f_{u,1}E_u) - E_s + V_{ex2} - V_{ex1} \tag{6}$$

$$d_k(\theta_{k,t+\Delta t} - \theta_{k,t}) = Q_v(\theta_{k-1}) - Q_v(\theta_k) - (f_{o,k}E_o + f_{u,k}E_u) + V_{exk+1} \tag{7}$$

$$d_n(\theta_{n,t+\Delta t} - \theta_{n,t}) = Q_v(\theta_{n-1}) + (Q_{sin,t} - Q_{S,t}) \Delta t \tag{8}$$

式中： d_k ——第 k 层土壤的厚度； n ——土壤层数； θ_k ——第 k 层土壤的含水率； I_f ——计算时段内渗入土壤层中的水量； Q_v ——流入下层的水量； $f_{o,k}$ 、 $f_{u,k}$ ——第 k 层土壤中对上冠层、下冠层的根系比； V_{exk} ——地下水位上升时地下水对土壤水的补给； $Q_{sin,t}$ 、 $Q_{S,t}$ ——计算时段初侧向壤中流的入流量、出流量。

假定土壤饱和渗透系数随土壤深度呈指数递减，推导出土壤导水系数 $T_{x,y}$ 的计算公式如下：

$$T_{x,y}(z_{x,y}, D_{x,y}) = \frac{K_{x,y}}{f_{x,y}} (e^{-f_{x,y}z_{x,y}} - e^{-f_{x,y}D_{x,y}}) \tag{9}$$

式中： $K_{x,y}$ ——栅格 (x, y) 表层土壤侧向饱和渗透系数； $f_{x,y}$ ——指数衰减系数； $z_{x,y}$ ——地下水位埋深； $D_{x,y}$ ——土壤层厚度。

采用运动波方法计算侧向饱和壤中流，用 Wigmosta^[11] 发展的准三维路径模式计算坡面流。坡面地表流、壤中流逐栅格汇流并流向流域低洼处汇集进入河道，利用线性槽蓄法进行河道汇流演算。

2.2 模型改进

分析星丰流域 2003—2008 年实测日流量过程，依据饱和水运动 Deput-Boussinesq 方程对退水过程较长的典型年份（2003 年、2004 年、2006 年）退水过程进行拟合（图 2）。由图 2 可知，退水特征明显表现为 2 个阶段，原因在于南方红壤丘陵区多为二元水文地质结构^[12]，退水段径流主要来源于土壤层及基岩裂隙水。上层土壤层渗透性按式（9）进行衰减，退水较快；下层基岩裂隙退水过程较稳定。因此，笔者在饱和土壤层之下添加裂隙含水层模块，综合考虑土壤水和基岩裂隙水之间的水力联系，对 DHSVM 进行改进。

采用 Wigmosta 等^[13] 提出的地形驱动影响下饱和壤中流的计算方法，利用地下水位（而不是地面高程）计算栅格之间的水力梯度。由于水头的变化，需要对每一个计算时段内的地下水位和相应的坡度、坡向、流向、水力梯度进行计算。裂隙含水层的水分运动分为垂向和侧向两部分进行计算，地下水流量的计算公式

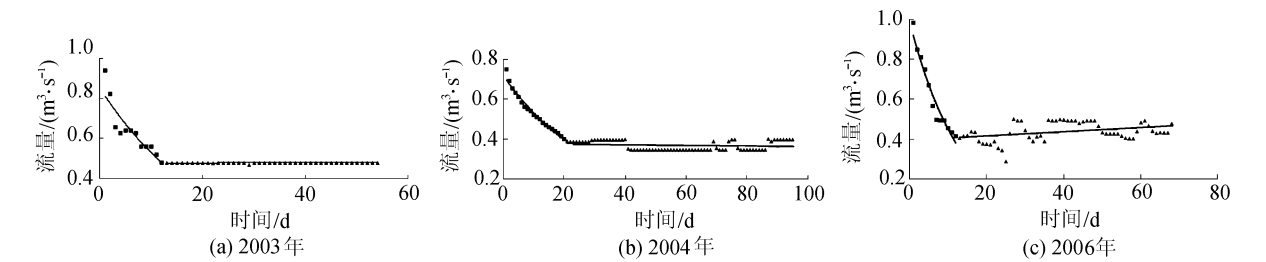


图 2 星丰流域枯期径流退水过程规律

Fig. 2 Low-flow curve fitted by Depuit-Boussinesq model for Xingfeng Basin

如下:

$$Q_{x,y} = \sum_{i=0}^3 f_i G_{\text{GW}} K_l S + G_{\text{GW}} K_d S$$

(10)

式中: f_i ——栅格 (x,y) 在 i 方向的流线宽度; G_{GW} ——水力梯度; K_l ——裂隙含水层侧向水力传导率; S ——栅格单元内含水层含水量; K_d ——含水层下基岩的垂向传导率。

裂隙含水层的水量平衡方程为

$$S_{t+\Delta t} = S_t + (Q_{\text{Gin},t} - Q_{\text{G},t} + Q_{\text{v,GW}}) \Delta t - V_{\text{ex,GW}}$$

(11)

式中: $S_t, S_{t+\Delta t}$ —— $t, t+\Delta t$ 时刻裂隙含水层含水量; $(Q_{\text{Gin},t} - Q_{\text{G},t})$ ——裂隙含水层中基流的净增水量(单元栅格中侧向流入量 $Q_{\text{Gin},t}$ 减去流出量 $Q_{\text{G},t}$); $Q_{\text{v,GW}}$ ——上覆土壤层向裂隙含水层渗漏的水量; $V_{\text{ex,GW}}$ ——裂隙含水层水位上升对其上覆土壤层的补给量。

紧邻裂隙层的上覆土壤层水量平衡方程式改写为

$$d_n(\theta_{n,t+\Delta t} - \theta_{n,t}) = Q_v(\theta_{n-1}) + (Q_{\text{sin},t} - Q_{\text{S},t} - Q_{\text{v,GW}}) \Delta t + V_{\text{ex,GW}}$$

(12)

当裂隙含水层没有到达饱和时,上覆饱和壤中流以下渗的形式对裂隙含水层进行补给,直至裂隙含水层饱和。当栅格单元内裂隙含水层的含水量大于其最大容量时,多余的水量将“返还”给上覆土壤层。除了和上覆土壤进行水分交换,裂隙含水层水分还会向下渗透,逸出含水层,形成“深层损失”,“深层损失率”由基岩的水力传导率决定。当栅格单元内的地下含水层水位高于河床,裂隙含水层水量将会被河道截留。

3 模型应用

3.1 模型率定与验证

根据 DEM 将流域划分为 50 m×50 m 栅格,共 162 行、156 列。模型计算参数率定期为 2003—2006 年,验证期为 2007—2008 年,计算步长为 2 h。根据模型计算与实测流域出口断面流量过程,采用人工试错法对模型参数进行率定。通过确定性系数和径流深相对误差来评测模型日径流模拟的精度。表 1、表 2 列出了模型主要土壤、基岩裂隙以及植被特征参数的取值。

表 1 土壤及基岩裂隙特征参数
Table 1 Soil property parameters

土壤类型	侧向传导率/ (10 ⁻⁵ m · s ⁻¹)	指数 递减系数	垂向传导率/ (10 ⁻⁵ m · s ⁻¹)	孔隙度/ %	气孔分布 系数	田间持水量/ %	凋萎系数
砂壤土	8.0	0.3	2.0	45.3	0.378	21	0.095
壤土	5.0	0.3	1.0	46.3	0.252	29	0.117
黏土	2.5	0.3	8.0	47.5	0.165	36	0.272
基岩层	5.0	0	1.0	20.0			

表 3 为利用 DHSVM 及本文改进的 DHSVM 进行参数率定与模型验证的结果。如不考虑基岩裂隙水,率定期枯水年份(2003 年、2004 年)计算径流量 R 显著偏小,丰水年份(2005 年、2006 年)则偏大。这是因为 DHSVM 本身在枯水处理方面有一定缺陷,存在退水衰减过快的问题,枯季径流模拟效果不佳。在模型率定中,由于枯水年径流较小,模拟径流深偏小,为了在连续模拟中保持水量平衡,使丰水年径流模拟结果相应地偏高。进一步分析发现,裂隙含水层对年内径流分配具有一定的调节作用,改进后 DHSVM 模拟年径流确定性系数有显著提高(表 3),流量过程线的吻合度较高(图 3)。

表 2 植被特征参数
Table 2 Vegetation property parameters

植被类型	植被覆盖率/ %	空气动力学 衰减指数	辐射 衰减指数	植被参考 高度/m	树干比例 系数	气孔阻力/(s·m ⁻¹)		叶面积 指数	冠层 反射率
						最大	最小		
针叶林	51~86	2.0	0.15	12.5	0.5	5000	125	1.83~5.74	0.12~0.22
阔叶林	53~94	1.5	0.20	12.5	0.5	5000	150	1.01~3.15	0.13~0.26
灌丛	27~50	2.0	0.20	1.5	0.4	3000	170	0.91~2.65	0.13~0.24
耕地	16~51	2.0	0.10	1.1	0.2	3000	40	0.29~1.45	0.14~0.23

表 3 DHSVM 改进前后蒸散发及径流模拟结果
Table 3 Comparison of evapotranspiration and streamflow before and after DHSVM revision

年份	P/mm	E_1/mm	E_c+E_s/mm		实测	R/mm		确定性系数		相对误差/%	
			改进前	改进后		改进前	改进后	改进前	改进后	改进前	改进后
2003	1 310.4	137.0	741.2	735.5	741.8	607.5	670.1	0.716	0.745	-18.1	-9.7
2004	1 293.3	130.4	703.6	695.8	570.1	466.3	494.1	0.032	0.720	-18.2	-13.3
2005	1 989.8	154.3	613.4	613.2	952.3	1 166.9	1 091.5	0.729	0.900	22.5	14.6
2006	2 336.5	146.4	663.0	664.0	1 242.7	1 440.6	1 433.5	0.354	0.664	15.9	15.4
2007	1 565.7	145.8	714.5	703.2	609.9	743.7	775.2	0.626	0.748	21.9	27.1
2008	1 761.0	164.0	729.0	726.6	995.1	866.2	862.5	0.361	0.681	-12.9	-13.3

注: E_I 为上、下冠层总截留蒸发量; E_c 为上、下冠层植被总散发量。

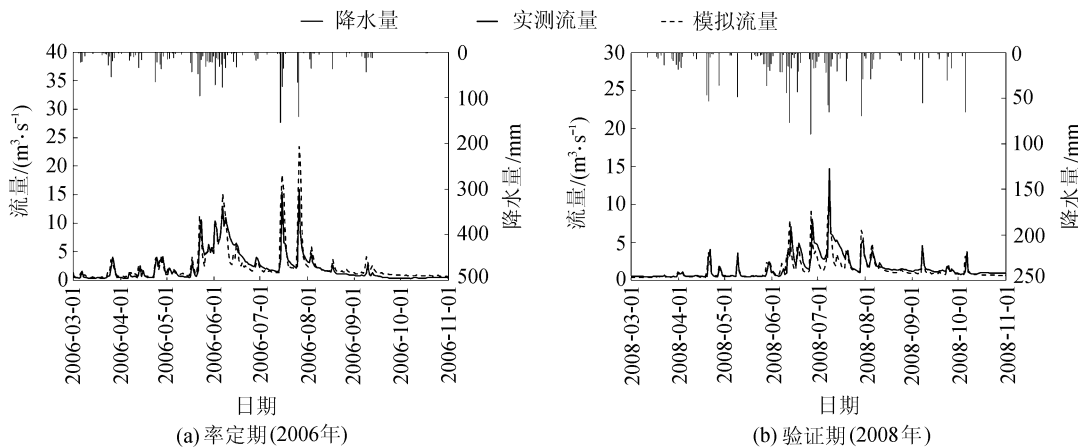


图 3 实测与模拟流量过程线
Fig. 3 Observed and simulated streamflow

利用实测流量和模型改进前、后的模拟流量序列,采用期望值公式,将流量按从大到小进行排频(图 4),显然,考虑裂隙作用对枯期流量模拟结果改进显著。进一步选取频率为 75% 的流量值 $Q_{75\%}$ 作为枯季径流的特征值,统计出不同历时下实测和模型改进前、后模拟的枯季流量低于 $Q_{75\%}$ 的发生次数(图 5)。通过比较可以发现,改进后枯期径流模拟精度比改进前有较大提高。

3.2 参数灵敏度分析

选用扰动分析法,计算参数在小范围内变化所导致的模型输出变化率,通过敏感度因子 S_{en} 加以衡量,计算公式如下:

$$S_{en} = \frac{y' - y}{y} \frac{x}{\Delta} \tag{13}$$

式中: y, y' ——参数变化前、后输出值; x ——变化前参数值; Δ ——参数变化值。

选取各参数敏感度因子的算数平均值作为该参数的灵敏度值,模型计算输出值选用上覆土壤层含水量、日平均蒸散发量、日平均流量以及汛期日平均流量、枯季日平均流量。

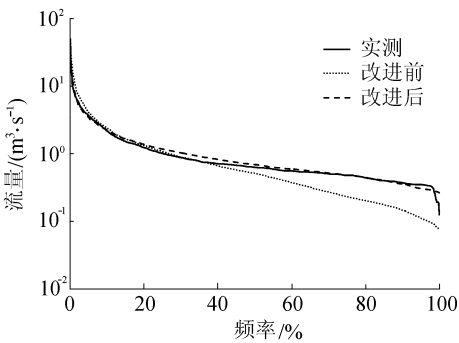


图 4 实测与模拟流量历时曲线
Fig. 4 Observed and simulated flow duration curves

分析表明:对上覆土壤层含水量最敏感的参数是孔隙度 Φ 和田间持水量 θ_{fc} ,其他参数敏感度都较小;对日平均蒸散发量较敏感的参数有植被参考高度 H , F , θ_{fc} 、最小气孔阻力 $R_{s_{min}}$;对日平均径流量最敏感的参数排序为 $H, F, \theta_{fc}, R_{s_{min}}$,其中汛期日径流量敏感性系数较大的参数主要有 H, F, Φ 和裂隙含水层孔隙度 G_p ,而枯期日径流量敏感性系数较大的参数主要是 Φ, θ_{fc}, G_p 。由此可见,上覆土壤含水量及蒸散发主要受土壤、植被参数影响,基岩裂隙含水层参数对汛期和枯期径流起调节作用,减少汛期流量、增加枯期流量,对枯期流量影响显著,但对全年流量影响不大。

4 结 语

根据东江星丰流域植被、土壤、基岩特征,在考虑裂隙含水层对径流的调节功能情况下对 DHSVM 进行改进。流域水文过程模拟及参数灵敏性分析表明,基岩裂隙水对径流过程模拟效果影响显著,模型改进后对径流过程的模拟精度有较大提升,尤其对枯期径流的模拟更接近实际观测结果。基岩裂隙含水层参数对汛期和枯期径流起调节作用,减少汛期流量、增加枯期流量,对枯期流量影响尤为显著。

参考文献:

[1] 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.

[2] BATHURST J C. Physically-based distributed modelling of an upland catchment using the systeme hydrologique europeen[J]. Journal of Hydrology, 1986,87(1/2):79-102.

[3] ZHAO Renjun. The Xin'anjiang model applied in China[J]. Journal of Hydrology, 1992,135(1/2/3/4):371-381.

[4] 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.

[5] 黄国如,陈永勤. 基于新安江水文模型的东江流域枯水径流模拟[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2006,34(11):93-98. (HUANG Guoru, CHEN Yongqin. Low flow simulation of the Dongjiang Basin based on Xin'anjiang watershed hydrological model[J]. Journal of South China University of Technology:Natural Science Edition, 2006, 34(11): 93-98. (in Chinese))

[6] 陈宇,温忠辉,束龙仓. 基岩裂隙水研究现状与展望[J]. 水电能源科学,2010,28(4):62-65. (CHEN Yu, WEN Zhonghui, SHU Longcang. Status and prospect of research on bedrock fissure water[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(4): 62-65) (in Chinese))

[7] 广东省水利厅. 广东省地下水功能区划[R]. 广州:广东省水利厅,2009.

[8] 邓南荣,李定强,王继增,等. 广东省东江流域土壤侵蚀空间分布特征研究[J]. 中国水土保持,1999(5):21-23. (DENG Nanrong, LI Dingqiang, WANG Jizeng, et al. The characteristic of spatial distribution of soil erosion in Dongjiang Basin of Guangdong Province[J]. Soil and Water Conservation in China, 1999(5): 21-23. (in Chinese))

[9] MU Q, HEINSCH F A, ZHAO M, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007,11(4):519-536.

[10] EAGLESON P. Climate, soil, and vegetation: 3. A simplified model of soil moisture movement in the liquid phase[J]. Water Resources Research, 1978,14(5):722-730.

[11] WIGMOSTA M S, PERKINS W A. Simulating the effects of forest roads on watershed hydrology[J]. Water Science and Application, 2001,2:127-143.

[12] 刘昆,何捷,焦树林,等. 粤东花岗岩流域覆盖型风化壳风化特征比较[J]. 生态环境,2008,17(5):1937-1941. (LIU Kun, HE Jie, JIAO Shulin, et al. Comparison on the weathering characteristics of the alluvium-covered weathering crust for the granite catchments in eastern Guangdong province[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(5): 1937-1941. (in Chinese))

[13] WIGMOSTA M S, LETTENMAIER D P. A comparison of simplified methods for routing topographically driven subsurface flow[J]. Water Resources Research, 1999,35(1):255-264.

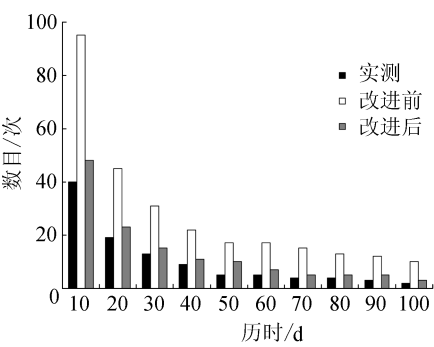


图5 各时段实测和模拟流量低于 $Q_{75\%}$ 的数目

Fig. 5 Occurrences of observed and simulated flow below $Q_{75\%}$