

蓄满—超渗兼容水文模型的改进及应用

胡彩虹¹, 王金星², 李析男^{1,3}

(1. 郑州大学水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 水利部水文情报预报中心, 北京 100053;
3. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘 要:在介绍蓄满—超渗兼容模型理论和自由水箱模型理论的基础上, 针对其各自的结构特点和产流机理, 对二水源蓄满—超渗兼容水文模型进行改进, 模型能反映地表径流、壤中流和地下径流的动态变化, 可应用于洪水预报、水情模拟、水资源开发和利用等。并将模型应用于伊河流域栾川站, 采用单纯形法、罗森布瑞克法及基因法联合自动优选法对模型参数进行了率定, 并与原模型进行了比较分析, 结果表明, 改进模型模拟精度高, 且能反映不同径流成分的变化过程。

关键词:蓄满—超渗兼容模型; 水源; 改进模型

中图分类号: P334+.92

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2014)01-0039-07

水文模型是对自然界中复杂水文现象的一种概化, 是水文学及水资源学科研究的重要领域之一。水文系统是一个高度非线性的复杂过程, 而流域水文模型则是一个以封闭流域内的水文循环过程为研究对象的模型^[1-2]。随着分布式水文气象信息和下垫面信息(例如降雨、气温、土地利用和土壤属性等)的越来越丰富以及计算机运算能力的快速提高, 分布式水文模型的研制一直是研究热点^[3-6]。然而, 分布式水文模型相比传统的集总式水文模型^[6-9], 由于复杂度使其在实际生产应用中存在很大的困难。众所周知, 降雨径流形成过程受到许多因素的影响和制约, 一般概化为产流和汇流过程。由于产流方式的不同, 模型结构也不同, 如新安江模型^[10-12], 其产流方式为蓄满产流, 采用蓄水容量曲线解决由于产流空间分布不均匀的问题, 模型在湿润半湿润地区有较好的应用结果, 然而由于没有考虑超渗产流, 对于干旱半干旱地区有一定的应用难度; 水箱模型^[1,13-15]也是一种概念性模型, 由于其弹性较好, 只需针对流域特点设置水箱数目便可以模拟大中小流域或不同气候条件的流域, 但是其参数没有实际的物理意义, 且模型结构设计存在很大的主观性; 蓄满—超

渗兼容水文模型^[16-19]是在新安江两水源模型基础上改进的两水源模型, 即模型将蓄满和超渗产流有机结合起来, 既考虑流域土壤含水量及其分配情况, 又考虑流域的下渗能力及其分布, 模型输出为地表径流和地下径流两个部分, 理论上兼容模型可以应用于所有地区, 但模型仅将径流划分为地面径流和地下径流, 因此, 从水源划分来讲, 难以满足实际的径流形成过程。实际上, 地面以下的径流由多种产流机制形成, 在流域出口断面流量的退水过程线上常呈现这些水源的退水特征。因此, 本研究结合新安江三水源模型和水箱模型的特点, 将蓄满—超渗兼容水文模型改进为三水源模型, 考虑了超渗产流、蓄满产流共同作用的复合机制, 有利于模型对现实情况的模拟, 有利于分析降雨过程中的主要产流模式, 使模型具有更强的适用性。

1 改进模型结构

蓄满—超渗兼容水文模型(以下简称兼容模型)同时考虑蓄满产流和超渗产流作用的情况。该模型揭示了流域产流面积变化的规律和机制, 流域蓄水容量面积分配曲线可以描述降雨量空间分布均匀时

收稿日期: 2012-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(51079131); 中国气象局气候变化专项(GCSF-2011-1); 国家 973 计划(2010CB428405)

作者简介: 胡彩虹 (1968-), 女, 山西平遥人, 工学博士, 教授, 主要从事水文学及水资源方面的教学和科研。E-mail: hucaihong@zzu.edu.cn

通讯作者: 王金星 (1976-), 男, 江西婺源人, 高级工程师, 主要从事水文情报预报工作。E-mail: wjxmwr@mwr.gov.cn

总径流面积变化规律,流域下渗能力面积分配曲线可以描述降雨强度空间分配均匀时超渗径流的面积变化规律。兼容模型构成了按照二者的产流原理有机结合形成了既考虑流域下渗能力及其分布,又考虑土壤含水量及其分布情况的产流模型^[16-20],兼容模型结构见图1。

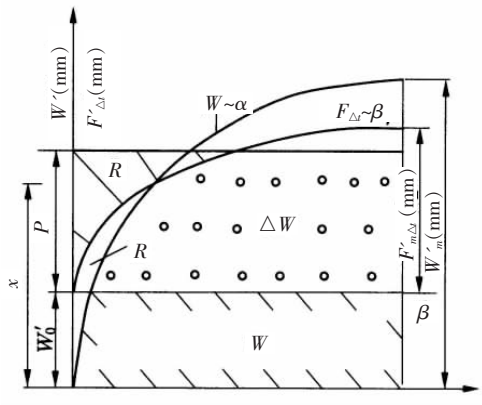


图1 兼容模型结构示意图

Fig.1 Structure of the saturated storage and excess infiltration model

水箱模型能以比较简单的形式来模拟径流形成过程,把由降雨转换为径流的复杂过程简单地归纳为流域的蓄水容量与出流的关系,将径流形成各个环节用若干彼此相联系的水箱进行模拟,以水箱中的蓄水深

度为控制,计算流域的产流、汇流以及下渗过程,采用若干个相串联的直列式水箱模型模拟出流和下渗过程,考虑降雨和产、汇流的不均匀,需要分区计算较大流域,可用若干个串并联组合的水箱模型,模拟整个流域的雨洪过程^[1]。

兼容模型在原新安江模型的基础上,考虑了流域上由于降雨强度超过下渗强度而产生的地面径流部分,引进了流域下渗能力分布曲线,模型认为径流的形成是由降雨强度超过下渗能力而产生的地面净雨过程和下渗雨量填补土壤中的缺水量超蓄后而产生的地下净雨过程总和。不同的水源成分,在向流域出口断面的运动过程中,受流域的调蓄作用也不同,水文学上,通常把具有显著不同特征的水源成分概化为地表径流、壤中流和地下径流^[1]。结合水箱模型及三水源新安江模型水源划分的特点,考虑将模型的径流成分划分为三种,即:地表径流、壤中径流和地下径流,改进模型基本结构流程图见图2,其基本思路即为以水箱中的蓄水深度为控制,利用自由蓄水容量曲线将水源划分为地表径流(RS)、壤中流(RI)和地下径流(RG),把复杂的径流形成过程转化为流域的蓄水容量与出流的关系进行模拟,满足了不同的水源在流域出口断面的运动过程受流域的调蓄作用不同的条件。

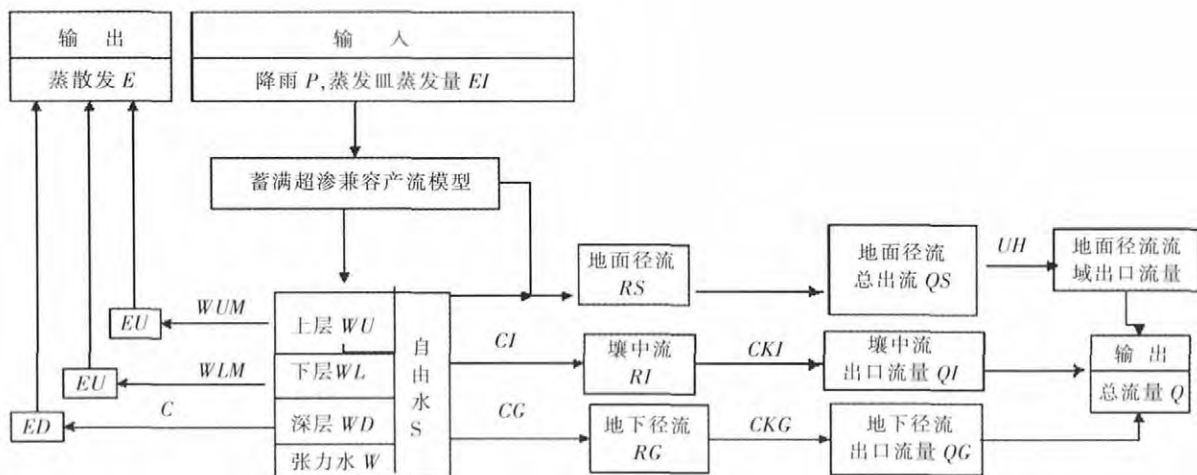


图2 改进模型基本流程图

Fig.2 Basic flow of the modified model

1.1 模型计算

兼容模型依据流域下渗容量曲线和蓄水容量曲线将径流划分为地表径流和地下径流,其计算过程见文献^[16-17,19]。改进模型认为,将下渗后的

净雨由于蓄满土壤缺水量而形成的部分径流量划分为地下径流RG和壤中流RI。根据新安江三水源划分法及自由水箱模型的相关概念(示意图见图3)。

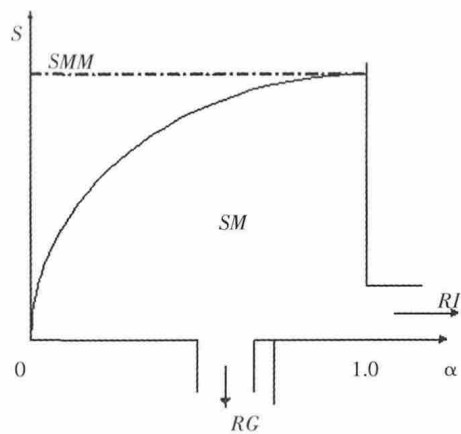


图3 自由蓄水容量空间分布示意图
Fig.3 Spatial distribution of the free water storage capacity

$$SMM=(1+EX)\times SM$$

(1)

$$AU=\begin{cases} SMM\times(1-(1-\frac{S1}{SM})^{\frac{1}{1+EX}}), & P>0 \\ SMM, & P<0 \end{cases}$$

(2)

式中: $S1$ 为初始自由水容量; SM 为流域自由水蓄水容量; SMM 为自由水最大的点蓄水容量; EX 为抛物线经验指数; P 为净雨。

1)当 $P+AU\leq 0$ 时

$$\begin{aligned} RI&=S1\times CI\times FR \\ RG&=S1\times CG\times FR \\ S2&=(1-CI-CG)\times S1 \end{aligned}$$

(3)

2)当 $P+AU\geq SMM$ 时

$$\begin{aligned} RI&=(P-SM+S1)\times FR \\ RG&=SM\times CG\times FR \\ S2&=(1-CG)\times SM \end{aligned}$$

(4)

3)当 $0<P+AU<SMM$ 时

$$ST=SM-SM\times(1-\frac{P+AU}{SMM})^{1+EX}$$

$$\begin{aligned} RI&=(P-ST+S1)\times FR \\ RG&=ST\times CG\times FR \\ S2&=(1-CG)\times ST \end{aligned}$$

(5)

式中: RI 为壤中流(mm); RG 为地下径流(mm); $S2$ 为时段末自由水蓄水容量(mm); CG 为地下水出流系数; FR 为产流面积。

地面汇流计算采用瞬时单位线法来模拟流域的地面汇流过程, 壤中流和地下径流的汇流计算采用线性水库蓄泄模型计算其汇流过程。

1.2 模型参数率定与检验

改进兼容模型在原模型的基础上, 增加了 5 个参数, 其主要参数包括: WM 、 WUM 、 WLM 、 m 、 n , 下渗参数 f_c 、 K , 蒸发参数 CKE 、 C , 地下径流退水系数 KG 以及汇流参数 N 、 NK , 自由水容量 SM 、 EX , 消退系数 CKI 和出流系数 CI 和 CG 共 17 个参数, 其主要参数及其相应物理意义见表 1。

目前, 应用于流域水文模型参数优选的方法很多, 模型参数优选方法常用的方法有人工试错法、自动优选法和人机联合优选法。人机联合优选法既可充分发挥预报人员的知识和经验, 又可充分利用先进的优化技术, 也就常作为模型参数的优化方法。本研究采用模型参数采用基因法(Genetic)、罗森布瑞克法(Rosenbrock)和单纯形法(Simplex)联合运用的人机优选方法来优选, 在给定的模型参数范围初值的基础上, 首先以基因法优选的结果作为参数初值, 然后再采用其它两种方法进一步优选, 得出模型各个参数的近似最优值。目标函数采用 Nash 模型效率系数 Ens (确定性系数)以及径流总量相对误差 $RE^{[21]}$ 。

表1 改进模型主要参数物理意义表
Table1 Physical significance of the modified model parameters

编号	符号	物理意义	编号	符号	物理意义
1	WM	流域平均蓄水容量/mm $WM=WUM+WLM+WDM$	8	N 、 NK	河道汇流参数
2	m	下渗容量曲线经验性指数, 与流域的透水特性有关	9	SM	自由水蓄水容量, 反映了水源比例的变化/mm
3	n	蓄水容量曲线经验性指数, 反映流域中蓄水容量的不均匀性	10	EX	自由水蓄水容量曲线指数
4	f_c	下渗参数, 稳渗率/mm.h ⁻¹	11	CKG	地下径流消退系数
5	K	下渗参数, 与土壤透水特性有关的指数/h ⁻¹	12	CKI	壤中流消退系数
6	CK	蒸发器折算系数	13	CI	壤中流出流系数
7	C	与深层蒸发有关的系数	14	CG	地下水出流系数

2 模型应用

2.1 流域概况

伊河流域面积 6 029km², 其中伊河沿程各水文站分别为: 栾川站以上为 340km²; 潭头站以上控制流域面积为 1 695km²; 东湾站以上控制流域面积为 2 623 km²。伊河流域其多年平均降雨量为 791mm, 属于温带大陆性季风气候, 多年平均蒸发量为 1 135.4mm。6~10 月为暴雨发生季节, 其中 7、8 两月暴雨集中、强度大, 洪水流量最大。本研究作为模型初探, 选取栾川站单站作为模拟算例, 收集整理了 1990~1998 年洪水资料, 1991~1996 年的资料作为率定(1997 年没有洪水), 1998 年的资料作为检验。根据洪水特性和流域情况, 选取 11 场洪水用于模型率定和检验(模型计算时段为 1h)。

2.2 洪水选取及参数率定

研究分别采用 Nash 模型效率系数 Ens (确定性系数)、绝对误差、相对误差以及模拟值-实测值相关关系对洪水模拟精度进行评定^[2]。率定模型参数结果见表 2。为了对模型进行比较, 同时对兼容模型进行了相应的计算, 模型计算结果分别见表 3~5。

表3 模型参数率定和检验结果统计表
Table3 The results of Nash-Sutcliffe efficiency coefficients in calibration and verification periods

项目	模型	率定期	检验期
Ens 效率系数/%	兼容模型	80.19	70.40
	改进模型	82.06	76.97

2.3 模拟结果分析

2.3.1 模拟结果对比

本文对研究流域分别用兼容模型和改进模型进行模拟比较, 表 3 为研究区域的率定和检验结果统计表, 从表中可以看出, 栾川站用兼容模型模拟, 率定期和检验期的 Ens 效率系数分别为 80.19%和 70.40%; 改进模型模拟拟合效果比兼容模型拟合效果好, 率定期和

检验期分别为 82.06%和 76.97%。本研究共 11 个场次洪水拟合结果显示, 改进模型的模拟效果明显比原兼容模型要好, 例如 900719 洪水(见图 4), 改进模型预测洪峰流量为 180.68m³/s, 而兼容模型模拟值为 127.69m³/s, 与实测值 208.0m³/s 相比, 改进模型的绝对误差仅为-15.12%。表 4 为栾川站不同产流模型场次洪峰模拟结果, 根据洪峰绝对误差, 可以看出, 改进模型在模拟洪水过程要优于兼容模型。其中 900719、950813、980730、980807、980815 和 980826 的绝对误差优于兼容模型拟合的结果, 而其它场次差别也不是很大; 峰现差基本保持着一致。

2.3.2 单场洪水模拟结果比较分析

表 5 分别列出了两模型模拟值对实测值的 R²。可以发现总 11 场次洪水, R² 大多满足要求大于 0.6, 仅 980730 洪水和 980807 洪水的 R² 小于 0.6(见图 5)。对于 980730 洪水, 其原因可能是洪水选取的洪峰流量过小, 导致模拟不准确; 980807 洪水, 其原因可能是选取多峰洪水的缘故。但是究其两场洪水的趋势, 980730、980807 洪水的模拟结果与降雨情况相吻合。所以, 即使是 R² 小于 0.6, 但是其模拟结果(或趋势)依旧可以作为参考。其余 9 场次洪水的 R² 大于 0.6, 其中

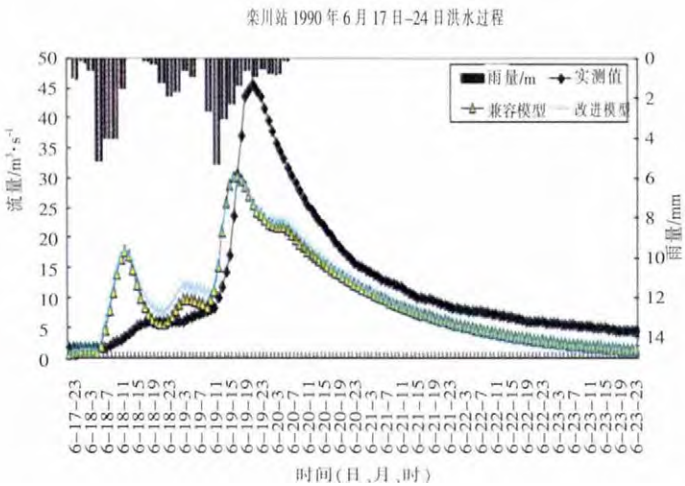


图4 栾川站 900619 洪水在两种模型下的模拟值与实测值对比
Fig.4 The comparison between the simulated and observed value in the study area (900619)

表2 改进模型参数率定结果表
Table2 The calibration results of the modified model parameters

参数名称	WM	m	n	CK	C	fc	K	N
参数值	155.393	0.312	2.905	5.417	0.159	7.643	0.222	2.969
参数名称	NK	EX	SM	CKG	CKI	CI	CG	
参数值	3.692	2.934	22.406	0.966	0.968	0.467	0.226	

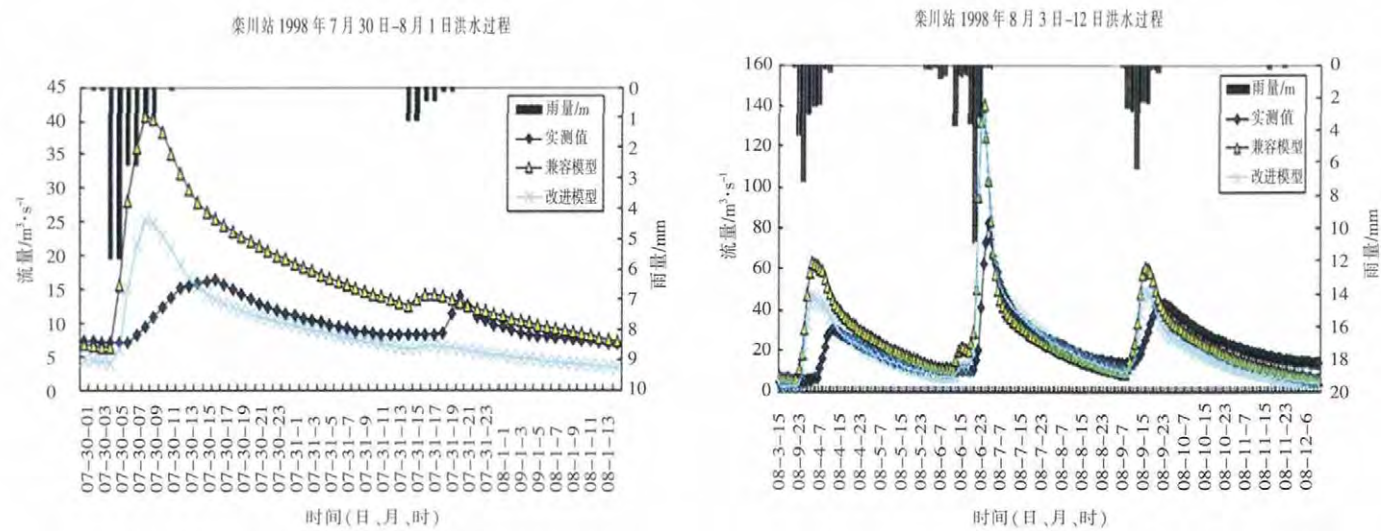


图5 栾川站 980730、980807 洪水在两种模型下的模拟值与实测值对比
Fig.5 The comparison between simulated and observed values in the study area (980730 and 980807)

表4 栾川站产流模型场次洪峰模拟结果
Table4 The results of two models on simulation

洪号	实测/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	模拟洪峰流量/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$		绝对误差/%		峰现差/h	
	洪峰流量	兼容模型	改进模型	兼容模型	改进模型	兼容模型	改进模型
900721	208.00	127.69	180.68	-62.89	-15.12	0	1
900816	60.20	39.66	40.26	-51.79	-49.53	-4	-4
940703	520.00	352.65	337.26	-47.45	-54.18	1	1
950813	201.00	148.80	151.22	-35.08	-32.92	-1	-1
960804	128.00	99.57	92.60	-28.55	-38.23	-2	-1
960917	194.00	156.19	152.98	-24.21	-26.81	0	0
980730	16.50	40.78	25.44	59.54	35.14	-8	-8
980807	82.50	140.49	135.02	41.28	38.90	-2	-2
980815	272.00	197.91	199.05	-37.44	-36.65	0	0
980826	31.60	44.68	43.47	29.27	27.31	-4	-4

表5 栾川站各场次洪水模拟结果相关性分析
Table5 The correlation analysis of the flood simulation in the study area

洪号	相关系数 R^2		相对误差 $RE/\%$		实测洪峰流量 / $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
	兼容模型	改进模型	兼容模型	改进模型	
900619	0.7406	0.6759	20.42	17.45	45.60
900721	0.8429	0.8041	38.44	18.99	208.00
900816	0.6642	0.7060	31.27	25.04	60.20
940703	0.8449	0.8491	7.63	-5.26	520.00
950813	0.7935	0.7873	-30.91	-34.17	201.00
960804	0.6946	0.7556	-7.66	1.55	128.00
960917	0.8836	0.9133	-8.88	5.80	194.00
980730	0.3776	0.3216	-67.74	12.05	16.50
980807	0.4220	0.5380	-18.54	-0.93	82.50
980815	0.9342	0.9320	22.73	22.43	272.00
980826	0.6414	0.6647	-6.42	-1.65	31.60

960917、980815 洪水大于 0.9,说明其模拟结果与实测值的符合程度很高,且从模拟图(未列)也可以得出相同的结论。

另外,兼容模型与改进模型的模拟结果与实测值之比较,两模型模拟的 R^2 值很相近,说明二者差异不大,但是改进模型模拟的精度要略好于兼容模型,有 6 场洪水的 R^2 大于兼容模型,分别为 900816、940703、960804、960917、980807、980826 洪水,其中 980816、960804、960917、980807 洪水的 R^2 值要比兼容模型模拟的精度更高,同时两模型在对洪峰流量大于 $200\text{m}^3/\text{s}$ 的洪水模拟结果佳,说明改进模型对于洪峰流量高的洪水过程模拟良好。

2.3.3 误差分析

2008 年颁布实施的国家标准《水文情报预报规范》(GB/T 22482-2008)中规定当洪水预报的率定期和检验期的确定性系数介于 0.70~0.90 之间时,预报方案的精度认定为乙级,可用于发布预报。将改进后的蓄满-超渗兼容模型应用到栾川站,其率定期和检验期的确定性系数均超过 0.70,可用于作业预报。但仍可看到部分场次洪水的模拟结果有一定误差,分析其原因如下:

(1)观测资料误差。从资料分析,降雨资料往往出现降雨突停(即降雨过程中降雨量为零)现象,如在 1998 年 8 月 13~14 日之间的小时降雨有断点现象;流量资料中出现间断的陡增陡降,这些资料对于洪水过程的分析不免怀疑其准确性。

(2)模型结构误差。任何模型的结构都是不完善的,从模拟过程图可以了解到,无论是兼容模型,还是改进模型,其洪水过程严格地与降雨过程相一致,但是模型对极端洪水拟合精度不够,例如 1998 年 7 月 30 日的洪峰流量为 $16.50\text{m}^3/\text{s}$,属于小洪水事件,而 1994 年 7 月 3 日的洪峰流量 $520\text{m}^3/\text{s}$,属于特大洪水事件,这些极端洪水事件有着不同的产流方式,采用同样的模型及其参数在模拟过程中不免会带来不同的误差,因此,对于极端洪水事件的模拟还有待进一步研究。

(3)模型参数误差。无论采用哪种优化算法,模型的参数对其真实值来说总是存在误差的,即使参数反映着流域自然地理特征,由于观测误差的存在,也不可能完全准确。

2.3.4 径流成分分析

表 6 为模拟各个水源的出流量和所占比例,可见,不同洪水径流成分组成不同。出流中以地表径流为主,其次为壤中流和地下径流。地表径流所占比例在 24.34%~83.39%。壤中流占主导的洪水有三场次,分别是 900619、960804 和 980826,壤中流所占比例在 50%左右,地表径流和地下径流均在 25%左右;其余洪水场次,地表径流在 45%~84%,壤中流在 10%~38%之间。壤中流作为洪水过程的主要组成部分,其产流方式为蓄满产流,而对于大洪水其产流方式是蓄满和超渗兼而有之的。伊洛河流域地处黄河流域中游,处于半湿润半干旱地区,该地区产流机制比较复杂,有时是单一的超渗或蓄满产流模式,有时既有超渗产流又有蓄满

表6 改进模型模拟下各个水源出流量和所占比例
Table6 The results in outflow and proportion of floods

洪水场次	出流量/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$			所占洪峰比例/%		
	洪峰流量	壤中流	地下径流	壤中流	地下径流	地表径流
900619	30.13	14.88	7.65	49.39	25.39	25.22
900721	180.68	25.22	12.92	13.96	7.15	78.89
900816	40.26	11.42	5.79	28.37	14.38	57.25
940703	337.26	37.04	18.99	10.98	5.63	83.39
950813	151.22	50.21	25.41	33.20	16.80	49.99
960804	92.60	44.42	22.20	47.97	23.97	28.06
960917	152.98	41.55	20.98	27.16	13.71	59.13
980730	25.44	9.51	4.63	37.38	18.20	44.42
980807	135.02	36.50	18.54	27.03	13.73	59.24
980815	199.05	57.55	29.37	28.91	14.76	56.33
980826	43.47	21.90	10.99	50.38	25.28	24.34

产流^[18],这一点在模型中得到了检验,说明模型能反映不同产流方式在径流形成过程中的作用。

3 结语

结合三水源新安江模型及自由水箱模型的特点,将蓄满——超渗兼容模型进行了改进,改进后模型将水源划分成了三种径流成分,即地表径流、壤中流和地下径流,改进模型反映了流域内降雨径流的蓄满和超渗径流共同作用的特点,揭示了径流形成过程中多水源的形成规律,通过多水源的考虑,使模型适用范围扩大。改进的模型,将由于蓄满而形成的径流划分为三种水源,反映出了不同径流成分的变化过程。文章的主要结论如下:

(1) 将兼容模型和改进模型应用于伊河流域栾川站的洪水预报中,兼容模型率定期和检验期的效率系数分别为 80.19%和 70.4%,改进模型率定期和检验期的效率系数分别为 82.06%和 76.97%,达到了预报方案评定乙等,可用于作业预报。

(2) 在本研究区域内,改进模型与兼容模型相比模拟结果更佳;利用改进模型进行洪水过程模拟,输出壤中流出流量和地下径流出流量,能反映不同径流成分的变化过程。通过地表径流、壤中流、地下径流的输出,可以进一步了解流域水文的不同径流成分的变化过程。

(3) 本文采用集总式模型,仅对伊河流域栾川站单站进行模拟研究初探,没有考虑整个流域空间分布特点。流域内降雨径流形成存在着时间和空间上分布的不均匀性,模型如何能反映出时间和空间上的分布不均匀性仍待进一步研究。

参考文献:

- [1] 徐宗学. 水文模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2009. (XU Zongxue. Hydrological Model[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [2] 詹道江, 叶守泽. 工程水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (ZHAN Daojiang, YE Shouze. Engineering Hydrology [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2003. (in Chinese))
- [3] Beven, K. J., M. J. Kirkby. A physically based variable contributing area model of basin hydrology [J]. Hydrology, 1979, 24(1): 43 - 69.
- [4] Abbott, M. B., J. A. Bathurst, P. E. Cunge. An introduction to the European hydrological system -system hydrologique europeen "SHE" 1: history and philosophy of a physically based distributed modeling system [J]. Hydrology, 1986, 87, 45 - 59.
- [5] Duffy, C. J. Semi-discrete dynamical model for mountain-front recharge and water balance estimation [A]. Rio Grande of Southern Colorado and New Mexico, in Groundwater Recharge in a Desert Environment [C]. The Southwestern United States, Water Sci. Appl. Ser., vol. 9, 255 - 271.
- [6] 雷晓辉, 田雨, 贾仰文, 等. WEP 模型全局参数敏感性分析及其在汉江上游流域的应用[J]. 水文, 2010, 30(6): 14-18. (LEI Xiaohui, TIAN Yu, JIA Yangwen, et al. Global parameter sensitivity analysis of WEP model and concerned application in Hanjiang river upstream [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(6) 14-18. (in Chinese))
- [7] Apostolopoulos, T. K., K. P. Georgakakos. Parallel computation for streamflow prediction with distributed hydrologic models[J]. Hydrology, 1997, 197, 1 - 24.
- [8] van Griensven, A., T. Meixner, S. Grunwald, T. Bishop, et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models [J]. Hydrology, 2006, 324, 10-23.
- [9] Beven, K. J.. Changing ideas in hydrology: the case of physically based models [J]. Hydrology, 105, 157-172.
- [10] 王佩兰. 三水源新安江流域模型的应用经验[J]. 水文, 1982, (5): 24-31. (WANG Peilan. The application of Xinanjiang model [J]. Journal of China Hydrology, 1982, (5): 24-31. (in Chinese))
- [11] 王佩兰, 赵人俊. 新安江模型(三水源)参数的检验[J]. 河海大学学报, 1989, 17(4): 16-20. (WANG Peilan, ZHAO Renjun. Parameter verification of Xinanjiang model[J]. Journal of Hohai University, 1989, 17(4): 16-20. (in Chinese))
- [12] 王佩兰, 赵人俊. 新安江模型(三水源)参数的客观优选方法[J]. 河海大学学报, 1989, 17(4): 65-69. (WANG Peilan, ZHAO renjun. Parameter optimization method of Xinanjiang model [J]. Journal of Hohai University, 1989, 17(4): 65-69. (in Chinese))
- [13] 李希峰, 马苗苗, 孙远斌, 等. 调和算法在水箱模型参数自动率定中的应用 [J]. 水电能源科学, 2004, 28(4): 19-21. (LI Xifeng, MA Miaomiao, SUN Yuanbin, et al. Application of harmony search algorithm to parameters Automatic calibration of Tank model [J]. Water Resources and Power, 2004, 28(4): 19-21. (in Chinese))
- [14] R.S.Chen, L.C.Pi. Diffusive tank model application in rainfall-runoff analysis of upland fields in Taiwan[J]. Agricultural Water Management, 2004, 70: 39-50.
- [15] Omer Inanc Tureyen. A generalized non-isothermal tank model for liquid dominated geothermal reservoirs [J]. Geothermics, 2010, (40): 50-57.
- [16] 锥文生, 胡春歧, 韩家田. 超渗和蓄满同时作用的产流模型研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(4): 6-13. (LUO Wensheng, HU Chunqi, HAN Jiatian. Research on a model of runoff yield reflecting excess infiltration and excess storage simultaneously[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6(4): 6-13. (in Chinese))
- [17] 胡彩虹, 王金星. 流域产汇流模型及水文模型 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2009. (HU Caihong, WANG Jinxing. Watershed Runoff Yield and Runoff Models and Hydrological Model [M]. Zhengzhou: Yellow River WaterPower Press, 2009. (in Chinese))
- [18] 胡彩虹, 郭生练, 彭定志, 等. 半干旱半湿润地区流域水文模型分析比较研究 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(5): 38-42. (HU Caihong, GUO Shenglian, Peng Dingzhi, et al. Comparative study on hydrological models in semi-dry and semi-humid region [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2003, 36(5): 38-42. (in Chinese))

(下转第 77 页)

in low flow research [J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(2), 249–253. (in Chinese))
 [25] 黄国如, 陈永勤. 枯水径流若干问题研究进展 [J]. *水电能源科学*,

2005,23 (4):61–63. (HUANG Guoru, CHEN Yongqin. Review of some problems about low runoff [J]. *Water Resources and Power*, 2005,23(4):61–63. (in Chinese))

Study on Correlation between Recession Coefficients and Catchment Characteristics in Pearl River

GE Yongxue¹, JIANG Tao², LIANG Chujian¹, WANG Xiuli¹, DONG Xiang¹

(1. *Zhaoqing Hydrology Bureau of Guangdong Province, Zhaoqing 526060, China;*

2. *Department of Water Resource and Environment, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)*

Abstract: This paper adopted the classical recession curve based on GA to study and analyze the mean daily runoff at some hydrological stations in the Xijiang upstream. The accuracy of verified results demonstrate well with Nash coefficients. Therefore, the obtained coefficient of recession can reflect the characteristics of the study basin. This paper also studied the relation of the coefficients of recession with the catchment area, underlaying surface characteristics, degree of vegetation and mean annual runoff, and discovered that (1)The recession coefficients will decrease with the catchment area and vegetation degree increasing;(2)The recession coefficients will decrease with the height difference permeability of underlaying reducing;(3)The recession coefficients are especially sensitive to the Karst landform, characterized by being larger than those in the non-Karst area;(4)The recession coefficients will increase with the mean annual runoff increasing, and there is an exponential function relationship between the two. These rules between the recession coefficients and catchment characteristic factors will provide reference for runoff forecasting in ungauged basins.

Key words: catchment characteristics; low flow discharge; parameter of recession; ungauged basin

(上接第 45 页)

[19] Caihong Hu, Shenglian Guo, Lihua Xiong. A modified Xinanjiang model and its application in Northern China [J]. *Nordic Hydrology*, 2005,36(2): 175–192.
 [20] 宋星原,管怀民,苏志诚,等. 半湿润地区洪水预报模型研究及应用[J]. *水文*, 2005,25 (2):24–28.(SONG Xingyuan, GUAN Huaimin, SU zhicheng, et al. Application and research on the model of flood

forecasting or the semi-humid area [J]. *Journal of China Hydrology*, 2005,25(2):24–28. (in Chinese))

[21] 张洪刚,郭生练,刘攀,等. 概念性水文模型多目标参数自动优选方法研究 [J]. *水文*, 2002,22 (1) : 12–16. (ZHANG Honggang, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Study on automatic calibration methods for multiple objectives of conceptual hydrological model [J].*Journal of China Hydrology*, 2002,22(1):12–16. (in Chinese))

A Modified Saturated Storage and Excess Infiltration Watershed Model and Its Application

HU Caihong¹, WANG Jinxing², LI Xinan^{1,3}

(1. *School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;*

2. *Hydrological Forecasting Center, MWR, Beijing 100053, China;*

3. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)*

Abstract: Saturated storage and excess infiltration of two water resources model was modified for each characteristic and mechanism of saturated storage and excess infiltration model and Tank model, based on the introduction to two models. The model could reflect dynamic change of surface runoff, interflow and groundwater runoff. And it can be applied in flood forecasting, river simulating, and water exploitation. The modified model was applied for the Luanchuan Station in the Yihe River Basin. Three optimization algorithms (Genetic, Rosenbrock and Simplex) for hydrological model calibration were used for calibrating the model parameters. The modified model was compared with the original model. The results show that the modified model has a better goodness-of-fit than the original model, and the model could reflect the process of different runoff composition

Key words: saturated storage and excess infiltration model; water source; modified model