

陈立华,杨开鹏,黄都熠. 平治河岩溶流域退水规律分析与降雨径流模拟[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 238-244.
DOI:10.11932/karst20180210

平治河岩溶流域退水规律分析与降雨径流模拟

陈立华^{1,2,3}, 杨开鹏^{1,2,3}, 黄都熠^{1,2}

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004;
3. 广西南宁禹道水利科技有限公司, 南宁 530000)

摘 要:以平治河岩溶流域为研究对象,分析其地下退水规律,将其划分为 9 个子流域,在传统新安江模型基础上,将地下径流划分为慢速和快速地下径流,分别采用两个线性水库进行模拟,构建降雨—径流模拟方案,并选取 2011—2015 年期间的 7 场洪水作为率定期洪水,以确定性系数(DC)最大为优化目标,应用遗传算法率定模型参数,而以 8 场洪水作为验证期洪水进行验证分析,获得率定期合格率为 85.71%,平均确定性系数为 0.846,验证期合格率为 75%,平均确定性系数为 0.893,达到乙级精度。其结果表明所构建的模拟方案能够较好地模拟该流域的径流规律。

关键词:岩溶区;地下径流;洪水模拟;水文模型

中图分类号:P641

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2018)02-0238-07

0 引 言

中国西南地区岩溶面积约 54 万 km²,是中国最大的裸露岩溶分布区^[1]。岩溶区地质条件复杂,裂隙、漏斗、落水洞和天窗分布广泛,构成了岩溶流域特有的二元三维空间系统^[2]。岩溶含水介质的非均匀性特点增加了流域水文模型的构建难度^[3-4]。

目前关于岩溶水系统的水文模型主要分为经验模型、概念性模型及分布和半分布式模型三类^[5]。经验模型又称黑箱模型,该类模型将岩溶水系统看做一个黑箱,注重模型的输入(降雨数据)和输出(流量数据),不考虑水系统内部的水动力特征和机理^[6-7],目前应用于岩溶流域的经验模型主要有线性核函数模型和人工神经网络模型等,如陈才等^[8]于 2009 年成功建立了适用于贵州后寨河流域的人工神经网络降雨—径流模型;概念性模型是以水文现象的物理成因机制为基础,将复杂水文过程利用数学模拟进行概化的模型。该类模型目前研究成果较多,如黄庆宏

等^[9]提出将岩溶水层划分为水平岩溶水层和虹吸岩溶水层,建立了适用于湿润地区岩溶流域的概念性水文模型;White W B^[10]根据岩溶裂隙垂向特征提出了岩溶流域概念性水文模型构建框架;Rimmer A 等^[11]建立了 HYMKE 模型,并成功应用于约旦河上游的三条支流。此外,一些学者对传统概念性水文模型加以改进并成功应用于岩溶地区,如郝庆庆等^[12]对新安江模型自由水蓄水库的地下水部分进行了改进,增加一个线性水库模拟深层地下水的日出流过程,模型对岩溶地区枯水期退水段的模拟精度比原模型提高较大。黑箱模型和概念性模型统称为集总式模型,该类模型结构简单、应用方便,在资料短缺地区有较高适用性,但因为缺乏考虑流域内部地理因素的空间变化,难免会产生误差。

分布和半分布式水文模型,主要通过水文学动力机制来描述流域内的水文过程^[6],如 Joodavi A 等^[13]建立了模拟岩溶区地下水补给的半分布式水文模型,成功模拟了伊朗费罗札巴流域地下水的补给;索立涛

基金项目:国家重点研发计划资助(2017YFC0405900);国家自然科学基金(51669003, 51469002);广西自然科学基金项目(2015GXNSFB139218);广西重点研发计划(桂科 AB16380284);南宁市科学研究与技术开发计划(20133326)

第一作者简介:陈立华(1980—),男,教授,博士,主要从事流域水文预报与水资源优化配置方面的研究。E-mail:zgfcjclh@163.com。

收稿日期:2017-03-15

等^[14]考虑到水文要素的空间变异性及水文单元之间的相互联系,改进了 TopModel 模型的子流域划分结构,解决了岩溶地区由于地下河的存在而无法使用 TopModel 模型的问题;章程等^[15]研究得出 SWWM 模型可适用于以管道为主的岩溶峰丛洼地地区。分布式模型能够充分利用流域各处地形、土壤、植被、土地利用和降水等空间分布信息,模拟土壤含水量、河川径流等水文要素的空间变化,模拟结果准确度较高,但建立分布式模型不仅需要对非均质含水层中岩溶水运动过程有相当深入的了解,同时对水文地质基本资料的要求也十分严格,在岩溶区应用难度较大。

本文以广西平治河岩溶流域为研究对象,根据实测水文资料分析该流域的退水规律,将地下径流划分为快速地下径流和慢速地下径流。在传统新安江模型一个线性水库模拟地下径流的基础上增加一个线性水库分别模拟快速与慢速地下径流,构建新安江岩

溶水文模拟方案,所构建模型可提高在岩溶地区的洪水模拟精度,以期为该流域和广西其他岩溶流域的径流模拟与洪水预报研究提供参考。

1 研究区概况

平治河发源于广西百色市,属于红水河一级支流,流域面积为 963 km^2 ,地势西北高东南低,干流河长 81 km ,干、支流总长 165.5 km ,河网密度为 $0.23 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ 。该流域属于亚热带季风气候区,多年平均降水量为 1517 mm ,蒸发量为 1572 mm ,4—9 月为雨季,降雨约占全年总降水量的 80%。流域内岩溶构造显著,主要分布在流域的东西南三面,约占流域总面积的 50%,北部和中部为非岩溶区。

采用流域内凤梧水文站和同老等 10 个雨量站 2010—2015 年水文资料展开研究工作,流域水系与水文站网分布如图 1 所示。

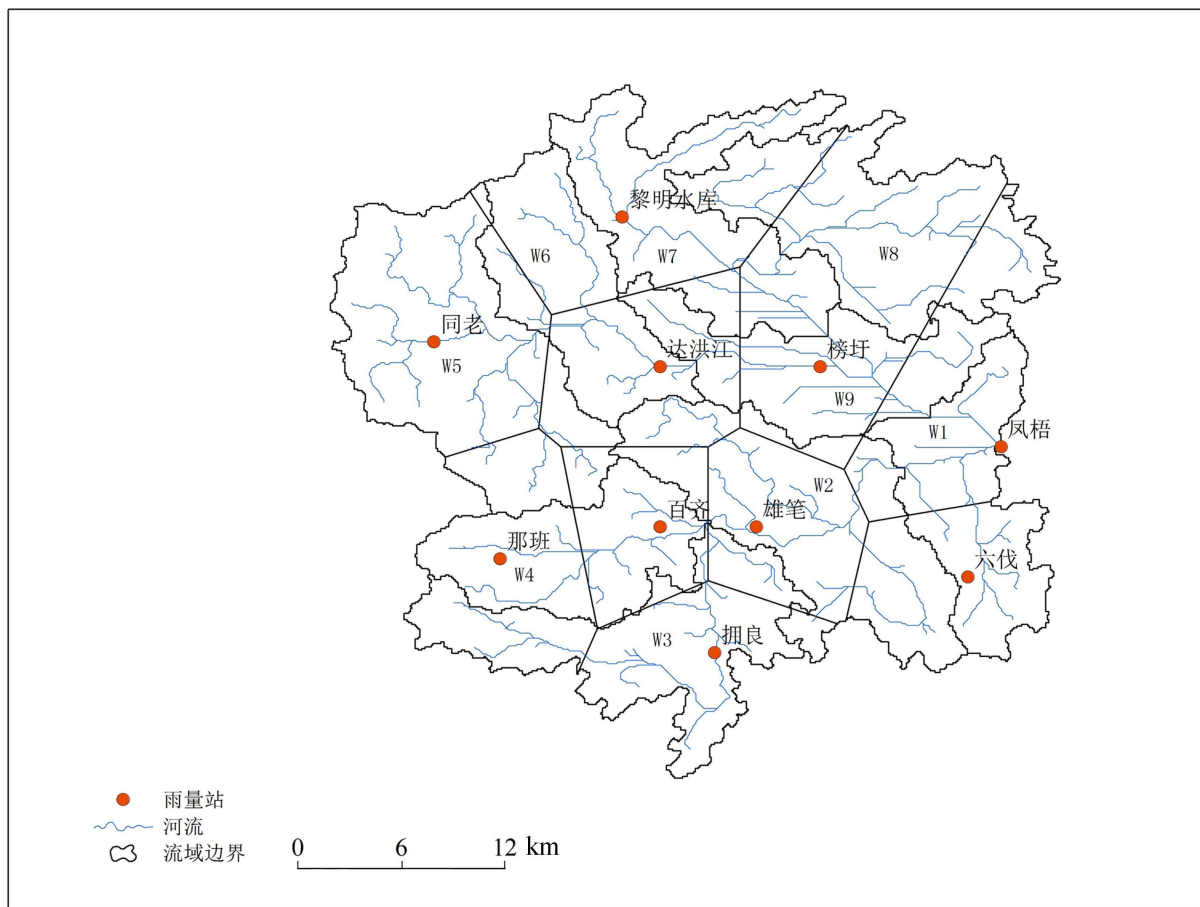


图 1 平治河流域泰森多边形划分图

Fig. 1 Thiessen polygon division in Pingzhihe river basin

2 平治河地下径流退水规律

根据 2010 年至 2015 年 6 场受前后期影响较小的典型单峰洪水资料,在半对数坐标系上作其洪水退水曲线(图 2)。从绘制的退水曲线可知,曲线在流量自然对数达到 3.0 时接近重合,反映了地下径流的退水特性,在达到 2.5 时出现拐点,反映了地下径流受流域调蓄作用的差异。分别对上述两段退水过程线作一元回归分析,得到各段退水曲线的衰减系数并记作 α_1 和 α_2 ,分析结果如图 3 和表 1 所示。

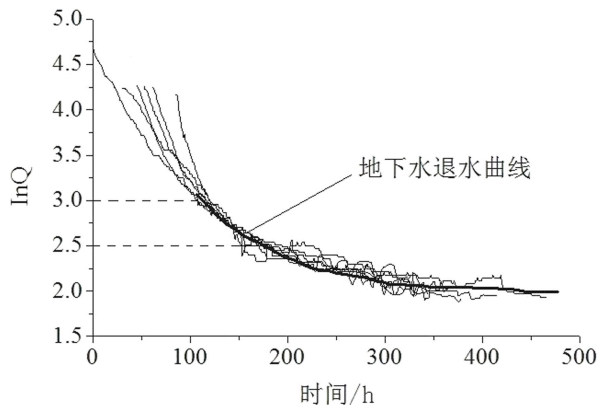


图 2 平治河流域地下水退水曲线

Fig. 2 Recession curve of groundwater in Pingzhihe river basin

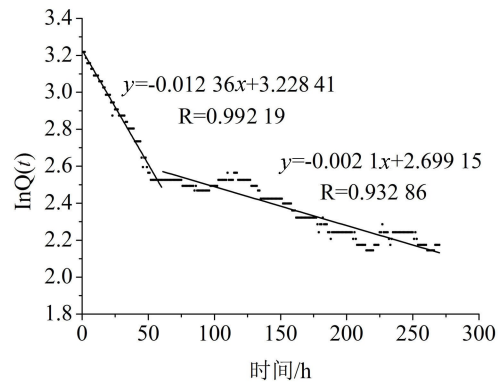


图 3 7 月 20 洪水地下水退水曲线及分段

Fig. 3 Groundwater recession curve and fragment of the flood in July 20th

由表 1 可看出,两段退水曲线与其趋势线的相关系数分别介于 0.945~0.994 和 0.899~0.965 之间,平均值为 0.997 和 0.935,拟合程度较好,可知将退水曲线划分为两段是比较合理的。第一段退水曲线的衰减系数 α_1 的最大值为 0.012,最小值为 0.006,平均值为 0.010,第二段退水曲线的衰减系数 α_2 的最大值为 0.003,最小值为 0.002,平均值为 0.002, α_1 约为 α_2 的 3~5 倍,说明第一段的退水速率较第二段曲线快,可认为这部分径流来自岩溶管道,称为快速地下径流,第二段来自岩溶裂隙,称为慢速地下径流。

表 1 退水曲线衰减系数

Table 1 Attenuation coefficients of groundwater recession curves

降雨场次	20100720	20110313	20111008	20120817	20131110	20140513	均值
衰减系数 α_1	0.012	0.009	0.009	0.011	0.006	0.012	0.010
相关系数 R_1	0.992	0.980	0.962	0.989	0.994	0.945	0.977
衰减系数 α_2	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002	0.003	0.002
相关系数 R_2	0.933	0.899	0.942	0.965	0.937	0.934	0.935

选择 Boussinesq 方程^[16]简化形式的指数型衰减方程计算地下径流消退系数,可得快速地下径流消退系数 $KQ = 0.988 \sim 0.995$,慢速地下径流消退系数 $KL = 0.997 \sim 0.999$ 。

3 降雨径流模型与实例研究

3.1 模型原理

根据岩溶流域较强的储水性能及径流调节能力的特点,参照新安江模型^[17],模型主要分为蒸散发、产流、径流划分、汇流 4 个部分。蒸散发计算采用 2 层蒸散发模型;产流计算采用蓄满产流模型;径流划

分采用自由蓄水库法将径流划分为地面径流、壤中流和地下径流,并进一步把地下径流分为快速和慢速地下径流;坡地汇流、河网汇流采用线性水库法,河道汇流采用马斯京根分段连续演算法。模型流程如图 4 所示。

3.2 方案构建

根据流域实际情况,采用 90 m 分辨率原始高程数据,利用 ArcGIS 软件将流域划分为 9 个子流域(图 1),并根据子流域拓扑关系编制平治河流域径流模拟方案(图 5)。从 2011—2015 年的逐小时水文数据中选择资料较完整的 7 场洪水作为率定期洪水、8 场洪水作为验证期洪水进行模拟。

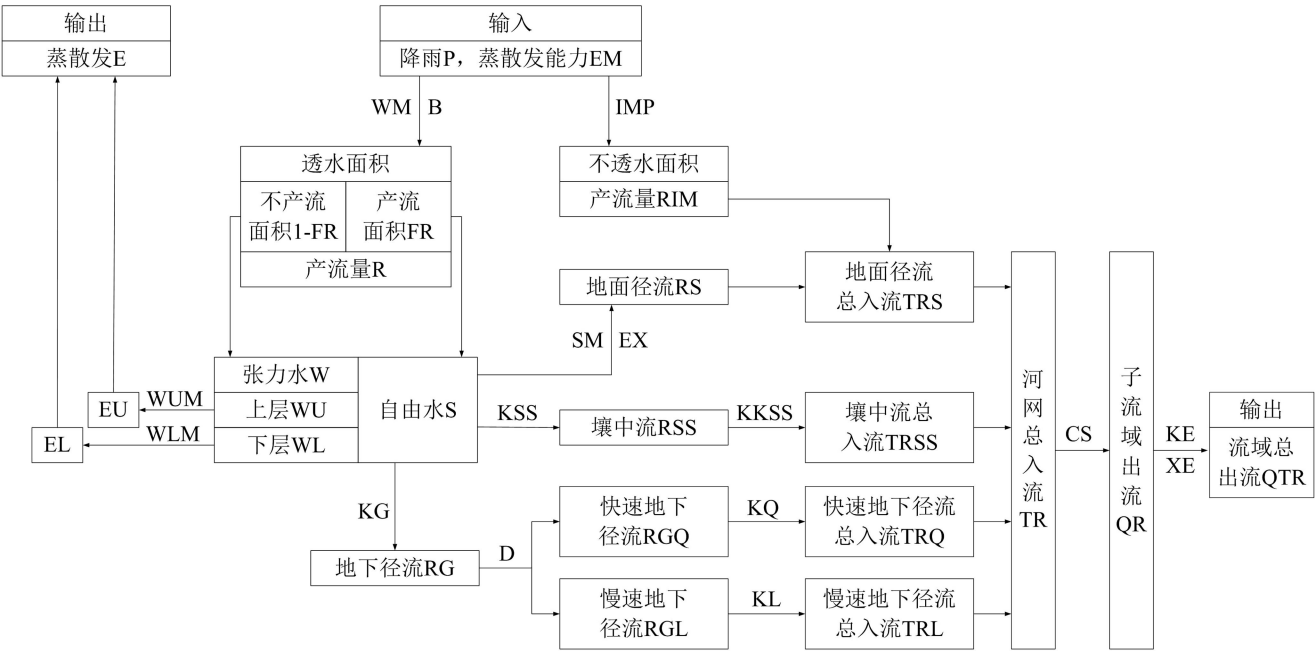


图 4 改进的新安江模型流程图

Fig. 4 Improved Xin'anjiang river model flowchart

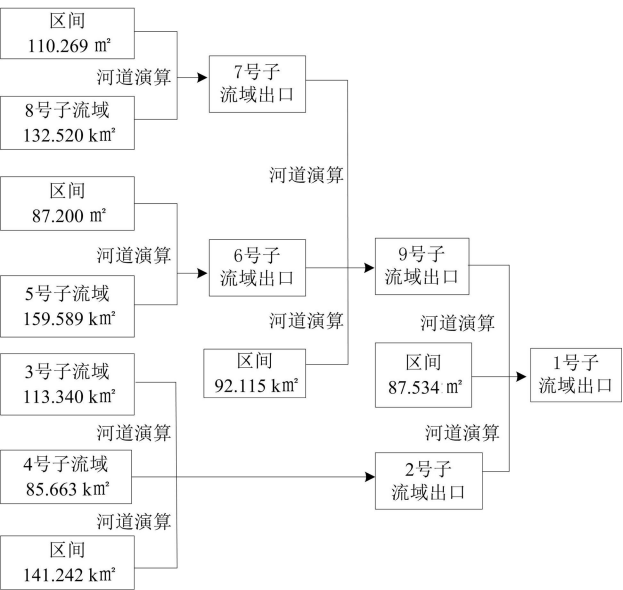


图 5 平治河流域模型模拟方案图

Fig. 5 Prediction scheme diagram of model in Pingzhihe river basin

3.3 参数率定

根据 7 场率定期洪水资料,采用遗传算法对改进的新安江模型进行参数率定(WLM 根据 $WLM = WM - WUM$ 确定)。以确定性系数(DC)最大为优化目标,设定种群规模为 100,交叉概率为 0.8,迭代次数为 500,停滞代数数为 50。模型初始参数范围和率定参数值如表 2 所示。

表 2 平治河流域模型参数范围和率定值

Table 2 Parameter calibration for the model in Pingzhihe river basin

参数	参数范围	率定值
K	0~1.0	0.934
WUM/mm	20~50	29.405
WM/mm	120~200	147.108
B	0.1~0.4	0.103
IMP	0.01~0.05	0.013
SM/mm	10~60	49.997
EX	1.0~1.5	1.001
KG	0~0.7	0.283
KSS	0~0.7	0.322
$KKSS$	0~1.0	0.863
D	0~1.0	0.175
KQ	0.988~0.995	0.993
KL	0.997~0.999	0.999
CS	0~1.0	0.972

3.4 成果分析

根据选择的 7 场率定期洪水资料和 8 场验证期洪水资料进行模型验证,统计结果见表 3,部分场次径流模拟如图 6 所示。

表 3 率定期和验证期模拟结果
Table 3 Simulation results of calibration and verification

时期	洪水场次	面雨量/ mm	实测洪峰/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	实测径流深/ mm	模拟洪峰/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	模拟径流 深/mm	洪峰流量 误差/%	峰现时差/ h	径流深 误差/%	确定性系数 (DC)	是否 合格
率 定 期	2011/6/24	183.05	131.00	56.80	146.15	67.94	11.57	−6	19.61	0.871	是
	2011/9/30	324.50	215.00	109.89	213.54	146.66	−0.68	−1	33.46	0.802	否
	2012/8/6	43.20	63.20	15.27	64.94	17.64	2.75	0	15.55	0.857	是
	2012/8/17	80.20	73.10	24.32	79.55	27.07	8.82	1	11.27	0.874	是
	2013/8/8	50.75	55.10	12.89	49.28	12.51	−10.56	−7	−2.89	0.923	是
	2013/8/18	144.35	150.00	48.72	145.58	52.19	−2.95	1	7.12	0.951	是
	2013/11/10	104.80	83.10	18.04	91.18	21.00	9.73	1	16.45	0.643	是
	平均值	132.98	110.07	40.85	112.89	49.29	2.67	−1.57	14.37	0.846	
验 证 期	2014/6/16	108.70	130.00	35.93	115.76	34.53	−10.95	1	−3.9	0.856	是
	2014/6/27	184.00	166.00	92.42	103.29	83.32	−37.77	−1	−9.85	0.893	否
	2014/7/14	160.80	132.00	62.79	134.65	65.31	2.01	−5	4.01	0.965	是
	2014/8/12	150.00	148.00	51.09	127.29	48.69	−14.00	1	−4.7	0.917	是
	2014/9/14	174.70	222.00	94.39	164.36	82.02	−25.96	3	−13.11	0.908	否
	2015/6/11	178.90	243.00	93.14	223.27	85.92	−8.12	−2	−7.75	0.927	是
	2015/7/23	216.45	121.00	83.51	134.76	94.98	11.38	−1	13.75	0.729	是
	2015/8/28	192.45	162.00	83.72	154.35	87.55	−4.72	2	4.58	0.946	是
	平均值	170.75	165.50	74.62	144.72	72.79	−11.02	−0.25	−2.12	0.893	

注:峰现时差为正值表示模拟洪峰时间早于实测洪峰出现时间,负值相反。

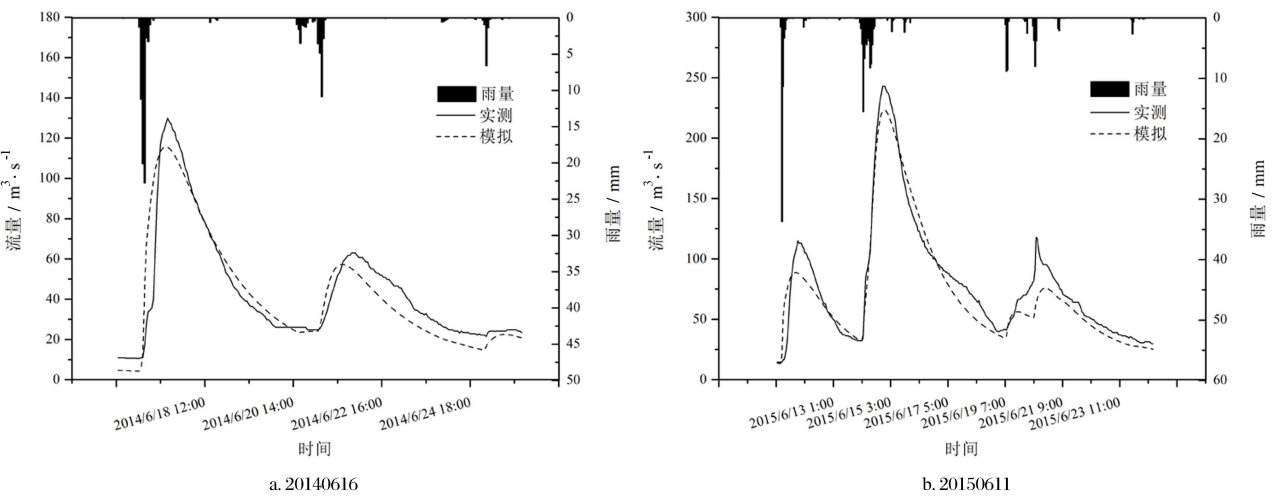


图 6 部分场次洪水降雨径流模拟结果
Fig. 6 Rainfall-runoff simulation in flood

由表 3 可看出,参照《水文情报预报规范(GB/T22482—2008)》,率定期 7 场洪水中有 6 场满足合格要求,其合格率为 85.71%,达到甲级精度;平均确定性系数为 0.846,达到乙级精度。验证期 8 场洪水模拟合格率为 75%,平均确定性系数为 0.893,均达到乙级精度。传统新安江模型模拟结果如表 4,8 场洪水模拟结果的合格率为 62.5%,为丙级精度,平均确定性系数为 0.889,达到乙级精度。改进的新安江模型较传统新安江模型在平均确定性系数和合格率方面均有所提高。

表 4 传统新安江模型验证期洪水模拟结果

Table 4 Simulation results of verification by using the traditional Xin'anjiang river model

时期	洪水场次	面雨量/ mm	实测洪峰/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	实测径流 深/mm	模拟洪峰/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	模拟径流 深/mm	洪峰流量 误差/%	峰现时 差/h	径流深 误差/%	确定性系 数(DC)	是否 合格
验证期	20140616	108.70	130.00	35.93	117.41	37.26	-9.68	-1	3.71	0.866	是
	20140627	184.00	166.00	92.42	108.18	94.48	-34.83	1	2.23	0.911	否
	20140714	160.80	132.00	62.79	141.00	72.98	6.82	-6	16.23	0.913	是
	20140812	150.00	148.00	51.09	126.69	47.59	-14.40	0	-6.85	0.926	是
	20140914	174.70	222.00	94.39	164.89	86.61	-25.73	3	-8.24	0.928	否
	20150611	178.90	243.00	93.14	229.90	94.70	-5.39	2	1.67	0.943	是
	20150723	216.45	121.00	83.51	132.29	100.64	9.33	1	20.51	0.677	否
	20150828	192.45	162.00	83.72	152.30	89.55	-5.99	3	6.96	0.946	是
	平均值	170.75	165.50	74.62	146.58	77.98	9.98	0.57	4.53	0.889	

4 结 语

(1)基于平治河岩溶流域复杂水文地质条件,分析流域退水规律,将地下径流划分为快、慢速两部分,推求出快速、慢速地下径流消退系数的范围分别为 0.988~0.995 和 0.997~0.999。以新安江模型为基础,增加一个线性水库分别模拟快速、慢速地下径流。

(2)选取 2011—2015 年内的 7 场洪水作为率定期洪水,8 场洪水作为验证期洪水进行验证分析。评定结果显示:率定期合格率为 85.71%,平均确定性系数为 0.846;验证期合格率为 75%,平均确定性系数为 0.893,达到乙级精度。其所构建的降雨径流方案能够较好的模拟该流域水文过程。

参考文献

[1] 刘仙. 基于 BASINS/HSPF 模型的岩溶槽谷区地下水模拟研究[D]. 重庆:西南大学, 2009.

[2] 宋万桢,雷晓辉,许波刘,等. 岩溶地区水文模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(7):54-57.

[3] 代俊峰,郭纯青,方荣杰. 西南岩溶灌区水文特性及其模拟模型的构建[J]. 水资源与水工程学报, 2011,22(4):11-15.

[4] 毛亮,于青春,王敬霞,等. 降雨对裂隙型岩溶含水系统演化影响的数值模拟研究[J]. 中国岩溶, 2017,36(1): 42-48.

[5] 黄都熠. 平治河流域洪水预报应用研究[D]. 南宁:广西大学, 2016.

[6] 蒙海花,王腊春. 岩溶流域水文模型研究进展[J]. 地理科学进

展, 2010,29(11):1311-1318.

[7] 常勇,刘玲. 岩溶地区水文模型综述[J]. 工程勘察, 2015,43(3):37-44.

[8] 陈才,陈喜,张志才,等. 喀斯特流域降雨-径流人工神经网络模型结构分析及模拟[J]. 中国岩溶, 2009,28(4): 375-379.

[9] 黄庆宏,林三益. 湿润地区岩溶流域确定性降雨径流水文模型[J]. 成都科技大学学报, 1987(3): 129-138.

[10] White W B. Conceptual models for karstic aquifers[J]. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 2003,1(1): 1-6.

[11] Rimmer A, Salingar Y. Modelling precipitation-streamflow processes in karst basin: The case of the Jordan River sources, Israel[J]. Journal of Hydrology, 2006, 331(3): 524-542.

[12] 郝庆庆,陈喜,马建良. 新安江模型在贵州岩溶地区的改进与应用[J]. 水电能源科学, 2009,27(4): 4-6.

[13] Joodavi A, Zare M, Raeisi E, et al. A multi-compartment hydrologic model to estimate groundwater recharge in an alluvial-karst system[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(3):1-13.

[14] 索立涛,万军伟,卢学伟. TOPMODEL 模型在岩溶地区的改进与应用[J]. 中国岩溶, 2007,26(1): 67-70.

[15] 章程,蒋勇军,袁道先,等. 利用 SWMM 模型模拟岩溶峰丛洼地系统降雨径流过程:以桂林丫吉试验场为例[J]. 水文地质工程地质, 2007,34(3): 10-14.

[16] Brutsaert W, Nieber J L. Regionalized drought flow hydrographs from a mature glaciated plateau[J]. Water Resources Research, 1997,13(3):637-643.

[17] 赵人俊,王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988(6): 2-9.

Study of rainfall-runoff simulation and recession flow in Pingzhihe river karst basin

CHEN Lihua^{1,2,3}, YANG Kaipeng^{1,2,3}, HUANG Duiyi^{1,2}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

3. Guangxi Nanning Yudao Water Conservancy Technology Co., Ltd., Nanning 530000, China)

Abstract The karst area in Guangxi Zhuang Autonomous Region is widespread, with complicated hydrogeological conditions and frequent flooding occurrence. The Pingzhihe river basin, which is selected as the study area, originates from Baise City of Guangxi and is a first tributary of the Red River. The main stream of the Pingzhihe river is 81 km long, with a total drainage area of 963 km². Karst region accounts for about 50% of the drainage area and the average annual precipitation is 1,517 mm. Combined with the structural characteristics of the karst aquifer system and the measured data, in this paper, we analyzed the pattern of groundwater drainage in Pingzhihe river basin and built a rainfall-runoff simulation program suitable for this basin. ArcGIS software is used to construct the digital basin for the study area which is divided into nine sub-basins. At the same time, based on the hydrological data of Tonglao, Liming reservoir and other 8 rainfall stations and Fengwu hydrological stations from 2010 to 2015, the research work has been carried out. Among them, six uni-modal flooding events happened in 2010 to 2015 were selected, from which their recession curves were plotted on semilog coordinates. The curves collectively show that when the logarithm of the flow rate is close to 2.5, the turning point appears. Thus two sections of the curves are linearly fitted and their attenuation coefficients can be obtained from the curve fitting. The results show that the subsurface flow can be divided into rapid and slow underground runoffs. Simplified Boussinesq exponential decay equation was used to calculate the regression coefficients for the two parts of runoffs. The extinction coefficient of rapid underground runoff KQ was 0.988—0.995 and the slow runoff extinction coefficient KL was 0.997—0.999.

Based on the traditional Xin'anjiang river model with one linear reservoir, a linear reservoir is added to simulate the rapid underground runoff and the slow underground runoff, respectively, to construct a rainfall-runoff simulation program. The calculation program was compiled with Matlab 2014 software. With the maximum of the deterministic coefficient as the optimization objective, the genetic algorithm is used to determine the model parameters. 7 floods from 2011 to 2015 were selected as regular analog floods, and 8 floods were selected as verified floods for runoff simulation. According to the "hydrological forecasting code (GB / T 22482—2008)" assessment criteria, the qualified rate of regular analog was 85.71%, and the average coefficient of determination was 0.846; the qualified rate of verification was 75%, the average deterministic coefficient of 0.893 reached B-grade accuracy. Compared with the traditional Xin'anjiang river model, the average deterministic coefficient and qualified rate of the improved Xin'anjiang river model have been improved. The simulation results show that the simulation scheme is suitable for the Pingzhihe river basin, and can provide reference for the rainfall-runoff simulation and flood forecasting in other similar karst areas in Guangxi.

Key words karst area, groundwater runoff, flood simulation, hydrological model

(编辑 黄晨晖)