

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0074

李琼, 龚珺夫, 王洪心, 等. 湿润地区山区小流域水文模型应用与比较[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(4): 81-86.
LI Q, GONG J F, WANG H X, et al. Application and comparison of hydrological models in small watersheds of humid regions [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(4): 81-86. (in Chinese)

湿润地区山区小流域水文模型应用与比较

李琼¹, 龚珺夫², 王洪心¹, 彭薇¹, 肖晒¹

(1. 宜昌市水文水资源勘测局, 湖北 宜昌 443000; 2. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098)

摘要:将新安江模型、萨克拉门托模型及 TOPMODEL 应用在 3 个不同的湿润地区山区小流域, 将洪峰相对误差及峰现时间误差作为预报精度主要评价指标, 分析不同水文模型在各流域的精度及适用性。结果表明: 在南阳河流域, 新安江模型略优于另外两种模型, 但 3 种模型总体精度均不高; 在雾渡河流域, 新安江模型精度较高, 萨克拉门托模型次之, TOPMODEL 精度最低; 茅坪河流域资料匮乏, 仅有的 6 场洪水全部用于模型率定, 3 种模型均能达到预报精度要求。综合比较后发现, 新安江模型在 3 个研究流域预报精度最高。

关键词:湿润地区; 山区小流域; 洪水预报; 水文模型; 比较分析

中图分类号: TV87 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Application and comparison of hydrological models in small watersheds of humid regions

LI Qiong¹, GONG Junfu², WANG Hongxin¹, PENG Wei¹, XIAO Shai¹

(1. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Yichang, Yichang 443000, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Xin'anjiang model, Sacramento model and TOPMODEL were applied in three small watersheds of humid areas of China. The relative error of flood peaks and error of the time of flood peaks were taken as the evaluation indexes for assessing the forecasting accuracy, and applicability of different hydrological models in different basins. The results showed that: In Nanyanghe watershed, the Xin'anjiang model had the better Prediction accuracy than the other two models, and none of these three modals had high accuracy; In Wuduhe watershed, the Xin'anjiang model had the highest prediction accuracy, which meet the prediction accuracy requirements, and the Sacramento model had moderate, while the TOPMODEL model had the worst accuracy; In Maopinghe watershed, Xin'anjiang model had the highest prediction accuracy, while the Sacramento model and TOPMODEL model had slightly lower prediction accuracy than Xin'anjiang model, but these three models meet the prediction accuracy requirement. After a comprehensive comparison, it was found that Xin'anjiang model had the highest prediction accuracy in the three selected watersheds.

Key words: humid region; small watershed in mountainous area; flood forecast; hydrological model; comparison

洪水预报是防洪决策中的重要工作^[1], 是保护 人民生命财产安全免受洪水威胁的第一道防线。洪

收稿日期: 2019-08-15 修回日期: 2019-11-10 网络出版时间: 2019-11-20

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191120.0937.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51679061); 国家重点研发计划(2018YFC1508103)

作者简介: 李琼(1966—), 女, 湖北宜昌人, 高级工程师, 主要从事水文预报研究。E-mail: 815857639@qq.com

通信作者: 龚珺夫(1993—), 男, 湖北襄阳人, 博士研究生, 主要从事水文预报研究。E-mail: gongjunfu321@163.com

水预报主要包括水文模型与经验方案^[2],其中水文模型包括了概念性模型和分布式物理模型。概念性模型对流域水文过程进行不同程度的概化,尤其是产流过程。通过经验公式或基于大量数据分析建立降雨径流关系,具有一定的物理基础,模型结构简单^[3],在生产应用中具有所需资料少、资料易于获取、简单易行等优点^[4]。分布式物理模型试图运用数学物理方程表述流域水文过程,着重考虑下垫面等条件的空间变异性,试图对水文过程进行更贴近真实情况的描述^[5]。分布式物理模型的缺点之一是较概念性模型需要更多的输入资料,在实际应用中工作量大大增加,有时却无法得到比概念性模型更优的结果^[6],实用性不强。

湿润地区山区小流域具有降水分布不均匀,洪水涨落迅速的特点,在此区域进行较为准确的洪水

预报就显得十分重要。目前我国山区小流域,由于各种自然条件与人为因素的限制^[7],可获得的流域水文气象数据及下垫面资料不足以满足分布式物理模型的要求,因此概念性模型在这些地区的应用应当受到关注。

本文以新安江模型、萨克拉门托模型、TOPMODEL 模型为例,分别应用于南阳河、雾渡河、茅坪河流域,对比不同模型的应用结果,评析各个模型的优缺点,为湿润地区山区小流域洪水预报提供参考。

1 流域概况

选取湖北省南阳水文站以上流域(简称南阳河流域)、湖北省雾渡河水文站以上流域(简称雾渡河流域)和湖北省茅坪河流域作为研究流域,3 个流域都位于湿润地区。流域位置及站点分布见图 1。

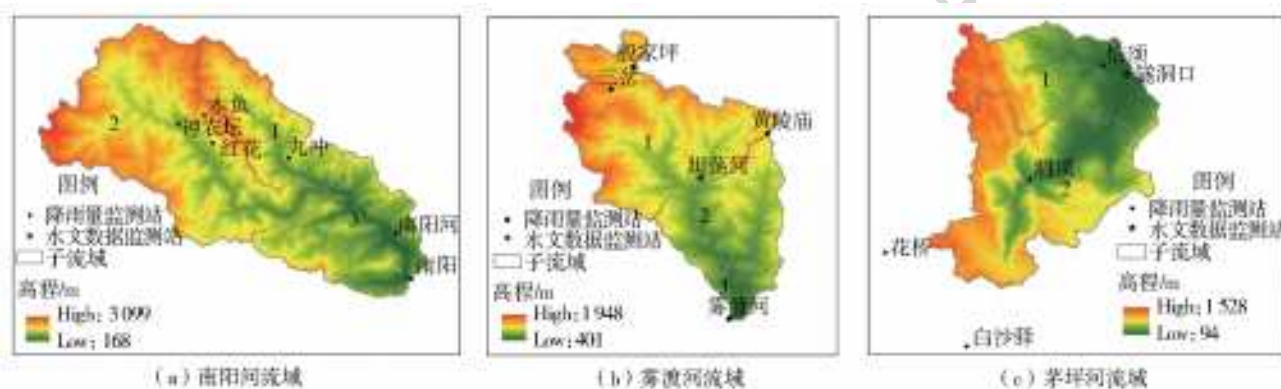


图 1 流域位置及站点分布

Fig. 1 Location of three watersheds and spatial distribution of discharge and rainfall stations

南阳河流域靠近神农架林区,流域面积 672 km²,流域平均高程 2 860 m。流域控制水文站为南阳站,资料年限为 2011—2018 年。配套雨量站有 5 个,分别是红花、九冲、南阳、神农坛和木鱼,红花、九冲、南阳站资料年限为 2011—2018 年,神农坛站资料年限为 2013—2018 年,木鱼站资料年限为 2016—2017 年。

雾渡河流域面积 566 km²,流域平均高程 886 m。流域控制水文站为雾渡河站(控制面积 207 km²),资料年限为 2010—2018 年。配套雨量站有 5 个,分别是殷家坪、三岔、黄陵庙、坦荡河及雾渡河,资料年限为 2010—2018 年。

茅坪河流域面积 120 km²,流域平均高程 647 m。流域控制水文站为隧洞口站,资料年限为 2010—2018 年。配套雨量站有 4 个,分别是桔颂、泗溪、花桥、白沙驿,其中花桥和白沙驿资料年限为 2010—2018 年,桔颂和泗溪的资料年限为 2016—2018 年。

2 模型简介及参数率定

新安江模型是赵人俊^[8]于 1984 年前后提出的概念性模型,在我国湿润及半湿润地区具有较高的预报精度,已得到广泛应用^[9-11]。TOPMODEL 是 Kirkby 等^[12]于 1979 年提出的半分布式概念模型。其需要优选的参数少且物理意义明确,已得到广泛应用^[13-14]。TOPMODEL 模型的基础是变动源面积理论(variable source area concept, VSAC),核心是地形指数^[15]。20 世纪 60 年代末到 70 年代初,美国天气局的 Burnash 等^[16]通过改进斯坦福模型(SWM)提出萨克拉门托模型。模型的特点是上下两层土层中的蓄水量被分为张力水和自由水,张力水可以正向补充自由水,过程不可以逆向。萨克拉门托模型适用于湿润流域、半湿润及半干旱流域^[17]。

在水文模型的参数率定中,自动优化算法,如单纯形法^[18]和 SCE-UA 算法^[19]等,可以快速稳定优选参数,但是存在异参同效或陷入局部最优解的问

题。人工优选法可以通过专家经验保证优选参数值的合理性,但又存在优选效率低的问题。本研究将人工优选法和单纯形法相结合率定模型参数,可以充分发挥两种方法的优点,克服两种方法的缺陷。以新安江模型为例,参数可分为蒸散发、产流、分水

源及汇流等 4 类^[20]。对于有明确物理意义且不敏感的参数,可以根据流域性质及专家经验给定初值,再人工优选。对于独立性强的敏感参数,如 CS、SM、CI 等,使用单纯形法自动优选参数。各模型的主要敏感参数及在研究区的率定值见表 1。

表 1 各模型主要参数及率定值

Tab. 1 Main parameters and their values of three hydrological models

模型	参数	南阳河	雾渡河	茅坪河
新安江模型	蒸散发折算系数(K_c)	0.28	1.40	0.25
	自由水容量(SM)	25.5	55.0	18.0
	河网水流消退系数(CS)	0.91	0.76	0.80
萨克拉门托模型	上层自由水容量(UZFWM)	25.5	30.0	20.0
	补给下层自由水的下渗水比例(PFREE)	0.20	0.35	0.20
	下层自由水不蒸发比例(RSERV)	0.35	0.30	0.30
TOPMODEL	非饱和区最大蓄水深(SZM)	0.016	0.018	0.012
	植被根系区最大含水量(SRMAX)	0.015	0.020	0.035

前期降水或土壤湿度对场次洪水模拟影响很大。在新安江模型与萨克拉门托模型中,为了得到较为准确的次洪初始土壤含水量,首先在每场洪水前 30 日进行日流量过程模拟,并以日模型提供的土壤含水量作为次洪初始土壤含水量,日模型的初始土壤含水量取最大蓄水容量的 1/2。TOPMODEL 通过植被根系层的初始含水量(SR_0)表示初始土壤湿度,地形指数相同的网格,植被根系层的 SR_0 也相同,同样通过连续的日流量模拟赋予每场次洪初始的 SR_0 。

3 模型应用比较

在大江大河的洪水预报中,通常将径流深相对误差、洪峰相对误差和确定性系数作为预报精度的评判标准。山区小河流域面积小,调蓄能力差,涨洪迅速,从洪水起涨到洪峰通常只需数小时。因此,山区小河流洪水预报的目标与大江大河有显著区别,通常更加关注洪峰及峰现时间的预报精度,次洪径流深及确定性系数的预报精度要求相对较低^[21]。根据《水文情报预报规范》,本研究选择洪峰相对误差和峰现时间误差作为模型模拟评判标准,洪峰相对误差小于 20%且洪峰出现时间误差小于 3 h 时认为模拟合格。

3.1 南阳河流域模拟结果比较

通过 DEM 将南阳河流域划分为 3 个自然子流域,见图 1(a),从南阳水文站 2011—2018 年径流资料中选出 20 场洪水进行计算,其中前 12 场用作模型率定,后 8 场用于模型验证,3 种模型的模拟结果

见表 2。

表 2 南阳河流域模型模拟结果汇总

Tab. 2 Simulation results for three hydrological models in Nanyanghe watershed

评价指标	新安江模型	TOPMODEL	萨克拉门托模型	
洪峰合格率/%	率定期	58	42	67
	验证期	50	50	38
	整体	55	45	55
峰现时间合格率/%	率定期	75	58	58
	验证期	100	75	50
	整体	85	65	55
径流深合格率/%	率定期	67	58	75
	验证期	75	87	38
	整体	70	70	60
平均确定性系数	率定期	0.60	0.47	0.70
	验证期	0.75	0.68	0.66
	整体	0.66	0.56	0.68

南阳河流域位于神农架山区,海拔较高,降雨空间分布十分不均匀且雨量站稀疏,同一场次洪水中不同雨量站的观测雨量甚至可以相差数倍。

由表 2 可以看出,在南阳河流域,新安江模型的模拟效果最好。新安江模型的洪峰合格率、峰现时间合格率在率定期与验证期均最高,同时,其率定期与验证期的精度差异也最小。萨克拉门托模型各项评价指标在率定期的精度都显著高于验证期,主要原因可能是该模型参数较多,在率定期总能通过调整参数达到较好的模拟效果,但同时意味着更容易出现异参同效的现象,使符合率定期洪水特征的参

数在验证期效果较差。TOPMODEL 的产流机制也为蓄满产流机制,但其洪峰模拟精度在 3 种模型中最低,部分洪峰模拟偏大且洪水形状的模拟效果远远不如前两个模型。

通过典型洪水来分析产生此现象的原因,各模型模拟 2011061701 号洪水的洪水过程线见图 2。由图 2 可以看出,洪峰出现在第 32 h,新安江模型与萨克拉门托模型的模拟洪峰相对误差均在 20% 以内,而 TOPMODEL 的模拟洪峰明显偏大,相对误差达到 59.3%。该场洪水从起涨到洪峰的过程摘录于表 3,可见该模型模拟的壤中流明显高于新安江模型与萨克拉门托模型,说明 TOPMODEL 洪峰预报偏大的原因是壤中流偏大。从模型结构方面分析壤中流偏大的原因, TOPMODEL 产流计算基于 3 个假设,其中之一就是假设壤中流为流域平均地下水埋深的负指数函数,随着持续降雨,流域地下水

面逐渐抬高接近地面,壤中流也随着增大。由于假设为指数函数,不同地下水埋深处壤中流的变率也不同,当地下水位较高时,壤中流变率较大,即较小的地下水位抬高将导致较大的壤中流增加。在表 3 中可以发现,南阳河流域的平均地下水埋深较浅,由此导致模拟壤中流偏大。

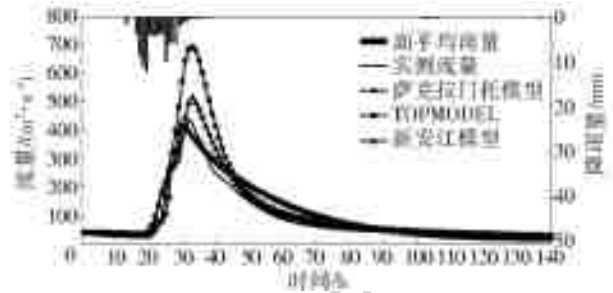


图 2 南阳河流域 2011061701 号洪水过程线

Fig. 2 Flood process line for No. 2011061701 flood in Nanyanghe watershed

表 3 3 种模型关于南阳河流域 2011061701 号洪水的模拟与比较

Tab. 3 Comparison of flood process simulated by three hydrological models of No. 2011061701 flood in Nanyanghe watershed

时间/h	面平均雨量/mm	实测流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	新安江模型		萨克拉门托模型		TOPMODEL		
			预报流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	壤中流/ mm	预报流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	壤中流/ mm	预报流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	平均地下水埋深/mm	壤中流/ mm
21	3.95	41.3	38.7	0.49	43.2	0.66	65.2	127.93	2.02
22	4.14	53.8	69.1	0.51	47.8	0.76	97.0	128.12	2.29
23	4.40	74.2	142.7	0.53	71.6	0.86	132.5	123.48	2.26
24	3.73	98.6	190.4	0.53	82.1	0.92	175.1	123.17	3.00
25	3.96	165.3	210.8	0.54	105.1	0.95	217.8	121.70	3.06
26	10.01	232.0	247.8	0.58	162.6	0.96	261.8	117.09	3.35
27	6.14	259.5	265.6	0.59	271.5	0.96	318.7	113.57	4.44
28	5.66	287.0	288.0	0.59	325.4	0.96	398.5	114.71	5.50
29	6.14	287.0	329.0	0.59	388.4	0.96	482.1	112.10	5.13
30	2.19	359.0	411.0	0.57	421.7	0.96	572.8	114.36	6.01
31	1.57	398.0	449.2	0.56	410.4	0.96	646.5	118.26	5.24
32	1.18	437.0	497.5	0.54	395.8	0.96	685.8	121.04	4.13

3.2 雾渡河流域模拟结果比较

通过 DEM 将雾渡河流域划分为 2 个自然子流域,见图 1(b),从雾渡河水文站 2002—2018 年径流资料中选出 20 场洪水进行计算,其中前 12 场用作模型率定,后 8 场用于模型验证,3 种模型的模拟结果见表 4。

雾渡河流域洪水过程线基本都是缓涨缓落,从过程线可以判断该流域的产流机制为蓄满产流。由表 4 可以看出,在雾渡河流域,新安江模型的模拟效果最好,萨克拉门托模型次之, TOPMODEL 最差。新安江模型的洪峰合格率和峰现时间合格率在率定期和验证期都远高于另外两个模型。萨克拉门托模

型在模拟洪峰较小的洪水时,会出现模拟洪水过程线类似一条直线,洪峰模拟不出的现象,见图 3,主要原因是:该模型的张力水及自由水容量都是均匀分布的,在降水不大的情况下,降雨量全部转化为上层张力水,流域不产流;流域上层张力水蓄满之后,降雨进入上层自由水库,由于下层土壤较为缺水,上层自由水库下渗率较大,使其不易蓄满,地表径流不易产生,无法准确模拟洪峰。新安江模型通过抛物线型的张力水及自由水蓄水容量曲线考虑了张力水及自由水蓄水容量不均匀的问题,使其在较小的降雨条件下也能产生部分地表径流,能更好地模拟洪峰较小的洪水。在 2013052420 号洪水中,萨克拉门

托模型上层自由水库仅在第 20 时段蓄满,其他时段均未蓄满,而新安江模型模拟的地表径流明显高于萨克拉门托模型。TOPMODEL 产生的饱和和坡面流很少,导致其在部分小洪水中也无法模拟出洪峰,且峰现时间误差巨大,基本无法应用在本流域。

表 4 雾渡河流域模型模拟结果汇总
Tab. 4 Simulation results for three hydrological models in Wuduhe watershed

评价指标		新安江模型	TOPMODEL	萨克拉门托模型
洪峰合格率/%	率定期	83	50	42
	验证期	75	38	38
	整体	80	45	40
峰现时间合格率/%	率定期	83	8	58
	验证期	100	13	75
	整体	90	10	65
径流深合格率/%	率定期	75	25	42
	验证期	88	63	63
	整体	80	40	50
平均确定性系数	率定期	0.61	-0.32	0.40
	验证期	0.71	-0.14	0.57
	整体	0.65	-0.25	0.46

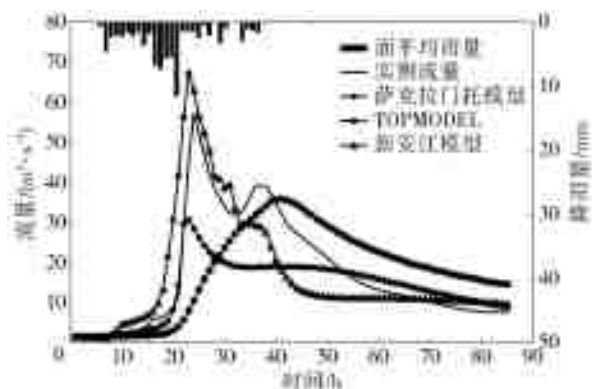


图 3 雾渡河流域 2013052420 号洪水过程线

Fig. 3 Flood process line for No. 2013052420 flood in Wuduhe watershed

3.3 茅坪河流域模拟结果比较

通过 DEM 将茅坪河流域划分为 2 个自然子流域,见图 1(c),由于流域内雨量站泗溪和桔颂站为新建站,资料序列短,从隧洞口水文站 2016—2018 年径流资料中选出 6 场洪水进行计算。由于洪水场次太少,为保证模型率定的可靠性,将 6 场洪水全部用于模型率定,3 种模型的模拟结果见表 5。

茅坪河流域上游为山地,下游为地势平缓的秭归县城,下垫面受人类扰动较大。另外茅坪河直接汇入三峡库区,汇入口为一段人造过水涵管,距离三峡大坝坝体仅数公里。由表 5 可以看出,在茅坪河流域,新安江模型的模拟效果最好,萨克拉门托模型

表 5 茅坪河流域模型模拟结果汇总

Tab. 5 Simulation results for three hydrological models in Maopinghe watershed

评价指标	新安江模型	TOPMODEL	萨克拉门托模型
洪峰合格率/%	83	67	67
峰现时间合格率/%	100	83	100
径流深合格率/%	100	50	83
平均确定性系数	0.70	0.18	0.66

次之, TOPMODEL 最差,说明在下垫面受人类扰动大的湿润地区,新安江模型较为适用。萨克拉门托模型同样能较好地模拟峰现时间,但洪峰模拟效果不如新安江模型。TOPMODEL 在计算饱和和地下水埋深时假设饱和壤中流的水力坡度 dH/dl 近似等于坡面地形坡度 $\tan \beta$ 。茅坪河流域紧邻三峡库区,地下水埋深受到三峡库区的强烈干扰,可能导致此假定不再成立,使模型计算饱和和地下水埋深有较大误差,直接导致饱和和源面积的计算有较大误差,不能较好地符合流域真实情况。

3.4 综合比较

综合比较 3 种模型在 3 个不同山区小流域的应用结果可以看出,新安江模型的精度最高,萨克拉门托模型次之, TOPMODEL 精度最差。将洪峰相对误差及峰现时间误差均合格的洪水场次占洪水场次的比称为模拟合格率,3 个模型的模拟合格率见表 6。新安江模型除在南阳河流域外都达到较高的预报精度要求(模拟合格率大于 60%,萨克拉门托模型和 TOPMODEL 仅在茅坪河流域达到较高的预报精度,而 TOPMODEL 在雾渡河流域模拟效果很差,说明在降雨资料匮乏且降雨空间分布不均匀的山区小流域,需要资料较少的概念性的新安江模型最为适用。越复杂的模型,对输入资料的精度要求就越高,在输入资料达不到模型要求时,考虑更多物理过程的模型结构反而会引入更大的误差。

表 6 模型在各流域模拟合格率

Tab. 6 Qualification rate of three hydrological models in each watersheds 单位: %

流域	新安江模型	TOPMODEL	萨克拉门托模型
南阳河	45	35	40
雾渡河	70	5	40
茅坪河	83	67	67

4 结论

本研究在湖北省宜昌市 3 个山区小流域分别应用新安江模型、萨克拉门托模型及 TOPMODEL 共 3 种概念性水文模型,并将应用结果进行了比较。

在南阳河流域,新安江模型精度略高于另外两种模型,但总的来说 3 种模型结果均不尽如人意。在茅坪河流域,新安江模型精度最高,达到预报精度要求,萨克拉门托模型次之, TOPMODEL 精度最低,后两者均未达到预报精度要求。茅坪河由于降雨资料序列短,洪水场次少,因此全部洪水场次用于模型率定,新安江模型精度最高,萨克拉门托模型及 TOPMODEL 比新安江模型略低。不同的水文模型从不同的角度概化了流域水文过程,具有不同的结构,适用于不同的情况。研究者应该根据流域水文气象条件及下垫面特点,选择适合该流域的水文模型,而不能主观地判断某一模型的好坏。本研究经综合比较后发现,在该地区新安江模型最为适用,模拟精度普遍优于萨克拉门托模型及 TOPMODEL,即在此地区进行洪水预报,应优先选用新安江模型。另外,水文模型在山区小河流应用精度不如大江大河,可能的原因是山区小流域雨量站数量少,建站晚,资料匮乏,少数雨量站点观测数据通常无法准确反映降雨空间分布的不均匀性。水文模型理论研究仍然有许多困难,如降雨与下垫面的空间不均匀对产汇流影响机理尚未明确等。这些都是山区小河流水文预报亟待解决的问题。

参考文献:

- [1] 王文,马骏. 若干水文预报方法综述[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(1): 56-60. DOI: 10. 3880/j. issn. 1006-7647. 2005. 01. 018.
- [2] 黄鹏年,李致家,姚成,等. 半干旱半湿润流域水文模型应用与比较[J]. 水力发电学报, 2013, 32(4): 4-9.
- [3] 吴险峰,刘昌明. 流域水文模型研究的若干进展[J]. 地理科学进展, 2002, 21(4): 341-348. DOI: 10. 11820/dlkxjz. 2002. 04. 007.
- [4] 袁作新. 流域水文模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [5] 张金存,芮孝芳. 分布式水文模型构建理论与方法述评[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 286-292. DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-6791. 2007. 02. 023.
- [6] SEYFRIED M S, WILCOX B P. Scale and the nature of spatial variability: Field examples having implications for hydrologic modeling [J]. Water Resources Research, 1995, 31(1): 173-184. DOI: 10. 1029/94wr02025.
- [7] 周莉,李致家,韩通. 基于地形地貌资料的 Nash 单位线参数规律研究[J]. 湖泊科学, 2016, 28(5): 1141-1147. DOI: 10. 18307/2016. 0525.
- [8] 赵人俊. 流域水文模拟: 新安江模型和陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984: 1-10.
- [9] 张建云. 中国水文预报技术发展的回顾与思考[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 435-443. DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2010. 04. 019.
- [10] 王婕,宋晓猛,张建云,等. 中小尺度流域洪水模型模拟比较研究[J]. 中国农村水利水电, 2019, (7): 72-76.
- [11] 霍文博,朱跃龙,李致家,等. 新安江模型和支持向量机模型实时洪水预报应用比较[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(4): 5-11. DOI: 10. 3876 /j. issn. 1000-1980. 2018. 04. 001.
- [12] KIRKBY M, BEVEN K. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology [J]. Hydrological Sciences Journal, 1979, 24(1): 43-69. DOI: 10. 1080/02626667909491834.
- [13] 刘青娥,夏军,王中根. TOPMODEL 模型几个问题的研究[J]. 水电能源科学, 2003, 21(2): 41-44. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-7709. 2003. 02. 014.
- [14] 熊立华. 分布式流域水文模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 2004.
- [15] BEVEN K J, LAMB R, QUINN P F, et al. TOMODEL in computer models of watershed hydrology[M]. Colorado: Water Resources Publications, 1997.
- [16] BURNASH R J C. The NWS river forecast system-catchment modeling [A]// Singh V P. Computer Model of Watershed Hydrology. Littleton: Water Resources Publications, 1996.
- [17] 陈红刚,李致家,李锐,等. 新安江模型、TOPMODEL 和萨克拉门托模型的应用比较[J]. 水力发电, 2009, 35(3): 14-18. DOI: 0559-9342(2009)03-0014-05.
- [18] 辛朋磊,李致家,汤嘉辉,等. 新安江模型参数全局优化: 以月潭流域为例[J]. 湖泊科学, 2011, 23(4): 626-634. DOI: 10. 18307/2011. 0420.
- [19] DUAN Q Y, GUPTA V K, SOROOSHIAN S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization[J]. Journal of Optimization Theory & Applications, 1993, 76(3): 501-521. DOI: 10. 1007/BF00939380.
- [20] 赵人俊,王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988(6): 4-11.
- [21] 李致家,姜婷婷,黄鹏年,等. 降雨和地形地貌对水文模型模拟结果的影响分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 473-480. DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2015. 04. 003.