

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.03.001

API模型和新安江模型的参数区域化研究与应用

姚成¹,邱桢毅¹,李致家¹,胡维登¹,许洁²

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098; 2. 安徽省水文局,安徽合肥 230022)

摘要: 为了将 API 模型与新安江模型更好地应用于无资料地区,将 API 模型和新安江模型应用于大别山区及皖南山区的 29 个中小流域,对模型参数在研究区的区域规律进行研究,通过中小河流新建水文测站对参数区域化的成果进行实证研究。结果表明:API 模型与新安江模型均能较好地用于研究区中小流域的洪水模拟;逐步回归分析法能有效地推求模型的敏感参数;基于空间邻近与逐步回归分析相结合的参数区域化方法,API 模型与新安江模型在新建水文测站次洪模拟中的平均确定性系数分别达到 0.92 和 0.86,该方法能有效地推求研究区无资料流域 API 模型与新安江模型的参数。

关键词: API 模型;新安江模型;无资料地区;参数区域化;空间邻近法;逐步回归分析法;新建水文测站

中图分类号: P338 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)03-0189-06

Parameter regionalization study and application of API model and Xin'anjiang model

YAO Cheng¹, QIU Zhenyi¹, LI Zhijia¹, HU Weideng¹, XU Jie²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Hydrology Bureau of Anhui Province, Hefei 230022, China)

Abstract: In order to better apply the API model and Xin'anjiang model to the ungauged regions, the parameter regionalization study and its application were conducted in this paper. Here, the API model and Xin'anjiang model were applied to small and medium-sized basins in the Dabie Mountain area and South Anhui Mountain area, the regional regularity of model parameters in the selected area was studied, and the result of regionalization was verified by the new hydrological station for the small and medium-sized rivers. The results show that both API model and Xin'anjiang model can be used to simulate the flood runoff in the study area; stepwise regression analysis can effectively deduce the sensitive parameters; based on the parameter regionalization method combining spatial proximity and stepwise regression analysis, the average deterministic coefficients for hourly API model and Xin'anjiang model simulations in the new hydrological station are 0.92 and 0.86, respectively. Therefore, this method can effectively deduce the parameters of API model and Xin'anjiang model in the ungauged basins of selected area.

Key words: API model; Xin'anjiang model; ungauged regions; parameter regionalization; spatial proximity; stepwise regression analysis; new hydrological station

水文模型作为水文预报的计算工具,一直是水文工作者研究的重点。随着研究的不断开展,水文模型的研究已在有水文资料的地区取得了较好的进展^[1-2]。其中,传统的 API 模型与新安江模型经过长期的优化改进,在国内已经取得了广泛的应用,尤其是在湿润与半湿润地区,取得了较高的预报精度^[3-4]。然而,模型

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402705);国家自然科学基金(51679061);中央高校基本科研业务费专项(2016B04714)

作者简介: 姚成(1982—),男,副教授,博士,主要从事水文模型与水文预报研究。E-mail:yaocheng@hhu.edu.cn

引用本文: 姚成,邱桢毅,李致家,等. API 模型和新安江模型的参数区域化研究与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(3):189-194.

YAO Cheng, QIU Zhenyi, LI Zhijia, et al. Parameter regionalization study and application of API model and Xin'anjiang model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(3): 189-194.

参数的推求问题限制了 API 模型和新安江模型在无资料地区的进一步应用。因此,有效地解决 API 模型与新安江模型在无资料地区的参数推求问题,对于无资料地区的水文预报具有重要意义。在模型参数推求过程中,3 种典型的参数区域化方法被广泛使用,即空间邻近法、回归分析法以及物理相似法^[5]。而自 2003 年国际水文科学协会(IAHS)提出无资料流域水文预报(PUB)计划以来,模型参数推求方面的研究取得了一定的进展^[6]。Oudin 等^[7]将基于 TOPMODEL 与 GR4J 模型的回归分析、空间邻近、物理相似 3 种方法进行试验,结果显示空间邻近法最优;Reichl 等^[8]基于 SIMHYD 模型对物理相似法加以优化,结果显示经过改进的物理相似法优于空间邻近以及回归分析法;Zhang 等^[9]基于改进新安江模型对空间邻近与物理相似法进行整合,结果表明两者相结合的方法较传统的参数区域化方法对结果有一定改善。由此可见,参数区域化方法的优化与结合是有必要的。此外,对于参数区域化方法的验证通常采用交叉验证,没有对无资料地区的未来资料序列进行实际检验。与此同时,近年来无资料流域新建成了大量的水文测站。新建水文测站资料序列较短,难以进行参数的率定,但可以通过有限的最新资料对参数区域化方法推求的参数结果进行实际检验。

本文选择大别山区及皖南山区为研究区,将 API 模型与新安江模型应用于研究区的 29 个中小流域,并且采用空间邻近与逐步回归分析相结合的参数区域化方法估计研究区内无资料流域的水文模型参数,旨在验证 2 种模型在研究区中小流域适用性的同时,通过新建水文测站检验此方法用于推求研究区无资料流域模型参数的有效性,改善 API 模型、新安江模型在无资料流域应用困难的现状,并为参数区域化方法的研究提供一定的借鉴。

1 研究区概况及数据资料

研究区为安徽省大别山区及皖南山区,属亚热带湿润季风气候,夏季雨量充沛,年平均降雨量 1 200 ~ 1 500 mm,年均蒸发量 600 ~ 800 mm。基于水文资料系列、流域代表性等因素,本文在研究区选取周家河、张冲等 29 个独立的中小流域作为研究对象,流域面积介于 4.71 ~ 887.88 km² 之间,均为自然闭合流域,受水工建筑物的影响较小。为率定 API 模型新安江模型的参数,选取这 29 个中小流域的实测水文资料,包括逐日流量与雨量、时段流量与雨量以及蒸发数据等,其中流量、雨量的时段长均为 1 h。为便于比较模型模拟结果与实测数据,模型模拟的时段长取 1 h。为提取流域的属性因子用于逐步回归分析,本文选用研究区中小流域的数字高程数据,资料来自于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站,精度为 90 m×90 m,数据采集时间为 2000 年。通过地理信息系统软件提取了流域面积、河网密度、平均高程、面积坡度等 12 种流域的属性因子。

2 API 模型与新安江模型简介

2.1 API 模型

API 模型又称前期雨量指数模型,模型产流部分采用前期雨量指数和降雨量计算,汇流部分采用 Nash 单位线计算^[10]。API 模型的参数有:流域最大初损值 I_m 、前期雨量指数消退系数 k 以及 Nash 汇流参数 N 和 K (N 为线性水库个数, K 为线性水库的蓄泄系数)。

2.2 新安江模型

新安江模型^[11]是典型的概念性水文模型,模型的结构主要分为 4 个模块:(a)蒸散发模块,参数有 K_c 、 W_{um} 、 W_{lm} 、 C ;(b)产流模块,参数有 W_m 、 B 、 I_{mp} ;(c)水源划分模块,参数有 S_m 、 E_x 、 K_g 、 K_i ;(d)汇流模块,参数有 C_i 、 C_g 、 C_s 、 L 、 X ,参数的物理意义见文献[12]。

2.3 模型应用

API 模型与新安江模型在 29 个流域的应用结果用于检验模型在研究区的适用性。模型参数的率定采用 SCE-UA 算法,该优化算法稳定性好、收敛速度快,且应用较好^[13]。选用洪峰相对误差、确定性系数对模拟结果进行评价。依据 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》,洪峰相对误差在 20% 以内为合格。图 1 为 29 个流域次洪模拟结果箱型图,显示了洪峰合格率、确定性系数均值的最小值、下四分位数、中位数、上四分位数、最大值,体现了 API 模型与新安江模型在 29 个流域模拟精度的变幅。

由图 1 可知,API 模型与新安江模型在 29 个流域次洪模拟结果的洪峰合格率均在 60% 以上,确定性系数均值都在 0.6 以上。经统计:API 模型应用于 29 个流域的平均洪峰合格率和平均确定性系数分别为

77.45% 和 0.72;新安江模型应用于 29 个流域的平均洪峰合格率和平均确定性系数分别为 83.72% 和 0.84。模型应用结果表明 API 模型新安江模型均能较好地用于研究区中小流域的洪水模拟,且新安江模型可以取得相对更高的模拟精度。

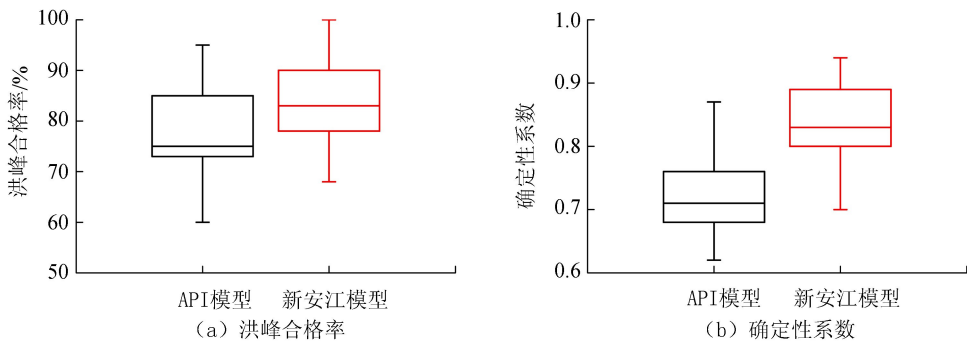


图 1 API 模型和新安江模型次洪模型模拟结果统计箱型图

Fig.1 Statistical boxplots of the simulating results by API model and Xin'anjiang model

3 参数区域化及其验证

3.1 参数区域化

空间邻近法是指建立在已知数据分布存在一定地理规律的基础上,通过已知点或其分区综合数据,推求该区域任一点或者分区数据的方法。模型参数通常具有一定物理意义,能够反映流域的自然地理综合特征。而流域自然地理特征是经过气候地形等长时间作用演化的结果,故其具有一定的区域相似性^[14]。正是区域相似性使得水文模型参数在空间分布上具有一定的规律,这也是空间邻近法能用于推求模型参数的前提条件。本文采用的空间邻近法为反距离权重法^[15],该法在模型参数推求中应用较好。此外,回归分析法作为参数区域化最常用的方法之一,其参数推求结果的好坏主要取决于模型参数与流域属性因子间是否存在较好的关联性,所选取的流域属性因子也需要能够反映出流域的自然地理特征。在选取流域属性因子的过程中,本文采用的是逐步回归分析法^[16-17]。逐步回归分析法不但剔除了引起多重共线性的变量,还能确保最后得到的自变量集是最优的。

API 模型参数确定时,首先固定参数 k 与 N , k 与 N 一般为常数,分别取 0.85 和 3^[18]。其次利用反距离权重法推求参数 I_m ,降雨径流移用邻近流域的相关关系。最后通过逐步回归分析方法获得公式计算参数 K 。其中,根据芮孝芳^[18]对 Nash 模型参数的分析, K 与流域的地形地貌条件相关。故本文以 K 为因变量,流域属性因子为自变量,通过逐步回归分析,得到 K 与流域地貌特征的定量关系:

$$K = 5.534S_{\text{area}}^{-0.236}$$

(1)

式中: S_{area} ——流域面积坡度, dm/km^2 。

通过逐步回归分析法得到的计算 K 值与率定 K 值近乎相等(图 2),但可以明显看出金家流域的计算值严重偏离率定值。据流域勘查发现,金家流域范围内存在东方红水库,该水库对径流有一定的调节作用。在参数率定过程当中,水库的调节作用已体现在实测洪水资料中。而在对该流域进行 K 值计算时并未考虑水

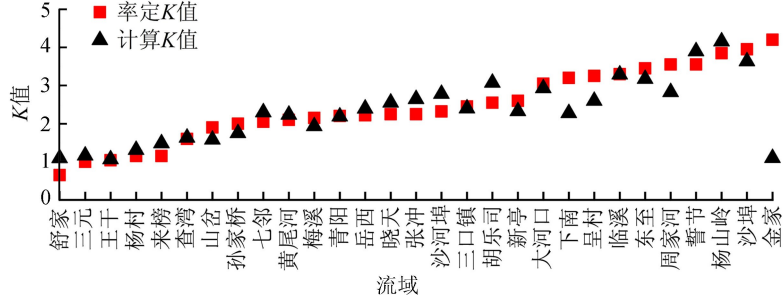


图 2 计算 K 值与率定 K 值对比

Fig.2 Comparison between calculated and rating values of K

库的调节作用,故导致计算值远小于率定值。此外,发现金家流域的洪水资料中大洪水仅一场,且场次洪水资料较少,率定值可能存在一定的偏差。基于上述原因,对除金家流域外的参数计算结果进行统计,计算 K 值与率定 K 值的平均绝对误差为 0.29。因而,在不存在水工建筑物影响或者影响较小的情况下,可以在研究区采用此公式计算 K 值。从物理层面分析,流域汇流过程中很重要的一部分是流域对净雨再分配中的水动力扩散作用,水动力扩散对于地表净雨汇流的影响主要体现在水流速度沿不同方向的差异性,这与流域的地形地貌有密切联系。式(1)中的流域面积坡度通过影响水动力扩散作用来改变地表净雨的再分配,从而影响了参数 K 的大小。

新安江模型参数确定时,为降低“异参同效”影响,首先对不敏感参数 W_m 、 W_{um} 、 W_{lm} 、 B 、 C 、 I_{mp} 、 E_x 采用固定赋值的方法,不再进行优选;其次利用反距离权重法推求参数 K_c 、 S_m 、 K_g 、 K_i 、 C_g 、 C_i 、 X ;最后通过逐步回归分析方法获得公式计算参数:河网蓄水消退系数 C_s 、滞时 L 。根据赵人俊等^[19]对新安江模型参数的分析, C_s 、 L 由河网地貌条件决定。故本文分别以 C_s 、 L 为因变量,流域属性因子为自变量,通过逐步回归分析,得到了 C_s 、 L 与流域地貌特征的定量关系:

$$C_s = \exp\left(\frac{-0.2867A^{0.2524}}{26.72 - 0.99\ln S_{area} - 3.185\ln H_{平均} - 9.55\ln P_p}\right)$$

(2)

式中: $H_{平均}$ ——流域平均高程,m; P_p ——流域河网密度,km/km²; A ——流域面积,km²。

$$L = 0.005A + 0.516$$

(3)

图3为逐步回归分析法得到的计算 C_s 值与率定 C_s 值对比结果,结果显示计算 C_s 值与率定 C_s 值整体误差较小,平均绝对误差为 0.07,但孙家桥与舒家流域的偏差较大,分别达到 0.37 和 0.17。分析发现:孙家桥流域面积较小、主河道长较短;舒家流域面积偏小,主河道长偏短,流域的河道平均坡度非常大。流域面积小、主河道长较短、河道平均坡度大这 3 个方面的原因可能造成流域的调蓄能力较差,从而使模型率定的 C_s 值较小。另外,孙家桥与舒家流域的面积均较小,而在面积较大的流域,杨山岭以及沙埠流域计算结果非常好。通过误差变化发现,误差整体上随着流域面积的减小呈现增大趋势,即误差与流域面积大体上呈现反比关系。造成这种误差现象的原因除异参同效以及模型结构所带来的不确定因素外,可能与小流域特定的地质条件和地貌结构有关。因此可以在研究区采用式(2)计算 C_s 值,且应用于面积较大的流域效果更好。

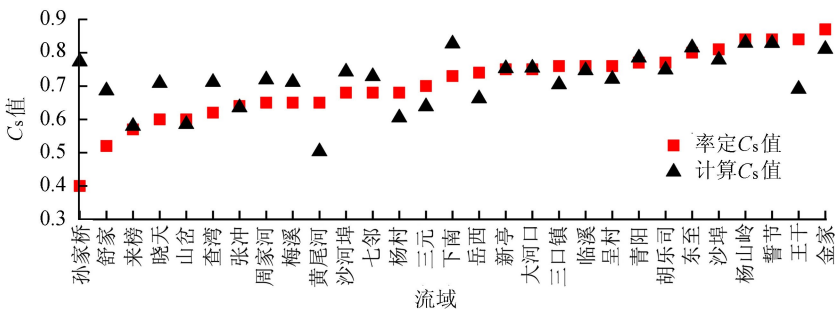


图3 计算 C_s 值与率定 C_s 值的对比

Fig.3 Comparison between calculated and rating values of C_s

L 的计算公式恰为一元线性回归,其回归模型的相关系数 $R^2=0.64$,表明该回归模型因变量与自变量之间的相关性程度较好。经统计:计算值 L 与率定值 L 的误差绝对值控制在 3 h 之内,平均误差为 0.74 h,误差较小。且式(3)只含有一个因变量,可很好地避免变量之间的相关性,可以在研究区采用式(3)计算 L 。

3.2 参数区域化成果在新建水文站的验证

本文选取研究区内的祁门流域对参数区域化成果进行验证。通过空间邻近与逐步回归分析相结合的参数区域化方法推求,祁门流域的模型参数均已得到。祁门作为中小河流新建水文测站,于 2014 年建立,仅有 2015—2016 年间 3 场洪水资料。基于研究区参数区域化的成果,本文采用 API 与新安江模型对这 3 场洪水进行模拟,模拟结果统计见表 1,洪水过程模拟见图 4。

由表 1 可知:API 模型 3 场洪水的洪峰相对误差均小于 20%,洪峰合格率为 100%,洪峰平均相对误差水平为 6.71%;3 场洪水的确定性系数均大于 0.8,平均确定性系数为 0.92。新安江模型有 2 场洪水的洪峰相对误差小于 20%,洪峰合格率为 66.67%,洪峰平均相对误差水平为 10.49%;3 场洪水的确定性系数均大于

表 1 API 模型与新安江模型在祁门流域的模拟结果

洪号	实测洪峰/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	计算洪峰/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		洪峰相对误差/%		确定性系数	
		新安江模型	API 模型	新安江模型	API 模型	新安江模型	API 模型
2015060708	492.00	456.44	427.40	-7.23	-13.13	0.87	0.88
2016041923	469.00	483.83	474.60	3.16	1.19	0.87	0.95
2016061811	676.83	819.55	716.20	21.09	5.82	0.83	0.94

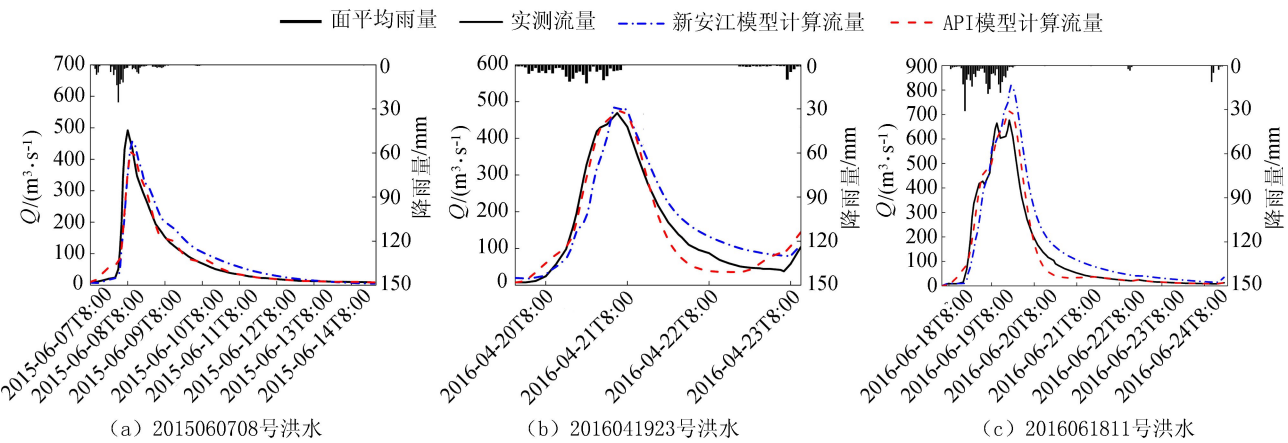


Fig.4 Simulation of flood process in the Qimen Basin

0.8,平均确定性系数为0.86。由图4所示的3场洪水过程可知:API模型的洪水模拟过程在涨洪初期流量略微高于实测,退水存在陡落现象,洪峰与实测较为接近,整体模拟效果较好;新安江模型的2016061811号模拟洪水洪峰与实测偏差较大,且3场洪水均略微滞后,但洪水过程线形状与实测较为一致;在整体上,API模型的模拟效果略优于新安江模型。

由此可见,API模型和新安江模型均能够较好地模拟祁门流域的洪水过程,但新安江模型在祁门流域的模拟效果较API模型稍差,这与前文模型在研究区29个中小流域的模拟结果有所差异。造成该现象的原因可能是:(a)API模型结构简单,需要率定的参数较少,有效的参数推求方法对于模拟效果起到了决定性的作用。而新安江模型结构比较复杂,需要率定的参数较多,参数推求的准确性对于模拟结果并非是唯一因素。因为影响模拟结果的是参数组合而不是单一参数,参数之间有复杂的联系,多个参数微小差异的组合可能会引起较大的影响,即“异参同效”现象;(b)祁门作为新建水文测站,历史资料有限,3场洪水的模拟结果具有一定的不确定性。

4 结 语

将API模型和新安江模型应用于安徽省大别山区及皖南山区的29个中小流域,在参数区域化方法上做出了新的尝试,采用空间邻近与逐步回归分析相结合的方法对研究区的模型参数开展区域化。在参数区域化成果验证过程中,采用中小河流新建水文测站。研究表明:(a)API模型和新安江模型均能较好地用于研究区中小流域的洪水模拟;(b)逐步回归分析法能有效地推求模型敏感参数 K 、 C_s 、 L ;(c)基于空间邻近与逐步回归分析相结合参数区域化方法,API模型和新安江模型在新建水文测站次洪模拟中的平均确定性系数分别达到0.92和0.86,该方法能有效地推求研究区无资料流域API模型和新安江模型的参数。此外,尽管研究得出了上述有用的结论,但仍需更多的新建水文测站及其实测资料来验证以便得到可靠性更高的结论,这都有待于在今后的研究中进行。

参考文献:

[1] 芮孝芳,蒋成煜,张金存. 流域水文模型的发展[J]. 水文,2006,26(3):22-26. (RUI Xiaofang,JIANG Chengyu,ZHANG Jincun. Development of watershed hydrologic models[J]. Journal of China Hydrology,2006,26(3):22-26. (in Chinese))

- [2] 李致家,姚成,张珂,等. 基于网格的精细化降雨径流水文模型及其在洪水预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 471-480. (LI Zhijia, YAO Cheng, ZHANG Ke, et al. Research and application of the high-resolution rainfall runoff hydrological model in flood forecasting[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(6): 471-480. (in Chinese))
- [3] 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. (ZHANG Jiangyun. Review and reflection on China's hydrological forecasting technique[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 435-443. (in Chinese))
- [4] 杨殿亮,许畅,钟华. 沂河临沂站洪水预报影响因素分析[J]. 水利规划与设计, 2017(12): 33-35. (YANG Dianliang, XU Chang, ZHONG Hua. Analysis of factors effecting flood prediction of Linyi station in Qihe River[J]. Water Resources Planning and Design, 2017(12): 33-35. (in Chinese))
- [5] MERZ R, BLOSCHLI G. Regionalisation of catchment model parameters[J]. Journal of Hydrology, 2004, 287(1): 95-123.
- [6] SIVAPALAN M, TAKEUCHI K, FRANKS S W, et al. IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003-2012: shaping an exciting future for the hydrological sciences[J]. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 2003, 48(6): 857-880.
- [7] OUDIN L, ANDREASSIAN V, CHARLES P, et al. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: a comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments[J]. Water Resources Research, 2008, 44(3): 893-897.
- [8] REICHL J P C, WESTERN A W, MCINTYRE N R, et al. Optimization of a similarity measure for estimating ungauged streamflow [J]. Water Resources Research, 2009, 45(10): 208-225.
- [9] ZHANG Yongqiang, CHIEW F H S. Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments[J]. Water Resources Research, 2009, 45(45): 4542-4548.
- [10] SITTNER W T, SCHAUS C E, MONRO J C. Continuous hydrograph synthesis with an API-type hydrologic model[J]. Water Resources Research, 1969, 5(5): 1007-1022.
- [11] 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.
- [12] 包为民. 水文预报[M]. 4版. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [13] 董洁平, 李致家, 戴健男. 基于 SCE-UA 算法的新安江模型参数优化及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(5): 485-490. (DONG Jieping, LI Zhijia, DAI Jiangnan. Application of SCE-UA algorithm to optimization of Xin'anjiang model parameters[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2012, 40(5): 485-490. (in Chinese))
- [14] 姚成, 章玉霞, 李致家, 等. 无资料地区水文模拟及相似性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 108-113. (YAO Cheng, ZHANG Yuxia, LI Zhijia, et al. Hydrological simulations and similarities in ungauged basins[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2013, 41(2): 108-113. (in Chinese))
- [15] DUAN Ping, SHENG Yehua, JIA L I, et al. Adaptive IDW interpolation method and its application in the temperature field[J]. Geographical Research, 2014, 196: 31-38.
- [16] 游士兵, 严研. 逐步回归分析法及其应用[J]. 统计与决策, 2017(14): 31-35. (YOU Shibing, YAN Yan. Stepwise regression analysis and its application[J]. Statistics & Decision, 2017(14): 31-35. (in Chinese))
- [17] 王卫光, 陆文君, 邢万秋, 等. 黄河流域 Budyko 方程参数 n 演变规律及其归因研究[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 7-13. (WANG Weiguang, LU Wenjun, XING Wanqiu, et al. Analysis of change and attribution of Budyko equation parameter n in Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 7-13. (in Chinese))
- [18] 芮孝芳. 利用地形地貌资料确定 Nash 模型参数的研究[J]. 水文, 1999, 19(3): 6-10. (RUI Xiaofang. A study on determining the parameters of the nash model using geomorphological data[J]. Journal of China Hydrology, 1999, 19(3): 6-10. (in Chinese))
- [19] 赵人俊, 王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988, 8(6): 4-11. (ZHAO Renjun, WANG Peilan. Study on parameters of Xinanjiang model[J]. Journal of China Hydrology, 1988, 8(6): 4-11. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-05-25 编辑: 张志琴)