

HBV 模型在逊毕拉河流域的适用性研究

谷一¹, 郝振纯¹, 王国庆², 金君良², 王乐扬³

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究所 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 宁海中学, 江苏 南京 210036)

摘要: 流域水文模型是水资源评价和管理的重要工具之一, 以我国北方的逊毕拉河流域为研究对象, 评估了 HBV 模型在不同资料条件下的区域适用性。结果表明: HBV 模型对逊毕拉河流域模拟效果总体较好, Nash 系数多在 0.6 以上; 雨量资料的质量对水文模拟效果具有较大的影响, 在雨量资料较为充分的条件下模拟效果更好, Nash 效率系数超过 0.8 (吴家堡站); HBV 可以较好地适用于资料较好的我国北方寒冷地区进行环境变化影响评估等方面的研究。

关键词: 径流量; HBV 模型; 水文模拟; 逊毕拉河; 适用性

中图分类号: TV12; P333.9 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)01-0020-06

Application of HBV model to the Xunbila River Basin

GU Yi¹, HAO Zhenchun¹, WANG Guoqing², JIN Junliang², WANG Yueyang³

(1. State Key Laboratory of Hydrology – Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology – Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Ninghai Senior Middle School, Nanjing 210036, China)

Abstract: Watershed hydrological model is an important tool in water resources assessment and management. Taking the Xunbila River basin located in north China as a study area, regional suitability of HBV model with different quality of rainfall data was investigated. The results showed that HBV model performed generally well for daily discharge simulation of the Xunbila River with Nash coefficient > 0.6. Data quality could influence hydrological simulation efficiency of HBV model a great extent. HBV model performed better for well-gauged catchment (e. g. for the Wujiabao station, Nash coefficient was larger than 0.8). Therefore, HBV model is suitable for cold regions of north China when data are good and could be applied to the researches on environmental impact assessment.

Key words: run off; HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) model; hydrological simulation; Xunbila River; suitability

1 研究背景

HBV 模型是瑞典气象水文研究所于 20 世纪 70 年代初开发的一款概念性水文模型, 初期目的是为了更好地进行水利水电工程的建设, 且满足在电脑设备上运行且运用灵活等合理需求。北欧地区冬季漫长, 气温较低, 夏季短促凉爽, 所以进行水文研究和水利开发时需格外注重冰冻融雪等问题, 而 HBV 模型中包含的融雪模块恰好能够灵活应对该类问

题, 故该模型目前在北欧地区已被广泛应用于水电站发电量预测, 大坝安全设计等方面^[1-2]。

在 20 世纪后期, HBV 模型引入中国, 并在中国南北地区的一些典型流域进行了应用尝试, 限于不同流域水文、气候、地理等因素的差异性, HBV 模型的应用效果也不尽相同^[3-4]。由于 HBV 模型结构简单, 优选速度快且结果良好, 常用于研究北方地区洪水致灾临界雨量, 在沁河、淮河等流域均取得了理想的效果^[5-7]。HBV 模型在汉江流域的适用性研

收稿日期: 2016-09-21; 修回日期: 2016-11-20

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFA0601501, 2016YFA0601601); 国家自然科学基金项目(41330854, 41371063, 41401024)

作者简介: 谷一(1994-), 女, 江苏高淳人, 硕士研究生, 主要从事流域水文模型和水资源评价研究。

通讯作者: 王国庆(1971-), 男, 山东成武人, 博士, 教授, 主要从事气候变化与水文水资源等方面的研究。

究中发现其在安康水电站上游流域具有较好的适用性,率定期和验证期 Nash 效率系数分别达到 0.72 和 0.75^[8]。目前,关于 HBV 模型在不同资料情况下的适用性研究仍较为欠缺^[9],以我国北方的逊毕拉河为例,探讨了 HBV 模型在不同资料区域的适用性,以为该流域的环境影响评价和水资源管理等提供科学依据。

2 资料与方法

2.1 流域概况

逊毕拉河是黑龙江省境内的一条主要支流,是典型的寒区河流。其位于小兴安岭北坡,河源位置位于东经 126°40',北纬 49°30',河口位置位于东经 128°59',北纬 49°25',海拔高度 400 m 左右,流域面积约为 15 846.6 km²,河长 251 km。逊毕拉河自西向东流经爱辉区、孙吴县和逊克县,并在逊克县车陆乡双河屯附近流入黑龙江干流,沿途有辰清河、沾河、乌底河等多条支流汇入。整条河流基本都在山区,只有沾河入口以下部分才有局部平原,故其两岸

植被覆盖率较高,约占整个流域面积的 40%^[10]。

逊毕拉流域内气象站和水文站的分布情况如图 1 所示,流域内只有孙吴站一个气象站,有清溪、宁家屯、吴家堡和双河屯 4 个水文站。雨量站大多分布在吴家堡站以上,而宁家屯站以上区域内只有两个雨量站,且位于区域下部。收集整理了流域内水文气象站点 2005 - 2012 年的逐日资料,表 1 给出了 4 个典型流域的基本信息。



图 1 逊毕拉河水系及水文气象站点分布

表 1 逊毕拉河流域 4 个典型子流域基本信息

水文站	河流	经度(E)	纬度(N)	面积/km ²	降水量/mm	径流深/mm
清溪	辰清河	127°14'	49°33'	1771	599.1	90.3
宁家屯	沾河	128°12'	49°33'	6547	520.8	172.9
吴家堡	逊毕拉河	127°71'	49°39'	5155	513.7	94.4
双河屯	逊毕拉河	128°93'	49°36'	15652	585.8	123.6

逊毕拉河流域大陆性气候特征显著,夏季温湿多雨,冬季严寒少雪,流域内的洪水类型主要是暴雨洪水。多年平均降水量约为 540 mm,超过 75% 的降水集中在 6 - 9 月份,年径流深为 160 ~ 220 mm,且河流在冬季长时间结冰封冻,降水与径流年内分布极不均匀。由于河道狭窄,坡度较大,汇流历时短,水流流势湍急,呈明显的山区性河流特征^[11]。

2.2 HBV 模型

HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) 模型是瑞典国家气象水文研究所研发的一个概念性的、半分布式的水文模型,其综合考虑了多种影响流域径流的因素,将降雨、融雪、产汇流、模型率定和实时预报等有机地结合起来,形成了一套完整的模型预报方案。该模型具有原理结构简单、易于实现、所需输入资料较少、参数优选速度快、模拟性能好等优点,现已被广泛应用于设计洪水、水量平衡研究、气候变化影响研究、地下水模拟和水文预报等诸

多方面^[12-13]。

HBV 模型以降水、气温、径流和潜在蒸散发作为输入值,主要由积融雪模块、土壤模块、响应模块和路径模块 4 部分组成。积融雪模块用来判断降水以降雨还是降雪的形式进入模型中,其以参数 TT 作为阈值,当温度超过 TT 时,降水模式为降雨,当温度低于 TT 时,降水模式为降雪;土壤模块既控制流域的蒸发计算,又判断土壤水是否参与地下水的交换;响应模块用一个简单的响应函数来概括整个径流形成过程,分为模拟洪峰流量和壤中流的上层非线型水库和模拟基流的下层线型水库,两层水库通过最大渗透率相互关联;路径模块是通过含有一个自由参数 ($MAXBAS$) 的三角形加权函数作为转化方程计算径流的一个过程。

采用 Nash - Sutcliffe 效率系数和多年平均相对误差两个目标函数进行模型率定:

$$Er = \frac{\bar{Q}_s - \bar{Q}_0}{\bar{Q}_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$Ns = 1 - \frac{\sum (Q_{i,s} - Q_{i,0})^2}{\sum (Q_{i,0} - \bar{Q}_0)^2} \quad (2)$$

式中： Er 为多年平均相对误差，反映总量精度，%； Ns 为 Nash - Sutcliffe 效率系数，反映流量过程吻合程度； \bar{Q}_s 为模拟平均径流量，mm； \bar{Q}_0 为实测平均径流量，mm； $Q_{i,s}$ 为模拟径流量，mm； $Q_{i,0}$ 为实测径流量，mm。模拟过程中要尽量使得流量误差 Er 趋近于 0，Nash 效率系数趋近于 1，当 Nash 效率系数接近 1 时，说明模拟值与实测值拟合程度较高，模拟效果较好^[14]。

3 模型分析结果

3.1 模型参数敏感性

HBV 模型中共有 24 个参数，即 14 个流域参数及 10 个植被带参数，其中在水文模拟过程中需要进行优选的参数有 12 个。由于 HBV 模型涉及到的参数比较多，故有必要对其进行参数敏感性分析，来提高模型率定的效率，缩短率定时间。优选参数及其范围如表 2 所示。

表 2 HBV 模型参数及范围

参数	定义	范围
$TT/^\circ\text{C}$	阈值温度	-2~0.5
$CF_{\max}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	度日因子	0.5~4
$SFCF$	降雪修正系数	0.5~0.9
FC/mm	最大土壤含水量	100~250
LP/mm	蒸发递减阈值	0.3~1
$BETA$	降雨/融雪的径流贡献率	1~2.5
$PERC/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	最大渗透率	0~4
UZL/mm	阈值参数	0~70
K_0/d^{-1}	洪峰出流系数	0.1~1
K_1/d^{-1}	壤中流出流系数	0.01~1
K_2/d^{-1}	基流出流系数	0.001~0.1
$MAXBAS/\text{d}$	转化能力参数	1~8

上述模型参数中， TT 、 CF_{\max} 、 $SFCF$ 为积融雪模块的参数， FC 、 LP 、 $BETA$ 为土壤模块的参数， $PERC$ 、 UZL 、 K_0 、 K_1 、 K_2 为响应模块的参数， $MAXBAS$ 为路径模块的参数。

积融雪模块中的参数影响的是 3 - 5 月份融雪时的径流， TT 越大则径流图变尖瘦且往后移动， CF_{\max} 的增加使径流图变尖瘦且前移， $SFCF$ 越大

则径流增加。在土壤模块中， FC 和 $BATE$ 增大使得径流整体下降，且 $BATE$ 主要影响较小的洪水波， LP 增大则会使得径流整体抬升。响应模块中 $PERC$ 增加使得波峰径流减少，波谷径流增加， UZL 增加则会使得涨水段径流减少，退水段径流增加， K_0 、 K_1 、 K_2 3 个参数值分别是控制洪峰流量、壤中流和基流的退水系数，其余参数值不变，退水系数越大，峰值越高，相应的基流径流减少。路径模块中只用到 $MAXBAS$ 1 个参数值， $MAXBAS$ 的增大往往会导致洪水波波型往后平移且峰值降低。

3.2 模拟结果分析

在进行模拟时，选取 2005 - 2009 年这 5 a 的数据对模型进行率定，利用 2010 - 2012 年的数据进行模型验证，表 3 统计给出了模拟结果。

表 3 逊毕拉河流域率定期及验证期的模拟结果

站点	阶段	绝对误差/ 相对误差/		Nash 系数
		($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	%	
清溪	率定期	5	3.73	0.779
	验证期	-6	-5.71	0.609
宁家屯	率定期	4	1.91	0.490
	验证期	-9	-5.88	0.386
吴家堡	率定期	1	0.98	0.802
	验证期	3	3.06	0.625
双河屯	率定期	3	2.22	0.682
	验证期	-4	-1.45	0.472

参数率定结果表明 FC 和 $MAXBAS$ 的值由上游向下游递增，这与上游区域植被茂密、土壤持水能力强有很大关系。由表 3 可以看出，(1) HBV 模型总体模拟效果较好，Nash 系数大多在 0.5 以上，4 个站水量平衡误差都控制在 10 mm 以内，相对误差也都控制在 $\pm 6\%$ 范围之内。(2) 吴家堡站模拟效果最好，率定期和验证期的绝对误差分别为 1 mm 和 3 mm，Nash 效率系数为 0.802 和 0.625；清溪站模拟效果次之，率定期和验证期的 Nash 效率系数均超过 0.6，其中，率定期的 Nash 系数接近 0.8。(3) 尽管双河屯站率定期 Nash 效率系数较高(0.682)，但验证期较低；宁家屯站模拟效果最差，Nash 效率系数小于 0.5。

为分析 HBV 模型对水文过程的模拟效果，图 2 给出了 4 个典型子流域逐日实测与模拟流量过程，由图可见：(1) 4 个站实测流量与模拟流量总体拟合良好，HBV 模型较好地模拟出了流域水文过程的季节分布特征。(2) 相比而言，吴家堡站模拟效果是 4 个站中最好的，尤其是大水年的情况下，其模拟径流与

实测径流基本重合,且验证结果也较好。由于 2005 年为模型率定阶段预热期,2010 年为模型验证阶段预热期,故第 1 年的数据均偏差较大。清溪站模拟结果总体良好,但对小水年的模拟效果较差,在该站的水文模拟中,采用的气象站位于清溪站控制区域之外,可能是清溪站模拟结果比吴家堡站差的主要原因。(3)双河屯站和宁家屯站模拟效果相对较差。宁家屯站以上雨量站点稀少,除宁家屯站外,只有沾北站和新春站这两个汛期雨量站,4-5 月份的洪峰过程大多为融雪径流,而非汛期整个流域只有一个雨量站的数据用于水文模拟,雨量站点稀少是该站模拟结果不佳的主要原因。双河屯站位于整个逊毕拉河流域出口断面处,流域面积较大,雨量站点分布不均匀,从而导致双河屯站模拟效果不是特别理想。

图 3 给出了 4 个水文站实测年径流量与模拟年径流量的散点图,可以看出:

(1)4 个站实测值与模拟值之间的相关系数均大于 0.75,二者之间具有良好的线性关系,其中吴家堡站

线性相关性最好,且所有点群最接近 1:1 线。

(2)相比较而言,尽管另外 3 个站的模拟值与实测值相关性较好,但点群大多分布在 1:1 线之上,说明模拟的年径流量大于实测值,分析认为这 3 个流域雨量站点稀疏,不能代表整个子流域的降水情况,这是模拟值偏高的主要原因。

图 4 给出了逊比拉河 4 个水文站实测与 HBV 模型模拟的径流量年内月分配过程。可以看出:(1)实测与模拟流量的年内月分配过程特征总体一致,主汛期 6-8 月份流量较大,12 月份到次年 3 月份流量较小,这与流域的降水、气温的季节特征有较大关系,汛期降水较多,易于形成径流,冬季气温较低,小于零度,降水以降雪形式出现,很难形成地面径流,河道流量以地下径流为主。(2)上半年 HBV 模型模拟的流量普遍偏小,而下半年模拟值普遍偏大。分析认为 HBV 模型根据流域高程和温度来判断降水模式,以此来模拟降雨和融雪的蒸发下渗过程,计算模拟径流量和融雪径流等水文过程。

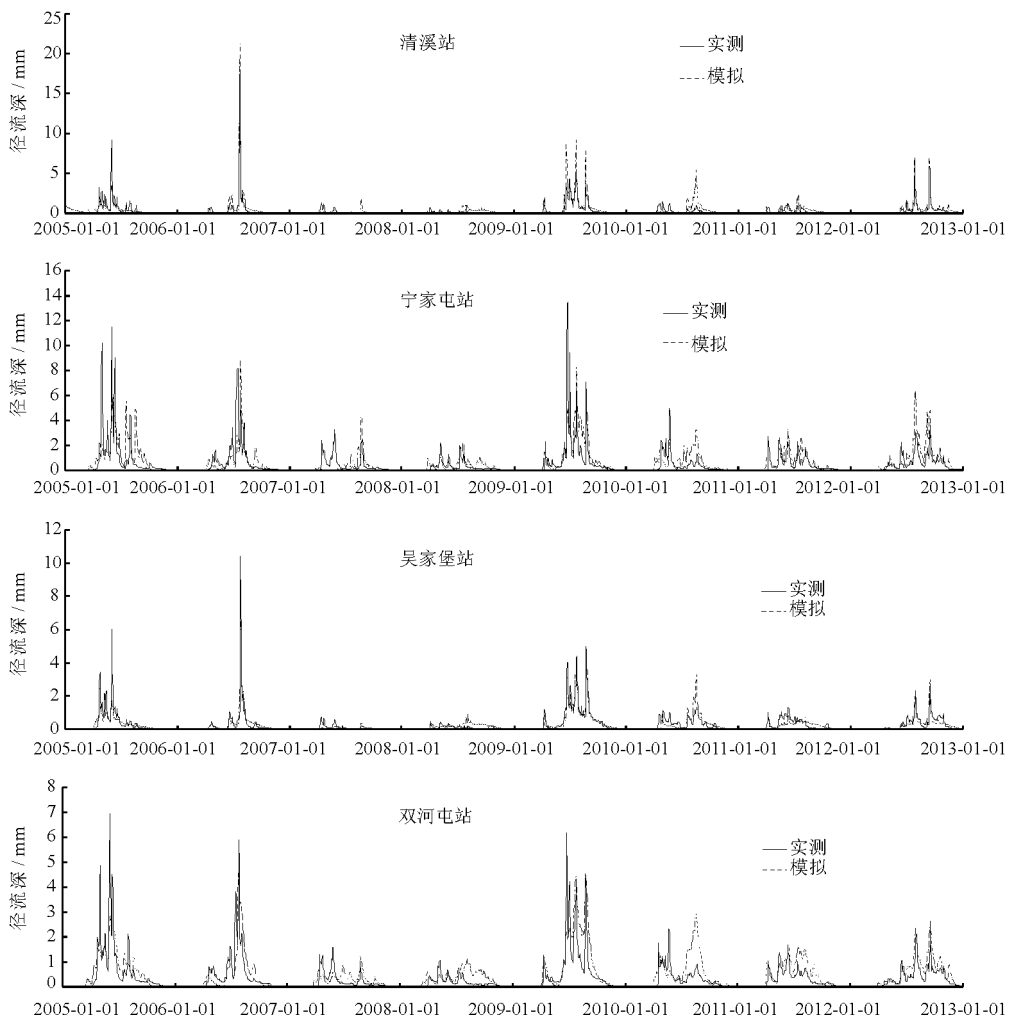


图 2 逊毕拉河 4 个水文站实测与模拟日流量过程

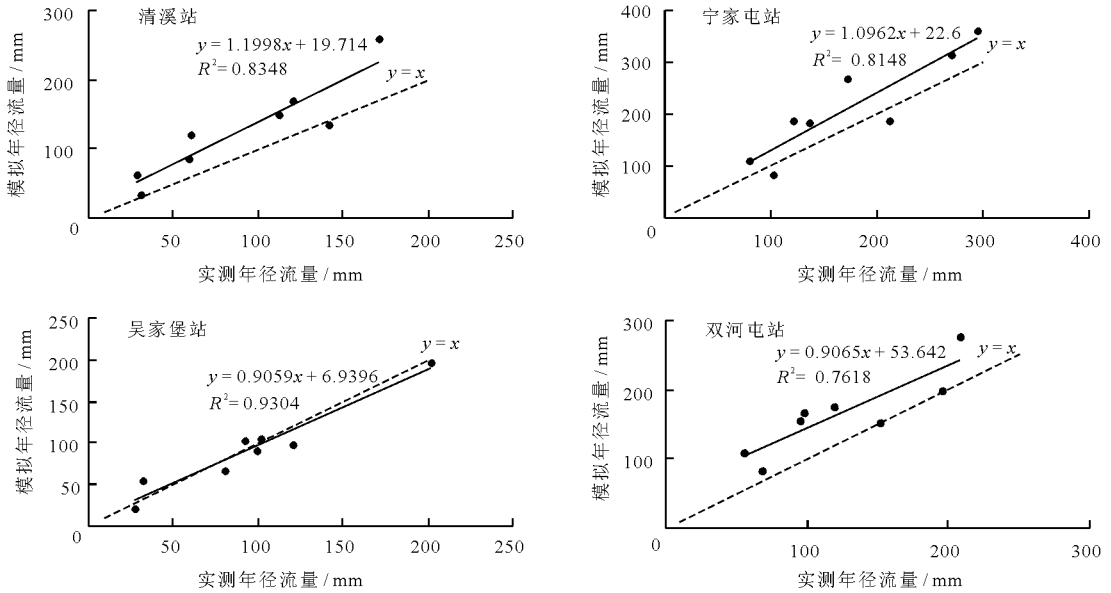


图3 逊毕拉河4个水文站实测与模拟的年径流量比较

由于逊毕拉河流域上一年12月到第二年的3月份温度较低,总体上均低于零下 2°C ,而 TT 的取值范围在 $-2\sim 0^{\circ}\text{C}$ 之间,故把这段时期的降水值均视为降雪,这可能与实际情况存在些许差异,也是造

成水文模拟误差的原因之一。HBV模型尽管能模拟出寒区径流态势,但在季节变化期产流机制转换过渡的描述方面以及关键参数的确定方面尚存在需要改进的地方。

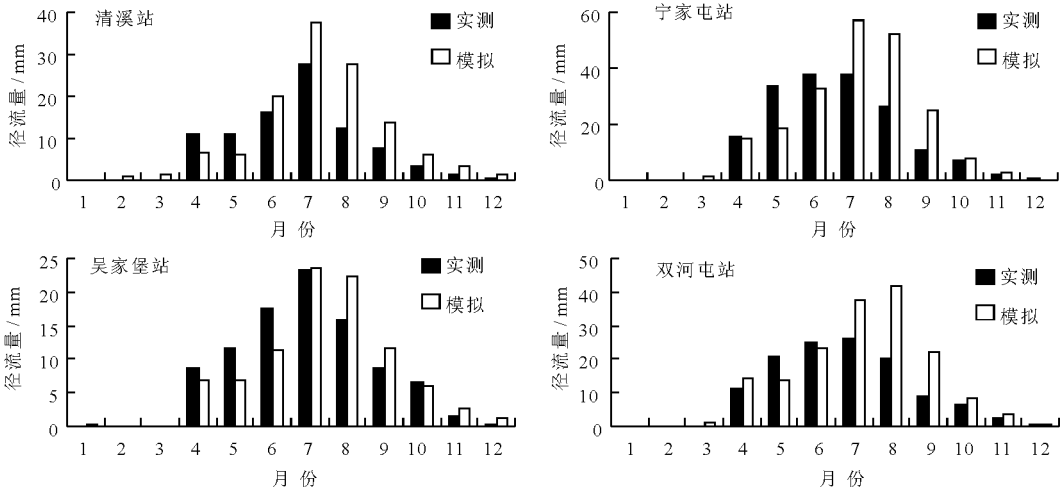


图4 逊毕拉河4个水文站实测与模拟月平均径流量

4 结论

(1) HBV模型在逊毕拉河流域模拟效果总体较好,模拟的径流量能大致反映出中国寒区径流的季节特征;相比而言,HBV模型对大水年拟合效果较好,对小水年模拟的误差相对较大。

(2) 研究区域气象资料的质量在一定程度上影响HBV模型的模拟精度,HBV模型对于资料丰富且流域面积小的流域模拟效果较好,对于资料欠缺

区域的水文过程模拟相对较差,无资料地区或资料欠缺地区的水文模拟仍为未来水文科学研究的重要方向。

参考文献:

- [1] Zelelew M B, Alfredsen K. Sensitivity - guided evaluation of the HBV hydrological model parameterization[J]. Journal of Hydroinformatics, 2013, 15(3):967 - 990.
- [2] Tian Ye, Xu Yueping, Zhang Xujie. Assessment of climate

- change impacts on river high flows through comparative use of GR4J, HBV and Xinanjiang Models [J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(8):2871-2888.
- [3] 张建新,赵孟芹,章树安,等. HBV模型在中国东北多冰雪地区的应用研究[J]. *水文*, 2007, 27(4):31-34.
- [4] 李龙辉,肖迪芳,杨春生. 寒冷地区融雪径流和融冻期降雨径流计算模型初探[J]. *水文*, 2011, 31(2):84-88.
- [5] 刘义花,鲁延荣,周强,等. HBV水文模型在玉树巴塘河流域洪水临界雨量阈值研究中的应用[J]. *水土保持研究*, 2015(2):224-228.
- [6] 赵海燕,张亚琳,王志伟,等. 基于HBV模型确定沁河流域洪涝致灾临界雨量[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(5):74-78.
- [7] 卢燕宇,田红. 基于HBV模型的淮河流域洪水致灾临界雨量研究[J]. *气象*, 2015, 41(6):755-760.
- [8] 董立凡,雷向杰,王倩. HBV模型在汉江流域的适用性研究[J]. *陕西气象*, 2016(4):23-26.
- [9] 王国庆,张建云,张明,等. 雨量站网密度对不同气候区月水文过程模拟的影响[J]. *人民长江*, 2009, 40(8):45-50.
- [10] 周俊峰,李义,孙卓. 逊毕拉河流域径流季节变化特征及变异分析[J]. *水利科技与经济*, 2011, 17(3):72-73.
- [11] 许连臣,贾俊明,周绍飞. 逊毕拉河流域暴雨洪水特性分析[J]. *水利科技与经济*, 2008, 14(3):232.
- [12] 张洪斌,李兰,赵英虎,等. HBV模型的改进与应用[J]. *中国农村水利水电*, 2008(12):70-72.
- [13] 张坤,包为民,赵丽平,等. 基于参数线性化率定法的HBV模型的优化算法及应用[J]. *水电能源科学*, 2013, 31(9):8-11.
- [14] 金君良,王国庆,刘翠善,等. 大尺度分布式水文模型VIC在嘉陵江流域径流模拟中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(1):58-61+66.

(上接第19页)

- [3] 王小玲,翟盘茂. 1957-2004年中国不同强度级别降水的变化趋势特征[J]. *热带气象学报*, 2008, 24(5):459-466.
- [4] Jiang Rengui, Gan T Y, Xie Jiancang, et al. Spatiotemporal variability of Alberta's seasonal precipitation, their teleconnection with large-scale climate anomalies and sea surface temperature [J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(9), 2899-2917.
- [5] 王刚,严登华,张冬冬,等. 海河流域1961年-2010年极端气温与降水变化趋势分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(1):1-6+11.
- [6] 张皓,冯利平. 近50年华北地区降水量时空变化特征研究[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(2):270-279.
- [7] 张宏利,陈豫,任广鑫,等. 近50年来渭河流域降水变化特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(4):236-241.
- [8] 来文立,宋进喜,章杰,等. 近60a渭河流域降水特征[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(6):1106-1112.
- [9] 刘梅,魏加华,王峰,等. 渭河流域降水时空变化与干旱特征分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(2):193-197+210.
- [10] 李淼,夏军,陈社明,等. 北京地区近300年降水变化的小波分析[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(6):1001-1011.
- [11] 陆文秀,刘丙军,陈俊凡,等. 近50a来珠江流域降水变化趋势分析[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(1):80-90.
- [12] 毕宝贵,刘月巍,李泽椿,等. 秦岭大巴山地形对陕南强降水的影响研究[J]. *高原气象*, 2006, 25(3):485-494.
- [13] 李小燕. 陕南降水变化时空差异分析[J]. *陕西理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 28(5):74-78.
- [14] 中国气象科学数据共享服务网. 中国地面国际交换站气候资料日值数据集(1961-2013年). [EB/OL]. [2015-10-10]. <http://cdc.cma.gov.cn>