

HBV 水文预报模型在白龙江流域的应用研究

王有恒^{1,2}, 谭丹³, 景元书⁴

(1. 中国气象局 兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,
中国气象局 干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 西北区域气候中心,
甘肃 兰州 730020; 3. 兰州中心气象台, 甘肃 兰州 730020; 4. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044)

摘要: [目的] 在白龙江流域武都站以上区域构建 HBV 水文模型, 通过对区域日径流模拟研究, 来评估模型在该区域的适用性。[方法] 在参数敏感性分析的基础上, 对模型参数进行率定和验证, 并分析径流和降水量的年际变化特征。[结果] (1) 在率定期 Nash—Sutcliffe 效率系数 $E_{ns} = 0.65$, 确定性系数 $R^2 = 0.74$, 验证期 $E_{ns} = 0.60$, $R^2 = 0.70$, HBV 模型在该流域模拟精度较高, 具有较好的适用性; (2) 降水量与模拟径流变化趋势对应, HBV 模型较好地模拟出了洪水对降水的响应过程。[结论] HBV 模型可进一步用于研究气候变化对白龙江流域水资源的影响。

关键词: HBV 水文模型; 白龙江; 径流

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)03-0218-04

中图分类号: P334

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.046

Application of HBV Hydrology Model in Bailong River Basin

WANG Youheng^{1,2}, TAN Dan³, JING Yuanshu⁴

(1. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Climatic Change and Disaster Reduction, Lanzhou, Gansu 730020, China; 2. Northwest Regional Climate Center, Lanzhou, Gansu 730020, China; 3. Lanzhou Meteorological Observatory Center, Lanzhou, Gansu 730020, China; 4. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

Abstract: [objective] The conceptual semi-distributed rainfall—runoff model, HBV, was examined in the Bailong river basin upstream the Wudu hydrological station, and it was applied to simulate the daily runoff in order to evaluate the applicability of the model in the area. [Methods] The parameters of HBV were calibrated and validated on the basis of sensitivity analysis, and the annual variation characteristics of the runoff and precipitation were analyzed. [Results] During the calibration period, the E_{ns} was 0.65, and the R^2 was 0.74; and during the verification period, the E_{ns} was 0.60 and R^2 was 0.70. Both of these indicated that the model could be successfully applied to simulate the daily runoff. Beside, the response of flooding to precipitation can be simulated better to HBV model. [Conclusion] The HBV model can be used for further studies of the impacts of climate changes on water resources.

Keywords: HBV hydrology model; Bailong river; run off

气候变化如何影响水资源是流域生态保护中面临的一个现实问题, 气候变化必然会引起陆地尺度水文演变, 研究气候变化水文响应一个重要的途径就是利用水文模型^[1-2], 水文模型是研究水文自然规律和解决水文实践问题的重要工具^[3]。近年来, 水文模型发展迅速, 涌现出了一些著名的模型, 如 HBV 模型、SWAT 模型、SWIM 模型、中国新安江模型等^[1]。由于自然地理、气候、产汇流特性等的差异, 各类模型在不同流域的适应性有所不同。HBV 模型是瑞典国家

水文局(SMHI)开发研制的水文预报模型^[4]。目前 HBV 模型已经广泛应用于欧洲、美洲、澳洲等地区 30 多个国家的流域洪水预报, 取得了良好的预报效果。HBV 模型相对于其他模型而言有很多独特的优点, 一方面, HBV 模型适应于各种复杂气候条件下的水文模拟; 另一方面, HBV 模型具有输入参数少、适合大流域、模拟精度高等优点^[3]。HBV 模型在国内也已经得到广泛应用, 赵彦增等^[5]利用 HBV 水文模型对淮河官寨流域进行了模拟研究; 靳晓莉等^[6]对东

江流域进行了模拟研究,指出通过参数区域化,HBV 水文模型能有效地应用于东江流域无资料流域的模拟研究;向亮等^[1]利用 21 世纪未来百年气候变化预估试验数据,应用 HBV 模型对滦河流域进行了模拟研究,模拟效果较好,指出模型在滦河流域具有很好的适用性。

本文仅就 HBV 模型对白龙江武都水文站以上流域的适用性进行模拟研究,并与实际径流变化进行对比分析,以期为进一步研究气候变化对白龙江流域水资源的影响提供理论基础。

1 研究区概况

白龙江发源于甘肃省甘南藏族自治州碌曲县与四川省若尔盖县交界的郎木寺,流经甘肃省迭部县、岷县、舟曲县、宕昌县、武都区、文县,在四川省广元市境内汇入嘉陵江,全长 576 km,流域面积 31 808 km²。白龙江流域位于甘肃省和四川省境内,甘肃省武都水文站以上流域面积为 14 288 km²。白龙江流经地域较为广阔,地形高差悬殊,气候类型复杂多样,流域年平均温度为 15 ℃ 左右,年降水量 449~912 mm,降水多集中在春夏两季^[7-8]。

白龙江流域历史上曾遍布茂密的天然森林,是甘肃省最大的原始林区。但是受区域不断增加的人口压力和国家经济建设需要,流域内的森林资源受到严重破坏和过度开发利用,水土流失面积日趋增大,生态系统水源涵养能力减弱,林线大幅上升,仅 1989—1998 年 10 a 间,甘肃省舟曲县境内采伐森林面积达 1.2 × 10⁴ hm²,宕昌县境内流域以南林线由海拔 1 000 m 上升到 2 000 m 以上,半山、低山以及河谷地带天然林资源基本被破坏。

由于流域人口持续增长,加之大量开荒垦地,造成大面积的水土流失,加剧了滑坡、泥石流等地质灾害的发生,白龙江流域已成为甘肃省水土流失、地质灾害最为严重的区域之一^[9]。

2 模型建立和分析方法

2.1 基础数据

本研究所需空间数据包括数字高程模型 (DEM) 数据、土地利用数据和水系数据。其中,DEM 数据,来源于国家基础地理信息中心,分辨率为 1:250 000;土地利用数据,来源于寒区旱区科学数据中心,分辨率为 1:100 000;水系数据,来源于国家基础地理信息中心,分辨率为 1:250 000。

水文资料采用武都水文站逐日流量资料,由于 20 世纪 90 年代之前,流域受水利工程等人为因素影

响较小,下垫面能够保持一致,在此本文选取武都水文站 1973—1985 年(其中 1976 年数据缺失)共 12 a 的水文数据进行研究。HBV 模型所需的气象数据包括流域内 6 个气象站(岷县、迭部、舟曲、宕昌、文县、武都)1973—1985 年的逐日降水量、气温数据。

2.2 模型概述

HBV 模型是一个概念性、半分布式水文模型,综合考虑了降水、气温、产流、土壤、汇流等因素。其原理是将流域划分为多个子流域,利于考虑下垫面和降雨空间分布差异,并分别模拟各子流域的径流过程,然后经过河道汇流形成流域总出口的径流过程。由于结构简单,输入数据要求少,参数也比较少,HBV 模型被较多地应用于参数区域化研究中。

2.3 模型建立

(1) 利用 Map Windows GIS 软件将研究区划分为 15 个子流域(图 1)。



图 1 白龙江武都水文站以上流域水系与子流域

(2) 利用相应统计软件对子流域中心点进行雨量插值,插值结果为 15 个子流域中心点的逐日降水量和平均气温。

(3) 根据模型要求,分别建立子流域土壤持水能力(FC)文件(表 1)和土地利用类型文件(表 2)。

(4) 模型评价标准。模型参数率定采用模型自带的 GAP 优化方法来获得。采用确定性系数 (R^2) 和 Nash—Sutcliffe 效率系数 (E_{ns}) 2 个指标来度量模拟效果,2 个系数反映的是观测径流量和模拟流量之间的吻合度,前者用来度量均值的模拟效果,后者是一个标准化的统计量,用来度量极值的模拟效果。

$$R^2 = \frac{[\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})]^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2}$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

式中: Q_{obs} , \bar{Q}_{obs} ——观测值及观测值平均值; Q_{sim} , \bar{Q}_{sim} ——模拟值及模拟值平均值, R^2 和 E_{ns} 值可以在 0—1 之间变动,越接近 1,则模拟效果越好,若为负值,则模拟效果较差。

表 1 白龙江流域各子流域土壤持水能力(FC)值

子流域	FC 值	子流域	FC 值	子流域	FC 值	子流域	FC 值
1	74.0	5	66.4	9	78.3	13	60.8
2	76.4	6	62.0	10	130.0	14	76.2
3	77.9	7	66.0	11	136.4	15	74.0
4	72.7	8	60.0	12	68.9		

表 2 白龙江武都水文站以上流域土地利用类型划分

序号	类型	代码	序号	类型	代码	序号	类型	代码
1	农田	5	5	城市	6	9	裸地	12
2	森林	2	6	草地	9	10	其它	13
3	灌木	3	7	湿地	10			
4	岩石地	4	8	交通地	11			

3 结果分析

3.1 参数敏感性分析

参数敏感性分析的目的是为了判断哪些参数值的改变对模型结果影响更大,从而提高模型校准效率。人类活动对流域环境的影响是逐年增加的,20世纪70年代,流域受水利工程等人为因素影响较小,下垫面能够保持一致,因此选取武都水文站以上流域1973—1975年的天然逐日流量序列对HBV水文模型进行参数率定。

HBV模型输入涉及33个参数,一是可直接确定的参数,如流域面积、站点经纬度、气象要素值等;二是对模式敏感性很低的参数,通常无太大的变化;三是敏感性较高的参数,包括土壤水过程参数(7个)和汇流过程参数(5个),需要反复调试。本文根据参考文献[1]和[5]的成果以及以往经验,采用试错法将敏感性较高的参数输入到模型,经过反复调试,对比模拟效果,最终选定最敏感的6个参数,并对其进行校准,校准后结果如表3所示。

3.2 模拟结果分析

图2给出了武都水文站以上流域日径流模拟过程,在模型率定期, $E_{ns}=0.65$, $R^2=0.74$;在验证

期, $E_{ns}=0.60$, $R^2=0.70$ 。表4给出了HBV模型模拟的日径流量与观测值的吻合度。结果表明,HBV水文模型对武都站以上流域日径流模拟精度较高,模型在研究区具有很强的适用性。从图2中可以看到,模拟径流量较实测径流量小,原因主要在于:(1)流域内气象站点数量少且分布不均,通过气象站资料插值得到的气象数据存在一定的不确定性,特别是降水的插值精度不够,降水受海拔、地形、下垫面等因素的影响较多,通过统计方法插值得到的降水精度较差,从而对径流模拟结果影响较大;(2)用于模型模拟的土地利用和土壤数据为1995年数据,与20世纪70、80年代的下垫面情况有一定的差异;(3)模型调参过程中存在人为因素,从而影响模拟精度。另外,从图2中发现汛期模拟要好于非汛期模拟,这可能与非汛期降水量较少以及未考虑春汛融雪有关。

表 3 敏感性参数及其校准值

序号	敏感参数	参数含义	参数值
1	BETA	土壤蓄水容量经验系数	0.500
2	KUZ ₂	上层土壤的快速消退系数	0.048
3	UZ ₁ /mm	直接径流阈值	5.080
4	KUZ ₁	上层土壤的慢速消退系数	0.035
5	PERC/mm	下层土壤渗透能力	1.000
6	KLZ	下层土壤的消退系数	0.005

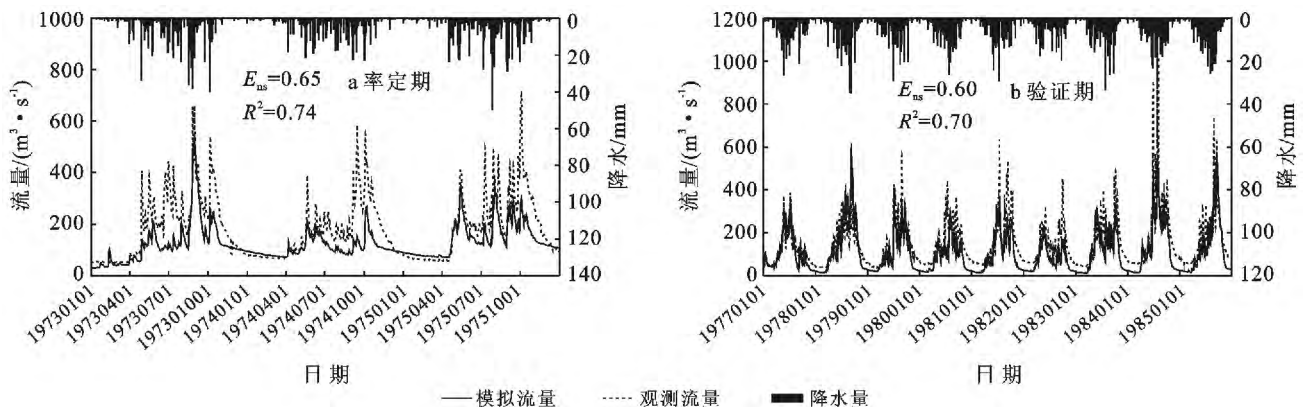


图 2 白龙江武都水文站日径流实测值与模拟值变化

径流与降水年际变化如图 2b 所示, 降水量和径流量年际变化趋势一致, 1980—1985 年降水量较小, 对应的径流量也较小, 1984 年汛期降雨量较大, 径流量也大, 并引发了白龙江流域的大洪水。由此可以看出 HBV 水文预报模型很好的模拟出了洪水对降水的响应过程。

表 4 HBV 模型模拟效果

时期	观测平均	模拟平均	R^2	E_{ns}
率定期(1973—1975 年)	181.85	125.78	0.74	0.65
验证期(1977—1985 年)	144.46	108.96	0.70	0.60

注: R^2 为确定性系数; E_{ns} 为效率系数。

4 结论

(1) HBV 模型在白龙江武都水文站以上流域具有较好的适用性, 模型率定期和验证期的 Nash—Sutcliffe 效率系数均在 0.6 以上, 模拟效果比较理想, 能较好的模拟出径流变化特征。

(2) 由于受气象站点数量与分布的限制, 模型对径流模拟存在局限性, 模拟径流偏小, 因此应用 HBV 模型需尽可能多地增加流域内雨量点密度, 提高降水插值精度。

(3) 模拟径流与降水量年际变化趋势相对应, 说明 HBV 模型可以较好地模拟洪水对降水的响应过

程, 因此可进一步用于研究气候变化对白龙江流域水资源的影响。

[参 考 文 献]

- [1] 向亮, 刘学锋, 郝立生, 等. 未来百年不同排放背景下滦河流域径流特征分析[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 861-866.
- [2] 顾万龙, 竹磊磊, 许红梅, 等. SWAT 模型在气候变化对水资源影响研究中的应用: 以河南省中部农业区为例[J]. 生态学杂志, 2010, 29(2): 395-400.
- [3] 高红凯, 何晓波, 叶柏生, 等. 1955—2008 年冬克玛底河流域冰川径流模拟研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(1): 171-181.
- [4] Bergström S. The HBV model [M] // Singh V P. Computer Models of Watershed Hydrology. Little Town, Colorado, USA: Water Resources Publications, 1995: 443-476.
- [5] 赵彦增, 张建新, 章树安, 等. HBV 模型在淮河官寨流域的应用研究[J]. 水文, 2007, 27(2): 57-60.
- [6] 靳晓莉, 张奇, 许崇育. 一个概念性水文模型的参数区域化研究: 以东江流域为例[J]. 湖泊科学, 2008, 20(6): 723-732.
- [7] 赵艳萍, 宁娜, 齐识. 白龙江流域近 40 a 气候变化特征分析[J]. 人民黄河, 2012, 34(10): 41-43.
- [8] 尹道举. 白龙江流域暴雨洪水特性[J]. 西北水电, 1992(4): 21-24.
- [9] 赵万奎, 张富, 安平山. 甘肃白龙江流域水土流失成因分析及治理对策[J]. 甘肃科技, 2013, 29(20): 5-7.
- [10] 间分异规律[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 121-128.
- [11] 刘月梅, 张兴昌. EN-1 固化剂、N 肥与土壤体积质量对黑麦草生长及水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报, 2014, 42(1): 1-8.
- [12] Nilsson C, Berggrea K. Alterations of riparian ecosystems caused by river regulation[J]. Bioscience, 2000, 50(9): 783-793.
- [13] 丁小龙, 张兴昌, 窦晶晶. EN-1 固化剂对 4 种土壤饱和和导水率的影响研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 132-134.
- [14] 李扬, 王冬梅, 信忠保. 漓江水陆交错带植被与土壤空
- [15] 谢小妍. 土力学[M]. 北京: 农业出版社, 2006: 26-28.
- [16] 王健, 刘旦旦, 张鹏辉. 土壤密度对土壤抗侵蚀性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(1): 65-68.
- [17] 张丽萍, 张兴昌, 孙强. SSA 土壤固化剂对黄土击实、抗剪及渗透特性的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 45-49.
- [18] 苏涛, 张兴昌, 王仁君. EN-1 对砒砂岩固化土抗剪强度特征的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 86-91.
- [19] 张丽萍, 张兴昌, 孙强. 2 种离子固化剂改善黄土抗剪强度和抗渗性的研究[J]. 节水灌溉, 2009(5): 35-38.

(上接第 217 页)