

SWBM 模型在锡林河流域气候变化影响评价中的应用

李 杨¹,朱仲元¹,贾德斌¹,姚苏红²,刘翠善^{3,4},李皓冰⁵

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,内蒙古 呼和浩特 010018;2. 内蒙古自治区第三地质矿产勘查开发院,内蒙古 呼和浩特 010050;3.水利部应对气候变化研究中心,江苏 南京 210029;4. 水文水资源与水工程国家重点实验室,江苏 南京 210029; 5. 黄河水利科学研究院,河南 郑州 450003)

摘要:以内蒙古地区的锡林河流域为研究对象,采用考虑融雪的水量平衡模型(SWBM 模型),在对锡林河流域水文模拟的基础上,评估了流域水资源对气候变化的响应。结果表明:SWBM 模型锡林河流域月径流过程具有较好的模拟效果,率定期和检验期的模型效率系数均超过 60%,相对误差也均小于 8%,在未来全球气候变化背景下,流域水资源以减少趋势为主,2030 年之后,减少幅度将可能超过 10%。

关键词:水量平衡模型;参数率定;径流模拟;影响评价

中图分类号:P467;TV211.1

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2013)02-0039-04

根据政府间气候变化专门委员会(the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第四次评估报告,21 世纪末全球平均气温将可能升高 1.1~6.4℃^[1]。气候变化将加剧全球和区域水文循环的过程,影响到降水、蒸发、径流、土壤湿度等水循环要素的时空分布,引起水资源在时间和空间上的重新分配^[1-2]。我国北方气候干旱,随着全球变暖和国民经济和社会发展,生态环境问题日益突出。内蒙古地区位于 40°~45°N 之间,受西风带影响强烈,水资源非常缺乏,对当地畜牧业发展和矿产资源的开发具有严重影响。正确评估气候变化对区域水资源的影响是未来该地区水资源及社会经济可持续发展的重要内容。

气候变化是重要的环境问题,由世界气象组织(WMO)、联合国环境署(UNEP)、国际水文科学协会(IAHS)等国际组织促进,先后开展并实施了世界气候影响研究计划(WCIP)、全球能量水循环试验(GEWEX)等项目的研究^[3]。随着我国气候变化研究的深入,未来区域水资源的模拟及气候变化影响评估已成为目前国家重大科研计划中的重点内容之一。王国庆等(2011 年)分析了辽河、涪江流域径流对气候变化

的响应^[4],陈亚宁等(2004 年)研究了气候变化对塔里木河水资源的可能影响^[5],郝振纯等(2006 年)评估了未来气候变化对黄河源区水资源的影响^[6],张建云等(2007)就气候变化影响评估方法及其对水文水资源的影响做了系统研究^[2]。从目前研究成果来看,干旱地区的水文模拟是目前水文科学研究的难点,关于内蒙古地区的气候变化影响评估相对较少。

本文以内蒙古地区的锡林河流域为研究对象,应用考虑融雪的水量平衡模型(Snowmelt-based Water Balance Model,SWBM 模型)进行了水文模拟研究,在此基础上,进一步评估了气候变化对该流域水资源的影响。

1 资料与方法

1.1 锡林河流域概况

锡林河属内陆河流域查干淖尔水系。发源于赤峰市克什克腾旗宝尔图西南山顶,海拔高度为 1334m,河流从东向西流经赤峰市的克什克腾旗,锡林郭勒盟的阿巴嘎旗,在贝尔克牧场转向西北流经锡林浩特市,最后流入查干诺尔沼泽地自然消失。锡林河全长 175km,

收稿日期:2012-06-04

基金项目:中英瑞气候变化适应项目(ACCC20100202);国家 973 气候变化专项计划(2010CB951103)

作者简介:李杨(1988-),女,内蒙古阿荣旗人,硕士研究生,主要从事流域水文模拟和气候变化影响评价等方面的研究。

E-mail: liyang152122@163.com

通讯作者:朱仲元(1956-),男,内蒙古凉城人,教授,博士生导师,主要从事水文水资源与天然植被需水方面的研究。E-mail: nmgzzy@tom.com

流域面积 105452km²,河道平均比降 1.25‰。主要由三条支流汇入,右岸汇入的有呼来吐郭勒,好来郭勒;左岸汇入的有呼斯特河,这几条河均在锡林河水库上游汇入,水库以下无支流汇入,整个流域水系呈不对称分布。锡林河水库位于内蒙古自治区锡林浩特市南 9km 的锡林河干流上。水库坝址以上控制流域面积 3 582km²。

收集整理锡林河流域锡林浩特站 1963~2008 年的逐月流量资料,考虑资料序列长度和空间分布特点,在流域内及周边选取 4 个气象站,收集整理了各站降水、气温和水面蒸发资料。

1.2 考虑融雪的水量平衡模型

针对半干旱地区超渗产流机制,郭生练、王国庆等提出了一个简单的月水量平衡模型^[7],为进一步反映北方寒冷地区的融雪径流特征,王国庆等通过概化积雪的面积分布及雨雪划分特点,对该模型进行了改进完善,提出了基于融雪的水量平衡模型(Snowmelt-based Water Balance Model, SWBM 模型),用于环境变化对区域水资源的影响研究,该模型考虑了地面径流、地下径流和融雪径流三种径流成分^[8]。模型结构如图 1 所示。

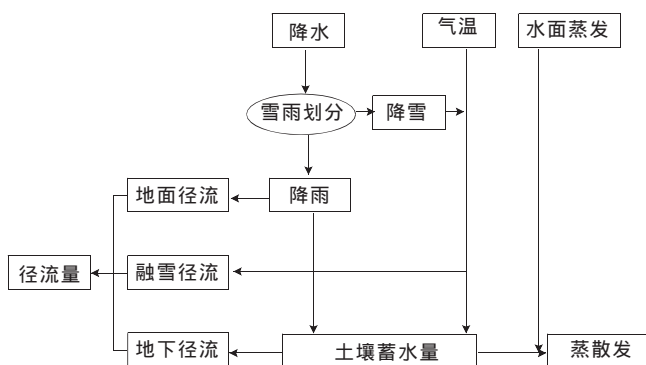


图 1 考虑融雪的水量平衡模型结构框图

Fig.1 Framework of snowmelt-based water balance model

该模型根据超渗产流机制,假设地面径流与降水和土壤含水量呈现正比线性关系;地下径流的计算则采用地下线性水库出流理论进行模拟;从能量收支和物质平衡的角度进行融雪径流的计算中,综合考虑了温度、积雪量对融水率的影响,假定冰雪融水率与气温具有较好的指数型关系,融雪径流正比于积雪量^[8]。

为估算流域的积雪过程,模型根据两个临界气温进行雨、雪划分,这两个临界气温一般取+4℃和-4℃。当气温高于+4℃时,降水全为降雨形式;当气温低

于-4℃时,降水全为降雪;气温在两者之间时,降雪量按线性插补。在模型的实际运行中,首先计算三种水源,然后根据水量平衡原理依次计算时段下渗量、流域的实际蒸散发和土壤蓄水量。三种径流组成的线性叠加即为时段内的计算径流量。模型共有 4 个参数需要率定,分别为:土壤蓄水容量 S_{max} ,其取值范围一般介于 100~500mm 之间;地面径流系数 K_s 、地下径流系数 K_g 和融雪径流系数 K_{sn} 均为无量纲参数,取值范围介于 0~1 之间^[2,8]。

2 结果与讨论

2.1 锡林河流域融雪径流产生机制

锡林河流域地处亚洲中纬度季风气候区,寒冷且干旱。多年平均降雨量为 266mm,平均年潜在蒸发量约为降雨量的 5.3 倍。由于蒸发量较大,降雨量少,所以锡林河流域水资源十分短缺,锡林河流域多年平均径流深仅为 4.44mm,径流系数不到 0.02,是全国产流系数最低的地区之一。锡林河流域产流受降水和融雪的支配,图 2 为多年平均降雨量、气温及锡林浩特站实测径流量的年内分配。

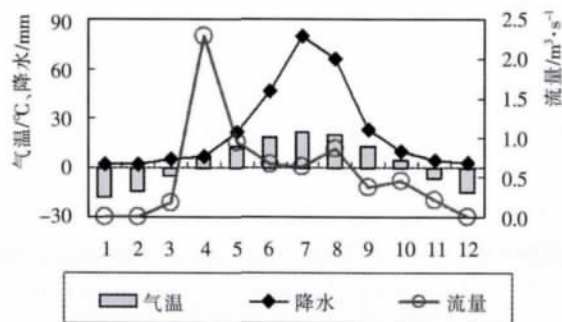


图 2 锡林河流域平均降雨量、温度及径流量年内分配
Fig.2 The annual distribution of mean precipitation, temperature and runoff in Xilinh River basin

由图 2 可以看出,尽管年降雨量的 80%均来自汛期(6~9月),但径流最大峰值出现在 4 月份,分析认为,锡林河流域平均气温较低,特别是 11 月至次年 3 月份,平均温度均低于 0℃,降水多以降雪形式出现,流域积雪量较大,4 月份气温回暖,融雪径流明显,因此,锡林河流域的水文模拟必须考虑流域的积雪和融雪过程。

2.2 锡林河流域径流过程模拟

进行水文模拟时,除要求所选用的模型结构合理外,参数的优化识别也非常重要。选用 Nash - Sutcliffe

确定性系数和相对误差作为目标函数^[9],采用 Rosen-broke 方法进行参数率定^[2]。其表达式为:

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^N (Qobs_i-Qsim_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Qobs_i-\overline{Qobs})^2} \quad (1)$$

$$Re=\frac{MAR_{sim}-MAR_{obs}}{MAR_{obs}}\times 100\% \quad (2)$$

式中: $Qobs_i$ 为实测流量; $Qsim_i$ 为模拟流量; \overline{Qobs} 为实测流量的平均值; N 为样本数; MAR_{sim} 为模拟的平均年径流量; MAR_{obs} 为实测的平均年径流量。

研究表明,流域水文易受人类活动的影响,资料序列越长,资料受人类活动的影响将越显著,从而影响水文模拟精度^[10]。由于本文主要研究水文模型在半干旱地区的适应性,为避免人类活动对流域水文的影响,故只采用资料系列的前 10 年(1963~1972)进行水文模拟研究。为检验模型的模拟效果,将前 6 年(1963~1968)作为模型的率定期用于参数率定,将后 4 年(1969~1972)作为检验期检验模型的模拟效果。表 1 给出了率定的模型参数及模拟统计结果,图 3 给出了 1963~1972 年实测与模拟的月流量过程,图 4 给出了实测与模拟流量的多年平均月分配过程。

表1 锡林河流域的模型参数及模拟效果统计
Table1 The calibrated parameters and statistical results of discharge simulation for the Xilinhe River basin

模型参数				率定期		检验期	
$Smax$	Ks	Kg	Ksn	$R^2/\%$	$Re/\%$	$R^2/\%$	$Re/\%$
310	0.05	0.001	0.52	73.6	2.1	62.7	7.4

由表 1 可以看出,锡林河流域土壤蓄水容量为 310mm,该值稍大于黄河流域的大多数子流域^[2],说明该流域土壤层较为深厚,另外,地表径流系数和地下径流系数较小,融雪径流系数较大,说明该流域地表径流与地下径流不发育,融雪径流占有较大比重。统计结果表明,计算年径流量与实测值非常接近,最大相对误差不超过 15%,率定期和检验期的 Nash-Sutcliffe 模型效率系数分别为 73.6% 和 62.7%,两个时期的多年平均相对误差均小于 8%。

由图 3 和图 4 可以看出,实测与模拟径流过程较为吻合;SWBM 模型模拟的 4 月份和 7、8 月份的径流量偏大,5、6 月份和 10、11 月份模拟的径流量偏小,总体而言,模型较好地模拟出径流量的丰枯变化,特别是

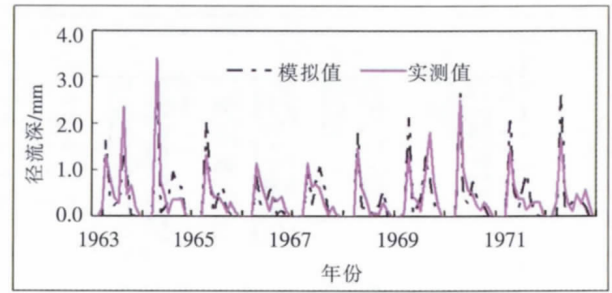


图3 锡林河流域锡林浩特站实测与模拟月流量过程
Fig.3 The observed and simulated runoff at the Xilinhaote station in the Xilinhe River basin

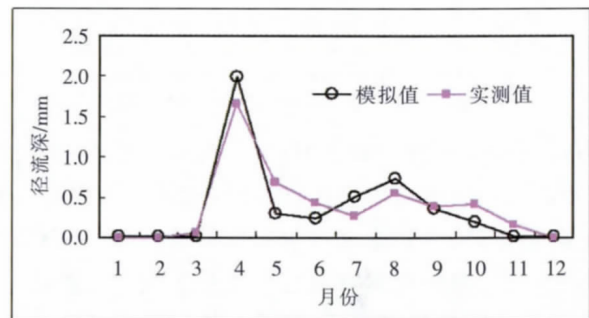


图4 锡林浩特站实测与模拟月流量的年内分配比较
Fig.4 The annual distribution of the observed and simulated runoff at the Xilinhaote station in the Xilinhe River basin

4 月份以融雪为主的凌峰和 8 月份以暴雨产流为主的洪峰。由此说明,模型在锡林河流域具有较好的模拟效果,可以用于环境变化对流域水资源的影响评估。

2.3 气候变化对锡林河流域水资源的影响

在完成区域水资源评价模型构建的基础上,通常利用未来气候变化情景驱动评价模型,进而评估未来气候变化对区域水资源的影响^[2]。中国适应气候变化项目(Adapting to Climate Change in China, ACCC 项目)提供了 A1B 排放情景下基于 HadCM3、MPI 两种全球气候模式和 PRECIS、REGCM3 两种区域模式的 4 套区域气候情景。尽管不同模式下各年代气温变化有所差异,但总体均呈现升高趋势;降水的不确定性更大;与基准期 1981~2010 年相比,2021~2030 年期间,平均气温约升高 0.85~1.32℃,降水变化幅度在-1.0%~3.3%之间。

采用建立的考虑融雪过程的水量平衡模型,根据未来气候变化趋势,评估了锡林河流域水资源的变化,图 5 给出了锡林河流域在不同气候变化情景下水资源的变化情况。

由图 5 可以看出,锡林河流域未来水资源以减少趋势为主,除了 2021~2030 年期间,Had-Pre 情景下水资源有略微增多趋势外,其它年代的水资源均为减少趋势,2030 年之后减少幅度较大,其中,2031~2040 年

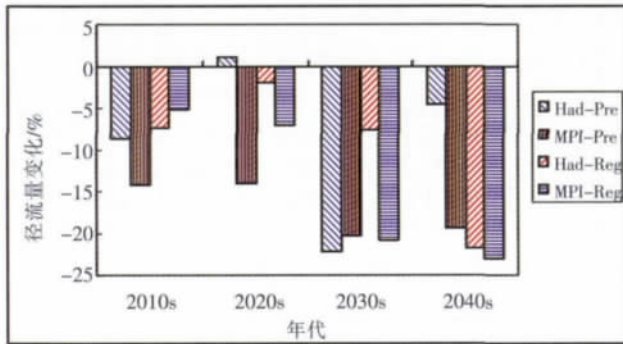


图5 锡林河流域不同年代水资源较基准期(1981~2010)的变化(Had-Pre:HadCM2驱动PRECIS模式的情景;Had-Reg:HadCM2驱动Regcm3模式的情景;MPI-Pre:MPI驱动PRECIS模式的情景;MPI-Reg:MPI驱动Regcm3模式的情景)
Fig.5 The runoff changes in the various decades comparing with the baseline from 1981 to 2010

和 2041~2050 年减少幅度分别为 7.5%~22.1%和 4.5%~23.0%。另外,也可以看出,锡林河流域水资源受气温变化影响显著,尽管未来降水有增有减,但水资源以减少为主,与气温变化具有显著的负相关性。分析认为,在气温升高的气候背景下,锡林河流域降雪比例减少,降雨比例增多,由于该气候非常干旱,大部分降雨难以形成有效径流,大多损失于流域蒸散发,从而导致流域水资源显著减少。

流域水文模型已广泛应用于环境变化影响评价、水资源优化配置及调度等多个领域,成为流域现代管理的重要工具。尽管分布式流域水文模型是目前水文科学研究的热点,然而,该类模型对资料要求精细,致使大多数流域难以满足模型的资料要求,相比而言,集总式水量平衡模型,结构简单,参数较少,资料要求不高,因此,该类模型依然是目前开展环境变化影响研究的主要工具之一,然而,根据流域水文特性选取适用的水文模型是非常重要的环节。内蒙古地区气候干旱,未来全球变化背景下,锡林河流域水资源将可能呈现减少趋势,对流域水资源的开发利用和维系区域生态环境改善提出了严峻挑战。

3 结语

锡林河流域是全国最为干旱的地区之一。流域水资源匮乏,多年平均实测径流量为 4.44mm,该流域的产流过程受融雪和暴雨驱动,考虑融雪的水量平衡模型在该流域具有较好的径流模拟效果,Nash-Sutcliffe模型效率系数在 60%以上,相对误差也较小。

锡林河流域未来气温将继续呈现明显的升高趋势,降水变化的不确定性较大,变化幅度可能在 $\pm 10\%$

以内,然而,由于降雪比例减少,区域蒸散发增多,未来水资源以减少趋势为主,对区域水资源利用和生态环境提出严峻挑战。

气候变化对流域水资源具有直接影响,随着人类活动的加剧,下垫面变化和资源开发对流域水文的影响也更加突出,考虑人类活动和气候变化双重变化环境下的流域水文模拟及评价是未来研究的重要方向。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press,2007.
- [2] 张建云,王国庆.气候变化对水文水资源影响研究[M].北京:科学出版社,2007.(ZHANG Jianyun, WANG Guoqing. Impact of Climate Change on Hydrology and Water Resources [M]. Beijing: Science and Technology Press,2007. (in Chinese))
- [3] 张建云,王国庆,刘九夫,等.国内外关于气候变化对水的影响研究进展[J].人民长江,2009,(8):39-42.(ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, LIU Jiufu, et al. Review on studies for climate change impacting on water[J]. Journal of Yangtze River, 2009(8):39-42. (in Chinese))
- [4] 王国庆,李迷,金君良,等.涪江流域径流变化趋势及其对气候变化的响应[J].水文,2012,32(1):32-38.(WANG Guoqing, LI Mi, JIN Junliang, et al. Variation of runoff in Fujiang River basin and its responses to climate change[J].Journal of China Hydrology, 2012,32(1): 32-38. (in Chinese))
- [5] 陈亚宁.全球气候变化对新疆塔里木河流域水资源的可能性影响[J].中国科学 D 辑,2004,34(11):1047-1053.(CHEN Yaning, The potential effect of climate change on water resources in Tarim River of Xinjiang [J]. China Science (D), 2004, 34(11):1047-1053. (in Chinese))
- [6] 郝振纯,王加虎,李丽,等.气候变化对黄河源区水资源的影响[J].冰川冻土,2006,28(1):1-7.(HAO Zhenchun, WANG Jiahua, LI Li, et al. Impact of climate change on runoff in source region of Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2006,28(1):1-7. (in Chinese))
- [7] 郭生练,王国庆.半干旱地区月水量平衡模型[J].人民黄河,1994, 17(12): 13-16. (GUO Shenglian, WANG Guoqing. Monthly water balance model for semi-arid catchments [J]. Journal of Yellow River, 1994,17(12):13-16.(in Chinese))
- [8] 王国庆,马吉让.融雪径流模型及其在黄河唐乃亥站的应用[J].西北水资源与水工程,1997,8(2):60-64.(WANG Guoqing, MA Jirang. Snowmelt-based runoff model and its application to the Tangnaihai station of the Yellow River [J]. Water Resources and Water Engineering for North-west China. 1997,8(2): 60-64. (in Chinese))
- [9] Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V.. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles [J]. J. Hydrol. 1970,10:282 - 290.
- [10] 王国庆,金君良,王金星,等.辽河流域径流对气候变化的响应特征研究 [J]. 地球科学进展,2011,26(4):433-440.(WANG Guoqing, JIN Junliang, WANG Jinxing, et al. Study on hydrological characteristics of Liaohe River basin in response to climate change [J]. Advance in Earth Sciences,2011,26(4): 433-440. (in Chinese))

(下转第 50 页)

[30] 谢金南, 周嘉陵. 西北地区中、东部降水趋势的初步研究[J]. 高原气象, 2001, 20 (4):362-367. (XIE Jinnan, ZHOU Jialing. A preliminary study on trends and interannual variation of precipitation in central and western portions of Northwest region of China[J]. Plateau Meteorology, 2001, 20(4):362-367. (in Chinese))

[31] 张存杰, 李栋梁, 王小平. 东北亚近 100 年降水变化及未来 10 - 15 年预测研究 [J]. 高原气象, 2004, 23 (6): 919-929. (ZHANG Cunjie, LI Dongliang, WANG Xiaoping. Study on precipitation variability in last 100 years and trend prediction in Northeast Asia in future 10-15 years [J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(6): 919-929. (in Chinese))

[32] 王绍武, 董光荣. 中国西部环境特征及其演变[M], 北京: 科学出版社, 2002:71-145. (WANG Shaowu, DONG Guangrong. Environmental Characteristics and Evolution of Western China [M]. Beijing: Science Press, 2002:71-145. (in Chinese))

[33] 王苏民. 环境演变对中国西部发展的影响及对策 [M]. 北京: 科学出版社, 2002:15-17. (WANG Sumin. Environmental Evolution of the Development of Western China and Countermeasures [M]. Beijing: Science Press, 2002:15-17. (in Chinese))

[34] G.B.Phipp, C.A.Biney. Management of freshwater bodies in Ghana [J]. Water international, 2002, 27:476-484.

[35] 李玲萍, 杨永龙, 钱莉. 石羊河流域近 45 年气温和降水量特征分析[J]. 干旱区研究, 2008, 25 (5): 705-708. (LI Lingping, YANG Yonglong, QIAN Li. Analysis on the characteristics of temperature and precipitation in the Shiyang River basin since recent 45 years [J]. Arid Zone Research, 2008, 25(5): 705-708. (in Chinese))

Climate Change in Alxa Plateau over Recent 60 Years

CHUN Xi^{1,2}, DAN Dan², BI Lige³, LIU Meiping², LIU Yue², HU Hedalai²

(1. Key Laboratory of Mongolian Plateau Environment and Global Change, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 3. Inner Mongolia Institute of Meteorological Science, Hohhot 010022, China)

Abstract: Alxa Plateau, located in the monsoon margin area, where ecological environment is extremely fragile, is very sensitive to the dry and wet changes of climate. In this paper, the mutation and its change trend was analyzed by using Mann-Kendall and Mann-Whitney test, according to the monthly temperature and precipitation from the meteorology stations in the study area over the recent 60 years. The results show that the temperature mutation of the study area occurred in 1988, and the annual mean temperature from 1988 to 2010 is 1°C higher than that from 1955 to 1987, which show a significant warming trend while there is no obvious increasing trend of annual precipitation. Although there was a slight increase trend since 1991 at some stations, the precipitation mutation of regional scale did not occur. So the climate condition is still warm and dry, and it hasn't changed to warm and wet.

Key words: Alxa Plateau; water resources; climate change; ecological environment



(上接第 42 页)

Application of SWBM Model in Climate Change Impact Assessment for Xilinke River Basin

LI Yang¹, ZHU Zhongyuan¹, JIA Debin¹, YAO Suhong², LIU Cuishan^{3,4}, LI Haobing⁵

(1. Inner Mongolia Agricultural University, Hydraulic and Civil Engineering Institute, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Third Institute of Geology and mineral Exploration and Development, Hohhot 010050, China; 3. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 4. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China; 5. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Taking the Xilinke River Basin, a dry cold basin located in the Inner Mongolia of China, as a case, a snowmelt-based water balance model (SWBM) was applied to simulate runoff and study climate change impact. The results indicate that SWBM performs well for monthly runoff simulation, Nash-Sutcliffe efficiency (NSEs) in calibration and verification periods are both over 60% while relative error (Res) in both periods are less than 8%. Under global warming, water resources in the Xilinke River Basin will present decreasing trend with significant decreasing possibly occurred after 2030.

Key words: water balance model; parameter calibration; runoff simulation; impact assessment