

融雪的水量平衡模型在内蒙古 锡林河流域水文模拟中的应用

李 杨¹, 贾德彬¹, 朱仲元¹, 李皓冰², 严小林^{3,4}, 胡青叶^{3,4}

(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. 黄河水利委员会
水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 3. 南京水利科学研究院水文水资源与水工程国家重点实验室,
江苏 南京 210029; 4. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029)

摘 要: 水量平衡模型是目前水文及环境分析中最常用的工具和手段之一, 半干旱地区的水文模拟是目前水文科学研究中的难点。以内蒙古地区的锡林河流域为研究对象, 开展了考虑融雪的水量平衡模型(Snowmelt-based Water Balance Model, SWBM 模型)的拓展性应用研究。结果表明: 锡林河流域气候干旱, 产流受降水和融雪驱动, 流域降水量及实测径流量均呈现弱减少趋势。SWBM 模型对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可超过 60%, 相对误差小于 8%, 说明该模型可以用于研究气候变化对半干旱地区的影响评价。

关键词: 水量平衡模型; 参数率定; 径流模拟; 应用检验

中图分类号: P334.92 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2012)05-0138-04

Hydrological simulation of Xilinhe river basin in inner-mongolia using snowmelt-based water balance model

LI Yang¹, JIA Debin¹, ZHU Zhongyuan¹, LI Haobing², YAN Xiaolin^{3,4}, HU Qingye^{3,4}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, 010018, China
2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou, 450003, China;
3. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute,
Nanjing 210029, China; 4. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: Water balance model is one of commonly utilized tools and means in hydrological analysis and environmental change assessment, while hydrological modeling for semiarid areas is currently a challenge in hydrology science. Taking Xilinhe River basin, a dry cold basin, locating in the inner mongolia, as a case, a snowmelt-based water balance model (SWBM) was applied and verified. Results indicate that Xilinhe River basin is dry with less precipitation and cold temperature in most of seasons, runoff yielding in the catchment is dominated by both snowmelt and heavy rainfall storm. Both catchment mean precipitation and recorded annual runoff at Xilinhaote station present slight decrease trend. The SWBM model performed well for simulating monthly discharge rates. NSEs in calibration and verification are both beyond 60% while relative error in both periods is less than 8%, which implied that SWBM could be used in snow-covered cold catchment for hydrological modeling and climate change study.

Key words: water balance model; parameter calibration; discharge simulation; application and verification

收稿日期: 2012-05-29; 修回日期: 2012-07-07

基金项目: 国家 973 气候变化专项计划(2010CB951103); 中荷国际科技合作项目(2010DFA24330); 中英瑞气候变化适应项目(ACCC20100202)资助

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。
通讯作者: 贾德彬(1968-), 男, 内蒙古巴彦淖尔市人, 教授, 硕士生导师, 主要从事水文水资源系统模拟、水资源可持续利用与规划等方面的研究。

0 前言

随着国民经济及社会的发展,我国北方干旱半干旱地区水资源短缺和不合理的开发利用造成水资源危机以及相关生态环境问题日益突出,这些已经成为制约当地经济社会发展的瓶颈。内蒙古地区位于北纬 $40^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 之间,受西风带影响强烈,气候干旱少雨,水资源总体缺乏,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工作。

流域水文模拟技术是现代流域管理中应用最为广泛的工具之一,水量平衡模型以其灵活性好和易于理解的优点,在水文分析计算和气候变化影响评价中占有非常重要的地位。Thornthwaite等(1948)最早提出了水量平衡模型^[1],当时主要用于资料短缺地区的径流重建,后来为满足生态学研究、干旱分析、气候变化和人类活动影响评价等不同目的需要,随后,Palmer(1965)^[2]、Thomas(1981)^[3]、郭生练(1992)^[4]、王国庆等(1997)^[5]相继提出了结构及计算时段各异的水量平衡模型。王妙林(2000)^[6]、王国庆等(2005)^[7]对一些水文模型进行了比较,认为半干旱地区的水文模拟历来是水文模拟的难点,虽然水量平衡模型的结构简单,但一般具有较好的地区适应能力,并且有与复杂水文模型接近的模拟精度。

内蒙古地区气候干旱,产流机制复杂,目前,针对内蒙古地区的流域水文模拟研究相对较少。本文以内蒙古地区的锡林河流域为研究对象,在分析流域水文变化特性的基础上,对考虑融雪的水量平衡模型(Snowmelt-based Water Balance Model, SWBM模型)进行了拓展性应用尝试,并对模拟结果进行了分析讨论。

1 锡林河流域水文变化特性

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1334 m,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175 km,流域面积105452 km²,河道平均比降1.25‰。主要由三条支流汇入,右岸汇入的有开来吐郭勒,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9 km的锡林河干流上。水库坝址以上控制流域面积3852 km²。

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266 mm,并以0.688 mm/a的速率缓慢下降;多年平均潜在蒸发量约为1757.3 mm,大概是多年平均降雨量的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4.44 mm,并且还在以0.0191 mm/a的速率缓慢下降(图1)。

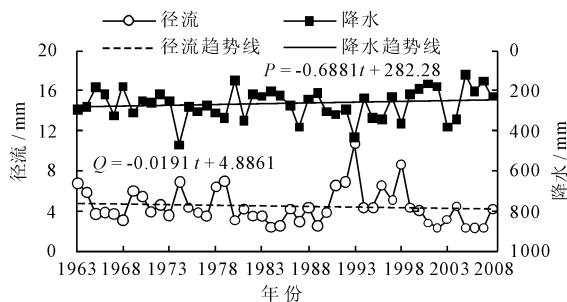


图1 锡林河流域1963-2008年年降雨量及年径流深变化

降雨是径流产生的主要因素,同时,潜在蒸发量及温度也将对干旱区的径流产生很大影响(Wang, 2009)。锡林河流域平均降雨量、平均温度及锡林浩特站实测径流量的年内分配如图2。由图2可以看出,年降雨量的80%均来自汛期(6-9月),并且最大月降雨量出现在7月份。锡林河流域年平均气温大概为 3°C ,其中4-10月份的平均温度高于 0°C ,而其他月份均低于 0°C 。从锡林河流域径流深年内变化来看,径流在一年内出现两个峰值,第一个峰值出现在4月份,这一现象解释了融雪的产流机制;第二个峰值出现在8月份,是汛期大量降雨的结果。

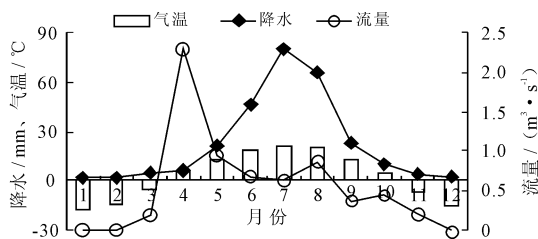


图2 锡林河流域平均降雨量、温度及径流量年内分配

2 考虑融雪的水量平衡模型

我国北方地区气候干旱,产流以超渗产流为主,同时存在降雪、积雪和融雪过程。根据北方干旱半干旱地区的水文特性,王国庆、郭生练等提出了考虑融雪过程的水量平衡模型(Snowmelt-based Water

Balance Model, SWBM 模型) 开展气候变化的影响研究, 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^[7]。模型结构如图 3。

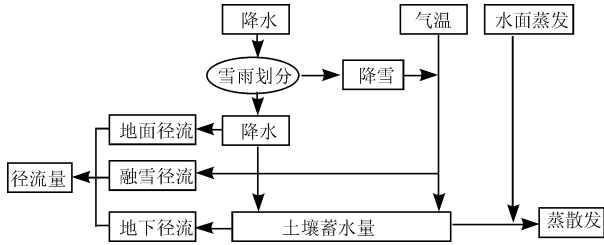


图3 考虑融雪的水量平衡模型结构框图

模型中认为地面径流与降水和土壤含水量存在正比线性关系, 假定地下径流为地下线性水库流出; 冰雪融水率与气温具有较好的指数型关系, 融雪径流正比与积雪量。三种径流成分计算如下:

$$Q_{si} = K_s \cdot \frac{S_{i-1}}{S_{\max}} \cdot P_i \quad (1)$$

$$Q_{gi} = K_g \cdot S_{i-1} \quad (2)$$

$$Q_{sni} = K_{sn} \cdot e^{\frac{T_i - T_H}{T_H - T_L}} \cdot Sn_i \quad (3)$$

$$Sn_i = Sn_{i-1} + P_{sni} \quad (4)$$

式中: Sn_i 为时段内积雪量, mm; Sn_{i-1} 为前期积雪量, mm; P_{sni} 为时段降雪量, mm。 T_i 为气温, °C; T_H 和 T_L 分别为雪雨划分的两个临界气温, 一般取 4°C 和 -4°C, 当气温高于 4°C 时, 降水全为降雨形式; 当气温低于 -4°C 时, 降水全为降雪; 气温在两者之间时, 降雪量按线性插补。 Q_{gi} 为地下径流量, mm; Q_{si} 为地面径流量, mm; S_{i-1} 为前期土壤蓄水量, mm; P_i 为时段降水量, mm。 S_{\max} 为最大土壤蓄水容量, mm; K_s 、 K_{sn} 和 K_g 分别为地面径流系数、融雪径流系数和地下径流系数, 均为无量纲参数。

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} , 该参数与土壤类型和土壤层厚度有关, 表征了土壤层的最大蓄水能力, 其取值范围一般介于 100 ~ 500 mm 之间; 地面径流系数 K_s 是一个无量纲参数, 参数取值范围介于 0 ~ 1 之间, 取值大小与下垫面状况和植被覆盖度有关, 植被较好的地区, 取值相对较小; 地下径流系数 K_g , 是一个无量纲参数, 取值一般介于 0 ~ 1 之间, 取值大小与土壤类型和植被覆盖度有关, 沙质土壤和植被覆盖度较好地区, 该

参数取值较大; 融雪径流系数 K_{sn} 参数反映了产流的地区特性, 取值范围介于 0 ~ 1 之间, 一般高纬度地区和寒冷地区的取值较大。

3 参数率定与水文模拟

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。参数率定方法可分为人工试错法和自动优选法两种方法, 人工试错法是根据人的分析判断来修改参数, 最后使目标函数达到预定要求; 自动优选法是利用计算机采用优化技术一次解出参数的最优值。目前, 常用的自动优化计算方法包括 Rosenbroke 法、Simplex (单纯形) 法、SCE - UA 法、遗传算法等^[8]。

目标函数的选择决定了模型参数优化识别的效率、准确性, 进而直接影响系统模拟的精度。水文模拟中常采用的目标函数包括 Nash - Sutcliffe 确定性系数和相对误差^[9], 其表达式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (5)$$

$$R_e = \frac{MAR_{sim} - MAR_{obs}}{MAR_{obs}} \times 100 \quad (6)$$

式中: Q_{obs_i} 为实测流量; Q_{sim_i} 为模拟流量; $\overline{Q_{obs}}$ 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。

显然, 如果 Nash - Sutcliffe 效率标准越接近 1, 同时相对误差越接近 0, 则说明模拟效果越好。在本研究中, 选用 Nash - Sutcliffe 确定性系数和相对误差作为目标函数进行参数的率定。

研究结果表明, 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。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。图 4 给出了 1963 - 1972 年实测与模拟的月流量过程, 图 5 给出了实测与模拟流量的多年平均月分配过程。

由图可以看出, 实测与模拟径流过程较为吻合, 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% and 62.7%, 两个时期的多年平均相对误差均小于 8%。由图 5 可以看出,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 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。

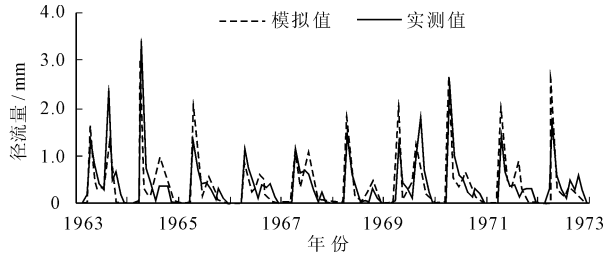


图4 锡林河流域锡林浩特站实测与模拟月流量过程

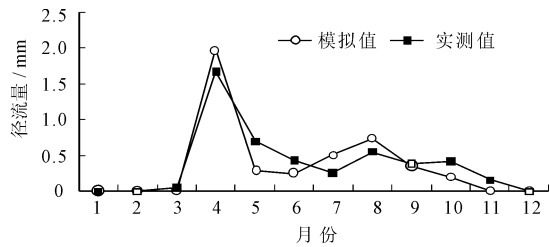


图5 锡林浩特站实测与模拟月流量的年内分配比较

4 结 语

流域水文模型是在人们对流域水文规律认识的基础上,对流域水文的数学描述。目前,流域水文模型已广泛应用于水文预报、水量调度、水资源优化配

置等多个领域,成为流域现代管理的重要工具。随着一体化流域管理步伐的加快,流域水文模型在河流现代管理中将扮演着愈来愈重要的角色,选取适用的水文模型将变得更为重要。SWBM 模型在锡林河流域的应用结果表明,模型在该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。流域水文易受人类活动的影响,变化环境下的流域水文模拟是未来研究的重要方向。

参考文献:

- [1] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of Climate[R]. Geogr. Rev, 1948,38(1):55-94.
- [2] Palmer W C. Meteorological drought[R]. Res. Pap. U. S. Weather Bur., 1965:45-58.
- [3] Thoms H A. Improved methods for national water assessment [R]. U. S. Water Resources. Washington, D. C., 1981:109-121.
- [4] 郭生练. 气候变化对东江流域水文的影响[C]//. 中国博士后首届学术大会论文集,国防工业出版社,1992.
- [5] 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.
- [6] 王渺林,郭生练. 月水量平衡模型比较分析及其应用[J]. 人民长江,2000,31(6):32-33.
- [7] 王国庆,荆新爱,陈江南,等. 流域水文模型在黄河中游清涧河流域的应用对比[J]. 灌溉排水学报,2005,24(3):53-56.
- [8] 张建云. 水文学手册[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [9] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles[J]. J. Hydrol. 1970,10:282-290.