

RCCC-WBM 水量平衡模型 在北方典型流域的适用性研究

赵建华¹, 王国庆^{2,3}, 张建云^{2,3}, 贺瑞敏^{2,3}, 万思成^{3,4}

(1.江苏省水文水资源勘测局南京分局, 江苏 南京 210008;

2.南京水利科学研究院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.水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029; 4.河海大学, 江苏 南京 210098)

摘要:流域水文模型是开展环境变化影响分析和水资源评价的重要工具。以山西省的5个不同尺度的代表性流域为研究对象, 分析了RCCC-WBM模型在山西省的区域适用性。结果表明:RCCC-WBM模型能够较好地模拟出山西省径流年内分配特征和年代际变化特点, 对典型流域月径流量模拟的Nash-Sutcliffe模型效率系数超过65%, 水量模拟误差也较小, 该模型在山西省具有较好的适用性, 可以用于山西省水资源评价等方面的科学研究。

关键词:RCCC-WBM水量平衡模型; 山西省; 典型流域; 流量模拟; 适用性

中图分类号:P333.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0852(2018)02-0025-05

1 前言

随着全球性气候变化的加剧和区域社会经济的快速发展, 环境变化对区域水资源的影响日益明显^[1]。动态模拟变化环境下区域水文过程, 科学评估不同驱动要素对水资源的影响, 是开展区域水资源评价的基础工作。随着对区域水文循环认识的深入和计算机技术的快速发展, 流域水文模拟技术成为评价区域水资源的重要手段和有效工具^[2]。目前全球已提出了数以百计的流域水文模型, 并广泛应用洪水预报、水资源模拟。以及环境变化的影响评价等方面^[3-5]。然而, 由于不同流域的水文气候特征存在差异, 基于不同产流机制的流域水文模型也具有相应的区域适用性^[6-7]。因此, 只有采用足够的代表性流域对模型进行充分的适用性检验和验证后, 才可以将流域水文模型应用到某一具体区域。

为配合山西省第三次水资源调查评价, 本研究采用山西省6个典型代表性流域的实测水文气象资料, 初步探讨了一个水量平衡模型在山西省的区域适用

性, 以期为变化环境下山西省水资源管理和评价提供科技支撑。

2 资料与方法

2.1 典型流域概况

山西省位于东经110.23~114.55°和北纬34.57~40.72°之间, 南北长680km, 东西宽约380km, 区域总面积约 $15.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。山西地处华北地区西部, 黄土高原东翼, 气候受东亚季风影响明显, 具有冬季寒冷干燥, 夏季炎热多雨的特点。全省平均年降水量约508mm, 年内分配不均, 70%的降水量集中在6~9月份。山西省水系发达, 汾河是省内的最大河流, 全省有5条流域面积超过 $10\,000 \text{ km}^2$ 的较大河流和48条流域面积介于 $1\,000 \sim 10\,000 \text{ km}^2$ 的中等河流。为评估月水量平衡模型在山西省的区域适应性, 综合考虑地理位置、气候特点、资料情况、流域尺度等因素, 选择了6条河流进行水文模拟效果检验。图1给出了山西省主要水系和所选6个水文站的地理位置, 典型流域的基本信息见表1。

收稿日期:2017-01-15

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFA0601501;2016YFC0402405;2017YFC0404401;2017YFC0404602);

国家自然科学基金项目(41330854;41401024;41401026)

作者简介:赵建华(1966-),男,江苏姜堰人,高级工程师,主要从事水文水资源评价研究。E-mail:zhaojjh@126.com

通讯作者:王国庆(1971-),男,山东成武人,教高,主要从事气候变化和水资源评价等方面的科学研究。E-mail:qgwang@nhri.cn

表1 山西省代表性流域的水文信息特征
Table1 The hydrological information of the selected typical catchments in Shanxi province

| 序号 | 河流 | 水文站 | 流域面积/km ² | 年降水量/mm | 年均气温/°C | 年径流量/mm | 资料系列 |
|----|-----|-----|----------------------|---------|---------|---------|-----------|
| 1 | 三川河 | 后大成 | 4102 | 485 | 6.92 | 51.3 | 1957~2010 |
| 2 | 中西河 | 岔口 | 492 | 592 | 8.54 | 131 | 1958~2015 |
| 3 | 岚河 | 上静游 | 1140 | 484 | 6.97 | 42.6 | 1955~2015 |
| 4 | 浊漳河 | 石梁 | 9652 | 528 | 8.92 | 39.8 | 1958~2012 |
| 5 | 昕水河 | 大宁 | 3992 | 516 | 9.03 | 32.4 | 1955~2008 |
| 6 | 汾河 | 河津 | 38728 | 486 | 10.11 | 28.1 | 1954~2000 |



图1 山西省水系概况及典型流域水文控制站地理位置
Fig.1 The river system in Shanxi province and location of the typical hydrology stations

所选的代表性流域在空间分布上基本覆盖了山西省的不同区域。由表1可以看出,代表性流域涵盖了多种不同的尺度范围,最小的流域只有数百平方公里,而最大的流域达到数万平方公里;尽管流域面平均降水量差异相对较小,但径流量差异较大,最大径流深约为最小径流深的4.67倍,反映了不同的区域产流差异。

2.2 RCCC-WBM 水量平衡模型

RCCC-WBM 水量平衡模型 (monthly Water Balance Model developed by Research Center for Climate Change, RCCC-WBM)是由水利部应对气候变化研究中心团队研发并逐步完善的大尺度水文模型^[7-8],该模型通过对超渗、蓄满两种产流机制进行合理概化,同时充分考虑寒区降雪、积雪和融雪过程特征进行区

域水文过程模拟。模型以月为计算时间步长,模拟的径流量包括地面径流、地下径流和融雪径流三种成分。模型输入包括逐时段降水量、水面蒸发量和气温,其中,水面蒸发也可以采用 Penman-Monteith 等公式进行估算^[9]。模型的结构如图2所示。

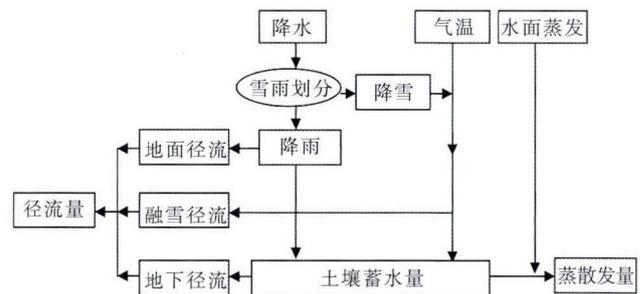


图2 RCCC-WBM 水量平衡模型结构框图
Fig.2 The structure of RCCC-WBM model

模型共有4个参数需要率定,分别为:土壤蓄水容量 S_{max} ;地面径流系数 K_s ;地下径流系数 K_g ;融雪径流系数 K_{sn} 。 S_{max} 的取值范围一般介于100~500mm之间;其它3个参数均为无量纲参数,取值范围介于0~1之间。

在参数率定的时候,一方面要求实测与模拟过程拟合程度好,同时要求模拟水量误差较小。因此,选用 Nash-Sutcliffe 模型效率系数 NSE 和模拟总量相对误差 RE 为目标函数, NSE 一般在0~1之间变化,若 NSE 越接近于0,同时 RE 越接近于1,说明模拟效果越好^[10]。

3 结果与讨论

3.1 典型流域水文特性

由于气候条件、土壤类型、下垫面等因素的差异,不同流域的产流特征具有一定的不同,图3给出了岚河(上静游)和昕水河(大宁)两个典型流域降水、气温和径流量的年内分配过程。

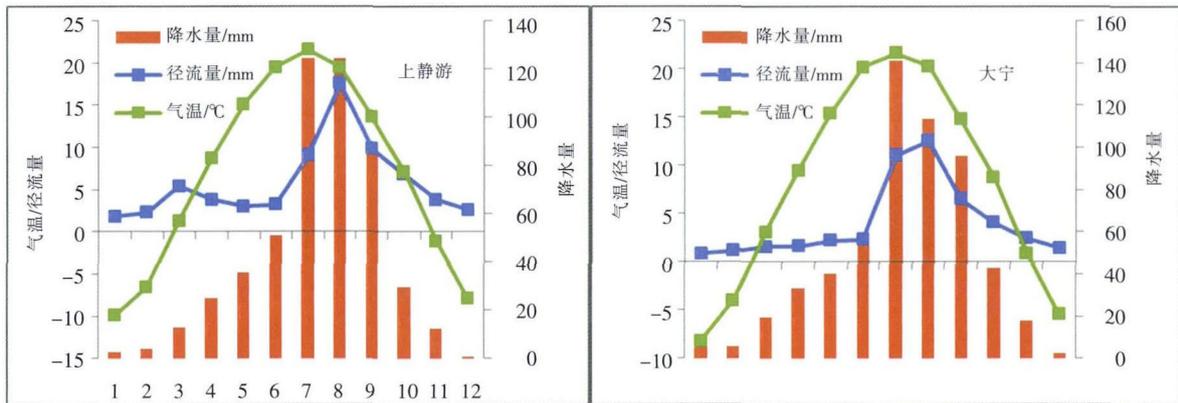


图3 山西省典型流域气温、降水和径流量年内分配过程

Fig.3 The monthly distribution of the temperature, precipitation, and runoff in the two typical catchments in Shanxi province

由图3可以看出,(1)两个流域气温的年内分配过程非常相似,7月份最高,12月至次年2月气温低于0°C,其中1月份气温最低,接近-10°C。(2)7月份降水量最大,主汛期7~9月份降水量较多,昕水河和岚河流域在这三个月的降水量分别占年降水量的61%和66%;冬季降水量最少,不到年降水量的3%。(3)受降水影响,两个流域主汛期径流量超过50%,但两个流域径流量的年内分配也存在一定的差异,岚河流域径流量为双峰过程,峰值分别出现在3、8月份;昕水河流域呈现单峰过程,峰值出现在8月份。

山西省气候干旱,降水集中,超渗产流是主要的产流机制,8月份径流峰值毫无疑问是由汛期降水产生的地表径流形成的;然而,也可以看出最大降水量出现在7月份,提前径流峰值一个月份,说明前期降水量对区域产流具有较大的影响。冬季气温较低,该时期降水多以降雪形式出现,特别是在12月份和次年1月份,气温多在-5°C以下,降水形成积雪,地下径流是该时期的主要成分。随着3月份气温转暖,积雪融化加速,多

数河流会出现应积雪融化形成的春汛,该时期径流由地下径流和融雪径流组成。相比而言,岚河流域春季融雪径流模型,形成3月份峰值,而昕水河融雪径流变化平缓,峰值不明显。分析认为,这与流域的气温变化有很大关系,岚河流域常年12月~次年2月份气温一直低于-5°C,3月份气温升温幅度较大,融雪径流明显;而昕水河2月份气温就已经超过-5°C,后期升温平缓,积雪逐步融化,形成的融雪径流也因此相对平缓。

3.2 模型参数率定及流量过程模拟

黄河中游自20世纪70年代以来,开展了大规模的水土保持和水利工程建设,对流域水文情势造成了很大的影响,从而破坏了水文资料的一致性^[1]。为减小人类活动对水文模拟结果的影响,方便起见,统一采用1970年之前的资料进行模型参数率定和水文模拟。表2给出了6个典型流域的参数率定结果和模拟效果,图4~5分别给出了两个代表性流域实测与模拟月流量过程。

表2 山西省典型流域模型参数及月流量过程模拟效果

Table2 The calibrated hydrological model parameters and statistical results of discharge simulation for typical catchments in Shanxi province

| 河流 | 站名 | 模型参数 | | | | 模拟效果 | |
|-----|-----|---------|-------|-------|------|-------|------|
| | | Smax/mm | Ks | Kg | Ksn | NSE/% | RE/% |
| 三川河 | 后大成 | 150 | 0.14 | 0.027 | 0.07 | 79.1 | 0.2 |
| 中西河 | 岔口 | 150 | 0.335 | 0.085 | 0.1 | 68.2 | 1.3 |
| 岚河 | 上静游 | 180 | 0.18 | 0.02 | 0.2 | 80.6 | 0.4 |
| 浊漳河 | 石梁 | 170 | 0.22 | 0.006 | 0.05 | 65.1 | -0.1 |
| 昕水河 | 大宁 | 150 | 0.11 | 0.008 | 0.01 | 70.1 | 1.8 |
| 汾河 | 河津 | 170 | 0.073 | 0.016 | 0.01 | 77.3 | 1.8 |

由表 2 可以看出:(1)6 个典型流域的最大土壤蓄水容量相差不大,介于 150~1 800mm 之间,这与流域土壤类型有很大关系,山西省大部分地区位于黄土高原丘陵区,土壤以马兰黄土和离石黄土为主,区域间土壤类型差别较小。(2)其它 3 个参数差异显著,中西河流域参数值较大,说明地表径流、地下径流和融雪径流都较为充沛;尽管浊漳河 K_s 较大,但 K_g 较小,说明该

流域以地表径流为主,地下径流比例相对较小;另外,岚河流域融雪径流要高于其它流域。(3)6 个典型流域月流量过程模拟的 Nash-Sutcliffe 模型效率系数一般都在 65%以上,水量模拟误差较小,一般不超过 2%;岚河上静游站 Nash-Sutcliffe 模型效率系数超过 80%,说明模型能够较好地模拟山西省典型流域的月水文过程。

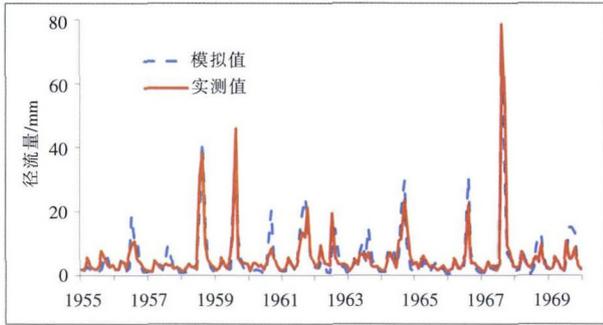


图4 岚河上静游站1955~1969年实测与模拟月流量过程
Fig.4 The observed and simulated monthly discharge at the Shangjingyou station on the Lanhe River during 1955-1969

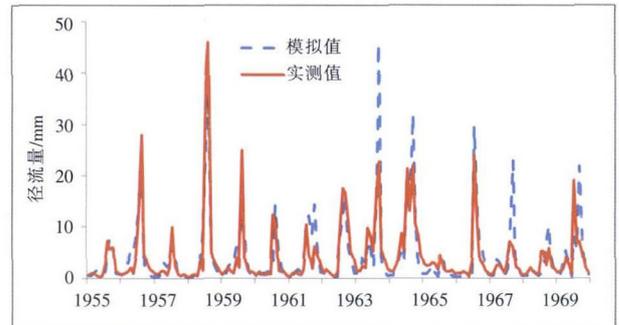


图5 昕水河大宁站 1955~1969 年实测与模拟月流量过程
Fig.5 The observed and simulated monthly discharge at the Daning station on the Xinshui River during 1955-1969

由图 4、图 5 可以看出:(1)两个水文站实测与模拟月流量过程总体拟合较好,个别峰值模拟误差较大,说明模型总体上能够较好地模拟出这些流域的水文变化过程。(2)相比而言,模型对上静游站模拟效果好于大宁站,这与表 2 中的统计结果一致;模型对大宁站的后期模拟误差相对较大。已有研究表明,由于人类活动的影响,昕水河流域实测径流量序列在 1965 年就发生较大的变异^[12],大规模人类活动导致产流条件的

变异是昕水河流域后期模拟误差较大的重要原因。

3.3 RCCC-WBM 模型的适用性分析

表 2 结果初步表明 RCCC-WBM 模型能够较好地模拟出山西省典型流域的径流量过程。从区域水资源评估角度出发,不仅要求模型对水资源总量模拟误差较小,而且要求模型可以较好地模拟出水资源的年内分配和年代际的变化特征。图 6 给出了 6 个典型流域径流的多年平均年内分配过程,图 7 对比了实测与模拟的年径流量。

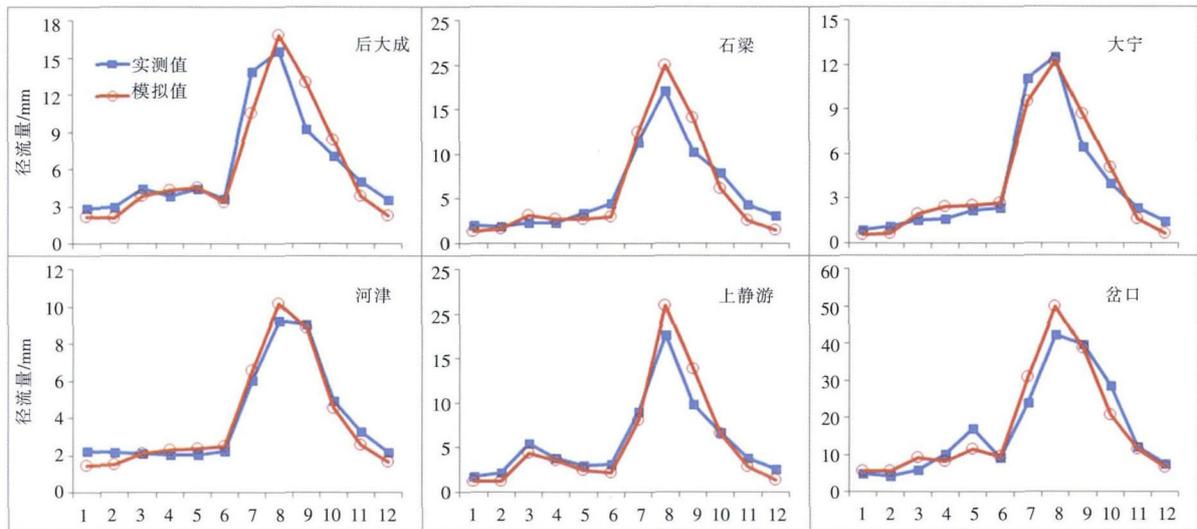


图 6 山西省 6 个典型流域实测与模拟径流量的多年平均年内分配

Fig.6 The distribution of the observed and simulated multiple-year average discharge for the typical catchments in Shanxi province

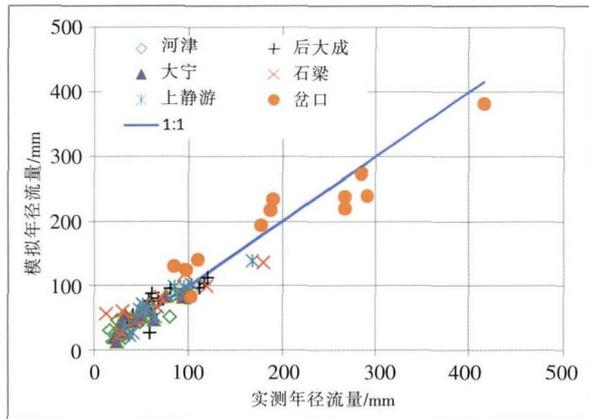


图7 山西省6个典型流域实测与模拟年径流量对比
Fig.7 The comparison between the observed and simulated annual runoff for the 6 typical catchments in Shanxi province

从图6和图7可以看出,典型站点实测与模拟径流的年内分配过程非常吻合,模型不仅可以较好地模拟出汛期峰值,而且也模拟出了非汛期的融雪径流峰值。从年径流量来看,6个站点的模拟径流量点群都集中在1:1线附近,说明模拟的年径流量非常接近实测值。由此可以说明模型能够较好地模拟出年径流量的大小及其年内分配特征,在山西省具有良好的适用性。

但同时也可以看出,模型对汛期径流量模拟的偏大,对非汛期径流量模拟的偏小;对大流量模拟的偏小,对小流量模拟的相对较大。分析认为,在参数率定时,对一个或几个高值流量模拟的好坏在很大程度上决定了NSE的大小,以最求Nash-Sutcliffe模型效率系数NSE最大化和模拟总量相对误差RE最小化为目标函数,可能对个别最大值流量模拟较好,而对多数中等流量和低水流量过程的模拟效果未必达到最佳。

4 结语

(1)山西省气候干旱,降水较少且集中,超渗产流是主要的产流机制,地表径流比重较大,地下径流比重较小;由于冬季气温较低,存在积雪和融雪径流过程。

(2)RCCC-WBM模型对山西省典型流域的月流量过程模拟效果较好,Nash-Sutcliffe模型效率系数一般都可达到65%以上,水量模拟误差较小,一般不超过2%;但流域内的人类活动会对模拟效果产生一定的影响。

(3)RCCC-WBM模型不仅可以较好地模拟出径流量年内分配特征,而且可以较好地模拟出年径流量的年代际变化,在山西省具有较好的区域适用性,能够用于山西省水资源评价等方面。

参考文献:

- [1] 王国庆,张建云,贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J]. 水科学进展, 2006,17(6):853-858. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, HE Ruimin. Impacts of environmental change on runoff in Fenhe River basin of the middle Yellow River [J]. Advances in Water Science, 2006,17(6):853-858. (in Chinese))
- [2] 刘志雨,侯爱中,王秀庆. 基于分布式水文模型的中小河流洪水预报技术[J]. 水文, 2015,35(1):1-6. (LIU Zhiyu, HOU Aizhong, WANG Xiuqing. Flood forecasting for small- and medium-sized rivers based on distributed hydrological modeling[J]. Journal of China Hydrology, 2015,35(1):1-6. (in Chinese))
- [3] 徐宗学.水文模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (XU Zongxue. Hydrological Models [M]. Beijing: Sciences Press, 2009. (in Chinese))
- [4] 冯夏清,章光新. 基于水文模型的乌裕尔河流域水资源评价[J]. 水文, 2015,35(2):49-52. (FENG Xiaqing, ZHANG Guangxin. Assessment of water resources in Wuyuer River basin based on hydrological model [J]. Journal of China Hydrology, 2015,35(2):49-52. (in Chinese))
- [5] 徐宗学,赵捷. 生态水文模型开发和应用:回顾与展望[J]. 水利学报, 2016,47(3):346-354. (XU Zongxue, ZHAO Jie. Development and applications of eco-hydrological models: past and future [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016,47(3):346-354. (in Chinese))
- [6] 黄鹏年,李致家,姚成,等. 半干旱半湿润流域水文模型应用与比较[J]. 水力发电学报, 2013,32(4):4-9. (HUANG Pengnian, LI Zhijia, YAO Cheng, et al. Application and comparison of hydrological models for semi-arid and semi-humid regions [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013,32(4):4-9. (in Chinese))
- [7] 王国庆,张建云,林健,等. 月水量平衡模型在中国不同气候区的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2008,19(5):28-34. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, LIN Jian, et al. Application of a monthly water balance model to the different climatic zones in China [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008,19(5):28-34. (in Chinese))
- [8] 王国庆,李健,王云璋. 气候异常对黄河中游水资源评价网格化水文模型及应用[J]. 水科学进展. 2000,11(supp):22-26. (WANG Guoqing, LI Jian, WANG Yunzhang. Grid hydrological model for climate change impact on water resources in the middle Yellow River and its application [J]. Advances in Water Sciences, 2000,11(supp):22-26. (in Chinese))
- [9] 单鱼洋,张新民,陈丽娟. 彭曼公式在参考作物需水量中的应用[J]. 安徽农业科学, 2008,36(10):4196-4197. (SHAN Yuyang, ZHANG Xinmin, CHEN Lijuan. Application of Penman formula in reference of crop water requirements [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008,36(10):4196-4197. (in Chinese))
- [10] Nash J.E. and Sutcliffe J. River flow forecasting through conceptual models, Part 1, a discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970,(10):282-290
- [11] 姚文艺,徐建华,冉大川,等. 黄河流域水沙变化情势分析与评价[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2011. (YAO Wenyi, XU Jianhua, RAN Dachuan, et al. Analysis and Assessment for Variation of Water and Sediment of the Yellow River Basin [M]. Zhengzhou: Yellow River Press, 2011. (in Chinese))

(下转第14页)

Test and Adjustment of Spatiotemporal Consistency on Quantile Estimates of Extreme Precipitation in Huaihe River Basin

SHAO Yuehong¹, LIU Junjie², WU Junmei³, GE Hui¹, LI Min⁴

(1.College of Hydrometeorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2.Anhui Meteorology Bureau, Hefei 230031, China;

3.Kunshan Meteorology Bureau, Kunshan 215300, China; 4.Haimen Meteorology Bureau, Haimen 226100, China)

Abstract: Quantile estimates of extreme precipitation show an intersection of distribution or a spatial discontinuation due to the lack of rainfall sites with spare spatial distribution as well as the short data length and different optimum distribution between adjacent duration and homogeneous region. The spatiotemporal inconsistency still didn't get an effective solution. In order to get more normative and spatiotemporal consistent quantile estimates, quantile estimates were computed by utilizing hydrometeorological regional L-moments method in the first section of this study, and were adjusted by spatial interpolation and distributing the surplus of the ratio of the longer duration vs. the shorter duration to eliminate the cross and discontinuation. The results show that the anomalous estimates are removed and values of mutual restriction are more reasonable by distributing the surplus of the ratio, and that adjusted quantiles exhibit better reliability expressed in relative error of the empirical frequency to the theoretical exceedance probability of the data, and a better spatial smoothing pattern shown as well by using spatial interpolation. The spatial patterns of quantiles are similar to different durations and return periods. High values were found in the northeast mountainous area of basin and low values were in the north plain area, which is in the agreement with the observed precipitation extremes. It will provide important hydrologic basis for designing rainstorm and flood of water engineering and resources.

Key words: quantile estimates of extreme precipitation; distributing the surplus of the ratio; spatiotemporal consistency

(上接第 29 页)

[12] Guoqing Wang, Jianyun Zhang, Qinli Yang. Attribution of runoff change for the Xinshui River catchment on the Loess Plateau of China in a changing environment [J]. *Water*, 2016,doi:10.3390/w8060267.

Suitability of RCCC-WBM Model to Typical River Catchments in North China

ZHAO Jianhua¹, WANG Guoqing^{2,3}, ZHANG Jianyun^{2,3}, HE Ruimin^{2,3}, WAN Sicheng^{3,4}

(1. Jiangsu Hydrology and Water Resources Bureau, Nanjing Branch, Nanjing 210008, China; 2. State Key Laboratory of

Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. Research Center for Climate Change, MWR, Nanjing 210029, China; 4. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Hydrological models have been believed a useful tool in environmental change study and water resources assessment. Taking six typical river catchments in Shanxi Province as cases, suitability of RCCC-WBM model has been investigated. The results show that the model could well simulate seasonal pattern of annual runoff and its decadal variation features. Nash-Sutcliffe coefficients of the RCCC-WBM model are greater than 65% while relative errors of water volume are less than 2% for monthly discharge simulation of the six river catchments. RCCC-WBM model is suitable to Shanxi Province, and could be applied to scientific research on water resources assessment.

Key words: RCCC-WBM model; Shanxi Province; typical river catchment; discharge simulation; suitability