DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2011.06.002

全球月平均蒸发数据在流域径流模拟中的适用性

薛联青,范正行,郝振纯,王加虎,李永坤,王 娇

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要 利用分布式水文模型 CREST 对淮河史灌河流域梅山水库 1978—1987 年的入库径流过程进行了参数自动率定和验证,对比分析了实测蒸发数据与全球月平均蒸发数据对径流模拟结果的影响程度,同时进行了蒸发影响效果的误差对比实验.结果表明,采用全球月平均蒸发数据来驱动模型,替代模型运行中所需的实测蒸发数据,具有较好的模拟效果,同时对具有大蒸发面积的流域径流模拟预报效果也较好.

关键词 径流模拟;蒸发数据;分布式水文模型;梅山水库流域

中图分类号:P333 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2011)06-0602-05

水文预报是防洪减灾的重要手段之一,而利用水文模型对历史降雨径流过程的模拟则是开展水文预报工作的基础[1].很多学者在水文模型的构建方面做了大量研究工作[2-4],同时也有学者利用水文模型对具有长序列资料的流域日径流过程进行了分析计算,取得了一定的成果[5-8].然而由于全国范围内的蒸发站密度较低,在众多模型计算过程中,尤其是对于分布式模拟计算中所需的蒸发数据在某种程度上较难获取,这就对进行不同尺度流域径流过程模拟、水文预报等带来困难.为了有效解决分析计算中的长系列蒸发资料的获取问题,本文利用长时段流域分布式水文模型 CREST(the coupled routing and excess storage),重点分析了采用全球月平均蒸发数据替代实测蒸发数据,进行具有大蒸发面积流域径流模拟预报的效果,并进行了蒸发影响效果的误差对比实验,从而论证了利用全球月平均蒸发数据在进行不同尺度流域径流模拟中的适用性,为较大时空尺度上、少资料或无资料地区的流域径流预报提供理论依据,也为进一步联系气候变化与水文过程之间的响应关系分析提供参考.

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

选取位于淮河流域史灌河上游的梅山水库流域为研究区,该流域面积 1 970 km^2,正常蓄水位面积 57.84 km^2,平均水深 25 m,最大蓄水面积 92.29 km^2[9],处于季风气候区,受季风影响,全年降水量有 60% ~ 70% 集中在 5—9 月,洪水多发生在 6 月下旬至 7 月中旬,是典型的汛期洪水.历史最大洪峰流量 13 978 m^3/s,相应的最高水位为 135.75 m,1990 年以来,梅山水库发生了 7 次较大暴雨洪水[10],因此进行梅山水库流域内的产汇流分析及入库洪水的模拟对区域防洪具有重要作用.研究区域内有雨量站点 21 个,其中 12 个为汛期站,为了便于长时间序列的研究,选取 9 个非汛期站作为降雨数据的来源,各降雨站点在流域内的空间分布如图 1 所示.为便于比较和考虑同步资料的获取,选取 1978—

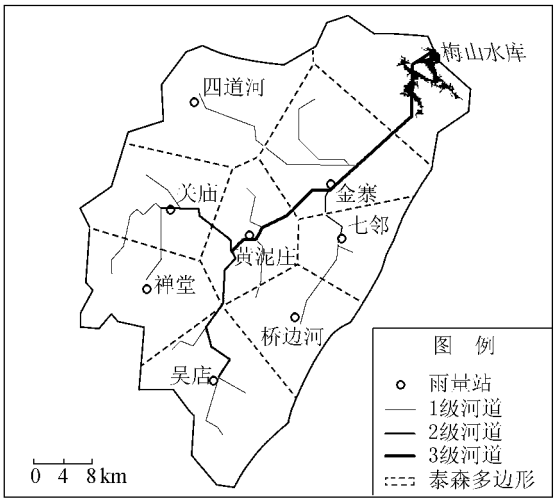

图 1 梅山水库流域雨量站分布及水系情况

Fig. 1 Distribution of rain gauge stations and water system of Meishan Reservoir Basin

收稿日期:2010-12-07

基金项目:国家自然科学基金(50979027,40830639);水利部公益性行业科研专项(201001057,201001066);河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项(2011585512,2009585512);中央高校基本科研业务费专项(B1020068);河海大学创新人才计划(2009585512)

作者简介:薛联青(1973—),女,新疆石河子人,教授,博士,主要从事环境水文及水环境保护研究.E-mail:xuelq@hhu.end.cn

1987 年的降雨径流及水库流量历史数据进行对比研究．由于研究区面积小，故以梅山蒸发站日平均蒸发数据作为研究区的实测蒸发数据．选取流域内所有雨量站点的日平均降雨量、日平均蒸发量、梅山水库坝下日平均流量以及梅山水库坝上水位资料用于模型计算．

1.2　分布式水文模型 CREST

CREST 模型[11]主要通过 DEM 把流域分为由众多规则单元组成的系统，该模型包括垂向水量平衡（主要是降雨产流，由 4 个蓄满水库组成，分别代表冠层截留和 3 个土壤层的蓄水）、垂向能量平衡（主要是蒸散发计算）、次网格汇流（2 个线性水库分别模拟快速径流和慢速径流的次网格汇流）和网格间汇流（按照最陡坡度法的单流向算法逐单元汇流[12]）4 个模块．CREST 模型采用分布式参数设置，主要产汇流参数与遥感数据的物理特性相关联，需要率定的参数均具有明确的物理意义，它们与流域的地形特征、植被、土壤特性等物理因素相联系．CREST 模型内嵌了自适应随机搜索算法（adaptive random search，ARS）[13]来进行可调式参数的自动率定，可同步优选的参数数量多，兼容各种目标函数或者目标函数组合．该模型近年来应用较为广泛，驱动 CREST 模型的降雨数据可采用卫星遥感降水、雨量站观测值以及雷达估算的降雨等．该模型可通过汇流对产流的反馈设计，以较小的分辨率（30″）进行不同尺度流域水文模拟．

1.3　数据处理及 CREST 模型驱动

根据研究区 1978—1987 年日平均降雨量和水库入库径流过程线及日平均蒸发过程线可知，研究区内每年 5—9 月降雨较为集中，降雨与径流过程具有明显的汛期与非汛期特征，其中，1980 年与 1986 年最大日平均流量分别为 2 728.93 m^3/s 和 3 571.24 m^3/s，与之相应的最大日平均降雨量达到 206.49 mm 和 256.02 mm，分别属于大暴雨和特大暴雨．考虑到降雨洪水过程的完整性和代表性，模型率定期取 1978 年 1 月 1 日至 1983 年 12 月 31 日，验证期为 1984 年 1 月 1 日至 1987 年 12 月 31 日．从水文年鉴获得该流域 1978—1987 年的水面蒸发数据，根据流域的地理位置及气象条件，将水面蒸发乘以 0.95 作为修正后的流域蒸发数据，其日平均蒸发过程如图 2所示，其中多年平均年蒸发量为 1 065.7 mm，除 1978 年蒸发量较大（1 200.2 mm）及 1982 年蒸发量较小（839.3 mm）以外，其他年份的蒸发量较均匀，近似等于多年平均蒸发量．本文采用的全球月平均蒸发数据源自 USGS（http ://igskmncnwb015.cr.usgs.gov/Global），该数据源将全球分为 0.25°的众多网格，对每一网格的蒸发数据进行了月平均处理．本文根据研究区的经纬度提取得到所需的月平均蒸发数据．该数据年内表现为夏高冬低，没有年际变化，其中 7 月最高，平均为4.488 mm/d，1 月最低，平均为 1.08 mm/d．全年总蒸发量为 1 051.3 mm，与实测多年平均蒸发量相差仅 14.4 mm，说明全球月平均蒸发数据可在研究区域内使用．

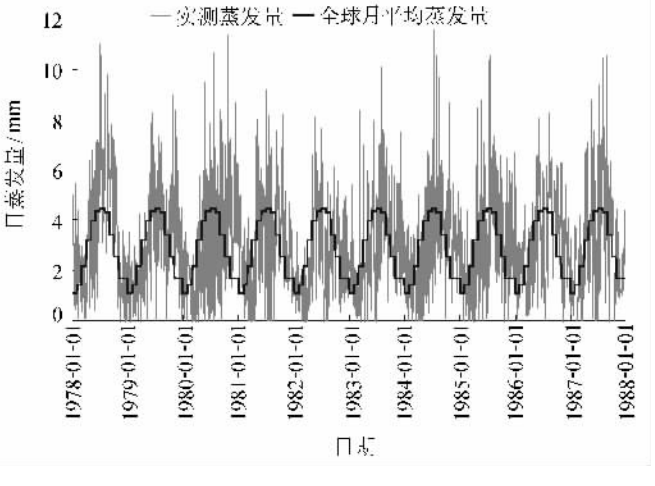

图 2　1978—1987 年不同蒸发数据源的过程线

Fig. 2　Course curves of different evaporation data sources from 1978 to 1987

采用全球多年按月平均的蒸发数据代替梅山站的实测蒸发数据来驱动模型，通过对比分析两种不同蒸发数据对于多年径流过程的模拟，探讨全球月平均蒸发数据在径流模拟应用上的适用性，从而解决缺乏实测蒸发数据流域的径流模拟资料获取问题．

2　情景模拟结果及对比分析

2.1　CREST 模型参数自动率定

分别采用实测蒸发数据与全球月平均蒸发数据来驱动 CREST 模型，通过自动优选的变域递减随机搜索算法对模型参数进行了率定，分别得到了如表 1 所示的最优参数组合．

最优参数组合所模拟的流量过程如图 3 所示，从图 3 可知，实测蒸发数据率定的效率系数为 86.4%，总量误差为 12.7%，率定期对于流量过程线以及径流总量的模拟效果都较好．同时使用全球月平均蒸发数据驱动对于径流过程的模拟效果也比较好，效率系数达到89.1%，比实测蒸发数据的模拟结果略高，总量误差

表1 CREST模型参数率定结果

Table 1 Calibration results of parameters in CREST model

蒸发数据源	快速径流出流系数	快速径流汇流滞时/d	慢速径流出流系数	慢速径流汇流滞时/d	最大土壤含水量/mm	蓄水容量曲线指数	不透水系数/%	稳定下渗率/(mm·h^{-1})
实测蒸发	0.11	7.17	0.55	158.42	467.77	0.25	16.10	34.97
全球月平均蒸发	0.22	13.02	0.58	191.62	160.83	0.28	16.23	41.55

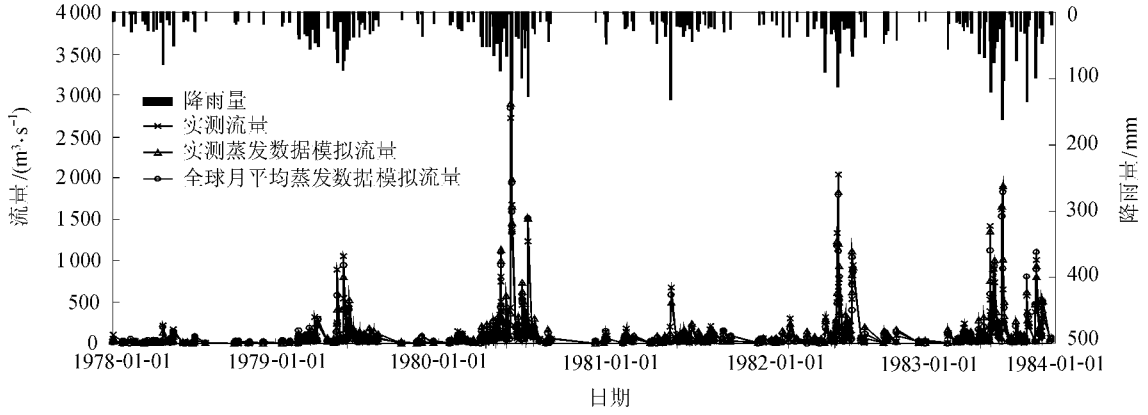

图3 率定期内实测蒸发数据模拟流量、全球月平均蒸发数据模拟流量与实测流量的过程线

Fig. 3 Course curves of simulated runoff with measured evaporation data, simulated runoff with global average monthly evaporation data, and measured runoff during calibration period

为10.6%,径流总量上也比实测蒸发数据的模拟精度略高.由于全球月平均蒸发数据和实测蒸发数据对于径流过程的模拟结果与实测径流过程较为一致,说明在缺乏实测蒸发数据的情况下,完全可采用全球月平均蒸发数据代替实测蒸发数据进行径流模拟和流域防洪分析.

2.2 参数验证及结果分析

利用1984—1987年的降雨-径流数据对率定的参数进行了验证,结果如图4所示.从图4可知,实测蒸发数据与全球月平均蒸发数据对于径流的模拟效果一致.从1984年2月至1987年12月,整个入库流量过程的模拟均与实测流量过程比较接近,实测蒸发数据与全球月平均蒸发数据模拟的效率系数分别为85.3%和86.6%,总量误差分别为7.51%和11.4%,全球月平均蒸发数据模拟结果的效率系数略高于实测蒸发数据的模拟结果,而总量误差较实测蒸发数据的模拟结果要大,与率定期的结果基本一致,说明参数稳定性较好.选取含最高洪峰的时间段1986年6月1日至1986年8月15日,即1986年汛期径流过程进行单独对比分析,模拟结果也较好,如图5所示.

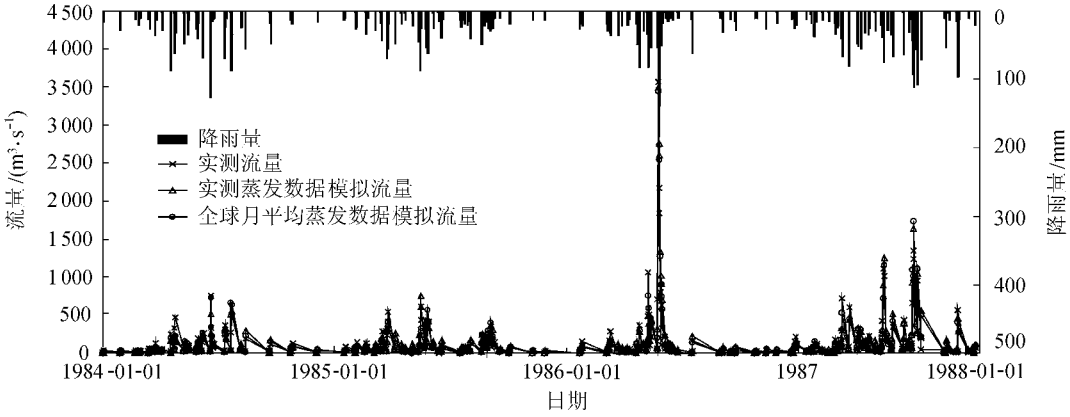

图4 验证期内实测蒸发数据模拟流量、全球月平均蒸发数据模拟流量与实测流量的过程线

Fig. 4 Course curves of simulated runoff with measured evaporation data, simulated runoff with global average monthly evaporation data, and measured runoff during validation period

由图5可知,实测蒸发数据与全球月平均蒸发数据对径流洪峰的模拟效果都比较理想,实测洪峰流量为

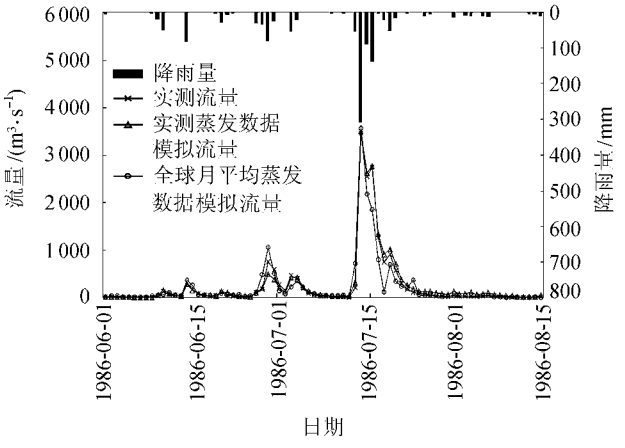

图 5　1986 年汛期模拟洪峰流量与实测洪峰流量过程

Fig. 5　Processes of simulated peak discharge and measured peak discharge during flood season in 1986

3 571.24 m^3/s，实测蒸发数据与全球月平均蒸发数据模拟的洪峰流量分别为 3 513.19 m^3/s 和 3 454.44 m^3/s，与实测洪峰的误差分别是 1.6% 与 3.3%．利用验证期内实测蒸发数据模拟流量、全球月平均蒸发数据模拟流量以及实测流量绘制线性相关关系如图 6 所示，从图 6 可以看出，无论是实测蒸发数据模拟的流量还是全球月平均蒸发数据模拟的流量，都与实测流量具有很好的相关性，R^2 分别达到 0.89 和 0.90，可以说，实测蒸发数据及全球月平均蒸发数据对于径流模拟的结果高度一致，完全可以利用全球月平均蒸发数据来代替实测蒸发数据进行流域径流模拟．

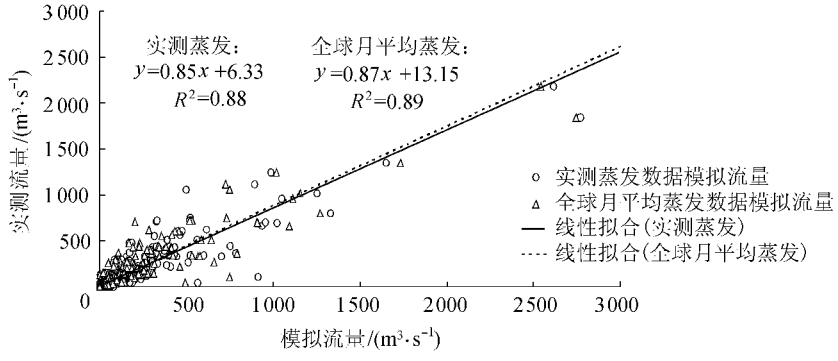

图 6　验证期内实测蒸发数据模拟流量、全球月平均蒸发数据模拟流量与实测流量相关关系

Fig. 6　Correlations between simulated runoff with measured evaporation data, simulated runoff with global average monthly evaporation data, and measured runoff during validation period

3　结　　语

针对梅山水库流域率定了 CREST 模型的 8 个主要产汇流参数，实现了参数率定的自动化，减少了人工率定过程中由于主观因素造成的不确定性，提高了参数的可信度及适用性．对梅山水库流域 1978—1987 年入库洪水模拟发现，率定期内全球月平均蒸发数据对于径流的模拟效率系数及总量误差均要优于实测蒸发数据，而验证期内全球月平均蒸发数据模拟的效率系数较优，但总量误差较大．无论是实测蒸发数据还是全球月平均蒸发数据，对于汛期洪水及洪峰的模拟精度都较高，这跟汛期蒸发量相对降雨量与径流量都要小得多有关．同时全球月平均蒸发数据模拟的流量和实测蒸发数据模拟的流量均与实测流量具有较高的相关性，因此，在缺少实测蒸发数据的情况下，可以利用全球月平均蒸发数据代替实测蒸发数据进行流域径流模拟．

参考文献：

[1] 梁家志，乐嘉祥．我国水文情报预报工作的主要成就及展望[J]．水文，1999(5)：20-23．(LIANG Jia-zhi, LE Jia-xiang. The achievements and prospects of the hydrology information and forcast work in China[J]. Journal of China Hydrology, 1999(5): 20-23. (in Chinese))

[2] 徐宗学,程磊.分布式水文模型研究与应用进展[J].水利学报,2010,41(9):1009-1017.(XU Zong-xue,CHENG Lei. Progress on studies and applications of the distributed hydrological models[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(9):1009-1017.(in Chinese))

[3] 张志才,陈喜,石朋,等.喀斯特流域分布式水文模型及植被生态水文效应[J].水科学进展,2009,20(6):806-811.(ZHANG Zhi-cai,CHEN Xi,SHI Peng,et al. Distributed hydrological model and eco-hydrological effect of vegetation in Karst watershed[J]. Advances in Water Science,2009,20(6):806-811.(in Chinese))

[4] 王船海,闫红飞,马腾飞.分布式架构水文模型[J].河海大学学报:自然科学版,2009,37(5):550-555.(WANG Chuan-hai,YAN Hong-fei,MA Teng-fei. Distributed hydrological model[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2009,37(5):550-555.(in Chinese))

[5] 朱求安,张万昌.新安江模型在汉江江口流域的应用及适应性分析[J].水资源与水工程学报,2004,15(3):19-23.(ZHU Qiu-an,ZHANG Wan-chang. The applicability study of Xinanjiang model on simulation of rainful-runoff and flooding hydrographs in Jiangkou basin[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2004,15(3):19-23.(in Chinese))

[6] 李艺婷,张万顺,朱齐艳,等.新安江模型产流模式在山区型和平原型水库入库径流量中的模拟与应用[J].水资源与水工程学报,2007,18(1):33-36.(LI Yi-ting,ZHANG Wan-shun,ZHU Qi-yan,et al. Application of runoff generation model of Xinanjiang model in mountain and plain reservoir runoff simulation[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2007,18(1):33-36.(in Chinese))

[7] 王光生,周记华.新安江模型改进的尝试[J].水文,1998(增刊1):23-27.(WANG Guang-sheng,ZHOU Ji-hua. Attempted improvement of Xinanjiang model[J]. Journal of China Hydrology,1998(Sup1):23-27.(in Chinese))

[8] SUGAWARA M. Tank model[M]//SINGH V P. Computer Models of Watershed Hydrology. Colorado:Water Resources Publications,1995:165-214.

[9] 吴松.改进粒子群算法在并联水库群联合防洪优化调度中的应用[D].南京:河海大学,2007.

[10] 汪从周.梅山水库泄洪对金寨县城的影响[J].治淮,2007(6):10-12.(WAGN Cong-zhou. The effect on the town of Jinzhai of spillway flood of Meishan reservoir[J]. Zhihuai,2007(6):10-12.(in Chinese))

[11] WANG J,HONG Y,LI L,et al. The coupled routing and excess storage(CREST) distributed hydrological model[J]. Hydrological Science Journal,2011,56(1):84-98.

[12] 王加虎.分布式水文模型理论与方法研究[D].南京:河海大学,2006.

[13] MASRI S F,BEKEY F B. A global optimization algorithm using adaptive random search[J]. Applied mathematics and computation,1980,7(4):353-375.

Analysis of applicability of global average monthly evaporation data to runoff simulation

XUE Lian-qing, FAN Zheng-hang, HAO Zhen-chun, WANG Jia-hu, LI Yong-kun, WANG Jiao

(*State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: The distributed hydrological model CREST was used for the automatic calibration and validation for the parameters of runoff into the Meishan Reservoir, in the Shiguanhe sub-basin of the Huaihe Basin, from 1978 to 1987. The influences of the measured evaporation data and the global average monthly evaporation data on the runoff simulation results were analyzed and compared, and error comparison experiments on evaporation effects were carried out. The results show that using global average monthly evaporation data instead of measured evaporation data during the model operation can produce satisfactory simulation results and can well simulate and predict runoff in the basins that have large evaporation areas.

Key words: runoff simulation; evaporation data; distributed hydrological model; Meishan Reservoir Basin