

Runoff Prediction Uncertainty of SWAT Caused by Model Parameters over the Upper Reach of Heihe River Basin*

Zhanling Li^{1#}, Zhanjie Li², Zongxue Xu²

¹School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing

²College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing

Email: #zhanling.li@cugb.edu.cn

Received: Sep. 30th, 2013; revised: Nov. 20th, 2013; accepted: Nov. 26th, 2013

Abstract: Uncertainty issue in hydrological modeling is a hot topic in recent hydrological research. Taking Heihe river basin as the study area, we mainly focused on the uncertainty in runoff prediction resulted from SWAT model parameter uncertainty. Bayesian method was employed for nine sensitive parameter estimations. We used 95% CI of runoff prediction to illustrate the uncertainty in runoff prediction caused by model parameter uncertainties. Results showed that: the larger the range of changing in precipitation, the narrower the 95% CIs of runoff prediction, the less effects of model parameter uncertainties to runoff prediction. With the increasing of temperature, the 95% CIs of runoff prediction were stretched if the precipitation kept stable, which means that the increases in temperature would lead to larger effects of model parameter uncertainty to runoff prediction. The 95% CIs of summer runoff prediction were the largest, followed by those of autumn and winter runoff predictions. With the decreasing of precipitation, the runoff prediction showed decreasing, while the corresponding 95% CI was little changed. With the increasing of temperature, both the spring runoff prediction and its 95% CI showed increasing.

Keywords: Uncertainty; SWAT; Heihe River; Runoff

基于 SWAT 模型参数不确定性的黑河流域流量预测*

李占玲^{1#}, 李占杰², 徐宗学²

¹中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京

²北京师范大学水科学研究院, 北京

Email: #zhanling.li@cugb.edu.cn

收稿日期: 2013 年 9 月 30 日; 修回日期: 2013 年 11 月 20 日; 录用日期: 2013 年 11 月 26 日

摘要: 水文模拟不确定性研究是当今水文科学研究中的热点问题。本文以流域水文模型 SWAT 为例, 以黑河流域作为研究区, 基于贝叶斯理论和方法, 探讨 SWAT 模型参数不确定性对流量模拟和预测结果的影响。结果表明, 在黑河流域, 降水的变化幅度越大, 模型参数不确定性对流量模拟和预测的影响越小; 在降水变化相同条件下, 温度增加会使模型参数不确定性对流量预测值的影响增大; 在模型参数不确定性影响下, 预测流量的不确定性区间夏季(尤其是 6、7 月份)最大; 随着降水的减少预测流量值趋于减少, 但预测流量值的不确定性区间变化不大; 随着气温的升高, 春季流量预测值有所增加, 且春季流量预测值的不确定性区间也趋于增大; 降水增加条件下, 随着气温的降低, 预测流量过程线越来越尖耸; 降水减少条件下, 随着气温的降低, 预测流量过程线形状变化不大。

*基金项目: 由国家自然科学基金(41101038)和中央高校基本科研业务费专项资金(2010ZY13)资助。

作者简介: 李占玲, 1980 年出生, 女, 内蒙古人, 讲师, 博士, 从事水文学及水资源研究。

#通讯作者。

关键词: 不确定性; SWAT; 黑河; 流量

1. 引言

水文模拟和预测是水文学的一个重要组成部分, 是防洪调度决策、生态环境保护、水资源综合利用的重要依据。水文模型是水文模拟和预测的有效工具。然而, 随着对水文过程理解的深入以及对水文模型应用的广泛, 人们逐渐认识到水文模型在模拟及预测过程中存在着极大的不确定性^[1-5]。目前, 水文模拟不确定性研究已经成为当今水文科学研究中的热点问题。例如, 许多学者采用 GLUE、MCMC、Beta-PERT 等方法对广泛使用的新安江模型、水箱模型、TOPMODEL、HIMS 模型等的参数不确定性进行了详尽地分析和讨论^[6-9]。黑河流域是我国第二大内陆河流域。近几年来, 人们在黑河流域发展和成功运用了多种水文模型, 获得了一些宝贵的经验。康尔泗等^[10]将瑞典水文气象研究所的 HBV 概念性径流模型加以改进, 运用到黑河山区流域, 对不同的年平均气温和年降水的变化趋势条件下出山径流的响应进行了模拟计算; 王中根等^[11]将 SWAT 模型运用到黑河上游径流模拟中研究发现, 该模型在结构上考虑了融雪和冻土对水循环的影响, 比较适合我国西北寒区; 陈仁升等^[12]用基于小波变换和 GRNN 神经网络模型的方法、蓝永超等^[13]运用 Kalman 滤波方法对黑河出山径流进行了模拟预测, 都获得了比较满意的结果。然而, 以往研究中, 在对未来气候变化条件下研究区的流量进行预测时, 尚缺乏考虑水文模拟不确定性的影响。

本文选用 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 水文模型, 以黑河流域作为研究区, 主要探讨模型参数不确定性对模型流量模拟及未来气候变化情景下对流量预测结果的影响, 明确模型参数不确定性对流量模拟及预测结果不确定性的贡献, 从而为减少这些不确定性来源、提高模拟和预报精度提供科学依据。

2. 研究区概况

黑河流域位于我国西北部地区, 是我国第二大内陆河流域, 其范围介于 97°E~102°E, 37°N~42°N 之间, 干流全长 821 km, 流域面积 14.29 万 km² (图 1)。以莺落峡和正义峡水文站为分界点, 流域分为上游山区(黑河发源地)、中游绿洲区(包括张掖、酒泉等城市)

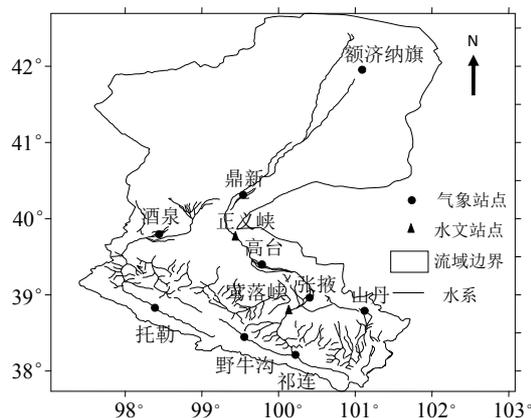


Figure 1. Locations of meteorological and hydrological stations in Heihe River basin

图 1. 黑河流域气象站点和水文站点分布图

和下游干旱的戈壁沙漠区三部分。上游是黑河的产流区, 也是本文 SWAT 模型应用的区域, 流域面积约 1.0 万 km², 多年平均气温不到 2°C, 年降水量为 200~500 mm, 部分山区可达 700 mm。莺落峡至正义峡之间为中游, 也是主要的水资源消耗区, 年平均气温 6~8°C, 年降水量 50~150 mm。正义峡以下为下游, 多年平均气温 8°C 左右, 年降水量只有 47 mm, 属极度干旱区, 也是径流消失区。黑河流域内有 9 个气象站点, 其中, 祁连、野牛沟和托勒站位于流域的上游, 山丹、张掖、高台、酒泉位于流域中游, 鼎新位于流域中下游, 额济纳旗位于流域的下游。各站点位置如图 1 所示。

3. 研究区 SWAT 模型构建及流量模拟

3.1. 研究区 SWAT 模型构建

SWAT 模型的输入数据包括: 1) 分辨率为 950 m 的黑河流域数字化高程模型(DEM); 2) 流域 1:100 万 1995 年土地利用图; 3) 流域 1:100 万土壤类型分布图; 4) 研究区域主要气象站(祁连、野牛沟、托勒、张掖)位置及 1985~2000 年逐日最高气温、最低气温、平均风速、相对湿度等常规气象资料; 主要雨量站(祁连、野牛沟、托勒、张掖、莺落峡)位置及 1985~2000 年逐日降水量; 莺落峡站 1985~2000 年逐日流量资料。气象数据资料来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>)。本研究将黑河上游划分了 9 个子流域、92 个 HRUs。地表径流估算采用 SCS 径流曲

线数法; 河道流量演算采用 Muskingum 法; 潜在蒸散发量估算采用 Penman-Monteith 方法。基于模型参数的敏感性分析结果, 确定了 9 个参数进行率定(TIMP, SMTMP, SMFMX, SMFMN, CN2, ALPHA_BF, SURLAG, SOL_AWC, SOL_K)。

3.2. SWAT 模型参数估计方法

本文采用 Bayes 理论对 SWAT 模型进行参数估计。Bayes 统计学认为模型参数 θ 是服从某一联合后验概率分布的随机向量, 这个联合后验概率分布能够描述模型参数在给定参数估计时段的观测数据 y 时的统计特征。根据参数的概率分布, 可以明确参数不确定性范围的大小。假设水文模型被定义为 $Y_t = f(X_t, \theta)$, X_t 为模型输入数据, θ 为模型参数, 当给定用于参数估计的验证数据 Y_t^{obs} 和输入数据 X_t 后, 参数 θ 的后验概率计算公式为:

$$f(\theta|Y^{obs}, X) = \frac{f(Y^{obs}, X|\theta)f(\theta)}{\int f(Y^{obs}, X|\theta)f(\theta)d\theta} \quad (1)$$

其中, $f(\theta)$ 为参数的先验分布, 即在进行水文模型参数估计之前, 对模型参数的认识, 通常情况下, 都假设参数服从彼此独立的均匀分布, 并且给出参数分布的上限与下限。 $f(Y^{obs}, X|\theta)$ 为似然函数, 它代表了参数估计过程中观测数据所具有的信息。似然函数的表达式中包含模型的结构, 由于模型结构不仅含有多个方程和公式, 还有大量的分支判断结构, 所以几乎不可能推导出上式的最终解析形式。面对这个困难, 通常的解决方法是在上式中引入模型残差, 其表达式为:

$$r_t = Y_t^{obs} - Y_t \quad (2)$$

对于模型误差项 r_t , 假设其满足相互独立且服从均值为 0, 方差为 σ^2 的正态分布, 此时 r_t 的概率密度为:

$$f(r_t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{r_t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

则对应的似然函数为:

$$\begin{aligned} f(Y^{obs}, X|\theta) &= \prod_{t=0}^N \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{[Y_t^{obs} - Y_t(\theta)]^2}{2\sigma^2}\right) \right] \\ &= \prod_{t=0}^N \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{r_t^2}{2\sigma^2}\right) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

进而采用 Bayes 准则

$f(\theta|Y^{obs}, X) = f(\theta) \times f(Y^{obs}, X|\theta)$ 计算参数的后验分布。由于运用 Bayes 方法对参数进行估计, 其积分计算很复杂, 运用传统的高维数值积分方法难以获得参数的精确后验分布, 因此本文采用 MCMC 方法得出参数联合后验分布的抽样样本, 选用 Metropolis-Hastings 抽样方法^[14,15]。

3.3. 研究区流量模拟

对黑河流域莺落峡水文站进行径流模拟, 结果表明, 率定期(1990~1996 年)莺落峡站的年平均流量模拟相对误差 RE 为 7.1%, E_{NS} 为 0.732; 验证期(1997~2000 年)该站年平均流量模拟 RE 为 8.4%, E_{NS} 为 0.678; 可以看出, 在率定期和验证期 SWAT 模型对莺落峡站日流量过程的模拟效果都比较好。就不同季节日流量过程的模拟效果而言, 冬季流量模拟效果较好, 无论是率定期还是验证期 E_{NS} 都高于 0.9, 然而流量拟合相对误差较大; 其次是夏季, E_{NS} 高于 0.7, 流量模拟相对误差在 $\pm 7.1\%$ 以内; 春季流量模拟效果较差, 两个时期拟合的 E_{NS} 都偏低, 流量模拟相对误差也较大。模型对莺落峡站月流量过程模拟效果较好, 无论是率定期还是验证期, E_{NS} 均高于 0.90, RE 均在 $\pm 10\%$ 以内。

4. 气候变化条件下研究区流量预测的不确定性

4.1. 气候变化情景的建立

气候变化情景是建立在一系列科学假设基础之上的, 对未来气候状态时间、空间分布形式的合理描述。目前选择气候情景通常采用两种方法: 一是假想的气候情景, 即假定到未来某一特定时期气候要素(温度、降水等)的变化量, 用该方法得到的假想气候情景驱动水文模拟, 分析气候变化的水文响应; 二是取自 GCM (General Circulation Model) 模拟的气候情景。由于 GCM 的网格格距较大, 对于区域气候而言, 其分辨率低, 模式滤掉了地表及边界条件中的某些重要特征; 另一方面由于物理学和动力学的限制, 目前的 GCM 无法完美地描述中尺度环流模式, 因此, 本文采用第一种方法建立气候变化情景。构建的黑河流域未来气候变化情景具体设置为: 降水量分别增加和减

少原来的 20%和 10%, 气温分别在原来的基础上升和降低 1°C和 2°C, 总共有 24 组情景, 见表 1。对这 24 组气候情景进行模拟, 计算在未来气候变化情景下、综合考虑模型参数不确定性影响下的流量变化情况。

4.2. 模型参数不确定性对流量模拟及预测结果的影响

采用 Bayes 方法进行 SWAT 模型的参数估计, 得到了参数后验边际分布的同时, 也得到了一系列流量模拟值, 取这些模拟值的 95%置信区间来表征模拟结果的不确定性, 这个模拟结果的不确定性是由参数不确定性引起的。图 2 给出了 SWAT 模型由于参数不确定性导致的模拟结果 95%置信区间以及流量实测值。根据流量实测值落入流量模拟值 95%置信区间的多少来判断模型参数对模型模拟结果的影响。结果表明, 仅考虑参数的影响, 莺落峡站约有 8.3%的流量实测值落入模拟值 95%置信区间。莺落峡站多年平均流量的置信下限是 43.51 m³/s, 置信上限是 43.86 m³/s, 变化幅度为 0.35 m³/s。这说明本研究中模型参数对模型模拟结果的不确定性有一定的贡献, 但不能用来解释模型模拟过程中的所有不确定性。

图 3 显示了在 25 种气候变化情景下, SWAT 模型对莺落峡站年平均流量多年的预测值。本文考虑了 SWAT 模型参数不确定性对预测流量的影响, 因此, 得到的流量预测值是一个区间, 而不是确定的数值, 因此包含了更多可为水资源管理部门提供决策支持的有价值的信息。在 S11、S12、S13、S14、S15 情景下, 即在降雨增加 20%, 温度升高 2°C、升高 1°C、不变、降低 1°C和降低 2°C条件下, 多年平均预测流量为 52~60 m³/s、55~62 m³/s、59~66 m³/s、65~70 m³/s、72~77 m³/s, 模型参数不确定性对流量预测值的影响范围大致为 5~8 m³/s; 在 S21、S22、S23、S24、S25 情景下, 参数不确定性对流量预测值的影响范围大致为 4~9 m³/s; 在 S31、S32、S33、S34、S35 情景下, 模型参数不确定性对流量预测值的影响范围大致为 5~10 m³/s。在 S41、S42、S43、S44、S45 情景下, 模型参数不确定性对流量预测值的影响大致为 6~10 m³/s。在 S51、S52、S53、S54、S55 情景下, 参数不确定性对流量预测值的影响大致为 8~9 m³/s。可以发现, 降水变化幅度越大, 流量预测值的区间越狭窄,

即参数不确定性对流量预测值的影响幅度越小。这说明对于降水是径流主要补给来源的流域而言, 降水的变化对流量模拟和预测起着至关重要的作用, 降水的变化幅度越大, 模型参数不确定性对流量模拟和预测的影响越小。在降水变化相同条件下, 随着温度的上升, 流量预测值的区间呈现拓宽趋势, 例如, 降水增加 20%、温度由降低 2°C到升高 2°C, 径流预测区间由 5 m³/s 拓宽到 8m³/s; 降水减少 10%、温度由降低 2°C到升高 2°C, 径流预测区间由 7 m³/s 拓宽到 10 m³/s, 即温度增加会使模型参数不确定性对流量预测值的影响更大。这说明, 温度越高, 模型对流域流量的预测越不准确。这与温度升高会改变流域产汇流以及流域蒸散发条件有关。此外, 从图中还可以看出, 气温变化相同、降水增加, 会导致预测的多年平均流量区间呈上升趋势; 此结论与不考虑参数不确定性的影响, 对流域流量预测结果的趋势一致。

图 4 显示了在不同气候情景下, 考虑 SWAT 模型参数的不确定性影响, 莺落峡站月平均流量的预测值。可以看出, 在模型参数不确定性影响下, 预测流量的不确定性区间夏季(尤其是 6、7 月份)最大; 其次是 10、11、12 月份。此外, 图中还可以看出, 随着

Table 1. Climate change scenarios of Heihe River basin
表 1. 黑河流域未来气候变化情景设置

气温变化/降雨量变化	+20%	+10%	0	-10%	-20%
+2°C	S11	S21	S31	S41	S51
+1°C	S12	S22	S32	S42	S52
0	S13	S23	S33	S43	S53
-1°C	S14	S24	S34	S44	S54
-2°C	S15	S25	S35	S45	S55

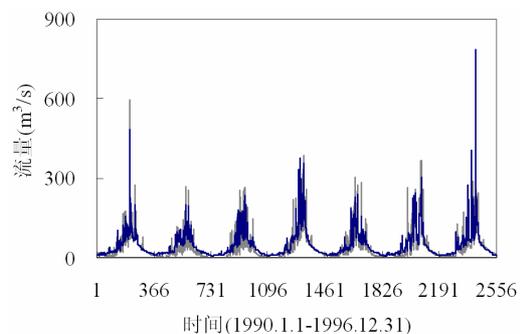


Figure 2. Simulated runoff and its 95% CI caused by parameter uncertainty in SWAT
图 2. 由 SWAT 模型参数不确定性导致的模拟结果的 95%置信区间

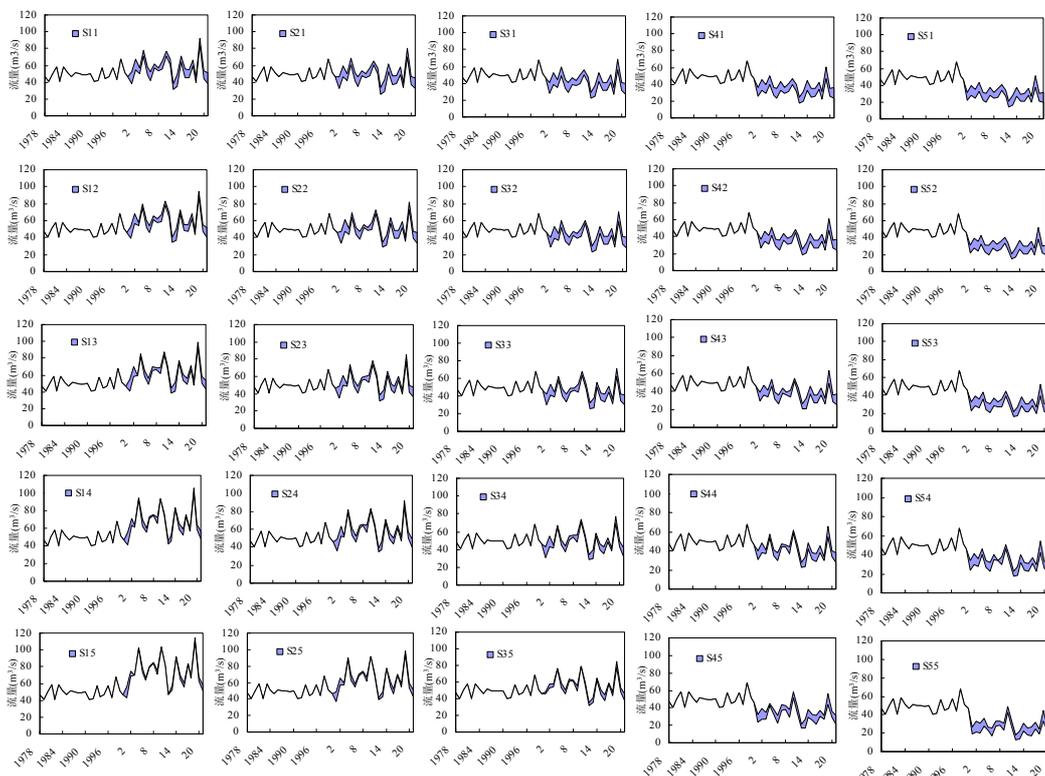


Figure 3. Predicted runoff under 25 climate change scenarios and their 95% CIs caused by parameter uncertainty in SWAT
图 3. 25 种不同气候情景下莺落峡站年平均流量在模型参数不确定性影响下的多年预测值

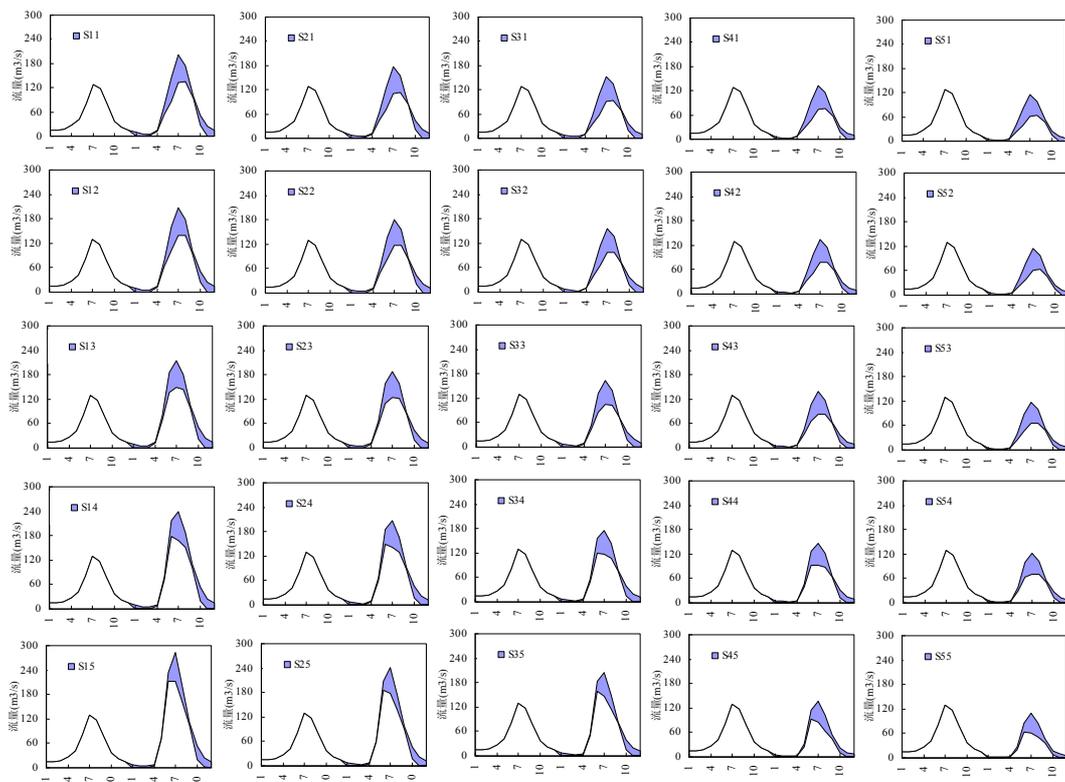


Figure 4. Annual mean predicted monthly runoff under 25 climate change scenarios and their 95% CIs caused by parameter uncertainty in SWAT
图 4. 25 种不同气候情景下莺落峡站月平均流量在模型参数不确定性影响下的预测值

降水的减少(S11→S51, S12→S52, S13→S53, S14→S54, S15→S55)预测流量值趋于减少, 但预测流量值的不确定性区间变化不大; 随着气温的升高(S15→S11, S25→S21, S35→S31, S45→S41, S55→S51), 春季流量预测值增加, 且春季流量预测值的不确定性区间也趋于增大; 降水增加条件下, 随着气温的降低(S11→S15, S21→S25), 预测流量过程线越来越尖耸; 降水减少条件下, 随着气温的降低(S41→S45, S51→S55), 预测流量过程线形状变化不大。

5. 结论

以往使用水文模型进行流量预测的研究中, 尚缺乏考虑水文模拟不确定性的影响。本文选用 SWAT 水文模型, 以黑河流域作为研究区, 基于贝叶斯方法, 探讨了水文模型参数不确定性对流量模拟及预测结果的影响。结果表明, 在黑河流域, SWAT 模型参数不确定性对模型模拟结果的不确定性有一定的贡献, 但不能用来解释模型模拟过程中的所有不确定性; 在未来气候变化情景下, 降水变化幅度越大, 参数不确定性对流量预测值的影响幅度越小; 在降水变化相同条件下, 温度增加会使模型参数不确定性对流量预测值的影响增大; 随着降水的减少, 预测流量值趋于减少, 但预测流量值的不确定性区间变化不大; 随着气温的升高, 春季流量预测值有所增加, 且春季预测流量的不确定性区间也趋于增大; 此外, 在模型参数不确定性影响下, 预测流量的不确定性区间夏季(尤其是6、7月份)最大, 其次是10、11、12月份; 降水增加条件下, 随着气温的降低, 预测流量过程线越来越尖耸; 降水减少条件下, 随着气温的降低, 预测流量过程线形状变化不大。

6. 致谢

感谢第十一届中国水论坛推荐。

参考文献 (References)

- [1] BEVEN, K., BINLEY, A. The future of distributed models—Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 1992, 6(3): 279-298.
- [2] BATES, B.C., CAMPBELL, E.P. A Markov chain Monte Carlo scheme for parameter estimation and inference in conceptual rainfall-runoff modeling. *Water Resources Research*, 2001, 37(4): 937-947.
- [3] ENGLAND, K., XU, C.-Y. and GOTTSCHALK, L. Assessing uncertainties in a conceptual water balance model using Bayesian methodology. *Hydrological Sciences Journal*, 2005, 50(1): 45-63.
- [4] MUGUNTHAN, P., SHOEMAKER, C.A. Assessing the impacts of parameter uncertainty for computationally expensive groundwater models. *Water Resources Research*, 2006, 42(10): W10428.
- [5] 王书功. 水文模型参数估计方法及参数估计不确定性研究[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州, 2006.
- [6] WANG Shugong. Studies on parameter estimation methods for hydrological model and associated uncertainties. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Ph.D. Thesis, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Lanzhou, 2006.
- [6] 刘丽芳, 刘昌明, 王中根等. HIMS 模型参数的不确定性及其影响因素[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(4): 532-537.
- [7] LIU Lifang, LIU Changming, WANG Zhonggen, et al. Parameter uncertainty of HIMS model and its influence factor analysis. *Progress in Geography*, 2013, 32(4): 532-537. (in Chinese)
- [7] 宋晓猛, 孔凡哲, 占车生等. 基于统计理论方法的水文模型参数敏感性分析[J]. *水科学进展*, 2012, 23(5): 642-649.
- [7] SONG Xiaomeng, KONG Fanzhe, ZHAN Chensheng, et al. Sensitivity analysis of hydrological model parameters using a statistical theory approach. *Advances in Water Science*, 2012, 23(5): 642-649. (in Chinese)
- [8] 陈昌军, 郑雄伟, 张卫飞. 三种水文模型不确定性分析方法比较[J]. *水文*, 2012, 32(2): 16-20.
- [8] CHEN Changjun, ZHENG Xiongwei and ZHANG Weifei. Comparison of three methods for uncertainty analysis of hydrologic models. *Hydrology*, 2012, 32(2): 16-20. (in Chinese)
- [9] 林凯荣, 陈晓宏, 江涛. 基于 Beta-PERT 分布的水文模型参数不确定性分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2010, 49(4): 139-143.
- [9] LIN Kairong, CHEN Xiaohong and JIANG Tao. Parameter uncertainty analysis of hydrological model based on beta-pert distribution. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2010, 49(4): 139-143. (in Chinese)
- [10] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(1): 79-86.
- [10] WANG Zhonggen, LIU Chengming, HUANG Youbo. The theory of SWAT Model and its application in Heihe Basin. *Progress in Geography*, 2003, 22(1): 79-86. (in Chinese)
- [11] 陈仁升, 康尔泗, 张济世. 基于小波变换和 GRNN 神经网络的黑河出山径流模型[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(增刊): 12-16.
- [11] CHEN Rensheng, KANG Ersi and ZHANG Jishi. Runoff model on wavelet conversion and GRNN of Heihe River. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(z1): 12-16. (in Chinese)
- [12] 蓝永超, 康尔泗. Kalman 滤波方法在黑河出山径流年平均流量预报中的应用[J]. *中国沙漠*, 1999, 19(2): 156-159.
- [12] LAN Yongchao, Kang Ersi. Application of Kalman filter method for runoff forecast at the mountain outlet of the Heihe River. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(2): 156-159. (in Chinese)
- [13] 朱永华, 仵彦卿. 黑河流域地下水监控研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2000, 14(3): 60-64.
- [13] ZHU Yonghua, WU Yanqing. Study on groundwater monitoring in Heihe watershed. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2000, 14(3): 60-64. (in Chinese)
- [14] YANG, J., REICHERT, P. and ABBASPOUR, K.C. Bayesian uncertainty analysis in distributed hydrological modelling: A case study in the Thur River basin (Switzerland). *Water Resources Research*, 2007, 43(10): W10401.
- [15] YANG, J., REICHERT, P., ABBASPOUR, K.C. and YANG, H. Hydrological modelling of the Chaohe Basin in China: Statistical model formulation and Bayesian inference. *Journal of Hydrology*, 2007, 340(3-4): 67-182.