

HIMS模型参数的不确定性及其影响因素

刘丽芳¹, 刘昌明^{1,2}, 王中根², 江 燕³, 张永强⁴, 桑燕芳², 王 虎⁵

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 4. 澳大利亚联邦科工组织土地与水资源研究所, 堪培拉 2601, 澳大利亚; 5. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要:模型参数的不确定性及影响因素分析对无资料流域水文预报具有重要意义。本文以澳大利亚3个流域为例, 采用GLUE方法分析HIMS模型参数的不确定性, 在此基础上探讨流域物理属性对参数取值的影响。研究发现: ① HIMS模型9个参数的不确定性都比较大, 属于敏感参数; ② 降雨量、森林覆盖度和表层土壤最大有效蓄水量大的流域, 土壤蓄水容量 W_m 取值大; 土壤饱和导水率和森林覆盖度高的流域, 产流系数 R 、 r 的取值较大; 温度低、森林覆盖度小的流域, 实际蒸散发系数 ϵ 取值大; 易透水、森林覆盖度高的流域, 马斯京根汇流系数 C_2 取值大。这些结论能为今后在无资料流域应用HIMS模型进行水文预报提供一定参考。

关键词:参数不确定性分析; 流域物理属性; HIMS模型; GLUE方法

doi: 10.11820/dlkxjz.2013.04.005

1 引言

自然界中许多流域由于受自然环境与经济条件的限制, 水文测站分布密度不足, 成为无资料流域; 另外一些流域则因为环境(气候和土地利用)变化等因素的影响, 使得历史资料有时不可用(Goswami et al, 2007; 李丹颖等, 2004; 刘苏峡等, 2005; Sivapalan et al, 2003; 谈戈等, 2004)。在这些无资料流域进行水资源开发利用时需要进行准确的水文预报。针对这一问题, 2003年国际水文科学协会(IAHS)正式启动了PUB(Prediction in Ungauged Basins)国际水文计划, 旨在用未来10年的时间大力开展无资料流域的水文预报, 减少水文预报的不确定性(Sivapalan et al, 2003)。作为水文预报的重要工具, 水文模型的不确定性也给水文预报带来很大的不确定性。水文模型的不确定性主要包括模型输入的不确定性、模型结构的不确定性、模型参数的不确定性(Blasone et al, 2008)。基于对气候、流域特征和水循环的基本认识, 分析水文模型参数的不确定性, 对于提高无资料流域水文预报的精度具有重要意义。

目前, 分析水文模型参数不确定性的方法众多, 主要有普适似然不确定估算法(Generalized Likelihood Uncertainty Estimation, GLUE)、经典贝叶斯法(classical-Bayesian)、伪贝叶斯法(pseudo-Bayesian)等, 其中GLUE方法因具有简单、易行、有效等优点得到了广泛应用(Blasone et al, 2008)。GLUE方法1992年由Beven等提出(Beven et al, 1992), 随后国内外对采用GLUE方法分析水文模型参数不确定性进行了大量研究(Beven et al, 2001; 戴健男等, 2011; 黄国如等, 2007; Montanari, 2005; 莫兴国等, 2004; 舒畅等, 2008; Schoups, 2010; 卫晓婧等, 2008; 熊立华等, 2004), 这些研究比较注重探讨GLUE方法的改进以及水文模型参数不确定性对模型预测结果的影响。通过分析水文模型参数不确定性可以获得参数取值在研究流域的分布情况, 在此基础上可进一步探讨流域物理属性(气候和地表特征)对参数取值分布的影响, 进而为无资料流域参数取值提供参考和依据, 而目前关于这方面的研究尚不多见。

目前已有大量的水文模型, 其中HIMS(Hydro-Informatic Modeling System)是中科院陆地水循环

收稿日期: 2012-10; 修订日期: 2013-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271048, 40971023, 50809004, 41201036)。

作者简介: 刘丽芳(1981-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水文模拟。E-mail: liulifang198160@163.com

通讯作者: 王中根(1973-), 男, 研究员, 主要从事水循环模拟和水资源管理方面研究。E-mail: wangzg@igsrr.ac.cn

及地表过程重点实验室开发的一个水循环综合模拟系统(刘昌明等, 2008), 其中日过程模型已在黄河、海河、黑河、澳大利亚 Murray Darling Basin (MDB)、美国加州等流(区)域都进行了成功的应用(刘昌明等, 2008, 2010; 吴梦莹, 2012), 但关于 HIMS 模型参数不确定性的研究还比较少, 且主要集中于单个流域, 不利于分析流域物理属性对 HIMS 模型参数的影响。本文选择 HIMS 模型, 以澳大利亚 3 个流域为例, 采用 GLUE 方法分析其模型参数的不确定性, 在此基础上将探讨流域物理属性对参数取值的影响, 旨在为无资料流域水文预报研究提供参考。

2 模型与方法

2.1 HIMS 模型结构及参数

HIMS 日过程模型包括潜在蒸发、实际蒸发、下渗、地表径流、壤中流、地下水补给、基流、河道汇流等计算过程(吴梦莹, 2012), 其输入包括降雨、最高与最低气温(或潜在蒸散发)和实测径流。HIMS 模型的参数较少, 共 9 个参数, 包括反映非饱和土壤层持水能力的土壤蓄水容量 W_{sm} 、实际蒸散发系数 ϵ 、产流系数 R 和 r 、壤中流系数 L_a 、地下水补给系数 R_c 和基流系数 K_b , 以及与汇流有关的马斯京根系数 C_1 和 C_2 。表 1 为 HIMS 模型参数的值域。本文中以整个流域为单元进行模拟。

2.2 GLUE 方法

采用 GLUE 方法可分析参数的不确定性, 具体步骤为: ① 确定模型参数的取值范围和先验分布,

表 1 HIMS 模型参数值域

Tab.1 Range of HIMS model parameter

取值	W_{sm}	R	r	L_a	R_c	ϵ	K_b	C_1	C_2
最小值	50	0.1	0.1	0.1	0.01	0.01	0.01	0.05	0.05
最大值	1500	5	0.99	1	1	10	0.7	0.9	0.9

根据参数取值范围和先验分布随机生成多组参数, 确定似然函数以及模型可接受的似然函数的临界值; ② 将生成的参数组代入模型进行模拟并计算似然函数值, 将似然函数值低于临界值的参数组去除, 点绘模型参数与高于该临界值的似然值的散点图, 分析模型参数的不确定性(莫兴国等, 2004)。

本文中参数的先验分布形式取均匀分布; 采用准随机序列(LPTAU)采样方法生成 80000 组样本, 作为 HIMS 模型参数组; 以纳西效率系数(NSE)为似然判据; 似然函数临界值设定为 0.3。纳西效率系数(NSE)计算公式如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

式中: $Q_{obs,i}$ 和 $Q_{sim,i}$ 分别为观测和模拟的径流量(m^3/s); \bar{Q}_{obs} 为观测径流量的平均值(m^3/s)。

3 实例分析

3.1 流域概况

选择澳大利亚 Murray Darling Basin (MDB) 编号为 226218、401210、403226 的流域为研究对象, 选取 1972-1980 年为计算时段, 采用 GLUE 方法分析其模型参数的不确定性, 探讨流域物理属性对参数取值的影响。3 个流域雨量均丰沛, 林木茂盛, 植被良好, 多年平均径流系数相差不大, 具体水文特征见表 2。3 个流域相比, 226218 流域土壤导水性和持水性较好, 土壤饱和导水率、深层土壤最大有效蓄水量较大; 401210 流域面积较大、高程较高、坡度较陡、森林覆盖度最高、多年平均温度最低; 403226 流域形状因子和森林覆盖度最小。

3.2 参数不确定性分析

将随机均匀采样的 80000 组参数代入 HIMS 模型, 通过对 226218、401210、403226 流域 1972-1980 年日径流系列的模拟, 获得似然函数值大于 0.3 的

表 2 流域水文特征

Tab.2 Catchment hydrological characteristics

流域编号	年平均降水量/(mm/yr)	年平均径流系数	年平均温度/°C	流域面积/km ²	流域形状因子	平均高程/m	平均坡度/°	森林覆盖度/%	表层土壤饱和导水率/(mm/hr)	深层土壤饱和导水率/(mm/hr)	表层土壤最大有效蓄水量/mm	深层土壤最大有效蓄水量/mm	水文数据序列
226218	1052	0.35	12.15	66	0.64	321.37	7.34	78.62	291.79	97.13	34.48	153.06	1972-1988
401210	1371	0.36	9.48	407	0.58	850.34	18.86	92.45	213.19	76.8	44	130.13	1972-1990
403226	1189	0.27	12.57	108	0.15	462.57	9.9	48.98	176.29	56.06	38.6	110.23	1972-1990

参数似然散点图见图1。从图1中可以看出: W_{sm} 、 R 、 r 、 L_a 、 R_c 、 ε 、 K_b 和 C_1 这8个参数的似然散点分布在3个流域表现非常相似,且似然函数值变化大; C_2 的似然散点分布在3个流域有较大差别,在226218流域和401210流域, C_2 在取值范围内似然函数最大值都能达到最大,散点左疏右密,在403226流域随着 C_2 取值的增加似然函数最大值逐渐变小(图1i)。

从图1a、1b、1c和1f可以看出: W_{sm} 、 R 、 r 和 ε 的似然函数最大值在一定区间内变化缓慢,当超过一定的临界值后,变化幅度剧烈;在226218、401210、403226流域, W_{sm} 分别在300~550之间、650~1050之间、400~900之间取值时,似然函数最大取值最大(图1a);当 R 取值小于1.5、 r 取值小于0.7时,似然函数最大值均迅速变小(图1b、1c);在226218、401210、403226流域中, r 分别在0.7~0.9之间、0.7~1.0之间、0.65~0.75之间取值时,似然函数最大值取值最大(图1c);在226218和401210流域中, ε 小于

3.0,似然函数最大值迅速变小;而在403226流域中, ε 小于2.5时,似然函数最大值迅速变小(图1f)。

从图1g可以看出: K_b 的散点图有明显的凸起;在226218、401210、403226流域中, K_b 分别在0.01~0.15之间、0.01~0.10之间、0.01~0.20之间取值时,似然函数最大值取值最大,超过这一范围似然函数最大值逐渐减小。

从图1d、1e和1h可以看出: L_a 、 R_c 和 C_1 的散点图在整个取值区间变化剧烈;随着 L_a 和 C_1 取值的增加,似然函数最大值逐步变小(图1d、1h); R_c 从小到大,似然函数最大值呈现明显的上升趋势(图1e)。

r 、 L_a 、 R_c 和 K_b 这4个参数的似然散点图的形状与吴梦莹(2012)在黑河流域的结果不同,这是因为不同流域水文特征存在差异。整体看来,HIMS模型的9个参数在参数取值范围内似然函数最大值变化大,并且 W_{sm} 、 r 、 ε 、 K_b 和 C_2 的最优取值范围与流域有关;因此HIMS模型9个参数的不确定性都比

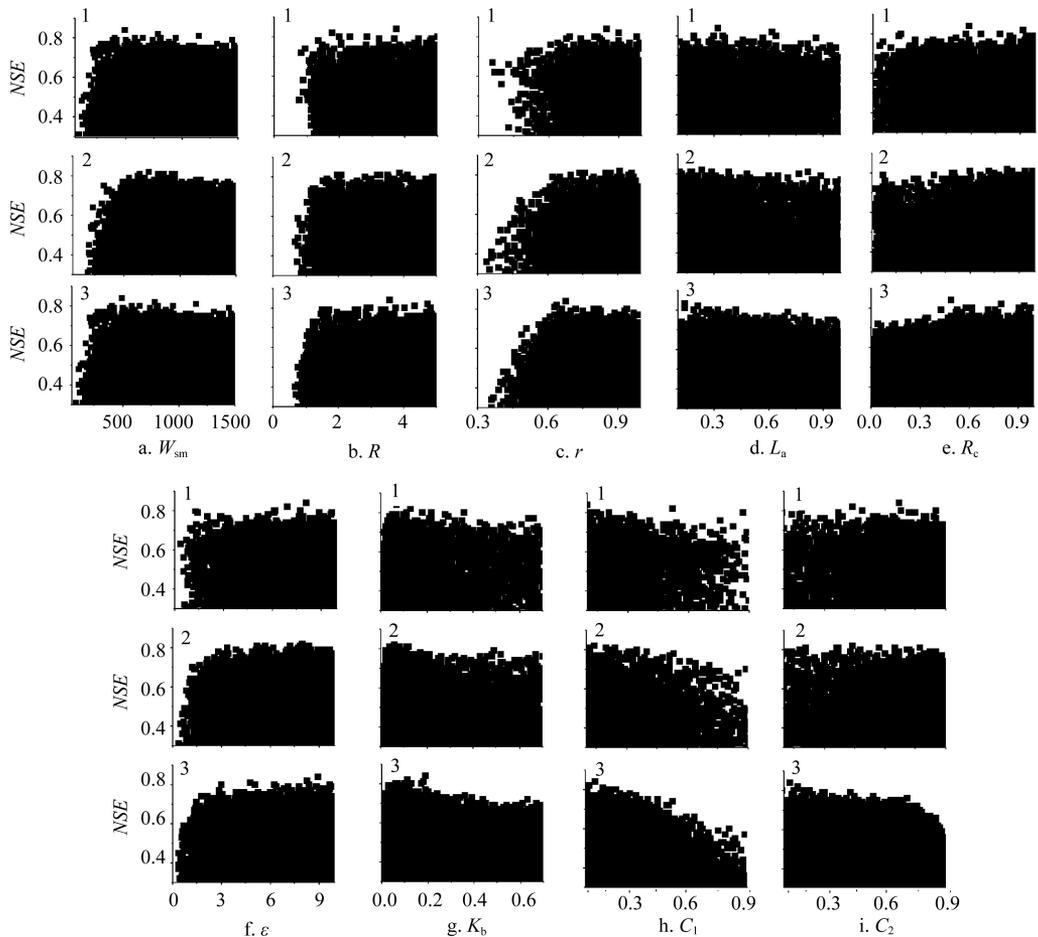


图1 参数似然散点图(1. 226218流域;2. 401210流域;3. 403226流域)

Fig.1 Scatter plots of the likelihood of parameter for daily discharge in basin 226218(1), 401210(2) and 403226(3)

较大,属于敏感参数。

3.3 参数取值与流域属性的关系

水文模型参数取值由影响流域水循环过程的土壤、植被、地形等因素决定。 W_{sm} 反映了非饱和土壤层的持水能力,与新安江模型中的流域平均张力水容量 WM 、表层土自由水蓄水容量 S_m 类似。影响 W_{sm} 取值的因素包括土壤的质地和结构、森林覆盖度、降雨量等因素;401210流域降雨量最大、森林覆盖度最高、表层土壤最大有效蓄水量最大,因此 W_{sm} 最优取值范围的值最大;这与舒畅等(2008)在九州流域和卢氏流域对新安江模型 WM 、戴健男等(2011)在东苕溪流域和息县流域对新安江模型 S_m 的研究结果一致,表明在降雨量充沛、植被覆盖度高、土壤水系发达的地区, WM 和 S_m 最优取值范围的值较大。

r 在226218流域和401210流域的最优取值范围的值较其在403226流域大,这与小流域暴雨径流研究组(1978)的研究结果一致。后者的研究表明,土壤饱和导水率高、森林覆盖度高, R 和 r 的取值较大。226218流域和401210流域森林覆盖度高、土壤饱和导水率较大, R 和 r 取值较大。

流域实际蒸散发由土壤的质地、森林覆盖度、供水和气象条件等共同决定。温度低,水分子运动慢,流域实际蒸散发小;另外,在一定条件下森林覆盖度的提高会增加流域的实际蒸散发(刘昌明,1978)。 ε 越小,流域实际蒸散发大;本文的研究流域都处于湿润地区,土壤质地和降雨差别不大, ε 在403226流域最优取值范围的值比226218与401210流域小,这与该流域温度较高有关; ε 在226218和401210流域最优取值范围相当,与226218流域温度高、401210流域森林覆盖度大有关。

流域汇流受流域面积、形状、土壤、植被、地质构造、降雨空间分布等多重因素影响;一般面积大、形状狭长、易透水、森林覆盖度高、地面径流比重小的流域,汇流时间长(芮孝芳,2004)。汇流时间长的流域,流域出口当天的流量与前一天的流量相关性高。 C_2 反映流域出口当天的流量与前一天的流量相关性,值越大说明流域汇流时间越长;226218流域和401210流域 C_2 取值较大,说明这两个流域汇流时间长,这与两个流域森林覆盖度高有关。

通过对比这3个流域的参数取值范围发现,降雨量、森林覆盖度和表层土壤最大有效蓄水量大的流域, W_{sm} 取值大;土壤饱和导水率和森林覆盖度高

的流域, R 、 r 的取值较大;温度低、森林覆盖度小的流域, ε 取值大;易透水、森林覆盖度高的流域, C_2 取值大。

4 结语

本文以澳大利亚3个流域为例,采用GLUE方法分析HIMS模型参数的不确定性,在此基础上探讨了流域物理属性对参数取值的影响,研究发现:① HIMS模型的9个参数在参数取值范围内似然函数最大值变化大,并且 W_{sm} 、 r 、 ε 、 K_b 和 C_2 的最优取值范围与流域有关;因此HIMS模型9个参数的不确定性都比较大,属于敏感参数;② 通过对比这3个流域的参数取值范围发现,降雨量、森林覆盖度和表层土壤最大有效蓄水量大的流域, W_{sm} 取值大;土壤饱和导水率和森林覆盖度高的流域, R 、 r 的取值较大;温度低、森林覆盖度小的流域, ε 取值大;易透水、森林覆盖度高的流域, C_2 取值大。

L_a 、 R_c 和 K_b 这3个参数的取值与流域植被、土壤质地、地质结构等关系密切,在今后的研究中仍需要进一步搜集流域地质结构方面的资料,分析 L_a 、 R_c 和 K_b 的取值问题。随着计算机、GIS、RS、水文模型、数学方法等研究技术和手段的发展,流域水文预报精度得到了极大提高,今后需要更多地将这些先进技术应用到研究中,基于流域水循环过程,分析HIMS模型参数与流域物理属性的关系,为解决无资料流域水文预报中HIMS模型参数的不确定性问题提供理论支持。

参考文献(References)

- Beven K, Binley A. 1992. Future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(3): 279-298.
- Beven K, Freer J. 2001. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *Journal of Hydrology*, 249(1-4): 11-29.
- Blasone R S, Vrugt J A, Madsen H, et al. 2008. Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling. *Advances in Water Resources*, 31(4): 630-648.
- Dai J N, Li Z J, Huang P N, et al. 2011. Uncertainty analysis of Xin'anjiang model parameters. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 39(6): 618-622. [戴健男, 李致家, 黄鹏年, 等. 2011. 新安江模型参数不确定性分析.

- 河海大学学报: 自然科学版, 39(6): 618-622.]
- Goswami M, O'Conner K M, Bhattarai K P. 2007. Development of regionalization procedures using a multi-model approach for flow simulation in an ungauged catchment. *Journal of Hydrology*, 333(2-4): 517-531.
- Huang G R, Xie H H. 2007. Uncertainty analyses of watershed hydrological model based on GLUE method. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 35(3): 137-142, 149. [黄国如, 解河海. 2007. 基于GLUE方法的流域水文模型的不确定性分析. 华南理工大学学报: 自然科学版, 35(3): 137-142, 149.]
- Liu C M. 1978. Primary analysis of the effects of forests on the annual runoff in the Loess Plateau. [刘昌明. 1978. 黄土高原森林对年径流影响的初步分析. *地理学报*, 33(2): 112-126.]
- Li D Y, Liu C M, Niu C W. 2004. Study on the PUBs issues in the source regions of the Yellow River//Xia J. Study on the complexity and uncertainty of water issues and its progress. Beijing, China: China Water Power Press: 132-141. [李丹颖, 刘昌明, 牛存稳. 2004. 黄河源区PUBs问题研究//夏军. 水问题的复杂性与不确定性研究与进展. 北京: 中国水利水电出版社: 132-141.]
- Liu C M, Wang Z G, Zheng H X, et al. 2008. Development of hydro-informatic modelling system and its application. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 38(3): 456-466. [刘昌明, 王中根, 郑红星, 等. 2008. HIMS系统及其定制模型的开发与应用. *中国科学E辑: 技术科学*, 38(3): 350-360.]
- Liu S X, Xia J, Mo X G. 2005. Advances in Predictions in Ungauged Basins. *China Academic Journal Electronic Publishing House*, 36(2): 9-12. [刘苏峡, 夏军, 莫兴国. 2005. 无资料流域水文预报(PUB计划)研究进展. *水利水电技术*, 36(2): 9-12.]
- Liu C M, Zheng H X, Wang Z G, et al. 2010. Multi-scale integrated simulation of hydrological processes using HIMS with verified case studies. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 46(3): 268-272. [刘昌明, 郑红星, 王中根, 等. 2010. 基于HIMS的水文过程多尺度综合模拟. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 46(3): 268-272.]
- Montanari A. 2005. Large sample behaviors of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) in assessing the uncertainty of rainfall-runoff simulations. *Water Resources Research*, 41: W08406.
- Mo X G, Liu S X. 2004. The GLUE method and its application to uncertainty analyses of watershed hydrological model//Xia J. Study on the complexity and uncertainty of water issues and its progress. Beijing, China: China Water Power Press: 143-150. [莫兴国, 刘苏峡. 2004. GLUE方法及其在水文不确定性分析中的应用//夏军. 水问题的复杂性与不确定性研究与进展. 北京: 中国水利水电出版社: 143-150.]
- Rui X F. 2004. *Hydrology principles*. Beijing, China: China Water Power Press. [芮孝芳. 2004. 水文学原理. 北京: 中国水利水电出版社.]
- Shu C, Liu S X, Mo X G, et al. 2008. Uncertainty analysis of Xin'anjiang model parameter. *Geographical Research*, 27(2): 343-352. [舒畅, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 2008. 新安江模型参数的不确定性分析. *地理研究*, 27(2): 343-352.]
- Sivapalan M, Takeuchi K, Franks S W, et al. 2003. IAHS decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, 48(6): 857-880.
- Schoups G, Vrugt J A. 2010. A formal likelihood function for parameter and predictive inference of hydrologic models with correlated, heteroscedastic, and non-Gaussian errors. *Water Resources Research*, 46: W10531.
- The Small Watershed Storm Flood Peak Study Group. 1978. Calculation of the storm flood peak in small watershed. Beijing, China: Science Press. [小流域暴雨径流研究组. 1978. 小流域暴雨洪峰流量计算. 北京: 科学出版社.]
- Tan G, Xia J, Li X. 2004. Hydrological prediction in ungauged basins. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26(2): 192-196. [谈戈, 夏军, 李新. 2004. 无资料地区水文预报研究的方法与出路. *冰川冻土*, 26(2): 192-196.]
- Wu M Y. 2012. Study on distributed hydrological model of the upstream of Heihe River based on HIMS[D]. Beijing, China: University of Chinese Academy of Sciences. [吴梦莹. 2012. 基于HIMS的黑河流域上游分布式水文模型研究[D]. 北京: 中国科学院大学.]
- Wei X J, Xiong L H. 2008. Application of improved GLUE method to analyzing uncertainty of hydrological model. *Express Water Resources and Hydropower Information*, 29(6): 23-25. [卫晓婧, 熊立华. 2008. 改进的GLUE方法在水文模型不确定性研究中的应用. *水利水电快报*, 29(6): 23-25.]
- Xiong L H, Guo S L. 2004. Study on the equifinality of Xin'anjiang model parameter//Xia J. Study on the complexity and uncertainty of water issues and its progress. Beijing, China: China Water Power Press: 151-155. [熊立华, 郭生练. 2004. 三水源新安江模型异参同效现象的研究//夏军. 水问题的复杂性与不确定性研究与进展. 北京: 中国水利水电出版社: 151-155.]

Parameter uncertainty of HIMS model and its influence factor analysis

LIU Lifang¹, LIU Changming^{1,2}, WANG Zhonggen², JIANG Yan³, ZHANG Yongqiang⁴,
SANG Yanfang², WANG Hu⁵

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China; 4. CSIRO Land and Water, Canberra, ACT 2601, Australia; 5. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Parameter uncertainty of hydrological model and its influence factor analysis have important significance in hydrological forecasting for ungauged basins. In this paper, the parameter uncertainty of HIMS model was examined by employing generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) method based on the simulation results of daily rainfall runoff data from the three catchments in Australia, and the influence factors of HIMS model parameters were discussed. It was found that parameters of HIMS model were all sensitivity parameters. And then the parameters distribution of HIMS model and the physical attributions in different catchments were compared. The results showed that the value of soil moisture storage capacity (W_{sm}) in the catchment was related to the precipitation, forest coverage and available water capacity in lay 1. As the precipitation, forest coverage and available water capacity in lay 1 rising, the value of W_{sm} increased. The larger values of runoff generation coefficient (R) and (r) in the catchment were due to the large soil saturated hydraulic conductivity and high forest coverage. The value of actual evapotranspiration coefficient (ε) was large in the catchment with low temperature and forest coverage. The value of Muskingum model coefficient (C_2) was large when soil saturated hydraulic conductivity and forest coverage were high.

Key words: parameter uncertainty analysis; catchment physical attributions; HIMS model; GLUE