

Comparative Study of Hydrological Models in the Poyang Lake Basin

Shenglian Guo^{1,2}, Jiali Guo^{2,3}, Haijin Guo^{2,4}, Gaohong Xu^{2,4}, Sunyun Lv^{2,4}

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

²Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan

³College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang

⁴Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan

Email: slguo@whu.edu.cn

Received: Jun. 1st, 2014; revised: Oct. 5th, 2014; accepted: Nov. 10th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The lumped Xin'anjiang model, semi-distributed TopModel model and distributed VIC model were selected for rainfall runoff simulation in order to compare the suitability in the plain lake region. The Boyang and Xi River sub-basins in the Poyang Lake uncontrolled intervening basin were used to calibrate and verify these hydrological models. Application results show that the model efficiency of VIC model is 10% higher than those of Xinanjiang and TopModel models, the relative error of total runoff is within 5% and much better than other two models. The distributed VIC model performs much better than lumped and semi-distributed models and is able to simulate rainfall runoff and water resources well in lake area.

Keywords

Hydrological Model, Runoff Simulation, Comparative Study, Lake Area

鄱阳湖区流域水文模型比较研究

郭生练^{1,2}, 郭家力^{2,3}, 郭海晋^{2,4}, 徐高洪^{2,4}, 吕孙云^{2,4}

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉

²水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉

作者简介: 郭生练(1957-), 男, 福建龙岩人, 教授, 博士, 主要从事水文学及水资源开发利用方面的研究。

³三峡大学水利与环境学院, 宜昌

⁴长江水利委员会水文局, 武汉

Email: slguo@whu.edu.cn

收稿日期: 2014年6月1日; 修回日期: 2014年10月5日; 录用日期: 2014年11月10日

摘要

选用目前具有代表性的三水源新安江模型、半分布式TopModel和分布式VIC模型, 开展降雨径流模拟计算, 分析比较各种水文模型在平原湖区的适用性。选择鄱阳湖未控区间内的博阳河和西河流域, 分别进行三个水文模型的参数率定和检验。应用结果表明, VIC模型的效率系数比TopModel模型和新安江模型高出10多个百分点, 径流总量相对误差均控制在5%以内, 低于其余2个模型。VIC分布式水文模型的模拟结果明显优于集总式和半分布式水文模型, 能较好地模拟湖区流域的降雨径流过程和水资源量。

关键词

水文模型, 降雨径流, 比较研究, 湖区流域

1. 引言

流域水文模型是在对复杂的水文物理现象进行抽象的基础上, 采用系统理论方法、数学物理方法或者利用一些简单的物理概念和经验关系, 对流域产汇流过程进行描述而建立起来的数学模型, 通过计算机来分析、模拟、显示和实时预测各种水体的存在、循环、分布以及物理和化学特性。流域水文模型经历了几十年的发展, 随着科学技术的发展, 模型也在不断的改进和完善。到目前为止, 据不完全统计至少有上百种流域水文模型。根据反映水流运动的空间变化特点, 流域水文模型可分为集总式、半分布式和分布式三种类型[1]。

本文分别选用目前具有代表性的三水源新安江模型、TOPMODEL半分布式和VIC分布式水文模型, 开展降雨径流模拟计算, 分析比较各种水文模型在平原湖区的适用性[2]。

2. 流域概况和研究资料

选择鄱阳湖未控区间内的博阳河流域和西河流域, 研究降雨径流关系。两个流域与未控区间流域同在环鄱阳湖暴雨区, 降雨条件相似, 下垫面条件略有不同, 未控区间内有一个较大面积的湖泊水面, 博阳河、西河基本是陆面。未控区间流域并非水文规则意义上的流域, 直接应用水文模型, 模型参数的率定是个难题。整个未控区间内, 仅有博阳河、西河属于完整封闭流域, 并具有水文观测资料。因此, 可以采用流域水文模型模拟这两个流域的降雨径流过程, 率定水文模型参数, 研究湖区流域的产汇流规律。博阳河和西河流域在鄱阳湖区的相对位置如图1所示。

2.1. 博阳河流域

博阳河流域面积 1354 km², 河长 105 km。博阳河控制站梓坊水文站设立于 1956 年 12 月, 为国家基本水文站, 集水面积 626 m²。根据梓坊站 1957~2007 年共 51 年的资料统计, 多年平均流量 13.3 m³/s, 多年平均年径流量为 4.21 × 10⁸ m³。流域径流变化差异较大, 最大日流量 721 m³/s, 最小日流量不足 1 m³/s。流域内及其附近的雨量站共有 8 个, 平均密度为 78.25 m²/站。如图 2 所示, 站点分布均匀, 观测资料能

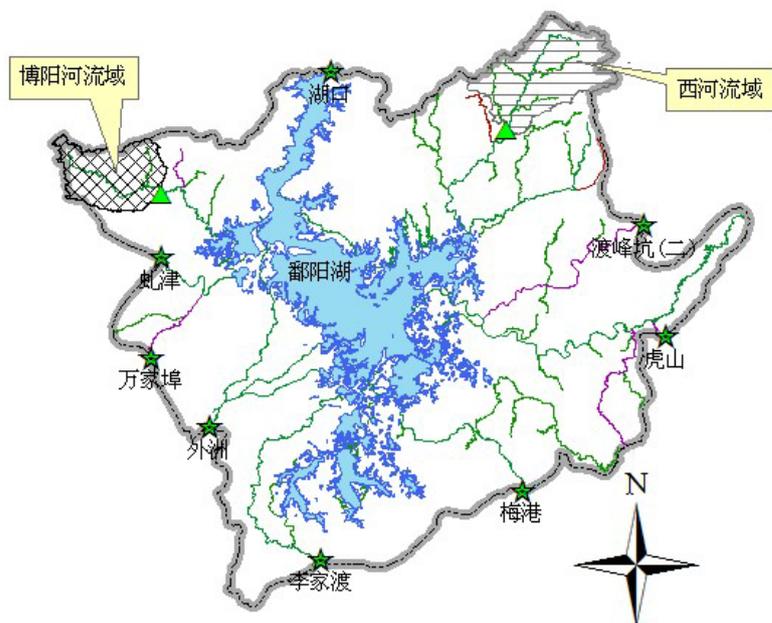


Figure 1. The location of Boyang and Xi River basins in the Poyang Lake region
图 1. 博阳河和西河流域在鄱阳湖未控区间的相对位置



Figure 2. The distribution of gauged stations in the Boyang River basin
图 2. 博阳河流域水系及站点分布

代表该流域的降水特性。其中资料年限最长的梓坊站为 51 年；最短为钟村、山脚下陈、竹林下、枣树李站，各有 27 年。各站多年平均年降雨量在 1305~1508 mm 之间变化，相互之间差别不大，采用泰森多边形计算得到的流域多年平均面雨量为 1436 mm。流域内设有蒸发观测站，蒸发资料采用离流域最近的虬津站蒸发皿观测资料，蒸发皿样式为 E601。根据该站 1982 年 1 月 1 日~2007 年 12 月 31 日共 26 年的资料统计，最大日蒸发量为 10.90 mm，多年平均日蒸发量为 1.80 mm。年蒸发量在 578~764 mm 之间变化，多年平均年蒸发量为 655 mm。

博阳河流域的土壤类型主要为粘壤土和壤土。其中上层为粘壤土和粘土，面积比例分别为 25.98% 和 74.02%，下层全部为粘土。流域内的植被覆盖类型包括 7 种，分别为：常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶阔叶林、林地、林地草原、草原和耕地，各种植被类型的面积比例依次为 10.95%，0.67%，0.13%，27.35%，

46.06%，5.32%和9.52%。

距离博阳河流域最近的国家气象站为南昌站，气温资料包括日平均气温、最高气温和最低气温。本章采用该站的气温数据作为VIC模型的大气强迫数据输入。

该流域可供利用的资料年限共有1982~2007年26年长度。将此数据分为三组，分别为1982~1989、1990~1999、2000~2007。

2.2. 西河流域

西河流域位于鄱阳湖东北侧(见图3)。西河又称潼津西河，它与潼津东河在波阳县田坂街汇合而成，过童子渡分汉注入鄱阳湖。流域跨皖、赣两省，大部分位于安徽省境内，皖境内河段称为龙泉河。源头为安徽省池州市东至县白马岭梓树尖(海拔645 m)，自官港西南流，经泥溪至孙家坂，左纳源出九江岭(海拔524 m)，经木塔、利安、林家坂、黄渡溪来汇的支流，又西南流，经永丰、昭潭，至何家村，左纳经大板水库下来的支流；又西南，出龙泉进入赣境石门街。属山区河流，河道长65.5 km，河宽20~30 m，比降2.96‰。流域出口控制站石门街以上集水面积841 km²。根据出口控制站1959~1976年、1991~2007年2个时期共35年(1977~1990年间无流量资料记载)实测流量数据统计，年径流量最大为1998年的14.3 × 10⁸ m³，最小为1963年的1.45 × 10⁸ m³，多年年平均径流量为6.45 × 10⁸ m³，最大日流量为1998年的2140 m³/s，最小日流量为2007年的186 m³/s，多年平均日流量20.4 m³/s。

西河流域内共有雨量站5个，但目前收集的降雨资料来自3个站点，即白石口、昭潭和石门街，这三个雨量站分别位于流域的上、中、下游。石门街站有较长降雨资料，但白石口和昭潭站目前仅收集到1971~1976年共6年的资料，白石口和昭潭站多年平均年降水量比石门街多年平均年降水量(无论是51年平均还是6年平均)偏大。流域内另外2个雨量站：利安、泥溪于1977年建站，目前尚未收集到这两个站的资料。西河流域内仅设石门街蒸发站。所采用的蒸发皿样式为E601。根据该站1964年~2007年共44年资料统计，最大日蒸发量为13.7 mm，多年平均日蒸发量为2.34 mm。年蒸发量在666~1052 mm之间，多年平均年蒸发量为818 mm。

西河流域的土壤类型主要为粘壤土和壤土。其中上层为粘壤土和壤土，面积比例分别为35.65%和64.35%，下层全部为壤土。流域内的植被覆盖类型包括7种，分别为：常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶阔叶林、林地、林地草原、草原和耕地，各种植被类型的面积比例依次为7.93%，0.18%，1.46%，51.14%，24.46%，2.82%和12.00%。



Figure 3. The distribution of gauged stations in the Xi River basin
图3. 西河流域水系及雨量站点分布

距离西河流域最近的国家气象站为景德镇站, 气温资料包括日平均气温、最高气温和最低气温。本文采用该站的气温数据作为 VIC 模型的大气强迫数据输入。

西河流域收集到的可供利用的只有 1971~1976 年共 6 年资料。

3. 模型率定和检验结果

将博阳河流域 1982~2007 年的资料分为 3 组, 即: 1982~1989、1990~1999、2000~2007, 分别以 1980s、1990s 和 2000s 代表这三个时期。三个时期分别率定和检验, 以区别模型在不同时期的适用性, 各组率定期和检验期的划分如表 1 所示。

按照建立 VIC 模型的步骤, 将大气强迫资料(包括降雨、最高最低气温)、土壤和植被资料输入模型, 在博阳河流域以子流域为计算单元进行计算。在运行 VIC 模型时, 为观察模型各参数的特性, 采用人工调试的方法进行参数优选[3]-[6]。

采用遗传算法对新安江模型参数进行优选。该算法对初值并不敏感, 参考新安江模型应用的文献, 在合理的参数范围内任意设置初始值, 并对各个时期给出相同的参数值的取值范围, 最大迭代次数设置为 6000 次, 基本上可以得到较为稳定的近似最优值[1]。

采用单纯型法优选 TopModel 模型参数。单纯形法不是直接去探查有利方向, 而是求出单纯形各个顶点的目标函数值, 并加以比较, 丢掉目标函数值最大的点, 代之以新点, 如此构成一新的单纯形, 通过这种方式逐步逼近极小点[2]。

三个水文模型的率定和检验结果如表 2 所示。VIC 模型在三个时期的模型效率系数, 相差不大, 均

Table 1. Data set of calibration and verification periods in the Boyang and Xi River basins

表 1. 博阳河和西河流域率定期和检验期的资料年限

流域	分组	所代表年代	率定期	检验期
博阳河	1980s	1982~1989	1982~1987	1988~1989
博阳河	1990s	1990~1999	1990~1996	1997~1999
博阳河	2000s	2000~2007	2000~2005	2006~2007
西河	1970s	1971~1976	1971~1974	1975~1976

Table 2. Calibration and verification results of three hydrologic models in the Boyang River basin

表 2. 三个水文模型在博阳河流域的率定和检验结果

模型	时期	模型效率系数(%)		径流总量相对误差(%)	
		率定期	检验期	率定期	检验期
VIC	1980s	87.65	87.88	0.08	0.92
新安江		80.79	68.73	-5.83	-7.66
TopModel		72.63	54.41	-1.23	7.93
VIC	1990s	85.94	88.14	1.75	-1.72
新安江		80.33	87.22	-0.37	3.83
TopModel		69.40	73.15	1.43	-8.15
VIC	2000s	86.33	85.78	4.45	2.82
新安江		71.87	67.64	-0.81	2.19
TopModel		77.38	55.18	6.38	11.01

在 85% 以上, 达到了国家《水文情报预报规范》的甲级标准, 虽然径流总量相对误差在不同时期略有不同, 但是误差范围均控制在 5% 以内, 其中以 1980s 时期的径流量模拟效果最好, 基本上与实测值趋于一致。2000s 时期径流总量相对误差略微偏大, 率定期和检验期分别为 4.45% 和 2.82%, 模拟径流量比实测值偏大。1990s 时期的模拟效果无论是径流量还是流量过程线均与 1990s 时期相近。

新安江模型在 1990s 应用效果最好, 效率系数在率定期和检验期分别达到 80.33% 和 87.22%, 达到国家《水文情报预报规范》乙级标准, 且径流总量相对误差均在 5% 以内。1980s 应用效果其次, 率定期模型效率系数为 80.79%, 检验期稍差, 为 68.73%。2000s 时期模型应用效果较差, 模型效率系数分别为 71.87% 和 67.64%。总体看来, 新安江三水源模型在博阳河流域的应用, 虽然模型效率系数在各时期不尽相同, 但是各时期径流总量相对误差的绝对平均值为 3.45%, 处于相对理想的范围。

TopModel 模型是以地形为基础的水文模型, 地貌指数分布曲线是其中非常重要的一个输入。TopModel 模型在 3 个不同时期率定期的模型效率系数在 69.40%~77.38% 之间, 检验期相对较差, 除 1990s 为 73.15% 外, 另外 2 个时期在 55% 左右。径流总量相对误差对于 1980s 和 1990s 时期, 率定期不超过 2%, 而检验期却达到了 8% 左右; 2000s 时期径流总量较实测值偏大程度在率定期和检验期均达 5% 以上。

采用与博阳河流域相同的方法, 计算得到三个模型在西河流域的率定和检验结果, 见表 3。VIC 在西河流域率定期的模型效率系数达到 71.32%, 检验期不甚理想。径流总量相对误差在率定期和检验期分别为 -0.02% 和 -1.32%, 说明该模型对西河流域的径流量模拟有一定适应性。新安江模型的效率系数在率定期和检验期均在 60% 左右, 但是径流总量相对误差无论是在率定期还是检验期绝对值均不超过 5%。TopModel 模型的效率系数在率定期和检验期非常接近, 约为 60%, 径流总量相对误差在率定期和检验期分别为 12.52% 和 5.12%, 略显偏大。

4. 模型模拟结果综合比较

将三个模型应用的评价指标在各时期的平均值列于表 4 中。通过分析对比表 3 和表 4 中的结果可知, VIC 模型的效率系数比 TopModel 模型和新安江高出 10 多个百分点以上, 径流总量相对误差低于其余 2 个模型, 且均在 5% 以内。图 4~图 7 列出了三个水文模型模拟流量与实测流量的对比情况。

Table 3. Calibration and verification results of three hydrologic models in the Xi River basin

表 3. 三个水文模型在西河流域的率定和检验结果

模型	模型效率系数(%)		径流总量相对误差(%)	
	率定期	检验期	率定期	检验期
VIC	71.32	54.93	-0.02	-1.32
新安江	59.07	62.91	-3.89	2.80
TopModel	59.45	59.26	12.52	5.12

Table 4. Results comparison of three hydrologic models in the Boyang River basin

表 4. 三个水文模型博阳河流域率定和检验结果对比

模型	模型效率系数(%)		径流总量相对误差(%)	
	率定期	检验期	率定期	率定期
VIC	86.64	87.27	2.09	1.82
TopModel	73.14	60.91	3.01	9.03
新安江	76.77	70.3	2.34	4.56

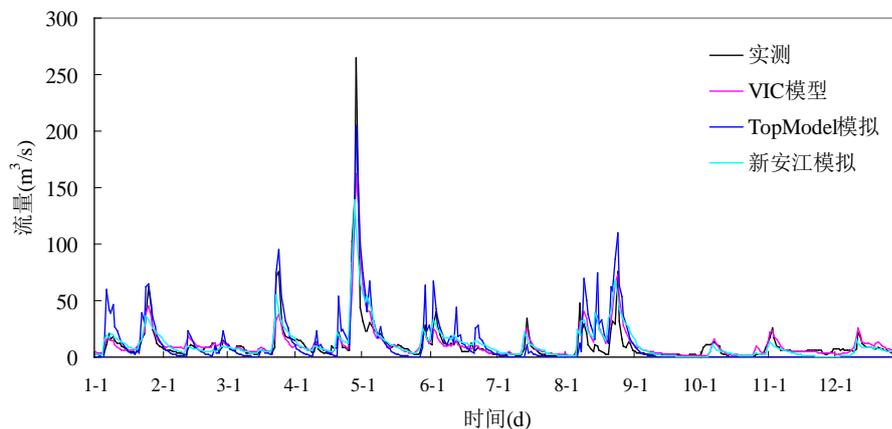


Figure 4. Comparison of simulated and observed flow hydrographs in the Boyang River basin during 1988 (verification period)

图 4. 博阳河流域 1988 年三种模型模拟与实测流量过程线对比(检验期)

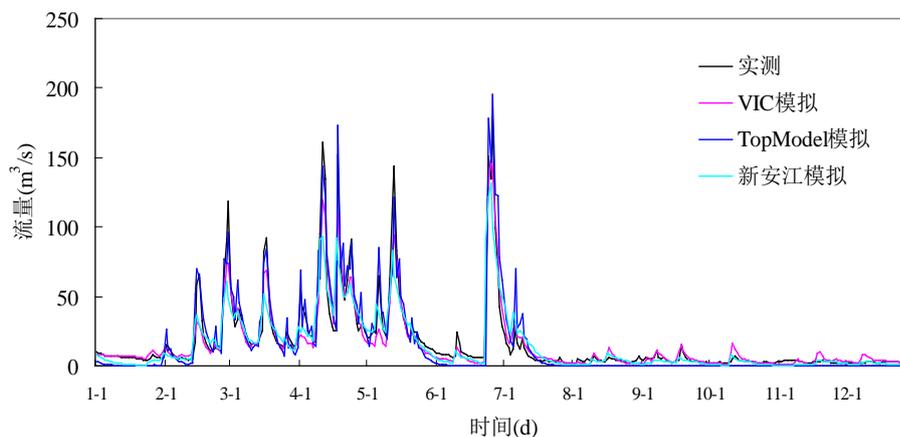


Figure 5. Comparison of simulated and observed flow hydrographs in the Boyang River basin during 1997 (verification period)

图 5. 博阳河流域 1997 年三种模型模拟与实测流量过程线对比(检验期)

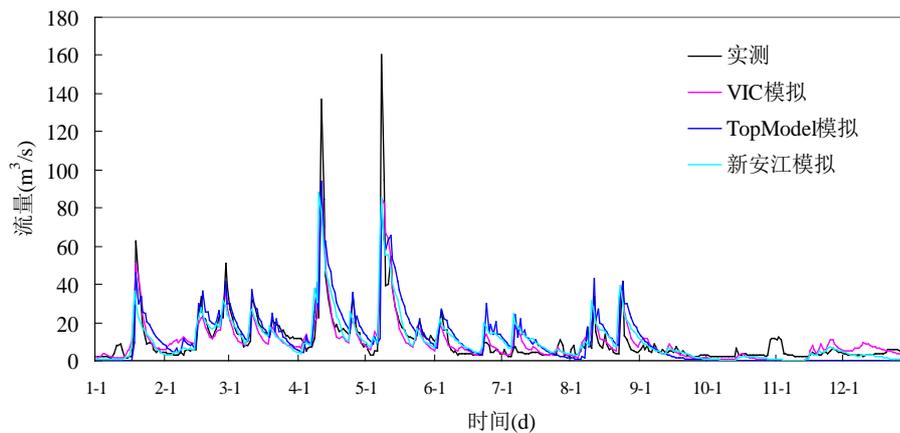


Figure 6. Comparison of simulated and observed flow hydrographs in the Boyang River basin during 2006 (verification period)

图 6. 博阳河流域 2006 年三种模型模拟与实测流量过程线对比(检验期)

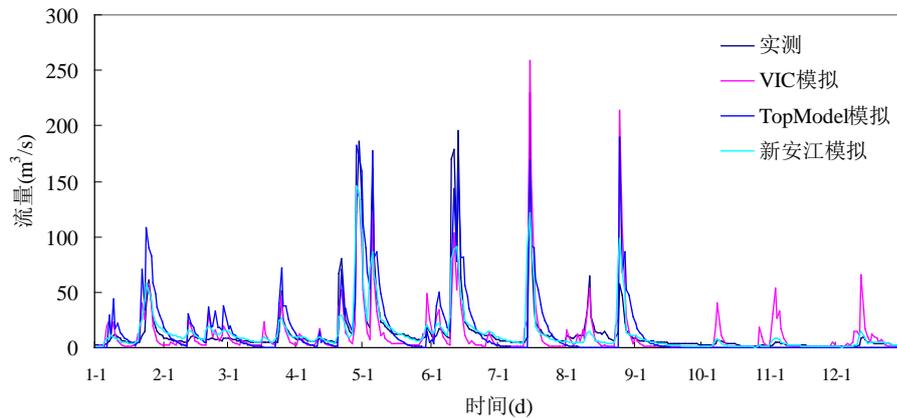


Figure 7. Comparison of simulated and observed flow hydrographs in the Xi River basin during 1975 (verification period)

图 7. 西河流域 1975 年三种模型模拟与实测流量过程线对比(检验期)

5. 结论

选择鄱阳湖未控区间内的博阳河和西河流域为代表流域,对降雨、蒸发、径流、地形等资料进行分析,应用 VIC、TopModel 和新安江三种水文模型分别进行降雨径流模拟。结果表明, VIC 模型比 TopModel 模型和新安江模型具有更强的适用性,不仅能较好地模拟流量过程,模拟的径流量也与实测值较为接近。建议采用 VIC 模型,模拟鄱阳湖未控区间流域的降雨径流关系,研究分析水量平衡和水资源分布规律。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51190094)。

参考文献 (References)

- [1] 张文华, 郭生练. 降雨径流理论与方法[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2008.
ZHANG Wenhua, GUO Shenglian. Rainfall and runoff theory and method. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2008. (in Chinese)
- [2] 熊立华, 郭生练. 分布式流域水文模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
XIONG Lihua, GUO Shenglian. Distributed hydrological models. Beijing: China Water Resources and Power Press, 2004. (in Chinese)
- [3] 郝振纯, 李丽, 王加虎, 罗健. 分布式水文模型理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
HAO Zhenchun, LI Li, WANG Jiahu and LUO Jian. Theory and methods of distributed hydrological model. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [4] 张俊, 郭生练, 李超群, 林凯荣. 概念性流域水文模型比较研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(2): 1-6.
ZHANG Jun, GUO Shenglian, LI Chaoqun and LIN Kairong. Comparative study of conceptual watershed hydrologic models. Journal of Wuhan University, 2007, 40(2): 1-6. (in Chinese)
- [5] 周研来, 郭生练, 郭家力, 吴波. VIC 模型参数的地区分布规律及在无资料流域的移用[J]. 水资源研究, 2012, 1(3): 57-64.
ZHOU Yanlai, GUO Shenglian, GUO Jiali and WU Bo. Regional distribution of the VIC model parameters and application in ungauged basins. Journal of Water Resources Research, 2012, 1(3): 57-64. (in Chinese)
- [6] GUO, S.L., GUO, J., ZHANG, J. and CHEN, H. VIC distributed hydrological model to predict climate change impact in the Hanjiang basin. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(11): 3234-3239.