

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.05.001

淮河上游地区降雨径流分析及模拟

邓 鹏¹,李致家²,郭 元²,孙善磊¹

(1.南京信息工程大学水文气象学院,江苏 南京 210044; 2.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要: 为了掌握淮河流域的水情信息,对淮河干流王家坝以上流域的降雨径流进行分析和模拟。采用流域内 1985—2007 年的站点历史资料对降雨径流进行分析,并且应用分布式 SWAT 模型,采用 SCE-UA 算法进行参数自动校准并进行检验,建立降雨径流月尺度模拟模型。分析发现流域年降水量 50% 集中在 6—8 月,并且淮南山区息县及潢川子流域的月平均径流和径流系数都大于属于淮北平原区的班台子流域。息县、潢川、班台及王家坝月径流的模拟结果确定性系数分别达到 0.77、0.81、0.69 和 0.80。淮河上游地区的降雨存在明显的季节集中性,并且淮南山区和淮北平原区因地势不同使产流特征不同。流域中水利工程设施的应用对天然降雨径流过程的改变产生很大影响,使班台子流域的模拟结果差于其他子流域。研究区属于径流资料短缺地区,分布式水文模型的建立充分反映了下垫面的已知信息,弥补了径流资料短缺的不足之处。

关键词: 淮河上游地区;降雨径流;水文模拟;分布式水文模型

中图分类号:P339 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2014)05-0377-05

Rainfall-runoff analysis and simulation for upstream area of Huaihe River

DENG Peng¹, LI Zhijia², GUO Yuan², SUN Shanlei¹

(1. College of Hydrometeorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to obtain information on the water regime of the Huaihe River Basin, the rainfall and runoff in the catchment upstream of the Wangjiaba sub-basin, in the main stream of the Huaihe River, were analyzed and simulated. Historical data from 1985 to 2007 in the basin were used for rainfall-runoff analysis. The distributed SWAT model was used for monthly rainfall-runoff simulation, and the SCE-UA algorithm was used for automatic calibration of parameters. The results show that 50% of annual rainfall was concentrated in the period from June to August. The mean monthly runoff and runoff coefficients of the Xixian and Huangchuan sub-basins in the southern mountainous area were higher than those of the Bantai sub-basin in the northern plain area. The determination coefficients of the simulation results of monthly runoff in the Xixian, Huangchuan, Bantai, and Wangjiaba sub-basins were 0.77, 0.81, 0.69, and 0.80, respectively. The rainfall in the upstream area of the Huaihe River areas shows a significantly seasonal centrality. The characteristics of runoff of the southern mountainous area and northern plain area are different due to terrain difference. The water conservancy facilities have significant influence on the change of rainfall-runoff processes, resulting in the simulated results of the Bantai sub-basin being inferior to those of other sub-basins. The study area is a runoff data-deficient area, and the distributed hydrological model adequately reflects the given information of the underlying surface, which can offset this deficiency.

Key words: upstream area of Huaihe River; rainfall-runoff; hydrological simulation; distributed hydrological model

淮河处在我国南北气候过渡带,汛期雨量丰沛但分布不均^[1]。每当汛期大暴雨时,淮河上游山地洪水迅速汇集,河道水位迅速抬高。加上淮河中游地势平坦,河道比降小造成洪水排泄不畅,使淮河中上游地区防洪任务艰巨。为了防御洪水,淮河上游地区建立了一定数量的水库、行蓄洪区和分洪道,这些工程使用频

收稿日期: 2013-07-30

基金项目: 南京信息工程大学校科研启动费项目(20100407);江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD);江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXZZ12_0241)

作者简介: 邓鹏(1983—),男,江苏兴化人,讲师,博士,主要从事水文模型和水文气象研究。E-mail: dp@nuist.edu.cn

繁,使淮河洪水的传播过程更加复杂^[2-5]。

淮河流域不利的气候和地形组合,使流域内洪涝灾害频繁发生。最近 10 年来,淮河流域降水量年际变化很大,旱涝交替出现。2001 年,淮河流域发生四季连续干旱的大旱;2003 年、2007 年淮河发生流域性大洪水;2005 年淮河干流上游及部分支流出现较大洪水^[6-7]。关于淮河流域降雨方面,大多数是关于极值降雨的变化及分布研究^[6]。有关淮河径流的研究,主要包括气候变化情景下径流的预测^[8-10],以及淮河流域近年来大洪水事件的气象成因^[11-12]等,有关淮河流域历史径流的统计分析 & 变化趋势研究较少见。

由于人为因素及下垫面条件不均的影响,淮河上游地区降雨径流规律变得更加复杂。本文将通过历史资料对淮河上游地区降雨径流情况进行分析,并对降雨径流过程进行分布式月时段水文模拟。月模型适合长时间的水文模拟,更注重水平衡过程,并且对资料要求不高,易于应用^[13]。该研究对淮河上游地区区域水文情势的分析具有重要作用。

1 研究区域及数据

以淮河干流王家坝以上流域作为研究区域,应用 ArcGIS 处理 90 m 分辨率 SRTM 高程数据^[14],提取流域信息,如图 1 所示。王家坝以上流域总面积 30 672 km²。流域上有多座水库,其中直接对王家坝径流产生影响的是图 1 所示的 6 座水库。其中宿鸭湖水库包括桂庄和夏屯 2 个出流点,故图 1 中有 7 个水库出流点。以上游水文站息县、潢川、班台和水库出流点划分子流域如图 1 所示。流域的南部地区多为山地,汇流迅速,为山溪性河流。流域北部为平原性河流,与淮河干流息县以上和淮南山区显著不同。息县、潢川、班台以上集水面积分别为 10 232 km²、2 050 km²、11 280 km²。

应用 1 km 分辨率 2000 年土地利用图^[15]对流域情况分析如表 1 所示。表中息县、潢川、班台指这些站点的上游集水面积流域,王家坝以上流域即是整个流域。从表中可以统计出息县、潢川、班台、王家坝以上流域的森林地覆盖率分别为 11.77%、19.31%、1.69%、5.90%,说明森林植被主要覆盖于息县和潢川以上的山区性地区。各流域的主要土地利用为农田。采用 10 km 分辨率 1999 年土壤类型图^[16]对流域土壤情况进行分析,结果列于表 1 中。从表 1 可以看出息县、潢川以上流域多为黏壤土,而班台以上流域多为沙壤土。搜集了流域内 1985—2007 年 40 个雨量站点的时段雨量资料,以及息县、潢川、班台、王家坝和各水库出流点在汛期的径流资料。搜集了流域内 1961—2007 年宝丰、驻马店、信阳、阜阳 4 个气象站点资料,包括日最高、最低及平均气温,风速,相对湿度及日照时数等。资料站点的分布如图 1 所示。

表 1 2000 年各流域土地利用及土壤类型情况
Table 1 Land use and soil types of basins in 2000 %

流域	土地利用比例										土壤类型比例		
	水体	常绿 针叶林	落叶 阔叶林	混合林	林地	林地 草地	闭合 灌木	草地	农田	城镇	沙壤土	壤土	黏壤土
息 县	1.85	0.14	0.09	0.25	11.29	17.60	0.34	14.98	53.37	0.10	6.44	13.15	73.86
潢 川	0.86	0.01	0.06	0.05	19.19	14.04	0	7.31	58.28	0.20	0	29.47	70.53
班 台	1.16	0.04	0.15	0.09	1.42	16.43	0.49	12.08	67.94	0.21	53.69	24.36	21.30
王家坝	1.56	0.06	0.09	0.12	5.63	14.33	0.31	10.70	67.05	0.14	28.86	16.55	48.50

2 模拟方法

采用 SWAT 模型对流域的降雨径流过程进行月时段模拟。SWAT 模型是由美国农业部农业研究中心开发的分布式流域水文模型,该模型可以在一个大型复杂的流域内,模拟或预测长期的降雨、土壤、土地利用和管理措施条件下对流域产流、产沙和化学污染物负荷的影响。SWAT 模型中以水量平衡为基础,模拟包括降雨、径流、下渗、蒸发蒸腾、基流、壤中流等水文过程。模型中采用 SCS 径流曲线数法对流域地表径流量进行模拟,采用动力贮水方法计算壤中流,降水中超过土壤蓄水容量的水分补给地下含水层。蒸散发量的计算采

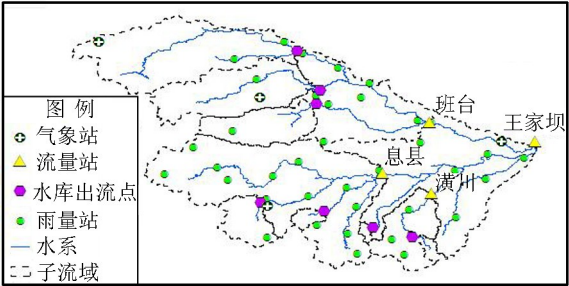


图 1 淮河干流王家坝以上流域
Fig. 1 Catchment upstream of Wangjiaba in main stream of Huaihe River

用 Penman-Monteith 公式计算蒸发能力,在此基础上计算实际蒸散发,包括植物截留层植物散发以及土壤水蒸发。模型针对水文响应单元(HRU)计算汇流时间,再采用水力学公式分别计算坡面汇流和河道汇流,水库汇流采用马斯京根法^[17]。

随着计算机技术的迅猛发展,参数自动优选方法得到了普遍应用,大大加快了参数优选的速度,增加了模拟结果的客观性和可信度。水文模型参数优选一直是水文预报的重要内容,国内外研究较多的水文模型参数优选方法主要有单纯形法、SCE-UA、遗传算法等。SWAT 模型中参数自动校准采用 SCE-UA 数学算法^[18]。参数校准有一个原则:先校准上游子流域的参数,当上游子流域的参数校准好后便不再改变,接着校准下游流域参数。因而这里先分别校准上游息县、潢川、班台子流域的参数,最后校准这些子流域至王家坝区间的参数。另外研究区的径流资料有短缺,这里先用模型对整个径流过程进行连续模拟,再对有实测资料的径流值和模拟值之间采用上述方法进行模型校准,以观测值和模拟值差值的平方和最小作为自动校准的目标函数。采用相对误差 δ 、复相关系数 R^2 和确定性系数 D_c 作为模型适用性评价指标。

3 结果与讨论

采用泰森多边形插值法计算流域面雨量,得到 1985—2007 年各子流域及整个流域的月平均雨量变化过程如图 2 所示。从图 2 可以看出流域降水量从 1 月到 7 月迅速增加,然后从 7 月到 12 月迅速减小。流域年降水量的 50% 集中在 6—8 月。1985—2007 年 4—10 月月平均径流深变化过程如图 3 所示。从图 2、图 3 可

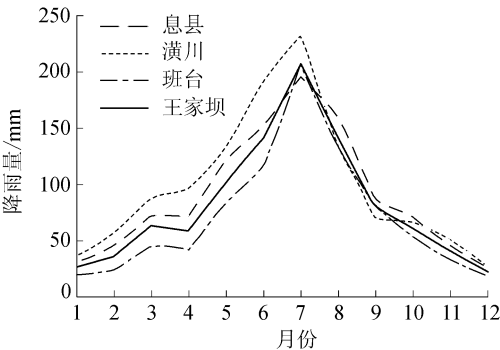


图 2 流域月平均雨量
Fig. 2 Mean monthly rainfall

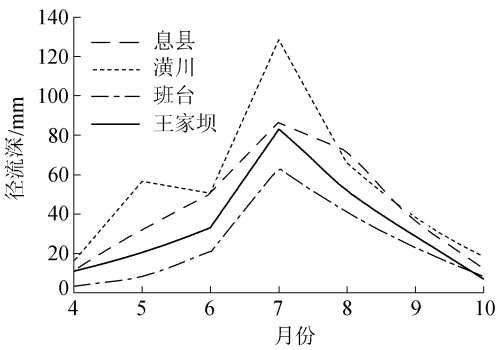


图 3 流域月平均径流深
Fig. 3 Mean monthly runoff

以看出,潢川以上流域面雨量最大,径流量也最大。潢川以上流域面积较小,且为山地地形流域,雨量较大的一个原因是山地对上升气流的阻碍使雨量加大,而径流量大的原因是山区地形使产流过程陡涨陡落,土壤对雨量的再分配作用比其他流域小。班台流域径流量最小,这是由于班台以上流域地势平缓,为平原区流域,洪水涨落都比较慢,土壤及河网对降水量的再分配作用比较明显。计算得到息县、潢川、班台、王家坝以上流域 4—10 月的径流系数分别为 0.41、0.45、0.28、0.35,同样说明息县、潢川这样的山地性流域产流效率要大于班台流域及整个王家坝流域。各流域的降雨径流年际变化线性趋势如表 2 所示。其中班台流域汛期径流量的增加达到了 0.05 的信度检验。潢川流域虽然降雨量较其他流域大,但是其降雨量年变化反而呈减少趋势。

降雨径流的模拟计算中,根据敏感性分析结果,选定 8 个参数作为模型敏感参数,即河道有效导水率 C_{H_k2} 、SCS 径流曲线系数 C_{N2} 、土壤蒸发补偿系数 E_{SCO} 、地下水再蒸发系数 G_{W_REVAP} 、回归流产生时需要浅层蓄水体的初始水深 G_{WQMN} 、再蒸发发生时浅层蓄水体水深 R_{EVAPM} 、土壤可利用水量比 S_{OL_AWC} 、土壤饱和导水

表 2 降雨及径流线性趋势
Table 2 Linear trends of rainfall and runoff

项目	流域	时段	线性倾向率	相关系数	显著性水平
降雨	息 县	1985—2007 年	9.889 2	0.257 5	> 0.1
	潢 川	1985—2007 年	-4.715 0	-0.125 5	> 0.1
	班 台	1985—2007 年	11.342 5	0.346 6	0.1
	王家坝	1985—2007 年	9.046 5	0.271 8	> 0.1
径流	息 县	1985—2007 年 6—9 月	3.778 1	0.162 1	> 0.1
	潢 川	1985—2007 年 6—9 月	0.779 3	0.028 8	> 0.1
	班 台	1985—2007 年 6—9 月	8.785 6	0.439 6	0.05
	王家坝	1985—2007 年 6—9 月	8.915 6	0.369 2	0.1

率 S_{OL_K} 。这8个参数的取值范围如下: $C_{H_K2}=0\sim150\text{ mm/h}$, $C_{N2}=35\sim98$, $E_{SCO}=0\sim1$, $G_{W_REVAP}=0.02\sim0.2$, $G_{WQMN}=0\sim5\,000\text{ mm}$, $R_{EVAPM}=0\sim500\text{ mm}$, $S_{OL_AWC}=0\sim1$, $S_{OL_K}=0\sim2\,000\text{ mm/h}$ 。利用息县、潢川、班台、王家坝4个水文站1985—1998年月径流实测数据,进行月尺度径流校准。校准的模型参数值结果见表3。校准完成后,使用1999—2007年的径流观测数据进行验证。图4分别是各个测站观测径流与模拟径流的比较。表4为各个测站径流校准与验证期间的评价系数值。

表3 模型校准参数值
Table 3 Model calibrated parameters

站点	模型参数最终值							
	$C_{H_K2}/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	C_{N2}	E_{SCO}	G_{W_REVAP}	G_{WQMN}/mm	R_{EVAPM}/mm	S_{OL_AWC}	$S_{OL_K}/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$
息 县	11.93	47~68	0.23	0.10	129.27	260.32	0.56	297.68
潢 川	43.76	72~94	0.05	0.15	1022.30	299.34	0.62	312.67
班 台	62.41	36~40	0.07	0.06	4696.70	405.28	0.39	1.96
王家坝	5.60	57~76	0.64	0.11	3142.60	410.69	0.35	161.04

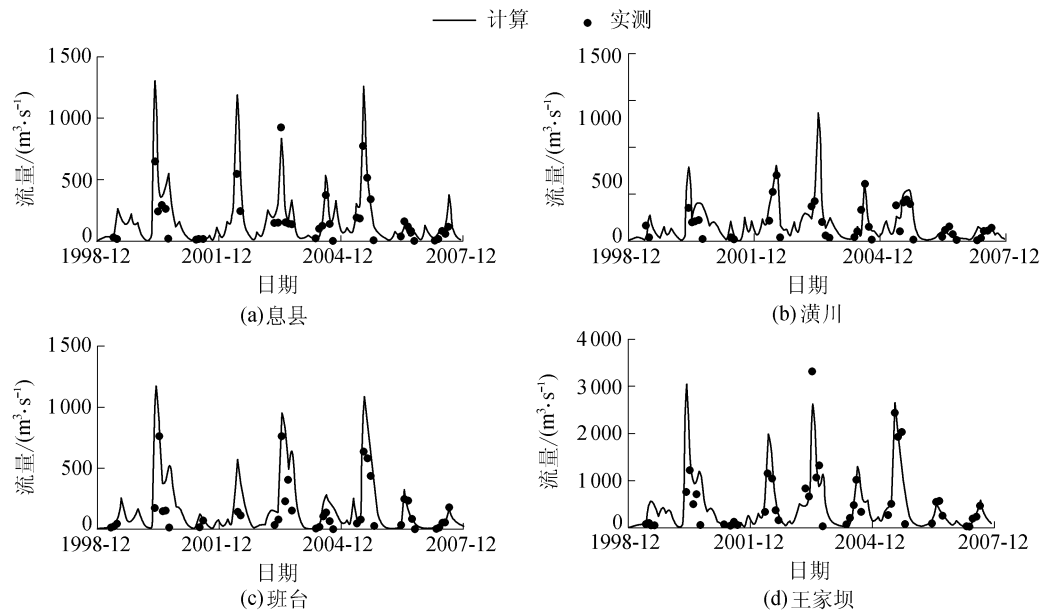


图4 验证期月径流过程线
Fig. 4 Monthly runoff hydrograph in validation period

从表4中可以看出,息县和潢川流域的模拟结果好于班台流域,这是因为班台以上流域有众多水利
工程设施,如板桥水库、薄山水库、
宿鸭湖水库、杨庄滞洪区,以及很多
行蓄洪区、闸门设施等。本模拟考
虑到水库放水对径流的影响,而各
种蓄、滞洪区设施的应用对径流的
影响无法考虑,故模拟效果较差。
比较而言,息县和潢川流域为山区

表4 模拟结果评价系数
Table 4 Evaluation coefficients of simulation results

站点	模拟时期	径流月均值/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)		$\delta/\%$	R^2	D_c
		实测值	模拟值			
息 县	校准期	147.53	162.68	10.27	0.80	0.81
	验证期	149.67	129.05	-13.78	0.62	0.77
潢 川	校准期	38.04	44.01	15.69	0.79	0.83
	验证期	47.61	45.18	-5.10	0.74	0.81
班 台	校准期	68.71	87.91	27.94	0.51	0.62
	验证期	187.85	209.44	11.49	0.70	0.69
王家坝	校准期	306.91	336.01	9.48	0.72	0.78
	验证期	635.52	647.07	1.82	0.71	0.80

地形流域,除了已经考虑的上游水库,其他水利
工程设施相对较少,降雨径流关系比较有规律,故模拟结果较
好。淮河上游地区人类活动对径流过程的改变产生很大影响,特别是对于水利
工程设施频繁使用的流域,无法反映出天然降雨径流的相关性过程。从各指标
中发现整个王家坝径流模拟过程达到一般标准水平。

4 结 语

通过分析淮河上游地区的降雨径流规律,发现淮河上游50%的年降雨量集中在6—8月,故产生季节性

洪水的风险较大。淮南山区径流系数大于淮北平原区径流系数,故淮南地区降雨转换为河道洪水的几率较高,防范突发性大洪水的任务更加艰巨。采用分布式水文模型进行月径流模拟,因受水利设施使用的影响,可以得到一般标准水平的模拟结果。本次所选择的研究区属于径流资料短缺地区,所以建立网格分布式模型充分反映下垫面的已知信息,弥补径流资料短缺的不足之处,并且由降雨等资料驱动模型得到连续的径流模拟过程,然后根据实测径流部分进行模型参数的率定与检验。该模拟计算可为无资料地区或资料短缺地区的水文模拟提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 邓鹏,李致家. 近50年淮河流域年降水量变化分析[J]. 水电能源科学,2013,31(4):14-17. (DENG Peng, LI Zhijia. Variation analysis of annual precipitation events in Huaihe River Basin in past 50 years[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(4): 14-17. (in Chinese))
- [2] LI Zhijia, BAO Hongjun, XUE Cangsheng, et al. Real-time flood forecasting of Huai River with flood diversion and retarding areas[J]. Water Science and Engineering, 2008, 1(2):10-24.
- [3] 包红军,赵琳娜,李致家. 淮河具有行蓄洪区河系洪水预报水力学模型研究[J]. 湖泊科学,2011,23(4):635-641. (BAO Hongjun, ZHAO Linna, LI Zhijia. Hydraulic model for flood forecast of river basin with flood diversion and flood retarding areas of Huaihe River[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(4): 635-641. (in Chinese))
- [4] 李致家,于莎莎,李巧玲,等. 降雨-径流关系的区域规律[J]. 河海大学学报:自然科学版,2012,40(6):597-604. (LI Zhijia, YU Shasha, LI Qiaoling, et al. Regional pattern of rainfall-runoff relationship[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(6): 597-604. (in Chinese))
- [5] 邓鹏,李致家. 3种水文模型在淮河息县流域洪水模拟中的比较[J]. 河海大学学报:自然科学版,2013,41(5):377-382. (DENG Peng, LI Zhijia. Comparison of three hydrological models in flood simulation for Xixian Basin of Huaihe River[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2013, 41(5): 377-382. (in Chinese))
- [6] 王嘉涛,梁树献,徐慧. 淮河流域2000—2009年水势分析[J]. 中国防汛抗旱,2011(1):21-24. (WANG Jiatao, LIANG Shuxian, XU Hui. Analysis of water resources in Huai River Basin between 2000 and 2009[J]. China Flood & Drought Management, 2011(1): 21-24. (in Chinese))
- [7] LI Zhijia, WANG Lili, BAO Hongjun, et al. Rainfall-runoff simulation and flood forecasting for Huaihe Basin[J]. Water Science and Engineering, 2008, 1(3):24-35.
- [8] 余敦先,夏军,张永勇,等. 近50年来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征[J]. 地理学报,2011,66(9):1200-1210. (SHE Dunxian, XIA Jun, ZHANG Yongyong, et al. The trend analysis and statistical distribution of extreme rainfall events in the Huaihe River Basin in the past 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(9): 1200-1210. (in Chinese))
- [9] 高歌,陈德亮,徐影. 未来气候变化对淮河流域径流的可能影响[J]. 应用气象学报,2008,19(6):741-748. (GAO Ge, CHEN Deliang, XU Ying. Impact of climate change on runoff in the Huaihe River Basin[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(6): 741-748. (in Chinese))
- [10] 郝振纯,鞠琴,王璐,等. 气候变化下淮河流域极端洪水情景预估[J]. 水科学进展,2011,22(5):605-614. (HAO Zhenchun, JU Qin, WANG Lu, et al. Prediction of extreme floods in Huaihe River Basin under climate change[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 605-614. (in Chinese))
- [11] 王黎娟,管兆勇,何金海. 2003年淮河流域致洪暴雨的环流背景及其与大气热源的关系[J]. 气象科学,2008,28(1):1-7. (WANG Lijuan, GUAN Zhaoyong, HE Jinha. The circulation background of the extremely heavy rain causing severe floods in Huaihe River valley in 2003 and its relationships to the apparent heating[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2008, 28(1): 1-7. (in Chinese))
- [12] 矫梅燕,金荣花,齐丹. 2007年淮河暴雨洪涝的气象水文特征[J]. 应用气象学报,2008,19(3):257-264. (JIAO Meiyun, JIN Ronghua, QI Dan. Meteorological and hydrological characteristics of flood related torrential rain over Huaihe River Basin in 2007[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(3): 257-264. (in Chinese))
- [13] XU C Y, SINGH V P. A review on monthly water balance models for water resources investigations[J]. Water Resources Management, 1998(12): 31-50.
- [14] SRTM90. International Scientific Data Service Platform [EB/OL]. [2012-09-19]. <http://datamirror.csdb.cn/dem/files/ys.jsp>.
- [15] UMD. 1km Global land cover [EB/OL]. [2010-05-04]. <http://www.geog.umd.edu/landcover/1km-map/meta-data.html>.
- [16] NASA. GLDAS global soils dataset of Reynolds [EB/OL]. [2010-05-04]. <http://www.ngdc.noaa.gov>.
- [17] 肖仓军,周文斌,罗定贵,等. 非点源污染模型:SWAT用户应用指南[M]. 北京:地质出版社,2010:5-10.
- [18] DUAN Q, GUPTA V K, SOROOSHIAN S. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall runoff models[J]. Water Resources Research, 1992, 28(4): 1015-1031.