

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.01.021

新安江模型在乌江独木河流域的应用与改进

郝庆庆¹, 陈 喜^{1, 2}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098 ;

2. 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 : 为了提高新安江模型在喀斯特地区的模拟精度, 以贵州独木河流域为研究对象, 使用新安江模型对该流域进行了径流模拟研究. 根据模拟分析结果和岩溶地区独特的水文特征, 提出了改进新安江模型的 3 种设想, 并对第 1 种设想(3 层蒸散发结构改为 2 层蒸散发结构)进行了验证. 对比分析结果表明, 改进后模拟结果的平均确定性系数比改进前的高 0.02, 改进后的新安江模型可供类似地区的径流分析借鉴.

关键词 : 贵州喀斯特地区, 独木河流域, 径流模拟, 新安江模型, 模型改进

中图分类号 : P333 **文献标志码 :** A **文章编号 :** 1000-1980(2012)01-0109-04

Application and improvement of Xin 'anjiang model in Dumu Watershed of Wujiang River Basin

HAO Qing-qing¹, CHEN Xi^{1, 2}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

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

Abstract : In order to improve the simulation precision of the Xin 'anjiang model in karst areas, the model was used to simulate runoff in the Dumu Watershed for a case study. According to the simulation results and the distinguishing hydrological characteristics of karst areas, three assumptions were proposed to improve the Xin 'anjiang model. The first assumption, that is, that the three-layer evapotranspiration structure is changed to a two-layer one, was verified. The comparison results show that the average coefficient of determination of the improved model was 0.02 higher than that of the unimproved model, and the improved model could be used to analyze runoff in similar regions.

Key words : Guizhou karst area ; Dumu Watershed ; runoff simulation ; Xin 'anjiang model ; model improvement

新安江模型^[1-2]是一个分单元、分水源、分阶段, 具有分布参数的完整的概念性降雨径流模型, 适用于湿润与半湿润地区, 具有概念清晰、结构合理、调参方便和计算精度较高等优点. 模拟计算主要分为蒸散发、产流、分水源和汇流 4 个阶段. 其中, 蒸散发计算采用 3 层蒸散发模型, 产流计算采用蓄满产流模型, 径流划分为地表径流、壤中流和地下径流 3 种水源. 径流划分采用了自由水蓄水库法, 汇流计算中, 地表径流汇流计算采用无因次单位线法, 壤中流和地下径流汇流计算采用线性水库法, 河道汇流计算则采用马斯京根分段连续演算法^[2].

本文的研究对象独木河流域地处西南喀斯特地区. 该区为连片裸露碳酸岩面积最大和生态最脆弱的地区^[3-4], 虽然降水较多, 但时空分布不均且下垫面情况复杂. 根据岩溶地区独特的水文地质特性^[5]以及三水源新安江模型应用于岩溶地区的模拟结果分析, 笔者提出了改进新安江模型的 3 种设想^[6], 并验证了第 1 种改进方法.

收稿日期 : 2011-03-30

基金项目 : 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2006CB403200) ; 教育部科学技术研究重大项目(308012) ; 国家自然科学基金(50679025)

作者简介 : 郝庆庆(1976 —) , 女, 江西永修人, 讲师, 博士研究生, 主要从事流域水文模拟研究. E-mail : haoqq@hhu.edu.cn

1 模型的应用

研究区为贵州省内乌江流域的支流——独木河流域,面积 1485 km².该流域内共有下湾、昌明和六广3个站点.

1.1 日模拟

采用独木河流域 1973—1979 年的水文资料率定日模参数,1980—1983 年的水文资料检验日模参数,缺失的部分资料移用邻近水文特征相似站点的来代替.日模参数^[7]的率定顺序为蒸散发折算系数 K →表层土自由水蓄水容量 S_M 和表层土自由水蓄水库对地下水的出流系数 K_C 与表层土自由水蓄水库对壤中流的出流系数 K_I 的比值 K_C/K_I →地下径流的消退系数 C_C →壤中流的消退系数 C_I .率定蒸散发折算系数 K 时以径流深绝对误差为目标函数^[8],计算公式为

$$\overline{\Delta R} = \left| \frac{\sum_{i=1}^n \Delta R_i}{n} \right| \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

(1)

式中: ΔR_i ——第 i 年径流深的绝对误差; $\overline{\Delta R}$ —— n 年径流深绝对误差的平均值; n ——资料的年数.
率定其他参数时^[9],为减少洪水高水部分误差的作用,突出低水部分的作用,以误差的对数为目标函数,通过使流量过程线对数误差绝对值的平均值最小的方法来优选参数.

$$f(i) = \sum_{j=1}^m \left| \lg [Q(j)/Q'(j)] \right| / \sum_{j=1}^m \left| \lg [Q(j)] \right|$$

(2)

$$\overline{f(i)} = \sum_{i=1}^n f(i) / n$$

(3)

式中: $Q(j)$ ——实测日平均流量; $Q'(j)$ ——计算日平均流量; $f(i)$ ——第 i 年的流量过程线对数误差的绝对值; $\overline{f(i)}$ —— n 年流量过程线对数误差绝对值的平均值.

计算结果见表 1 和表 2.

表 1 率定年份日模模拟结果

Table 1 Daily simulation results in calibration years

年份	降雨量/ mm	水面蒸发 量/mm	实测 径流深/mm	计算 径流深/mm	径流深绝对 误差/mm	径流深相对 误差/%	确定性 系数
1973	1083	718	605.3	612.6	7.3	1.2	0.763
1974	1425	1191	664.0	679.3	15.3	2.3	0.693
1975	1127	1240	396.6	382.7	-13.9	-3.5	0.807
1976	1621	1267	804.3	830.7	26.4	3.3	0.707
1977	1508	938	882.7	875.1	-7.6	-0.9	0.711
1978	1170	1280	455.8	439.4	-16.4	-3.6	0.649
1979	1344	1111	755.9	744.7	-11.2	-1.5	0.798

表 2 检验年份日模模拟结果

Table 2 Daily simulation results in examining years

年份	降雨量/ mm	水面蒸发 量/mm	实测 径流深/mm	计算 径流深/mm	径流深绝对 误差/mm	径流深相对 误差/%	确定性 系数
1981	1117	1004	473.9	464.0	-9.9	-2.1	0.728
1982	1302	1062	565.7	571.2	5.5	1.0	0.654
1983	1279	1023	572.9	579.3	6.4	1.1	0.531

分析表 1 和表 2 结果可知 (a)率定得到的日模参数对多年来说是最优的,对于有些年份的模拟结果很好,而对于另外一些年份的模拟结果相对较差 (b)新安江模型没有考虑随着时间推移下垫面的变化以及人类活动的影响,是造成模拟误差的一个原因 (c)在极值处的预报结果相对较差,计算峰值基本都小于实测峰值,这可能是流域下垫面特性、模型概化、参数率定以及水文资料等因素综合作用及相互影响的结果 (d)个别年份 (如 1983 年)出现计算峰值明显高于实测峰值的现象,这可能是抽水等人为因素造成的 (e)所研究流域面积较小,如果存在不闭合量,不闭合量占总径流量的比例就会比较大,从而对径流量及流量过程线产生

较大影响.

1.2 次洪模拟

次洪模拟收集了 1973 年、1977 年、1982 年和 1983 年这 4 个年份的洪水资料,共选取了 8 场次洪水,其中前 6 场用于率定次洪模型参数,后 2 场用于检验次洪模型参数.次洪模型模拟计算的时段长取为 1 h.对于与时段长无关的参数,使用日模相应的值.与时段长有关的次模参数率定顺序为 $S_M \rightarrow C_S \rightarrow C_I$.在采用次洪模型模拟时,低水点据不多,为突出高水部分的作用,则以误差的绝对值为目标函数^[10].计算公式为

$$S_i = \sum_{j=1}^m \left| [Q(j) - Q'(j)] \right| / \sum_{j=1}^m Q(j)$$

(4)

$$\bar{S} = \sum_i^n S_i / n$$

(5)

式中: S_i ——第 i 场洪水流量过程线误差的绝对值; $\bar{S}$ —— n 场洪水流量过程线误差绝对值的平均值.

计算结果见表 3 和表 4.

表 3 率定场次洪模拟结果

Table 3 Simulation results of floods in calibration years

洪号	降雨量/mm	实测径流深/mm	计算径流深/mm	径流深相对误差/%	洪峰流量相对误差/%	峰现时差/h	确定性系数	$\bar{S}$
19730701	39.7	30.2	30.4	-0.46	-0.95	2	0.959	0.123
19730915	75.2	65.8	60.2	8.47	-6.88	3	0.951	0.129
19770508	43.5	36.0	32.3	10.29	-3.31	0	0.931	0.130
19770619	78.7	75.7	68.7	9.24	1.23	3	0.780	0.229
19770826	47.9	30.0	30.5	-1.72	-7.95	-1	0.943	0.182
19820614	76.7	68.0	59.6	12.36	6.44	0	0.945	0.206

注:峰现时差正值表示滞后,负值表示超前.

表 4 检验场次洪模拟结果

Table 4 Simulation results of floods in examining years

洪号	降雨量/mm	实测径流深/mm	计算径流深/mm	径流深相对误差/%	洪峰流量相对误差/%	峰现时差/h	确定性系数	$\bar{S}$
19830708	23.2	14.9	14.3	4.00	-3.77	1	0.766	0.201
19830910	35.3	20.1	16.5	17.69	2.78	-3	0.763	0.300

从表 3 和表 4 可以看出 (a)洪水过程上涨段陡峭,退水段则上部陡降,下部退水明显变缓,且多处转折,持续时间较长 (b)实际流域下垫面对洪水产汇流过程有坦化作用 (c)洪水过程常呈现出具有较大底水流量的复峰 (d)检验的 2 场洪水代表性不够,洪量都偏小,洪水过程易受外部条件的影响.

2 模型的改进

为了使新安江模型能更适用于具有不均匀下垫面的岩溶地区,根据岩溶地区独特的水文地质特性以及此次模拟结果,对新安江模型在岩溶地区的应用提出了一些改进的设想 (a)由于岩溶流域内覆盖土层一般较薄^[11],植被差,流域实际蒸散发量和缺水容量均小于非岩溶地区,可以忽略由于深根植物散发引起的土壤深层蒸散发,而采用 2 层蒸散发模型进行计算.(b)我国南方大部分岩溶流域气候湿润,土层较薄,下渗能力强,包气带缺水量不大,易为一般的雨量所满足,即达到田间持水量要求,所以在岩溶地区采用蓄满产流方式计算产流量基本符合实际情况.为了使后面分水源及汇流阶段模拟得更加准确,可以将岩溶流域下垫面透水面积划分为非岩溶区和岩溶区,其中岩溶区又分为裸露岩溶区和土壤覆盖岩溶区 2 类.(c)由于补给强度、径流成分和汇流速度等有所不同,被调蓄程度和时程分布不一,将径流划分为地表径流、壤中流、快速地下径流和慢速地下径流,并分别采用不同的方法进行计算^[12].地表径流采用无因次单位线或滞洪演算法,壤中流、快速地下径流和慢速地下径流则分别采用不同的线性水库进行汇流计算,最后线性叠加得到流域出口断面总出流^[13].

根据第 1 种设想,尝试把新安江日模型的 3 层蒸散发结构改为 2 层蒸散发结构.对比分析改进前后的模拟结果可知,除 1974 年确定性系数稍有减小外,其余 10 个年份的确定性系数各有不同程度的提高.由此可以证明,改进后的模型模拟精度较改进前有所提高,所以可以岩溶地区为例对改进后的新安江模型进行进一步的研究和检验.表 5 和表 6 为改进前后的计算结果对比.

表5 率定年份改进前后日模拟结果对比

Table 5 Comparison of daily simulation results of original model and improved model in calibration years						
率定年份	改进前			改进后		
	径流深绝对误差/mm	径流深相对误差/%	确定性系数	径流深绝对误差/mm	径流深相对误差/%	确定性系数
1973	7.3	1.2	0.763	27.6	4.6	0.794
1974	15.3	2.3	0.693	5.6	0.8	0.678
1975	-13.9	-3.5	0.807	-16.5	-4.2	0.823
1976	26.4	3.3	0.707	21.2	2.6	0.748
1977	-7.6	-0.9	0.711	-11.5	-1.3	0.738
1978	-16.4	-3.6	0.649	-22.3	-4.9	0.685
1979	-11.2	-1.5	0.798	-13.3	-1.8	0.822

表6 检验年份改进前后日模拟结果对比

Table 6 Comparison of daily simulation results of original model and improved model in examining years						
检验年份	改进前			改进后		
	径流深绝对误差/mm	径流深相对误差/%	确定性系数	径流深绝对误差/mm	径流深相对误差/%	确定性系数
1980	10.0	1.7	0.783	5.5	0.9	0.807
1981	-9.9	-2.1	0.728	-24.4	-5.2	0.754
1982	5.5	1.0	0.654	-8.5	-1.5	0.679
1983	6.4	1.1	0.531	1.1	0.2	0.538

3 结 语

岩溶地区的实测水文资料相对贫乏,在岩溶流域建立完整精确的流域水文模型存在一定的困难.在目前尚未有较适用模型的情况下,笔者选用新安江模型并根据具体情况对其进行了适当的改进.实例应用结果表明,将新安江模型的3层蒸散发结构改为2层蒸散发结构,不仅能较大地提高该模型在岩溶地区的适用性,而且方法简便并易于实施.

参考文献:

[1] 赵人俊.流域水文模拟[M].北京:水利水电出版社,1984.

[2] 李致家,姚成,汪中华.基于栅格的新安江模型的构建和应用[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(2):131-134.(LI Zhi-jia,YAO Cheng,WANG Zhong-hua.Development and application of grid-based Xin'anjiang model[J].Journal of Hohai University:Natural Sciences,2007,35(2):131-134(in Chinese))

[3] 胡松,梁虹,刘善霞.喀斯特流域洪水研究:以贵州省为例[J].水科学与工程技术,2009(1):36-38.(HU Song,LIANG Hong,LIU Shan-xia.Study on the flood in Karst Drainage Basins:a case study in Guizhou Province[J].Water Sciences and Engineering Technology,2009(1):36-38.(in Chinese))

[4] 杨明德.岩溶流域水文地貌系统[M].北京:地质出版社,2002.

[5] 郝庆庆,陈喜,马建良.南方喀斯特流域枯季退水影响因子分析[J].水土保持研究,2009,16(6):74-77.(HAO Qing-qing,CHEN Xi,MA Jian-liang.Analysis on low-flow recession influencing factors in South Karst Basin[J].Research of Soil and Water Conservation,2009,16(6):74-77.(in Chinese))

[6] 郝庆庆,陈喜,马建良.新安江模型在贵州岩溶地区的改进与应用[J].水电能源科学,2009,27(4):52-54.(HAO Qing-qing,CHEN Xi,MA Jian-liang.Improvement and application of Xin'anjiang model in Guizhou Karst area[J].Water Resources and Power,2009,27(4):52-54.(in Chinese))

[7] 李致家,周轶,哈布·哈其.新安江模型参数全局优化研究[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(4):376-379.(LI Zhi-jia,ZHOU Yi,HAPUARACHCHI H A P.Application of global optimization to calibration of Xin'anjiang model[J].Journal of Hohai University:Natural Sciences,2004,32(4):376-379.(in Chinese))

[8] 王佩兰,赵人俊.新安江模型(三水源)参数的客观优选方法[J].河海大学学报,1989,17(4):65-69.(WANG Pei-lan,ZHAO Ren-jun.Optimization method of calibration of Xin'anjiang model(3 components)[J].Journal of Hohai University,1989,17(4):65-69.(in Chinese))

[9] 瞿思敏,包为民,张明,等.新安江模型与垂向混合产流模型的比较[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(4):374-377.(QU Si-min,BAO Wei-min,ZHANG Ming,et al.Comparison of Xin'anjiang model with vertically-mixed runoff model[J].Journal of Hohai University:Natural Sciences,2003,31(4):374-377.(in Chinese))

[10] CARTER J M,DRISCOLL D G.Estimating recharge using relations between precipitation and yieldin a mountainous area with large variability in precipitation[J].Journal of Hydrology,2006,316:71-83.

[11] LONG A J.Hydrograph separation for karst watersheds using a two-domain rainfall-discharge model[J].Journal of Hydrology,2009,364:249-256.

[12] DAVIS A D, LONG A J, WIREMAN M. KARSTIC: a sensitivity method for carbonate aquifers in Karst terrair[J].Environmental Geology,2002,42:65-72.

[13] LONG A J,PUTNAM L D.Age-distribution estimation for karst groundwater: issues of parameterizationand complexity in inverse modeling by convolutio[J].Journal of Hydrology,2009,376:579-588.