

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.04.004

减小集总式水文模型洪峰相位差的方法

陈福容¹,王冰芯¹,冯艳²,薛梅²,章永鹏¹,李军¹

(1.丹华水利环境技术上海有限公司,上海 200032; 2.松辽水利委员会水文局,吉林 长春 130021)

摘要:采用集总式 NAM 水文模型模拟五道沟水文站以上集水区域的流量过程,选取 1985—2010 年洪峰流量最大的前 9 场洪水率定模型参数。模拟结果表明,洪峰存在系统性的相位提前,且调整模型参数的方式无法减小洪峰相位差。为获得合理的模拟结果,提出 2 种改进模型——错位加权生成面雨量的集总式 NAM 水文模型和同时刻加权生成面雨量的基于子流域的 NAM 水文模型。2 种改进方法计算结果表明,峰值相位差减小,确定性系数和合格率提高。

关键词:集总式水文模型;子流域;NAM;洪峰相位差;五道沟水文站

中图分类号:TV121⁺.1 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2014)04-0301-05

A method for decreasing flood peak phase difference of lumped hydrological model

CHEN Furong¹, WANG Bingxin¹, FENG Yan², XUE Mei², ZHANG Yongpeng¹, LI Jun¹

(1. DHI China, Shanghai 200032, China;
2. Bureau of Hydrology, Songliao Water Resources Commission, Changchun 130021, China)

Abstract: Based on the NAM model, which is a lumped hydrological model, the discharge at the Wudaogou Hydrological Station was simulated. Nine flood events with the largest peak flows from the period of 1985 to 2010 were chosen to calibrate the model parameters. Simulation results show that peak flow appeared in advance systematically, and the flood peak phase difference could not be decreased by adjusting model parameters. In order to obtain reasonable results, two improved models are proposed: one is a lumped NAM hydrological model that does not change model parameters but deals with area precipitation by shifting time weighted, and the other is a NAM hydrological model, which is based on sub-catchments and deals with simultaneously weighted area precipitation. Calculation results of the two improved models show that the flood peak phase difference decreases, and the coefficient of determination and the qualified rate increase.

Key words: lumped hydrological model; sub-catchment; NAM; peak flood phase difference; Wudaogou Hydrological Station

基于集总式的概念水文模型模拟降雨-径流过程的特点是模型输入数据、模型参数都反映了流域的平均情况。当流域面积过大或者支流河道长短不一,即流域不均匀性显著加强时,集总式水文模型需要改进才能适宜模拟降雨-径流过程。通常的做法是划分流域的汇流单元,每一个汇流单元都相当于一个集总式模型,汇流单元出口到流域出口相当于河道汇流。汇流单元可以是子流域,也可以是栅格;河道汇流演算根据河道断面数据选择运用水文学法或者水动力学法^[1-14]。

笔者以五道沟水文站以上集水区域为例,建立基于集总式的概念水文模型——NAM 水文模型模拟降雨-径流过程,发现计算洪峰存在系统性的相位提前。为改善计算洪峰的相位精度,笔者拟采用 2 种方法对 NAM 水文模型进行改进,一种是处理面雨量但不改变模型结构,另一种是不改变面雨量建立基于子流域的概念水文模型 NAM 模型。

1 研究区域概况

五道沟水文站为辉发城下游控制站,集水面积为 12 391 km²,流域形状呈椭圆形,降雨主要受台风、南方气旋、倒槽(华北、河套)、蒙古低压、冷涡等大型天气系统影响。以五道沟水文站为例,多年平均降雨量为 788.8 mm,历年汛期平均降雨量为 557.2 mm,占年降雨量的 70.6%。径流年际及季节变化很大,洪峰退水较长。

2 流域出口流量计算方法

2.1 NAM 水文模型简介

NAM 水文模型是一个集总式的确定性概念模型,对流域内降雨产流和汇流进行模拟。它将流域内储水概化为积雪储水层、地表储水层、浅层(也称为根区)储水层和地下水储水层 4 个部分,分别模拟融雪径流、地表径流、壤中流和地下水径流。NAM 模型的参数如下: $U_{\max}$ 为地表储水层最大含水量,通常取值范围为 15~25 mm; $L_{\max}$ 为根区储水层最大含水量,通常取值范围为 50~250 mm; C_{QOF} 为坡面流系数,取值范围为 0~1,其影响峰值流量的大小,为敏感参数; $C_{\text{K1},2}$ 为坡面流汇流时间常数,通常取值范围为 3~50 h; C_{KIF} 为壤中流汇流时间常数,通常取值范围为 50~1 000 h; C_{KBF} 为基流汇流时间常数,通常取值范围为 500~5 000 h; T_{OF} 、 T_{IF} 、 T_{G} 分别为产生坡面流、壤中流、地下水补给时所需的最小土壤含水率,取值范围均为 0~1。 $U_{\max}$ 和 $L_{\max}$ 为影响总水量平衡的 2 个参数,其中 $L_{\max}$ 为敏感参数; $C_{\text{K1},2}$ 、 C_{KIF} 和 C_{KBF} 分别为影响坡面流、壤中流和基流汇流速度和流量过程线形状的参数,其中 $C_{\text{K1},2}$ 为敏感参数。

2.2 原方法:同时刻加权生成面雨量的集总式 NAM 水文模型

面雨量的处理方式:以雨量站的空间分布和子流域边界划分泰森多边形,各雨量站降雨量 P_i 控制的泰森多边形面积 A_i 与流域总面积 A 的比例为该雨量站的权重系数 α_i ,该流域的面雨量 P_t 为各雨量站同时刻加权,即

$$P_t = \sum_{i=1}^n P_{i,t} \alpha_i \tag{1}$$

式中: P_t —— t 时刻的面雨量; n ——雨量站数量; $P_{i,t}$ —— t 时刻第 i 个雨量站的点雨量; α_i ——第 i 个雨量站的权重系数。

该方法的特点是:(a)基于概念水文模型;(b)一个子流域、一个面雨量序列、一个面蒸发序列、一套参数;(c)泰森多边形同时刻加权生成一个面雨量序列。该方法在空间差异性不大的流域便于应用,而且应用效果较好,但是在空间差异性较大的流域需要改进使用。

2.3 改进方法一:错位加权生成面雨量的集总式 NAM 水文模型

面雨量的处理方式:将流域划分为 20 个子流域(图 1),利用式(1)计算每个子流域的面雨量 $P_{j,t}$ 。各子流域的面积 A_j 与流域总面积 A 的比例为该子流域的权重系数 α_j ,该流域的面雨量 P_t 为各子流域面雨量错位加权,即

$$P_t = \sum_{j=1}^m P_{j,t-t_j} \alpha_j \tag{2}$$

式中: m ——子流域数量; $P_{j,t-t_j}$ —— t 时刻第 j 个子流域的面雨量; α_j ——第 j 个子流域的权重系数(表 1 第 4 列); t_j ——第 j 个子流域的河道汇流延迟时间(表 1 第 6 列)。如果 t_j 取 0,即子流域编号为 1,该子流域出口到流域出口的距离为 0 m;如果 t_j 取最大值,即子流域编号为 19、20,该子流域出口到流域出口的距离最长。

该方法的特点是:(a)基于概念水文模型;(b)一个子流域计算产汇流、划分多个子流域计算一个改进的面雨量序列、一个面蒸发序列、一套参数;(c)基于

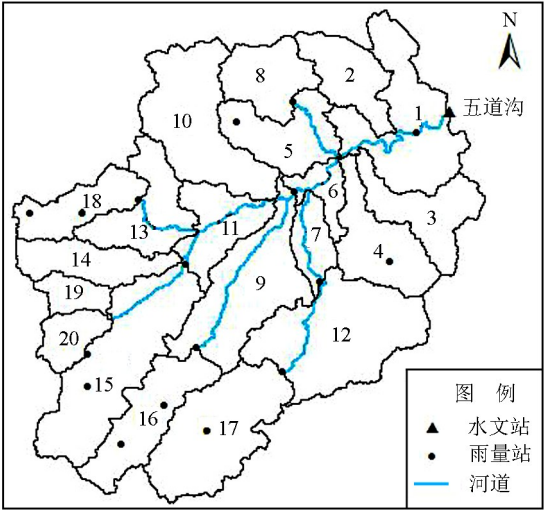


图 1 子流域划分示意图

Fig. 1 Sketch map of division of sub-catchments

子流域汇流单元汇流时间的差异性,采用泰森多边形同时刻加权生成多个子流域的面雨量,多个子流域的面雨量按照子流域出口到流域出口的河道汇流时间差异性,时间上错位加权生成一个面雨量序列。该方法是原方法在空间差异性较大的流域的改进使用。

表 1 子流域至流域出口的汇流距离及河道汇流时间

Table 1 Routing distance from sub-catchment to catchment outlet and routing time					
子流域编号	子流域面积/km ²	流域总面积/km ²	权重系数	汇流距离/m	河道汇流延迟时间/h
1	999	12 733	0.08	0	0
2	465	12 733	0.04	21 134	7
3	546	12 733	0.04	44 994	14
4	607	12 733	0.05	48 664	15
5	564	12 733	0.04	51 430	16
6	220	12 733	0.02	51 430	16
7	272	12 733	0.02	67 752	21
8	471	12 733	0.04	76 681	24
9	1 081	12 733	0.08	76 822	24
10	1 097	12 733	0.09	80 887	25
11	590	12 733	0.05	80 887	25
12	976	12 733	0.08	101 358	32
13	683	12 733	0.05	111 875	35
14	442	12 733	0.03	122 515	38
15	1 178	12 733	0.09	122 905	38
16	622	12 733	0.05	137 773	43
17	981	12 733	0.08	138 207	43
18	481	12 733	0.04	139 865	44
19	202	12 733	0.02	153 976	48
20	256	12 733	0.02	153 976	48

注:河道汇流时间是按照河道汇流距离除以河道平均流速求得。经过多次试算河道平均流速求得面雨量,根据比较场次洪水的计算结果,最终确定河道平均流速为 0.89 m/s。

2.4 改进方法二:同时刻加权生成面雨量的基于子流域的 NAM 水文模型

以中国科学院大学国际科学数据服务平台 (<http://datamirror.csdb.cn/index.jsp>) 提供的数字高程模型 (30 m×30 m DEM) 为基础划分子流域,生成河道 (图 1),采用改进方法二建立基于子流域的 NAM 水文模型,基于子流域的 NAM 水文模型特点如下:(a) 多个子流域,每个子流域相当于 1 个集总式模型,每个子流域采用 NAM 水文模型计算产汇流,计算结果为每个子流域出口的流量;(b) 每个子流域出口到流域出口的河道汇流采用马斯京根法计算;(c) 泰森多边形生成各个子流域的面雨量序列和面蒸发序列,计算面雨量的过程与原方法相同;(d) 基于概念水文模型——NAM 模型。

3 计算结果及比较分析

3.1 计算结果

采用原方法建立集总式 NAM 水文模型,选取五道沟水文站 1985—2010 年序列中洪峰流量最大的前 9 场洪水率定该集总式 NAM 水文模型的参数,率定过程结合自动率定及临近流域的参数取值手动调整参数使之合理。参数取值如下: $U_{\max}=12\text{ mm}$, $L_{\max}=105\text{ mm}$, $C_{\text{QOF}}=0.65$, $C_{\text{K1},2}=31\text{ h}$, $C_{\text{KIF}}=500\text{ h}$, $C_{\text{KBF}}=1\,500\text{ h}$, $T_{\text{OF}}=0.05$, $T_{\text{IF}}=0.2$, $T_{\text{G}}=0.9$ 。

采用改进方法一建立集总式 NAM 水文模型,模型参数与原方法取值相同,计算相同场次的洪水,目的是为了研究仅改变面雨量带来的结果变化。

采用改进方法二建立基于子流域的 NAM 水文模型,NAM 模型参数与原方法取值相同,每个子流域出口到流域出口的河道汇流采用马斯京根法计算。马斯京根法的 2 个参数 K 和 X ,其中 K 为蓄量常数,具有时间因次,取值是按照河道平均流速 0.89 m/s 求得, X 为比重因子 (取值为 0.5),流速和 X 的取值为率定结果。计算相同场次的洪水,目的是为了研究仅改变模型结构带来的结果变化。

3.2 比较分析

按照 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》^[15] 制定的水文模型的评价标准,主要指标包括:径流深相

对误差、确定性系数、峰值相对误差、峰值相位差和合格率。率定目标是径流深相对误差小于 20%,确定性系数大于 0.5,峰值相对误差小于 20%,峰值相位差绝对值小于 24 h,合格率大于 60%。3 种方法的计算结果比较见表 2、表 3。

表 2 3 种方法各场次洪水评价指标比较
Table 2 Comparison of flood evaluation indices using three methods

开始日期	结束日期	方法	径流深相对误差/%	确定性系数	峰值相对误差/%	峰值相位差/h	是否合格
1985-07-31	1985-08-30	原方法	5.30	0.41	-6.09	-31	×
		改进方法一	8.90	0.83	-7.53	-8	✓
		改进方法二	4.19	0.79	-8.36	-3	✓
1986-07-29	1986-08-12	原方法	-15.50	0.41	-4.44	-39	×
		改进方法一	-16.70	0.90	-8.90	-22	✓
		改进方法二	-15.47	0.91	-7.81	-12	✓
1989-07-08	1989-08-10	原方法	3.40	0.85	4.57	-35	×
		改进方法一	-0.20	0.92	-2.07	-4	✓
		改进方法二	6.06	0.85	0.88	-1	✓
1991-07-06	1991-08-18	原方法	-7.80	0.82	14.99	-28	×
		改进方法一	-6.00	0.86	5.60	1	✓
		改进方法二	-4.90	0.74	-11.01	7	✓
1994-08-06	1994-08-25	原方法	-1.00	0.48	-5.43	-30	×
		改进方法一	4.60	0.90	-15.13	0	✓
		改进方法二	0.76	0.82	-23.70	5	×
1995-07-14	1995-08-14	原方法	-5.90	0.33	-4.34	-30	×
		改进方法一	-6.90	0.96	-18.85	1	✓
		改进方法二	-9.66	0.91	-19.98	5	✓
1996-06-13	1996-09-11	原方法	9.80	0.84	-9.43	-28	×
		改进方法一	9.90	0.81	-25.49	0	×
		改进方法二	10.16	0.75	-28.88	2	×
2005-06-17	2005-09-19	原方法	-5.70	0.79	-11.32	-52	×
		改进方法一	-4.20	0.86	-9.84	-24	✓
		改进方法二	-6.36	0.82	-13.85	-17	✓
2010-08-19	2010-09-11	原方法	-12.50	0.76	-12.14	-22	✓
		改进方法一	-12.00	0.83	-15.72	2	✓
		改进方法二	-5.06	0.78	-12.40	6	✓

表 3 3 种方法 9 场洪水评价指标的平均值比较
Table 3 Comparison of average values of evaluation indices in nine flood events using three methods

方法	场数	径流深相对误差/%	确定性系数	峰值相对误差/%	峰值相位差/h	合格率/%
原方法	9	-3.32	0.63	-3.74	-33	11.11
改进方法一	9	-2.51	0.87	-10.88	-6	88.89
改进方法二	9	-2.25	0.82	-13.90	-1	77.78

采用同时刻泰森加权生成面雨量的方式建立集总式 NAM 水文模型,通过自动率定调整 NAM 水文模型的参数无法改善计算洪峰的相位,计算洪峰存在系统性的相位提前。采用 2 种改进方法改善计算洪峰的相位,从表 2 和表 3 中的数据可以看出,改进方法一和改进方法二的峰值相位差都比原方法小,确定性系数和合格率都比原方法大。由此可见,2 种改进方法都能够提高计算洪峰的精度。

4 结 论

- a. 通过时间错位加权处理面雨量可以减小集总式水文模型在五道沟以上集水区域的计算洪峰相位差。
- b. 建立基于子流域的水文模型可以减小集总式水文模型在五道沟以上集水区域的计算洪峰相位差。
- c. 在山区性源头子流域可以采用马斯京根法进行洪水计算,如果在平原河网地区则需要搜集详细的断面数据,建立河道水动力学模型,计算河道汇流。

参考文献:

[1] 安婷. 基于 DEM 的集总式水文预报模型产流结构生成[J]. 水文,2012,32(6):1-5. (AN Ting. Generation of lumped watershed hydrologic model runoff-yield structure based on DEM [J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(6):1-5. (in Chinese))

[2] 林凯容,郭生练,张文华,等. 分布式水文概念模型率定方案比较研究[J]. 水文,2006,26(2):1-5. (LIN Kairong, GUO Shenglian,ZHANG Wenhua,et al. Comparative study on calibration strategies for a distributed hydrologic conceptual model [J]. Journal of China Hydrology,2006,26(2):1-5. (in Chinese))

[3] 芮孝芳,蒋成煜,张金存. 流域水文模型的发展[J]. 水文,2006,26(3):22-26. (RUI Xiaofang, JIANG Chengyu, ZHANG Jincun. Development of watershed hydrologic models [J]. Journal of China Hydrology,2006,26(3):22-26. (in Chinese))

[4] 熊立华,郭生练,田向荣. 基于 DEM 的分布式流域水文模型及应用[J]. 水科学进展,2004,15(4):517-520. (XIONG Lihua, GUO Shenglian, TIAN Xiang rong. DEM based distributed hydrological model and its application [J]. Advances in Water Science,2004,15(4):517-520. (in Chinese))

[5] 王贵作,任立良,王斌. 基于栅格的分布式流域水文模型的构建与应用[J]. 水电能源科学,2008,26(6):17-20. (WANG Guizuo,REN Liliang,WANG Bin. Grid based distributed watershed hydrological modelling and its application in cold and arid regions [J]. Water Resources and Power,2008,26(6):17-20. (in Chinese))

[6] 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.

[7] CHENG Genwei, YU Zhongbo, LI Changsheng, et al. Integrated simulation of runoff and groundwater in forest wetland watersheds [J]. Water Science and Engineering, 2008, 1(3): 1-15.

[8] 李丹,张翔,张扬,等. 水文模型参数敏感性的区间分析[J]. 水利水电科技进展,2011,31(1):29-32. (LI Dan, ZHANG Xiang,ZHANG Yang,et al. Application of interval analysis of sensitivity of parameters of hydrologic model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2011,31(1):29-32. (in Chinese))

[9] BAO Hongjun, WANG Lili, LI Zhijia, et al. Hydrological daily rainfall-runoff simulating with BTOPMC model and comparison with Xin'anjiang model[J]. Water Science and Engineering, 2010, 3(2): 121-131.

[10] 芮孝芳,梁霄. 水文学的现状与未来[J]. 水利水电科技进展,2011,31(2):1-4. (RUI Xiaofang, LIANG Xiao. Present situation and future of hydrology [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2011,31(2):1-4. (in Chinese))

[11] XUE Lijuan, LI Lijiao, ZHANG Qi. Hydrological behaviour and water balance analysis for Xitiaoqi catchment of Taihu Basin [J]. Water Science and Engineering, 2008, 1(3): 44-53.

[12] GU Huanghe, YU Zhongbo, YANG Chuanguo, et al. Study on the large scale hydrologic simulation using multi-satellite precipitation[J]. Water Science and Engineering, 2010, 3(4): 418-430.

[13] RUI Xiaofang, LIU Ningning, LI Qiaoling, et al. Present and future of hydrology[J]. Water Science and Engineering, 2013, 6(3):241-249.

[14] 刘晓帆,任立良,徐静,等. 老哈河流域地表植被覆盖对于干旱的响应[J]. 河海大学学报:自然科学版,2012,40(2):134-140. (LIU Xiaofan,REN Liliang,XU Jing,et al. Vegetation response to meteorological drought in Laohahe Basin [J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2012,40(2):134-140. (in Chinese))

[15] GB/T 22482—2008 水文情报预报规范[S].