

小流域洪水预报新安江模型参数 优选方法及应用研究^{*}

陈洋波, 朱德华

(中山大学水资源与环境系, 广东 广州510275)

摘 要: 针对小流域洪水降雨强度大、历时短、汇流速度快的特点, 提出了一种应用新安江模型进行小流域洪水预报及模型参数优化率定的方法。该方法以最小二乘法作为模型参数优选的准则, 并采用逐次渐进网格寻优法优选模型参数。由于该方法同时优选所有模型参数, 不需要对实测径流进行分割, 从而可避免人工分割径流而出现的参数率定误差。最后, 按照该方法, 应用二水源、三水源新安江模型对广东省黄京塘流域进行了研究计算, 优选出了模型参数。模型验证结果表明, 二水源新安江模型效果比三水源新安江模型好。

关键词: 洪水预报, 新安江模型, 参数优选

中图分类号: P338⁺. 8; P333. 2 文献标识码: A 文章编号: 0529-6579 (2005) 03-0093-04

小流域洪水具有降雨量集中、强度大、时间短、汇流速度快、汇流主要呈现山坡汇流的特征, 因此小流域洪水往往出现峰高量大, 历时短的特点, 给小流域洪水预报带来了较大困难。

洪水预报一般采用降雨—径流模型(Rainfall-Runoff Model)。国内外目前使用的降雨径流模型主要是集总型模型, 如爱尔兰的SLM模型和SMAR模型, 意大利的CLS模型和ARNO模型, 美国的斯坦福4号模型和HEC模型, 日本的水箱模型和我国的新安江模型等。分布式物理水文模型是近年来出现的一类新模型, 但在洪水预报方面的应用尚没有进入成熟实用期。集总型模型目前仍然是主流的洪水预报模型。

新安江模型是一种广泛使用的降雨径流模型, 在我国的南方湿润地区应用取得了较好的效果。新安江模型又分成二水源新安江模型、三水源新安江模型和四水源新安江模型, 不同水源新安江模型的不同在于对径流的划分上。随着水源的增加, 模型结构越来越复杂, 参数率定越来越困难。在新安江模型汇流参数率定中, 一般将实测径流过程按照水源划分的方法进行分割, 由于没有标准的径流分割方法, 在进行径流分割时任意性较大, 并可能引起模型参数率定的误差。水源划分得越细, 这种任意性引起的误差就会越大, 由于参数的误差而引起的模型误差也会越来越大, 就可能会出现水源划分越多而模型精度反而下降的情况, 即二水源新安江模

型反而比三水源新安江模型精度更低的情况。

为了降低新安江模型参数率定因径流分割引起的误差, 本文提出了一种应用新安江模型进行小流域洪水预报及进行参数优化率定的方法。该方法在进行模型参数率定时, 不需要对实测径流进行人为分割, 因而避免了由于人为分割径流而出现的误差。分别应用二水源、三水源新安江模型对广东省的一个小流域黄京塘流域进行了研究计算, 发现二水源新安江模型效果较好。

1 方法介绍

新安江模型包括蒸散发计算, 产流量计算, 流域汇流计算和河道汇流计算四部分, 关于模型各部分的详细介绍, 可参阅文献[1]。本文仅对各部分作简要介绍, 以便于说明参数优化率定的方法及对结果进行分析比较。

1.1 蒸散发计算

在计算小流域暴雨洪水时, 流域在整个洪水期间基本都处于蓄满状态, 仅在暴雨开始后的若干小时内处于未蓄满状态。本文认为在进行小流域洪水预报计算时, 按一层蒸发模式计算流域蒸发量已足够, 计算公式如下:

$$E = E_m \left(\frac{W}{W_m} \right) \quad (1)$$

式中, E 为流域蒸发量, W 为流域平均蓄水量,

^{*} 收稿日期: 2004-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50479033, 50179019), “985工程”GIS与遥感的地学应用科技创新平台(105203200400006)

作者简介: 陈洋波(1964年生), 男, 教授, E-mail: peesych@zsu.edu.cn

W_m 为流域平均蓄水容量, E_m 为陆面蒸发率, 为模型参数, 可根据流域观测值确定。

1.2 产流量计算

新安江模型在进行产流量计算时, 采用的是蓄满产流模式, 即降雨首先补充流域降水的不足, 流域蓄满后才产生径流, 考虑到流域各处的蓄水容量各不相同, 提出如下的蓄水容量分布函数

$$X = 1 - (1 - \frac{W_m}{W_{max}})^b \tag{2}$$

式中, W_{max} 为流域最大蓄水容量, X 为蓄水容量小于 W_m 的面积比例, b 为反映流域蓄水容量分布的指数。由 (2) 求出流域平均蓄水容量为

$$W_m = \frac{W_{max}}{1 + b} \tag{3}$$

设降雨量为 P , 则产流计算公式为

$$\begin{cases} R = 0, & \text{当 } P - E \leq 0 \\ R = P - E - W_m + W + W_m (1 - \frac{P - E + A}{W_{max}})^{1+b}, & \text{当 } P - E + A < W_{max} \\ R = P - E - (W_m - W), & \text{当 } P - E + A \geq W_{max} \end{cases} \tag{4}$$

式中, R 为产流量, A 为流域蓄水量为 W 时相应的中间变量, 计算式如下

$$A = W_{max} [1 - (1 - \frac{W}{W_m})^{\frac{1}{1+b}}] \tag{5}$$

1.3 径流划分

产流总量 R 将进一步划分成不同类型, 相应于二、三、四水源, 其划分各不相同。四水源模型过于复杂, 本文不作研究。

二水源新安江模型将径流划分成地表径流 (R_s) 和地下径流 (R_g) 两部分, 地下径流由下渗产生。地表及地下径流计算公式为

$$\begin{cases} R_g = f_c \Delta t \\ R_s = R - R_g \end{cases} \tag{6}$$

式中, f_c 为稳渗率, 是模型参数, Δt 为时段长度。

三水源新安江模型将径流划分成地表径流 (R_s)、壤中流 (R_{ss}) 和地下径流 (R_g), 计算公式如下:

$$\begin{cases} R_g = f_{cb} \Delta t \\ R_{ss} = f_{ca} \Delta t \\ R_s = R - R_g - R_{ss} \end{cases} \tag{7}$$

式中, f_{cb} 为地下水入渗率, f_{ca} 为壤中流下渗率, 为模型参数。

1.4 流域汇流计算

在新安江模型中, 没有提出自身的流域汇流计算方法, 一般是利用单位线法, 在本文计算中, 采

用 Todini 等^[2] 提出的一个数值算法进行汇流计算, 其公式如下:

$$Q_{t+\Delta}^i = \frac{2k - \Delta t}{2k + \Delta t} Q_t^i + \frac{\Delta t}{2k + \Delta t} (Q_{t+\Delta}^{i-1} + Q_t^{i-1}) \tag{8}$$

式中, $Q_{t+\Delta}^i$ 为 $t + \Delta t$ 时段 i 水库的计算出流, $i = n$ 时的流量即为流域出口流量。 Q_0^0 为流域的产流量, 即 $Q_0^0 = R$, 为上式计算的起始条件, 经过 n 次计算可由流域产流量求得流域出口流量过程。 R , n 为模型参数。

在本文计算中, 对地表径流、壤中流和地下径流的汇流计算, 均采用式 (8) 进行计算, 因此计算方法相同但参数值不同。

2 模型参数的优化率定

模型参数分成蒸散发参数、产流参数和汇流参数 3 类, 本文提出一种对模型参数率定的优选方法, 其原则是将蒸散发参数、产流参数和汇流参数分开率定, 而在率定汇流参数时, 不进行径流分割, 从而避免人为分割而带来的误差。

2.1 蒸散发参数率定

蒸散发模型只有一个参数, 即陆地蒸发率 E_m , 根据流域实际观测的水面蒸发率直接确定。

2.2 产流参数率定

产流参数为 b 、 W_m , 对二水源模型增加一个参数 f_c , 而对三水源模型增加两个参数 f_{ca} 、 f_{cb} 。本文对 b 、 W_m 和 f_c 、 f_{ca} 、 f_{cb} 分开率定, 首先率定 b 、 W_m , 其数值对所有水源的新安江模型是相同的。本文利用最小二乘法率定参数 b 和 W_m , 其优化准则为

$$F = \min \sum_{k=1}^L (V_k - \hat{V}_k)^2 \tag{9}$$

式中, k 为用于参数率定的洪水场次, L 为用于参数率定的洪水总场次, V_k 为第 k 场洪水的总水量, $\hat{V}_k$ 为基于参数 b 、 W_m 的模型计算的第 k 场洪水的总水量, 其与 b 、 W_m 的值有关。

公式 (9) 是一个二变量的无约束寻优问题。模型参数率定, 国内外一般采用优化方法, 如李致家等^[3], 张洪刚等^[4], Madsen 等^[5]。本文提出一种逐次渐进网格寻优法求解, 计算的基本思路是首先根据经验找出 b 、 W_m 的上下限, 将 b 、 W_m 在其上下限之间取若干个离散值 b_i 、 W_{mj} , 对 b_i 、 W_{mj} 形成的各组值, 计算其相应的 F 值, 取使 F 值最小的 b_{i0} 、 W_{mj0} 为初选值, 在此基础上, 再分别以 b_{i0} 、 W_{mj0} 为中心, 取若干个 b 、 W_m 值重新进行上述计

算, 求出一对改进的 b 、 W_m 值。如此重复计算, 直至求出一组满意的 b 、 W_m 为止。

对参数 f_c 、 f_{ca} 、 f_{cb} 的率定, 需要对实际洪水过程划分地表径流、地下径流和壤中流, 分别确定出地表径流过程、壤中流过程和地下径流过程, 再进行参数率定, 而这些径流的划分, 由于没有严格的科学划分方法, 在实际划分中存在着人工分割带来的误差, 为了避免这种误差对模型参数率定的影响, 本文对用于参数率定的洪水过程不再分割径流, 而采用集中优选法, 在汇流参数率定时一起率定参数 f_c 、 f_{ca} 和 f_{cb} 。

2.3 汇流参数率定

汇流参数为 n 、 k , 本文仍采用最小二乘法率定, 其优选准则如下:

$$F = \min_{k=1}^L \sum_{t=1}^T (Q_{k,t} - Q_{k,t})^2 \tag{10}$$

式中, $Q_{k,t}$ 为第 k 场洪水 t 时段实测流量, $Q_{k,t}$ 为第 k 场洪水 t 时段按模型计算的流量, 与模型参数有关。对于二水源模型, 与 f_c 、地表径流汇流参数 n_s 、 k_s 及地下径流汇流参数 n_g 、 k_g 有关, 对于三水源模型, 则与 f_c 、 f_{ca} 、 f_{cb} , 汇流参数 n_s 、 k_s 、 n_{ss} 、 k_{ss} 、 n_g 、 k_g 有关。

对于二水源模型, 参数优选是一个 5 参数的无约束寻优问题, 对于三水源模型, 则是一个 8 参数的无约束寻优问题。仍然利用上述介绍的逐次渐进的网格法进行参数优选。三水源模型参数优选的计算工作量可能会比较大。

3 研究结果

采用广东省的一个小流域黄京塘流域作为研究实例。该流域面积 595 km², 植被较好, 人类活动影响较小, 是一处较为理想的研究流域。流域内有 8 个雨量站, 在流域出口有一个流量站, 均可实现自动测报, 近年来的资料较为齐全。在本文研究中, 从过去的记录资料中摘录了 4 场暴雨洪水, 用其中 3 场洪水进行模型参数率定, 而另外 1 场进行模型验证, 计算中采用的流域降雨过程为流域各雨量站的算术平均值。

根据观测资料, 黄京塘流域水面蒸发率为 2 mm/d, 本次计算采用 1 h 为计算时段, 故 E_m 为 0.083 mm。

根据 b 的取值范围为 0.2~0.4。 W_m 为 60~150 mm, 在本次计算中, 将 b 在其范围内取 100 个值, W_m 在其取值范围内取 50 个值, 采用网格优选法直接寻优, 一次求出 b 、 W_m 的最优值, 经过

计算求得参数分别是 $b=0.31$, $W_m=97\text{mm}$ 。

对二水源汇流参数采用网格法进行率定, 经过二轮计算, 得到参数优选值分别为: $f_c=1.3$, $n_s=2.1$, $k_s=3.1$, $n_g=5$, $k_g=2.5$ 。

对三水源汇流参数进行率定, 仍采用网格法。经过 2 轮优选计算, 求出模型参数的最优值分别为: $f_{ca}=0.7$, $f_{cb}=0.2$, $n_s=2$, $k_s=3$, $n_g=1$, $k_g=5$, $n_{ss}=5$, $k_{ss}=2$ 。

三水源参数率定时间较长, 在同一台 PC 机上所花时间为 180 min, 是二水源模型参数率定所花时间的 15 倍, 但所花时间尚在可接受范围内。

对不同水源的新安江模型, 利用一场实测洪水对模型进行验证计算, 结果如图 1。

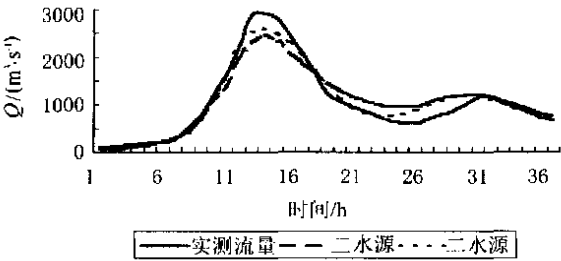


图1 新安江模型不同水源验证结果
Fig 1 Results of Xin'anjiang model validation using two and three components

4 结 论

(1) 从图 1 结果看出, 二水源新安江模型验证效果较好, 故从本文计算结果来看, 在小流域洪水预报中二水源新安江模型效果比三水源新安江模型好。这一结论的合理解释是由于模型参数越多, 模型结构本身的误差相应增加, 这验证了国外一些学者的看法, 即并不是模型结构越复杂, 参数越多, 效果就越好, 一个参数适量, 结构尽量简化的模型, 其实际应用效果更佳。

(2) 对不同水源模型参数进行分析发现, 二水源和三水源新安江模型的地表径流汇流参数基本一致, 而地表径流是洪水径流的主体, 由此也说明, 在进行小流域洪水预报时, 二水源新安江模型就可以满足需要, 无需应用三水源新安江模型。

(3) 从模型验证结果看, 二水源新安江模型的平均预报误差为 8.55%, 达到优良效果, 峰现时间与实测一致, 洪峰流量比实测小 14.4%, 达到工程实用要求。而三水源新安江模型的平均预报误差为 14.6%, 因此本文率定的小流域洪水预报二水源新安江模型是可行的, 这也证明本文提出的模型优选方法是合理的。

参考文献:

[1] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984: 103—180

[2] TODINI E. ARNO rainfall-runoff model[J]. Journal of Hydrology, 1996, 175(1—4): 339—382.

[3] 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.

[4] 张洪刚, 郭生练, 刘攀等. 概念性水文模型多目标参数自动优选方法研究[J]. 水文, 2002, 22(1): 12—16.

[5] MADSEN H. Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives [J]. Journal of Hydrology, 2000, 235(3): 276—288.

Optimal Parameter Calibration Method and Its Application of Xin'anjiang Model for Small Basin Flood Forecasting

CHEN Yang bo, ZHU De hua

(Department of Water Resources and Environment, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: According to the characteristics with small basin flood with high precipitation rate, short time elapse and rapid routing speed, a method for small basin flood forecasting by using Xin'anjiang Model, and the way for calibrating model parameters optimally was presented. This method minimizes the squared flood simulation difference and employs the successive grid search technique to find the optimal model parameter values. As this method calibrates all the model parameters in one procedure, and there is no need to separate the runoff, it can reduce the error caused by model parameter calibration due to intentionally separate runoff. The Huangjingtang basin in southern China is used as the case study, and the model parameters are derived by using the method presented in this paper. The model validation results show that the flood simulated results of two component Xin'anjiang Model is better than that of three component Xin'anjiang Model.

Key words: flood forecasting; Xin'anjiang Model; optimal parameter calibration