

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.01.009

栅格型新安江模型的参数估计及应用

姚 成¹,纪益秋²,李致家¹,刘开磊¹

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098 ;2. 南通市港闸区幸福街道办事处,江苏 南通 226012)

摘要:根据新安江模型与一维扩散波模型理论,构建了基于栅格的新安江(Grid-Xin'anjiang)模型.该模型以 DEM 栅格为计算单元,将每个单元的产流量划分为地表径流、壤中流以及地下径流 3 种水源,最后再根据栅格间的汇流演算次序,利用扩散波汇流方法依次将各种水源演算至流域出口.模型在进行产汇流计算时,考虑了栅格之间的水量交换以及河道排水网络的影响.以流域地貌特征、土壤及植被类型等下垫面条件为基础,研究了模型参数的估计方法,并对其进行了验证.将模型用于安徽省屯溪流域的洪水模拟,取得了良好的应用效果.

关键词:栅格型新安江模型 新安江模型 扩散波模型 参数估计 洪水模拟 屯溪流域

中图分类号:P333.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2012)01-0042-06

Parameter estimation and application of grid-based Xin'anjiang model

YAO Cheng¹, JI Yi-qiu², LI Zhi-jia¹, LIU Kai-lei¹

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

2. Xingfu Street Agency in Gangzha District of Nantong City, Nantong 226012, China)

Abstract:Based on the theory of the Xin'anjiang model and one-dimensional diffusion wave model, the grid-based Xin'anjiang model (the Grid-Xin'anjiang model) was developed. This model regarded the grid DEM as the computational element, and the generated runoff of each element was divided into three components, the surface runoff, interflow, and groundwater runoff, which were routed using the cell-to-cell diffusion wave flow routing method according to the computational order of each grid cell in the DEM. During the calculation of the runoff generation and runoff concentration, the water exchange between grids and the influence of the river drainage network were taken into consideration. Based on the underlying surface conditions, including the topography, and the types of soil and vegetation in the study basin, a method for parameter estimation of the model was proposed and verified. The model was applied to the Tunxi Basin in Anhui Province for flood simulation and produced favorable results.

Key words: grid-based Xin'anjiang model ; Xin'anjiang model ; diffusion wave model ; parameter estimation ; flood simulation ; Tunxi Basin

基于栅格的分布式水文模型是目前水文研究的热点之一.1969 年,Freeze 等^[1]发表的‘一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝图(FH69 蓝图)’被认为是分布式水文模型研究的开始.过去受制于技术的限制,许多流域信息、特征不能及时准确地获得,地理信息无法及时准确地获得和使用,使得分布式水文模型发展缓慢.而数字高程模型(DEM)的出现为分布式水文模型的构建创造了条件,分布式水文模型取得了飞速发展.比较具有代表性的分布式和半分布式流域水文模型有 SHE^[2],TOPKAPI^[3]和 TOPMODEL^[4]模型等.随着信息、遥感、计算机等技术的发展,基于 DEM 的分布式水文模型以其充分考虑水文要素和各种参数空间变化的特点正成为水文模型的发展趋势,而新安江模型^[5]作为一个半分布式的概念性模型,自研制以来,就得到了广大学者的认同,在中国的洪水预报中也得到了广泛成功的应用,因此研究栅格型新安江模型具有一定的

收稿日期:2011-01-12

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2010B00114) 国家博士点基金(20090094110005)

作者简介:姚成(1982—),男,江苏扬州人,讲师,博士,主要从事水文模型与水文预报研究. E-mail :yaocheng@hhu.edu.cn

现实意义^[6-7].本研究利用 DEM,提取了水文模拟与参数估计所需要的流域地貌特征,并根据新安江模型与扩散波模型理论,构建了栅格型新安江(Grid-Xin'anjiang)模型.同时,本文结合土壤类型、植被覆盖及利用等信息,对空间变化模型参数的估计方法进行了一定的研究与验证,并将 Grid-Xin'anjiang 模型应用于安徽省屯溪流域洪水模拟计算.

1 Grid-Xin'anjiang 模型原理

Grid-Xin'anjiang 模型以流域内每个 DEM 栅格作为计算单元,并假设在栅格单元内的降雨和地貌特征、土壤类型以及植被覆盖等下垫面条件空间分布均匀,模型只考虑各个要素在不同栅格之间的变异性. Grid-Xin'anjiang 模型先计算出每个栅格单元的植被冠层截留量、河道降水量和蒸散发量,然后再计算出栅格单元的产流量,并采用自由水蓄水结构对其进行水源划分,即划分为地表径流、壤中流以及地下径流 3 种水源,最后再根据栅格间的汇流演算次序,依次将各种水源演算至流域出口.在进行次洪模型计算时,采用一维扩散波模型,且假设在原来的坡地栅格内也存在一个“虚拟河道”,每个栅格单元的壤中流和地下径流直接流入河道,采用河道汇流的计算方法,则栅格间的扩散波汇流演算只包括坡面汇流和河道汇流 2 种方式.考虑到日径流模拟时对汇流演算精度要求不高且时间步长较大,为了增加模型的运行效率,Grid-Xin'anjiang 模型采用简便的线性水库法和滞后演算法进行栅格间汇流计算.

1.1 植被冠层截留

植被冠层截留是指降雨在植被冠层表面的吸着力、承托力及水分重力、表面张力等作用下储存于其表面的现象^[8].在一次降雨过程中,植被冠层对降雨的累积截留量^[9]可表示为

$$I_{cum} = f_{lc} S_{cmax} (1 - e^{-C_{vd} \frac{P_{cum}}{S_{cmax}}}) \quad (1)$$

式中: I_{cum} ——植被冠层的累积截留量; f_{lc} ——植被覆盖率; P_{cum} ——累积降雨量; C_{vd} ——植被密度的校正因子; S_{cmax} ——植被冠层的截留能力,即植被冠层的最大截留量.

1.2 河道降水

假设在每一个河道栅格内,降雨分布均匀,河道形状不发生改变,则可以根据栅格单元内河道部分所占的面积比例进行河道降水的计算.河道降水 I_{ch} 可表示为

$$I_{ch} = \frac{L_{ch} W_{ch} P}{A_{gr}} \quad (2)$$

式中: L_{ch} ——河道长度; W_{ch} ——河道断面最大过水面积所对应的水面宽; A_{gr} ——栅格单元的面积; P ——时段降雨量.其中, $L_{ch} W_{ch}$ 表示河道所占面积.对于流域内的坡地栅格,即使有“虚拟河道”存在,也不考虑河道降水的影响,即在坡地栅格上 $I_{ch} = 0$.

1.3 蒸散发

将每个栅格单元内的土壤分为上层、下层和深层 3 层,每一层对应的张力水蓄水容量分别为 W_{UM} , W_{LM} 和 W_{DM} .在栅格单元实际蒸散发计算时,冠层截留量按蒸散发能力蒸发,当截留水量小于蒸散发能力时,则采用 3 层蒸散发模型^[10].

1.4 单元产流及分水源

土壤蓄满表示的是土壤含水量达到田间持水量,而不是饱和含水量.新安江模型引进张力水蓄水容量分布曲线来考虑土壤含水量面上分布不均的问题,而在 Grid-Xin'anjiang 模型中,由流域地貌特征以及土壤、植被等下垫面条件来确定任意一个栅格单元的张力水蓄水容量 W_M ,而在栅格单元内暂不考虑张力水含水量分布不均的问题.将计算时段内栅格单元的实测降雨先扣除相应时段的蒸散发、植被冠层截留、河道降水后,再考虑上游入流是否补足当前单元的土壤含水量,即可得到实际用于产流计算的时段雨量 P_e .当 $P_e \leq 0$ 或 $P_e + W_0 \leq W_M$ 时, $R = 0$; 当 $P_e + W_0 > W_M$ 时, $R = P_e + W_0 - W_M$. 其中: R 为时段产流量; W_0 为栅格单元实际的张力水含量.

在 Grid-Xin'anjiang 模型中,任意栅格单元内的产流量 R 均被划分为 3 种水源:地面径流 R_s 、壤中流 R_i 和地下径流 R_g .所需参数包括表层土自由水容量 S_M 、表层自由水含量对壤中流的出流系数 K_i 、表层自由水含量对地下水的出流系数 K_g .

指数大的地方包气带较薄而地形指数小的地方包气带较厚.这与实际情况基本相符.一般而言,在湿润地区地形指数大的地方大多位于河道附近,而这些区域的地下水埋深较浅,包气带相对较薄.相反,地形指数小的地方基本位于流域的上游山坡,远离河道,包气带相对较厚.因此,可以假设流域上地形指数最大的栅格单元对应的张力水蓄水容量最小,而地形指数最小的栅格单元对应的张力水蓄水容量最大.图 2 为估计的屯溪流域包气带厚度以及腐殖质土厚度的空间分布.

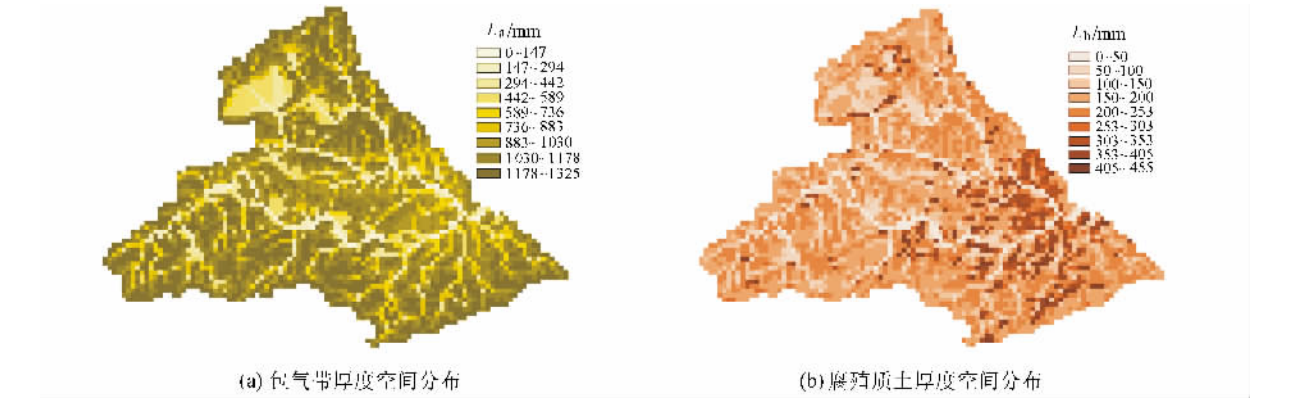


图 2 屯溪流域土壤厚度分布

Fig. 2 Distribution of thickness of soil in Tunxi Basin

K_i 与 K_g 这 2 个参数属于并联参数,其和 $K_i + K_g$ 代表的是自由水出流的快慢,应与单元的土壤类型有关,而自由水指的是饱和含水量与田间持水量之间那部分可以在重力作用下自由流动的水,因此可以将 θ_s 与 θ_{fc} 作为衡量自由水出流快慢的指标. K_i/K_g 表示的是壤中流与地下径流的比,此比值可以通过 θ_{wp} 来反映^[14].具体计算公式为

$$\begin{cases} K_i + K_g = \left(\frac{\theta_{fc}}{\theta_s}\right)^{m_{oc}} \\ \frac{K_i}{K_g} = 1 + \frac{2(1 - \theta_{wp})}{m_r} \end{cases} \tag{6}$$

式中: m_{oc} ——自由水出流综合影响因子; m_r ——自由水出流校正系数,根据已有研究成果,在估计模型参数时,可以取 $m_r = 1$. m_{oc} 可直接通过新安江模型分水源中的结构性约束($K_i + K_g = 0.7$)^[5]选取.具体步骤是:先给 m_{oc} 赋予一初值,然后根据每个栅格单元的土壤类型由土壤参数统计表和式(6)确定栅格单元对应的 $K_i + K_g$,再统计出流域内所有栅格 $K_i + K_g$ 的均值并与 0.7 进行比较,由此对 m_{oc} 进行调整,使其尽量满足该结构性约束.

3.3 汇流参数

当 Grid-Xin'anjiang 模型进行扩散波汇流演算时,模型参数的估计主要是基于流域地貌特征以及河道断面信息.其中,坡面汇流的曼宁糙率系数 n_h 根据栅格单元的植被类型由植被参数统计表确定.而每个栅格单元河道(包括虚拟河道)汇流的曼宁糙率系数 n_c ^[15] 由下式进行计算:

$$n_c = n_0 S_{oc}^{0.272} A_d^{-0.00011} \tag{7}$$

式中: A_d ——栅格单元的上游汇水面积,km²; S_{oc} ——河道坡度,可由 DEM 提取得到; n_0 ——系数, n_0 可以由流域出口点的糙率及坡度代入式(7)反算出.地表径流汇入河道的比例也是在生成的研究流域水系基础上,采用面积比例法进行计算^[7].在判断河道形状时,主要是根据流域内实测站点的断面数据,反演出每一栅格单元的河道形状.以屯溪流域为例,定义某一断面宽度指数 α ,考虑到随着上游汇水面积的增加,越到流域下游其河道过水断面面积应该越大,且变化比较明显,因此可认为 α 在流域内应当是变化的,即河道断面的尺寸是空间变化的.根据流域内已有的实测断面资料分析,即可获得 α 的空间分布.

4 应用结果分析

屯溪流域具有 1982—2001 年以及 2006 年的日降雨资料,有 40 场洪水的时段降雨资料,屯溪出口站有对应的流量资料.本文将 1982—1995 年的日资料 and 对应的次洪资料用于模型参数的率定,剩余资料用于模型

参数的检验,对于模型参数估计方法的验证采用率定期资料进行,对于屯溪流域降雨资料的空间插值采用距离平方反比法.

采用率定期内的资料对模型估计参数进行验证.其中,日模型模拟的径流深以及洪峰相对误差的合格率分别为 100%和 79%,平均相对误差水平分别为 3.7%和 12.6%,确定性系数的均值为 0.91.次洪模型模拟的径流深、洪峰相对误差以及峰现时差的合格率分别为 91%,48%和 83%,平均相对误差水平分别为 9.1%,19.9%和 2.2 h,确定性系数的均值为 0.87.图 3 为应用估计参数模拟的 2 次洪水过程线比较.

— 降雨量 ——— 实测流量 - - - - - 模拟流量

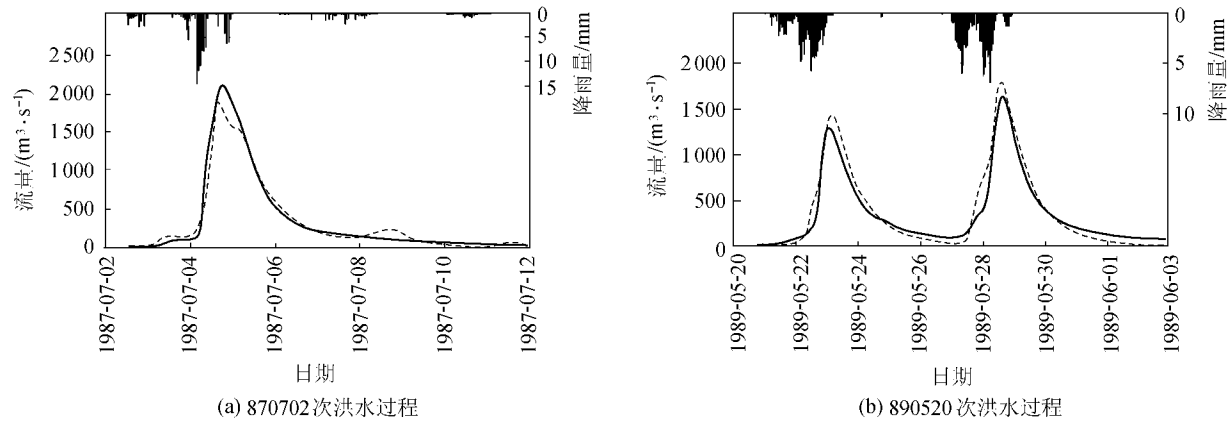


图 3 Grid-Xin'anjiang 次洪模型估计参数模拟结果比较

Fig. 3 Comparison of estimated parameters of Grid-Xin'anjiang model for floods

由估计参数的模拟结果可以看出,根据土壤、植被及地貌等下垫面条件估计出的 Grid-Xin'anjiang 日模型参数值较为合理,对于屯溪流域率定期内的日径流模拟精度较高,因此直接将日模型的参数估值用于该流域检验期内的日径流模拟,检验期内模拟的径流深与洪峰相对误差合格率均为 91%,平均相对误差水平分别为 10.1%和 7.0%,确定性系数的均值为 0.90.对于 Grid-Xin'anjiang 次洪模型而言,需要率定检验的主要是扩散波汇流方法中的坡面糙率系数 n_h ,率定方法选择人工试错法.对于次洪模型中其他参数则不再进行率定.通过率定扩散波汇流方法的糙率系数,对于率定期内洪水而言,Grid-Xin'anjiang 次洪模型模拟的径流深、洪峰和峰现时间的平均相对误差水平分别为 7.7%,7.9%和 1.8 h;合格率分别为 96%,96%和 91%,确定性系数的均值为 0.91.对于检验期内洪水而言,Grid-Xin'anjiang 次洪模型模拟的径流深、洪峰和峰现时间的平均相对误差水平分别为 8.0%,9.7%和 2.6 h;合格率均为 94%,确定性系数的均值为 0.90,模拟结果较好.图 4 为应用率定参数模拟的 2 次洪水过程线比较.

— 降雨量 ——— 实测流量 - - - - - 模拟流量

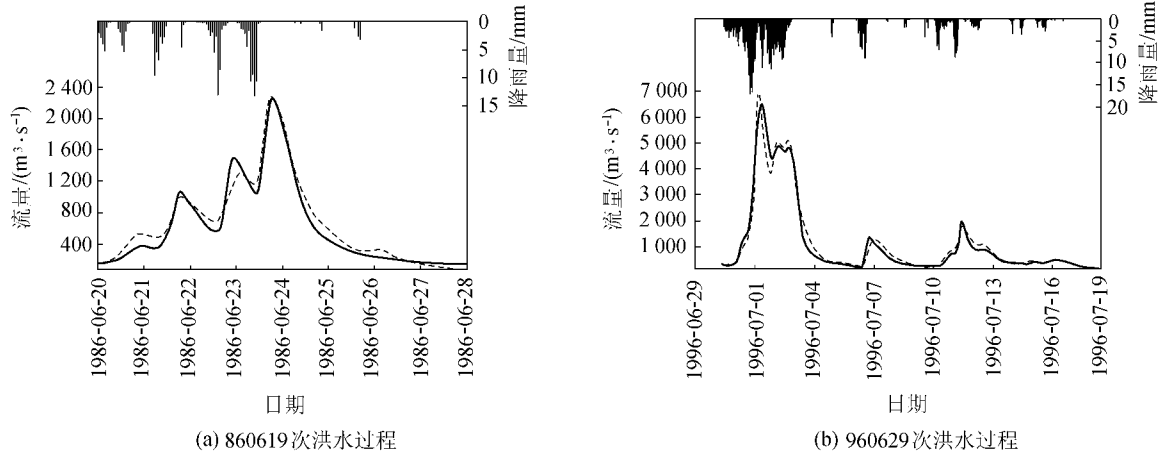


图 4 Grid-Xin'anjiang 次洪模型率定参数模拟结果比较

Fig. 4 Comparison of calibrated parameters of Grid-Xin'anjiang model for floods

5 结 语

以新安江蓄满产流模型与一维扩散波汇流模型为基础,构建了适用于湿润流域的分布式 Grid-Xin'anjiang 模型,并在模型进行产汇流计算时,考虑了栅格间的水量交换问题以及河道排水网络的影响.根据流域的地貌特征、土壤类型及植被覆盖等下垫面特性,对基于物理机制的模型参数估计方法进行了一定的研究与验证.从 Grid-Xin'anjiang 模型在屯溪流域的应用情况可以看出,模型的应用效果较好,模拟精度较高.为了使 Grid-Xin'anjiang 模型可以更好地应用于不同类型的流域,还应当加入超渗产流、融雪模型等其他水文过程的计算方法,对于栅格间壤中流与地下径流的汇流演算方法也有待进一步改进.为了使模型更好地用于缺乏资料地区的洪水模拟及预报,还需要进一步加强对模型的应用研究,开展模型在其他流域以及与其他模型应用的对比分析,同时也需要进一步完善模型参数的估计方法.

参考文献:

- [1] FREEZE R, HARLAN R. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model[J]. Journal of Hydrology, 1969, 9: 237-258.
- [2] ABBOTT M, BATHURST J, CUNGE J, et al. An introduction to the European Hydrological System-Système Hydrologique Européen, "SHE", 1. history and philosophy of a physically-based, distributed modelling system[J]. Journal of Hydrology, 1986, 87: 45-59.
- [3] TODINI E, CIARAPICA L. The TOPKAPI model [M]//SINGH V. Mathematical models of large watershed hydrology. Colorado: Water Resources Publications, 2001: 471-504.
- [4] BEVEN K, KIRKBY M. A physically based variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrology Science Bulletin, 1979, 24(1): 43-69.
- [5] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [6] 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: Nature Sciences, 2007, 35(2): 131-134. (in Chinese))
- [7] YAO Cheng, LI Zhi-jia, BAO Hong-jun, et al. Application of a developed Grid-Xin'anjiang model to Chinese watersheds for flood forecasting purpose[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(9): 923-934.
- [8] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [9] ASTON A. Rainfall interception by eight small trees[J]. Journal of Hydrology, 1979, 42: 383-396.
- [10] 赵人俊, 王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988(6): 2-9. (ZHAO Ren-jun, WANG Pei-lan. Analysis of the parameters of the Xin'anjiang model[J]. Journal of China Hydrology, 1988(6): 2-9. (in Chinese))
- [11] MACCORMACK R. Numerical solution of interaction of shock wave with laminar boundary layer[J]. Lecture Notes in Physics, 1971, 8: 151-163.
- [12] WANG M, HJELMFELT A. DEM based overland flow routing model[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 1998, 3(1): 1-8.
- [13] 李致家. 水文模型的应用与研究[M]. 南京: 河海大学出版社, 2008.
- [14] KOREN V, SMITH M, WANG D, et al. Use of soil property data in the derivation of conceptual rainfall-runoff model parameters[C]//Proceedings of the 15th Conference on Hydrology. Long Beach: AMS, 2000: 103-106.
- [15] KOREN V, REED S, SMITH M, et al. Hydrology laboratory research modeling system (HL-RMS) of the national weather service[J]. Journal of Hydrology, 2004, 291: 297-318.