

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.06.002

基于网格水滴的汇流模拟计算方法

罗玉玲¹, 秦洪亮², 姚成¹, 杜若愚¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010)

摘要: 为探究网格水滴汇流方法的预报精度及物理性质, 并验证其在缺资料或无资料地区的适用性, 以蓄满产流为原理, 结合网格新安江模型进行产流计算, 构建了基于网格水滴的汇流模型。以湿润地区屯溪及其嵌套子流域和半湿润地区东湾及其嵌套子流域为研究对象, 假设嵌套子流域为缺资料地区, 在不重新率定参数情况下对屯溪和东湾内部嵌套子流域进行模拟验证。结果表明: 相同流域内, 基于网格水滴的汇流模型综合模拟精度随着子流域面积减小而降低; 模型在屯溪流域模拟精度达到甲级, 其嵌套子流域模拟精度基本满足需求; 在东湾流域模拟精度达到乙级, 其嵌套子流域模拟精度除洪峰合格率外均达丙级; 模拟结果验证了网格水滴汇流模型在缺资料流域的适用性。

关键词: 网格水滴汇流方法; 嵌套流域; 分布式水文模型; 湿润半湿润地区

中图分类号: P338

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2023)06-0009-09

Confluence calculation method based on grid water drop

LUO Yuling¹, QIN Hongliang², YAO Cheng¹, DU Ruoyu¹

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

2. Hydrology Bureau of Yangtze River Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: To explore the prediction accuracy and physical properties of the grid water drop confluence method, and verify its applicability in areas lacking or without data, based on the grid model of Xin'anjiang model, the flow yield calculation is carried out, and the confluence model based on the grid water drops is constructed. Tunxi and its nested basin in the humid area and Dongwan and its nested basin in the semi-arid area are taken as the study basins, and the nested sub-basin is assumed to be the area lacking of data. The simulation validation of Tunxi and the inner sub-basin of Dongwan is carried out without re-setting parameters, and the results indicate that in the same watershed, the comprehensive simulation accuracy of the grid water drop confluence model decreases with the decrease of the subwatershed area. The simulation accuracy of the model in Tunxi River basin reaches grade A and the simulation accuracy in its sub-basins basically meets the requirements, while the simulation accuracy of Dongwan reaches Class B and the accuracy of its sub-basins reaches Class C except for the pass rate of flood peak. This study validates the applicability of the grid-water-drop based confluence method in the area lacking of or without data.

Key words: confluence method based on grid water drop; nested watershed; distributed hydrological model; humid and semi-arid areas

准确可靠的洪水预报是防洪决策的重要依据^[1-2], 可以有效减少洪水带来的损失。在实际水文工作中, 相比于资料充足地区的洪水预报, 缺资料地区的洪水预报更具普遍性和挑战性, 是水文工作者需要解决的问题之一^[3]。分布式水文模型可以考虑和描述流域下垫面条件和降雨的空间变异性, 是解决缺资料地区水文预报的重要手段^[4-7]。汇流过程作为分布式水文模型模拟预报的重要环节, 其描述的准确性会影响预报精度, 是分布式水文模型研究的重难点之一^[8]。

现有的汇流计算方法主要包括线性水库法、基于水量平衡和槽蓄方程的 Muskingum 法、改进 Muskingum

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979070)

作者简介: 罗玉玲(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail: 455650369@qq.com

通信作者: 姚成(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水文模型与水文预报研究。E-mail: yaocheng@hhu.edu.cn

引用本文: 罗玉玲, 秦洪亮, 姚成, 等. 基于网格水滴的汇流模拟计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 9-17.

LUO Yuling, QIN Hongliang, YAO Cheng, et al. Confluence calculation method based on grid water drop[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(6): 9-17.

法(Muskingum-Cunge 方法、MCT 法)^[9]、基于圣维南方程的简化近似的扩散波法与运动波法^[10]。姚成等^[11]将基于网格的 Muskingum 法与扩散波法应用于分布式水文模型中,发现逐网格 Muskingum 法计算简单,只需较少资料即可达到较好精度,但是对水文资料依赖度较高,且缺乏对参数和变量空间变异性的描述;扩散波法物理性强,可以较好地利用下垫面信息对参数进行空间描述,但计算效率较低,受差分方程及其形式影响大。董丰成等^[12-13]认为水文过程与下垫面、流域地形地貌互相作用是客观存在的物理现象,根据这一性质利用 DEM 信息提取地貌单位线,将流域汇流与地貌特征结合,一定程度上推进了无资料地区的汇流研究。近年来,随着水文大数据的发展,芮孝芳^[14]认为无法只通过求解微分方程解决复杂的流域产汇流问题,需要利用大数据描述、揭示流域产汇流规律。为进一步解决原有汇流计算方法对水文资料依赖性较强、对下垫面条件考虑较少及计算效率较低等问题,本文在 Rui 等^[15]提出的网格水滴汇流方法基础上,进一步考虑土壤类型、土地利用/覆盖类型、地表糙率等^[16-18]对汇流的影响,将水文响应与流域地形地貌结合构建基于网格水滴的汇流模型,以期对缺资料地区汇流计算提供一种可行的方法。

网格新安江模型自创建以来便得到较为广泛的应用^[19-22],故本文构建的模型以蓄满产流原理为基础,采用网格新安江模型进行产流计算^[21],采用网格水滴汇流方法进行汇流计算,将所构建的模型用于湿润地区屯溪流域和半湿润地区东湾流域的洪水模拟,验证模型预报精度,并假设 2 个流域的嵌套子流域为缺资料地区,在不重新率定参数的情况下,分别将在 2 个流域率定的参数移植于其嵌套流域,验证该模型的物理性质和在缺资料地区适用性。

1 网格水滴汇流方法

网格水滴汇流方法以分布式水文模型为基础,将流域上发生降雨并产流的网格视作为“水滴”,并以该形式参与流域汇流。

1.1 汇流速度

网格水滴的汇流速度由两部分组成:坡面汇流速度、河道汇流速度。

坡面汇流速度主要与坡度、地表糙率、土地利用/覆盖类型等因素有关,采用美国水土保持局工程手册提出的公式:

$$v_s = aS_s^{1/2} \tag{1}$$

式中: v_s 为坡面汇流速度; a 为反映地表糙率的经验系数; S_s 为沿水流方向的地表坡度。

河道汇流速度主要与河道糙率、汇水面积等有关,采用根据曼宁公式演变的河道汇流速度公式^[13]:

$$v_r = nA^\beta S_r^{1/2} \tag{2}$$

式中: v_r 为河道汇流速度; n 为反映河道糙率的参数; β 为经验指数(一般取 0.3); A 为网格汇水面积; S_r 为河道网格坡度。

1.2 汇流路径

汇流路径根据网格流向获取,采用 D8 法则确定网格水滴流向,若网格流向 r 为正向出流 0、2、4、6,则汇流路径为 d (d 为单元格边长),若网格流向 r 为斜向出流 1、3、5、7,则汇流路径为 $\sqrt{2}d$ ^[13]。将“水滴”从网格单元出发到流域出口时经过的网格单元依次连接,得到该网格的汇流路径 L 。

1.3 汇流时间矩阵

根据汇流路径和汇流速度,将各个网格单元所需要的时间累加得到其到达流域出口所需要的时间 t' :

$$t' = \sum_{i=1}^m t_i \tag{3}$$

其中 $t_i = \begin{cases} d/v & (r = 0, 2, 4, 6) \\ \sqrt{2}d/v & (r = 1, 3, 5, 7) \end{cases}$

式中: t_i 为网格单元 i 的汇流时间; m 为该单元网格流经网格数; v 为单元网格对应汇流速度。所有网格的汇流时间组合在一起,可以得到流域的汇流时间矩阵。

1.4 出口流量过程

根据水滴汇流时间的空间分布,可以得到 t 时刻降雨所产生的流域出口断面流量:

$$q_t = \sum_{i=1}^m X(\tau_i) h_i \quad (t \leq \tau_i < t + \Delta t)$$

式中: q_t 为 t 时刻降雨在出口断面形成的流量过程; τ_i 为产流对应时刻; $X(\tau_i)$ 为指标函数,当 $t \leq \tau_i < t + \Delta t$ 时,取为 1,否则为 0; h_i 为 t 时刻降雨网格单元所形成的产流量。

对各时刻流域出口形成的流量过程进行积分,即可得到流域出口的流量过程(式(5)),该过程是将不同时刻降雨形成出口断面流量同时刻相加,可以得到一定时空分布降雨落到流域基本单元形成的出口断面流量过程。

$$Q_t = \int_0^T q_t dt$$

式中: Q_t 为流域出口流量过程; T 为流域汇流总时间。

2 模型构建

在网格新安江模型的基础上,以蓄满产流原理为基础,计算每个网格单元的产流量,采用自由水蓄水库结构,将其划分为地表径流、壤中流及地下径流 3 种水源,再根据网格水滴汇流演算至出口断面。采用网格水滴汇流方法进行汇流演算时,假设网格单元是由坡面及河道组成,坡面网格分为地面径流、地下径流及壤中流,3 种径流都采用网格水滴汇流方法,根据网格水滴的汇流速度、汇流路径及时间矩阵,将径流演算至流域出口。

在模型构建时,因地表径流、地下径流及壤中流的流速存在一定差异,考虑流域以山区林地为主,降雨较大情况下,地表径流是壤中流流速的 2~3 倍^[23],模型计算壤中流流速设置为地表径流的 1/2.5。考虑到地下径流在岩石空隙中受到的阻力较大,且其流速慢于壤中流,模型中的地下径流流速设为地表径流的 1/3。

3 实例验证

3.1 流域概况

屯溪流域(图 1(a))位于皖南山区,靠近中国东南沿海地区,为亚热带季风气候区,四季分明,气候温和,多年平均气温约为 17℃。屯溪流域面积为 2 670 km²,地势西高东低。流域内植被良好,雨量充沛,多年平均降水量为 1 800 mm,降水在年内、年际分配不均匀,汛期内的降水量占全年总降水量的 60%,为典型的湿润流域。

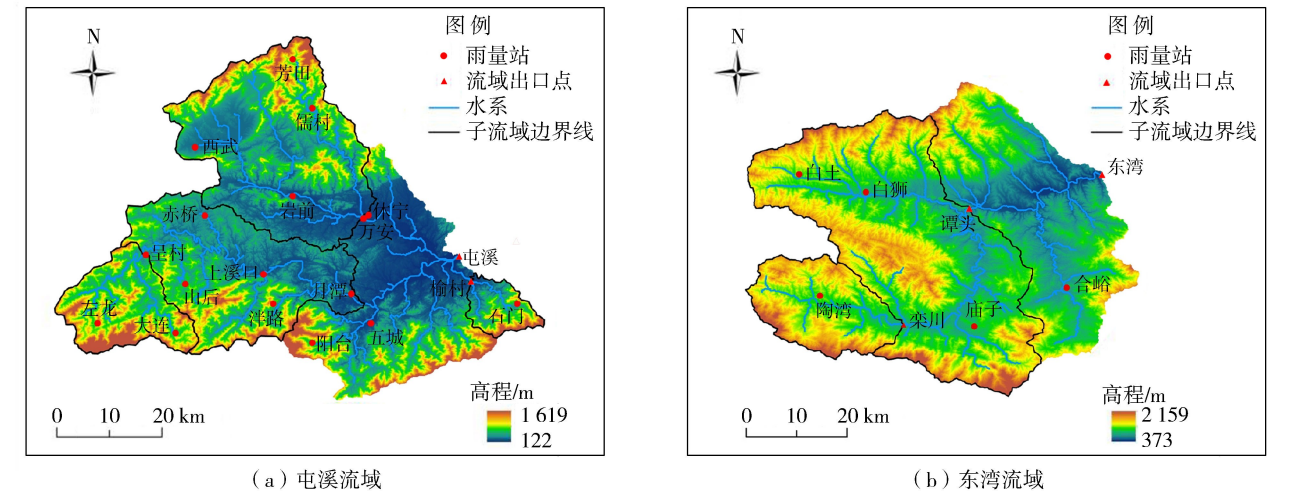


图 1 研究区水系、雨量站分布

Fig.1 Distributions of water system and rainfall stations in study areas

东湾流域(图 1(b))位于伊河河源地区,流域面积为 2 623 km²,属于大陆性季风气候,为半湿润地区。降水量分布不均匀,流域内多年平均降水量为 773 mm,日降水量一般在 100 mm 以上,最大可达 600 mm。暴雨主要集中在 7—8 月,占总降水量的 60%,多年平均蒸发量为 564 mm。流域地势西高东低,相对落差较大,上游地区植被良好,主要为林地,下游河道附近裸地较多。

选取屯溪流域内部嵌套子流域4个(月潭、万安、呈村、榆村),东湾流域内部嵌套子流域2个(棠川和潭头)为研究对象,各流域地形地貌参数见表1。对于屯溪流域和东湾流域内部嵌套子流域,没有对模型参数进行重新率定,直接采用网格水滴模型在出口断面屯溪站点和东湾站点的参数率定结果,根据嵌套流域出口站点所在栅格,直接获得其出流过程。

3.2 研究数据

本文模型所需下垫面数据有 DEM 数字高程数据、土壤类型和土地利用数据。DEM 数据来自地理空间数据云网站,原始数据分辨率为 90 m。土壤类型数据为世界土壤数据库 HWSO 中 1 : 100 万土壤栅格数据。土地利用数据来自美国地质勘探局网站,是分辨率为 1 km 的矢量文件。模型构建时,为提升模型的计算效率,将所有的下垫面数据处理为分辨率为 1 km 的网格数据^[21],即屯溪和东湾流域的下垫面数据均采用 1 km 的网格数据。采用反距离插值法将站点降水数据处理为空间网格降水数据。

选取屯溪流域 1986—1999 年 31 场洪水资料进行模拟,其中 22 场洪水进行率定,9 场洪水进行验证,其嵌套子流域月潭、万安、呈村和榆村分别选取 27 场、24 场、32 场和 20 场洪水进行模拟验证。选取东湾流域 1993—2011 年 15 场洪水资料进行模拟,其中 10 场洪水进行率定,5 场洪水进行验证,其嵌套子流域潭头和棠川分别选取 15 场和 14 场洪水进行模拟验证。

3.3 参数确定

对于网格新安江模型参数,先根据参数的物理性质,利用地貌特征、植被覆盖、土壤类型等下垫面空间信息,结合已有经验对参数取值做出前期估计,然后再根据参数估计的应用结果甄选出敏感参数,最后利用实测出口流量过程对敏感参数进行率定和检验。

网格水滴汇流方法进行汇流演算时,汇流参数包括 a 和 n 。 a 与土地利用类型有关, a 的大小影响流域汇流速度, a 越大,洪水汇流速度越快,洪峰越大,峰现时间越早。基于 Grimaldi 等^[24]给出的土地利用类型与流速参数参考表,结合屯溪与东湾流域土地利用类型(图2),本文定义了一个空间分布均匀的坡面流速参数比例因子 μ ,并利用观测资料对该因子进行率定,即任意网格单元的坡面流速为 $a = \mu b$ (b 为不同土地利用类型的网格对应流速)。 n 的计算公式为^[21]

$$n = n_0 S_r^{0.272} A^{-0.00011}$$

(6)

式中 n_0 为计算系数,当出口点无实测资料时需要对其率定。此次屯溪流域 n_0 取为 0.27,东湾流域 n_0 取为 0.275。坡度是描述地貌特征信息的重要指标,地表上任一点的坡度计算公式参见文献[25]。

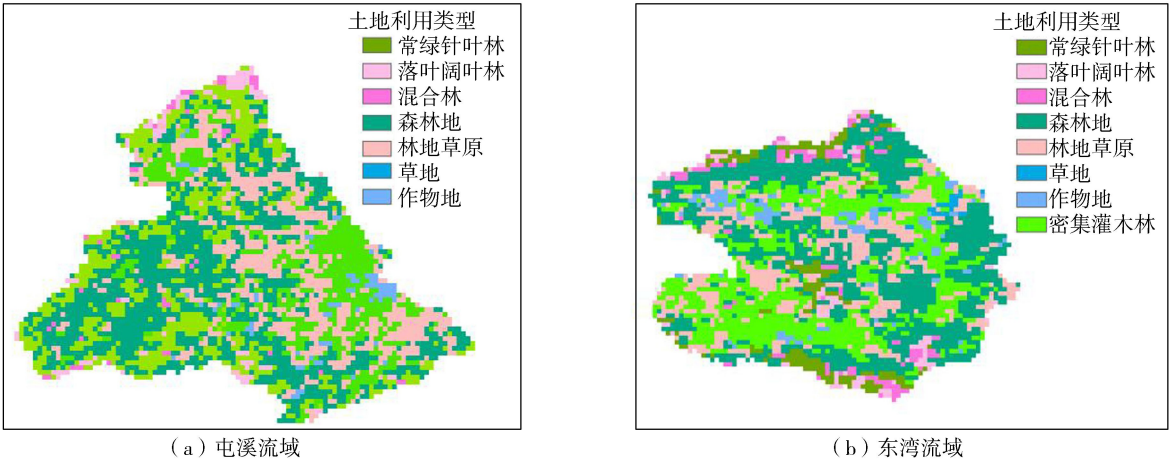


图2 屯溪、东湾流域土地利用类型分布

Fig.2 Land use distribution of Tunxi watershed and Dongwan watershed

3.4 模拟结果

采用网格水滴汇流模型进行洪水模拟时,屯溪流域、东湾流域参数 μ (坡面流速比例因子)的率定值分别为 0.7、0.26。根据已有研究成果^[21]确定屯溪及东湾产流参数。对于月潭、呈村、潭头等嵌套子流域,直接采用屯溪流域和东湾流域率定参数进行模拟,不再对模型参数进行重新率定。

依据 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》,选取洪峰相对误差、径流深相对误差、峰现时间误差和确定性系数 4 个指标对模拟效果进行综合评价。

3.4.1 屯溪及其嵌套子流域

屯溪流域率定期内共有 22 场洪水,其径流深误差均在 $\pm 15\%$ 以内,洪峰误差范围为 $-21.22\% \sim 31.32\%$,峰现时间误差介于 $-5 \sim 6\text{ h}$ 之间,平均确定性系数介于 $0.71 \sim 0.98$ 之间;验证期间共有 9 场洪水,径流深误差介于 $\pm 11\%$ 之内,洪峰误差在 $-15.1\% \sim 16.95\%$ 之间,峰现时间误差介于 $-1 \sim 4\text{ h}$ 之间,确定性系数介于 $0.93 \sim 0.98$ 之间,验证期的径流深合格率、洪峰合格率及平均确定性系数整体上较率定期高。月潭流域共有 27 场洪水,径流深误差介于 $-11.63\% \sim 18.78\%$ 之间,洪峰误差介于 $-29.22\% \sim 8.35\%$ 之间,其中 81% 的洪峰都小于实测洪峰,峰现时间误差除了 19960627 号 18 h 之外,其余峰现时间误差都在 $-7 \sim 2\text{ h}$ 之间,确定性系数介于 $0.78 \sim 0.96$ 之间。万安径流深误差介于 $-33.18\% \sim 30.43\%$ 之间,洪峰误差介于 $-41.33\% \sim 30.46\%$ 之间,其 70% 计算洪峰都小于实测洪峰,峰现时间误差在 $-3 \sim 0\text{ h}$ 之间,确定性系数介于 $0.67 \sim 0.96$ 之间。呈村流域 32 场洪水,除 19860611 号和 19880518 号洪水径流深误差为 37.86% 和 35.34% 之外,其余径流深误差都在 $\pm 15\%$ 之间,洪峰误差介于 $-44.69\% \sim 9.42\%$ 之间,其中 90% 的计算洪峰小于实测洪峰,峰现时间误差介于 $-3 \sim 10\text{ h}$ 之间,确定性系数介于 $0.58 \sim 0.9$ 之间。榆村流域 20 场洪水,径流深误差介于 $-4.62\% \sim 19.54\%$ 之间,洪峰误差介于 $-57.95\% \sim -2.48\%$ 之间,其中全部的洪峰均小于实测洪峰,峰现时间误差介于 $-1 \sim 12\text{ h}$ 之间,除了 19980720 号洪水外,其余计算峰现时间均晚于实测峰现时间。

由屯溪及其内部嵌套流域(榆村除外)的19990622号洪水过程(图3)可知,随着流域面积的减小,该洪

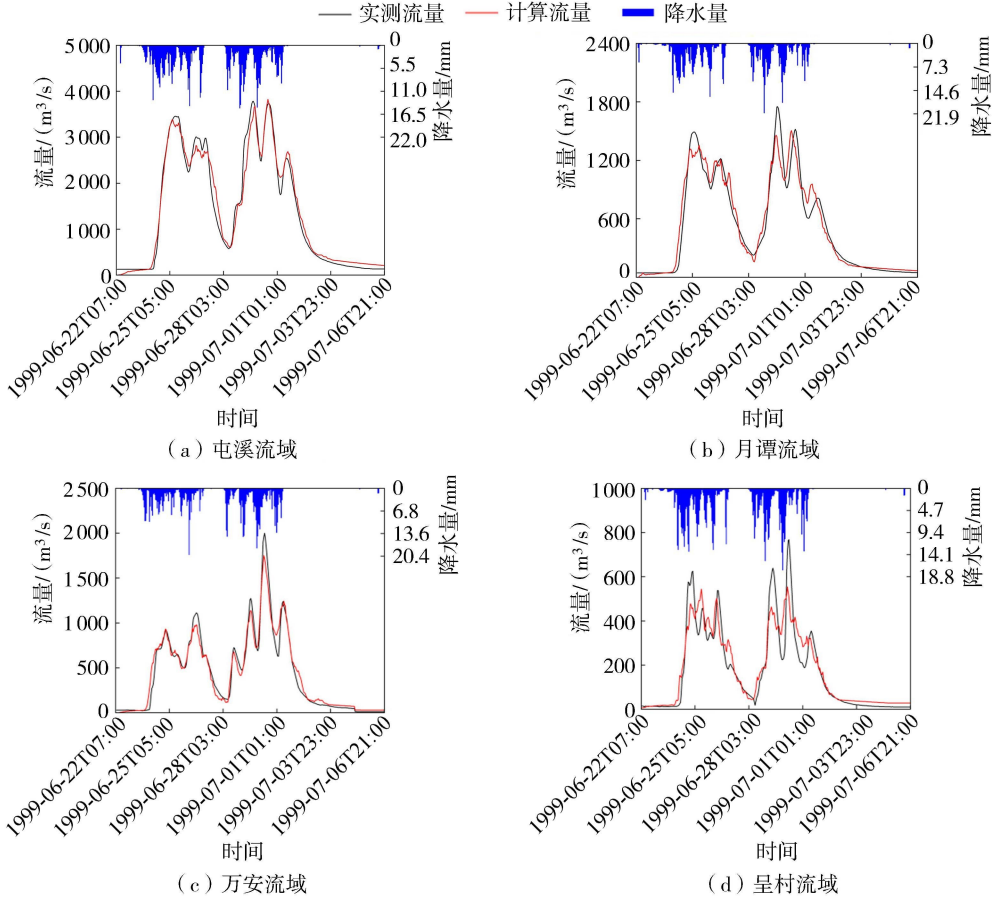


图 3 屯溪及嵌套子流域 19990622 号洪水过程线

Fig.3 Flood process line of No.19990622 flood in Tunxi and its nested basins

水场次在不同流域的预报精度也有所降低,且较小流域存在计算洪峰小于实测洪峰现象。将网格水滴汇流模型用于屯溪及其嵌套子流域,其应用效果较好(表 2)。从洪峰合格率和确定性系数上分析,屯溪流域和月潭流域均达到了甲级预报精度,万安流域达到了乙级预报精度,呈村流域达到丙级预报精度,榆村应用效果较差,且总体洪峰偏低,峰现时间延后,从确定性系数上看,达到丙级预报精度。

3.4.2 东湾及其嵌套流域

东湾流域率定期内共有 10 场洪水,其径流深、洪峰和峰现时间合格率分别为 80%、80%、50%,平均确定性系数为 0.75。验证期内 5 场洪水,径流深、洪峰和峰现时间合格率分别为 100%、80%、60%,平均确定性系数为 0.75,达乙级预报精度,模型模拟精度较好。将参数移植到潭头和栾川,潭头合格率分别为 73.3%、33.3%、66.7%,平均确定性系数为 0.61,其洪峰误差相对较大,且潭头流域面积相对东湾流域有所减小,其总体的模拟精度也有所降低,栾川流域的合格率分别为 50%、35.7%、64.3%,平均确定性系数为 0.55。将东湾流域参数移植于栾川流域,总体模拟精度较东湾流域和潭头流域低。

嵌套子流域滩头和栾川的平均确定性系数、径流深和时间合格率都达到丙级预报精度,而洪峰合格率较低。由图 4 可知,东湾流域没有明显的随着流域面积减小而使得洪峰相对偏小情况。东湾流域是半湿润地区,产流机制相对湿润地区更为多变,采取蓄满产流原理对半湿润地区进行产流计算时没有考虑半湿润地区超渗产流情况,故所构建的网格水滴汇流模型在该区域预报精度相对湿润地区低。

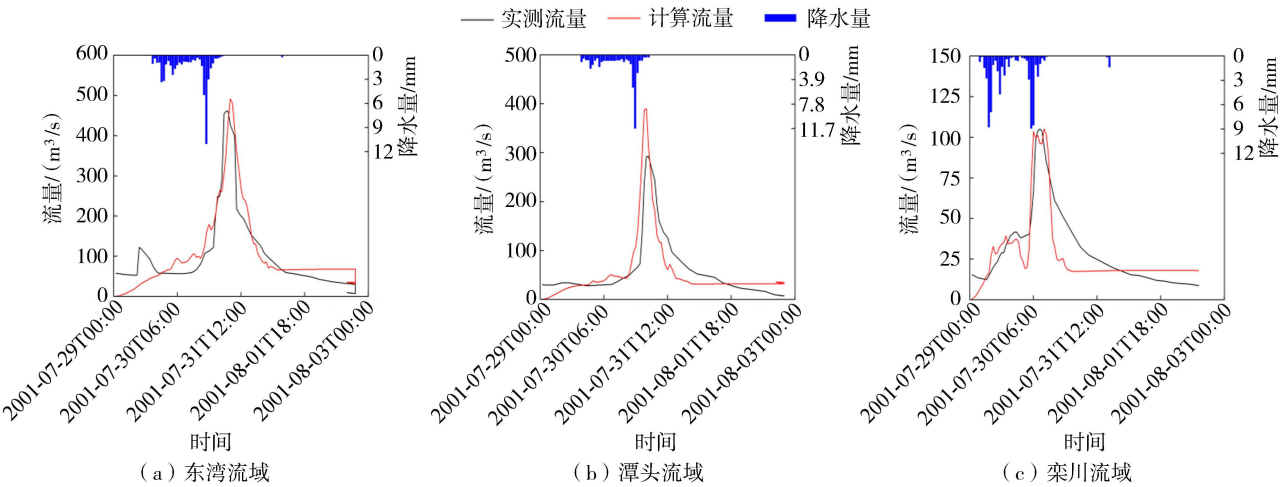


图 4 东湾及其嵌套子流域 20010729 号洪水过程线

Fig. 4 Flood process line of No. 20010729 flood in Dongwan and its nested basins

由屯溪及其嵌套子流域、东湾及其嵌套子流域模拟结果可知,网格水滴汇流模型在屯溪和东湾流域的模拟精度较好,在没有重新率定模型参数的情况下,嵌套子流域的模拟总体效果较好,基本满足精度需求。由此可知,本文网格水滴汇流模型较为合理,具有较强的物理机制,在缺乏资料地区具有一定的适用性。

网格水滴汇流模型的模拟精度受子流域面积和下垫面条件的影响:将湿润地区屯溪流域率定参数移植于其嵌套子流域,模拟精度随流域面积减小而降低。从总体模拟精度上看,面积大小相近的月潭流域和万安流域模拟结果相近,都达乙级预报精度;呈村流域面积相对较小,其总体模拟精度较月潭流域和万安流域偏低;榆树流域面积小于呈村,其预报精度最低,同时洪峰误差较大,对比榆村流域 19890626 号和 19940617 号洪水模拟结果(图 5)发现榆村流域计算洪峰相对偏低,峰现时间延后。

两流域的坡面汇流速度介于 0.027 ~ 1.1 m/s 之间(图 6),其主要与土地利用类型、坡度、流域整体调蓄能力相关,而直接将屯溪、东湾流域率定参数 μ 移植于其嵌套子流域,只考虑了整体大流域的调蓄能力,忽略了子流域内部调蓄能力随着面积减小而降低问题,故出现相同流域下,随着子流域面积减小模型模拟精度降低现

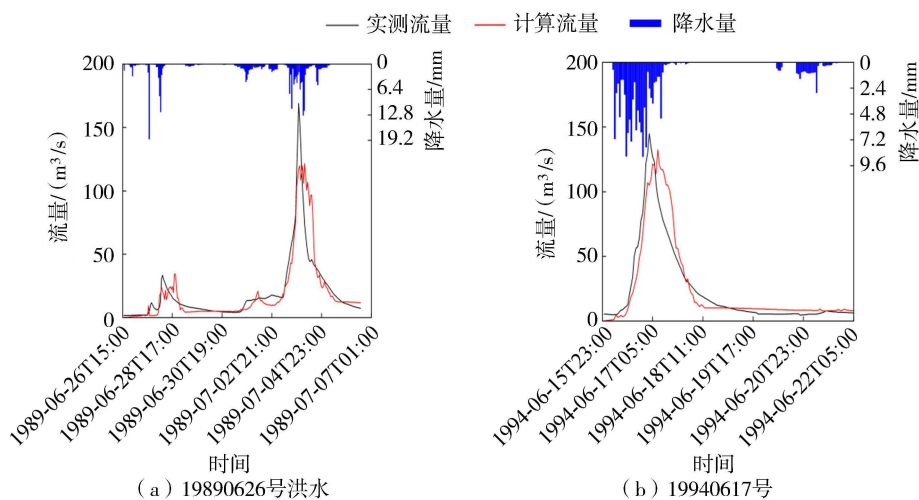


图 5 榆村流域 19890626 号洪水和 19940617 号洪水过程线

Fig. 5 Flood process lines of No. 19890626 flood and No. 19940617 flood in Yucun watershed

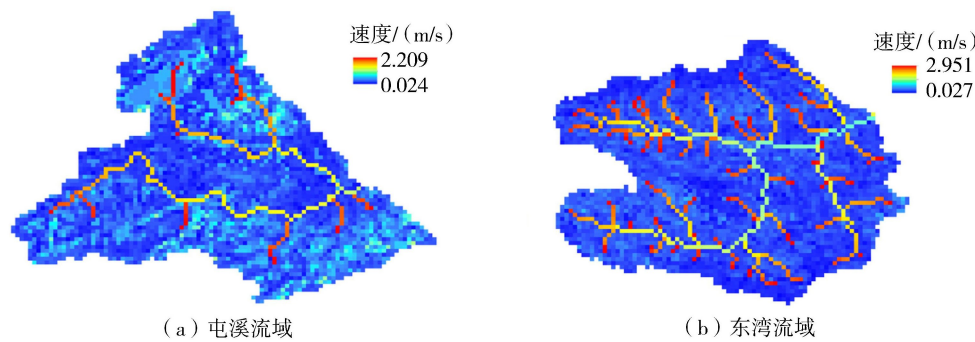


图 6 屯溪、东湾流域汇流速度分布

Fig. 6 Distribution of confluence velocity in Tunxi and Dongwan watersheds

象。但通过对比东湾及其嵌套子流域的模拟结果发现,随着面积的减小,总体模拟精度降低,但其嵌套子流域并没有明显的洪峰相对较小和峰现时间相对延后现象,且潭头流域和栾川流域模拟精度相差不大,主要是因为半湿润地区产流机制更为多变,网格水滴汇流方法采用蓄满产流原理进行产汇流计算,只考虑了蓄满区域径流,而忽略非蓄满区域的超渗产流,一定程度上导致半湿润地区东湾流域的模拟精度低于湿润地区屯溪流域。

3.5 讨论与分析

无论是屯溪流域还是东湾流域,都出现小流域应用效果较差问题,本文只是直接应用参数,对产流部分采取参数移植方法,汇流部分只考虑了大流域的调蓄能力,未对小流域调蓄能力进行考虑,更好地应该是建立参数和下垫面及其流域面积等的定量关系,在参数移植时,需要根据移用流域下垫面特点及面积,对参数值进行适当的修正。

网格水滴汇流模型所采用的河道汇流公式为根据曼宁公式演变得到,经验指数 β 取值为0.3, n 根据式(6)计算得到,河道汇流速度完全根据下垫面条件计算所得,将屯溪、东湾流域河道汇流速度输出,如图6所示,可以发现屯溪和东湾流域的河道汇流速度为上游较为陡峭地区河道速度相对较大,达到2~3 m/s,主干道区域汇流速度相对较小,屯溪流域大约在1.1~1.8 m/s之间,东湾流域在1.1~1.9 m/s之间,符合实际情况。东湾流域上游地区坡度较陡,相对落差大,其相对流速也较屯溪流域大。河道汇流速度分布符合实际物理规律,证明根据下垫面计算的河道流速计算公式及其参数使用合理。

4 结 语

网格水滴汇流模型的模拟结果较好,基本满足精度需求;根据下垫面条件计算的河道流速公式使用合理,河道汇流速度分布符合物理规律;网格水滴汇流模型结构合理且具有较强的物理机制,计算较为简便,能够输出较为丰富要素结果,对缺资料或无资料地区的研究具有积极意义。

参考文献:

- [1] LAAHA G,SKOIE J O, NOBILIS F, et al. Spatial prediction of stream temperatures using Top-Kriging with an external drift [J]. *Environmental Modeling & Assessment*,2013,18(6):671-683.
- [2] 刘永伟,王文,刘元波,等. 水文模型模拟预报的多源数据同化方法及应用研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021,49(6):483-491. (LIU Yongwei, WANG Wen, LIU Yuanbo, et al. Advances in multi-source data assimilation approach and application in simulation and forecast of hydrological model[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2021,49(6):483-491. (in Chinese))
- [3] SIVAPALAN M,TAKEUCHI K,FRANKS S W. IAHS decade on predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: shaping an exciting future for the hydrological sciences [J]. *Hydrological Sciences Journal*,2003,48(6):857-880.
- [4] 芮孝芳,黄国如. 分布式水文模型的现状与未来[J]. 水利水电科技进展,2004,26(2):55-58. (RUI Xiaofang, HUANG Guoru. Current situation and future of distributed hydrological model [J]. *Advances in Water Resources and Hydropower Science and Technology*,2004,26(2):55-58. (in Chinese))
- [5] 霍文博,李致家,张珂,等. 分布式格林-安普特降雨径流模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):47-54. (HUO Wenbo, LI Zhijia, ZHANG Ke, et al. Study on the distributed Green-Ampt rainfall-runoff model [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2022,50(3):47-54. (in Chinese))
- [6] 熊立华,郭生练. 分布式流域水文模型[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
- [7] 李治军,王华凡,侯岳,等. 我国无资料地区水文预报研究进展[J]. 水利科学与寒区工程,2022,5(5):46-50. (LI Zhijun, WANG Huafan, HOU Yue, et al. Advances in hydrological forecasting for no data area in China [J]. *Water Resources Science and Cold Area Engineering*,2022,5(5):46-50. (in Chinese))
- [8] 芮孝芳. 水文学研究进展[M]. 南京:河海大学出版社,2007.
- [9] 王纲胜,夏军,牛存稳. 分布式水文模拟汇流方法及应用[J]. 地理研究,2004(2):175-182. (WANG Gangsheng, XIA Jun, NIU Cunwen. Flow routing method and its application in distributed hydrological modeling[J]. *Geographical Research*,2004(2):175-182. (in Chinese))
- [10] 李致家,孔凡哲,王栋,等. 现代水文模拟与预报技术[M]. 南京:河海大学出版社,2010.
- [11] 姚成,章玉霞,李致家. 扩散波与马斯京根法在栅格汇流演算中的应用比较[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(1):6-10. (YAO Cheng, ZHANG Yuxia, LI Zhijia. Application and comparison of cell-to-cell diffusion wave and Muskingum routing methods [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2013,41(1):6-10. (in Chinese))
- [12] 董丰成,石朋,陆美霞,等. 分布式地貌瞬时单位线在闽江流域的应用探究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2020,42(1):1-6. (DONG Fengcheng, SHI Peng, LU Meixia, et al. Construction and Application of distributed geomorphologic instantaneous unit hydrograph in Minjiang River [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Science Edition)*, 2020,42(1):1-6. (in Chinese))
- [13] 石朋. 网格型松散结构分布式水文模型及地貌瞬时单位线研究[D]. 南京:河海大学,2006.
- [14] 芮孝芳. 单元嵌套网格产汇流理论[J]. 水利水电科技进展,2017,37(2):1-6. (RUI Xiaofang. Theory of runoff yield and confluence by grid inlaid in watershed basic unit [J]. *Advances in Water Resources and Hydropower Science and Technology*, 2017,37(2):1-6. (in Chinese))
- [15] RUI Xiaofang,YU Mei,LIU Fanggui,et al. Calculation of watershed flow concentration based on the grid drop concept[J]. *Water Science and Engineering*,2008,1(1):1-9.
- [16] 杨苗,龚家国,赵勇,等. 坡面流层流区动力学特性[J]. 水科学进展,2019,30(5):709-718. (YANG Miao, GONG Jianguo, ZHAO Yong, et al. Study of dynamic characteristics of laminar flow zone in overland flow [J]. *Advances in Water Science*, 2019,30(5):709-718. (in Chinese))
- [17] 刘飞,董占地. 不同降雨条件下城市下垫面表面薄层水流的典型参数试验研究[J]. 水科学进展,2020,31(4):565-574. (LIU Fei, DONG Zhandi. Experimental study on typical parameters of thin layer flow of urban underlying surface under different rainfall conditions [J]. *Advances in Water Science*,2020,31(4):565-574. (in Chinese))
- [18] 李致家,姚成,张珂,等. 基于网格的精细化降雨径流水文模型及其在洪水预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(6):471-480. (LI Zhijia, YAO Cheng, ZHANG Ke, et al. Research and application of the high-resolution rainfall runoff hydrological model in flood forecasting [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2017,45(6):471-480. (in Chinese))
- [19] 张珂,张企诺,陈新宇,等. 栅格新安江-地表地下双人工调蓄分布式水文模型[J]. 水资源保护,2021,37(5):94-101. (ZHANG Ke, ZHANG QINUO, CHEN XINYU, et al. Gridded Xin'anjiang-dual anthropogenic aboveground and underground regulation distributed hydrological model[J]. *Water Resources Protection*,2021,37(5):94-101. (in Chinese))

[20] 姚成,李致家,张珂,等. 基于栅格型新安江模型的中小河流精细化洪水预报[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):19-25. (YAO Cheng, LI Zhijia, ZHANG Ke, et al. Fine-scale flood forecasting for small and medium-sized rivers based on Grid-Xin' anjiang model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1):19-25. (in Chinese))

[21] 姚成. 基于栅格的新安江(Grid-Xinanjang)模型研究[D]. 南京:河海大学,2009.

[22] YAO Cheng, LI Zhijia, BAO Hongjun, 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.

[23] 孙阁. 林地土内径流速率的研究[J]. 水土保持学报, 1990(4):37-41. (SUN Ge. Study on runoff rate in forest soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1990(4):37-41. (in Chinese))

[24] GRIMALDI S, PETROSEL A, ALONSO G, et al. Flow time estimation with spatially variable hillslope velocity in ungauged basins[J]. Advances in Water Resources, 2010, 33(10):1216-1223.

[25] 刘学军, 龚健雅, 周启鸣, 等. 基于 DEM 坡度坡向算法精度的分析研究[J]. 测绘学报, 2004(3):258-263. (LIU Xuejun, GONG Jianya, ZHOU Qiming, et al. A study of accuracy and algorithms for calculating slope and aspect based on grid digital elevation model(DEM) [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004(3):258-263. (in Chinese))

(收稿日期:2022-12-13 编辑:刘晓艳)

(上接第 8 页)

[15] 姚成,李致家,张珂,等. 基于栅格型新安江模型的中小河流精细化洪水预报[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):19-25. (YAO Cheng, LI Zhijia, ZHANG Ke, et al. Fine-scale flood forecasting for small and medium-sized rivers based on Grid-Xin' anjiang model [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(1):19-25. (in Chinese))

[16] 李红霞,张新华,张永强,等. 缺资料流域水文模型参数区域化研究进展[J]. 水文, 2011, 31(3):13-17. (LI Hongxia, ZHANG Xinhua, ZHANG Yongqiang, et al. Review of hydrological model parameter regionalization for ungauged catchments[J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(3):13-17. (in Chinese))

[17] 张珂,张企诺,陈新宇,等. 栅格新安江-地表地下双人工调蓄分布式水文模型[J]. 水资源保护, 2021, 37(5):94-101. (ZHANG Ke, ZHANG Qinyu, CHEN Xinyu, et al. Gridded Xin' anjiang-dual anthropogenic aboveground and underground regulation distributed hydrological model[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5):94-101. (in Chinese))

[18] 赵人俊. 流域水文模拟:新安江模型与陕北模型[M]. 北京:水利电力出版社 1984.

[19] LEE S, CHU M L, SCHMIDT A R. Effective Green-Ampt parameters for two-layered soils[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2020, 25(4):4020004.

[20] 李致家,霍文博,张珂. 格林-安普特降雨径流模型改进及初步应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5):385-391. (LI Zhijia, HUO Wenbo, ZHANG Ke. Improvement and preliminary application of Green-Ampt rainfall-runoff model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(5):385-391. (in Chinese))

[21] 霍文博,李致家,张珂,等. 分布式格林-安普特降雨径流模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3):47-54. (HUO Wenbo, LI Zhijia, ZHANG Ke, et al. Study on the distributed Green- Ampt rainfall-runoff model [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(3):47-54. (in Chinese))

[22] CHENG X, MA X, WANG W, et al. Application of HEC-HMS parameter regionalization in small watershed of Hilly Area[J]. Water Resources Management, 2021, 4:1-16.

[23] CHENG Y, LI Z, YU Z, et al. A priori parameter estimates for a distributed, grid-based Xin' anjiang model using geographically based information[J]. Journal of Hydrology, 2012, 468:47-62.

[24] MOHAMMADZADEH-HABILI J, KHALILI D. Development of the Green-Ampt infiltration rate model and relationship of the GA model parameters with soil hydraulic parameters[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2021, 26(11):4021033.

[25] VERMA S, SINGH P K, MISHRA S K, et al. Activation soil moisture accounting (ASMA) for runoff estimation using soil conservation service curve number (SCS-CN) method[J]. Journal of Hydrology, 2020, 589:125114.

[26] 李致家,梁珂,阚光远,等. 新安江模型中河网汇流参数 Cs 的一种计算方法[J]. 水科学进展, 2016, 27(5):652-661. (LI Zhijia, LIANG Ke, KAN Guangyuan, et al. A method for deriving the river network flow concentration parameter Cs of the Xin' anjiang model[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(5):652-661. (in Chinese))

(收稿日期:2022-10-12 编辑:刘晓艳)