

Application of the DEM-Based DDRM Model in the Wujiang Basin

Mengran Tang, Lihua Xiong*, Peng Shu, Shilei Chen

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei
Email: mrtang@whu.edu.cn, *xiongh@whu.edu.cn

Received: Oct. 15th, 2020; accepted: Nov. 10th, 2020; published: Dec. 22nd, 2020

Abstract

Based on the digital elevation model data and the river network extracted using geographic information system, the DEM-based distributed rainfall-runoff model (DDRM) is built for the Wujiang basin and its parameters are calibrated by the SCE-UA optimization algorithm. The simulation performance of DDRM is evaluated by both the Nash-Sutcliffe Efficiency and the relative error of runoff depth and then compared to that of the Xinanjiang model. The results show that on the premise that the consistency of hydrological data is not destroyed, DDRM can achieve a better performance than the Xinanjiang model in simulating the runoff process. In addition to simulating the runoff process at the outlet of the watershed, DDRM can also simulate the spatial distribution within the basin of both the soil moisture and runoff at any time. For its simple structure and parsimonious parameters, DDRM has great application potential in humid basins.

Keywords

Runoff Simulation, Distributed Hydrological Model, Xinanjiang Model, Wujiang Basin

DDRM模型在乌江流域降雨径流模拟中的应用

汤孟然, 熊立华*, 舒鹏, 陈石磊

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉
Email: mrtang@whu.edu.cn, *xiongh@whu.edu.cn

收稿日期: 2020年10月15日; 录用日期: 2020年11月10日; 发布日期: 2020年12月22日

摘要

以地理信息系统(GIS)为平台, 对乌江流域的数字高程模型(DEM)进行处理, 提取了乌江流域的河网水系及数字流域信息, 构建基于DEM的分布式降雨径流模型(DDRM), 利用SCE-UA算法率定模型参数, 采用纳什效率系数和径

作者简介: 汤孟然(1998-), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要从事水文模型研究。

*通讯作者。

流相对误差对模拟效果进行评定分析,并与新安江模型的模拟结果进行对比。研究发现,在水文资料一致性未被破坏的前提下,DDRM对流域出口日流量过程的模拟效果略优于新安江模型。除了能模拟流域出口处的径流过程,DDRM还能模拟任一时刻土壤含水率及径流量的空间分布,且其结构简单、参数较少,可以在湿润地区推广应用。

关键词

径流模拟, 分布式水文模型, 新安江模型, 乌江流域

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

流域水文模型是进行水文科学研究的重要手段之一,是探究水文物理变化规律、解决实际水文生产实践问题的重要工具[1]。水文模型主要分为集总式水文模型和分布式水文模型。集总式模型将流域视为一个整体,并将降雨、蒸发等水文气象条件均匀分布于整个流域,主要考虑水的垂向运动,计算相对简便。而分布式模型则将流域划分为一个个网格,充分考虑了水文气象信息及土壤下垫面特征在空间上分布的不均匀性,将水的垂向运动与水平向运动均考虑在内,具有更强的物理机制。

随着 3S 技术(遥感技术(Remote sensing, RS)、地理信息系统(Geography information systems, GIS)、全球定位系统(Global positioning systems, GPS))的成熟和广泛应用,水文气象资料在空间上的分布信息越来越容易获取,分布式水文模型也获得了更广泛的发展与应用[2]。熊立华等[1]于 2004 年提出了一个基于 DEM 的分布式降雨径流模型(DEM-based distributed rainfall-runoff model, DDRM)。该模型曾成功应用于英国的 SlaptonWood 流域[3]、中国的清江流域[4]、渠江流域[5]、赣江流域[6]、旬河流域[7]、东江流域[8]和北江流域[9],其改良版还成功应用于典型喀斯特流域——西江流域[10]。本文将 DDRM 应用于武隆站上游的乌江流域进行径流模拟,并和三水源新安江模型[11](下文简称 XAJ 模型)的径流模拟效果进行对比分析。

2. 分布式水文模型 DDRM

2.1. 模型介绍

DDRM 是一个基于栅格单元产流计算和基于栅格流向进行逐栅格分级汇流演算的分布式水文模型[8]。构建 DDRM 时,首先利用 GIS 平台将研究的目标流域划分为相同大小的栅格单元,然后根据已知的水文站点资料将流域划分为数个子流域(图 1),从而更加充分的考虑流域内不同区域下垫面特征的差异并使模型运算过程并行化以提高模型运算效率。在模型产流部分,DDRM 假定流域的产流机制为蓄满产流,当发生降雨时,雨水直接渗入土壤,地下土壤蓄水量在完成降雨、蒸散发、地下水入流及出流的过程后发生变化,超过栅格土壤蓄水能力的部分将涌出地面形成浅层地表水并在重力作用下产生坡面流入栅格河道。在模型汇流部分,DDRM 首先利用熊立华等于 2007 年提出的分级确定法[12]来确定各个子流域内的栅格汇流演算顺序,从上游栅格开始,各栅格的产流量都根据栅格汇流演算顺序不断向下游进行演算至各个子流域的出口栅格(节点 d 和 e)处;然后再根据子流域之间的河网拓扑关系对各个子流域出口栅格进行河网汇流演算至全流域出口栅格(节点 f)。

2.2. 栅格产流

DDRM 的栅格产流计算基于蓄满产流机制进行,即扣除实际蒸散发后的净雨量直接汇入土壤,在完成地下水的水平向交换之后,超出土壤蓄水能力的土壤水涌出地面形成浅层地表水,并在重力作用下产生坡面流入河道(图 2)。

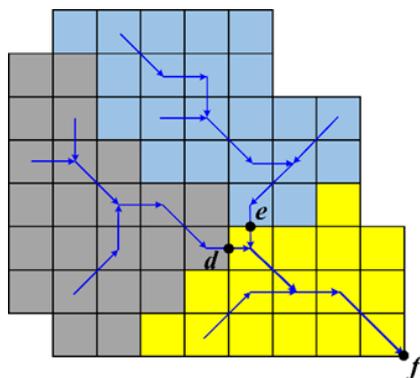


Figure 1. Discretization of catchment into sub-catchments and grids in DDRM
图 1. DDRM 栅格及子流域划分示意图[13]

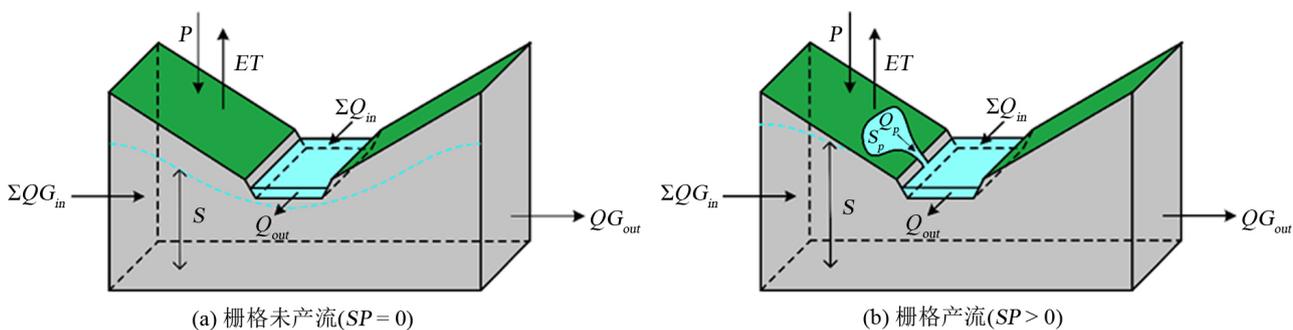


Figure 2. Hydrological processes involved in a grid in DDRM
图 2. DDRM 栅格单元产流计算示意图[13]

为了定义每个栅格处的土壤蓄水能力从而充分考虑流域下垫面条件空间分布的不均匀性，DDRM 利用地形指数来计算栅格 i 处的土壤蓄水能力如下(后文公式中参数的下标 i 表示栅格 i 处的参数，下标 t 表示 t 时刻时的参数):

$$TI_i = \ln \frac{\alpha_i}{\tan \beta_i} \quad (1)$$

$$SMC_i = S0 + \left(\frac{TI_i - TI_{\min}}{TI_{\max} - TI_{\min}} \right)^n \cdot SM \quad (2)$$

式中： TI_i 为栅格地形指数； α_i 为栅格集水面积； $\tan \beta_i$ 为地表坡度； SMC_i 为土壤蓄水能力； $S0$ 为全流域最小土壤蓄水能力； TI_{\min} 、 TI_{\max} 分别为全流域最小和最大地形指数； SM 为全流域土壤蓄水能力变化幅度。其中 $S0$ 、 n 、 SM 三个参数需通过算法进行优选。

基于蓄满产流机制，记栅格 i 处 t 时刻的地下土壤水蓄量的计算值为 $S_{i,t}$ ，当其大于 SMC_i 时，超出的部分冒出地表产流形成浅层地表水 $SP_{i,t}$ 。

浅层地表水在重力作用下形成坡面流 $QP_{i,t}$ 并汇入栅格河道，根据线性水库法计算如下：

$$QP_{i,t} = \frac{SP_{i,t}}{TP} \quad (3)$$

式中： TP 为反映坡面流形成的一个时间参数，需通过算法进行优选。

栅格 i 处的地下水出流量 $QGout_{i,t}$ 与该处的地下土壤水蓄量和地下水力坡度有关，DDRM 用地表坡度来近似

表示地下水水力坡度， $QGout_{i,t}$ 计算如下：

$$QGout_{i,t} = \frac{\max\{S_{i,t} - ST, 0\}}{TS} (\tan \bar{\beta})^b \quad (4)$$

式中： $ST = \alpha \cdot SMC_i$ ($0 < \alpha < 1$) 为地下水出流阈值，只有当地下土壤水蓄量超出该阈值时才会产生地下水出流， α 为反映地下水出流特性的一个参数； TS 为反映地下水出流的一个时间参数； $\tan \bar{\beta}$ 为该处的栅格平均坡度； b 为反映坡度对地下水出流影响程度的一个参数。其中 α 、 TS 、 b 需通过算法进行优选。

栅格 i 处的实际蒸散发量 $ET_{i,t}$ 计算如下：

$$ET_{i,t} = \frac{S_{i,t}}{SMC_i} PET_{i,t} \quad (5)$$

式中： $PET_{i,t}$ 为 3.3.2 中利用 Blaney-Criddle (B-C) 公式及反距离加权插值法计算所得的栅格 i 处 t 时刻的潜在蒸散发量。

栅格 i 处的地下水入流量 $Qin_{i,t}$ 为其相邻的所有上游栅格的地下水出流量之和。基于水量平衡的原理，根据时刻 t 时的地下土壤水蓄量，在考虑降雨、实际蒸散发、地下水出流和入流的变化后即可计算出栅格 i 在下一时刻 $t + \Delta t$ 时的地下土壤水蓄量。

2.3. 栅格汇流

栅格 i 内的河道入流量 $Qin_{i,t}$ 为其相邻上游各栅格河道出流量 $Qout_{j,t}$ 之和。栅格河道的汇流演算采用马斯京根法，在考虑坡面流的情况下，栅格河道出流量计算如下：

$$Qout_{i,t} = c_0 (Qin_{i,t} + QP_{i,t}) + c_1 (Qin_{i,t-\Delta t} + QP_{i,t-\Delta t}) + (1 - c_0 - c_1) Qout_{i,t-\Delta t} \quad (6)$$

式中： c_0 、 c_1 为马斯京根汇流参数，需通过算法进行优选。

2.4. 河网汇流

模型在每个子流域上分别进行栅格产汇流计算得到子流域的出口流量，然后根据河网拓扑关系利用马斯京根法从河段上游节点的入流过程 I_t 演算至下游节点的出流过程 O_t 从而实现河网汇流演算，其计算公式为：

$$O_t = hc_0 I_t + hc_1 I_{t-\Delta t} + (1 - hc_0 - hc_1) O_{t-\Delta t} \quad (7)$$

式中： hc_0 、 hc_1 为河网马斯京根汇流参数，需通过算法进行优选。

如图 1 所示，有些栅格可能同时是多条河流的汇流出口，此时可采用线性叠加法进行计算，即认为该栅格处的流量为上游多条河流独立向下游进行演算所得的流量之和，图 1 中节点 f 的总出流量 $O_{f,t}$ 计算如下：

$$O_{f,t} = O_{df,t} + O_{ef,t} + Qout_{f,t} \quad (8)$$

$$O_{df,t} = hc_{0,df} O_{d,t} + hc_{1,df} O_{d,t-\Delta t} + (1 - hc_{0,df} - hc_{1,df}) O_{df,t-\Delta t} \quad (9)$$

$$O_{ef,t} = hc_{0,ef} O_{e,t} + hc_{1,ef} O_{e,t-\Delta t} + (1 - hc_{0,ef} - hc_{1,ef}) O_{ef,t-\Delta t} \quad (10)$$

式中： O_f 、 O_d 、 O_e 分别为节点 f 、 d 、 e 的总出流量； O_{df} 、 O_{ef} 分别为节点 d 、 e 演算到节点 f 的流量； $hc_{0,df}$ 、 $hc_{1,df}$ 分别为节点 d 至节点 f 的河网马斯京根汇流参数，需通过算法优选； $hc_{0,ef}$ 、 $hc_{1,ef}$ 分别为节点 e 至节点 f 的河网马斯京根汇流参数，需通过算法优选； $Qout_f$ 为节点 f 所对应的区间出流量。

若某个节点对应的子流域是头流域(head watershed)时(即图 1 中的节点 d 和 e)，该节点的总出流量即等于其对应的区间出流量，即：

$$O_{d,t} = Qout_{d,t} \quad (11)$$

$$O_{e,f} = Qout_{e,t} \quad (12)$$

式中： $Qout_d$ 、 $Qout_e$ 分别为节点 d 、 e 对应的区间出流量。

3. DDRM 在乌江流域的构建

3.1. 研究区域概况

乌江是长江右岸上游最大的一条支流，发源于贵州省境内威宁县香炉山花鱼洞，至涪陵汇入长江。乌江流域上、中游居于云贵高原东部，下游局部位于四川盆地、武陵山区和鄂西南山地，整个流域位于东经 $104^{\circ}18' \sim 109^{\circ}22'$ 、北纬 $26^{\circ}7' \sim 30^{\circ}22'$ 之间。乌江全长 1037 km，其流域面积约为 $87,920 \text{ km}^2$ 。乌江河段上支流众多，仅在贵州省境内，流域面积大于 100 km^2 的支流就有 75 条，在整个乌江流域内，有 15 条一级支流的流域面积超过了 1000 km^2 [14]。乌江流域大部分地区都属于亚热带季风气候，其年平均气温为 $10^{\circ}\text{C} \sim 19^{\circ}\text{C}$ ，总体呈现西冷东热的特征，年均降雨量为 $1100 \sim 1900 \text{ mm}$ ，其汛期(5~10月)的降雨量占全年降雨量的 75% 以上。

本文选取乌江武隆站以上区域作为研究对象，其面积为 $83,035 \text{ km}^2$ 。图 3 给出了研究区域内武隆站及 25 个气象观测站点的位置分布。研究采用的水文气象资料包括：武隆站 1976~1990 年的逐日径流序列和 25 个气象观测站点(气象观测站点根据泰森多边形法选取) 1976~1990 年的逐日降雨量和日平均气温序列。并将武隆站的径流序列作为本文的模拟对象。

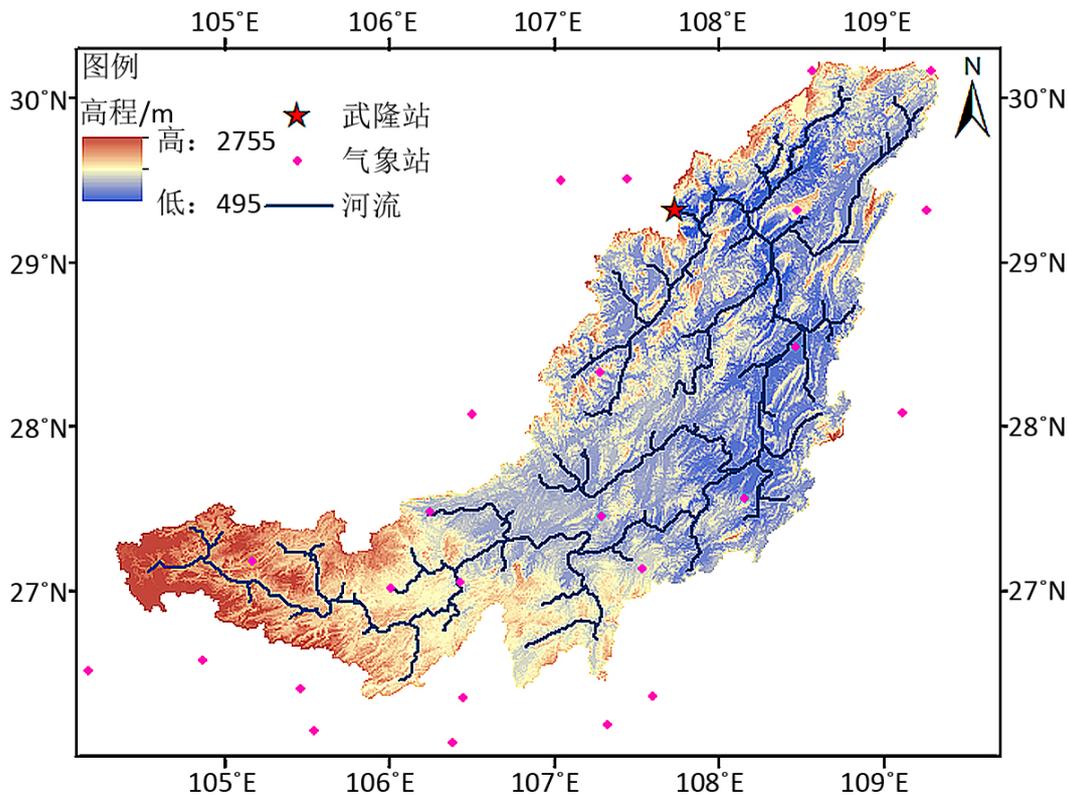


Figure 3. Topography of Wujiang basin and the locations of a hydrological station and meteorological stations

图 3. 乌江流域及水文气象站点图

3.2. 数字流域信息提取

本文采用从 <http://srtm.csi.cgiar.org/> 网站上下载的分辨率为 $3''$ (约为 88 m) 的 DEM 数据，利用 ArcGIS 软件将

其重采样至 1 km 的分辨率后进行 DEM 的预处理, 包括填洼、计算栅格流向、计算栅格集水面积、提取河网水系和确定流域边界等过程, 然后根据栅格的坡度和集水面积来计算栅格地形指数。由于仅有武隆站一个水文站的日径流序列, 因此本文不对乌江流域进行子流域的划分。

3.3. 水文气象输入数据

3.3.1. 降雨

分布式水文模型相对于集总式水文模型而言最主要的优势就是能够充分考虑水文气象资料在空间上的不均匀分布。根据研究表明, 降雨及时空分配是水文模型最为关键的输入数据[15], 10%的降雨误差可以导致 35%的径流误差[16], 因此在空间上构建合理的降雨数据对提升模型的模拟效果至关重要。由于站点降雨数据是离散的, 为了能让流域内的降雨数据在空间上连续分布, 本文采用反距离加权插值法[17]对站点的降雨数据进行插值计算。反距离加权插值法根据相近相似的原则, 每个站点的数据对流域内的每个点都有一定的权重, 这个权重随着距离的增加而减小, 即站点数据对距离越近的点贡献越大, 对距离越远的点贡献越小。本文以处理后的 DEM 栅格为基准进行降雨数据的空间插值。

3.3.2. 潜在蒸散发

由于缺少实测蒸散发数据, 本文采用以温度为基础的 B-C 公式来计算潜在蒸散发量。 t 时刻的潜在蒸散发量 $PET(t)$ 计算如下:

$$PET(t) = k \cdot p(t) \cdot [0.46 \cdot T_a(t) + 8.13] \quad (13)$$

式中: k 为一经验系数, 取 0.85; $p(t)$ 代表 t 时刻的白昼时间占全年白昼时间的比例; $T_a(t)$ 为 t 时刻的日平均温度。

在计算得到所有气象站点的逐日潜在蒸散发数据之后, 用反距离加权插值法对站点潜在蒸散发数据进行插值计算从而获得在空间上连续分布的潜在蒸散发数据。

3.4. 模型参数率定

选用由美国亚利桑那大学的 Duan 等[18]于 1992 年提出的 SCE-UA 算法, SCE-UA 算法基于复合型搜索和自然界生物进化的原理提出, 是一种全局优化算法, 能快速、高效地搜索到参数的全局最优解[19]。

由于缺少水库调度的实际数据, 为了尽量避免修建水库等其他人为因素的影响, 本文在已有资料的基础上尽量选择早期数据进行研究, 因此本文选取 1976 年 1 月 1 日至 1979 年 12 月 31 日作为模型率定期, 1980 年 1 月 1 日至 1981 年 12 月 31 日作为模型验证期, 将模型预热期设置为 100d, 并采用模拟日径流的纳什效率系数 (Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE) 作为模型率定的目标函数, NSE 的值越接近 1 则代表模型的模拟效果越好, 其计算式如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T [Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t)]^2}{\sum_{t=1}^T [Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}}]^2} \quad (14)$$

除了以 NSE 作为模型模拟效果的评定指标外, 还选取径流深相对误差 (Relative Error, RE) 作为评定指标, 其计算式如下:

$$RE = \frac{\sum_{t=1}^T [Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t)]}{\sum_{t=1}^T Q_{obs}(t)} \times 100\% \quad (15)$$

式中: T 表示总时段数目; $Q_{sim}(t)$ 为时刻 t 的模拟径流量; $Q_{obs}(t)$ 为时刻 t 的实测径流量; $\overline{Q_{obs}}$ 为全时段实测

径流量的平均值。

DDRM 各参数的物理意义及率定结果见表 1, 由于本文未对乌江流域划分子流域, 无需进行河网汇流过程, 故不考虑 hc_0 和 hc_1 两个参数。

此外, 本文还在乌江流域构建 XAJ 模型进行日径流模拟, 其原理参考文献[11], 并与 DDRM 的模拟结果进行对比, XAJ 模型的参数率定同样采用 SCE-UA 算法, 其参数的物理意义及率定结果见表 2。

Table 1. Descriptions of the DDRM parameters

表 1. DDRM 参数表

参数	取值范围	单位	物理意义	率定值
$S0$	5~500	mm	全流域栅格土壤最小蓄水能力	24.76
SM	5~800	mm	全流域栅格土壤蓄水能力变化幅度	658.26
TS	0~20	day	反映地下水出流特性的一个时间参数	13.45
TP	0~10	day	反映坡面流形成的一个时间参数	2.43
α	0~1	-	反映地下水出流特性的一个参数	0.18
b	0~1	-	反映坡度对地下水出流影响程度的一个参数	0.13
n	0~1	-	反映土壤蓄水能力与地形指数之间非线性关系的一个参数	0.97
c_0	0~1	-	栅格河道马斯京根汇流参数	0.99
c_1	0~1	-	栅格河道马斯京根汇流参数	0.01
hc_0	0~1	-	河网马斯京根汇流参数	-
hc_1	0~1	-	河网马斯京根汇流参数	-

Table 2. Descriptions of the XAJ model parameters

表 2. XAJ 模型参数表

参数	取值范围	单位	物理意义	率定值
WM	100~200	mm	流域平均张力水容量	142.35
WUM	5~50	mm	上层张力水容量	12.72
WLM	5~100	mm	下层张力水容量	86.35
KC	0.5~1.5	-	蒸散发能力折算系数	0.90
C	0.1~0.3	-	深层蒸散发扩散系数	0.27
B	0.2~0.9	-	流域蓄水容量-面积分布曲线指数	0.57
SM	5~100	mm	自由水蓄水容量	45.35
EX	1.0~1.5	-	自由水蓄水容量-面积分布曲线指数	1.14
KG	0~0.7	-	自由水库对地下径流的日出流系数	0.20
CG	0.9~0.999	-	地下径流消退系数	0.99
KSS	0~0.7	-	自由水库对壤中流的日出流系数	0.38
CI	0~0.9	-	壤中流消退系数	0.59
CS	0~0.9	-	地表径流消退系数	0.99
IMP	0~1	-	不透水面积所占比例	0.08
XE	0~1	-	马斯京根法流量比重系数	0.32

4. 结果分析

DDRM 及 XAJ 模型在率定期和验证期的径流模拟效果见表 3。

Table 3. Evaluation of the model-simulated runoff from DDRM and Xinanjiang model
表 3. DDRM 和 XAJ 模型径流效果评价表

时期	年份	降雨量/mm	平均气温/ °C	实测径流深/mm	模拟径流量/mm		RE/%		NSE	
					DDRM	XAJ	DDRM	XAJ	DDRM	XAJ
率定期	1976	1 519.1	16.01	779.5	775.8	787.1	-0.48	0.98	0.87	0.72
	1977	1 577.2	14.85	942.0	914.1	898.8	-2.96	-0.46	0.78	0.75
	1978	1 391.2	15.42	581.5	668.5	654.2	14.96	12.50	0.76	0.77
	1979	1 515.9	15.51	620.5	683.3	641.4	10.12	3.37	0.81	0.79
验证期	1980	1 626.9	15.00	848.0	903.8	909.5	6.58	7.25	0.82	0.73
	1981	1 416.7	15.25	441.3	596.4	545.6	35.15	23.63	0.36	0.17

分析表 3 中数据：从 NSE 的角度来说，在率定期 4 年数据中，DDRM 和 XAJ 模型的 NSE 均大于 0.7，且 DDRM 的 NSE 有 2 年大于 0.8，其 4 年的模拟效果整体较 XAJ 模型更优，在验证期 2 年数据中，DDRM 和 XAJ 模型在 1980 年的模拟效果较好，但 1981 年的模拟情况较差，其原因将在后文进行猜测分析，总体来说 DDRM 和 XAJ 模型对于乌江流域这一湿润流域模拟效果较好，且 DDRM 模拟效果略优于 XAJ 模型；从 RE 的角度来说，在全部 6 年的数据中，DDRM 和 XAJ 模型互有优劣，总体来说模拟效果基本相当。

在 6 年的模拟中，1981 年的模拟情况非常差，该年出现了实测径流深异常小的情况，在其年降雨量及平均气温与其他年份大致相当的情况下，该年出现极端气候现象的可能性较小，因此推测该异常现象由人类活动导致。根据文献[14]中的资料显示：乌江干流梯级开发的第六个电站，也是第一座大型水电站，乌江渡水电站，在 1981 年完成了第 2 台机组的建成投产。推测可能是由于水电站的建设过程中修建引水隧洞、大江截流等施工过程以及投产后的调度过程等大规模人类活动从一定程度上破坏了短期内水文资料的一致性从而导致 1981 年模拟效果不佳。

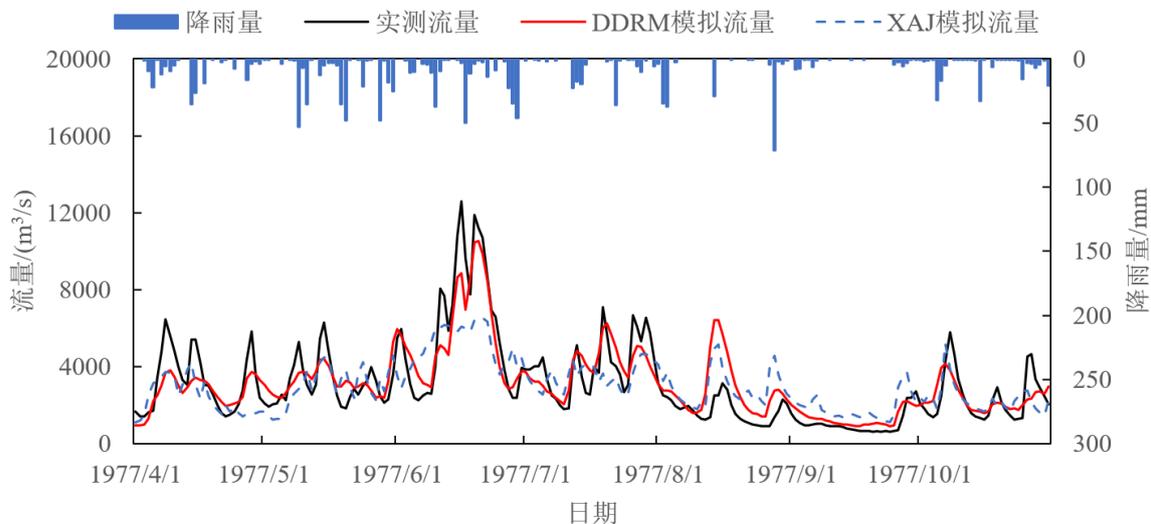


Figure 4. Time series of observed runoff and simulated runoff over the flood season in 1977

图 4. 1977 年洪水季节实测与模拟日径流量过程对比图

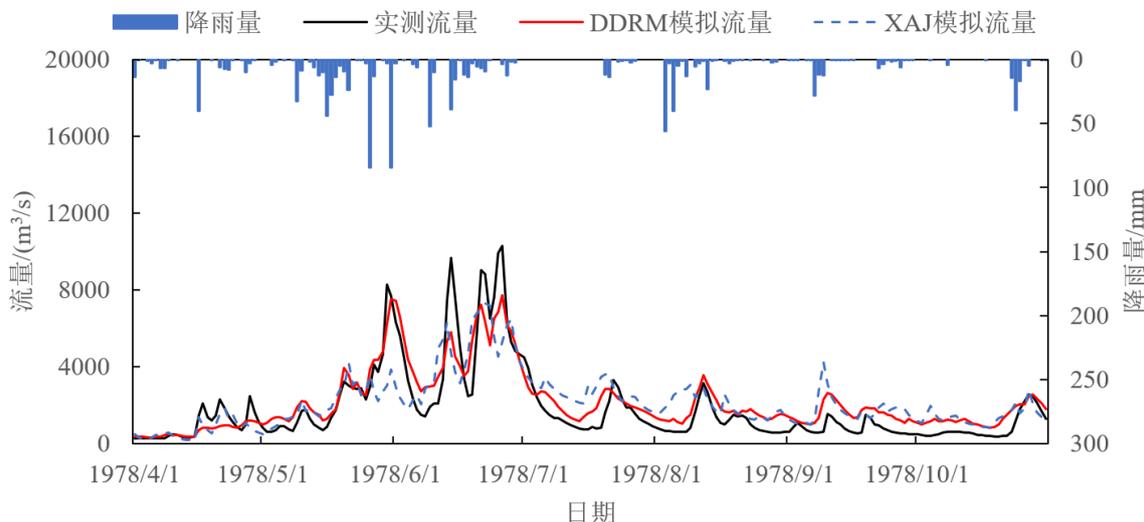


Figure 5. Time series of observed runoff and simulated runoff over the flood season in 1978
 图 5. 1978 年洪水季节实测与模拟日径流量过程对比图

在 DDRM 和 XAJ 模型模拟效果都较好的年份中选取径流深最大和最小的年份(1977 年和 1978 年)中洪水季节的模拟日径流序列进行绘图展示(图 4、图 5)。从图 4 和图 5 中也可以发现, DDRM 与 XAJ 模型在峰现时间的模拟上与实测径流基本吻合,但在洪峰量级的模拟上, DDRM 略优于 XAJ 模型。

除了能够模拟流域出口的日径流序列, DDRM 还具有模拟流域内土壤含水率 $\theta_{i,t}$ 和径流量 Q 在时空间上分布的能力。本文选取 19780525 场次洪水进行研究, DDRM 对本次洪水模拟的 NSE 为 0.72, 洪峰流量相对误差为 -9.06%, 模拟峰现时间与实测峰现时间仅相差 1 d, 模拟效果较好。本次洪水的流域出口在整个洪水期间的径流模拟情况如图 6 所示。

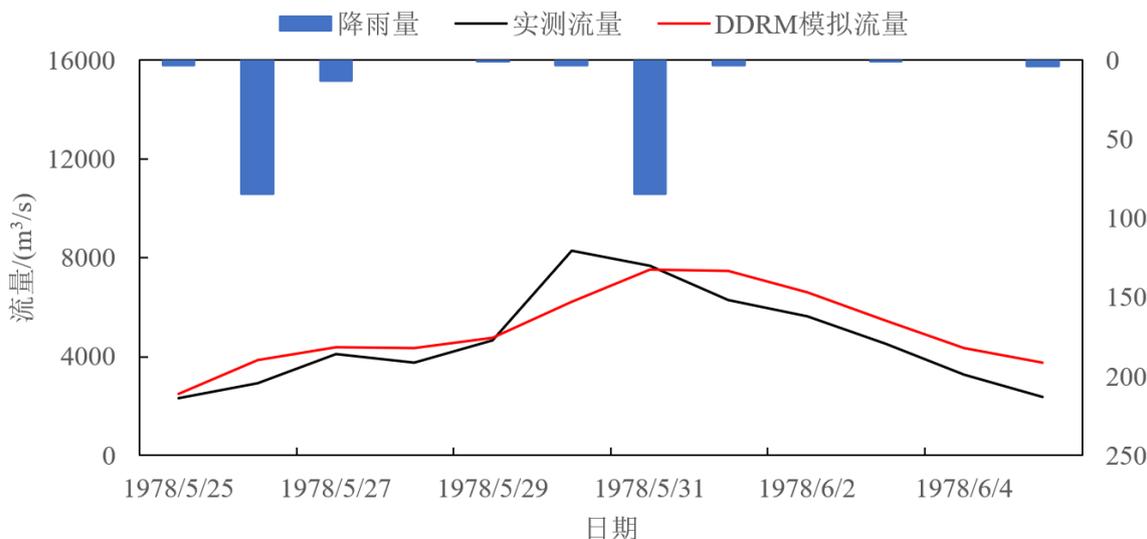


Figure 6. Time series of observed runoff and simulated runoff from DDRM during "19780525" flood
 图 6. 19780525 号场次洪水实测流量与 DDRM 模拟流量过程对比图

图 7 给出了该次洪水在乌江流域中不同时刻的日土壤含水率的空间分布情况。在涨水时刻(19780528), 流域大部分区域土壤含水率在 0.8 左右。在洪峰时刻(19860531), 由于连续的强降雨, 此时流域中几乎大部分地区都趋于饱和。在退水时刻(19780604), 整个乌江流域的土壤含水率明显降低。

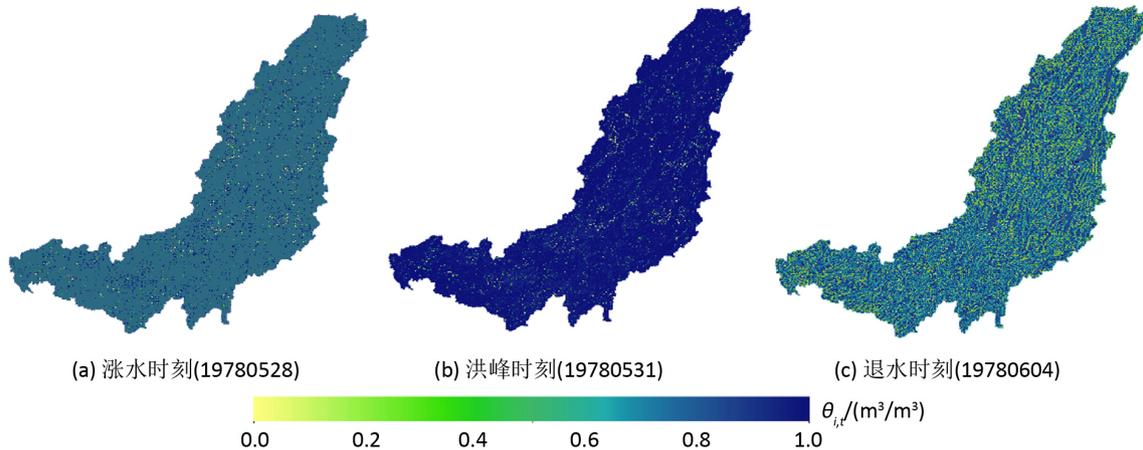


Figure 7. The spatial distribution of simulated soil moisture contents from DDRM on the four days during “19780525” flood

图 7. 乌江流域在 19780525 场次洪水中不同时刻土壤含水率的空间分布图

图 8 则给出了该次洪水在乌江流域中不同时刻的日径流量空间分布情况，根据图中信息可以发现，径流量在每一段河网上都呈现从上游往下游逐渐增大的趋势，且属于河网水系的栅格处的径流量明显大于非河网水系处栅格的径流量。从整个时段来看，洪峰时刻(19780531)的径流量略大于涨水时刻(19780528)，明显大于退水时刻(19780604)，在退水阶段，随着时间的推移，全流域的径流量逐渐减小，径流量较高的区域基本属于乌江河网水系部分。

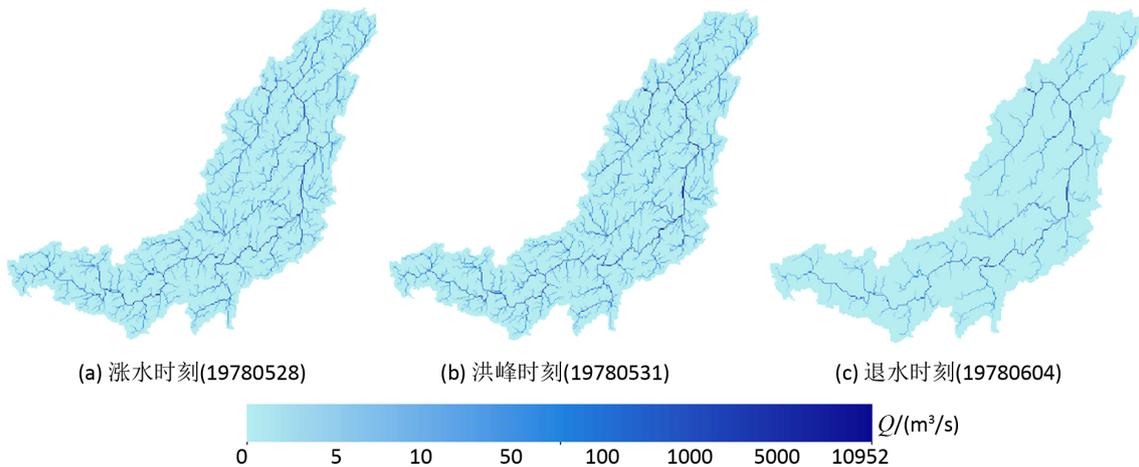


Figure 8. The spatial distribution of simulated runoff values from DDRM on the four days during “19780525” flood

图 8. 乌江流域在 19780525 场次洪水中不同时刻日径流量的空间分布图

5. 结语

本文以武隆站上游的乌江流域为研究对象构建 DDRM 进行 1976~1981 年的日径流模拟，以纳什效率系数 NSE 和径流总量相对误差 RE 这两个指标进行精度评定，并选用三水源新安江模型对比分析。得出结论如下：在保证水文资料一致性不被破坏的前提下，DDRM 径流模拟的 NSE 较新安江模型略优，径流总量相对误差 RE 的模拟效果与新安江模型基本相当。总体而言，DDRM 在乌江流域的模拟效果略优于新安江模型。

DDRM 除了能模拟流域出口处全时段的径流数据，也能够模拟流域内任一时刻土壤含水率及径流量的空间分布，本文选取 19780525 场次洪水对 DDRM 的这一能力进行了展示。

由于缺少水库调度的数据, 本文未能进一步模拟水库投产运行后的日径流序列, 这一不足之处可以作为以后的研究内容。

总的来说, DDRM 结构简单、参数较少且物理过程明确, 在已经成功应用于多个湿润地区大中型流域的基础上, 本文将成功应用于乌江流域, 进一步表明了 DDRM 具有较大的推广价值, 值得在其他流域进一步探究其应用前景。

基金项目

国家重点研发计划项目(2017YFC0405901)和国家自然科学基金项目(51525902)。

参考文献

- [1] 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.
XIONG Lihua, GUO Shenglian. Distributed hydrological model. Beijing: China Water & Power Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 徐宗学. 水文模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
XU Zongxue. Hydrological model. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [3] 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 and TIAN Xiangrong. DEM-based distributed hydrological model and its application. Advances in Water Science, 2004, 15(4): 517-520. (in Chinese)
- [4] 龙海峰, 熊立华, 万民. 基于 DEM 的分布式水文模型在清江流域的应用[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(1): 71-78.
LONG Haifeng, XIONG Lihua and WAN Min. Application of the DEM-based distributed rainfall-runoff model in the Qingjiang basin. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(1): 71-78. (in Chinese)
- [5] XIONG, L., YANG, H., ZENG, L. and XU, C. Evaluating consistency between the remotely sensed soil moisture and the hydrological model-simulated soil moisture in the Qujiang catchment of China. Water, 2018, 10(3): 291.
<https://doi.org/10.3390/w10030291>
- [6] XIONG, L., ZENG, L. Impacts of introducing remote sensing soil moisture in calibrating a distributed hydrological model for streamflow simulation. Water, 2019, 11(4): 666. <https://doi.org/10.3390/w11040666>
- [7] 刘移胜, 熊立华. 气候与土地利用变化对旬河流域径流的影响研究[J]. 水资源研究, 2013, 2(3): 181-187.
LIU Yisheng, XIONG Lihua. Research on streamflow responses to land use change and climate variability in Xunhe catchment. Journal of Water Resources Research, 2013, 2(3): 181-187. (in Chinese)
- [8] 曾凌, 熊立华. 东江流域分布式降水径流模拟研究[J]. 人民珠江, 2018, 39(11): 1-7, 21.
ZENG Ling, XIONG Lihua. Distributed rainfall-runoff simulation in Dongjiang basin. Pearl River, 2018, 39(11): 1-7, 21. (in Chinese)
- [9] 万民, 熊立华, 董磊华. 飞来峡流域基于栅格 DEM 的分布式水文模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(5): 549-553.
WAN Min, XIONG Lihua and DONG Leihua. Grid DEM-based distributed hydrological modeling for Feilaixia watershed. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(5): 549-553. (in Chinese)
- [10] 陈石磊, 熊立华, 查悉妮, 舒鹏. 考虑喀斯特地貌的分布式降雨径流模型在西江流域的应用[J]. 人民珠江, 2020, 41(5): 17-24.
CHEN Shilei, XIONG Lihua, ZHA Xini and SHU Peng. Application of a DEM-based distributed rainfall-runoff model considering karst landform in the Xijiang river basin. Pearl River, 2020, 41(5): 17-24. (in Chinese)
- [11] 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.
ZHAO Renjun. Basin hydrological simulation: Xinanjiang model and Shanbei model. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1984. (in Chinese)
- [12] 熊立华. 分布式水文模型中栅格汇流演算顺序的确定[C]//中国水利学会第三届青年科技论坛论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2007: 305-309.
XIONG Lihua. The determination of the sequence of grid routing in distributed hydrological model. In: Proceedings of the 3rd youth science and technology forum of Chinese hydraulic engineering society. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2007: 305-309. (in Chinese)
- [13] 熊立华, 郭生练, 曾凌, 万民. 珠江流域分布式降雨径流模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
XIONG Lihua, GUO Shenglian and WAN Min. Distributed rainfall-runoff simulation in Zhujiang basin. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)
- [14] 黄健民. 乌江流域研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.

-
- HUANG Jianmin. Research on Wujiang basin. Beijing: China Science and Technology Press, 2007. (in Chinese)
- [15] SKOP, E., LOAICIGA, H. A. Investigating catchment hydrology and low flow characteristics using GIS. *Nordic Hydrology*, 1998, 29(2): 105-128. <https://doi.org/10.2166/nh.1998.0007>
- [16] RIFAI, H. S., BROCK, S. M., ENSOR, K. B. and BEDIENT, P. B. Determination of low-flow characteristics for Texas streams. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2000, 126(5): 310-319. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2000\)126:5\(310\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2000)126:5(310))
- [17] SHEPARD, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: *Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference*. New York: Association for Computing Machinery, 1968: 517-524. <https://doi.org/10.1145/800186.810616>
- [18] DUAN, Q., SOROOSHIAN, S. and GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 1992, 28(4): 1015-1031. <https://doi.org/10.1029/91WR02985>
- [19] DUAN, Q. Y., GUPTA, V. K. and SOROOSHIAN, S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of optimization theory and applications*, 1993, 76(3): 501-521. <https://doi.org/10.1007/BF00939380>