

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2023002

陆海田,朱立煌,倪晋.HEC-HMS模型和NAM模型在降雨径流模拟中的应用研究[J].中国防汛抗旱,2023,33(8):41-46.LU Haitian,ZHU Lihuang,NI Jin.Research on application of HEC-HMS model and NAM model in rainfall runoff simulation[J].China Flood & Drought Management,2023,33(8):41-46.(in Chinese)

HEC-HMS模型和NAM模型 在降雨径流模拟中的应用研究

陆海田¹ 朱立煌² 倪晋¹

(1.安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院 水利水资源安徽省重点实验室,合肥230000;

2.安徽省铜陵市水利局,铜陵244000)

摘要:HEC-HMS(Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System)模型是半分布式水文模型,NAM(Nedbor-Af-strømnings-Model)模型是集总式概念性模型,通过对两种模型计算原理和模型架构及参数组成进行对比,并选取滁河沙河集子流域的5场日径流进行模拟,通过模拟结果对两种模型在降雨径流模拟性能上进行比较研究。研究表明,两种模型均有较好的模拟效果,预报的径流深均在许可误差范围内。两种模型在降雨径流模拟过程中均存在一定的局限性,HEC-HMS模型计算功能强大,部分参数能直接反映流域的具体特性,但是其建模过程较繁琐,且内部的观测值难以进行检验,NAM建模过程简便,所需参数较少且物理意义明确,但是模型计算过程忽略了流域的空间变异及产流的空间分布。

关键词:HEC-HMS模型;NAM模型;降雨径流;水文模拟;模型参数

中图法分类号:TV121

文献标识码:A

文章编号:1673-9264(2023)08-41-06

0 引言

流域水文模型是在认识流域水文规律基础上,通过一定计算手段对流域产汇流计算、洪水过程进行模拟研究,旨在应用水文学、物理学、数学等学科知识对降雨径流形成过程进行局部和综合模拟,水文模型也一直是水文学和水资源等领域的重要基础研究课题之一^[1]。

流域水文模型是信息革命造就的一个具有勃勃生机的水文科学研究领域,是水文科学与计算机相结合的产物。早在20世纪60年代,水文学界就对水文模型持有两种截然不同的态度:一种认为有了模型就不需要进行水文观测了,用模型可以直接由降雨过程推导出洪水过程;另一种认为模型只是水文学中的计算公式,其并不能解决实

际洪水过程中遇到的复杂水文问题^[2]。模型可以看作是一个提供数学物理方程定解问题的系统,模型结构就是泛定方程,模型参数就是这个泛定方程的系数,模型的状态变量就是所包含的未知函数,模型的激励、初始和边界状态就是定解条件^[3]。模型有多种形式,分为物理模型、解析式模型、数学模型等。水文模型通常指水文数学模型,用数学方法或系统理论来描述原型各种变量之间的关系,通过模型结构内在的计算逻辑,模拟和预测多种情形下的水文过程。随着计算机的发展和普及,水文模型得到了前所未有的发展,数量也急剧增长,至21世纪初,世界上有使用价值的水文模型就多达70余个,且还在不断发展壮大,这就为求解各种复杂条件下的水文过程问题带来了可能性。虽然水文模型的数量繁多,但从发展和运用角度看,水文模型

收稿日期:2023-01-05

第一作者信息:陆海田,男,工程师,E-mail:89070361@qq.com。

基金项目:安徽省自然科学基金项目(2208085US04)。

可分为确定性模型和随机模型^[4]。NAM(Nedbør-Afstrømnings-Model)模型为概念性集总式模型^[5],HEC-HMS(Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System)为半分布式水文模型^[6],均为确定性模型。目前对NAM、HEC-HMS模型已有比较多的适用性研究,但是对两种模型的应用对比研究则较少,基于此,本文将在利用数字高程模型(DEM)、土地利用、土壤质地等下垫面资料基础上,对两种模型的降雨径流进行比较研究。以期通过研究来分析两种模型在降雨径流模拟中的适用性以及其各自的优缺点。

1 HEC-HMS模型和NAM模型的结构原理比较

1.1 HEC-HMS模型

HEC-HMS水文模型是一种具有物理概念的半分布式水文模型,包括产流计算、坡面汇流、基流、河道洪水演进4个计算模块。模型在广泛考虑流域下垫面的基础上,以集水区边界将流域划分为若干个子流域,在每个子流域上可以选择若干不同的计算方法进行产汇流计算,然后通过一定方法进行河道洪水演进计算^[7]。HEC-HMS模型结构示意图如图1所示。

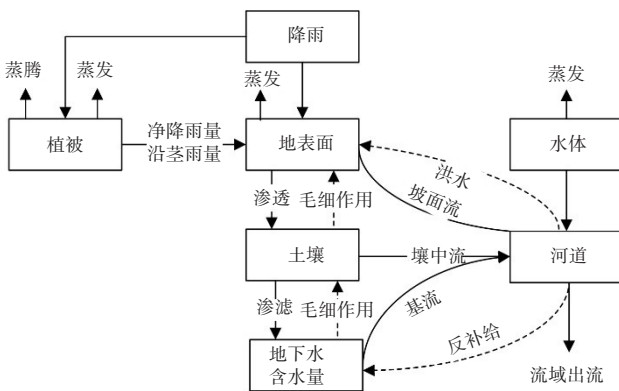


图1 HEC-HMS模型结构示意图

1.2 NAM模型

NAM水文模型是一种集总式概念性模型,将整个流域作为一个整体进行分析,所采用的参数和变量均代表的是整个流域面上的平均值,参数和变量不能实测,可以根据流域自然特征进行初定,通过历史水文资料的率定确定最终参数。模型将流域分为4个蓄水层进行产汇流计算:融雪

蓄水层、地表蓄水层、浅层蓄水层、地下蓄水层。通过连续计算这4个不同但相互作用的储水层含水量简单定量描述了陆相水文循环^[8]。

模型的蒸散发计算采用双层蒸发模型。当地表蓄水层最大储水量大于蒸散发能力时,以最大的蒸散发能力进行蒸发,否则,第一层地表蓄水层的需水量全部蒸发,不足部分从第二层根区蓄水层进行蒸发,实际蒸发量与剩余蒸散发能力及根区相对含水量成正比。

当地表蓄水层含水量大于最大储水量,实际降雨量扣除蒸散发和下渗后就会产生地表径流。NAM模型产流计算包括地表流、壤中流、基流3种模式。汇流采用先演进后求和的模式进行计算,即3种水源先分别采用线性水库单独计算汇流,然后在流域出口处叠加得到总径流^[9]。NAM模型结构示意图如图2所示。

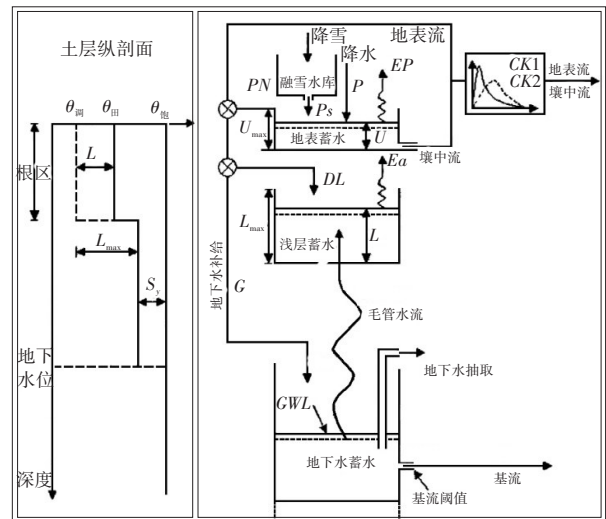


图2 NAM模型结构示意图

注:图中, $\theta_{田}$ 为土壤田间持水量,mm; $\theta_{凋}$ 为土壤凋萎含水量,mm; $\theta_{饱}$ 为土壤饱和含水量,mm; S_1 为地下蓄水层出水系数,无量纲; PN 为净降雨量,mm; PS 为净雪量,mm; EP 为潜在蒸发量,mm; Ea 为实际蒸发量,mm; DL 为浅层蓄水层下渗量,mm; GWL 为地下水水位,m; T_{lag} 为洪峰滞时,h。

HEC-HMS模型在产流过程中考虑了流域下垫面的影响,其中SCS曲线法中的参数CN值是反映流域土地利用、土壤质地等特征的一种综合参数^[10],坡面汇流中的洪峰滞时 T_{lag} 可以通过分析流域DEM的汇流长度及汇流坡度进行估算。而NAM模型则简化这一过程,用地表蓄水层最大储水量(U_{max})、根区蓄水层最大储水量(L_{max})、地表径流系数

(C_{QOF})等参数反应流域下垫面情况,模型结构简单且参数较少,参数可通过软件自带的自动优化功能进行率定检验,调参过程较为简单便捷,但是模型对产流过程过于简化,细节反映不足,会在一定程度上影响模型的精度。

2 模型在沙河集流域的应用

2.1 流域概况

沙河集流域位于安徽滁州市境内,为滁河左岸一级清流的源头地区,流域面积301.2 km²。流域属亚热带季风气候区,雨量充沛,降水在年内的分配与季风活动相应,年降水量主要集中在6—9月。流域内有董家洼、曲亭、施集、珠龙、沙河集5个雨量站,且流域出口为沙河集水库,故本文称之为沙河集流域,该流域有较全的反推入库流量资料,可以通过泰森多边形计算流域各雨量站在研究区的权重。沙河集流域位置示意图见图3。

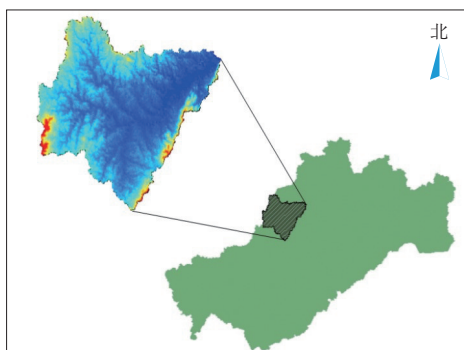


图3 沙河集流域位置示意图

本文选择2015年、2016年、2017年作为率定期,2018年和2020年作为验证期,所用数据均为汛期(5—9月)数据。包括较为齐全的降雨、流量、蒸发资料。

2.2 下垫面数据来源

DEM和土地利用数据均来源于中科院资源环境与科学数据中心,其中DEM数据精度为30 m×30 m,土地利用数据精度为1 km×1 km。土壤质地数据来源于联合国粮食及农业组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)所构建的世界土壤数据库(HWSD),数据精度1 km×1 km。通过ArcGIS软件进行裁剪获得研究区域的数据。

2.3 模型建模

HEC-HMS建模是利用其自带GIS模块对研究区的

DEM进行处理,通过填注、水流方向与汇流累积计算、提取河网、子流域划分等步骤^[11],对研究的区域进行子流域划分,最后得到的研究区HEC-HMS模型结构概化图,如图4所示。

NAM模型建模则是利用研究区域的雨量站分布通过泰森多边形计算各雨量站在研究区域的权重,在NAM模型降雨模块中输入各雨量站的降雨信息及其权重(图5)。



图4 研究区HEC-HMS模型结构概化图

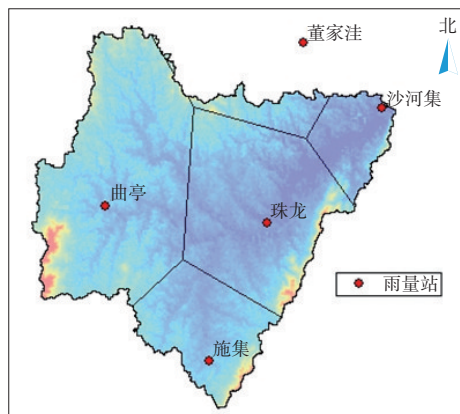


图5 沙河集流域泰森多边形

2.4 模型参数

HEC-HMS模型根据其模型计算的4个模块中选择的计算方法不同,其参数结构也不同。根据前人研究经验^[12-15]以及本研究区的实际情况,本文产流模块选择SCS (Soil Conservation Service)曲线法、坡面汇流模块选择SCS单位线法、基流模块选择消退基流法、河道汇流模块选择马斯京根法(表1)。

NAM模型根据其模型结构选取9个参数作为其主要

计算参数,具体见表2。

表1 HEC-HMS模型参数结构

计算方法	计算参数	参数意义
SCS曲线法	CN	反映降雨前流域下垫面特征的综合参数,无量纲
	Initial Abstraction	初始雨量损失值,mm
SCS单位线法	Lag Time	集水区的洪峰延时,min或h
消退基流法	Initial Discharge	初始基流量,m ³ /s
	Recession Constant	表征在暴雨事件之间基流消退的速度,无量纲
	Ratio to Peak	表征暴雨事件期间,当前流量与峰值流量的比值,无量纲
马斯京根法	Muskingum K	表征洪水波通过演进河段的运动时间,h
	Muskingum X	表征演进河段入流和出流影响的权重,无量纲

表2 NAM模型参数结构

参数	具体参数	物理意义
U_{max}	15	地表蓄土层最大储水量,mm
I_{max}	110	根区蓄土层最大储水量,mm
C_{QOF}	0.86	地表径流系数
CK_{IF}	650	壤中流出流时间
$CK_{1,2}$	22	地表径流、壤中流汇流时间常数
TOF	0.63	地表径流临界值
TIF	0.57	壤中流计算临界值
TG	0.59	地下径流计算临界值
CK_{BF}	2300	基流时间常数

2.5 参数率定

NAM模型参数因为表征的是流域平均值,根据流域自然特征进行初定对参数进行初定,通过模型自带的参数优化功能对参数进行自动率定,辅以人工调整得到最终符合流域降雨径流实际情况的参数。HEC-HMS模型中关键参数CN值可以通过ArcGIS平台对研究区的土地利用、土壤质地等数据进行综合分析获取,其他参数根据经验设以初始假定值,然后通过后期率定对参数进行优化调整。

3 NAM模型和HEC-HMS模型模拟结果对比

采用确定性系数和径流深相对误差来对NAM模型和HEC-HMS模型的模拟结果进行评价。模拟结果对比见表3。2015—2020年降雨径流模拟曲线如图6至图10所示。

表3 NAM模型和HEC-HMS模型模拟结果对比

项目	年份	NAM模型		HEC-HMS模型	
		确定性系数	径流深相对误差(%)	确定性系数	径流深相对误差(%)
率定期	2015	0.685	-5.42	0.724	7.64
	2016	0.596	-19.30	0.662	7.04
	2017	0.844	-14.30	0.772	4.34
验证期	2018	0.820	-13.30	0.717	8.85
	2020	0.753	11.89	0.850	9.96

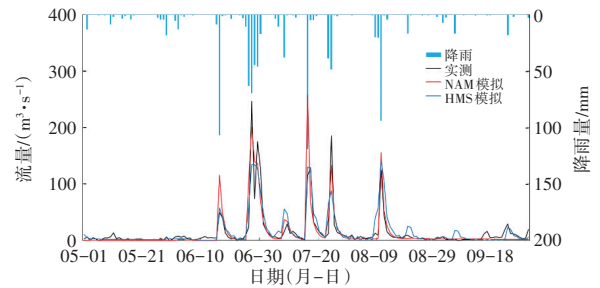


图6 2015年降雨径流模拟曲线图

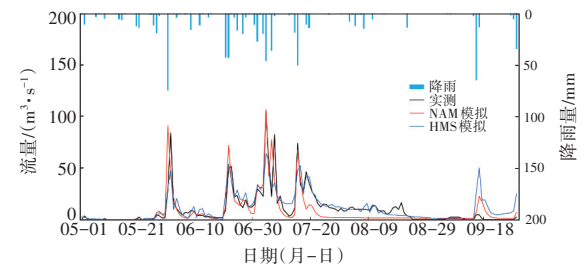


图7 2016年降雨径流模拟曲线图

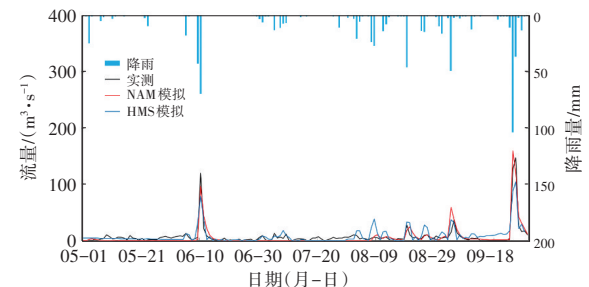


图8 2017年降雨径流模拟曲线图

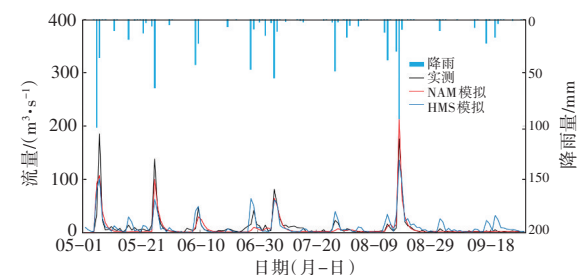


图9 2018年降雨径流模拟曲线图

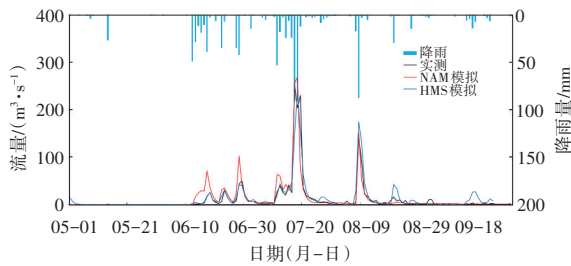


图10 2020年降雨径流模拟曲线图

根据《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008)相关要求,径流深预报以实测值的20%作为许可误差,NAM模型和HEC-HMS模型的预报径流深均在许可误差范围之内;按照预报项目精度等级划分,确定性系数 $DC > 0.90$ 为甲级, $0.90 \geq DC \geq 0.70$ 为乙级, $0.70 > DC \geq 0.50$ 为丙级,NAM模型有3 a达到乙级水平,HEC-HMS模型有4 a达到乙级水平,两个模型在所有预报年份均达到了丙级水平,可用于本流域的水文模拟。通过模拟结果可以看出,在丰水年份,两个模型模拟效果均较好,因为这更符合湿润和半湿润地区的气候特征,产流过程中蓄满产流占比较大,模拟的效果相对较好。

4 模拟误差分析

(1)研究表明^[16], CN 值是HEC-HMS模型中最敏感的参数,对降雨的反应也非常灵敏,因笔者对流域下垫面分析时所采用的土地利用、土壤类型数据精度均为1 km精度,而研究区域的东、西、南北长度均为20 km左右,这无疑对 CN 值的计算产生一定影响。

(2)NAM模型中的 C_{QOF} 为敏感参数,它决定将净降雨分配为地表径流和入渗的比例,在丰水年份,浅层蓄水层缺水不大,相应 C_{QOF} 的值较大,在枯水年份时则较小,本文中的 C_{QOF} 取值兼顾丰、枯水年份,对最终得模拟结果会产生一定影响。同时像 U_{max} 、 L_{max} 等参数,因各年份的浅层蓄水层的含水量不同,采用同一参数也会对最终得模拟结果产生影响。

(3)另外,本文模拟所采用的流量数据是通过水库反推所得,枯水期时水面波动影响对其数据影响较大;其次由于反推入库时,没有向前推时段,使得实际发生时间和反推记录时间存在时间差,这也导致滞后时间与通过DEM计算的 T_{lag} 存在不同,从而导致最终模拟结果出现误差。

5 结论

(1)NAM模型和HEC-HMS模型在沙河集流域的降雨径流模拟过程中,均有较好的模拟的效果,预报的径流深均在许可误差范围内。

(2)HEC-HMS模型计算的径流深相对误差均控制在10%以内。因为HEC-HMS模型作为分布式模型,其中包括5个子流域、5条河段,而各子流域和河段中又包括众多的参数,这样在率定优化后的参数在各年份具有普遍适用性,而NAM模型作为一种集总式,其参数为流域平均值,在单一丰水年或者枯水年中模拟效果较好,在包含丰水年、枯水年系列的模拟中,由于研究环境存在较大差异,最终模拟效果会产生一定误差。

(3)HEC-HMS作为分布式模型,其内部的观测值难以检验,而分布式模型如果能进行这种检查的话,可以发现一些关于模型率定及检验的重要问题。NAM模型作为一种集总式模型,忽略了流域的空间变异及产流的空间分布,且汇流是采用简单的线性水库进行累加计算,无法考虑降雨类型及分布。

(4)根据两个模型的模拟研究,结合两种模型的计算原理可知,两种模型在降雨径流模拟过程中均存在一定的局限性。但是其也各有各的优点,HEC-HMS模型建模过程较为复杂,但是其具有强大的功能,不仅包含较多计算方法,可以结合流域特点选择合适的计算方法进行模拟计算,而且像 CN 值等参数能反应流域下垫面综合情况及流域具体特性。NAM模型的建模过程简便,所需参数较少且参数物理意义较为明确,其计算过程基于水文物理循环的结构,同时结合了一些经验和半经验公式,率定优化过程较为方便快捷。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 芮孝芳.论流域水文模型[J].水利水电科技进展,2017,37(4):1-7,58.
- [3] 芮孝芳.对流域水文模型的再认识[J].水利水电科技进展,2018,38(2):1-7.
- [4] 杨文发,王乐,张俊.流域多尺度水文预报应用进展及适用性探讨[J].

- 人民长江,2021,52(10):84-94.
- [5] 赵然杭,伍谋,王兴菊,等.NAM降雨径流模型的参数全局敏感性分析[J].人民黄河,2022,44(5):40-45.
- [6] 张冬冬,刘冬英,秦智伟,等.HEC-HMS水文模型在大渡河流域的应用研究[J].人民长江,2018,49(22):108-111,122.
- [7] 史利杰,陈真,张国栋.HEC-HMS模型在黄河中游大理河流域适用性研究[J].人民黄河,2020,42(8):21-24.
- [8] 赵然杭,伍谋,王兴菊,等.NAM降雨径流模型的参数全局敏感性分析[J].人民黄河,2022,44(5):40-45.
- [9] 周景舒,张行南,夏达忠.TOPMODEL模型与NAM模型在中小流域的比较研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2017,31(2):67-72,101.
- [10] 罗清元,侯东儒,刘丽娜,等.HEC-HMS模型与MFPM模型在暴雨洪水预报中的应用比较[J].水电能源科学,2022,40(8):70-73,87.
- [11] 朱龙辉.基于HEC-HMS模型的潦河流域洪水预报应用研究[D].江西:南昌大学,2021.
- [12] 刘晓清.基于HEC-HMS模型的碧流河流域未来径流对气候变化响应研究[D].山西:太原理工大学,2019.
- [13] 梁彦宽.HEC-HMS模型在小流域的洪水预报研究与应用[D].山西:太原理工大学,2020.
- [14] 梁彦宽,祝雪萍,孙小平,等.HEC-HMS模型在岢岚流域的应用研究[J].人民黄河,2022,44(4):53-56.
- [15] 程旭,马细霞,王武森,等.HEC-HMS模型参数区域化在河南省小流域适用性研究[J].水文,2022,42(1):40-46,102.
- [16] 程文飞.基于HEC-HMS及ELM模型的万年饱流域径流模拟研究[D].山西:太原理工大学,2019.

Research on application of HEC-HMS model and NAM model in rainfall runoff simulation

LU Haitian¹, ZHU Lihuang², NI Jin¹

(1. Anhui and Huihe River Institute of hydraulic Research, Key laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Hefei 230000;
2. Tongling Water Conservancy Bureau, Tongling 244000)

Abstract: The HEC-HMS model is a semi-distributed hydrological model, while the NAM model is a lumped conceptual model. The calculation principle, model architecture and parameter composition of the two models were compared, and the five daily runoff in the Shaheji sub-basin of Chuhe River basin were simulated. The simulation results were used to compare the rainfall runoff simulation performance of the two models. The results show that both models have good simulation results, and the predicted runoff depth is within the allowable error range. Both models have certain limitations in the rainfall and runoff simulation process. The HEC-HMS model has powerful computational function and some parameters can directly reflect the specific characteristics of the basin, but its modeling process is complicated and the internal observed values are difficult to be tested. The NAM modelling process is simple, requires fewer parameters and has clear physical meaning. However, the spatial variation and distribution of runoff producing are ignored in the model calculation process.

Keywords: HEC-HMS model; NAM model; rainfall runoff; hydrological simulation; parameter of model

责任编辑 马 啸