

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.004

产流模式时空分布规律及其判别方法

刘玉环^{1,2}, 罗 赞³, 李致家², 王春青¹

(1. 黄河水利委员会水文局; 2. 河海大学水文水资源学院; 3. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院)

摘要: 为提高半湿润半干旱地区洪水预报精度, 针对其产流特点, 结合水文气象、土壤地形和植被地貌等指标, 通过优选判别指标、层次权重评估、滚动修正聚类等方法建立网格层次聚类产流模式判别(GRGI)方法。黄河中游千阳流域的实例验证结果表明: GRGI 方法能够精确地识别千阳流域蓄满、超渗产流模式的时空分布, 千阳流域整体以蓄满网格为主, 占比在 70% 以上; 与 Grid-XAJ 和 Grid-GA 模型相比, 基于产流判别规则改进 Grid-XAJ-SIDE 模型的径流深误差、洪峰误差及峰现时差合格率分别提高约 12%、35%、12%。

关键词: 半湿润半干旱地区; 蓄满产流; 超渗产流; 产流模式识别; Grid-XAJ-SIDE 模型; 过程精细化模拟

Spatial and temporal distribution rules and identification methods of runoff generation modes

Liu Yuhuan^{1,2}, Luo Yun³, Li Zhijia², Wang Chunqing¹

(1. Hydrology Bureau of Yellow River Conservancy Commission;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University;

3. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission)

Abstract: To improve the accuracy of flood forecasting in semi-humid and semi-arid regions, the runoff generation characteristics of these regions were analyzed, as well as indexes such as hydrometeorology, soil and topography, and vegetation landcover. The grid hierarchical-clustering runoff generation pattern identification method (abbreviated as GRGI) was established through the optimization of identification indexes, hierarchical weight evaluation, and rolling correction clustering. Case verification results of the Qianyang Watershed in the middle reaches of the Yellow River show that the GRGI method can accurately identify the spatial and temporal distribution of the saturation-excess and infiltration-excess runoff generation modes in the Qianyang Watershed, with the saturation-excess pattern grid dominating, accounting for more than 70% of the total. Compared with those of the Grid-XAJ and Grid-GA models, the qualified rates of runoff depth error, peak flow error, and peak time difference of the Grid-XAJ-SIDE model improved based on runoff generation identification rules are increased by about 12%, 35%, and 12%, respectively.

Key words: semi-humid and semi-arid region; saturation-excess runoff generation; infiltration-excess runoff generation; identification of runoff generation mode; Grid-XAJ-SIDE model; process-refined simulation

洪涝灾害是我国最为多发的自然灾害之一, 而北方半湿润半干旱地区尤为突出, 该区域的洪涝灾害不仅强度大、频次高, 且影响范围广, 由此酿成的经济损失难以估量^[1-2]。基于水文模型的洪水预报是减少洪涝灾害损失最行之有效的非工程措施^[3-5], 然而在半湿润半干旱地区, 几乎没有一个水文模型能取得满意的模拟效果^[6-8]。目前, 湿润地区的预报精度已经达到 80% 以上, 而半湿润半干旱地区整体预报精度不高, 尤其在中小河流, 只有 40%~50%, 难以满足洪水预警预报的需求^[9]。

半湿润半干旱地区洪水预报困难的问题从 20 世纪 80 年代开始困扰至今。早期学者们认为半湿润半干旱地区的下垫面空间异质性强, 导致土壤的下渗能力空间分布不均, 国内外学者们围绕下渗理论开展了大量研究, 并以此来构建相应的洪水模型, 如 Green-Ampt 入渗模型^[10]、陕北模型^[11]、双超模型^[12]等。然而, 在半湿润半干旱地区复杂的下垫面情况和变化多端的降水条件下, 流域经常出现蓄满产流和超渗产流交替主导、

基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2023YFC3206701); 河南省自然科学基金青年项目(252300423290); 黄河水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(HKY-JBYW-2023-11); 水利部重大科技项目(SKR-2022024); 黄河水利委员会水文局科技计划项目(R202315)

作者简介: 刘玉环(1993—), 女, 工程师, 博士, 主要从事产流模式及洪水预报研究。E-mail: lyh_yuhuan@163.com

通信作者: 罗赞(1991—), 男, 工程师, 博士, 主要从事水文循环与水资源规划管理研究。E-mail: luoyun_hhu@hhu.edu.cn

相互交织的现象^[13]。当降雨强度大于土壤下渗率或土壤蓄满后,形成的地面径流能够沿坡面河网快速到达流域出口,形成快速涨落的洪水形态;当土壤的下渗能力大,降雨补充土壤缺水后,会形成一定比例的壤中流和地下径流,在土壤的调蓄作用下,这部分径流呈现缓涨缓落的形态;当土壤下渗能力小或土壤缺水量大时,无法产生地下径流。因此,以蓄满产流为主导的洪水往往会产生较多的壤中流和地下径流,洪水形态缓涨缓落且呈现偏态;以超渗产流为主导的洪水以地面径流为主,基本没有或有少量的地下径流,洪水过程陡涨陡落,形态对称性较好。在半湿润半干旱地区,完全蓄满或超渗的洪水数量很少,多数洪水形态,既有陡涨陡落的洪峰过程,又有缓慢的退水过程,前者是由降雨强度大于下渗能力产生的超渗地表径流,后者是部分地区土壤补充至田间持水量产生了饱和地表径流、壤中流或地下径流,说明超渗产流和蓄满产流在该地区的洪水中均有发生。单一产流模型无法准确描述这一复杂产流现象,因此需要对产流模拟进行综合考虑:如增加超渗的新安江模型^[14]、蓄满-超渗兼容模型^[15]、VIC-3L 模型^[16]、垂向混合产流模型^[17]、TOKASIDE-D 模型^[18]、地表地下人工双调蓄 GXAJ-DAR 模型^[19]等。虽然学者们一直致力于解决半湿润半干旱地区洪水预报困难的问题,但仍没有形成类似蓄满产流或超渗产流这样明晰的理论。因此,有必要深入研究半湿润半干旱地区复杂产流规律和水文模型。

本文基于前人研究,针对半湿润半干旱地区水文和下垫面特点,结合水文气象、土壤地形和植被地貌等指标因子,在网格尺度上,通过优选判别指标、层次权重评估、滚动修正聚类等方法建立网格层次聚类产流模式判别(grid hierarchical-clustering runoff generation pattern identification method,GRGI)方法,并在黄河中游典型流域——千阳流域进行验证。

1 产流模式空间分布判别方法

1.1 产流模式判别规则

每场降雨发生前,流域的初始产流模式均不一样,降雨发生时,在降雨和土壤含水量的作用下,产流模式会发生变化。基于此,本文将流域的产流模式判别分为两种情况:降雨发生前的初始状态、洪水期的动态变化。

a. 降雨发生前的初始状态。依据流域下垫面的地形、土壤、植被等分布确定流域蓄满和超渗的初始空间分布;依据流域前期土壤含水量对初始空间分布进行调整,即土壤含水量达到田间持水量的调整为蓄满状态,小于毛管断裂含水量的调整为超渗状态。

b. 洪水期的动态变化。降雨发生时期,以降雨强度和土壤含水量两个指标共同判定:首先判断土壤含水量的状态,当土壤含水量达到田间持水量全部转换为蓄满网格;其次当降雨强度大于下渗能力时,蓄满转换为超渗,否则下渗量用于补充土壤缺水量,蓄超状态不变。降雨结束后退水阶段,以土壤含水量作为判断指标:土壤含水量达到田间持水量时,超渗转换为蓄满;小于毛管断裂含水量时,蓄满转为超渗;土壤含水量介于两者之间的产流状态不变。

1.2 网格尺度初始产流模式判别方法

流域的实际产流过程十分精细复杂,对于特定流域,降雨特性及下垫面条件的时空变化可能导致径流形成过程具有多样性,复杂多变的产流模式很难用简单的指标进行量化^[20-21],因此有必要开展网格尺度的产流模式精细判别研究。本文在已有产流模式变化特征研究的基础上,建立 GRGI 方法对网格尺度初始产流模式进行判别。

1.2.1 初始指标优化筛选

水文气象指标包括前期累计净雨量、前期土壤含水量、前期累计蒸散发等;土壤地形指标包括土壤类型、饱和导水率、孔隙度和坡度等;植被地貌指标包括土地利用类型、植被覆盖度、土地裸露指数、地形湿度指数、归一化植被指数、叶面积指数等。由于影响产流模式的指标数量较多,采用相关分析法分别计算各指标与洪水径流量、洪峰量的相关系数,剔除相似指标,然后依据专家经验,选择相关系数 0.75 以上的指标作为产流模式判别指标,结果见表 1。

1.2.2 指标权重确定

确定指标权重的方法较多,其中层次分析法的精度较高,既可定性分析又能定量分析,且在很多领域中都有较好的应用。因此,本文采用层次分析法确定各指标的权重,主要步骤为:①构建层次体系;②构建各个指标间的判断矩阵;③求解权重并进行重要性排序(方根法);④一致性检验。

表1 产流模式判别指标及判别依据

Table 1 Identification indicators and rationale for runoff generation modes

指标类型	指标	指标含义	判别依据
水文气象	前期累计净雨量	标准化处理的洪水发生前 15 d 累计净雨量,	局部降雨集中区域(前期累计净雨量大于 0.75)为易蓄满区域
	前期土壤含水量	标准化处理的洪水发生前 15 d 土壤含水量	大于 0.75 为易蓄满区域
土壤地形	土壤类型	主要包括砂土、壤砂土、砂壤土、粉砂土、壤土、砂黏壤土、粉壤土、黏壤土、黏土	砂土、壤土类为易蓄满区域,黏土类为易超渗区域
	饱和导水率	土壤的入渗能力及产生径流的潜力,越易入渗,径流潜力越高	中等以上入渗能力(饱和导水率大于 14 mm/h)为易蓄满区域
	坡度	坡面的垂直高度和路程的比值	小于或等于 5°为易蓄满区域
植被地貌	土地利用类型	重分类为水域、森林、草地、耕地及裸土等 5 种	水域、森林为易蓄满区域,草地、耕地及裸土为易超渗区域
	植被覆盖度	森林面积占土地总面积之比	小于或等于 40%为易超渗区域
	地形湿度指数	地形和土壤特性对土壤水分布的影响	小于或等于 5 为易超渗区域

注:前期累计净雨量、前期土壤含水量采用最大最小法进行标准化处理。

1.2.3 产流模式综合判别

根据表 1 的判别依据对产流模式进行初步判别,其中蓄满属性标记“1”,超渗属性标记“0”,再利用各指标权重计算网格蓄超产流模式综合判别指标(式(1)),进而全面综合地考量所有指标在判别过程中的作用,确保分析的完整性与系统性。在权重的影响下,可有效放大某些关键指标的影响力。

$$C_1 = \sum_{k=1}^m w_k \frac{s_k}{s_{k,\max}}$$

(1)

式中: C_1 为每个网格的产流模式综合判别指标; w_k 为指标 k 的权重; s_k 为指标 k 标准化取值; $s_{k,\max}$ 为指标 k 标准化的最大值; m 为指标个数。

采用滚动修正聚类分析法对产流模式判别指标进行聚类,逐步逼近修正综合判别指标的阈值,进而采用该阈值进行最终的产流模式判别,具体步骤如下。

a. 选取待分类判别指标的 80%数据作为样本集为 X ,20%数据作为验证集, X 为:

$$X = \{x_{ik} \mid i = 1, 2, \cdots, n; k = 1, 2, \cdots, n\}$$

(2)

式中: x_{ik} 为第 i 个洪水事件指标 k 的特征值。

b. 采用最大最小法对指标标准化处理,消除不同指标间物理量纲的差异性,得到新的样本集 X' 。

c. 根据贴进度法,采用海明距离公式计算相似系数 h 以表征样本集中元素的接近程度, h 越接近 1,表示对应指标的特征值越相似,建立样本集中元素的模糊关系矩阵 $R = (h_{ij})_{n \times n}$:

$$h_{ij} = 1 - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m |x'_{ik} - x'_{jk}| \quad (i, j = 1, 2, \cdots, n)$$

(3)

d. 设单指标的阈值集合为 $\{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$,令最大值 $x_1 = 1.0, x_2 = 0.95$,依次等差对阈值集合赋值。将 R 的所有元素降序排列,选取 x_1 ,将所有等于 x_1 的元素归为一类,记为 A ,不等于 x_1 的归为另一类,记为 A' ;选取 x_2 ,在 A' 中采用第 1 步的方法再分类,依此类推直到将样本集中的所有元素进行聚类。

e. 聚类结束后,采用式(1)计算综合判别指标,根据指标分类结果,即可获得分类结果的综合判别指标阈值。分别采用综合判别指标阈值、聚类分析法对验证集进行分类,并对比分析两种分类方法的结果。如果两种结果误差在 10%以内,则表明聚类分析法推求的综合阈值可行,否则调整单指标的阈值集合,重复步骤 d~e,重新聚类计算综合阈值,直至两种结果误差在 10%以内。

根据产流模式综合判别指标阈值对流域所有网格的产流模式初始状态进行判别。

2 实例验证

2.1 研究流域及数据

千阳流域位于陕西省,隶属黄河中游千河水系,控制站为千阳水文站,控制流域面积 2 935 km²(图 1)。千阳流域属半湿润半干旱气候,多年平均降水量为 696 mm,多年平均径流量 3.705 亿 m³。流域地形沟壑纵横,上游为土石山区,森林茂密,植被良好;中下游为黄土高原沟壑区,地表覆盖较差。2008 年千阳水文站附

近修建橡胶坝,流域上游有段家峡水库,此后流域拦洪效率增强,洪水频次降低。

下垫面数据包括:数字高程地图 (DEM)、土壤类型、土地利用类型、植被覆盖度等。DEM 来自国家地理空间数据云 (SRTMDEM 数据产品),分辨率为 90 m。土壤类型数据来自 HWSD 世界土壤数据集,分辨率为 1 km,由上 (0~30 cm)、下 (30~100 cm) 两层土壤数据组成。土地利用类型数据来自国家基础地理信息中心 (GlobeLand30 数据),分辨率为 30 m。植被覆盖度数据采用归一化植被指数 (NDVI) 表示,来自国家地理空间数据云 (MYD13A1 植被指数产品),分辨率为 500 m。水文气象资料包括:2010—2018 年降水量、蒸发及断面流量数据,来自陕西省水文局和黄河水利委员会水文局提供的摘录数据。

根据 DEM 提取千阳流域边界和流域范围内的土壤类型、土地利用数据。经统计,千阳流域的土壤类型以壤土为主,上层土壤、下层土壤中壤土占比分别为 86.2%和 59.9%,如图 2(a) 所示。上层土壤除壤土外,多为粉壤土或壤砂土,下渗率较高;下层土壤的黏壤土占比增加,土壤下渗率较低,出现了弱不透水层,上渗下堵是产生壤中流的天然条件。由图 2(b) (图例中土地利用类型后括号中数字为面积占比) 可知,千阳流域的土地利用类型主要为森林和耕地,占比分别为 58.8%和 31.8%,森林主要分布在流域西侧,耕地集中在流域中下游以及分散在流域东北区域。

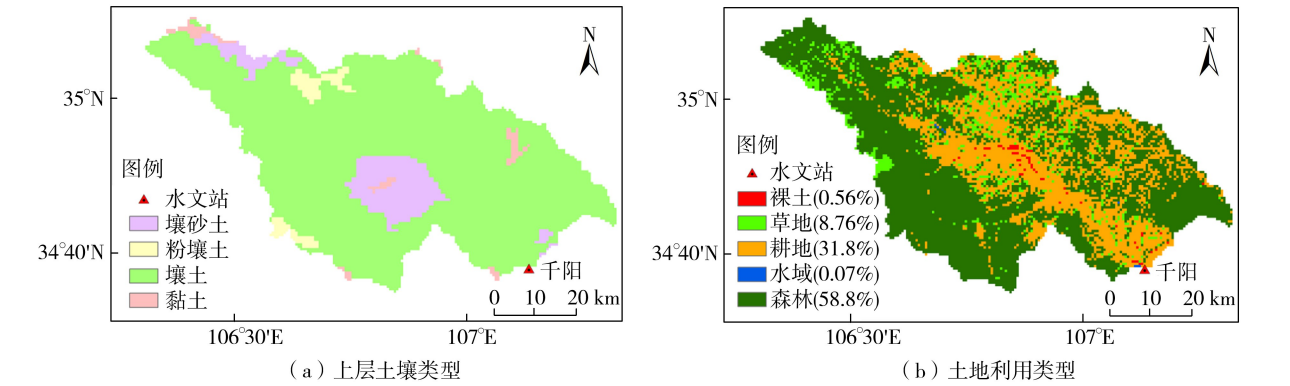


图 2 千阳流域上层土壤类型和土地利用类型分布

Fig. 2 Upper layer soil type and land use type distribution in the Qianyang Watershed

2.2 产流模式初始分布

依据层次分析法指标间的重要度,对水文气象、土壤地形、植被地貌 3 个层级的各指标进行相互比较,得到各层指标间的比较判断矩阵见表 2~5,并根据方根法求解各指标的权重以及一致性检验指标,结果见表 6。

表 2 准则层判断矩阵

Table 2 Judgment matrix of criterion layer

指标	水文气象	土壤地形	植被地貌
水文气象	1	1/2	1/2
土壤地形	2	1	4
植被地貌	2	1/4	1

表 3 水文气象指标判断矩阵

Table 3 Judgment matrix of hydrometeorological indicators

指标	前期累计净雨量	前期土壤含水量
前期累计净雨量	1	2
前期土壤含水量	1/2	1

多层指标权重叠加后,产流模式判别指标按权重从大到小依次为:前期土壤含水量、植被覆盖度、前期累计净雨量、地形湿度指数、坡度、土地利用类型、饱和传导度、土壤类型。将研究流域所有洪水的水文气象、土壤地形、植被地貌等数据进行标准化后,通过滚动修正聚类分析法,计算得到产流模式的综合指标阈值,为 0.632。

表 4 土壤地形指标判断矩阵

Table 4 Judgment matrix of soil and terrain indicators

指标	土壤类型	饱和导水率	坡度
土壤类型	1	2	3
饱和导水率	1/2	1	3
坡度	1/3	1/3	1

表 5 植被地貌指标判断矩阵

Table 5 Judgment matrix of vegetation and geomorphology indicators

指标	土地利用类型	植被覆盖度	地形湿度指数
土地利用类型	1	2	3
植被覆盖度	1/2	1	1/3
地形湿度指数	1/3	3	1

表 6 各指标权重以及一致性检验

Table 6 Weights of indicators and consistency tests

一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重	综合权重	一致性检验
水文气象	0.474	前期累计净雨量	0.333	0.158	0.043<0.1
		前期土壤含水量	0.667	0.316	
土壤地形	0.149	土壤类型	0.157	0.023	0.033<0.1
		饱和导水率	0.249	0.037	
		坡度	0.594	0.089	
植被地貌	0.376	土地利用类型	0.163	0.061	0.061<0.1
		植被覆盖度	0.540	0.203	
		地形湿度指数	0.297	0.112	

千阳流域的产流模式判别后的初始分布如图 3 所示。整体来看,千阳流域的初始超渗网格面积占比为 0~31.18%,以蓄满网格为主。从典型洪水的蓄超分布可知,QY-20180707、QY-20130720 洪水事件的前期土壤含水量较大,整个流域基本处于蓄满状态,其超渗网格面积占比分别为 0.02%和 3.25%。QY-20100721 洪水的初始超渗网格面积占比为 24.99%,与其相似占比的洪水有 7 场(18%~27%之间),相应的蓄超空间分布亦类似。相比其他洪水,QY-20150811 洪水事件的超渗网格面积占比比较高,为 31.18%,就空间分布来看,主要由中游北部的局部聚集的超渗网格造成。

2.3 验证分析

为验证蓄超时空组合的产流模式判别规则,以 Grid-XAJ 模型为对象进行改进研究,在 Grid-XAJ 模型产流模块中添加超渗模块,结合产流模式时空动态判定规则,对洪水过程中的产流模式进行动态识别和调整计算,构建蓄超时空动态组合的网格新安江(Grid-XAJ-SIDE)模型,模型详细结构及介绍,见文献[22]。Grid-XAJ 模型、Grid-GA 模型、Grid-XAJ-SIDE 模型分别代表蓄满、超渗、蓄超兼存 3 种产流模式。为比较 3 种不同产流模式模型的应用效果,将其分别应用于千阳流域 2010—2018 年的洪水事件进行参数率定、洪水模拟和对比分析(2010—2014 年率定,2015—2018 年验证)。另外,选择径流深误差合格率、洪峰误差合格率、峰现时差合格率和 Nash-Sutcliffe 系数等 4 个指标对各模型的模拟结果进行综合评价。半湿润半干旱地区的洪水峰高时短,因而更加关注洪峰的模拟情况,本文评价将以洪峰误差合格率与峰现时差合格率为主要评价指标,径流深误差合格率为次要评价指标,Nash-Sutcliffe 系数为参考指标。

2.3.1 模型参数率定

Grid-XAJ-SIDE 模型的参数确定方法:①参数空间估算,网格张力水蓄水容量(W_m)、土壤湿润锋处土壤吸力(S_f)等参数均采用 Grid-XAJ 和 Grid-GA 模型的参数估计方法进行估算^[23],此类参数估算后不再进行率定;②人工经验优选,蒸散发折算系数(K)、深层蒸散发系数(C)等参数采取集总式考虑,根据流域实测水文资料,采用人工优选法在经验取值范围内进行率定。在 Grid-XAJ-SIDE 模型率定中,产流模式转化过程中,模型状态参数(累积下渗量、土壤含水量等)也随之实时调整或更新,以保证计算连续性和水量平衡。

为更清晰地反映模型改进前后的效果,千阳流域 3 个模型的人工率定参数基本保持一致(表 7),仅

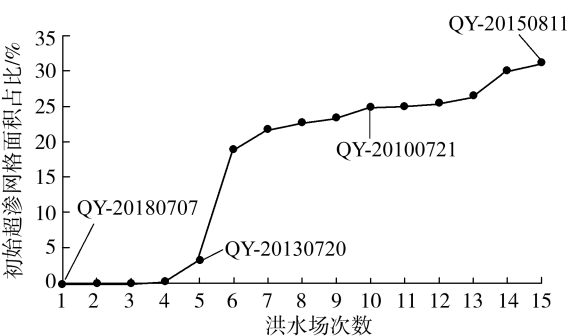


图 3 千阳流域典型场次洪水的初始产流模式分布

Fig.3 Distribution of initial runoff generation modes for typical floods in the Qianyang Watershed

Grid-GA 模型的河网消退系数 C_s 相较于其他两个模型偏小,主要是因为超渗产流在千阳流域的计算产流量偏小,较小的 C_s 可以减小河网的调蓄作用,增大模拟洪峰。

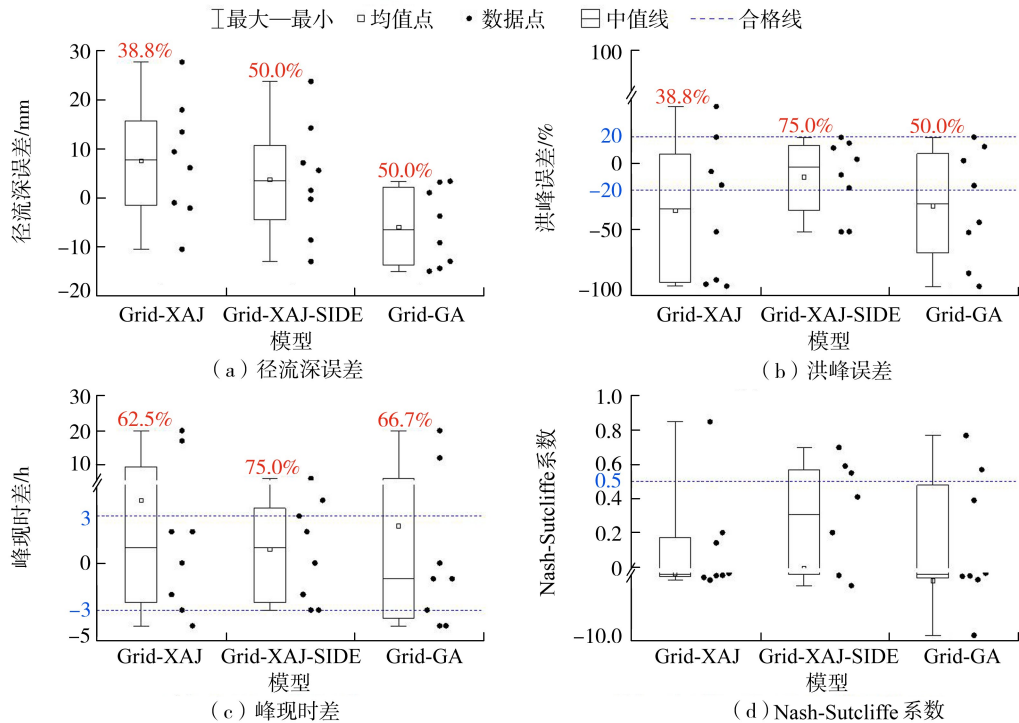
表 7 千阳流域各模型参数率定值

Table 7 Calibrated parameter values of different models in the Qianyang Watershed									
模型	K	C	F_m/mm	C_i	C_g	C_s	K_e	X_e	L_{ag}/h
Grid-XAJ	1.05	0.08		0.7	0.9	0.93	0.025	0.48	1
Grid-XAJ-SIDE	1.05	0.08	1000	0.7	0.9	0.93	0.025	0.48	1
Grid-GA	1.05		1000			0.81	0.025	0.48	1

注: F_m 为最大累积下渗量; C_i 为壤中流消退系数; C_g 为地下径流消退系数; K_e 、 X_e 为河道马斯京根汇流参数; L_{ag} 为滞后时间。

2.3.2 洪水模拟结果

由图 4 可知,3 个模型的洪水径流深模拟,合格率分别为 38.8%、50.0%和 50.0%,说明 3 个模型对千阳流域的径流量模拟精度一般,主要原因是 2008 年千阳水文站上游修建了一座橡胶拦水坝,影响了天然径流规律,尤其是小洪水被拦蓄后,其模拟洪水总会出现被高估的趋势。在洪峰误差方面,Grid-XAJ-SIDE 模型的模拟结果最好,洪峰误差的均值和中值线均接近 0,且合格率为 75.0%,相比于 Grid-XAJ 模型和 Grid-GA 模型的合格率有明显提高,这与产流模式动态识别密切相关。在峰现时差方面,相比单一产流模型,Grid-XAJ-SIDE 模型合格率提升至 75.0%,且峰现时差分布最窄,说明模型对洪峰出现时间的控制效果得到改善。3 个模型的 Nash-Sutcliffe 系数一般,模拟最好的 Grid-XAJ-SIDE 模型也只有 3 个洪水事件的 Nash-Sutcliffe 系数大于 0.5。综上,Grid-XAJ-SIDE 模型明显提升了洪水模拟精度,侧面反映其对产流模拟适应力增强。



注:图中红色字体的百分数为该指标的合格率。

图 4 千阳流域 3 个模型评价指标结果

Fig. 4 Results of three model evaluation indicators for the Qianyang Watershed

2.3.3 典型洪水分析

选择千阳流域典型洪水事件 QY-20100721 进行详细分析。由图 5 可知,QY-20100721 洪水事件的洪峰约 2000 m³/s,属于量级较大的双峰洪水,降水量大(261 mm)且空间分布均匀。虽然 Grid-XAJ-SIDE 和 Grid-GA 模型的模拟过程线接近,但前者模拟的洪峰和形状过程更接近实测洪水;Grid-XAJ 模型在主峰阶段的模拟洪水偏低,在随后的次峰模拟较好。

根据前期影响雨量计算结果可知,QY-20100721 平均前期影响雨量约为 120 mm,平均饱和度 0.67,初始蓄满网格占比为 73.5%。由图 5(b)(c)可知,流域的蓄满超渗网格动态变化如下:①超渗网格快速增加:

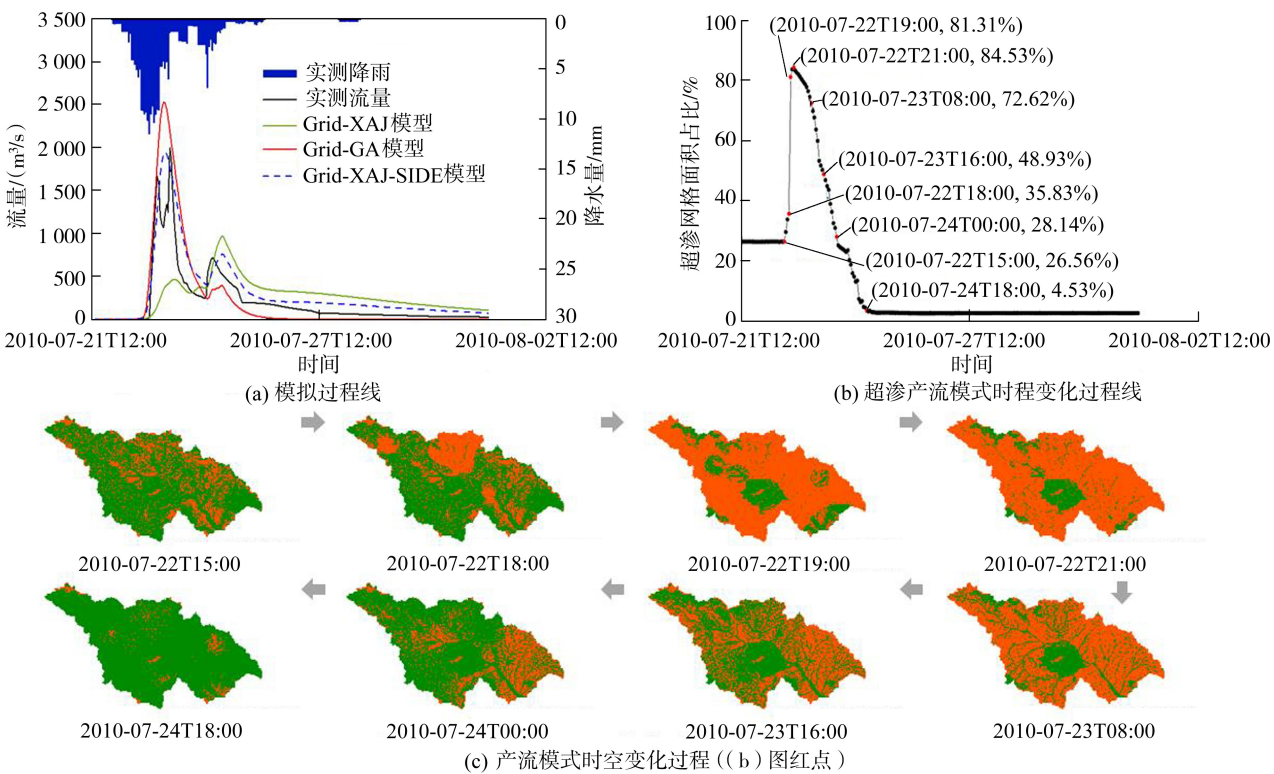


图 5 千阳流域 QY-20100721 洪水过程及其蓄超网格时空动态变化过程

Fig. 5 Process for QY-20100721 flood event and its spatial and temporal dynamic SE-IE change in the Qianyang Watershed

2010-07-22T15:00—21:00,流域降雨空间分布较为均匀,全流域超渗网格大面积增加,在 21:00 达到了 84.53%,尤其是 18:00—19:00 的 1 h 内,发生了大强度的全流域降雨(平均降雨强度大于 10 mm/h,单点最大强度为 35.6 mm/h),使得流域的超渗网格面积占比急速增加至 81.31%;②蓄满网格增加:2010-07-22T22:00—2010-07-24T18:00,随着降水的累积,超渗网格缺水得到补充,发生超渗转蓄满,超渗网格面积占比相比初始状态减少约 25%,直至 2010-07-24T18:00 流域所有网格均为蓄满状态。由图 5(c)可知,河道网格包气带较薄,蓄满速度快,最先完成超渗向蓄满的转换。

根据 QY-20100721 洪水事件的蓄超时空动态变化过程剖析不同模型表现优劣的内在成因。QY-20100721 洪水发生前期,土壤含水量较大,无论降雨强度大与否,Grid-XAJ 模型计算时仍需先补充土壤缺水后发生产流,因而在主峰的模拟洪水偏低;而 Grid-GA 模型在大强度降雨下,可以先产生超渗地表径流,模拟出快速涨落的洪水过程。随着降雨进行,土壤含水量补充完毕,Grid-XAJ 模型开始产流,从而较好地模拟出后续的洪水过程,相反 Grid-GA 模型在小强度降雨的模拟效果不如 Grid-XAJ 模型,是因为 Grid-GA 模型假定土壤是半无限土柱,即不会达到蓄满状态,入渗到土壤中降雨不会再产流。Grid-XAJ-SIDE 模型在结合两种产流模式后,优化了 Grid-GA 在后半段洪水模拟的缺陷。Grid-XAJ-SIDE 模型中即使是超渗产流主导的网格,当下渗量补充土壤含水量达到蓄满状态后,超渗网格可以转换为蓄满网格,在蓄满产流的作用下,土壤中的蓄水量会产生壤中流和地下径流,因而在后期更接近实测退水过程。

3 结 论

a. 在综合考虑水文气象、土壤地形和植被地貌等因子后,基于网格的层次聚类产流模式判别方法能够较精确地识别出千阳流域蓄满产流和超渗产流的空间分布,整体以蓄满网格为主,占比在 70%以上,划分结果与流域实际下垫面特点接近,能够有效地反映出流域内不同下垫面特征空间变化的特点。

b. 基于长序列历史洪水模拟,对千阳流域蓄满、超渗产流模式划分结果进行检验,与单一产流洪水模拟结果相比,采用改进后的 Grid-XAJ-SIDE 模型的径流深误差、洪峰误差及峰现时差合格率分别提高约 12%、

35%、12%,模型产流计算更加精细。蓄超判别方法可以展现两种产流模式交替出现以及相互转换的过程,在结合两种产流模式的优点后,既实现了径流量的增加,也保证了洪水峰值和出现的时间,扩大了栅格新安江模型在半湿润半干旱地区洪水模拟的适应范围。

参考文献:

[1] WMO. Manual on flood forecasting and warning[R]. Geneva,Switzerland:World Meteorological Organization,2011.

[2] Jonkman S N. Global perspectives on loss of human life caused by floods[J]. Natural Hazards,2005,34(2):151-175.

[3] 芮孝芳. 论流域水文模型[J]. 水利水电科技进展,2017,37(4):1-7. (Rui Xiaofang. Discussion of watershed hydrological model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(4):1-7. (in Chinese))

[4] Guo Liang, He Bingshun, Ma Meihong, et al. A comprehensive flash flood defense system in China: overview, achievements, and outlook[J]. Natural Hazards, 2018, 92(2):727-740.

[5] 王晟,张珂,晁丽君,等. 基于集合模拟的汉江上游洪水与滑坡灾害风险评估[J]. 水资源保护,2023,39(6):70-76. (Wang Sheng,Zhang Ke,Chao Lijun, et al. Assessment of flood and landslide hazard risk based on ensemble simulation over upstream of the Han River[J]. Water Resources Protection,2023,39(6):70-76. (in Chinese))

[6] 李琪. 全国水文预报技术竞赛参赛流域水文模型分析[J]. 水科学进展,1998,9(2):191-195. (Li Qi. Analysis and discussion related to the hydrological watershed models used in the first hydrological forecasting technology competition of China [J]. Advances in Water Science,1998,9(2):191-195. (in Chinese))

[7] Sittner W T. WMO project on intercomparison of conceptual models used in hydrological forecasting[J]. Hydrological Sciences Bulletin,1976,21(1):203-213.

[8] 石朋,陆美霞,吴洪石,等. 不同优化算法在新安江模型参数率定中的效果评估[J]. 水资源保护,2023,39(4):19-25. (Shi Peng,Lu Meixia,Wu Hongshi, et al. Evaluation of different optimization algorithms in parameter calibration of Xin'anjiang model [J]. Water Resources Protection,2023,39(4):19-25. (in Chinese))

[9] 张珂,牛杰帆,李曦,等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比[J]. 水资源保护,2021,37(1):28-35. (Zhang Ke,Niu Jiefan,Li Xi, et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China's semi-arid and semi-humid regions[J]. Water Resources Protection,2021,37(1):28-35. (in Chinese))

[10] Neuman S P. Wetting front pressure head in the infiltration model of Green and Ampt[J]. Water Resources Research,1976,12(3):564-566.

[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,1984:15-16.

[12] 王印杰,王玉珉. 土壤非饱和导水率机理的探讨[J]. 水利学报,1994,25(12):78-82. (Wang Yinjie, Wang Yumin. Characteristic function of soil moisture and analytical solution of richards equation[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1994,25(12):78-82. (in Chinese))

[13] Zhang Li, Hu Caihong, Jian Shengqi, et al. Identifying dominant component of runoff yield processes: a case study in a sub-basin of the middle Yellow River[J]. Hydrology Research,2021,52(5):1033-1047.

[14] 李致家,孔祥光,张初旺. 对新安江模型的改进[J]. 水文,1998,18(4):20-24. (Li Zhijia, Kong Xiangguang, Zhang Chuwang. Improving Xin'anjiang model[J]. Journal of China Hydrology,1998,18(4):20-24. (in Chinese))

[15] 雒文生,胡春歧,韩家田. 超渗和蓄满同时作用的产流模型研究[J]. 水土保持学报,1992,6(4):6-13. (Luo Wensheng, Hu Chunqi, Han Jiatian. Research on a model of runoff yield reflecting excess infiltration and excess storage simultaneously [J]. Journal of Soil and Water Conservation,1992,6(4):6-13. (in Chinese))

[16] Xu Liang, Xie Zhenghui. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models[J]. Advances in Water Resources,2001,24(9/10):1173-1193.

[17] 包为民,王从良. 垂向混合产流模型及应用[J]. 水文,1997,17(3):18-21. (Bao Weimin, Wang Congliang. Application and improvement of vertical-mixed runoff model[J]. Journal of China Hydrology,1997,17(3):18-21. (in Chinese))

[18] 刘玉环,刘志雨,李致家,等. 华北地区分布式蓄超空间动态组合 TOKASIDE-D 模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):105-112. (Liu Yuhuan, Liu Zhiyu, Li Zhijia, et al. TOKASIDE-D model of spatial dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff for North China region[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(2):105-112. (in Chinese))

Science),2024,47(6):731-738. (in Chinese))

[7] Singh R M,Datta B. Identification of groundwater pollution sources using GA-based linked simulation optimization model[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2006,11(2):101-109.

[8] Wu Mengtian,Xu Jin,Hu Pengjie,et al. An adaptive surrogate-assisted simulation-optimization method for identifying release history of groundwater contaminant sources[J]. Water,2022,14(10):1659.

[9] 高琬玉,卢文喜,潘紫东,等. 基于自适应权重粒子群优化算法的地下水污染溯源辨识[J]. 中国农村水利水电,2022(12):1-7. (Gao Wanyu,Lu Wenxi,Pan Zidong,et al. Inverse identification of contamination sources in groundwater based on adaptive weighted particle swarm optimization algorithm[J]. China Rural Water and Hydropower,2022(12):1-7. (in Chinese))

[10] 王敬,韩忠,梁浩,等. 地下水污染强度反演识别的 SCE-UA 算法[J]. 中国农村水利水电,2020(12):106-111. (Wang Jing,Han Zhong,Liang Hao,et al. Groundwater contaminant inverse identification by SCE-UA optimization algorithm[J]. China Rural Water and Hydropower,2020(12):106-111. (in Chinese))

[11] 黄林显,刘治政,邢立亭,等. 基于复合型进化算法的地下水污染反演模型[J]. 人民黄河,2019,41(4):58-63. (Huang Linxian,Liu Zhizheng,Xing Liting,et al. Inverse model based on SCE-UA optimization algorithm for unknown groundwater pollution identification[J]. Yellow River,2019,41(4):58-63. (in Chinese))

[12] 江思珉,张亚力,蔡奕,等. 单纯形模拟退火算法反演地下水污染源强度[J]. 同济大学学报(自然科学版),2013,41(2):253-257. (Jiang Simin,Zhang Yali,Cai Yi,et al. Groundwater contaminant identification by hybrid simplex method of simulated annealing[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2013,41(2):253-257. (in Chinese))

[13] 江思珉,蔡奕,王敏,等. 基于和声搜索算法的地下水污染源与未知含水层参数的同步反演研究[J]. 水利学报,2012,43(12):1470-1477. (Jiang Simin,Cai Yi,Wang Min,et al. Simultaneous identification of groundwater contaminant source and aquifer parameters by harmony search algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(12):1470-1477. (in Chinese))

[14] 李小兰,曾献奎,王栋,等. 基于优化-自适应稀疏网格替代模型的地下水模拟参数不确定性分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2022,52(4):1234-1243. (Li Xiaolan,Zeng Xiankui,Wang Dong,et al. Uncertainty analysis of groundwater simulation parameters based on optimized-adaptive sparse grid surrogate model[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2022,52(4):1234-1243. (in Chinese))

[15] Zhao Ying,Lu Wenxi,Xiao Chuanning. A Kriging surrogate model coupled in simulation-optimization approach for identifying release history of groundwater sources[J]. Journal of Contaminant Hydrology,2016,185-186:51-60.

[16] 张衡. 基于协同进化的混合变量粒子群优化算法[D]. 武汉:武汉大学,2020.

[17] 卢洪健,王卓然. 地下水模拟方法与应用软件研究进展[J]. 地下水,2022,44(6):49-52. (Lu Hongjian,Wang Zhuoran. Research progress in groundwater simulation methods and application softwares[J]. Ground Water,2022,44(6):49-52. (in Chinese))

[18] Leaf A T,Fienen M N. Flopy:the python interface for MODFLOW[J]. Groundwater,2022,60(6):710-712.

[19] Bakker M,Post V,Langevin C D,et al. Scripting MODFLOW model development using python and FloPy[J]. Groundwater,2016,54(5):733-739.

[20] Glover F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence[J]. Computers & Operations Research,1986,13(5):533-549.

(收稿日期:2024-11-25 编辑:刘晓艳)

(上接第35页)

[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 Qينوu,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] Clark M P,Kavetski D,Fenicia F. Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling[J]. Water Resources Research,2011,47(9):W09301.

[21] 芮孝芳. 产流模式的发现与发展[J]. 水利水电科技进展,2013,33(1):1-6. (Rui Xiaofang. The discovery and development of runoff formation models[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(1):1-6. (in Chinese))

[22] 杜若愚,姚成,刘玉环,等. 基于蓄满超渗时空动态组合的网格新安江模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):25-32. (Du Ruoyu,Yao Cheng,Liu Yuhuan,et al. Grid-Xin'anjiang model based on spatio-temporal dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(6):25-32. (in Chinese))

[23] 姚成. 基于栅格的分布式新安江模型构建与分析[D]. 南京:河海大学,2007.

(收稿日期:2024-12-20 编辑:刘晓艳)