

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.002

基于 SuperflexPy 的流域水文模型构建方法

王文鹏^{1,2}, 李欣靖¹, 侯爱中³, 张馨月¹, 刘波¹, 王欣沂¹, 黎春蕾⁴

(1. 河海大学水文水资源学院; 2. 水利部水利大数据重点实验室; 3. 水利部信息中心(水利部水文水资源监测预报中心);
4. 重庆市水文监测总站)

摘要: 为提升水文模型结构对流域产汇流时空异质特征的适配能力,改善传统固定结构模型在不同流域的适用性局限,系统阐述了基于灵活架构理论的 SuperflexPy 建模框架基本原理,以重庆綦江流域为研究区,构建了分散式流域水文模型,通过 18 种水文过程元件组合方案开展对比试验,定量评估不同模型结构的日径流模拟效果。结果表明:基于 SuperflexPy 构建的分散式水文模型可较好地模拟流域控制断面日径流过程;不同元件组合的模拟结果存在显著差异,能够有效识别并反映径流形成过程中的关键水文环节;SuperflexPy 采用面向对象范式实现水文元件模块化封装,通过模拟单元、节点与网络分层组织概化流域拓扑结构,可灵活组配不同产汇流过程,具备较强的流域适应性,能较好刻画流域产汇流时空异质性。

关键词: 水文模型;灵活架构;SuperflexPy;綦江流域

Construction method of catchment hydrological model based on SuperflexPy

Wang Wenpeng^{1,2}, Li Xinjing¹, Hou Aizhong³, Zhang Xinyue¹, Liu Bo¹, Wang Xinyi¹, Li Chunlei⁴

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

2. Key Laboratory of Water Big Data, Ministry of Water Resources;

3. Information Center (Hydrology Monitor and Forecast Center), Ministry of Water Resources;

4. Chongqing Hydrology Monitoring Center)

Abstract: To enhance the adaptability of hydrological model structures to the spatiotemporal heterogeneous characteristics of catchment runoff generation and routing and improve the applicability limitations of traditional fixed-structure models in different catchments, the fundamental principles of the SuperflexPy modeling framework based on the flexible architecture theory were systematically elaborated. By taking the Qijiang River Basin in Chongqing as the study area, a semi-distributed catchment hydrological model was constructed. A comparative test was carried out through 18 assembly schemes of hydrological process elements, and the daily runoff simulation effects of different model structures were quantitatively evaluated. The results indicate that the semi-distributed hydrological model constructed based on SuperflexPy can effectively simulate the daily runoff processes at catchment control sections; the simulation results of different element assembly schemes show significant differences, which can effectively identify and reflect the key hydrological links in the runoff formation process; SuperflexPy adopts an object-oriented paradigm to achieve the modular encapsulation of hydrological elements and generalizes the catchment topological structure through the hierarchical organization of simulation units, nodes, and networks. It can flexibly assemble different runoff generation and routing processes, possesses strong catchment adaptability, and can well depict the spatiotemporal heterogeneity of catchment runoff generation and routing.

Key words: hydrological model; flexible architecture; SuperflexPy; the Qijiang River Basin

概念性水文模型是流域水文模拟与洪水预报最常用的计算工具。受流域下垫面、气候及水文特性空间异质性影响,不同产汇流机制的物理概化方式形成了种类繁多的概念性水文模型。目前尚无单一固定结构的概念性水文模型能够通用于各类流域。在实际洪水预报方案构建中,模型结构选择仍存在较强不确定性,是制约洪水预报精度提升的关键难点之一^[1]。在当前技术条件下,采用一种通用的固定结构水文模型模拟不同气候、地理、下垫面特征的流域产汇流过程还难以实现^[2-3]。水文模型灵活架构理论^[4]认为,模型结构

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3006501);国家自然科学基金联合基金项目(U24A20587);水利部重大科技项目(SKS-2022132);湖南省水利科技项目(XSKJ2025056-22)

作者简介: 王文鹏(1983—),男,副教授,博士,主要从事水文不确定性理论及应用研究。E-mail:wangwphhu@163.com

通信作者: 刘波(1980—),女,副教授,博士,主要从事水资源评价与管理研究。E-mail:liubohhu@hhu.edu.cn

应当由模型各个元件机动组合而成,针对特定流域的产汇流特征,可通过灵活增减或替换水文模型元件,构建适配流域特性的个性化模型结构。基于灵活架构理论,现有研究已提出了实用的水文模型构建方法^[5]。其中,FUSE 框架以 PRMS、SACRAMENTO、TOPMODEL、ARNO/VIC 为原型,将产流过程概化为上层非饱和带与下层饱和带土壤水分的蒸散发、下渗、蓄存及运移等子过程;在各子过程内部,通过兼容并适配上述 4 种模型的本构方程与控制方程,最终形成 79 种模型结构组合;借助 MOPEX 数据集中 2 个典型试验流域,验证了模型结构优化对提升水文模拟精度的重要作用^[6]。Superflex 框架^[7]对模型结构拆分得更精细,它按水文响应功能函数解析模型元件,并提供了开源 Python 工具包 SuperflexPy^[8]允许用户根据实际需求扩展和定制模型元件。赵铜铁钢等^[9]率先建立了基于 Superflex 框架的新安江模型定制元件,并支持与其他概念性水文模型元件的组配。

面向智慧水利发展需求,新一代洪水预报系统建模框架应能充分利用网格或子流域尺度土壤、土地利用类型、植被等影响洪水预报精度的下垫面信息,智能配置产流、汇流等元件,模拟产汇流过程^[10-11]。目前灵活架构理论在国内的研究和应用已取得了初步成果。理论研究方面:Huang 等^[12]提出了地形曲线数与地形指数相结合(CN-TI)的流域主导产流模式划分方法;刘玉环等^[13-14]将 CN-TI 法与水文模型相结合,在子流域尺度发展出了蓄满、超渗、蓄超产流模式的空间组合模型(SCMs);刘玉环等^[15-16]依据降雨和土壤含水量动态识别网格尺度的主导产流模式,提出了基于蓄满超渗时空动态组合的 TOKAISIDE 模型和网格新安江模型。建模应用方面:基于组件技术的模型管理方式^[17]、面向对象的模型服务封装方法^[18]、基于云工作流的模型搭建与并行调度技术^[19],已逐渐推广应用于水利业务系统,为水文模型元件组配提供了可实现的软件技术路径。

依据 Superflex 框架组配水文模型,是在水文响应功能函数的粒度上开展模型适配原理和方法研究,对于进一步研究建立适用于我国洪水预报业务的水文模型灵活架构具有很好的借鉴意义。本文系统阐释了 SuperflexPy 建模框架的基本原理,以重庆綦江流域为研究区,选取 M4^[20]、HYMOD^[21]、GR4J^[22-23] 模型搭建分散式水文模型,并开展模型元件的组配试验,以期为实现流域水文模型的自适应配置提供技术参考。

1 SuperflexPy 基本原理

1.1 Superflex 建模框架的通用元件

SuperflexPy 是用 Python 编程语言实现的 Superflex 建模框架。Superflex 将流域水文过程概化为水量分配、蓄泄、传输过程的有机组合,分别采用水箱、滞后函数和连接件 3 类通用元件表征上述水文过程(图 1)^[7]。图 1 中 I 为输入通量; O 为输出通量; S 为水箱蓄量状态; θ 为水箱蓄泄参数; w 为滞后函数的权重; $I_1 \sim I_n$ 为 n 个输入通量; $O_1 \sim O_n$ 为 n 个输出通量; E 为损失通量; $O_{\text{over-Thr}}$ 为超过阈值的输出通量; $O_{\text{under-Thr}}$ 为低于阈值的输出通量; lag 为输入量对输出量有明显影响的最长滞后时间。水箱用于描述水量的分配和蓄泄过程,可用于模拟土壤水、地下水、积雪融水等动态变化;滞后函数对通量做卷积计算,可用于刻画坡面和河网汇流通量的推移和坦化;连接件用于通量的合并与拆分。连接件既可以将原通量直接拆分,也可以从原通量中扣除损失,将余量流向下一个计算单元,比如从降水中扣减蒸散发等损失形成净雨的计算过程,还可

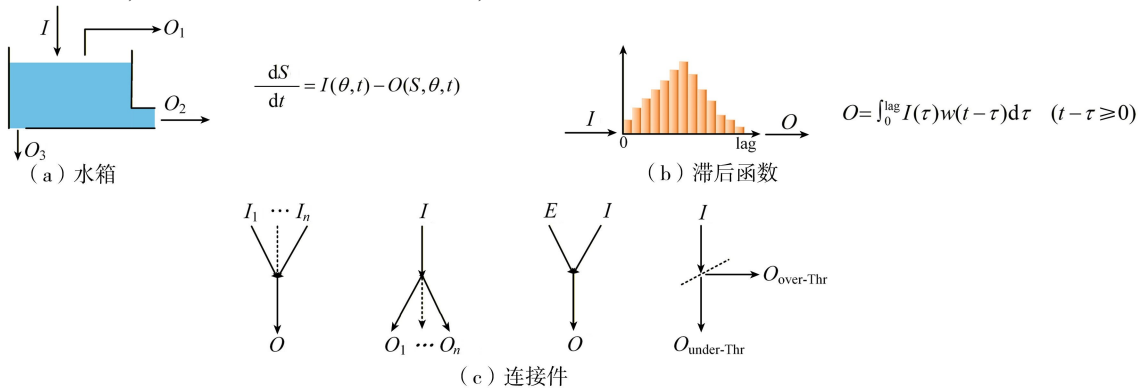


图 1 Superflex 建模框架通用元件

Fig. 1 Generic elements of Superflex modeling framework

以依据门槛将原通量进行拆解,比如模拟超渗产流机制。

1.2 流域拓扑结构的概化

针对实际流域构建水文模型可采用分散式和分布式两种拓扑结构,以考虑降雨空间分布不均匀性和下垫面条件变异性对流域产汇流的影响。分散式结构将流域划分成互不嵌套、不相交叉的若干个子流域,使得每个子流域降雨空间分布基本均匀,然后对每个子流域使用水文模型反映下垫面变异对产流的影响,再通过河网汇流,将各子流域的输出汇集成为流域出口断面流量过程^[24-25]。分布式结构则进一步将子流域剖分成若干个网格单元,使每个单元内的下垫面条件基本一致,进而为各单元配置与其下垫面条件相适应的模型结构及参数;单元之间依循地形、地貌和水系特征形成汇流联系,直至流域出口。

SuperflexPy 框架采用了分散式结构,同时允许将子流域分解成若干单元,但是它要求每个单元之间不能发生水力联系,子流域内部的各个单元为平级关系。各单元流域出口的流量过程独立地进行出口以下河道汇流计算,得到各单元流域在子流域出口的流量过程,再将以上过程线性叠加作为子流域出口流量过程。类似地,各子流域出口流量亦是独立演算至全流域出口,再做线性叠加,组成全流域出口的流量过程。

用于组建流域拓扑结构的 SuperflexPy 构件有 4 个层级:元件、单元、节点和网络^[8]。元件是最基础的构件,用于表征流域水文循环和水流运动的某个子过程;单元由多个元件相连组成,可以模仿集总式水文模型的结构来搭配元件,以模拟单元流域的水文过程;节点可视作子流域出口,连接了多个并行单元,起到将单元出流汇集到子流域出口的作用;网络可看作子流域的拓扑关系,通过连接多个节点,将子流域出流汇集到全流域出口。

1.3 概念性水文模型的定制元件

概念性水文模型是将流域产汇流现象概化为若干个子过程,对每个子过程采用统计曲线、数学方程、逻辑关系等方式表达水量变化和能量转化,形成若干个计算单元,再将这些计算单元按物理关联集成计算系统。从灵活建模的观点考察各种概念性水文模型的区别,主要体现在以下 3 个方面:将流域产汇流现象拆解为子过程的方式不同;对同一子过程采用了不同的数学表达方式;对同一数学表达使用的数值解法有区别。如果想通过改造几种固定结构的水文模型适配一种新的模型结构,要求各模型必须有相同的子过程,并且对于子过程的输入输出有一致的定义^[26],这个条件并不容易满足。

SuperflexPy 从最基础的元件层级起步构建流域水文模型,通过元件或多个元件组合表征某个子过程,再将元件组配成单元构件便可以模拟单元流域的产汇流现象。该方法从数学逻辑上来看,对于不同水文子过程,只要采用类型相同且输入输出定义一致的元件,即可通过元件替换,为目标流域组配适宜的模型结构。元件的输入输出是指单位时段内流入流出元件的水量或能量的累积量,记为通量,通量是相邻元件联系的桥梁;元件储存的水量和能量随时间而变,记为状态变量。要计算元件的输出通量和状态变量需定义两类方程:①本构方程,用于描述元件系统在当前状态下系统输出对输入的响应关系;②控制方程,用于描述系统状态在单位时段的改变量。若元件不改变流域状态就不必包含状态变量,也不用定义控制方程。

SuperflexPy 基于面向对象编程范式封装了通用元件类的属性和方法,利用面向对象的继承性和多态性自定义元件的通量与本构方程、状态变量与控制方程,从而将具体的概念性水文模型分解成元件,形成一批最基础的模型构件。本文以日尺度水文模型 GR4J 为例,说明定制元件的构建思路,其他概念性水文模型可以借鉴该例,制定个性化的 SuperflexPy 元件。GR 系列模型结构简单且具有较高的日径流模拟精度,已在我国南方湿润地区得到了初步应用^[27-29]。GR4J 模型结构主要由截留、产流、汇流 3 个子阶段组成^[22](图 2(a)):①截留阶段根据流域面降雨强度 P 、潜在蒸散发能力 E ,确定有效降雨强度 P_n 和剩余蒸散发能力 E_n ;②产流阶段通过 P_n 和 E_n 计算产流水箱补给强度 P_s 和实际蒸散发强度 E_s ;总产流强度 P_r 由水箱出流强度 Q_{UR} 和剩余有效降雨强度 $(P_n - P_s)$ 构成;③汇流阶段将 P_r 按固定比例 9 : 1 分为两组径流成分:90% 径流成分由单位线函数 $1(U_1)$ 演算,经汇流水箱二次调节后,出流强度记为 Q_{RR} ;10% 径流成分采用单位线函数 $2(U_2)$ 演算,直接汇集到流域出口,出流强度记为 Q_d ;对非闭合流域,两组径流成分都要扣减地下水交换强度 Q_{RF} ;④流域总出流强度 Q 为 Q_{RR} 与 Q_d 之和。

SuperflexPy 采用单元构件模仿 GR4J 模型结构,单元构件共分为 7 层,由 6 个定制连接元件和 3 个通用连接件组成(图 2(b))。第 1 层是模拟截留作用的水箱,通过比较 P 和 E 的数值大小计算 P_n 和 E_n ,不含状态变量。第 2 层是模拟产流作用的水箱,水箱蓄量 S_{UR} 为状态变量。SuperflexPy 支持采用微分形式的状态

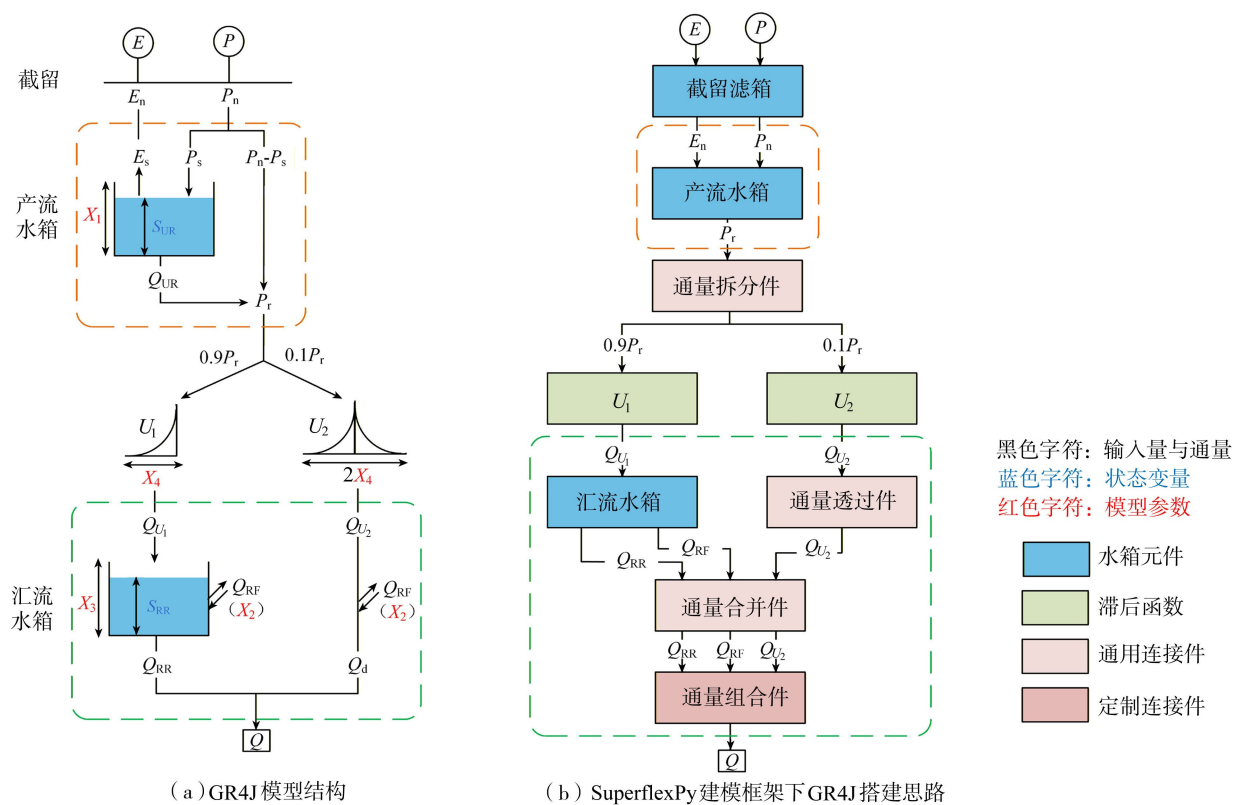


图 2 GR4J 模型及 SuperflexPy 建模框架下 GR4J 模型的结构

Fig. 2 Structure of GR4J model and its configuration under SuperflexPy modeling framework

控制方程,目的是实现模型数学方程与数值解法的分离,使能通过数值解法控制状态变量的求解误差和计算效率^[23,30-31]。微分形式的状态控制方程及初始条件,构成了微分方程的初值问题,可用数值法求解状态变量在不同时刻的取值(式(1))。控制方程的左侧为状态变量的微分,右侧是依据水量平衡原理推导出的多个通量组成的算式。进一步根据模型原理逐一确定右侧通量与状态变量的关系式,即本构方程,就可以形成状态微分方程的完整表达,见表 1^[23]。采用微分方程求解产流水箱状态时,通量 P_s 、 E_s 、 Q_{UR} 都与状态变量 S_{UR} 同步随时间演变,不能将它们分开独立求解,即仅依据时段初或时段末的状态值计算通量,也就是说上述通量计算都应当在产流水箱元件内部与状态变量一并求解完成。第 3 层是通量拆分件,属于通用连接件,无需自定义,只要规定通量 P_r 拆分后流向哪个元件,确定拆分比例即可。第 4 层是模拟两条单位线的滞后函数,作用是将两个径流成分通量分别与相应的单位线做卷积计算。第 5 层包括汇流水箱和通量透过件;汇流水箱的蓄量 S_{RR} 为状态变量,可参考产流水箱的思路推导 S_{RR} 的状态控制方程;通量透过件也是一种通用连接件,不对通量做任何计算,仅起到连接跨层元件并传递通量的作用。第 6 层是通量合并件,亦属于通用连接件,作用是将出自两个上层元件的 3 项通量,依次指派给下层元件。最后一层的通量组合件是定制元件,它先从单位线 UH_2 出流中扣减地下水交换强度,再与汇流水箱出流叠加,形成输出量,即流域总出流强度 Q 。定制元件共包含了 2 个状态变量和 13 个通量,具体定义见表 1。

控制方程

$$\frac{dS_{UR}}{dt} = P_s - E_s - Q_{UR} \Rightarrow S_{UR,t_1} = S_{UR,t_0} + \int_{t_0}^{t_1} dS_{UR} = S_{UR,t_1}$$

初始条件

$$S_{UR} = S_{UR,t_0}$$

式中: S_{UR,t_0} 为时段初的产流水箱蓄量; S_{UR,t_1} 为时段末的产流水箱蓄量。

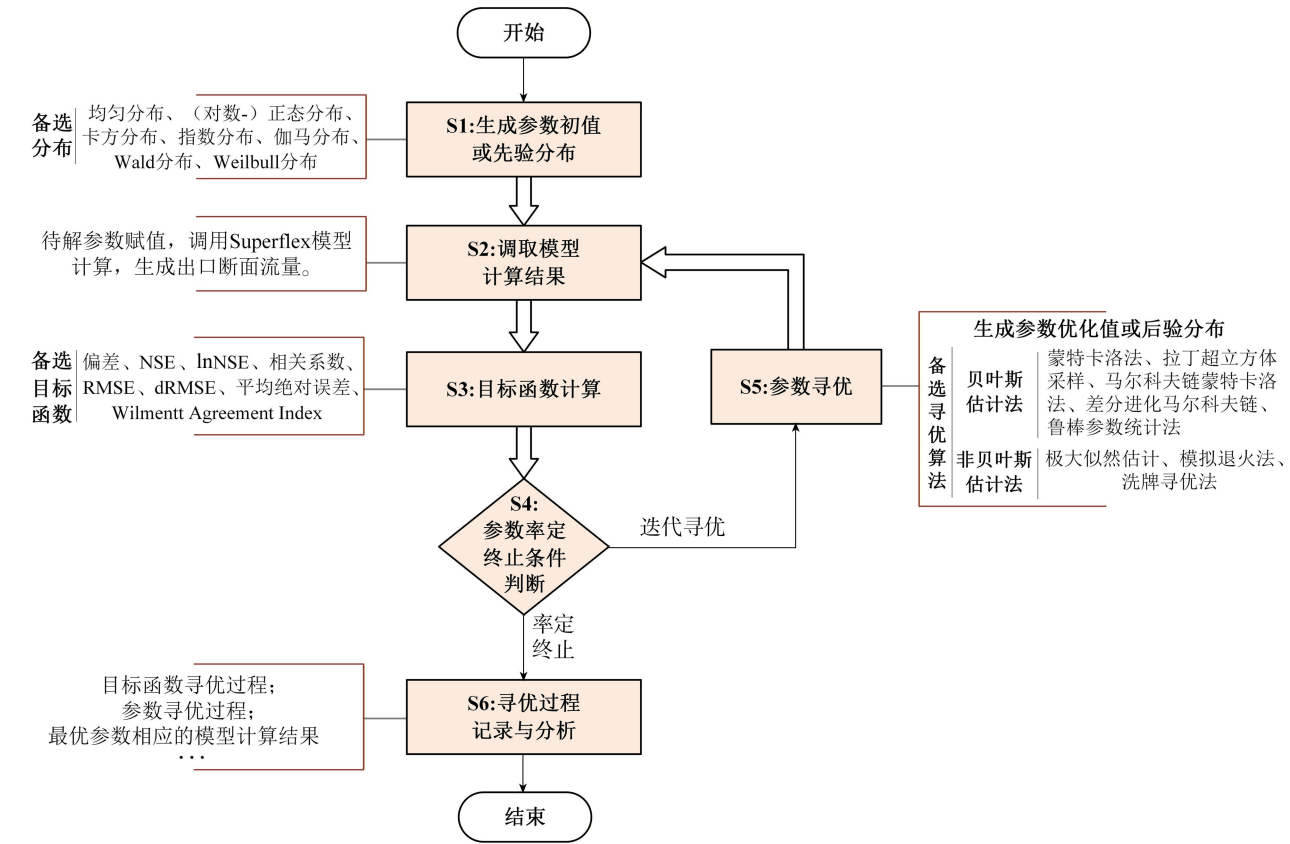
1.4 SuperflexPy 模型的参数率定

SuperflexPy 没有参数率定功能。SPOTPY (statistical parameter optimization tool) 是一款专门用于模型参数率定、不确定性分析和敏感性分析的开源 Python 工具包。SPOTPY 执行模型参数寻优的流程(图 3)与水文模型参数率定的通用流程类似,其特点主要是实现了模型计算与参数寻优算法的解耦,囊括了 8 种参数率定和不确定性分析算法、8 种先验分布可供参数随机采样、11 种目标函数,且支持并行计算^[32]。

表 1 SuperflexPy 建模框架下 GR4J 模型定制元件的数学表达

Table 1 Mathematical expressions of customized elements of GR4J model under SuperflexPy modeling framework

通用元件	定制元件	通量	本构方程	状态量	控制方程
截留滤箱		P	$P_n = \max\{P - E, 0\}$ $E_n = \max\{E - P, 0\}$		
		E			
		P_n			
		E_n			
水箱	产流水箱	E_s	$E_s = E_n \left[2 \frac{S_{UR}}{X_1} - \left(\frac{S_{UR}}{X_1} \right)^2 \right]$	产流水箱蓄量 S_{UR}	$\frac{dS_{UR}}{dt} = P_s - E_s - Q_{UR}$
		P_s	$P_s = P_n \left[1 - \left(\frac{S_{UR}}{X_1} \right)^2 \right]$		
		Q_{UR}	$Q_{UR} = \left(\frac{4}{9} \right)^4 \frac{1}{4X_1^4} S_{UR}^5$		
		P_r	$P_r = Q_{UR} + P_n - P_s$		
		Q_{RR}	$Q_{RR} = \frac{S_{RR}^5}{4X_3^4}$		
汇流水箱		Q_{RF}	$Q_{RF} = X_2 \left(\frac{S_{RR}}{X_3} \right)^{3.5}$	汇流水箱蓄量 S_{RR}	$\frac{dS_{RR}}{dt} = Q_{U_1} - Q_{RR} - Q_{RF}$
滞后函数	U_1	Q_{U_1}	$Q_{U_1} = \sum_{\tau=0}^{X_4} 0.9P_r(\tau)U_1(t-\tau)$		
	U_2	Q_{U_2}	$Q_{U_2} = \sum_{\tau=0}^{2X_4} 0.1P_r(\tau)U_2(t-\tau)$		
连接件	通量组合件	Q	$Q = Q_{RR} + \max\{0, Q_{U_2} - Q_{RF}\}$		



注:S2步允许替换灵活组配的任何模型,双线箭头表示该步骤允许并行计算。

图 3 SPOTPY 参数寻优流程

Fig. 3 Parameter optimization process of SPOTPY

SPOTPY 提供了名为“spotpy_model”的标准接口,接口下属 5 个方法,包括:类初始化(__init__)、提取待解参数值(parameters)、调取模型计算结果(simulation)、提取评价依据(evaluation)、设置目标函数

(objectivefunction)。调用方只要编码实现了以上 5 个方法,就可以生成 spotpy_model 类的实例对象,执行参数寻优的程序,完成确定模型参数的任务。对于使用 SuperflexPy 灵活组配的模式而言,将模型待求解参数的取值编码写入“parameters”方法,将调用模型计算及生成流域出口断面流量序列的程序写入“simulation”方法,将提取流域出口断面实测流量序列的编码写入“evaluation”方法,就实现了 SuperflexPy 与 SPOTPY 的集成。

2 实例分析

2.1 研究区概况

綦江是长江上游干流南岸一级支流,发源于贵州省桐梓县北大娄山系,由南向北于江津区注入长江。綦江地势南高北低,河长约 220 km,流域面积 5 566 km²,属亚热带湿润季风气候区,降雨集中于 5—9 月,多年平均降水量 1 040 mm,最大年降水量 1 350 mm,最小年降水量 750 mm。

綦江流域共设有 47 个雨量站,站网密度 118 km²/站,4 座水文站为东溪、石角、羊市、五岔(图 4)。获取水文整编资料为 2010—2019 年雨水情连续日数据,羊市站设立较晚,日径流资料长度为 2016—2019 年。

2.2 流域水文模型构建

对綦江流域拓扑结构概化如下:以水文控制站为流域出口节点,按照水系流向自源头而下,将流域划分为 4 个子流域区间,即石角以上区间、东溪以上区间、东溪与石角至羊市区间、羊市至五岔区间。本次建模方案在子流域内仅设一个水文响应单元,如需进一步研究可以根据下垫面空间变异性对子流域做更精细的单元流域划分^[33-34]。石角以上区间与东溪以上区间独立地进行产汇流计算,出流经河道汇流演算至羊市节点做线性叠加,再会同羊市区间出流向五岔节点做河道汇流演算,最后与五岔区间出流叠加后组成出口断面流量。

依据 SuperflexPy 建模框架,将綦江流域水文模型概化为由 4 个节点构成的网络。区间节点之间的汇流演算和流量叠加计算由网络构件完成,节点之间的河道汇流演算用滞后函数元件模拟,节点内设唯一单元,单元内由模拟单元流域产汇流过程的若干个计算元件组成(图 5)。本次建模采用 GR4J 模型结构模拟单元流域的日径流过程。

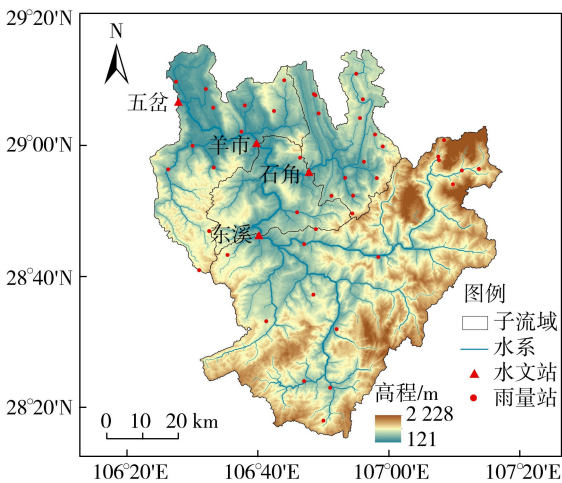


图 4 綦江流域水系与雨水情站网分布

Fig. 4 Distribution of river system and rainfall and hydrological station network in the Qijiang River Basin

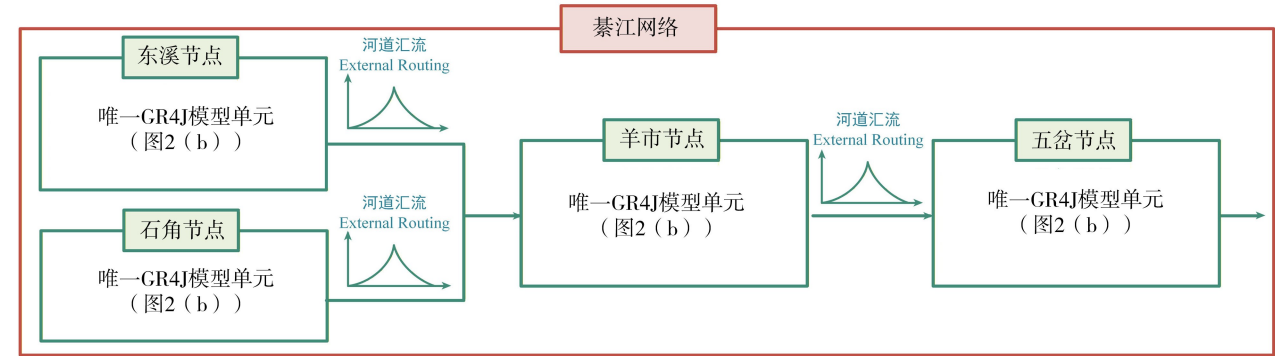


图 5 基于 Superflex 建模的綦江流域拓扑结构

Fig. 5 Topological structure of the Qijiang River Basin based on Superflex modeling

模型参数率定按照水系流向逐级进行,先率定石角以上区间、东溪以上区间的模型参数;再以石角以上区间、东溪以上区间模拟出流过程为上边界入流,用东溪与石角至羊市区间面雨量为输入,以羊市站实测日径流为模型输出依据,率定东溪与石角至羊市区间模型参数;最后以东溪与石角至羊市区间模拟出流过程为上边界入流,用羊市至五岔区间面雨量为输入,依据五岔站实测日径流,率定五岔区间模型参数。

在石角以上区间、东溪以上区间、羊市至五岔区间取 2010—2016 年为模型率定期,2017—2019 年为模

型检验期;在东溪与石角至羊市区间取 2016—2018 年为模型率定期,2019 年为模型检验期。采用参数寻优算法 SCE-UA,以纳什效率系数(NSE)为目标函数率定模型参数。

2.3 模型元件组配方案

Superflex 提供了从元件级组配流域水文模型的计算工具。结合具体流域的气候条件与下垫面特性适配模型结构的基本思路如下^[35-36]:①流域特征信号提取,即提取能够反映流域气候与下垫面条件空间变异性的特征量,如降水中的降雪占比、固结不透水层面积占比等,以及反映流域出流响应的特征量,如年平均径流量、基流指数等,这些特征量称为“信号”;②流域出流响应的控制信号分析,即通过相关分析、建模经验等提出控制流域出流特征的关键信号;③提出模型结构的原假设和备择假设,即依据控制信号选择相应的模型元件,使模型能够模拟特定的水文过程,或者依据控制信号划分单元流域,使模型在不同单元流域的参数取值差异能够反映控制信号的空间变异性;④验证模型结构假设,即依据实测数据比较两类假设下的模型精度,用实例反证接受或拒绝原假设,得出适宜的模型结构。例如,Dal Molin 等^[37]对瑞士图尔河流域的研究表明:固结不透水层面积与基流指数有较强的相关性,据此将每个区间按照固结不透水层面积占比的高低划分为两类单元,分开率定汇流水箱元件的参数,反映基流贡献的差异,得到的日径流模拟精度要优于依据土地利用类型划分单元的方法。

为简要说明不同元件组配模型的差异,以 GR4J 模型为綦江流域水文过程的原型,提出原假设:①截留作用影响水量平衡;②有未经包气带调蓄的直接径流产出(P_n-P_s);③流域不封闭,有地下水交换量 Q_{RF} 产生。为验证该假设,采用另外两种概念性水文模型 M4 和 HYMOD 元件,组建备择假设的模型。M4 和 HYMOD 都不包含截留元件;产流部分都只采用了一个模拟土壤包气带产流作用的水箱元件;汇流部分都不考虑地下水交换量,M4 用一个幂函数水箱元件模拟汇流过程,HYMOD 将径流分为地表和地下两部分,分别用串联线性水库和单个线性水库模拟汇流过程。将 M4、HYMOD、GR4J 模型元件自由组配,共形成 18 种模型结构(图 6),其中 S_{max} 为产流水箱容量, β 为产流水箱产流指数, C_e 为产流水箱产流系数, $k, k_1 \sim k_3, k_{LZ}$ 为

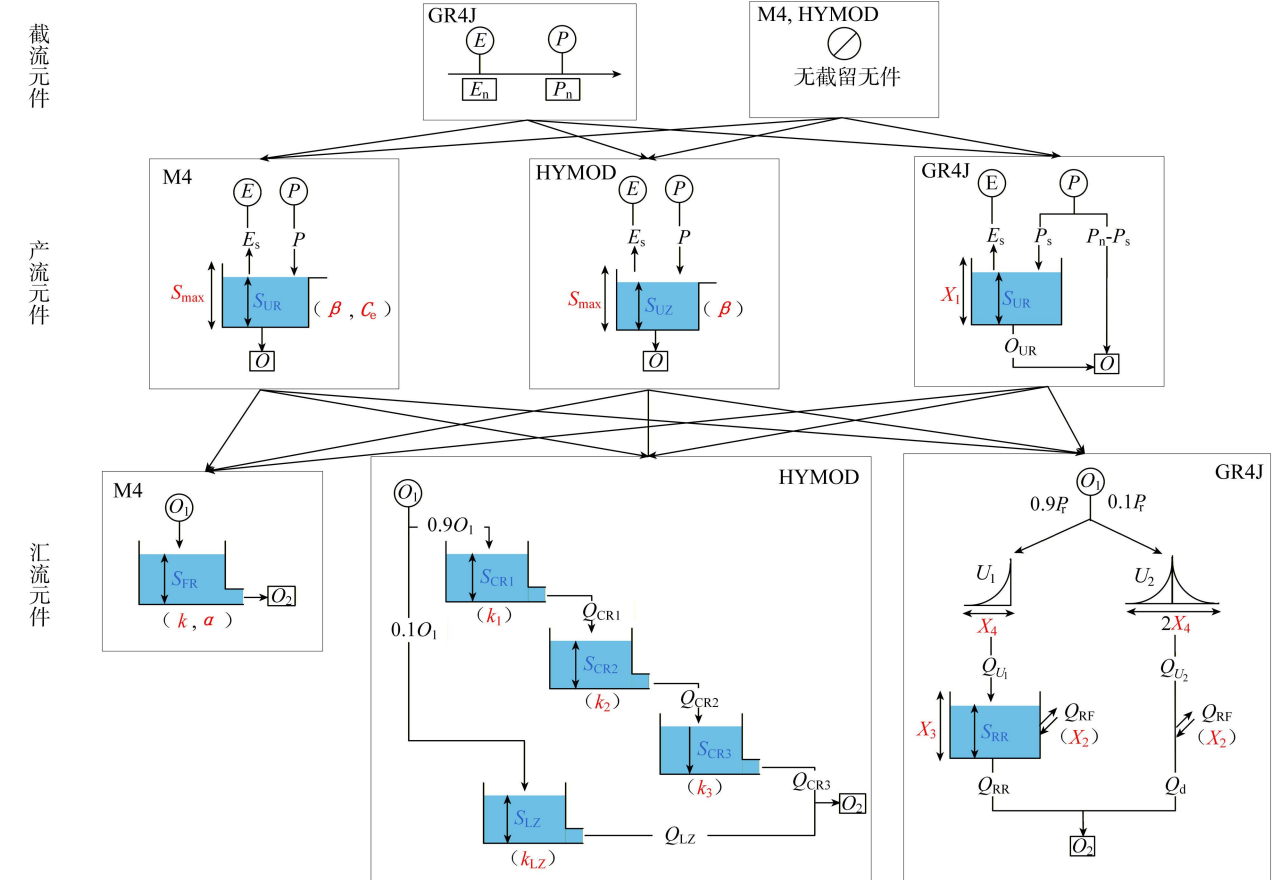


图 6 M4、HYMOD、GR4J 模型元件组配方案

Fig. 6 Element assembly schemes of M4, HYMOD, and GR4J models

汇流水箱退水系数, α 为汇流水箱退水指数, S_{UZ} 为产流水箱状态变量, S_{FR} 、 S_{CR1} 、 S_{CR2} 、 S_{CR3} 、 S_{LZ} 为汇流水箱状态量, $Q_{CR1} \sim Q_{CR3}$ 依次为 1~3 层高流速水箱出流量, Q_{LZ} 为低流速水箱出流量。以五岔站为出口构建集总式水文模型, 比较不同元件组配方案的精度。

2.4 结果与分析

2.4.1 径流模拟效果

由图 7 可知, 模型能较好地模拟各断面日径流过程。流域出口断面五岔站的 NSE 在率定期为 0.88, 验证期为 0.85; 其余断面 NSE 在率定期为 0.81~0.87, 验证期为 0.78~0.85。模型参数在 4 个子流域区间呈现出一定的空间分布规律, 产流水箱容量 X_1 、汇流水箱容量 X_3 以及地下水交换系数 X_2 整体上均为从上游向下游递减; 单位线汇流时间 X_4 由上游向下游递增。此外, X_2 取正值说明流域有不闭合产生的地下水交换问题, 具体表现为地下水对径流有补给作用。

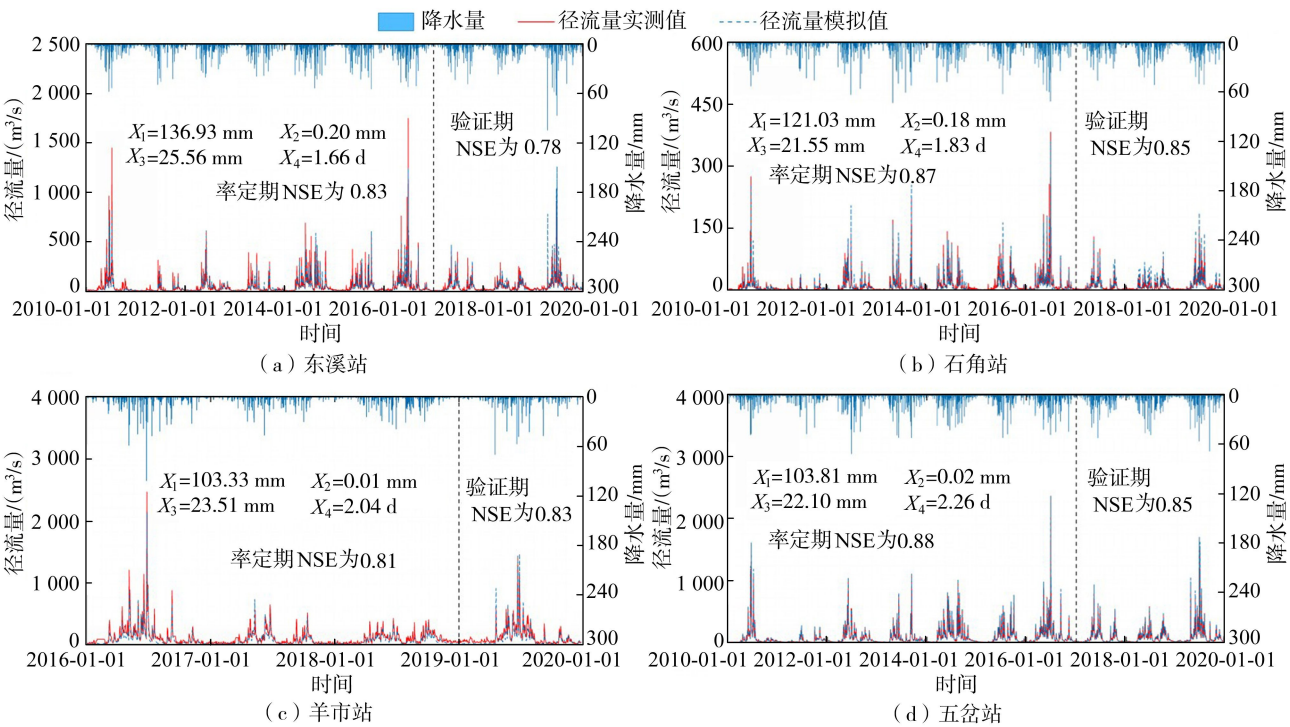


图 7 水文站实测与模拟日径流过程比较

Fig. 7 Comparison of measured and simulated daily runoff processes at hydrological control stations

2.4.2 元件组配效果

灵活组配 18 种模型结构模拟五岔站日径流过程的 NSE 如图 8 所示。考虑截留元件的模型精度仅稍优于未考虑情景, 率定期有无截留元件的各模型结构 NSE 均值均为 0.71, 验证期 NSE 均值从无截留元件的 0.64 略增至有截留元件的 0.65; 产流部分, 率定期采用 M4 产流元件的模型 NSE 均值为 0.73, 优于 GR4J(0.72) 和 HYMOD(0.69), 验证期采用 HYMOD 产流元件的模型 NSE 均值为 0.67, 优于 GR4J(0.65) 和 M4(0.62); 汇流部分, 采用 GR4J 汇流元件的模型精度, 率定期为 0.87, 验证期为 0.80, 都要明显高于 HYMOD(0.66 与 0.59) 和 M4(0.61 与 0.54)。由此可见, 所提原假设①和③都可接受, 但可以拒绝原假设②, 对綦江流域产流部分只要考虑包气带产流作用便可以取得不错的

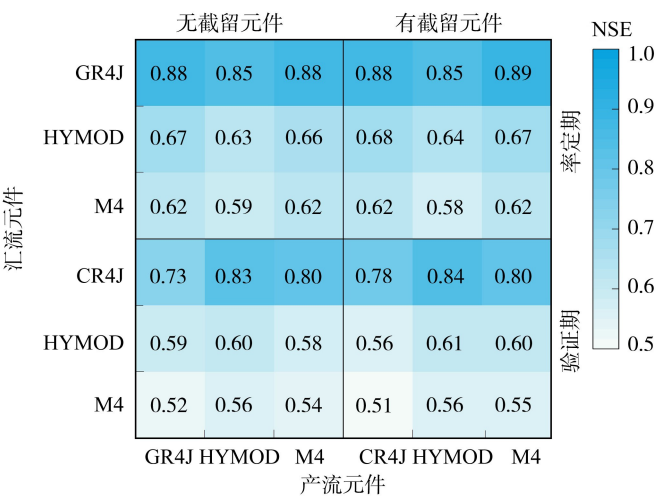


图 8 灵活组配模型的 NSE

Fig. 8 NSE values of flexibly assembled models

径流模拟效果,最适配的模型结构为 GR4J 原型搭配 HYMOD 或 M4 的产流元件。进一步以 2016 年五岔站日径流过程为例,观察汇流元件对日径流过程的影响。由图 9 可见,GR4J 径流过程峰值都要明显高于 HYMOD 和 M4,说明 GR4J 考虑地下水对径流的补给起了作用。需要说明的是,GR4J 和 HYMOD 汇流元件的参数数量都要多于 M4,容易取得较好的径流模拟效果。更严格的元件组配差异分析建议在参数数量一致的条件下进行。

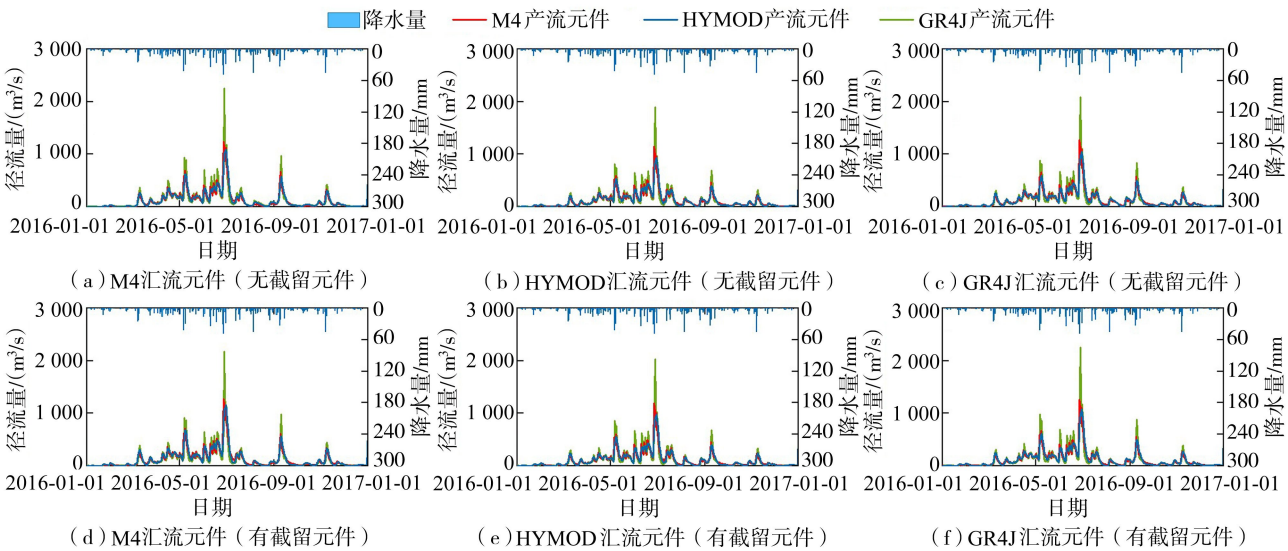


图 9 灵活组配模型模拟的 2016 年五岔站日径流过程

Fig. 9 Daily runoff processes at Wucha Station in 2016 simulated by flexibly assembled models

3 结 语

基于 SuperflexPy 在綦江流域构建的分散式流域水文模型可较好地模拟流域水文站控制断面的日径流过程。利用 SuperflexPy 可灵活替换模型元件的特点,构建并对比分析了 18 种不同组配方案对模拟结果的影响差异,揭示了控制綦江流域日径流形成的关键水文过程。SuperflexPy 采用面向对象编程范式进行封装,支持用户自定义概念性水文模型元件,具有较强的模块化与扩展性。未来研究可结合我国长期水文观测实践与区域产汇流特征,进一步优化模型模块的灵活组配方式,研发更贴合我国流域实际的水文模型,持续提升径流模拟精度。同时,鉴于该工具现有内置元件尚难以全面满足复杂水文过程的模拟需求,建议拓展集成主流产汇流模块,包括蓄满产流(如新安江模型)、超渗产流(如 Green-Ampt 模型)等产流机制,以及二水源、三水源等分水源计算模块,以增强模型适用性与模拟能力。

参考文献:

[1] Addor N,Melsen L A. Legacy, rather than adequacy, drives the selection of hydrological models[J]. Water Resources Research, 2019,55:378-390.

[2] Sivapalan M,Blöschl G,Merz R,et al. Linking flood frequency to long-term water balance:incorporating effects of seasonality[J]. Water Resources Research,2005,41:W06012.

[3] Kirchner J W. Getting the right answers for the right reasons:linking measurements,analyses,and models to advance the science of hydrology[J]. Water Resources Research,2006,42:W03S04.

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

[5] 申笑萱,张珂,张兆安,等. 水文多模型拆分组配与协同优化研究进展[J]. 水资源保护,2025,41(4):189-196. (Shen Xiaoxuan,Zhang Ke,Zhang Zhaoan, et al. Research progress on hydrological multi-model decomposition allocation and collaborative optimization[J]. Water Resources Protection,2025,41(4):189-196. (in Chinese))

[6] Clark M P,Slater A G,Rupp D E,et al. Framework for understanding structural errors (FUSE): a modular framework to diagnose differences between hydrological models[J]. Water Resources Research,2008,44:W00B02.

[7] Fenicia F,Kavetski D,Savenije H H G. Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling:1. motivation and theoretical development[J]. Water Resources Research,2011,47:W11510.

[8] Dal Molin M,Kavetski D,Fenicia F. SuperflexPy 1. 3. 0: an open-source Python framework for building, testing, and improving conceptual hydrological models[J]. Geoscientific Model Development,2021,14(11):7047-7072.

[9] 赵钢铁,陈泽鑫,段凯,等. 一种模块化的新安江模型构建方法:CN117540560A[P]. 2024-02-09.

[10] 刘志雨,侯爱中. 洪水影响预报和风险预警理念与业务实践[J]. 水文,2020,40(1):1-6. (Liu Zhiyu,Hou Aizhong. Concept and practice of impact-based flood forecasting and risk-based flood warning [J]. Journal of China Hydrology,2020,40(1):1-6. (in Chinese))

[11] 李致家,黄鹏年,姚成,等. 灵活架构水文模型在不同产流区的应用[J]. 水科学进展,2014,25(1):28-35. (Li Zhijia,Huang Pengnian,Yao Cheng,et al. Application of flexible-structure hydrological models in different runoff generation regions [J]. Advances in Water Science,2014,25(1):28-35. (in Chinese))

[12] Huang Pengnian,Li Zhijia,Yao Cheng,et al. Spatial combination modeling framework of saturation-excess and infiltration-excess runoff for semihumid watersheds[J]. Advances in Meteorology,2016,2016:5173984.

[13] 刘玉环,李致家,刘志雨,等. 半湿润半干旱流域空间组合模型研究[J]. 湖泊科学,2020,32(3):826-839. (Liu Yuhuan,Li Zhijia,Liu Zhiyu,et al. Spatial combination model for semi-humid and semi-arid watersheds [J]. Journal of Lake Sciences,2020,32(3):826-839. (in Chinese))

[14] Liu Yuhuan,Zhang Ke,Li Zhijia,et al. A hybrid runoff generation modelling framework based on spatial combination of three runoff generation schemes for semi-humid and semi-arid watersheds[J]. Journal of Hydrology,2020,590:125440.

[15] 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))

[16] 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))

[17] 张刚,解建仓,罗军刚. 洪水预报模型组件化及应用[J]. 水利学报,2011,42(12):1479-1486. (Zhang Gang,Xie Jiancang,Luo Jungang. Componentized model of flood forecast and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2011,42(12):1479-1486. (in Chinese))

[18] 余宇峰,胡健伟,严琳,等. 水文模型的服务化封装方法研究与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):34-41. (Yu Yufeng,Hu Jianwei,Yan Lin,et al. Research and application of service encapsulation method of hydrological model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):34-41. (in Chinese))

[19] 贺挺,李凤生,成建国,等. 水利部数字孪生流域模型管理云平台设计及应用研究[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(2):1-15. (He Ting,Li Fengsheng,Cheng Jianguo,et al. Design and application research of digital twin basin model platform of Ministry of Water Resources [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2024,55(2):1-15. (in Chinese))

[20] Kavetski D,Fenicia F. Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling:2. Application and experimental insights[J]. Water Resources Research,2011,47:W11511.

[21] Boyle D P. Multicriteria calibration of hydrologic models[M]. Washington DC:The University of Arizona,2001.

[22] Perrin C,Michel C,Andréassian V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation[J]. Journal of Hydrology,2003,279(1/2/3/4):275-289.

[23] Santos L,Thirel G,Perrin C. Continuous state-space representation of a bucket-type rainfall-runoff model:a case study with the GR4 model using state-space GR4 (version 1. 0) [J]. Geoscientific Model Development,2018,11(4):1591-1605.

[24] 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))

[25] 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. (Rui Xiaofang. More discussion of watershed hydrological model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(2):1-7. (in Chinese))

[26] 黄鹏年. 灵活架构水文模型的研制与应用[D]. 南京:河海大学,2016.

Research,1988,24(5):755-769.

[18] Mace A,Rudolph D L,Kachanoski G. Suitability of parametric models to describe the hydraulic properties of an unsaturated coarse sand and gravel [J]. Groundwater,1998,36(3):465-475.

[19] Zeng X B. Global vegetation root distribution for land modeling[J]. Journal of Hydrometeorology,2001,2(5):525-530.

[20] 贾斌凯,李怀恩,黄绵松,等. 固原市玫瑰苑小区低影响开发措施改造对降雨径流的调控效益[J]. 水土保持通报,2020,40(1):130-135. (Jia Binkai,Li Huairen,Huang Miansong,et al. Regulation and control benefits of rainfall-runoff by low impact development measures in a residential district of Guyuan city[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2020,40(1):130-135. (in Chinese))

[21] 路琪儿,罗平平,虞望琦,等. 城市雨水资源化利用研究进展[J]. 水资源保护,2021,37(6):80-87. (Lu Qier,Luo Pingping,Yu Wangqi,et al. Research progress of urban rainwater resources utilization[J]. Water Resources Protection,2021,37(6):80-87. (in Chinese))

[22] Wang Cong,Wang Shuai,Fu Bojie. Advances in hydrological modelling with the Budyko framework;a review [J]. Progress in Physical Geography,2016,40(3):409-430.

[23] Ragab R,Rosier P,Dixon A,et al. Experimental study of water fluxes in a residential area:2. road infiltration,runoff and evaporation [J]. Hydrological Processes,2003,17:2423-2437.

(收稿日期:2025-02-18 编辑:刘晓艳)

(上接第17页)

[27] 王文鹏,何站鹏,巫义锐,等. 基于集合卡尔曼滤波的水文模型状态变量反馈校正方法[J]. 水力发电学报,2024,43(10):17-31. (Wang Wenpeng,He Dianpeng,Wu Yirui,et al. State variable feedback-correction method of hydrological model based on ensemble Kalman filter[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2024,43(10):17-31. (in Chinese))

[28] 邓鹏鑫,王银堂,胡庆芳,等. GR4J 模型在赣江流域日径流模拟中的应用[J]. 水文,2014,34(2):60-65. (Deng Pengxin,Wang Yintang,Hu Qingfang,et al. Application of GR4J in daily runoff simulation for Ganjiang river basin[J]. Journal of China Hydrology,2014,34(2):60-65. (in Chinese))

[29] 许王辰,陈瑞弘,孙岸炜. 基于峰值导向型粒子群优化算法的城市水文模型自动率定方法[J]. 水利水电科技进展,2025,45(4):31-38. (Xu Wangchen,Chen Ruihong,Sun Anwei. Automatic calibration method for urban hydrological models based on peak-oriented particle swarm optimization algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(4):31-38. (in Chinese))

[30] 梁忠民,赵建飞,段雅楠,等. 微分形式新安江模型[J]. 水科学进展,2024,35(3):374-386. (Liang Zhongmin,Zhao Jianfei,Duan Ya'nan,et al. Differential-form Xin'anjiang model[J]. Advances in Water Science,2024,35(3):374-386. (in Chinese))

[31] Zhao Jianfei,Liang Zhongmin,Singh V P,et al. Two-dimensional differential form of distributed Xin'anjiang model [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2025,29(15):3745-3769.

[32] Houska T,Kraft P,Chamorro-Chavez A,et al. SPOTting model parameters using a ready-made Python package[J]. PLOS ONE,2015,10(12):e0145180.

[33] 张旭,蒋卫国,周廷刚,等. GIS 支持下的基于 DEM 的水文响应单元划分:以洞庭湖为例[J]. 地理与地理信息科学,2009,25(4):17-21. (Zhang Xu,Jiang Weiguo,Zhou Tinggang,et al. Hydrological response unit division for Dongting Lake based on DEM and GIS[J]. Geography and Geo-Information Science,2009,25(4):17-21. (in Chinese))

[34] Antonetti M,Buss R,Scherrer S,et al. Mapping dominant runoff processes:an evaluation of different approaches using similarity measures and synthetic runoff simulations[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2016,20(7):2929-2945.

[35] Fenicia F,McDonnell J J. Modeling streamflow variability at the regional scale:(1) perceptual model development through signature analysis[J]. Journal of Hydrology,2022,605:127287.

[36] Fenicia F,Meißner D,McDonnell J J. Modeling streamflow variability at the regional scale:(2) development of a bespoke distributed conceptual model[J]. Journal of Hydrology,2022,605:127286.

[37] Dal Molin M,Schirmer M,Zappa M,et al. Understanding dominant controls on streamflow spatial variability to set up a semi-distributed hydrological model:the case study of the Thur catchment[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2020,24(3):1319-1345.

(收稿日期:2025-06-24 编辑:刘晓艳)