

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0110

张博美,高红凯,余敦先,等.以地形为基础的HSC产流模型在辽西半干旱丘陵流域的适用性[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1072-1082. ZHANG B M,GAO H K,SHE D X,et al.HSC topography-driven runoff generation model's applicability in a semi-arid watershed in western Liaoning Province[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(6):1072-1082.(in Chinese)

以地形为基础的HSC产流模型在辽西半干旱丘陵流域的适用性

张博美¹,高红凯^{1,2},余敦先³,邵伟⁴,夏军³

(1. 华东师范大学地理科学学院,上海 200241;2. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室,上海 200241;
3. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,武汉 430072;4. 南京信息工程大学水文与水资源工程学院,南京 210044)

摘要:采用以地形为基础的HSC产流模型(HAND-based storage capacity curve),以典型半干旱丘陵区的辽宁省叶柏寿流域为研究区,检验模拟效果。在只改变产流模块的情况下,把HSC线型同HBV(hydrologiska byråns vattenbalansavdelning)模型的beta函数、新安江模型的蓄水容量曲线、基于雨强阈值的超渗模型进行比较后发现,在进行长时间序列模拟时,极端高洪峰流量过程对径流的模拟结果有很强的影响。传统模型依赖参数率定,普遍存在参数过拟合现象,即为了提高洪峰流量模拟精度,导致优化的产流参数严重背离物理意义和假设。研究提出的产流模型基于HSC线型并耦合根系区蓄水容量反演的MCT方法,参数物理意义明确且无需率定,可避免传统模型存在的为提高对少数洪峰流量的模拟精度而产生的参数过拟合现象,因此在率定期和验证期其洪水模拟精度表现更为可靠和稳定。

关键词:以地形为基础的HSC产流模型;产流机制;干旱半干旱区水文;叶柏寿流域;辽西半干旱丘陵流域

中图分类号:TV214 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



干旱半干旱区约占我国国土面积52.5%^[1],该区域水资源短缺,供需矛盾突出,水资源是制约其经济社会发展和生态保护的瓶颈问题^[2-3]。开展干旱半干旱地区的水文过程研究,对优化和调控干旱区水资源开发利用具有重要意义^[4-5]。在干旱半干旱地区,由于植被覆盖率低、包气带厚且干燥、下垫面条件复杂、气候变化异常以及降雨时空分布不均等因素的影响,产汇流机制复杂,局部产流现象严重,给水文过程模拟与预报带来较大困难,建立广泛适用的干旱半干旱区水文模型难度极大^[6-10]。针对干旱半干旱地区的产流特点和气候条件,众多学者^[11-15]建立或改进一些经典的水文模型,在部分干

旱半干旱的研究区模拟效果也比较好。但干旱半干旱地区降水过程有局地气候的特点,在许多流域还存在雨量站网密度低、数据精度不高的问题^[16-17],导致某些模型即使在研究区内模拟效果较好也难以应用于实际,并且部分模型参数较多,限制了其应用。

流域的水文过程受到气候、土壤、植被覆被、地形等因素的综合影响^[18-19]。研究^[20]表明地形是综合反映地表能量、水分、土壤、植被的重要信息,在水文模型中充分考虑地形信息可以提升产流的模拟精度和效果。如Gao等^[21]基于地形因子HAND(height above the nearest drainage,距最近河道的

收稿日期:2021-01-18 修回日期:2021-05-31 网络出版时间:2021-06-07

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210607.1124.002.html

基金项目:国家自然科学基金项目(42071081)

作者简介:张博美(1999—),女,四川成都人,主要从事流域水文模型研究。E-mail:zhangbomei@126.com

通信作者:高红凯(1984—),男,河南濮阳人,研究员,博士,主要从事流域水文模型研究。E-mail:hkgao@geo.ccnu.edu.cn

相对高程)^[22]和变源产流面积理论构建的以地形为基础的 HSC 产流模型。其中,地形因子 HAND 在水动力角度可以反映水力梯度,在生态学角度可以综合反映植物根系非饱和区的蓄水容量^[23],因此可量化土壤水分蓄水容量的空间分布。以地形为基础的 HSC 产流模型利用 HAND 构建的模拟产流过程的非线性线型,减少了产流过程中的自由参数,降低了模型异参同效现象。同时流域的根区最大蓄水容量也可以通过 MCT(mass curve technique)方法^[24],采用遥感和地面实测的降水、蒸散发等气象数据获取,因此构建的 HSC-MCT 产流模型的参数无需率定。

已有研究^[21]表明,在美国的 323 个流域进行的径流模拟试验验证了 HSC 模型的模拟效果,并且在地势平缓、森林覆被率低、略微干旱区域的模拟效果相比广泛应用的 HBV 和 TOPMODEL 更优。为检验 HSC 产流模型在我国干旱半干旱地区的应用效果,本文选择我国东北典型半干旱丘陵区叶柏寿流域为研究区域,通过对比 HSC 产流模型(指采用 HSC 线型的水文模型)、HBV 水文模型(指采用 HBV beta 线型的水文模型)、新安江水文模型(指采用新安江模型蓄水容量曲线的水文模型)以及基于雨强阈值的超渗模型在该地区的模拟效果,探讨适用于该研究区域的产流模式,以期为我国干旱半干旱地区产流过程及机制研究提供借鉴和参考。

1 研究区概况

叶柏寿流域位于我国辽宁省西部地区,见图 1(a),

属于典型的半干旱丘陵区,流域范围为 119.42°E~119.74°E,41.28°N~41.57°N,流域面积约为 192 km²。气候类型为温带大陆性季风气候,具有雨热同期、日照丰富、降雨量少等特点。多年平均降水量约为 465 mm,多集中在夏季(6—9 月),且多数降雨强度大、时间短;年平均潜在蒸发量近 2 000 mm;径流年内分配不均,多为暴雨洪水。降雨径流具有很强的非线性特征。地势西北高东南低,地形以丘陵山地为主,间有小块山间平地与沿河冲积平原,形成了极为丰富的局地气候。山坡上多为自然生长的灌丛、针叶林,河流两岸种植了粮食作物和经济作物,绝大部分农田为雨养农业。

2 数据获取与处理

HSC 水文模型运行的基础数据包括流域的水文气象和地形数据。本文所采用的气象和流量数据来自于叶柏寿水文监测站,该站位于大凌河支流第二牯牛河的上游,是流域内唯一的水文监测站。潜在蒸散发数据利用逐日气温数据运用 Hamon 方程计算。地形数据通过流域 DEM 数据获得。DEM 数据为 USGS 提供的 90 m 分辨率 SRTM 数据,见图 1(a)。采用 ArcGIS 填洼后的 DEM 和流向数据,利用 ArcToolbox 中的 Flow Distance 工具获得 HAND(距离最近河流的相对高程)图,见图 1(b)。使用 MATLAB 程序设计对 HAND 进行数据处理,得到蓄水容量的空间分布,进而得到产流量与土壤相对湿度的非线性关系。

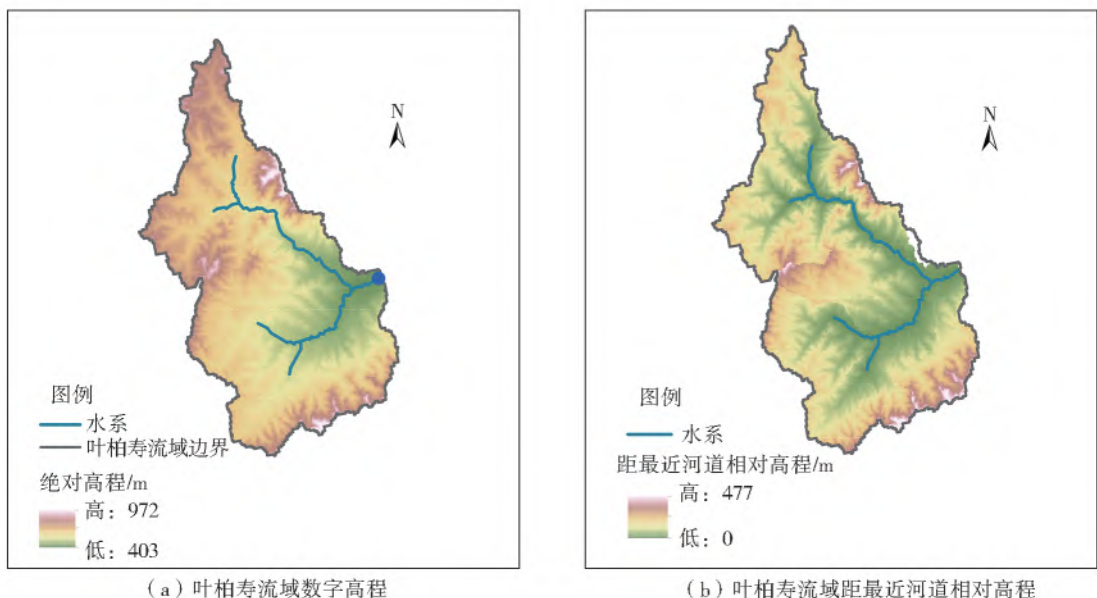


图 1 叶柏寿流域示意图

Fig. 1 The map of Yebaishou watershed

3 研究方法

采用的水文模型主要可以分为截留、蒸发、产流和汇流等 4 个模块。研究过程中仅改变模型的产流模块,利用 Kling-Gupta 效率系数(I_{KGE})、确定性系数(R^2)以及均方根误差(E_{RMS})评价模型的模拟效果。

3.1 模型简介

3.1.1 截留模块

截留模块计算植物冠层对降水的截留量。在截留模块中使用参数 S_{\max} (最大截留量阈值)将降水划分为进入土壤的部分和被植物冠层截留的部分,小于 S_{\max} 的降水被截留和蒸发,其余降水进入土壤。

3.1.2 蒸发模块

蒸发模块结合土壤相对湿度(S_u/S_{\max})和潜在蒸发计算进入土壤的降水的实际蒸发量。当土壤相对湿度小于水分蒸发阈值系数 C_e ,则实际蒸发与土壤相对湿度呈线型正相关关系;当土壤相对湿度大于 C_e ,则土壤的实际蒸散发等于潜在蒸散发。

3.1.3 产流模块

产流模块主要描述的是进入土壤的降水产生净雨的过程。为检验 HSC 产流模块的模拟效果,采用 HBV、新安江模型蓄水容量曲线、基于雨强的超渗产流模型等,作为基准模型进行对比研究。HSC、HSC-MCT 和用于对比的 HBV、新安江水文模型主要是依据土壤相对湿度(S_u/S_{\max})计算出的流域产流比例(A_s)将进入土壤的降水划分为入渗和产流从而计算净雨量。基于雨强的超渗产流模型主要是通过下渗阈值参数 F 和降水强度的相对大小对降水进行划分从而计算净雨量。

(1)以地形为基础的 HSC 产流模型。该模型基于地形因子 HAND (height above the nearest drainage)确定蓄水容量曲线和产流比例。HSC 基于全球大样本的生态学观测事实,即一般情况下根系深度随 HAND 增加,基于此假设 HAND 值和局地的根系区土壤蓄水容量 $S_{\max,i}$ 存在正线性相关关系,进而建立基于地形的产流量与相对土壤湿度间的非线性关系。实际操作时,首先由 DEM 获得整个流域各点的 HAND 值后,将流域平均根区蓄水容量 S_{\max} 根据 HAND 值离散化,得到每个格点的土壤根系蓄水容量 $S_{\max,i}$,进而构建流域的蓄水容量曲线。当流域土壤水分超过 $S_{\max,i}$ 时,该区域发生产流过程。用于计算流域平均土壤水分和产流比

例的公式为

$$S_u = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^s S_{\max,i} + S_{\max,s} (n-s) \right] \quad (1)$$

$$A_s = \frac{s}{n} \quad (2)$$

式中: S_u 为流域平均土壤水分,mm; n 为将 HAND 值进行标准化处理后的频带个数; s 为流域所有饱和区域的频带数目; $S_{\max,i}$ 为流域某区域的根区蓄水容量,mm; $S_{\max,s}$ 为流域土壤饱和区域的最大根区蓄水容量,mm; A_s 为流域产流面积比例。

(2)MCT(mass curve technique)方法。根系区是地球表层系统中联接水文、土壤、生态和气候的纽带,其储水能力的大小(S_{\max})决定了流域下垫面将降水分为入渗(供给蒸发和蒸腾)和产流的比例,是众多概念性水文模型的核心参数。Gao 等^[25]提出借鉴水库设计中常用的水量累积曲线法(mass curve technique, MCT),该方法假设生态系统根据降雨特征和植被需水来最优化根系区储水能力,通过可观测的降水和遥感蒸发等气象资料反演根系区储水能力。 S_{\max} 的大小是植被在保障干早期需水前提下,尽量减少地下生物量的生存策略的结果。该方法已在泰国和美国 300 多个流域得到验证,并且 Wang-Erlandsson 等^[24]也根据降水和遥感蒸散发等气候资料计算出了全球根区蓄水容量。本研究利用 Wang-Erlandsson 等反演的叶柏寿流域根区蓄水容量(S_{\max}),构建基于 HSC 线型的无需率定产流过程的 HSC-MCT 水文模型。

(3)HBV 模型 beta 曲线。HBV 水文模型是由瑞典国家水文气象局(SMHI)开发的考虑土壤湿度的概念模型,认为产流比例和土壤水分之间为幂函数关系:

$$A_s = \left(\frac{S_u}{S_{\max}} \right)^\beta \quad (3)$$

式中: A_s 为流域产流面积比例; S_u 为流域平均土壤水分,mm; S_{\max} 为流域平均土壤蓄水容量(即田间持水量),mm; β 为反映产流量与土壤水分的非线性关系。

(4)新安江模型的蓄水容量曲线。蓄水容量曲线是新安江模型^[26]计算产流过程的核心,基于大量数据分析和水文规律的深刻认识,能反映流域土壤水分分布的异质性对产流面积比例的影响:

$$A_s = 1 - \left(1 - \frac{S_u}{S_{\max}} \right)^\beta \quad (4)$$

式中: A_s 为流域产流面积比例; S_u 为流域土壤水分,mm; S_{\max} 为流域土壤蓄水容量,mm; β 反映了流域土壤水分分布的不均匀情况。

(5)基于雨强阈值的超渗模型。采用超渗产流机制进行径流模拟研究时,往往对研究数据精度要求高,需要小时甚至分钟尺度的数据,而本文所使用的降雨径流为日尺度的数据,数据精度较粗。因此,本文仅通过设置下渗阈值 F 对超渗产流机制进行

简单概化来模拟径流^[27]:当降雨强度小于 F 时,进入土壤的水分全部下渗;当降雨强度大于 F 时,余下的部分产流。下渗阈值 F 主要依据图 2 的叶柏寿流域土壤质地、不同土壤质地的饱和导水率以及流域实际的降雨径流情况来确定。

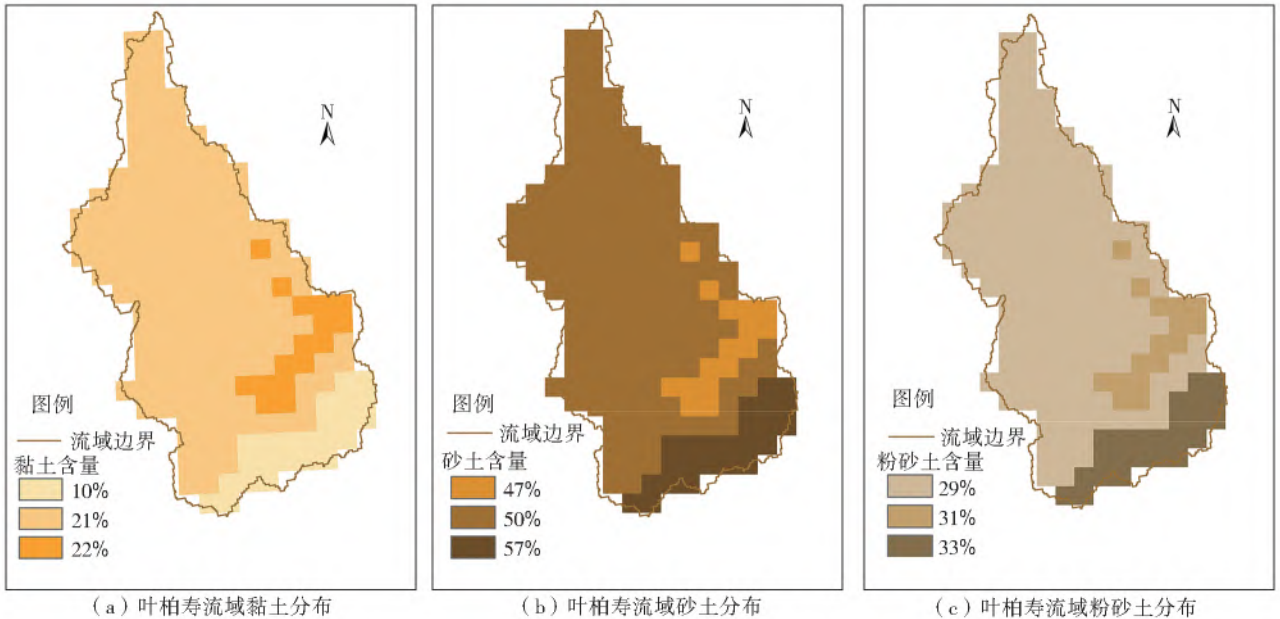


图 2 叶柏寿流域土壤质地分布情况

Fig. 2 The map of soil texture distribution in Yebaishou watershed

3.1.4 汇流模块

汇流模块表达的是产流模型计算的净雨汇流到流域出口断面形成的流量过程。汇流前,先通过参数 D 进行径流组划分,采用线性水库方法模拟快速退水、慢速退水的汇流过程。快速退水径流使用参数 T_{lagf} (从降雨峰到洪峰的延迟时间)反映地表径流或壤中流成分的汇流时滞,并利用参数 K_f (快速消退系数)计算出流 Q_f (快速

退水径流)。 Q_s (慢速退水径流)运用参数 K_s (慢速消退系数)计算出流。输出的模拟径流 Q_m 为 Q_f 和 Q_s 之和。

3.2 模型率定和验证

水文模型主要通过模型结构和参数来表达流域的水文规律和特征,需率定的模型参数的物理意义及参数范围^[21]见表 1,各模型需率定的模型参数在表 1 中以“√”表示。

表 1 模型参数

Tab. 1 The parameters of the models

模型参数	模型参数物理意义	参数范围	HSC 水文模型	HSC-MCT 水文模型	HBV 水文模型	新安江水文模型	设置阈值的超渗产流
S_{max}/mm	最大截留量阈值	(2,50)	√	√	√	√	√
S_{umax}/mm	根系非饱和区土壤蓄水容量	(10,1 000)	√		√	√	
C_e	土壤水分蒸发阈值系数	(0.1,1.0)	√	√	√	√	√
D	径流划分参数	(0,1)	√	√	√	√	√
T_{lagf}/d	降雨峰到洪峰的延迟时间	(0,10)	√	√	√	√	√
K_f/d	快速退水系数	(1,20)	√	√	√	√	√
K_s/d	慢速退水系数	(20,400)	√	√	√	√	√
β	线型参数	(0.01,5.00)			√	√	
$F/(mm \cdot d^{-1})$	下渗阈值	(10,50)					√

模型参数的率定采用叶柏寿流域 1961—1970 年的数据,利用多目标洗牌复合形进化算法(以下简称 MOSCEM-UA)^[28] 获得率定后的模型参数。MOSCEM-UA 算法利用评价模型模拟效果的目标函数,得到基于目标函数的帕累托前沿。本文将取得帕累托前沿的参数集取平均值作为模型参数的最终率定结果进行径流模拟结果展示和分析。判断径流模拟效果的 Kling-Gupta 效率系数(见第 3.3 节)和用于评价基流效果的 Kling-Gupta 效率系数的对数作为目标函数,并将初始样本数目设置为需率定的参数数目的平方,复合型个数设为模型需率定的参数数目,最大迭代次数设置为 20 000。然后依据率定后的模型参数,使用叶柏寿流域 1971—1980 年的降雨径流数据进行验证,得到率定期与验证期的径流模拟结果用于进一步分析。

3.3 模型评价

使用 Kling-Gupta 效率系数(I_{KGE})、确定性系数(R^2)以及均方根误差(E_{RMS})作为评估模型性能的指标。 I_{KGE} 的计算公式为

$$I_{KGE} = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\sigma-1)^2 + (\epsilon-1)^2} \quad (5)$$

式中: r 为模型模拟径流值 Q_m 和观测径流值 Q_o 之间的相关系数; σ 为模型模拟径流 Q_m 的标准差和实际观测径流 Q_o 标准差的比值,可以反映模型模拟值和观测值之间的相对变化; ϵ 为模型模拟径流 Q_m 的平均值与实际观测径流 Q_o 平均值之间的比值。 I_{KGE} 的取值范围为负无穷到 1, I_{KGE} 值越大表示模拟效果越好。

R^2 的计算公式为

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)(Q_{mi} - \bar{Q}_m)]^2}{(\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{mi} - \bar{Q}_m)^2)} \quad (6)$$

式中: \bar{Q}_m 为模型模拟径流平均值; \bar{Q}_o 为观测径流平均值; Q_{mi} 为第 i 天的模型模拟径流值; Q_{oi} 为第 i 天的观测径流值; n 为观测天数; R^2 取值范围为 0~1,越接近 1 模型的模拟效果越好。

E_{RMS} 的计算公式为

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{mi} - Q_{oi})^2}{n}} \quad (7)$$

式中: Q_{mi} 为第 i 天的模型模拟径流值; Q_{oi} 为第 i 天的观测径流值; n 为观测天数。 E_{RMS} 取值范围为 0 到正无穷, E_{RMS} 越接近 0 模型的模拟效果越好。

4 模型模拟结果

4.1 流量过程线

为了直观反映各模型的模拟效果,在率定期和验证期分别选取 1965 年和 1975 年,将它们汛期(6—9 月)的降雨径流情况绘制成图,见图 3、4。对于率定期(1965 年),这 5 种水文模型能模拟出主要的洪峰,但是基于雨强阈值的超渗模型没有模拟出小洪峰。同时,在洪量的模拟上,对于 1965 年的最大洪峰,HSC-MCT 水文模型模拟较为准确,而另外 4 个模型都存在明显的高估现象。对于验证期(1975 年),除基于雨强阈值的超渗模型无法模拟一些小洪峰外,对于主要洪峰的出现时间这 5 个水文模型都能较好重现;在洪量的模拟上 HSC-MCT 水文模型模拟情况相对较好,另外 4 个模型都存在明显的高估现象。

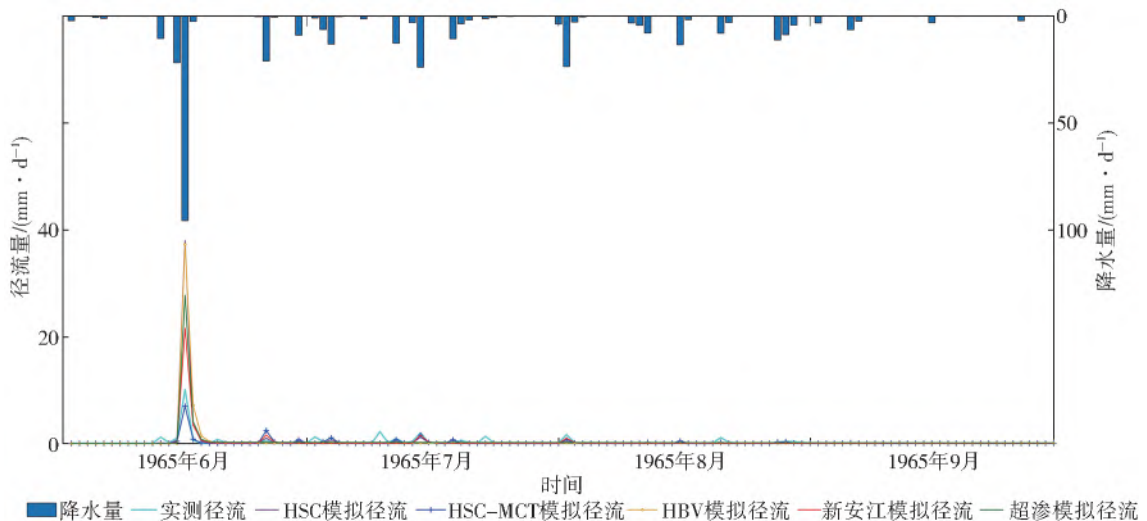


图 3 叶柏寿流域 1965 年(率定期)汛期降雨径流过程线

Fig. 3 The rainfall-runoff process line in 1965 flood season (calibration period) of Yebaishou watershed

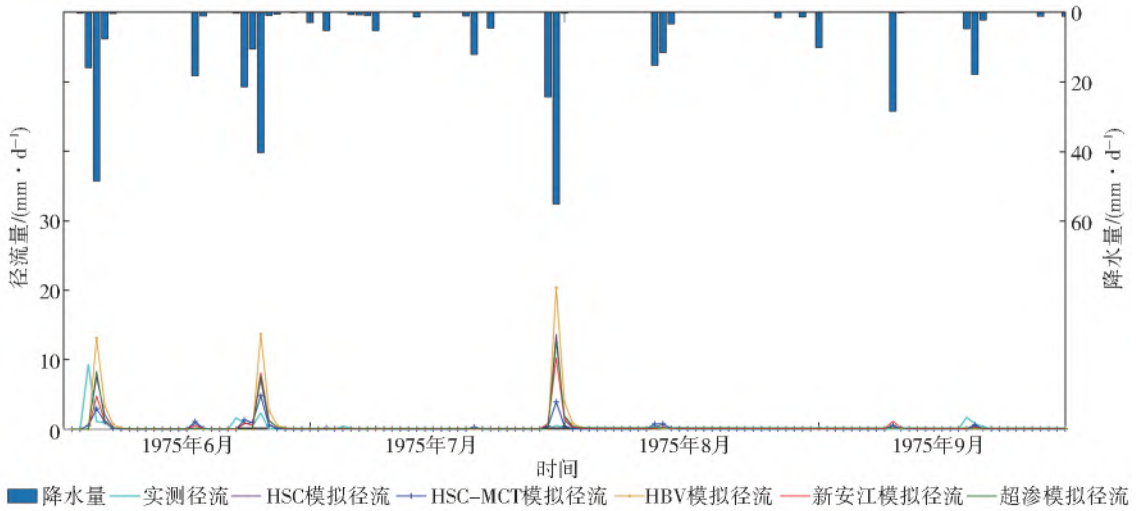


图 4 叶柏寿流域 1975 年(验证期)汛期降雨径流过程线

Fig. 4 The rainfall-runoff process line in 1975 flood season (validation period) of Yebaishou watershed

1962 年发生了叶柏寿建站以来最大洪峰,1962 年汛期(6—9 月)的降雨径流情况见图 5。从流量过程线上看,对于 1962 年最大洪峰,洪量的模拟上

HSC-MCT 水文模型以及基于雨强阈值的超渗模型存在明显低估,另外 3 个模型则较为准确,其中 HSC 水文模型模拟效果最佳。

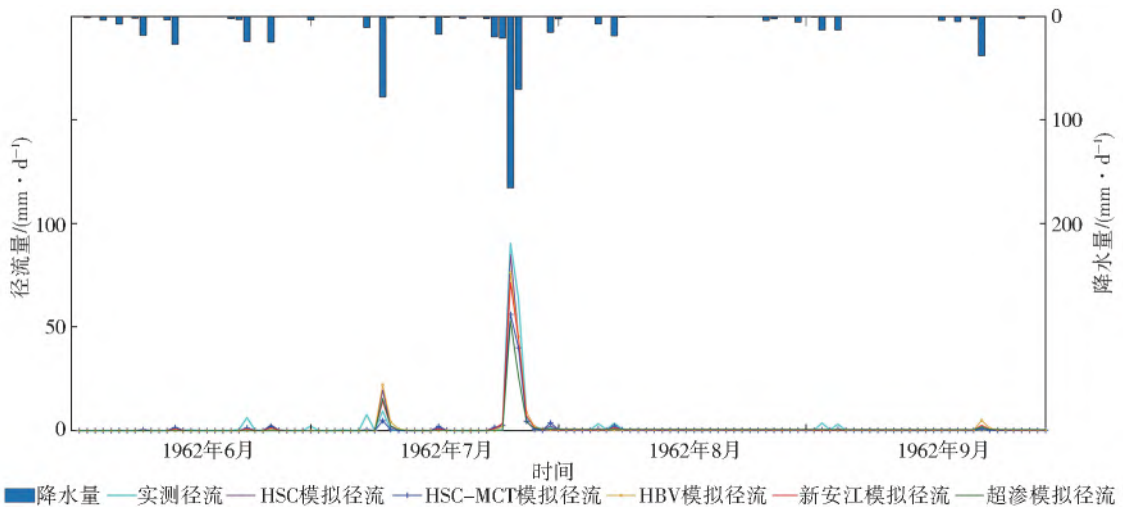


图 5 叶柏寿流域 1962 年(率定期)汛期降雨径流过程线

Fig. 5 The rainfall-runoff process line in 1962 flood season (calibration period) of Yebaishou watershed

4.2 模型模拟效果

为了比较各模型的模拟效果,将各模型 MOS-CEM-UA 参数寻优后得到的帕累托前沿的有效参

数集取平均,并计算其 Kling-Gupta 效率系数 (I_{KGE})、确定性系数 (R^2) 以及均方根误差 (E_{RMS}),见表 2。

表 2 基于帕累托前沿参数集取平均的模型模拟结果评价(率定期 1961—1970,验证期 1971—1980)

Tab. 2 The evaluation of model simulation results based on the averaged parameter sets on the Pareto-frontier(1961-1970 as calibration, and 1971-1980 as validation)

模型名称	I_{KGE}		R^2		$E_{RMS}/(mm \cdot d^{-1})$	
	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期
HSC 水文模型	0.87	-0.28	0.79	0.18	0.93	0.67
HSC-MCT 水文模型	0.52	0.43	0.90	0.24	0.89	0.40
HBV 水文模型	0.85	-0.89	0.74	0.13	1.04	0.86
新安江水文模型	0.78	0	0.85	0.18	0.79	0.58
超渗产流水文模型	0.51	0.13	0.74	0.09	1.11	0.53

从表 2 中的 I_{KGE} 值来看,在率定期:HSC 水文模型、HBV 水文模型以及新安江水文模型模拟效果好, I_{KGE} 值在 0.75 以上;而 HSC-MCT 水文模型和基于雨强阈值的超渗模型模拟效果不佳, I_{KGE} 值在 0.50 左右。然而在验证期:率定期模拟效果不好的 HSC-MCT 水文模型,验证期模拟效果最佳, I_{KGE} 值为 0.43;率定期模拟效果好的 HSC 水文模型和 HBV 水文模型 I_{KGE} 值为负,模拟效果不好;新安江水文模型模拟效果也不好, I_{KGE} 值为 0;基于雨强阈值的超渗模型 I_{KGE} 值为 0.13。从表 2 中的 R^2 来看,率定期各模型的确定性系数 R^2 都大于 0.7,验证期所有模型的模拟效果都有所下降,确定性系数 R^2 都小于 0.3,而 HSC-MCT 水文模型的 R^2 ,无论在率定期还是验证期都优于其他模型。因此仅从 R^2 来看,相比其他模型 HSC-MCT 模型模拟效果最好。从表 2 中的 E_{RMS} 来看:率定期,各模型的确定

性系数 E_{RMS} 基本都大于 0.80 mm/d;验证期, HSC-MCT 模型 E_{RMS} 值最小,为 0.40 mm/d。对于 E_{RMS} ,随着项数的增加 E_{RMS} 对异常大的偏差比较敏感,本文中率定期日径流深超过 10 mm 的洪峰个数远高于验证期,且率定期还有流域建站以来最大洪峰,因此率定期 E_{RMS} 的取值很可能存在高估。对于验证期,从 E_{RMS} 值来看, HSC-MCT 模型模拟效果最好。通常认为,率定期的模拟效果代表模型对降雨径流过程的拟合能力,但验证期的效果更能代表模型的适用性及其对真实水文过程的模拟能力。综合 Kling-Gupta 效率系数、确定性系数以及均方根误差, HSC-MCT 模型验证期的模拟效果好于其他模型。

同时为了更明确地比较各模型的模拟效果,依据各模型 MOSCEM-UA 参数寻优后得到的帕累托前沿的有效参数集的 I_{KGE} 值绘制成箱线图,见图 6。

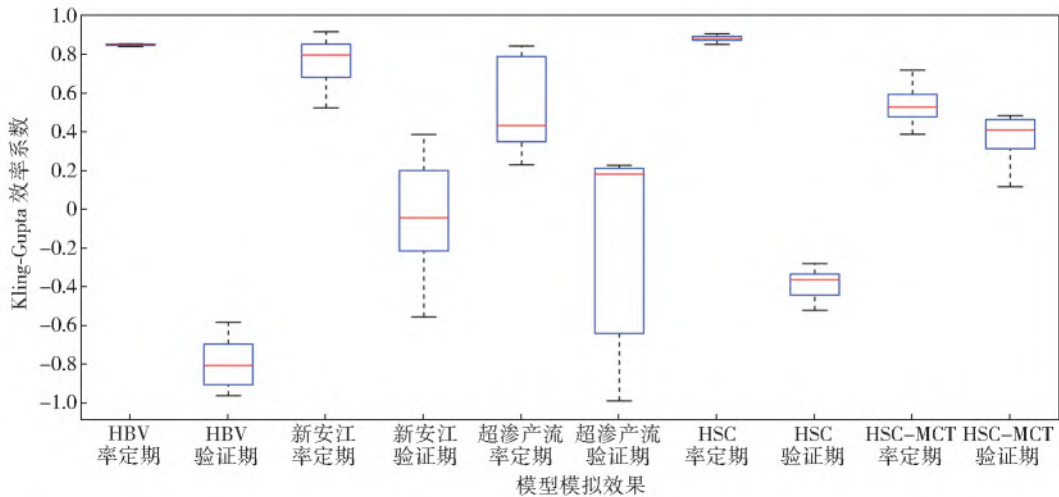


图 6 基于帕累托前沿的 Kling-Gupta 效率系数箱线图

Fig. 6 The boxplots of the Kling-Gupta efficiency based on the Pareto-frontier

从 I_{KGE} 值的箱线图可以明显看出,无须参数率定的 HSC-MCT 产流模型相比其他模型,没有出现率定期和验证期巨大的反差,模拟效果最为稳定。结合 I_{KGE} 值以及流量过程线,比较 HSC-MCT 模型以及其他 4 个模型在率定期和验证期的模拟效果可以看出, HSC-MCT 模型在率定期和验证期的表现避免了参数的自由调整导致的过拟合现象,模拟效果更具一致性,在率定期和验证期的综合表现相较其他模型更优异。本研究与之前研究一致^[21],表明 HSC-MCT 模型在偏干旱区模拟效果较 HBV 等模型更优。

5 结果分析与讨论

有研究^[29-30]表明对于绝大多数判定降雨径流模拟情况的指标来说,由于高流量的影响,往往会忽略低流量如基流的模拟效果。对于叶柏寿流域这样一

个降雨量少、蒸发强、径流量少的半干旱丘陵区,洪峰过程罕见。使用 MOSCEM-UA 算法基于获得更好的效率系数来率定模型参数,因此在样本量足够大(20 000)的情况下,很可能为了模拟率定期中 1962 年的最大洪峰,牺牲模型参数所代表的实际物理意义以拟合该过程。为验证这一假设,使用同样的模型参数,计算更长的时间序列(1961—1980 年)下的 I_{KGE} 值,结果显示 HSC、HBV、新安江水文模型的 I_{KGE} 值也很高,都在 0.8 左右,由此可以看出率定期 I_{KGE} 值高的原因可能只是模型能模拟 1962 最大洪峰这样的极端事件。

参数率定结果见表 3,各模型的参数率定结果除截留和产流模块外,其余差距并不大。对于截留模块,参数 S_{\max} 主要指流域内植被对降水的拦截作用。叶柏寿流域山坡植被多为自然生长的灌丛、针

叶林,河流两边为粮食作物和经济作物,因此冠层截留对应的降水量并不大。然而 HBV 和新安江模型 S_{\max} 的取值均大于 10 mm,这显然不符合流域实际情况^[31-35]。对于产流模块的重要参数 S_{\max} ,HSC 水文模型通过率定获得的 S_{\max} 的取值远小于前人研究结果(HSC-MCT 的取值),这意味着在相同的降水量下,HSC 水文模型模拟径流量远大于 HSC-MCT 水文模型,这是 HSC 水文模型能较好地模拟流域 1962 年洪峰过程,而 HSC-MCT 水文模型低估的原因,也是 HSC 水文模型在其他时段对径流量存在高估的原因。

表 3 基于帕累托前沿参数集取平均的模型参数率定结果
Tab. 3 The calibrated parameters of the models based on the averaged parameter sets on the Pareto-frontier

模型参数	HSC 水文模型	HSC-MCT 水文模型	HBV 水文模型	新安江 水文模型	设置阈值的 超渗产流
S_{\max}/mm	5.35	3.96	28.41	15.24	22.44
$S_{\text{umax}}/\text{mm}$	45.21	111.00 ^[24] (已知)	708.02	223.23	549.04
C_e	0.97	0.84	0.49	0.82	0.89
D	0.65	0.60	0.66	0.62	0.42
K_f/d	1.10	1.12	1.23	1.18	1.16
K_s/d	229.54	371.85	205.36	216.06	188.06
T_{lagf}/d	0.37	0.90	0.66	0.63	0.65
β			0.02	2.46	
$F/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$					12.47

超渗产流是传统认为的干旱区主要产流机制。但越来越多的实验证据显示,在日尺度上全流域超渗几乎是不存在的现象。即使短时期内观测到山坡产生超渗坡面流,在向河道运动的过程中也往往会再次入渗,真正贡献河道径流的主要是靠近河道的区域,而该区域产流时往往是蓄满的状态^[36]。蓄满产流模型在干旱区的应用效果,及其与超渗模型的对比同样验证了此观点。李致家等^[27]将新安江水文模型应用在干旱区,发现当 β 的取值大于 1 时,模拟的效果相对较好。本文也验证了该规律,率定出的新安江模型 β 参数的取值为 2.46,意味着即使流域土壤含水量较小,也有很高比例的降水最终产流。参数 β 的取值可能为了更好地模拟流域 1962 年的洪峰过程,但同时可能为避免其他时段的高估,新安江水文模型参数 S_{umax} 和 S_{\max} 的取值相比于 HSC-MCT 水文模型更大。HBV 水文模型也存在同样的情况,为了更好地模拟流域 1962 年的洪峰,参数 β 的取值接近于 0,同时为了避免其他时段对径流的高估现象提高了参数 S_{umax} 和 S_{\max} 的取值,但最终验证期依然存在高估现象。

干旱区复杂的降雨径流非线性关系是干旱区水文模拟的瓶颈问题。以 1975 年汛期为例,8 月 60 mm 降雨产生的径流却低于 9 月 20 mm 降雨产生的径流。这很可能与流域内汛期降雨以局地对流雨为主,降雨空间异质性强,导致观测的降雨量难以反映流域实际情况。因此有必要增加干旱与半干旱流域的观测站网,获得更高精度降水径流资料,以观测数据为基础研究干旱区流域的产汇流过程,提高干旱半干旱区水文模拟能力。

6 结论

以典型半干旱丘陵区叶柏寿流域为例,比较了不同产流模型效果,包括以地形为基础的 HSC 产流模型、无须率定的 HSC-MCT 产流模型、HBV 模型的 beta 曲线、新安江模型蓄水量曲线以及基于雨强阈值的超渗模型。结果表明,少数洪峰流量过程对径流的模拟结果有很强的影响,依赖参数率定的模型存在为了提高洪峰流量模拟精度而导致的参数过拟合现象,优化后的产流参数甚至背离其物理意义和假设。基于 HSC 线型和根系区蓄水量反演的 MCT 方法,得到的无须率定的 HSC-MCT 产流模型,其参数物理意义明确,可以避免对少数高流量产生的过拟合现象,相比其他模型验证期模拟效果最好,在率定和验证期表现最为稳定。研究结果为我国干旱半干旱地区产流过程及机制的深入研究提供了借鉴和参考。

参考文献(References):

- [1] 刘郁. 不同水文模型在干旱及半干旱地区适用性研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2016. (LIU Y. Research on the application of different hydrological models in semi-arid and semi-humid areas[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2016. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d. D829197.
- [2] 左其亭,郭丽君,平建华,等. 干旱区流域水文-生态过程耦合分析与模拟研究框架[J]. 南水北调与水利科技,2012,10(1):102-105,120. (ZUO Q T, GUO L J, PING J H, et al. Discussion of research framework of coupled analysis and simulation of hydro-ecological processes in arid watersheds[J]. South-to-north Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(1):102-105,120. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP. J.1201.2012.01102.
- [3] DUAN W, CHEN Y, ZOU S, et al. Managing the water-climate- food nexus for sustainable development in Turkmenistan[J]. Journal of cleaner production, 2019, 220:212-224. DOI:10.1016/j. jclepro. 2019. 02. 040.

- [4] 李洪源,赵求东,吴锦奎,等. 疏勒河上游径流组分及其变化特征定量模拟[J]. 冰川冻土, 2019, 41 (4): 907-917. (LI H Y, ZHAO Q D, WU J K, et al. Quantitative simulation of the runoff components and its variation characteristics in the upstream of the Shule River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41 (4): 907-917. (in Chinese)) DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2019. 0115.
- [5] 周海鹰,沈明希,陈杰,等. 塔里木河流域 60 a 来天然径流变化趋势分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41 (2): 221-229. (ZHOU H Y, SHEN M X, CHEN J, et al. Trends of natural runoffs in the Tarim River basin during the last 60 years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41 (2): 221-229. (in Chinese)) DOI: 10. 13826/j. cnki. cn65-1103/x. 2018. 02. 001.
- [6] 张向明,栗晓玲,张更喜. 基于 SRI 与 Copula 函数的黑河流域水文干旱等级划分及特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38 (5): 107-113. (ZHANG X M, LI X L, ZHANG G X. Classifying drought in Heihe River basin using SRI index and copula function[J]. Journal of Irrigation and Drainage 2019, 38 (5): 107-113. (in Chinese)) DOI: 10. 13522/j. cnki. ggps. 20180327.
- [7] 赵兰兰,朱冰,唐俊龙. 不同洪水预报模型在拒马河流域的应用对比分析[J]. 水文, 2017, 37 (4): 24-28. (ZHAO L L, ZHU B, TANG J L. Comparative analysis of different flood forecasting models used for Jumahe River basin[J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37 (4): 24-28. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2017. 04. 005.
- [8] 刘松,张利平,余敦先,等. 干旱半干旱地区流域水文模型的适用性[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52 (5): 384-390. (LIU S, ZHANG L P, SHE D X, et al. Applicability of catchment hydrologic models in arid and semi-arid regions[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52 (5): 384-390. (in Chinese)) DOI: 10. 14188/j. 1671-8844. 2019-05-002.
- [9] 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 (2): 3-5. (LI Q. 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 (2): 3-5. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-6791. 1998. 02. 014.
- [10] 胡彩虹,郭生练,熊立华,等. 黄河流域水文模型研究现状与进展[J]. 西北水资源与水工程, 2003 (1): 5-8, 12. (HU C H, GUO S L, XIONG L H, et al. Review and prospect of hydrological models for the Yellow River basin[J]. Northwest Water Resources & Water Engineering, 2003 (1): 5-8, 12. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-643X. 2003. 01. 002.
- [11] 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 Z J, HUO W B, ZHANG K. Improvement and preliminary application of Green-Ampt rainfall-runoff model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48 (5): 385-391. (in Chinese)) DOI: 10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2020. 05. 001.
- [12] 代荣霞,李兰,刘小莽,等. 基于 DEM 的水文模型在沮河流域的应用[J]. 中国农村水利水电, 2007 (3): 1-3, 6. (DAI R X, LI L, LIU X M, et al. Application of a hydrology model based on DEM in Juhe River watershed[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007 (3): 1-3, 6. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2007. 03. 001.
- [13] 解河海,郝振纯,杨涛. TOPMODEL 在岔巴沟流域的模拟研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2007 (3): 197-200. (XIE H H, HAO Z C, YANG T. Study on simulation of TOPMODEL in Chabagou catchment [J]. Journal of China Three Gorges University. (Natural Sciences), 2007 (3): 197-200. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-948X. 2007. 03. 002.
- [14] 程磊,徐宗学,罗睿,等. SWAT 在干旱半干旱地区的应用:以窟野河流域为例[J]. 地理研究, 2009, 28 (1): 65-73, 275. (CHENG L, XU Z X, LUO R, et al. SWAT application in arid and semi-arid region: A case study in the Kuye River basin[J]. Geographical Research, 2009, 28 (1): 65-73, 275. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-0585. 2009. 01. 008.
- [15] 王强,夏军,余敦先,等. 时变增益模型在辽宁干旱半干旱流域的适用性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16 (4): 35-41. (WANG Q, XIA J, SHE D X, et al. The applicability research of TVGM model in arid and semiarid watersheds of Liaoning Province[J]. South-to-north Water Transfer and Water Science & Technology, 2018, 16 (4): 35-41. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2018. 0094.
- [16] 李彬权,牛小茹,梁忠民,等. 黄河中游干旱半干旱区水文模型研究进展[J]. 人民黄河, 2017, 39 (3): 1-4, 9. (LI B Q, NIU X R, LIANG Z M, et al. Progress of research on hydrological models for arid and semi-arid areas of the Middle Yellow River[J]. Yellow River, 2017, 39 (3): 1-4, 9. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2017. 03. 001.
- [17] 陈华,霍苒,曾强,等. 雨量站网布设对水文模型不确定性影响的比较[J]. 水科学进展, 2019, 30 (1): 34-44. (CHEN H, HUO R, ZENG Q, et al. Comparative study on the influence of rain-gauge network on the uncertainty of hydrological modeling[J]. Advances in Water Science, 2019, 30 (1): 34-44. (in Chinese)) DOI:

- 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.01.004.
- [18] 林炳青,陈莹,陈兴伟. SWAT 模型水文过程参数区域差异研究[J]. 自然资源学报,2013,28(11):1988-1999. (LIN B Q, CHEN Y, CHEN X W. A study on regional difference of hydrological parameters of SWAT model[J]. Journal of Natural Resource, 2013, 28(11): 1988-1999. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2013.11.015.
- [19] LAN X, LI Y, SHAO R, et al. Vegetation controls on surface energy partitioning and water budget over China[J/OL]. Journal of Hydrology, 2020-3-31. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125646>. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125646.
- [20] GAO H, HRACHOWITZ M, FENICIA F, et al. Testing the realism of a topography-driven model (FLEX-Topo) in the nested catchments of the upper Heihe, China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(5): 1895-1915. DOI: 10.5194/hess-18-1895-2014.
- [21] GAO H, BIRKEL C, HRACHOWITZ M, et al. A simple topography-driven and calibration-free runoff generation module[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(2): 787-809. DOI: 10.5194/hess-23-787-2019.
- [22] RENÓ C D, NOBRE A D, CUARTAS L A, et al. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(9): 3469-3481. DOI: 10.1016/j.rse.2008.03.018.
- [23] FAN Y, MIGUEZ-MACHO G, JOBBÁGY E G, et al. Hydrologic regulation of plant rooting depth[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences-PNAS, 2017, 114(40): 10572-10577. DOI: 10.1073/pnas.1712381114.
- [24] WANG-ERLANDSSON L, BASTIAANSEN W G M, GAO H, et al. Global root zone storage capacity from satellite-based evaporation[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(4): 1459-1481. DOI: 10.5194/hess-20-1459-2016.
- [25] GAO H, HRACHOWITZ M, SCHYMANSKI S J, et al. Climate controls how ecosystems size the root zone storage capacity at catchment scale[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(22): 7916-7923. DOI: 10.1002/2014GL061668.
- [26] 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: 106-130. (ZHAO R J. Watershed hydrological modeling: Xinanjiang model and Shanbei model[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1984: 106-130. (in Chinese)).
- [27] 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 Z J, HUANG P N, YAO C, 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)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2014.01.006.
- [28] VRUGT J A, GUPTA H V, BASTIDAS L A, et al. Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models[J]. Water resources research, 2003, 39(8): 1214-1214. DOI: 10.1029/2002WR001746.
- [29] GARCIA F, FOLTON N, OUDIN L. Which objective function to calibrate rainfall-runoff models for low-flow index simulations? [J]. Hydrological Sciences Journal, 2017, 62(7): 1149-1166. DOI: 10.1080/02626667.2017.1308511.
- [30] LIU D. A rational performance criterion for hydrological model[J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2020, 590: 125488-125488. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125488.
- [30] LIU D. A rational performance criterion for hydrological model[J/OL]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2020-5-11. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125488>. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125488.
- [31] DUNKERLEY D L, BOOTH T L. Plant canopy interception of rainfall and its significance in a banded landscape, arid western New South Wales, Australia [J]. Water Resources Research, 1999, 35(5): 1581-1586. DOI: 10.1029/1999WR900003.
- [32] YANG X G, CHEN L, WANG L, et al. Dynamic rainfall-partitioning relationships among throughfall, stemflow, and interception loss by Caragana intermedia[J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 980-989. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.04.083.
- [33] 吕刚, 王磊, 张卓, 等. 辽西低山丘陵区不同年龄荆条冠层截留降雨模拟实验研究[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6372-6380. (LYV G, WANG L, ZHANG Z, et al. Simulated and experimental study on rainfall interception of different aged Vitex negundo var. heterophylla canopies in the low mountains and hills of western Liaoning [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6372-6380. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201803150516.
- [34] 赵文玥, 吉喜斌. 干旱区稀疏树木冠层降雨截留蒸发的研究进展与展望[J/OL]. 地球科学进展: 1-18 [2021-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1091.P.20201221.2005.006.html>. (ZHAO W Y, JI X B. A review of advances and future perspectives of

evaporation of intercepted rainfall from sparse tree canopy in drylands[J/OL]. *Advances in Earth Science*: 1-18 [2021-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1091.P.20201221.2005.006.html>. (in Chinese)

[35] 郭建平, 栾青, 王婧瑄, 等. 玉米冠层对降水的截留模型构建[J]. *应用气象学报*, 2020, 31 (4): 397-404. (GUO J P, LUAN Q, WANG J X, et al. Model construction of rainfall interception by maize canopy[J].

Journal of Applied Meteorological Science, 2020, 31 (4): 397-404. (in Chinese)) DOI: 10.11898/1001-7313.20200402.

[36] LIU D, TIAN F, HU H, et al. The role of run-on for overland flow and the characteristics of runoff generation in the Loess Plateau, China[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2012, 57 (6): 1107-1117. DOI: 10.1080/02626667.2012.695870.

HSC topography-driven runoff generation model's applicability in a semi-arid watershed in western Liaoning Province

ZHANG Bomei¹, GAO Hongkai^{1,2}, SHE Dunxian³, SHAO Wei⁴, XIA Jun³

(1. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Key Laboratory of Geographic Information Science of Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. School of Hydrology and Water Resources Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In arid and semi-arid regions, water scarcity poses prominent constraints to socio-economic development and threatens nature ecosystem conservation. Hydrological models represent integrated and systematic knowledge of catchment hydrology, which is essential to forecast floods and droughts, and decisions-makings on water resources management. However, the model performance in arid and semi-arid regions is far from satisfactory and the runoff generation mechanism is much more complex due to heterogeneous landscapes and complex hydrometeorological processes in humid regions. The topographic-driven HSC (HAND-based storage capacity curve) runoff generation model using the topographic information to derive the non-linear relationship between the relative soil moisture and the extent of saturated areas in catchment scale. Compared with HBV and TOPMODEL, HSC model performed better in hundreds of catchments in the United States, especially in the semi-arid catchment with gentle slopes, less forest coverage. However, the model performance in China's arid and semi-arid hilly catchments is still unknown.

The HSC topography-driven runoff generation model uses the topographic index HAND (height above the nearest drainage) to establish the HAND-based storage capacity curve, which allows to estimate the spatial distribution of storage capacity without parameter calibration. Besides, through the mass curve technique (MCT) method, the parameter of root zone storage capacity (S_{\max}) can be derived from climate data. Coupling HSC with MCT, the HSC-MCT runoff generation model is established which does not require parameter calibration. To test HSC's performance, three benchmark models: the HBV's beta function, the Xin'anjiang model's water storage capacity curve, and the infiltration excess model which is based on rainfall threshold were used for comparison. The Yebaishou watershed, a typical semi-arid hilly region in Liaoning Province of China, was used as a study site. The Kling-Gupta efficiency (I_{KGE}), the root mean square error (E_{RMS}), and the coefficient of determination (R^2) was used to evaluate model performance. The hydrological and meteorological data of the Yebaishou watershed from 1961 to 1970 was used to calibrate the extra free parameters, including routing module and three benchmark runoff generation modules, by the MOSCEM-UA (multi-objective parameter optimization algorithm), and period from 1971 to 1980 was used for validation.

Five models could reproduce the timing of the main peak flows very well. The HSC-MCT performed well in both calibration and validation for simulating the volume of peak flow, but the other four models overestimated peak flows. However, for the maximum peak flood simulation in 1962, the HSC-MCT and the infiltration excess model underestimated the peak flood, but the HSC, HBV, and Xin'anjiang could reproduce this event well. In terms of evaluation metrics, such as I_{KGE} , E_{RMS} , and R^2 , it was found that despite the other four models were of good results during calibration, the simulation results in validation significantly deteriorated. The calibrated parameters of these models were far beyond their range of physical reality, for example, the parameter of maximum interception capacity (S_{\max}), and the parameter of root zone storage capacity (S_{\max}). The HSC-MCT model had the best performance in validation, and maintain robustness thoroughly.

The extreme peak flow had a strong influence on model performance and parameter calibration. But the HSC-MCT model allows us to derive the root zone storage capacity (S_{\max}) by climate data and its spatial pattern by topography information, thus free of parameter calibration, and avoid parameter overfitting. In summary, the robustness and stability of HSC-MCT model to simulate hydrological processes is satisfactory in this semi-arid Yebaishou watershed.

Key words: topographic-driven runoff generation model; runoff generation mechanism; arid and semi-arid hydrology; Yebaishou watershed; Liaoxi semi-arid hilly watershed