

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.05.001

格林-安普特降雨径流模型改进及初步应用

李致家,霍文博,张珂

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要: 将基于土壤及降雨资料计算得出的具有物理基础的下渗能力分布曲线引入格林-安普特降雨径流模型,选择中国和美国2个半干旱流域作为研究区域,将改进后的格林-安普特模型与原模型及新安江模型进行模拟对比,研究改进后模型的应用效果及其在半干旱地区的适用性。结果表明:在2个半干旱流域,改进格林-安普特模型模拟结果均好于原始格林-安普特模型及新安江模型;增加的具有物理基础的下渗能力分布曲线能够更好地反映流域内各位置下渗能力随降雨和时间变化的特点,更加精确地计算出流域内下渗量及产流量;半干旱地区洪水多由短时强降雨引起,产流主要以超渗地面径流为主,降雨观测精度和降雨强度对模型模拟精度影响较大;改进格林-安普特降雨径流模型能够在半干旱地区洪水预报中发挥作用。

关键词: 格林-安普特模型;降雨径流;下渗能力分布曲线;新安江模型;半干旱流域;超渗产流模型;洪水预报;志丹流域;Walnut Gulch 流域

中图分类号: P338 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2020)05-0385-07

Improvement and preliminary application of Green-Ampt rainfall-runoff model

LI Zhijia, HUO Wenbo, ZHANG Ke

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A physics-based infiltration capacity distribution curve, which was calculated using the soil and rainfall data, was introduced into the Green-Ampt rainfall-runoff model to improve its performance. The improved Green-Ampt model was compared with the traditional Green-Ampt model and the Xin'anjiang model in two semi-arid basins in China and US, and then, the performance and applicability of the improved model in semi-arid regions were evaluated. The results show that in two semi-arid basins, the improved Green-Ampt model performs better than the traditional Green-Ampt model and the Xin'anjiang model. The added physics-based infiltration capacity distribution curve effectively reflects the changing of infiltration capacity with time and rainfall for the whole basin, and the results of infiltration and runoff generation calculated by the improved infiltration curve are more accurate. The flood in semi-arid region is mainly caused by the short-term and heavy rainfall, and the runoff is dominated by the infiltrated-excess surface runoff. Rainfall observation accuracy and rainfall intensity have great influence on the simulation accuracy of hydrological models. The improved Green-Ampt rainfall-runoff model can play an important role for the flood forecasts in semi-arid regions.

Key words: Green-Ampt model; rainfall-runoff; infiltration capacity distribution curve; Xin'anjiang model; semi-arid basin; infiltrated-excess runoff model; flood forecasting; Zhidan Basin; Walnut Gulch Basin

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1508101,2018YFC1508100);国家自然科学基金(51679061);中央高校基本科研业务费专项(2016B04714)

作者简介: 李致家(1962—),男,教授,博士,主要从事水文预报研究。E-mail: zhijia-li@vip.sina.com

引用本文: 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 Zhijia, HUO Wenbo, ZHANG Ke. Improvement and preliminary application of Green-Ampt rainfall-runoff model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(5):385-391.

水文模型是对自然界中水文过程的模拟和概化。自 19 世纪 50 年代以来,水文模型在国内外发展迅速并广泛应用^[1-6]。大部分水文模型在湿润地区应用效果较好^[7],而在干旱和半干旱地区,由于降雨时空分布极不均匀、实测资料不足、产流模式比较复杂,导致水文模型模拟效果不佳^[8-11]。在干旱和半干旱地区,由于土层相对较厚,土壤含水量较低,在一场降雨中土壤很难蓄满,因此径流主要来源于当降雨强度大于土壤下渗能力时形成的超渗地面径流。李致家等^[12]在新安江模型中增加了超渗产流模型,使其可以应用于干旱和半干旱地区。超渗产流模型包括霍顿(Horton)模型、格林-安普特(Green-Ampt)模型、菲利普(Philip)模型和霍尔坦(Holtan)模型等,其中格林-安普特模型是由格林和安普特于 1911 年提出的基于物理基础的下渗模型^[13],国内外对于格林-安普特模型的应用和改进研究较多。包为民^[14]提出了一条具有流域分布特征的格林-安普特下渗曲线,并在黄河中游 13 个流域应用,发现这条分布曲线结构合理,能使格林-安普特降雨径流模型模拟精度显著提高;Stewart^[15]通过研究土壤收缩和膨胀对饱和和导水率的影响,提出了动态格林-安普特下渗模型,与经典格林-安普特模型相比,动态格林-安普特模型在多尺度上计算入渗和径流;Gowdiah 等^[16]开发了三维格林-安普特模型(3DMGAR),用于模拟土壤水的三维分布。

大多数对格林-安普特模型的研究集中在下渗计算,而用其计算产流的研究相对较少。目前格林-安普特降雨径流模型中的下渗曲线为一条抛物线形的经验曲线,该曲线能反映流域内降雨和下垫面特征分布不均的特点,但与实际下垫面分布情况存在差距。本文通过流域土壤分布资料和降雨资料,计算流域内各点在不同时刻的下渗能力,从而得到一条具有物理基础的下渗能力分布曲线,将该曲线应用于格林-安普特模型,探究改进的格林-安普特模型在半干旱地区的应用效果。

1 格林-安普特降雨径流模型

格林-安普特降雨径流模型是基于格林-安普特下渗公式计算产流的超渗产流模型。在下渗过程中,假定土壤湿润区与未湿润区之间存在一个水平的湿润锋,湿润区土壤含水率为饱和含水率,未湿润区为初始含水率,随着下渗过程的进行,湿润锋不断地向下移动。格林-安普特下渗方程为

$$f(t) = K \left(1 + \frac{\psi \Delta \theta}{F(t)} \right) \tag{1}$$

式中: $f(t)$ ——土壤下渗能力; K ——饱和水力传导度; ψ ——湿润锋处土壤吸力; $\Delta \theta$ ——土壤饱和含水率与初始含水率之差; $F(t)$ ——累计下渗量; t ——时间。

在格林-安普特降雨径流模型中,产流计算使用格林-安普特下渗公式,蒸散发计算使用新安江模型中的三层土壤水模型^[1],河道汇流计算使用马斯京根汇流演算法。

1.1 下渗能力分布曲线

为了考虑流域中降雨及下垫面分布不均的情况,赵人俊教授提出了蓄水容量曲线并将其应用于新安江模型^[1]中。新安江模型是基于蓄满产流理论的概念性模型,在我国湿润地区应用效果良好。格林-安普特模型中使用了一条下渗能力分布曲线来处理降雨与流域下垫面分布不均的情况,该曲线形状与表达式类似于新安江模型中的蓄水容量曲线,如图 1 所示(其中 f'_m 为流域中某一点的下渗能力, f_{mm} 为流域中最大下渗能力, a 为下渗能力小于或等于 f'_m 部分的流域面积, A 为全部流域面积, R 为流域产流量, P_E 为扣除蒸发后的净雨量)。

这条下渗能力分布曲线的表达式为

$$\frac{a}{A} = 1 - \left(1 - \frac{f'_m}{f_{mm}} \right)^{B_x} \tag{2}$$

式中: B_x ——分布曲线的指数,控制曲线形状。

1.2 改进的下渗能力分布曲线

在新安江模型中,抛物线形的蓄水容量曲线很好地反映了流域蓄水容量分布不均的特点。为验证格林-安普特超渗产流模型中,流域内的下渗能力分布是否也呈抛物线形,本文提出一条改进的具有物理基础的下

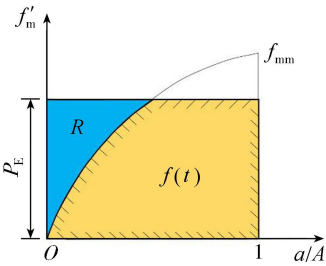


图1 格林-安普特模型中的下渗能力分布曲线
Fig.1 Infiltration distribution curve of Green-Ampt model

渗能力分布曲线,与原经验曲线进行对比,研究哪种曲线更适用于半湿润-半干旱地区水文模拟。根据美国农业部(USDA)土壤分类标准,Rawls 等^[17]给出了不同土壤类型的格林-安普特下渗模型中的 4 个参数值:土壤总孔隙度、土壤有效孔隙度、湿润锋处土壤吸力和饱和水力传导度。利用这些土壤参数值,即可通过降雨资料和土壤分布资料计算出流域内各点在任意时刻的下渗能力,得到一条具有物理基础的下渗能力分布曲线。具体计算步骤如下:

- a. 利用土壤类型资料和 Rawls 等给出的下渗参数值,可由式(1)计算出流域内各点的初始下渗能力,由此得到流域的初始下渗能力分布曲线。
- b. 由流域初始下渗能力分布曲线,结合降雨资料,计算得到初始时刻流域产流量及下渗量,将下渗量带入式(1)计算得到下一时段的下渗能力分布曲线。
- c. 重复步骤 a 和 b,依次计算各时段产流量及下渗能力分布曲线,改进的下渗曲线形状随降雨和时间的变化而不断地变化。

将这条下渗曲线应用于格林-安普特降雨径流模型,并与原始基于经验下渗曲线的格林-安普特降雨径流模型进行对比。

2 研究流域与资料选取

选择中国陕西省志丹流域和美国亚利桑那州 Walnut Gulch 流域(图 2)作为研究流域,两流域均为半干旱流域。志丹流域出口控制站为志丹水文站,该站是黄河流域北洛河水系周河控制站。志丹流域面积 774 km²,多年平均降水量为 509.8 mm,流域内植被覆盖差,水土流失较为严重。洪水多由暴雨形成,涨落较快,洪峰一般呈尖瘦形,洪水历时较短。Walnut Gulch 流域位于美国亚利桑那州 San Pedro 河,流域面积150 km²,流域内共有 16 个雨量站,多年平均降水量为 312 mm,气候环境更接近干旱地区,地表植被覆盖较差,多为低矮的草本植物。志丹流域的流量、降雨量、蒸发量等资料由当地水文局提供,Walnut Gulch流域资料由美国农业部(USDA)网站提供(<https://www.usda.gov/>)。

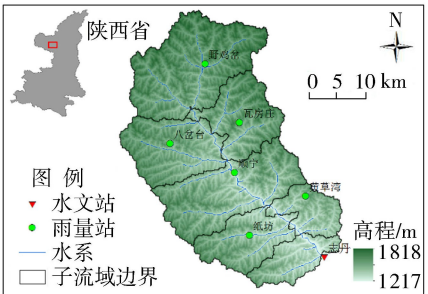
表 1 列出了志丹流域和 Walnut Gulch 流域的土壤类型占比,以及各类土壤所对应的格林-安普特下渗参数,图 3 为两流域土壤类型分布。本研究使用的土壤数据为 USDA 提供的 1 km×1 km 数据,在进行模型计算时,将每个流域划分成若干子流域,分别计算各子流域内的产汇流过程。由于子流域的土壤类型分布不同,因此改进的格林-安普特下渗分布曲线在不同的子流域中形状也不相同,并且其形状会随着时间及降雨的变化而改变。

表 1 两流域土壤类型及格林-安普特下渗参数

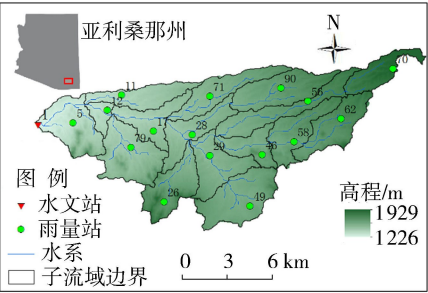
Table 1 Soil types and Green-Ampt infiltration parameters of two basins						
流域	土壤类型	占比/%	土壤总孔隙度	土壤有效孔隙度	饱和和水力传导度/ (cm·h ⁻¹)	湿润锋处 土壤吸力/cm
志丹流域	黏土	0.09	0.475	0.385	0.03	31.63
	壤土	92.44	0.463	0.434	0.34	8.89
	砂质壤土	1.25	0.453	0.412	1.09	11.01
	壤质砂土	6.22	0.437	0.401	2.99	6.13
Walnut Gulch 流域	壤土	78.33	0.463	0.434	0.34	8.89
	壤质砂土	21.67	0.437	0.401	2.99	6.13

3 模型率定

将原格林-安普特模型和改进的格林-安普特模型模拟结果分别与新安江模型模拟结果对比,研究其在半干旱地区的适用性。



(a) 志丹流域



(b) Walnut Gulch流域

图 2 流域地理位置

Fig. 2 Location of the Zhidan and Walnut Gulch Basins

在3个模型中,只有改进格林-安普特模型中的3个参数饱和含水率 θ_s 、饱和水力传导度 K 和湿润锋处的土壤吸力 ψ 是根据土壤性质得出的,其余参数均使用人工优选法和SCE-UA自动优选法^[18-19]结合率定得到^[20-21]。自动优选法具有高精度和高效率的特点,但由于模型中参数较多,存在异参同效现象,单纯使用自动优选法率定参数容易陷入局部最优解,得不到最佳参数。而只使用人工优选法率定效率较低,精度不高。因此,对于模型中相对不敏感的参数,使用人工优选法根据参数物理意义及流域特点确定参数值;对于敏感参数,使用SCE-UA自动优选法率定参数值,这样可以减少自动率定参数的数量,有效避免异参同效问题,提高参数精度。例如,对新安江模型中的蓄水容量分布曲线指数 B 、深层蒸散发扩散系数 C 、地下水出流系数 K_C 、地下水消退系数 C_C 等参数和原格林-安普特模型中的下渗能力分布曲线指数 B_x 、饱和含水率 θ_s 等参数,根据经验及流域气候特点、下垫面特征人工率定参数值;对于新安江模型中蒸散发折算系数 E 、自由水容量 S_M 、河网水流消退系数 C_s 等和原格林-安普特模型中饱和水力传导度 K 、湿润锋处的土壤吸力 ψ 等参数使用SCE-UA方法率定参数值。

各模型使用日模型和时段模型分别模拟,在志丹流域时段模型计算步长为1 h。Walnut Gulch流域面积较小,汇流时间短,时段模型计算步长选择10 min。两流域日模型计算步长均为24 h,日模型为时段模型提供初始土壤含水量等下垫面状态初值。

4 模型模拟结果比较

选择径流深合格率、洪峰合格率、峰现时间误差和确定性系数4个指标来评价模型模拟结果,其中径流深和洪峰是否合格按照GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》^[22]进行评判。对各场洪水峰现时间误差和确定性系数取平均值,综合评价各模型模拟结果。

4.1 志丹流域模拟结果比较

在志丹流域选择2000—2010年共13场洪水,其中前8场洪水用来率定模型参数,后5场洪水验证模型结果,3个模型模拟结果见表2,模型参数值见表3。

表2 志丹流域模拟结果对比

Table 2 Simulation result comparison of three models for the Zhidan Basin

模型	径流深合格率/%		洪峰合格率/%		峰现时间误差/h		确定性系数	
	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期
新安江模型	75.0	80.0	25.0	20.0	1.0	1.2	0.14	-0.03
原格林-安普特模型	87.5	100.0	37.5	20.0	0.9	1.0	0.37	0.14
改进格林-安普特模型	100.0	100.0	50.0	40.0	0.9	1.0	0.47	0.22

表3 志丹流域各模型参数值

Table 3 Parameters of three models for the Zhidan Basin

模型	E	K	θ_s	ψ	B/B_x	C	W_M	S_M	E_x	K_C	K_I	C_C	C_I	X	C_s
新安江模型	0.6				0.30	0.06	120	14	1.2	0.35	0.35	0.98	0.65	0.35	0.20
原格林-安普特模型	0.6	1.4	0.4	12	0.35							0.98		0.35	0.22
改进格林-安普特模型	0.6	0.03, 0.34, 1.09, 2.99	0.385, 0.434, 0.412, 0.401	31.63, 8.89, 11.01, 6.13								0.98		0.35	0.22

注: W_M 为流域平均蓄水容量; E_x 为自由水容量分布曲线指数; K_I 为壤中流出流系数; C_I 为壤中流消退系数; X 为河道汇流马斯京根法系数。

对于径流深模拟,改进格林-安普特模型具有很好的模拟结果,在率定期和验证期合格率都为100.0%。新安江模型率定期合格率为75.0%,验证期合格率为80.0%,在3个模型中合格率相对最低,但仍具有较高

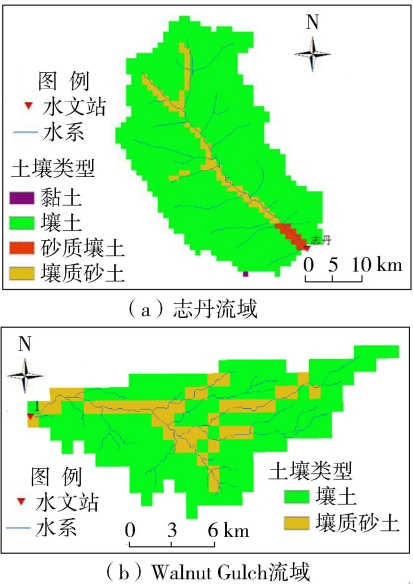


图3 流域土壤类型分布
Fig.3 Distribution of soil types in the Zhidan and Walnut Gulch Basins

的合格率。总体来看 3 个模型对径流深模拟结果较好,主要由于志丹流域洪水径流深普遍偏小。根据《水文情报预报规范》^[22],当一场洪水实测径流深小于 15 mm 时,模拟值与实测值误差在 3 mm 以内为合格。对于志丹流域的 13 场洪水,径流深最大的洪水为 2001081612 号洪水,其实测径流深为 9.08 mm,另外有 7 场洪水实测径流深都小于 3 mm,因此 3 个水文模型对于径流深的模拟值与实测值误差大多在 3 mm 以内,径流深合格率较高。对于志丹流域这样的半干旱中小流域,其洪水特点为历时短、涨落较快、总径流深小但洪峰流量较大,较大的洪峰可能导致山洪等灾害发生,因此对于洪峰的准确模拟更为重要。

在洪峰合格率方面,改进格林-安普特模型模拟结果最好,率定期合格率为 50%,验证期合格率为 40%,相比原格林-安普特模型有显著提高。但总体来看,3 个模型对洪峰模拟的精度普遍偏低,合格率不高。目前在世界范围内,水文模型在湿润及半湿润地区具有较好的模拟效果,而在干旱和半干旱地区模拟精度较低,主要由于干旱和半干旱地区降雨时空差异大,观测资料不足,产流模式较为复杂。对于志丹流域,洪峰模拟合格率不高主要是由于降雨观测精度不高。大部分雨量站的观测时间步长为 6 h,而实际产生洪峰过程的降雨常常发生在 1~2 h 内,将 6 h 的降雨资料插值为 1 h 数据时大幅度削弱了降雨强度,造成模型对洪峰模拟结果不佳。

改进前后的格林-安普特模型在率定期和验证期具有相同的峰现时间误差,并且误差稍小于新安江模型,这说明改进格林-安普特模型在模拟洪峰时间方面与原模型差异不大。改进格林-安普特模型确定性系数比原模型有提高,说明改进模型对洪水形状的模拟与观测值更接近。

总体来看,改进前后的格林-安普特模型在志丹流域模拟结果均好于新安江模型,主要因为模型产流机制不同。新安江模型是蓄满产流模型,在湿润地区模拟效果良好,而格林-安普特模型为超渗产流模型,更适用于干旱和半干旱地区。模拟结果表明志丹流域产流过程以超渗产流为主,这与其半干旱流域的特性相符。原格林-安普特模型模拟结果略好于新安江模型,但优势并不明显,主要原因还是降雨数据的时间分辨率不够。由于格林-安普特模型为超渗产流模型,当流域降雨强度大于下渗强度时产流,否则不产流,所以降雨强度观测精度对格林-安普特模型模拟结果的影响比对新安江模型影响更大。另外,志丹流域多年平均降水量为 509.8 mm,并不是完全的干旱流域,产流以超渗产流为主,同时还会伴随少量蓄满产流过程,因此用格林-安普特模型计算产流时会造成一定的误差。改进格林-安普特模型在径流深、洪峰和确定性系数方面模拟结果均好于原模型,说明加入具有物理基础的下渗能力分布曲线发挥了作用。这条下渗曲线比原来的经验下渗曲线更好地反映出流域下垫面状态随时间和空间的变化特点。原始经验曲线形状是固定的,不随时间变化,而具有物理基础的下渗能力分布曲线是基于土壤和降雨数据计算得出的,由于流域上每一点的下渗能力都会随时间和降雨变化而变化,因此改进的下渗曲线形状也是时刻变化的,这样更符合实际情况,也能更精确地计算出流域内的下渗和产流量,使改进格林-安普特模型在志丹流域模拟准确率得到提高。

图 4 展示了格林-安普特模型改进前后在志丹流域 2010081103 号洪水中野鸡岔子流域内的下渗能力分布曲线。由于在该子流域内主要有两种不同的土壤类型,计算得到的下渗能力分布曲线呈两阶梯形(图 4(a)(b)),随着降雨和时间的进行,该基于物理基础的下渗曲线形状会不断变化。原始的经验下渗曲线呈抛物线形(图 4(c)(d)),随着时间变化,曲线上各点的下渗能力不断变化,但曲线形状是固定不变的。此外,由于各子流域内土壤分布情况不同,改进的基于物理基础的下渗曲线在不同子流域内具有不同的形状,而原始经验曲线在不同子流域内形状相同。

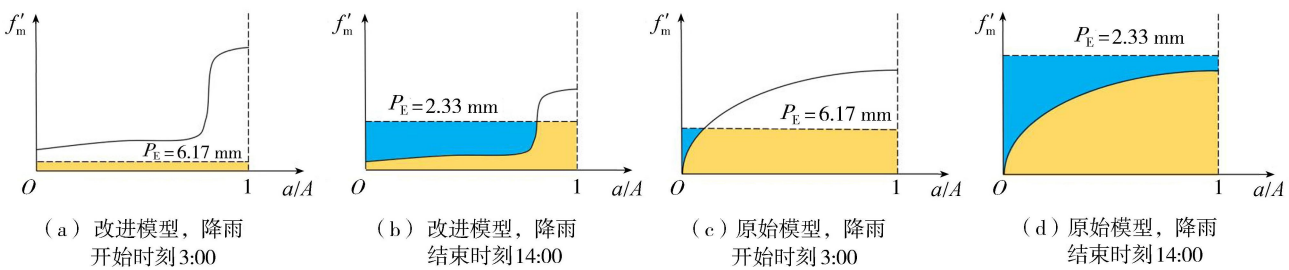


图 4 2010081103 号洪水改进前后格林-安普特模型下渗能力分布曲线

Fig. 4 Infiltration distribution curves of Green-Ampt models before and after the improvement for the flood 2010081103

4.2 Walnut Gulch 流域模拟结果比较

在 Walnut Gulch 流域选择 2000—2019 年共 20 场洪水,其中前 12 场洪水用来率定模型参数,后 8 场洪水作为验证。由于实测流量资料只有径流深和洪峰流量值,因此选择径流深合格率与洪峰合格率作为评价指标,模拟结果见表 4,模型参数值见表 5。

在 Walnut Gulch 流域,新安江模型的模拟结果不尽人意,尤其对洪峰模拟误差较大。由于该流域年均降雨量为 312 mm,气候更接近干旱地区,新安江模型的蓄满产流理论在该地区并不适用。

表 4 Walnut Gulch 流域模拟结果对比

Table 4 Simulation result comparison of three models for the Walnut Gulch Basin

模型	径流深合格率/%		洪峰合格率/%	
	率定期	验证期	率定期	验证期
新安江模型	83.3	62.5	25.0	12.5
原格林-安普特模型	91.7	62.5	33.3	12.5
改进格林-安普特模型	91.7	62.5	41.7	37.5

表 5 Walnut Gulch 流域各模型参数值

Table 5 Parameters of three models for the Walnut Gulch Basin

模型	E	K	θ_s	ψ	B/B_x	C	W_M	S_M	E_x	K_G	K_I	C_G	C_I	X	C_s
新安江模型	0.5				0.30	0.06	110	12	0.8	0.35	0.35	0.98	0.65	0.35	0.30
原格林-安普特模型	0.5	2.0	0.41	8.2	0.35							0.98		0.35	0.31
改进格林-安普特模型	0.5	0.34,2.99	0.434,0.401	8.89,6.13								0.98		0.35	0.31

原始格林-安普特模型与改进格林-安普特模型在率定期和验证期具有相同的径流深合格率,总体合格率略高于新安江模型。对于洪峰模拟,原始格林-安普特模型率定期合格率为 33.3% (略高于新安江模型),验证期合格率为 12.5% (与新安江模型相同)。改进格林-安普特模型率定期和验证期的洪峰合格率分别为 41.7% 和 37.5%,均高于原始格林-安普特模型。

总体来看,改进格林-安普特模型在 Walnut Gulch 流域模拟效果最好,但洪峰合格率依然较低,主要原因是实测资料精度不够。该流域面积较小,汇流时间短,洪峰涨落大多在 1 h 以内,因此模型模拟时间步长选为 10 min。而降雨数据观测时间间隔较长,甚至超过 1 h,当把降雨资料插值为 10 min 时,会造成较大的插值误差,削弱降雨强度。格林-安普特模型为超渗产流模型,降雨强度对产流计算影响很大,降雨强度误差会带来较大的洪水模拟误差。

5 结 语

将一条具有物理基础的下渗能力分布曲线引入传统格林-安普特模型对其进行改进,并选择 2 个半干旱流域,将改进格林-安普特模型与原始格林-安普特模型和新安江模型进行对比。

研究结果表明,在志丹流域,改进前后的格林-安普特模型模拟效果均比新安江模型更好,并且改进格林-安普特模型比原始格林-安普特模型有显著提高,说明引入基于物理基础的下渗能力分布曲线能更好地反映流域内降雨及下垫面变化特征,能够更加精确地计算各时刻流域内各个位置的下渗和产流量。并且由于不同子流域内土壤特性不同,改进的下渗能力分布曲线在各子流域的形状也不相同,这比原始的形状固定的经验下渗曲线更符合实际。在更接近于干旱地区的 Walnut Gulch 流域,改进格林-安普特模型比原始格林-安普特模型模拟精度提高,但仍然不够理想。半干旱、干旱地区洪水多由短时暴雨引起,陡涨陡落,因此需要更高精度的观测资料来进一步提高洪水模拟及预报精度。

在半干旱地区洪水预报中,改进格林-安普特模型可以发挥作用,以后还需要将此模型应用于干旱地区,研究其在干旱流域的洪水模拟及预报效果。

参考文献:

[1] 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: 1-10.
[2] 李致家, 姚成, 张珂, 等. 基于网格的精细化降雨径流水文模型及其在洪水预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 471-480. (LI Zhijia, YAO Cheng, ZHANG Ke, et al. Research and application of the high-resolution rainfallrunof hydrological model in flood forecasting[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(6): 471-

480. (in Chinese))

[3] 刘淑雅, 江善虎, 任立良, 等. 基于分布式水文模型的山洪预警临界雨量计算[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 384-390. (LIU Shuya, JIANG Shanhu, REN Liliang, et al. Calculation of critical rainfall for early-warning of mountain flood based on distributed hydrological model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(5): 384-390. (in Chinese))

[4] 李漫漫, 石朋, 尚艳丽, 等. 基于集合卡尔曼滤波的新安江模型状态变量实时修正方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 209-214. (LI Manman, SHI Peng, SHANG Yanli, et al. Real-time updating method for the state variables of Xin'anjiang model based on ensemble Kalman filter[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(3): 209-214. (in Chinese))

[5] 李致家, 梁世强, 霍文博, 等. 淮河上中游复杂流域洪水预报[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 1-6. (LI Zhijia, LIANG Shiqiang, HUO Wenbo, et al. Study on the flood forecasting in complex basins of upper and middle reaches of Huaihe River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(1): 1-6. (in Chinese))

[6] 赵娜娜, 王贺年, 张贝贝, 等. 若尔盖湿地流域径流变化及其对气候变化的响应[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 40-47. (ZHAO Nana, WANG Henian, ZHANG Beibei, et al. Runoff variation in Zoige Wetland Basin and its response to climate change[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 40-47. (in Chinese))

[7] World Meteorological Organization. Intercomparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting[R]. Geneva:Secretariat of the World Meteorological Organization, 1975.

[8] PILGRIM D, CHAPMAN T, DORAN D. Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions[J]. Hydrological Sciences Journal, 1988, 33 (4): 379-400.

[9] HASSAN S, LUBCZYNSKI M, NISWONGER R, et al. Surface-groundwater interactions in hard rocks in Sardon Catchment of western Spain: an integrated modeling approach[J]. Journal of Hydrology, 2014, 517: 390-410.

[10] 杨肖丽, 郑巍斐, 林长清, 等. 基于统计降尺度法和 SPI 的黄河流域干旱预测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 377-383. (YANG Xiaoli, ZHENG Weifei, LIN Changqing, et al. Prediction of drought in the Yellow River based on statistical downscale study and SPI[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(5): 377-383. (in Chinese))

[11] 李致家, 屈晨阳, 黄鹏年, 等. CASC2D 模型与 GSSHA 模型在柴川流域的径流模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 1-6. (LI Zhijia, QU Chenyang, HUANG Pengnian, et al. Simulation of runoff in Luanchuan Basin using CASC2D and GSSHA models[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(1): 1-6. (in Chinese))

[12] 李致家, 孔祥光, 张初旺. 对新安江模型的改进[J]. 水文, 1998, 32(4): 19-23. (LI Zhijia, KONG Xiangguang, ZHANG Chuwang. Improving Xin'anjiang model[J]. Journal of China Hydrology, 1998, 32(4): 19-23. (in Chinese))

[13] GREEN W, AMPT G. Studies of soil physics: the flow of air and water through soils[J]. The Journal of Agricultural Science, 1911, 4 (1): 1-24.

[14] 包为民. 格林-安普特下渗曲线的改进和应用[J]. 人民黄河, 1993(9): 1-3. (BAO Weimin. Improvement and application of the Green-Ampt infiltration curve[J]. Yellow River, 1993(9): 1-3. (in Chinese))

[15] STEWART R D. A dynamic multidomain Green-Ampt infiltration model[J]. Water Resources Research, 2018, 54 (9): 6844-6859.

[16] GOWDISH L, MUNOZ-CARPENA R. 3DMGAR: a transient quasi-3D point-source Green-Ampt infiltration and redistribution model[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17 (1): 180032.

[17] RAWLS W J, BRAKENSIEK D L, MILLER N. Green-Ampt infiltration parameters from soils data[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109 (1): 62-70.

[18] DUAN Qingyun, GUPTA V K, SOROOSHIAN S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization[J]. Journal of Optimization Theory and Application, 1993, 76(3): 501-521.

[19] SOROOSHIAN S, DUAN Qingyun, GUPTA V K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models[J]. Journal of Hydrology, 1994, 158(3/4): 265-284.

[20] HUO Wenbo, LI Zhijia, WANG Jingfeng, et al. Multiple hydrological models comparison and an improved Bayesian model averaging approach for ensemble prediction over semi-humid regions [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2019, 33(1): 217-238.

[21] 霍文博, 李致家, 冯钧, 等. 新安江模型和支持向量机模型实时洪水预报应用比较[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(4): 283-289. (HUO Wenbo, LI Zhijia, FENG Jun, et al. Comparison of Xin'anjiang model and support vector machine in application of real-time flood forecasting[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(4): 283-289. (in Chinese))

[22] 水利部水文局. 水文情报预报规范:GB/T 22482—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.