

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.06.001

基于水文模型的缺资料流域设计洪水计算

吴勇拓¹, 李致家², 戚振亚¹, 童睿轩², 杨子菁², 黄迎春³

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: 从流域降雨径流物理机制出发, 选取不同水文气象分区的 4 个缺资料小流域, 基于暴雨衰减公式进行设计降雨过程计算, 结合流域下垫面特征推求模型参数, 构建流域水文模型实现设计洪水计算, 并将水文模型法计算结果与推理公式法进行比较。结果表明: 水文模型法得到的设计洪水与推理公式法相似(洪峰、洪量相对误差均不超过 30%); 水文模型法考虑了土壤下渗能力随着降雨过程的变化情况和流域内各点汇流过程的不确定性; 水文模型参数的时空分布不均匀性更加符合流域实际的产汇流规律, 提升了复杂情况下设计洪水计算的可靠性。

关键词: 水文模型; 推理公式法; 缺资料流域; 气象分区; 下垫面条件

中图分类号: P338.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)06-0001-08

Design flood calculation of watershed with lack of data based on hydrological model

WU Yongtuo¹, LI Zhijia², QI Zhenya¹, TONG Ruixuan², YANG Zijing², HUANG Yingchun³

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corporation Ltd., Jinan 250013, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: From the perspective of physical mechanism of rainfall-runoff behaviour, three small watersheds in different hydrometeorological regions were selected and the design storms were calculated based on the attenuation formula of rainstorm in this study. According to the characteristics of the underlying surface of the basin, the model parameters were deduced, and the hydrological model was constructed to realize the design flood calculation. The results of using the hydrological model to estimate design floods were compared with those of the reasoning formula method. The results show: the design flood obtained by the hydrological model method is similar to that obtained by the inference formula method, with relative errors of flood peak and flood volume not exceeding 30%; the hydrological model method takes into account the variation of soil infiltration capacity during rainfall processes and the uncertainty of the catchment process at various points within the watershed; the uneven spatiotemporal distribution of hydrological model parameters is more in line with the actual runoff generation and concentration laws of the basin, improving the reliability of design flood calculation in the complex situation.

Key words: hydrological model; reasoning formula method; basin with lack of data; meteorological region; underlying surface condition

设计洪水计算在洪涝灾害风险分析、涉水工程标准制定中具有重要作用^[1]。现阶段大量中小流域水文站点匮乏, 暴雨洪水资料代表性不足, 基于数理统计原理的频率分析法难以运用^[2-3], 因此缺资料地区设计洪水计算多采用传统的推理公式法^[4-6]。推理公式法由陈家琦等^[7]提出, 该方法结构简单, 参数少易于计算^[8]。但研究表明, 推理公式法所计算的洪峰形态单一, 精度往往受到流域下垫面复杂化、暴雨动态变化和参数可移植性不强的限制, 其产汇流理论难以概化复杂情势下的降雨径流过程^[9-11]。水文模型可以精确刻画不同水文气象条件、不同下垫面条件的降雨径流过程, 并构建模型参数和下垫面特征的数学关系, 对于研究流域产汇流机制具有重要意义^[12-14]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079035, 51909059); 江苏省自然科学基金项目(BK20190492)

作者简介: 吴勇拓(1988—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事流域水文模拟与预报研究。E-mail: appder@126.com

通信作者: 李致家(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事流域水文模拟与水文模型研究。E-mail: zjli@hhu.edu.cn

引用本文: 吴勇拓, 李致家, 戚振亚, 等. 基于水文模型的缺资料流域设计洪水计算[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 1-8.

WU Yongtuo, LI Zhijia, QI Zhenya, et al. Design flood calculation of watershed with lack of data based on hydrological model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(6): 1-8.

为了计算以时变降雨过程为输入的设计洪水,本文选取新安江模型、Green-Ampt 模型和 HEC-HMS 模型 3 种概念性模型进行设计洪水计算。通过点面折减系数分配 24 h 设计降雨雨量,利用下垫面特征推求模型参数,并将设计洪水计算结果与推理公式法进行比较,分析推理公式法与水文模型法误差成因,探讨方法假设在不同水文气象分区和下垫面条件下的真实性。

1 设计洪水计算方法

1.1 推理公式法

推理公式法^[5]假定暴雨过程时空分布均匀,根据各点汇流历时计算等流时面积 F ,通过汇流面积变动反映流量变化,洪峰流量计算公式为

$$Q_m = 0.278\varphi SF/\tau^n$$

(1)

式中: Q_m 为设计洪峰流量; φ 为洪峰径流系数; S 为设计频率雨力; F 为流域面积; τ 为汇流时间; n 为暴雨衰减指数。

推理公式法的主要参数 τ ,通过假设-迭代法逼近:

$$\tau = \tau_0 \varphi^{1/(4-n)}$$

(2)

其中

$$\tau_0 = \frac{0.278^{3/(4-n)}}{(mJ^{1/3}/L)^{4/(4-n)}(SF)^{1/(4-n)}} \quad \varphi = \begin{cases} 1 - \mu\tau^n/S & t_c \geq \tau \\ n(t_c/\tau)^{1-n} & t_c < \tau \end{cases} \quad t_c = [(1-n)S/\mu]^{1/n}$$

式中: τ_0 为 $\varphi=1$ 的汇流时间; μ 为损失参数; t_c 为产流历时; m 为汇流参数; L 为河道平均长度; J 为河道平均比降。

1.2 水文模型法

不同水文气象分区产汇流特性存在差异^[15],因此本文采用 3 种产流方法和 2 种汇流方法(表 1)构建水文模型。对于缺乏实测水文资料的流域,水文模型的参数无法通过率定获得^[16],因此通过下垫面地理特征、土壤类型、土地覆盖类型等数据,结合地区经验、回归方法和物理意义,计算模型参数。

表 1 水文模型所用产汇流方法

Table 1 Runoff-confluence methods for hydrological models

水文模型	产流计算方法	汇流计算方法
新安江模型	三水源蓄满产流模型	滞后演算法
Green-Ampt 模型	Green-Ampt 降雨径流模型	滞后演算法
HEC-HMS 模型	SCS-CN 损失模型	SCS 综合单位线法

1.2.1 产流计算方法

a. 三水源蓄满产流模型。三水源蓄满产流模型由 3 层蒸散发计算、蓄满产流计算、三水源划分计算三部分构成^[16]。产流模块通过土壤含水量和张力水蓄水容量曲线计算产流量,具体步骤详见文献[17]。敏感参数为自由水蓄水容量 S_m ,流域内所有网格的 S_m 可通过下垫面地形指数和土壤质地分布计算:

$$S_m = \theta L_a(T_1)(\theta_s - \theta_c)$$

(3)

式中: θ 为下垫面土地利用特征; L_a 为包气带厚度,是地形指数 T_1 的函数; θ_s 、 θ_c 分别为饱和含水率和田间持水率,取决于土壤类型。其他非敏感参数参照区域参数查用表(表 2)和文献[18]选取。

表 2 三水源蓄满产流模型非敏感参数查用表

Table 2 Checklist of non-sensitive parameters for full-storage runoff model of three water sources

模块	参数	判断依据	参数规律和参考取值
蒸散发模块	K	季节、高程差	$K<1$
	W_{UM}	植被覆盖	5 ~ 20 mm(缺林地 ~ 多林地)
	W_{LM}	蒸散发	60 ~ 90 mm,此范围内蒸散发与土湿成正比
	C	深根植物覆盖	0.18 ~ 0.08(南方多林区 ~ 北方缺林区)
产流模块	W_M	流域水文气象特征	100 ~ 170 mm(北方半湿润区 ~ 南方湿润区)
	B	流域面积	0.1(≤100 km ²)、0.2 ~ 0.3(100 ~ 2000 km ²)、0.4(≥2000 km ²)
	I_M	岩土类型	天然流域此值很小,0.01 ~ 0.02
分水源模块	E_x	表层自由水蓄水条件	1 ~ 1.5
	K_G+K_I	退水历时	退水历时 3 d;则 $K_G+K_I=0.7$

注: K 为蒸散发折算系数, W_{UM} 、 W_{LM} 分别为上层、下层张力水容量, C 为深层散发系数, W_M 为张力水容量, B 为张力水分布曲线指数, I_M 为不透水面积比例, E_x 为自由水分布曲线指数, K_G 为地下水出流系数, K_I 为壤中流出系数。

b. Green-Ampt 降雨径流模型。Green-Ampt 降雨径流模型假定土壤饱和区和未饱和区之间存在一个水平的湿润峰,湿润峰随着降雨过程不断下移,土壤的下渗能力随下渗量的增大而不断减小^[19-21],下渗能力随时间变化的函数为

$$f(t)=K_s\left(1+\frac{\psi\Delta\theta}{F_m(t)}\right)$$

(4)

式中: f 为土壤下渗能力; K_s 为饱和水力传导度; ψ 为湿润峰处土壤吸力; $\Delta\theta$ 为有效含水率; F_m 为累积下渗量。不同土壤质地的下渗参数取值见表 3。

c. SCS-CN 损失模型。SCS-CN 损失模型综合考虑流域土壤类型、土地利用和气候条件,通过初损 I_a 和 C_N 计算产流能力^[22]:

$$Q_s/(P-I_a)=F/I_m$$

(5)

其中

$$I_m=25\,400/C_N-254$$

式中: Q_s 为地面径流; P 为降雨量; I_a 为初损雨量; I_m 为流域最大入渗量。

C_N 是 SCS-CN 损失模型的主要参数,反映下垫面的综合条件,取决于下垫面土壤质地和土地覆盖类型,土地覆盖分类采用 UMD(University of Maryland College)规则^[22]。

1.2.2 汇流计算方法

a. 滞后演算法。滞后演算法假定地表径流直接汇入河网,地下径流经过滞后衰减后汇入河网,汇入河网的水流经过河网汇集后流向流域出口^[23]。敏感参数为河网蓄水消退系数 C_s ,表示河网汇流速度的快慢,本文基于自相似河网结构^[24-26]计算 C_s ,原理为根据蓄量微分方程推求流域出口河链蓄量 W 表达式,利用最小二乘法迭代计算 C_s 直至 C_s 趋于稳定。

b. SCS 综合单位线法。SCS 综合单位线法假定单位线流量 U 为时间 t 的函数:

$$U(t)/U_p=f(t/t_p)$$

(6)

其中

$$t_p=L^{0.8}(S+25.4)^{0.7}/(7\,069.7J^{0.5})$$

式中: U_p 为无因次单位线洪峰; t_p 为流域平均汇流时间。

2 实例验证

2.1 流域概况

为探讨推理公式法和水文模型法在不同情景下的适用性差异,选取不同水文气象分区和下垫面类型的 4 个小流域进行研究,流域基本信息见表 4,各流域的 DEM 信息如图 1 所示。

表 4 各流域基本信息

Table 4 Basic information of each basin

流 域	流域面积/ km ²	平均 海拔/m	流域平均 坡度/‰	年平均 降水/mm	水文气象 分区	主要土壤 类型
歹阳河	102.3	1 775.7	15.3	1 200	湿润区	壤土、砂质黏壤土
湖 南	0.291	208.0	5.0	1 110	湿润区	黏土、砂壤土
县北沟	34.4	637.2	6.3	807	半湿润区	壤土
内蒙古	27.3	1 348.4	3.1	250	半干旱区	壤土、砂壤土

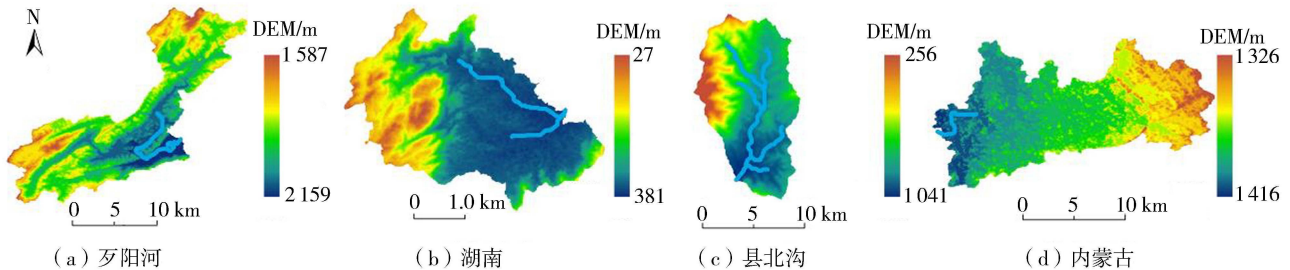


图 1 各流域 DEM 信息

Fig. 1 DEM information of each catchment

2.2 水文模型参数推求结果

表5 为根据水文模型法和推理公式法计算的研究流域参数。

表5 研究流域参数取值

Table 5 Model parameter values for study catchments

流 域	三水源蓄满产流模型									
	K	B	C	W_M/mm	W_{UM}/mm	W_{LM}/mm	S_m/mm	E_x	K_G	K_I
歹阳河	0.9	0.2	0.2	80	30	20	25	1.4	0.4	0.3
湖 南	0.9	0.1	0.2	80	30	20	12	1.4	0.4	0.3
县北沟	0.9	0.1	0.3	80	30	20	25	1.4	0.4	0.3
内蒙古	0.9	0.1	0.2	80	30	20	15	1.4	0.36	0.33

流 域	SCS-CN 损失模型			滞后演算法			SCS 综合单位线法		推理公式法	
	C_N	I_a/mm	I_M/mm	C_G	C_S	t_{lag}	t_p/min	J	m	τ
歹阳河		6.5	0	0.9	0.73	1	240.7	103	0.85	6.4
湖 南	根据流域	4	0	0.7	0.3	0	12	5	0.59	1.5
县北沟	栅格土壤	18.6	0	0.8	0.65	1	17	39.8	0.8	3
内蒙古	类型确定	30.4	0	0.7	0.75	1	166.4	49	1.2	3.5

注: S_m 为自由水蓄水容量, C_G 为地下水消退系数。Green-Ampt 模型参数主要为流域栅格对应土壤类型下渗参数。

2.3 设计洪水计算结果合理性分析

2.3.1 设计暴雨过程计算方法

降雨过程是水文模型最重要的输入信息,在降雨实测资料有限的情况下,难以获取研究流域典型暴雨的时程分配,因此本文通过地区暴雨参数和暴雨公式,对 24 h 设计暴雨进行分配,主要步骤如下:

a. 由《中国暴雨统计参数图集》查算研究区百年一遇最大 24 h 点降水量,根据研究区点面折减系数^[14]计算最大 24 h 面降水量 H_{24} 。

b. 由《电力工程水文气象计算手册》暴雨衰减指数分区表查得研究区设计衰减参数 $n_1(t \leq 1\text{ h})$ 、 $n_2(1\text{ h} < t \leq 6\text{ h})$ 、 $n_3(6\text{ h} < t \leq 24\text{ h})$,每个阶段中, t 时刻的累积降水量 H_t 和 t 成对数线性相关关系,斜率为 $1-n$,反映了累积降水量 H_t 随历时 t 的变化。可推导出三阶段暴雨公式为

$$H_t = \begin{cases} H_6 (t/6)^{1-n_3} & 6 < t \leq 24 \\ H_1 t^{1-n_2} & 1 < t \leq 6 \\ H_1 t^{n_1} & t \leq 1 \end{cases} \tag{7}$$

c. 对不同时段的 H_t 进行逐小时差值计算,求得逐时段降水量 P_t 。采用式(8)计算雨峰出现时间 t_r ,雨峰等于最大时段雨量 P_m 。遵循 $\sum_0^n P_t = H_t$ 的前提下,随机分配其他时段降水,取 5 000 次随机过程样本的中位点过程线为设计暴雨过程。

$$t_r = t_m - \tau \tag{8}$$

式中 t_m 为推理公式法峰现时间。

2.3.2 设计暴雨过程计算结果

本文降雨分配将雨峰置于偏后位置,模拟前期降水充足时土壤含水量偏大的情形,使模型计算结果偏安全。以百年一遇设计暴雨为例,各流域步长为 24 h 的降水过程和累积水量变化如图 2 所示。

由图 2 和表 6 可知,通过暴雨参数和衰减系数计算的设计暴雨特点如下:前期降水主要用于补充土壤含水量,降水量集中在雨峰时刻前后 1 h 内,峰后降雨控制洪水退水段,呈现峰前总降水量大于雨峰降水量约等于峰后总降水量的分布规律。

2.3.3 设计洪水计算结果

以百年一遇设计标准为例,推理公式法、新安江模型、

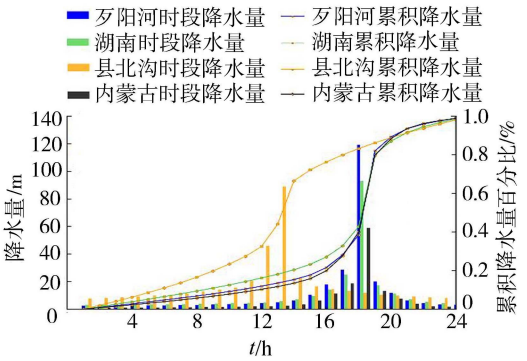


图2 各流域百年一遇最大 24 h 逐小时降水和累积降水过程线
Fig.2 Maximum 24-hourly and cumulative rainfall process line for each catchment when return period is 100 years

表 6 研究流域不同阶段设计降水量占比
Table 6 Proportion of designed storm in different stages of each catchment

流 域	H_{24}/mm	峰前降水量 占比/%	雨峰降水量 占比/%	峰后降水量 占比/%
歹阳河	274	52.6	22.7	24.7
湖 南	249	53.7	21.6	24.7
县北沟	397	46.8	22.2	31.0
内蒙古	149	55.4	16.9	27.7

Green-Ampt 模型和 HEC-HMS 模型在各流域的设计洪水计算结果(时间步长为15 min)见表 7,同时计算了以推理公式法为基准的 3 种水文模型模拟洪峰和洪量的相对误差。

由表 7 可知,与推理公式法推求的设计洪水值相比,3 种水文模型法在歹阳河小流域和湖南小流域得到的洪峰和洪量较为接近,在半干旱的内蒙古流域,Green-Ampt 模型和 HEC-HMS 模型得到的洪量相对误差较大,HEC-HMS 模型模拟的洪峰差异较为明显。

由图 3 可知,3 种水文模型模拟得到的洪量和洪峰,与推理公式法相比,相对误差均不超过 30%,模拟过程线基本吻合。新安江模型计算结果最接近推理公式法,洪峰与洪量的误差较小,但在峰现时间上有一定差异;Green-Ampt 模型洪峰误差较小,在歹阳河小流域和内蒙古小流域存在峰现时间偏前的情况;HEC-HMS 模型在内蒙古流域洪峰误差较大,在其他流域与推理公式法结果接近。

表 7 各流域洪峰、洪量、峰现时间计算结果

Table 7 Calculation results of peak flow, flood volume and peak occurrence time of each catchment

流 域	计算方法	$Q/(\text{m}^3/\text{s})$	$W/\text{万 m}^3$	$Q_{\text{re}}/\%$	$W_{\text{re}}/\%$
歹阳河	推理公式法	746	1700		
	新安江模型	721	1796	-3.4	5.6
	Green-Ampt 模型	708	1649	-5.1	-3.0
	HEC-HMS 模型	723	1844	-3.1	8.5
湖 南	推理公式法	5.59	5.79		
	新安江模型	6.0	6.10	7.3	5.4
	Green-Ampt 模型	5.92	5.30	6.0	6.0
	HEC-HMS 模型	5.99	5.03	7.1	-13
县北沟	推理公式法	467	1092		
	新安江模型	507	1284	11	18
	Green-Ampt 模型	431	1236	-7.7	15
	HEC-HMS 模型	461	1158	-1.4	6.0
内蒙古	推理公式法	107	115.0		
	新安江模型	111	120	3.7	4.4
	Green-Ampt 模型	116	149	8.4	30
	HEC-HMS 模型	77.3	142.6	-27	24

注: Q 为洪峰流量, W 为洪量, Q_{re} 为洪峰流量相对误差, W_{re} 为洪量相对误差。

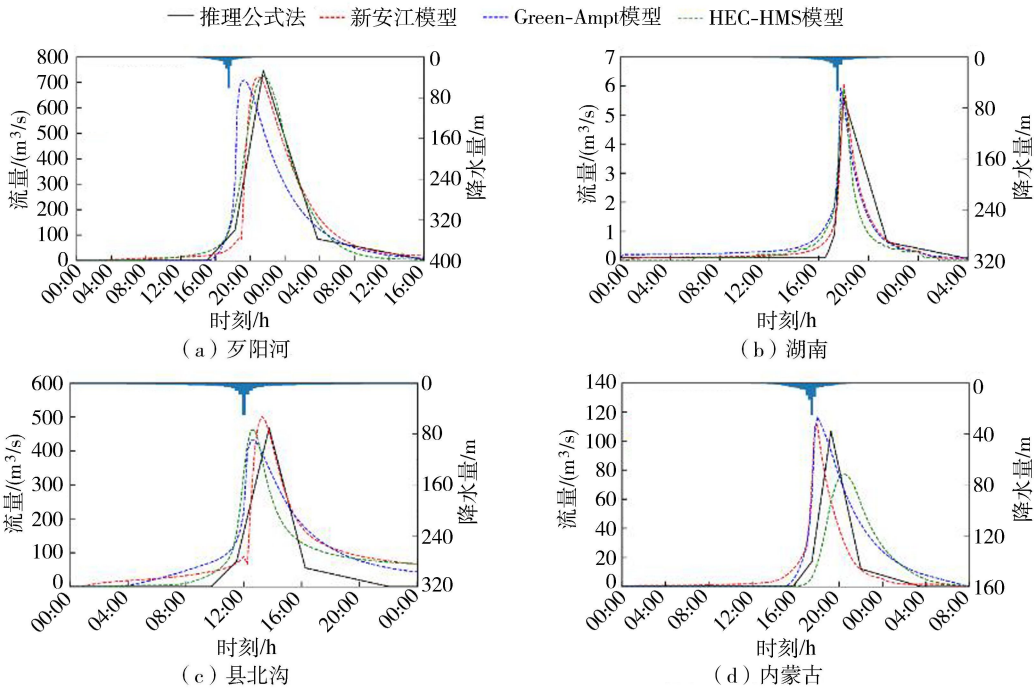


图 3 各流域推理公式法和水文模型模拟降雨-径流模拟过程线

Fig.3 Simulated hydrographs of rainfall-runoff with reasoning formula method and hydrological model method for each catchment

从产流角度,3 种水文模型在歹阳河小流域和湖南小流域洪量相对误差较小,但是在县北沟和内蒙古小流域,水文模型洪量相对误差均出现超过 15% 的情况。由图 4 可知,流量误差在降雨初期较小,偏差主要集

中在雨峰出现后的时段,表明在洪水过程的前期与中后期,水文模型法和推理公式法在基本假设上存在一定的差异。

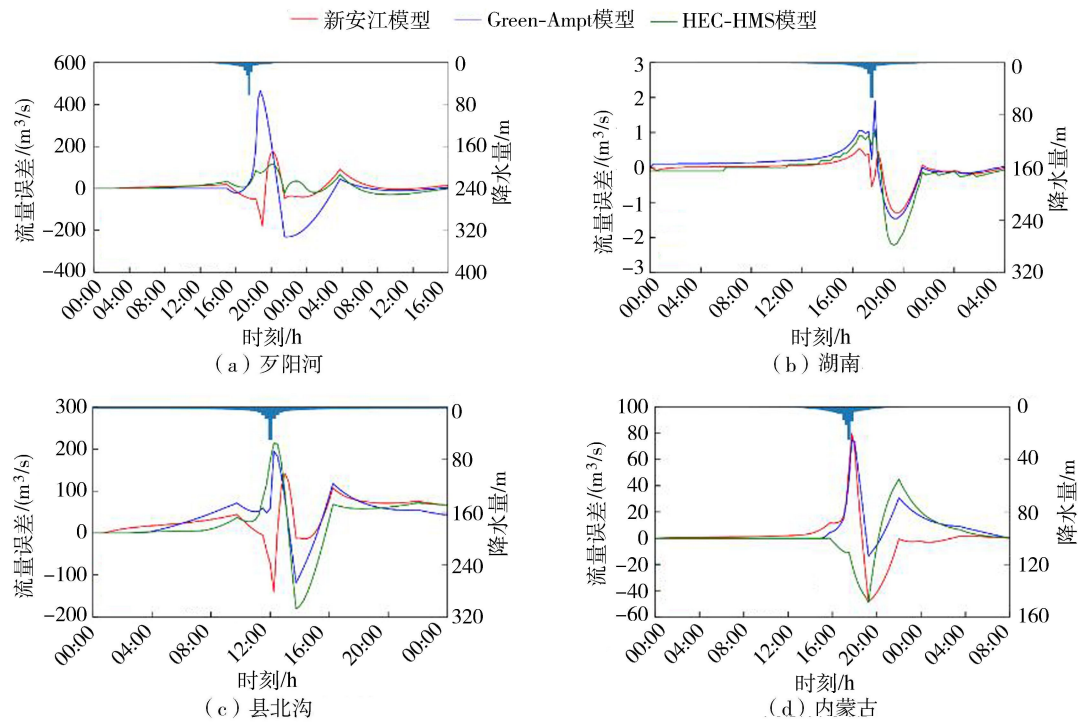


图4 各流域流量误差随降水历时的变化曲线

Fig.4 Variation curve of basin flow error with rainfall duration in each catchment

歹阳河小流域和湖南小流域属于湿润区,县北沟流域属于半湿润区,内蒙古小流域属于干旱区。Rawls 通过对不同土壤导水率的研究得到饱和/非饱和状态土壤下渗能力差值 Δf ,反映了降雨前期和中后期土壤下渗能力的差异^[19]。HEC-HMS模型中根据0~5 m厚的表层土壤的饱和和导水率大小,将土壤分成A、B、C、D四组。A类为渗透性强、潜在径流量很低的砂土或砾石土;B类为渗透性较强的砂壤土;C类为中等透水性土壤,主要为壤土;D类为微弱透水性土壤,主要为黏土等。由表8可知,不同气候类型的下垫面土壤类型、质地和占比差异较大。

县北沟和内蒙古小流域以壤土为主,分别为半湿润和半干旱气候,年均降水量较小,降雨初期土壤缺水较大,下渗能力随累积下渗量的变化较显著(图5)。歹阳河小流域和湖南小流域属于湿润气候,土壤缺水较小,较容易达到饱和状态,因而下渗能力变化较小。对于产流过程,Green-Ampt模型通过不同土壤类型的导水率和下渗参数描述降雨损失的时变特征,HEC-HMS模型通过土壤质地和利用类型划分土壤水文分组,新安江模型通过蓄水容量曲线表征不同阶段的影响,而推理公式法假设流域内产流能力和下渗能

表8 各流域土壤类型占比、下渗能力差异和水文分组

Table 8 Contribution of soil type, difference of infiltration capacity and hydrological grouping in each study catchment

流 域	土壤类型	质地	面积占比/%	$\Delta f /$ (cm/min)	土壤水文 分组
歹阳河	壤土	中等	62.2	49.2	B
	砂质黏壤土	中等	33.3	21	B
	壤砂土	粗糙	4.4	118	A
湖 南	黏土	细腻	41.1	7.1	C
	砂壤土	粗糙	33.9	97.2	A
	壤砂土	粗糙	25	118	A
县北沟	壤土	粗糙	100	49.2	B
内蒙古	壤土	粗糙	90.3	49.2	B
	砂壤土	粗糙	9.7	97.2	B

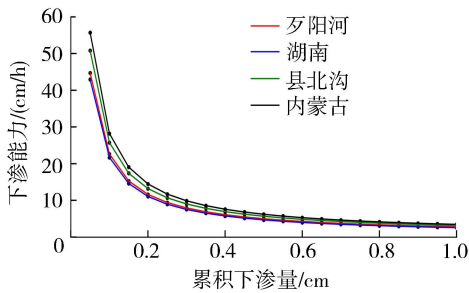


图5 各流域下渗能力变化曲线

Fig.5 Change curve of infiltration capacity of each study catchment

力均匀且不随降雨改变,未能考虑土壤下渗能力时变性的对产流的影响。因此,推理公式法在半湿润和干旱地区,无法精确描述流域下渗能力的变化。导致了在湿润地区水文模型法与推理公式法模拟结果接近,而在干旱地区二者差异较大。

在歹阳河小流域,水文模型法与推理公式法峰现时间存在较大误差;在湖南、县北沟和内蒙古小流域水文模型法和推理公式法峰现时间均小于 1 h。由表 9 可知,歹阳河小流域面积和平均坡度较大,河网结构复杂。对于汇流过程,推理公式法假定各点汇流速度相同,随着流域面积增大,下垫面空间异质性增大,各点实际汇流过程具有不确定性,和流长呈非线性关系;滞后演算法通过河道蓄量递推方程描述洪水波“推移”和“坦化”运动,SCS 综合单位线法则是根据流域下垫面特征计算单位线参数,综合考虑了下垫面因素对汇流过程的影响。因此,当流域面积较小时,符合推理公式法和汇流模型的基本假设,二者峰现时间基本一致;当流域面积较大时,受下垫面空间异质性的影响,二者峰现时间误差增加。

小流域设计洪水重点关注洪峰,本文采用的土壤含水量为田间持水量和凋萎含水量的中值,适用于常规情况,3 种水文模型法和推理公式法结果相近,其中新安江模型较小,Green-Ampt 模型和 HEC-HMS 模型在半湿润和半干旱地区洪峰相对误差偏大。在不利于工程的高洪事件中,若在连续降水的情况下,前期土壤含水量接近饱和,推理公式法和水文模型法洪峰计算结果均会增大(表 10),新安江模型洪峰接近推理公式法,Green-Ampt 模型洪峰流量显著增大,HEC-HMS 模型结果略有增大。前期土壤湿润的情况下,下渗损失减少,净雨量增加,Green-Ampt 模型和 HEC-HMS 模型对湿润程度的响应更敏感。

小流域设计洪水重点关注洪峰,本文采用的土壤含水量为田间持水量和凋萎含水量的中值,适用于常规情况,3 种水文模型法和推理公式法结果相近,其中新安江模型较小,Green-Ampt 模型和 HEC-HMS 模型在半湿润和半干旱地区洪峰相对误差偏大。在不利于工程的高洪事件中,若在连续降水的情况下,前期土壤含水量接近饱和,推理公式法和水文模型法洪峰计算结果均会增大(表 10),新安江模型洪峰接近推理公式法,Green-Ampt 模型洪峰流量显著增大,HEC-HMS 模型结果略有增大。前期土壤湿润的情况下,下渗损失减少,净雨量增加,Green-Ampt 模型和 HEC-HMS 模型对湿润程度的响应更敏感。

表 10 不同土壤缺水情况下洪峰计算结果

Table 10 Calculation results of flood peak under different soil water shortages

流 域	$Q_m/(m^3/s)$							
	推理公式法		新安江模型		Green-Ampt 模型		HEC-HMS 模型	
	$D=54.8\text{ mm}$	$D=0\text{ mm}$	$D=49.8\text{ mm}$	$D=0\text{ mm}$	$D=79.4\text{ mm}$	$D=0\text{ mm}$	$D=29.8\text{ mm}$	$D=0\text{ mm}$
歹阳河	746	826	721	796	708	1013	723	992
湖 南	5.59	6.68	6.0	7.2	5.98	11.5	5.99	7.3
县北沟	467	509	507	516	431	583	461	495
内蒙古	107	143	111	156	116	173	77.3	129

注: D 为土壤缺水量。

集中型降水容易导致河道壅塞、洪峰抬高,构成洪涝危害。降雨集中度 C_T 能够反映降雨过程的分散程度。根据 C_T 取值可将降雨过程划分为集中型、分散型、均匀型。以歹阳小河流域为例,在累积 24 h 降水量不变时,不同 C_T 取值的洪峰 Q_m 计算结果见表 11。推理公式法假定降水均分配,洪峰无变化;水文模型法的洪峰结果对 C_T 敏感, C_T 取值和洪峰成正相关,说明降雨越集中洪峰越大。因此水文模型能够处理不同分散程度的降水过程,能够对不同的设计降水情景做出响应。

集中型降水容易导致河道壅塞、洪峰抬高,构成洪涝危害。降雨集中度 C_T 能够反映降雨过程的分散程度。根据 C_T 取值可将降雨过程划分为集中型、分散型、均匀型。以歹阳小河流域为例,在累积 24 h 降水量不变时,不同 C_T 取值的洪峰 Q_m 计算结果见表 11。推理公式法假定降水均分配,洪峰无变化;水文模型法的洪峰结果对 C_T 敏感, C_T 取值和洪峰成正相关,说明降雨越集中洪峰越大。因此水文模型能够处理不同分散程度的降水过程,能够对不同的设计降水情景做出响应。

3 结 论

a. 采用的基于三段衰减系数的设计暴雨具有峰前雨量大于雨峰约等于峰后雨量的分布规律,前期降雨偏多、土壤饱和、雨峰偏后,能够模拟出在工程中偏安全的情况。

表 9 各流域水文模型洪峰出现时间误差

Table 9 Occurrence time error of peak flow with hydrological model method for each study catchment

流 域	面积/ km ²	平均 坡度/%	$\Delta t/h$		
			新安江模型	Green-Ampt 模型	HEC-HMS 模型
歹阳河	103	15.3	1.0	2.3	0
湖 南	0.85	5.0	0	0.2	0
县北沟	34.4	6.3	-0.3	-0.7	-0.7
内蒙古	6.4	3.1	0.7	0.7	-0.7

注: Δt 水文模型和推理公式法的洪峰出现时刻的差值。

表 11 歹阳河小流域不同降水集中度时的洪峰计算结果

Table 11 Calculation results of flood peak under different concentration of rainfall for Daiyang watershed

C_T	分散程度	$Q_m/(m^3/s)$			
		推理公式法	新安江模型	Green-Ampt 模型	HEC-HMS 模型
0.15	均匀型	746	608	594	617
0.50	分散型	746	707	683	702
0.85	集中型	746	783	945	976

b. 在最大 24 h 降水量相同时,以推理公式法为标准,根据下垫面特征推求的水文模型参数进行模型计算后,各模型洪峰、洪量误差基本在 30% 以内,洪水过程与推理公式法接近。

c. 水文模型法与推理公式法计算结果的差异主要来源于地区复杂性变化和基本假设的差异。推理公式法基于流域产流能力均匀和等流时面积 2 个假定进行设计洪水推求。采用水文模型法进行设计洪水计算时,可以精准刻画不同类型土壤下渗能力随着降雨过程的变化情况,同时基于下垫面特征空间分布的汇流模型综合考虑了流域内各点汇流过程不确定性,更加符合流域实际的产汇流规律。

d. 集中型降雨更易形成高洪事件,危害防洪安全,推理公式法对降雨分布的变化无响应,不符合降雨分布集中的应用场景,水文模型法对降雨分布变化的响应灵敏,能够预演极端情况下的设计洪水过程,有利于提高设计洪水计算结果的安全性。

参考文献:

- [1] 芮孝芳,张超. 论设计洪水计算[J]. 水利水电科技进展,2014,34(1):20-26. (RUI Xiaofang,ZHANG Chao. Research on design flood calculation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2014,34(1):20-26. (in Chinese))
- [2] 魏炳乾,杨坡,罗小康,等. 半干旱无资料中小流域设计洪水方法研究[J]. 自然灾害学报,2017,26(2):32-39. (WEI Bingqian,YANG Po,LUO Xiaokang,et al. Research on design flood methods for semi-arid and non-data basin in a medium-small scale[J]. Journal of Natural Disasters,2017,26(2):32-39. (in Chinese))
- [3] TUNAS I G,ANWAR N,LASMINTO U. A synthetic unit hydrograph model based on fractal characteristics of watersheds[J]. International Journal of River Basin Management,2019,17(4):465-477.
- [4] 郭生练,刘章君,熊立华. 设计洪水计算方法研究进展与评价[J]. 水利学报,2016,47(3):302-314. (GUO Shenglian,LIU Zhangjun,XIONG Lihua. Advances and assessment on design flood estimation methods[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(3):302-314. (in Chinese))
- [5] 李巧玲,马亚楠,李致家,等. 无资料小水库影响下的中型水库入库洪水模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):213-219. (LI Qiaoling,MA Yanan,LI Zhijia,et al. Inflow flood simulation of medium reservoirs under impact of ungauged small reservoirs[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(3):213-219. (in Chinese))
- [6] 李致家,臧帅宏,刘志雨,等. 新安江模型中河道汇流方法的改进[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):189-194. (LI Zhijia,ZANG Shuaihong,LIU Zhiyu,et al. Improvement of channel routing method for Xin' anjiang model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(3):189-194. (in Chinese))
- [7] 陈家琦,张恭肃. 推理公式的应用与改进[J]. 水文,1983,3(1):4-11. (CHEN Jiaqi,ZHANG Gongsu. Application and improvement of inference formula[J]. Journal of China Hydrology,1983,3(1):4-11. (in Chinese))
- [8] 魏国晋,何灼伦,王统旭,等. 推理公式法在青海省应用的误差分析[J]. 人民黄河,2021,43(9):48-51. (WEI Guojin,HE Zhuolun,WANG Tongxu,et al. Application and error analysis of hydrological reasoning formula method in Qinghai Province[J]. Yellow River,2021,43(9):48-51. (in Chinese))
- [9] 叶永东. 基于流量-面积比值的小流域设计洪水计算方法对比研究[J]. 中国水能及电气化,2018(5):35-40. (YE Yongdong. Comparative study on small basin design flood calculation method based on flow-area ratio[J]. China Water Power & Electrification,2018(5):35-40. (in Chinese))
- [10] 吴兴辉,常玉娟. 基于坡面排水设计的两种暴雨洪水算法应用[J]. 人民长江,2020,51(6):33-37. (WU Xinghui,CHANG Yujuan. Application of two storm flood algorithms in slope drainage design[J]. Yangtze River,2020,51(6):33-37. (in Chinese))
- [11] 李致家,朱跃龙,刘志雨,等. 中小河流洪水防控与应急管理关键技术的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):13-18. (LI Zhijia,ZHU Yuelong,LIU Zhiyu,et al. Thoughts on key technologies of flood prevention and emergency management in small and medium-sized rivers[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(1):13-18. (in Chinese))
- [12] 芮孝芳. 工程水文学在中国的发展[J]. 水利学报,2019,50(1):145-154. (RUI Xiaofang. The advances of engineering hydrology in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(1):145-154. (in Chinese))
- [13] WANG W,LIU J,LI C,et al. Assessing the applicability of conceptual hydrological models for design flood estimation in small-scale watersheds of northern China[J]. Natural Hazards,2020,102(3):1135-1153.
- [14] 常琛朝,黄津辉,陈以恒. 降雨点面折减系数计算方法综述[J]. 水资源保护,2022,38(2):76-82. (CHANG Chenchao,HUANG Jinhui,CHEN Yiheng. Review on calculation methods of areal reduction factor[J]. Water Resources Protection,2022,38(2):76-82. (in Chinese))

[20] 姚成,李致家,张珂,等. 基于栅格型新安江模型的中小河流精细化洪水预报[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):19-25. (YAO Cheng, LI Zhijia, ZHANG Ke, et al. Fine-scale flood forecasting for small and medium-sized rivers based on Grid-Xin' anjiang model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1):19-25. (in Chinese))

[21] 姚成. 基于栅格的新安江(Grid-Xinanjang)模型研究[D]. 南京:河海大学,2009.

[22] YAO Cheng,LI Zhijia,BAO Hongjun, et al. Application of a developed Grid-Xin' anjiang Model to Chinese watersheds for flood forecasting purpose[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2009,14(9):923-934.

[23] 孙阁. 林地土内径流速率的研究[J]. 水土保持学报,1990(4):37-41. (SUN Ge. Study on runoff rate in forest soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation,1990(4):37-41. (in Chinese))

[24] GRIMALDI S,PETROSEL A ,ALONSO G, et al. Flow time estimation with spatially variable hillslope velocity in ungauged basins[J]. Advances in Water Resources,2010,33(10):1216-1223.

[25] 刘学军,龚健雅,周启鸣,等. 基于 DEM 坡度坡向算法精度的分析研究[J]. 测绘学报,2004(3):258-263. (LIU Xuejun, GONG Jianya, ZHOU Qiming, et al. A study of accuracy and algorithms for calculating slope and aspect based on grid digital elevation model(DEM) [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2004(3):258-263. (in Chinese))

(收稿日期:2022-12-13 编辑:刘晓艳)

(上接第 8 页)

[15] 姚成,李致家,张珂,等. 基于栅格型新安江模型的中小河流精细化洪水预报[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):19-25. (YAO Cheng,LI Zhijia,ZHANG Ke,et al. Fine-scale flood forecasting for small and medium-sized rivers based on Grid-Xin' anjiang model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(1):19-25. (in Chinese))

[16] 李红霞,张新华,张永强,等. 缺资料流域水文模型参数区域化研究进展[J]. 水文,2011,31(3):13-17. (LI Hongxia, ZHANG Xinhua,ZHANG Yongqiang,et al. Review of hydrological model parameter regionalization for ungauged catchments[J]. Journal of China Hydrology,2011,31(3):13-17. (in Chinese))

[17] 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 Qينو, 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))

[18] 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.

[19] LEE S,CHU M L,SCHMIDT A R. Effective Green-Ampt parameters for two-layered soils[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2020,25(4):4020004.

[20] 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. (in Chinese))

[21] 霍文博,李致家,张珂,等. 分布式格林-安普特降雨径流模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):47-54. (HUO Wenbo,LI Zhijia,ZHANG Ke,et al. Study on the distributed Green- Ampt rainfall-runoff model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(3):47-54. (in Chinese))

[22] CHENG X,MA X,WANG W,et al. Application of HEC-HMS parameter regionalization in small watershed of Hilly Area[J]. Water Resources Management,2021,4:1-16.

[23] CHENG Y,LI Z,YU Z,et al. A priori parameter estimates for a distributed,grid-based Xin' anjiang model using geographically based information[J]. Journal of Hydrology,2012,468:47-62.

[24] MOHAMMADZADEH-HABILI J,KHALILI D. Development of the Green-Ampt infiltration rate model and relationship of the GA model parameters with soil hydraulic parameters[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2021,26(11):4021033.

[25] VERMA S,SINGH P K,MISHRA S K, et al. Activation soil moisture accounting (ASMA) for runoff estimation using soil conservation service curve number (SCS-CN) method[J]. Journal of Hydrology,2020,589:125114.

[26] 李致家,梁珂,阚光远,等. 新安江模型中河网汇流参数 Cs 的一种计算方法[J]. 水科学进展,2016,27(5):652-661. (LI Zhijia,LIANG Ke, KAN Guangyuan, et al. A method for deriving the river network flow concentration parameter Cs of the Xin' anjiang model[J]. Advances in Water Science,2016,27(5):652-661. (in Chinese))

(收稿日期:2022-10-12 编辑:刘晓艳)