

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.06.004

考虑地形地貌特征与土地利用变化的小流域 设计洪水计算方法

李彬权^{1,2}, 任泽凌², 王国庆³, 刘加进⁴, 鲍振鑫³, 刘翠善³, 张磊磊⁴

(1. 河海大学流域水循环与水安全全国重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 南京水利科学研究院水文水资源研究所, 江苏 南京 210029;

4. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要:为解决设计洪水计算中传统推理公式法与瞬时单位线法难以反映地形地貌特征和土地利用变化的问题,考虑地形地貌特征和土地利用变化对汇流时间的影响,提出了一种新的设计洪水汇流计算方法——径流曲线法(SCS)地貌广义单位线法,并与SCS产流模型耦合构建完整的产汇流模型,以杭州市上埠河流域为例对该方法进行验证。实例验证结果表明:与传统的推理公式法和瞬时单位线法相比,SCS地貌广义单位线法在城镇化地区小流域设计洪水计算中更具合理性,能够更好地反映流域地形地貌特征以及适应土地利用的变化;情景分析发现城市化带来下垫面的改变会进一步增大设计洪量和设计洪峰。

关键词:设计洪水;SCS产流模型;广义单位线法;城市化;土地利用变化;上埠河流域

中图分类号:TV122.3

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2025)06-0033-08

A method for design flood calculation in small watershed considering geomorphological features and land use change

LI Binquan^{1,2}, REN Zeling², WANG Guoqing³, LIU Jiajin⁴, BAO Zhenxin³, LIU Cuishan³, ZHANG Leilei⁴

(1. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, Hohai University, Nanjing 210098, China;

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

3. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

4. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: Traditional reasoning formula methods and instantaneous unit hydrograph methods are difficult to reflect geomorphological features and land use changes in design flood calculation. To address this issue, a new design flood flow concentration calculation method, namely the runoff curve number (SCS) geomorphologic general unit hydrograph method, was proposed by considering the influence of geomorphological features and land use changes on the time of flow concentration. This method was coupled with the SCS model to establish a complete flow generation and concentration model, and the Shangbu River Watershed in Hangzhou City was taken as an example to verify the method. The verification results show that compared to traditional reasoning formula method and instantaneous unit hydrograph methods, the SCS geomorphologic general unit hydrograph method is more reasonable for calculating design floods in small watersheds within urbanized areas, as it better reflects the watershed's geomorphological features and adapts to land use changes. Scenario analysis further reveals that the changes in underlying surface conditions caused by urbanization will lead to an increase in design flood volume and flood peak.

Key words: design flood; SCS flow generation model; general unit hydrograph method; urbanization; land use change; the Shangbu River Watershed

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42471049)

作者简介: 李彬权(1984—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:libinquan@hhu.edu.cn

通信作者: 任泽凌(2000—),男,博士研究生,主要从事水文不确定性理论与应用研究。E-mail:221301010028@hhu.edu.cn

引用本文: 李彬权,任泽凌,王国庆,等.考虑地形地貌特征与土地利用变化的小流域设计洪水计算方法[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(6):33-40.

LI Binquan, REN Zeling, WANG Guoqing, et al. A method for design flood calculation in small watershed considering geomorphological features and land use change[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(6): 33-40.

设计洪水是确定水利工程建设规模及制定运行管理策略的重要依据^[1],其准确估计是有效防洪减灾的关键^[2]。推求设计洪水的途径主要有两类:一是直接由流量资料推求设计洪水^[3],要求具有长系列流量资料;二是由暴雨资料推求设计洪水^[4-5]。由于高强度人类活动干扰和站点布设困难等影响,很多小流域缺乏足够的流量资料样本^[6],因而只能采用第二类方法^[7]。缺资料小流域的设计洪水计算方法主要有推理公式法和瞬时单位线法等^[8-9]。推理公式法结构形式简单,参数少易于计算,但包含较多假设,成果存在不确定性^[10]。另外,很多省份的瞬时单位线法均为 20 世纪发布,近几十年来没有更新,由于气候条件和下垫面特征等均已发生变化,因此其可靠性有待检验。随着流域水文模型的发展,以模型模拟实现设计洪水计算成为缺资料小流域设计洪水计算的一种新途径^[11]。在设计洪水推求中,纳入流域面积、形状、水系分布、河道长度与比降等关键地形地貌要素,能更准确地反映流域水文响应^[12]。随着我国城市化进程快速推进,城市下垫面条件急剧演替,直接影响到城市的产汇流规律^[13-16]。在气候变化和城市化背景下,采用最新降雨资料,并结合地形地貌特征和土地利用变化条件,研究小流域设计洪水计算方法具有重要意义。

为考虑地形地貌特征和下垫面土地利用变化对流域水文响应的影响,本文将地貌瞬时单位线理论和 SCS 无因次单位线引入广义单位线模型^[17-20],提出一种全新的设计洪水汇流计算方法——SCS 地貌广义单位线法,用于推求设计洪水。以杭州市上埠河流域为例,产流计算采用能够考虑土地利用类型等下垫面因素的 SCS 产流模型^[21-22],汇流计算则采用 SCS 广义单位线法、地貌广义单位线法和 SCS 地貌广义单位线法等多种方法。通过将本文方法与现行推理公式法、浙江省瞬时单位线法进行对比分析,验证 3 种广义单位线法在小流域设计洪水计算中的适用性,并分析土地利用变化对设计洪水的影响程度。

1 研究方法

SCS 产流模型的原理详见文献[23],推理公式法和浙江省瞬时单位线法的介绍详见文献[24]。

1.1 广义单位线法

2022 年,Guo^[17-19]对瞬时单位线提出了 3 个假设以消除其缺陷,从而得到了广义单位线 $g(t)$ 和瞬时单位线 $u(t)$ 的解析表达式:

$$g(t) = 1 - [1 + mx(t)]^{-\frac{1}{m}} \tag{1}$$

$$u(t) = \frac{dg(t)}{dt} = \frac{\mu}{t_p} x(t) [1 + mx(t)]^{-(1+\frac{1}{m})} \tag{2}$$

其中

$$x(t) = \exp \left[\mu \left(\frac{t}{t_p} - 1 \right) \right]$$

式中: $x(t)$ 为流域特征; m 为不对称形状因子; μ 为上升系数; t_p 为峰现时间。由式(2)可知,一个流域的汇流过程仅由 t_p 、 μ 、 m 这 3 个参数表征,SCS 广义单位线法、地貌广义单位线法和 SCS 地貌广义单位线法的区别就是 3 个参数的计算方法不同。若已知流域净雨过程,则流域出口流量可通过净雨过程与瞬时单位线卷积计算得到:

$$Q(t) = \int_0^t I(\tau) u(t - \tau) d\tau \tag{3}$$

式中 $I(\cdot)$ 为转换为流量单位的净雨过程。

1.2 SCS 广义单位线法

SCS 广义单位线法是将广义单位线与 SCS 无因次单位线相拟合^[17],得到 $\mu=5, m=3$ 。SCS 广义单位线中 t_p 的计算公式^[20]为

$$t_p = \frac{2l^{0.8}}{1323y^{0.5}} \left(\frac{1000}{C_N} - 9 \right)^{0.7} \tag{4}$$

式中: l 为主河道长度; y 为平均坡度; C_N 为径流曲线数。

1.3 地貌广义单位线法

根据地貌瞬时单位线理论^[12],有:

$$u_p t_p = 0.58 \left(\frac{R_N}{R_A} \right)^{0.55} R_L^{0.05} \tag{5}$$

$$t_p = \frac{0.44L}{v} \left(\frac{R_N}{R_A} \right)^{0.55} R_L^{-0.38} \tag{6}$$

式中： u_p 为地貌瞬时单位线的峰值； R_N 为流域水系的河数（ N ）比； R_L 为河长（ L ）比； L 为流域河系中最高级别河流的长度； R_A 为面积（ A ）比； v 为流域平均流速。

在缺资料地区，采用经验流速公式求平均流速^[12]：

$$v = 0.665\alpha^{0.6} (i_r A)^{0.4} \tag{7}$$

其中

$$\alpha = S_0^{0.5} / cB^{\frac{2}{3}}$$

式中： i_r 为净雨强度； A 为流域面积； S_0 为河道比降； c 为曼宁糙率系数，一般取 0.025； B 为河宽。

根据三角形单位线理论^[25]，单位线底宽 t_b 与峰现时间 t_p 存在密切关系，即 $t_b = 2.67t_p$ ，因此 t_p 之前产生的径流量是总径流量的 37.5%，将 $t=t_p$ 代入式（1）：

$$g(t_p) = 1 - (1 + m)^{-\frac{1}{m}} = 0.375 \tag{8}$$

求解式（8），可得到 $m = 2.89$ 。将 $t=t_p$ 代入式（2）得到 u_p ，将 u_p 代入式（5）可得到式（9），则可根据地形地貌特征参数 R_N 、 R_L 和 R_A 推求参数 μ ， t_p 计算公式同式（6）。

$$u_p t_p = \mu (1 + m)^{-(1+\frac{1}{m})} = 0.58 \left(\frac{R_N}{R_A} \right)^{0.55} R_L^{0.05} \tag{9}$$

1.4 SCS 地貌广义单位线法

SCS 广义单位线法可以反映设计洪水对土地利用变化的响应，其中 t_p 的变化与 C_N 相关， C_N 能反映城市化带来的土地利用变化，然而 μ 和 m 的计算与所选小流域的地形地貌特征无关，为常数。相比之下，地貌广义单位线法的参数 μ 和 t_p 可通过地形地貌特征推求，优点在于参数计算与所选小流域的地形地貌特征相关，缺点在于难以反映设计洪水对土地利用变化的响应。

为结合 SCS 广义单位线法与地貌广义单位线法的优点，考虑耦合二者的计算方法，采用地貌广义单位线法推求 μ 和 m ，采用 SCS 广义单位线法推求 t_p ，这种耦合方法的优势在于能够同时考虑小流域地形地貌特征和土地利用变化对设计洪水的影响，即 SCS 地貌广义单位线法。

2 实例验证

2.1 研究区概况

杭州市上埠河流域近年来城市规划建设进程加快，下垫面条件发生了很大变化，且流量资料缺乏，因此适合采用设计暴雨推求设计洪水。本文选取杭州市运西片区南部山区的上埠河小流域为研究区（图 1），流域面积为 40.9 km²，河长为 16.9 km，河道比降为 4.82‰，流域地形平均坡度为 21.58%，属山区性河流，源短流急，其水系形状属于羽毛状水系，上游起源于余杭区板照山，主要承接西湖区西南部与余杭区的部分山水，下游出口于荆山桥处与沿山河相连。山洪经沿山河往西至闲林港，往东至五常港，最终汇入运西河网。流域内小和山高教园区的建成进一步推进了城镇化进程。

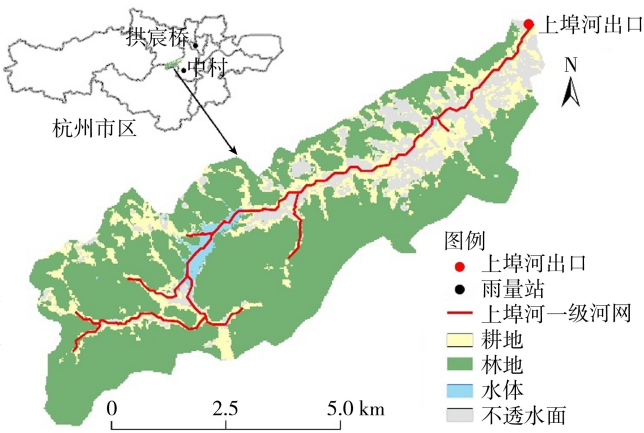


图 1 上埠河流域概况

Fig. 1 Overview of the Shangbu River Watershed

数字高程数据（DEM）采用 ASTER-GDEM-30M（来自地理空间数据云，<http://www.gscloud.cn>），土壤质地数据采用分辨率为 1 km×1 km 的中国土壤质地空间分布数据（来自中国科学院资源环境科学数据中心，<http://www.resdc.cn>），土地利用数据采用分辨率 30 m×30 m 的中国逐年土地覆盖数据集^[26]。采用年最大值法^[27]选样，收集到拱宸桥站 1980—2022 年和中村站 1962—2022 年 1、3、6、24 h 共 4 个历时的降雨极值资料；收集到拱宸桥站 1980—2022 年的逐小时降雨资料；以 2 年一遇设计雨量为标准挑选暴雨过程，采用同频率分析法^[28]推求拱宸桥站 24 h 设计暴雨雨型，用于代表上埠河流域的设计雨型。

2.2 设计暴雨计算

利用 Mann-Kendall 趋势检验方法与 Pettitt 突变分析方法^[29-31] 分别分析拱宸桥站 1980—2022 年和中村站 1962—2022 年 1、3、6、24 h 共 4 个历时的降雨极值资料的趋势性和突变性,结果表明,在 0.05 显著性水平下,两站的降雨极值序列均未发生显著的趋势性变化,且均不存在显著的突变点。选用水利部门推荐的 P-Ⅲ型分布函数用于拱宸桥站和中村站 4 个历时(1、3、6、24 h)降雨极值序列的频率分析, C_s/C_v 取 3.5(C_s 为偏态系数, C_v 为变差系数),得到点雨量均值、 C_v ,根据上埠河流域面积查得各历时点面系数,各历时平均点雨量均值分别乘以相应历时的点面系数即为各历时面雨量均值, C_v 值不变, C_s/C_v 取 3.5,计算上埠河流域各历时设计面雨量,结果见表 1。根据《浙江省短历时暴雨》,推求得到上埠河流域的暴雨衰减指数 $n_{1,6}$ 和 $n_{6,24}$ (表 2)。由表 2 和设计面雨量的计算公式,得到不同降雨频率下的 12 h 设计面雨量,以拱宸桥站为代表站,采用同频率分析法推求上埠河流域 24 h 设计暴雨雨型,将不同重现期的各历时设计面雨量代入设计暴雨雨型中,可得不同重现期下 24 h 设计暴雨过程(图 2)。

表 1 上埠河流域设计面雨量

Table 1 Areal design rainfall in the Shangbu River watershed

历时/h	设计面雨量/mm					
	频率为 50%	频率为 20%	频率为 10%	频率为 5%	频率为 2%	频率为 1%
1	30.01	45.73	57.01	68.04	82.38	93.11
3	46.76	74.40	94.88	115.19	141.87	161.97
6	60.03	89.90	111.07	131.65	158.30	178.17
24	94.65	141.74	175.12	207.57	249.58	280.91

表 2 暴雨衰减指数计算结果

Table 2 Results of storm attenuation index calculation

降雨频率/%	$n_{1,6}$	$n_{6,24}$
1	0.638	0.672
2	0.635	0.672
5	0.632	0.672
10	0.628	0.672
20	0.623	0.672

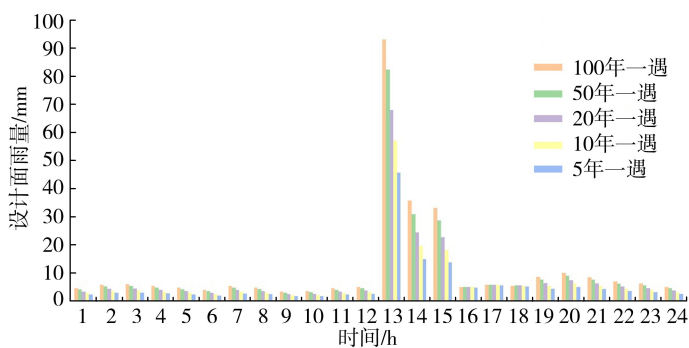


图 2 上埠河流域不同重现期下 24 h 设计暴雨过程

Fig. 2 24-h design storm process for different return periods in the Shangbu River Watershed

2.3 设计洪水计算

2.3.1 土地利用变化和 C_N 值计算

分析流域不同年份土地利用变化情况(表 3),发现林地与耕地始终是上埠河流域的主要土地利用类型。1985—2020 年,林地与耕地总体呈减少趋势,而不透水面呈持续递增趋势。相较于 1985 年,2020 年的耕地与林地占比分别由 20.7%、78.3% 下降至 17.3%、68.2%;不透水面占比由 0.9% 上升至 12.6%;1985—2015 年水体占比变化不大,由于闲林水库的建成,2015—2020 年水体占比由 0.2% 上升至 2.0%。

根据文献[32],计算得到的各年份的 C_N 值见表 4。由表 3 和表 4 可知,耕地与林地占比的持续减小,不透水面占比的不断增大,表明流域城市化进程的快速推进,其 C_{N2} 值也由 1985 年的 63.25 增加到 2020 年的 67.40。

2.3.2 各广义单位线法的合理性分析

根据上埠河流域不同分级河流的河数、平均河长、集水面积等,利用地貌定律计算得到 $R_N=7$ 、 $R_L=14.22$ 、 $R_A=21.02$ 和 $m=2.89$;代入式(9)得到 $\mu=3.88$ 。上埠河 $B=16\text{ m}$ 、 $A=40.9\text{ km}^2$ 、 $S_0=0.00482$ 、 $c=0.025$, i_r 根据设计净雨强度计算,由式(6)计算得到 t_p 。

现行的浙江省小流域设计洪水计算主要采用推理公式法和浙江省瞬时单位线法,因此主要将 3 种广义单位线方法推求得到设计洪水与 2 种现行方法进行对比分析。以 50 年一遇设计洪水推求为例,输入为

表 3 上埠河流域不同年份各类土地利用占比 (单位: %)

Table 3 Land use composition in the Shangbu River Watershed in different years (unit: %)				
年份	耕地	林地	水体	不透水面
1985	20.7	78.3	0.1	0.9
1990	17.0	81.9	0.1	1.0
1995	16.7	81.8	0.1	1.4
2000	15.4	82.5	0.1	2.1
2005	15.0	78.5	0.1	6.3
2010	13.1	77.5	0.2	9.3
2015	18.2	70.2	0.2	11.4
2020	17.3	68.2	2.0	12.6

表 4 上埠河流域不同年份 C_N 值

Table 4 C_N values for the Shangbu River Watershed in different years			
年份	C_{N1}	C_{N2}	C_{N3}
1985	41.96	63.25	79.83
1990	41.46	62.77	79.50
1995	41.56	62.87	79.57
2000	41.60	62.91	79.60
2005	43.07	64.30	80.55
2010	43.84	65.02	81.04
2015	45.39	66.43	81.99
2020	46.48	67.40	82.62

注: C_{N1} 、 C_{N2} 、 C_{N3} 分别为前期土壤湿润条件为干旱、正常、湿润时的 C_N 。

50 年一遇的 24 h 设计暴雨过程,产流模型采用 SCS 产流模型,汇流则分别采用推理公式法、浙江省瞬时单位线法、SCS 广义单位线法、地貌广义单位线法和 SCS 地貌广义单位线法等方法,其中推理公式法中的设计洪水过程线拟采用三角形概化方法。以 1985 年和 2020 年土地利用条件为典型场景,采用不同方法推求得到的设计洪水过程线如图 3 所示。由图 3 可知,地貌广义单位线法的设计洪峰明显偏大于其他汇流方法;相较于 1985 年,2020 年的设计洪水峰现时间提前,洪峰增大,反映出土地利用变化对设计洪水过程线的影响。

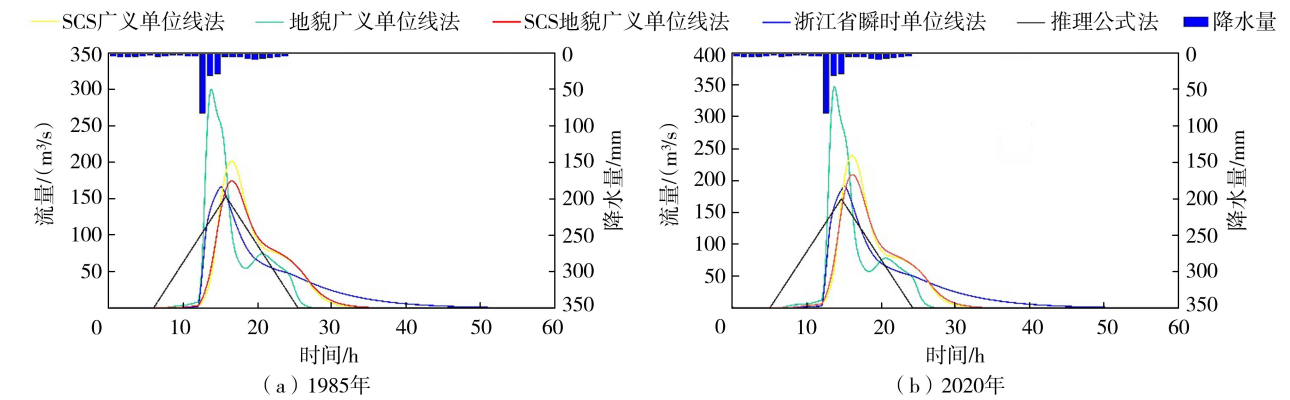


图 3 上埠河流域 1985 年与 2020 年不同汇流方法推求的设计洪水过程线
Fig. 3 Design flood hydrographs under different flow concentration methods for the Shangbu River Watershed in 1985 and 2020

由表 5 可知,以推理公式法为标准,SCS 广义单位线法、地貌广义单位线法和 SCS 地貌广义单位线法在不同年份的洪峰相对误差分别为 30.4%~39.6%、95.3%~102.7%和 12.8%~22.1%;以浙江省瞬时单位线法为标准,3 种方法在不同年份的洪峰相对误差则分别为 20.3%~24.7%、80.1%~82.9%和 4.1%~9.1%。SCS 地貌广义单位线法推求的设计洪峰与 2 种现行方法的计算结果最接近,其中地貌广义单位线的洪峰相对误差最大,这可能是因为计算流域平均流速的经验公式具有较大不确定性。相较于 SCS 广义单位线,SCS 地貌广义单位线考虑了地形地貌特征,计算出的 μ 较小,推求的洪峰流量会相对较小,更符合上埠河流域羽毛状水系特征的实际水文响应过程,初步反映了 SCS 地貌广义单位线法的优越性及其在研究流域的适用性。推理公式法中的汇流参数 m 是基于自然流域水流特征推求的,用于城市化影响的小流域设计洪水推求时,计算的汇流时间过大,进一步导致设计洪峰流量偏小^[33]。浙江省瞬时单位线法则是 20 世纪 80 年代提出,此后浙江省城镇化发展迅速,该方法在下垫面条件显著变化条件下是否适用仍是未知数。

本文重点分析的是 3 种广义单位线汇流方法的合理性,因此产流计算方法均为 SCS 产流模型。推理公式法与浙江省瞬时单位线法推求的 2020 年设计洪峰比 1985 年大(图 3),主要是由产流量增大引起的。现行的推理公式法和浙江省瞬时单位线法在汇流计算时无法考虑到地形地貌特征和土地利用变化因素。相比之下,SCS 地貌广义单位线法综合了地貌瞬时单位线与 SCS 广义单位线法的优点,其参数 μ 和 t_p 分别表征了小流域地形地貌和考虑土地利用变化的汇流时间,且广义单位线法是克服了传统单位线三大缺点的一种

表5 3种广义单位线方法较推理公式法和浙江省瞬时单位线法的洪峰相对误差

Table 5 Comparison of relative errors in flood peak among three general unit hydrograph methods, reasoning formula method, and Zhejiang Provincial instantaneous unit hydrograph method

年份	洪峰相对误差 1/%			洪峰相对误差 2/%		
	SCS 广义单位线法	地貌广义单位线法	SCS 地貌广义单位线法	SCS 广义单位线法	地貌广义单位线法	SCS 地貌广义单位线法
1985	31.4	95.9	13.8	20.8	80.1	4.6
1990	30.4	95.3	12.8	20.3	80.2	4.1
1995	30.6	95.4	13.0	20.4	80.2	4.3
2000	30.9	95.5	13.3	20.6	80.2	4.4
2005	33.4	98.1	15.8	23.1	82.9	6.9
2010	34.9	99.9	17.4	22.5	81.5	6.6
2015	37.6	100.6	20.1	23.8	80.4	8.0
2020	39.6	102.7	22.1	24.7	81.2	9.1

注:洪峰相对误差 1、2 分别以推理公式法、浙江省瞬时单位线法为标准。

全新单位线法,因此本文提出的方法可作为缺资料小流域设计洪水推求的新途径。

2.3.3 土地利用变化洪水效应

为分析设计洪水对城市化进程的响应程度,以及产汇流模型对洪峰增加的贡献程度,以 C_N 为情景构建因素,以情景分析方法构建 5 种情景,见表 6。

输入为 50 年一遇的 24 h 设计暴雨过程,采用“SCS 产流模型+SCS 地貌广义单位线法”为产汇流方案,根据不同情景推求的设计洪水过程线如图 4 所示。情景 1 较历史情景是在产流计算增大了 C_N ,产生的径流量增加,洪峰流量由 $174.6\text{ m}^3/\text{s}$ 增加到 $195.3\text{ m}^3/\text{s}$;情景 2 较历史情景是在汇流计算增大了 C_N 值,峰现时间提前,洪峰流量由 $174.6\text{ m}^3/\text{s}$ 增加到 $187.1\text{ m}^3/\text{s}$,可以看出,产流模型对洪峰增加的贡献程度要稍大于汇流模型;历史情景、情景 3 及情景 4 则是在产汇流计算时将 C_N 逐步递增,随着 C_N 的逐步增大,产流量逐步增加,峰现时间逐步提前,洪峰流量由历史情景的 $174.6\text{ m}^3/\text{s}$ 分别增加到情景 3 的 $209.2\text{ m}^3/\text{s}$ 和情景 4 的 $254.8\text{ m}^3/\text{s}$,因此设计洪峰与 C_N 呈正相关关系,与峰现时间呈负相关关系。

城市化发展伴随着下垫面的不透水化^[34],原有下垫面的产汇流特性将会发生改变,降雨截留与土壤下渗逐渐减少,径流系数逐渐增大,产流量随之增加,地表汇流加快,峰现时间提前,洪峰流量在产汇流对城市化进程的共同响应下增大,可以预测随着未来城市化进程的进一步推进,小流域的防洪风险会进一步加大。

3 结 论

a. 与现行推理公式法和浙江省瞬时单位线法对比,3 种广义单位线方法中,地貌广义单位线法洪峰相对误差最大,SCS 地貌广义单位线法洪峰相对误差最小。SCS 地貌广义单位线法能更好地反映上埠河流域羽毛状水系对设计洪峰的削减作用,在设计洪水计算中表现出一定的适用性,该方法综合了地貌广义单位线法与 SCS 广义单位线法的优点,能够更好地反映小流域地形地貌特征以及土地利用变化的影响,完善了缺资料小流域设计洪水的计算方法。

b. 情景分析表明,随着城市化进程的推进,小流域产流量增加,峰现时间提前,洪峰流量在产汇流对城

表6 上埠河流域 C_N 值变化情景构建

Table 6 Scenario design for C_N value variation in the Shangbu River Watershed

情景	描述
历史情景	1985 年土地利用情景,产汇流计算 C_N 取 63.25
情景 1	产流计算 C_N 取 67.40,汇流计算 C_N 取 63.25
情景 2	产流计算 C_N 取 63.25,汇流计算 C_N 取 67.40
情景 3	2020 年土地利用情景,产汇流计算 C_N 取 67.40
情景 4	未来城市化进程进一步推进,产汇流计算 C_N 取 72.40

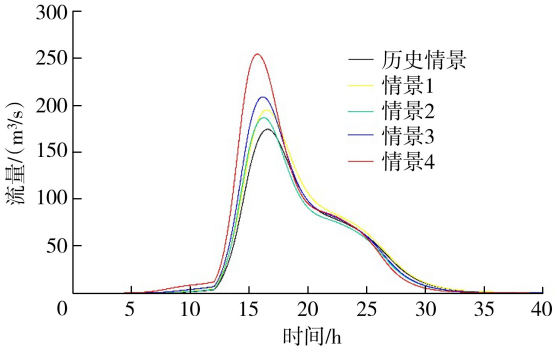


图4 上埠河流域不同情景下设计洪水过程线

Fig. 4 Design flood hydrographs under different scenarios in the Shangbu River Watershed

市化进程的共同响应下明显增大,这强调了应重视城市化进程对小流域防洪风险管理的重要性。

c. 本文提出的 SCS 地貌广义单位线法是一种全新的缺资料小流域设计洪水计算方法,在本文案例中,上埠河上游已建造闲林水库,因此未来仍需选择更多有实测资料的小流域来验证方法的合理性。

参考文献:

[1] HU Yiming, CAO Ziheng, CHEN Yu, et al. Nonstationary multi-site design flood estimation and application to design flood regional composition analysis[J]. Journal of Hydrology, 2024, 638: 131538.

[2] JARAJAPU D C, RATHINASAMY M, AGARWAL A, et al. Design flood estimation using extreme Gradient Boosting-based on Bayesian optimization[J]. Journal of Hydrology, 2022, 613: 128341.

[3] GOSWAMI M. Generating design flood hydrographs by parameterizing the characteristic flood hydrograph at a site using only flow data[J]. Hydrological Sciences Journal, 2022, 67(16): 2505-2523.

[4] 桂海娇, 张翔, 王瑶, 等. 改进的径流系数法在城市小流域设计洪水中的应用研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(8): 978-986. (GUI Haijiao, ZHANG Xiang, WANG Yao, et al. Application of improved runoff coefficient method in design flood of urban small watershed[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(8): 978-986. (in Chinese))

[5] DONG Lijun, DONG Xiaohua, WEI Chong, et al. Recalculating design flood values under nonstationary conditions in the Yalong River Basin, China[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2024, 29(1): 04023043.

[6] 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 Ya'nan, 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))

[7] GRIMALDI S, NARDI F, PISCOPIA R, et al. Continuous hydrologic modelling for design simulation in small and ungauged basins: a step forward and some tests for its practical use[J]. Journal of Hydrology, 2021, 595: 125664.

[8] 刘春果, 喻海军, 吴滨滨, 等. 推理公式法在复杂丘陵地貌设计洪水计算中的适用性分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41(3): 57-60. (LIU Chunguo, YU Haijun, WU Binbin, et al. Applicability analysis of reasoning formula method in design flood calculation of complex hilly landform[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(3): 57-60. (in Chinese))

[9] 王煌, 翟丽妮, 关洪林. 瞬时单位线法在湖北省山洪灾害分析评价中的应用及探索[J]. 中国农村水利水电, 2020(9): 148-151. (WANG Huang, ZHAI Lini, GUAN Honglin. Application and exploration of instantaneous unit hydrograph method in analysis and evaluation of mountain torrents in Hubei Province [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(9): 148-151. (in Chinese))

[10] 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. (in Chinese))

[11] WANG Wei, LIU Jia, LI Chuanzhe, 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.

[12] 芮孝芳. 地貌瞬时单位线研究进展[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 345-350. (RUI Xiaofang. Some advances in geomorphologic instantaneous unit hydrograph theory[J]. Advances in Water Science, 1999, 10(3): 345-350. (in Chinese))

[13] 任宏昌, 张恒德. 郑州“7·20”暴雨的精细化特征及主要成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 1-9. (REN Hongchang, ZHANG Hengde. Refined features and main causes of “7·20” rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5): 1-9. (in Chinese))

[14] 周宏, 刘俊, 丁华凯, 等. 城市有效不透水下垫面及其识别研究进展[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 39-48. (ZHOU Hong, LIU Jun, DING Huakai, et al. Research progress on urban effective impervious surface and its identification[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 39-48. (in Chinese))

[15] 张金良, 罗秋实, 王冰洁, 等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 6-15. (ZHANG Jinliang, LUO Qiushi, WANG Bingjie, et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 6-15. (in Chinese))

[16] 曹雪健, 许金玉, 戚友存. “三道防线”建设赋能城市洪水预报: 内在机理和技术路径[J]. 水利发展研究, 2024, 24(8): 27-30. (CAO Xuejian, XU Jinyu, QI Youcun. “Three lines of defense” empowers urban flood forecasting: mechanisms and approaches[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(8): 27-30. (in Chinese))

[17] GUO Junke. General and analytic unit hydrograph and its applications[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2022, 27(2): 04021046.

[18] GUO Junke. General unit hydrograph from Chow's linear theory of hydrologic systems and its applications[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2022,27(10):04022020.

[19] GUO Junke. Application of general unit hydrograph model for baseflow separation from rainfall and streamflow data[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2022,27(11):04022027.

[20] GUO Junke. Design hydrographs in small watersheds from general unit hydrograph model and NRCS-NOAA rainfall distributions[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2023,28(5):04023014.

[21] 颜梅春,陈贝贝,李致家,等. 基于土壤地形指数和下垫面水文分区的流域模型参数率定[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(3):197-202. (YAN Meichun,CHEN Beibei,LI Zhijia,et al. Parameter calibration for watershed hydrology model based on soil topography index and hydrological partition of underlying surface[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2015,43(3):197-202. (in Chinese))

[22] 杨子菁,刘攀,王起峰,等. HEC-HMS 模型在不同水文气象分区中的改进[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):26-34. (YANG Zijing,LIU Pan,WANG Qifeng,et al. Application of HEC-HMS model in different hydrometeorological regions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):26-34. (in Chinese))

[23] 邵嘉佳,李彬权,孟健,等. 山区小流域 SCS 广义单位线产汇流模型[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2024,22(3):618-624. (SHAO Jiajia,LI Binqun,MENG Jian,et al. Runoff generation and confluence model coupling SCS-CN and general unit hydrograph for small mountainous watersheds[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2024,22(3):618-624. (in Chinese))

[24] 姜燕,楼章华,曹飞凤,等. 浙江省无资料小流域设计洪水推求方法探讨[J]. 科技通报,2016,32(7):56-61. (JIANG Yan,LOU Zhanghua,CAO Feifeng,et al. Study on the method for design flood calculating in Zhejiang ungauged basins[J]. Bulletin of Science and Technology,2016,32(7):56-61. (in Chinese))

[25] 张建云,何惠. 应用地理信息进行无资料地区流域水文模拟研究[J]. 水科学进展,1998,9(4):345-350. (ZHANG Jianyun,HE Hui. Study on runoff modeling in non data watershed using geo referenced data[J]. Advances in Water Science,1998,9(4):345-350. (in Chinese))

[26] YANG Jie,HUANG Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data,2021,13(8):3907-3925.

[27] 黄志珍,楼峰青,丁伯良,等. 浙江省降水特征及其参数空间变化分析[J]. 水资源保护,2022,38(4):117-123. (HUANG Zhizhen,LOU Fengqing,DING Boliang,et al. Spatial variation analysis of precipitation characteristics and statistical parameters in Zhejiang Province[J]. Water Resources Protection,2022,38(4):117-123. (in Chinese))

[28] 严方家,李琼芳,王燕,等. 镇江市中长历时设计暴雨计算[J]. 水资源保护,2021,37(2):108-111. (YAN Fangjia,LI Qiongfang,WANG Yan,et al. Medium and long duration design rainstorm calculation in Zhenjiang City[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):108-111. (in Chinese))

[29] 冯平,白粟,张婷,等. 径流变异对溱沔河流域水库生态调度的影响[J]. 水资源保护,2023,39(5):99-108. (FENG Ping,BAI Su,ZHANG Ting,et al. Impacts of runoff change on ecological operation of reservoirs in the Hutuo River Basin[J]. Water Resources Protection,2023,39(5):99-108. (in Chinese))

[30] 商守卫,王磊之,王银堂,等. 1960—2019 年成都地区极端降水时空演变特征分析[J]. 水资源保护,2023,39(3):195-204. (SHANG Shouwei,WANG Leizhi,WANG Yintang,et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics of extreme precipitation in Chengdu area from 1960 to 2019[J]. Water Resources Protection,2023,39(3):195-204. (in Chinese))

[31] 徐宗学,班春广,张瑞. 我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征[J]. 水利水电科技进展,2024,44(1):1-8. (XU Zongxue,BAN Chunguang,ZHANG Rui. Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(1):1-8. (in Chinese))

[32] 姚蕾. 缺资料地区产汇流模型研究[D]. 南京:河海大学,2014.

[33] 郝曼秋,常虹,陈高林,等. 滨海山丘区城市小流域设计洪水计算方法研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(5):109-113. (HAO Manqiu,CHANG Hong,CHEN Gaolin,et al. Research on calculation method of design flood in small urbanization basin of coastal mountainous area[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2015,26(5):109-113. (in Chinese))

[34] 司伟,黄思琦,王培霞,等. 富春江水库流域径流变化及其量化归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(3):1-7. (SI Wei,HUANG Siqi,WANG Peixia,et al. Analysis of runoff evolution in Fuchunjiang Reservoir Basin and its quantitative attribution[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(3):1-7. (in Chinese))