

滇池西岸山地区域 SCS-CN 模型优化

李金梅^{1,2,3}, 周京春^{1,2,3}, 王金亮^{1,2,3}

(1.云南师范大学 地理学部, 云南 昆明 650500; 2.云南省高校资源与环境遥感

重点实验室, 云南 昆明 650500; 3.云南省地理空间信息技术工程技术研究中心, 云南 昆明 650500)

摘要: [目的] 模拟计算滇池西岸山洪产流量, 为该区面山截洪设施的修建, 减少山洪灾害和保护滇池水环境提供科学决策的依据。[方法] 基于 SCS-CN 产流模型, 选取昆明滇池西岸山地区域 2019、2020 年的 33 场实测降雨径流数据, 通过坡度结合前期影响雨量对 CN 值进行分级优化设定。采用穷举法对 λ 进行优化取值。再以 2021 年的 19 场实测降雨径流数据验证优化 SCS-CN 模型的模拟精度及其参数适用性。[结果] ①采用坡度及前期影响雨量分级优化得到的 CN 值仅适用于降雨量 < 30 mm 的中小型降雨; 对于降雨量 ≥ 30 mm 的强降雨, 需根据场次降雨前 5 d 的降雨总量采用线性内插法对标准 SCS-CN 模型中 AMC 等级进行修改, 再确定对应的坡度 CN 修正值。②适合滇池西岸山地区域中小型降雨和强降雨的最佳初损系数 λ 值分别为 0.15、0.2。③经验证, 中小型降雨和强降雨下的 NSE 值分别为 0.852 2、0.797 8, 模型合格率分别为 93.33% 和 75%。[结论] 优化的 SCS-CN 模型用于滇池西岸山地区域 < 30 mm 的中小型降雨和 ≥ 30 mm 的强降雨情况下的产流计算是可行的, 可为该区地表径流预测及 SCS-CN 模型的进一步优化提供科学依据和理论参考。

关键词: 山洪; 地表径流; SCS-CN 模型; 径流曲线数 CN; 初损系数 λ

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)03-0139-09

中图分类号: P333.1, P334, P338

文献参数: 李金梅, 周京春, 王金亮. 滇池西岸山地区域 SCS-CN 模型优化[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 139-147, 158. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230525.001; Li Jinmei, Zhou Jingchun, Wang Jinliang. Optimization of SCS-CN model in a mountainous area on west bank of Dianchi Lake [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 139-147, 158.

Optimization of SCS-CN Model in a Mountainous Area on West Bank of Dianchi Lake

Li Jinmei^{1,2,3}, Zhou Jingchun^{1,2,3}, Wang Jinliang^{1,2,3}

(1. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China;

2. Key Laboratory of Resources and Environmental Remote Sensing for Universities in Yunnan, Kunming, Yunnan 650500, China; 3. Center for Geospatial Information Engineering and Technology of Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: [Objective] The mountain flood runoff on the west bank of Dianchi Lake was simulated and calculated in order to provide a scientific basis for constructing flood interception facilities, reducing mountain flood disasters, and protecting the water environment of Dianchi Lake. [Methods] We used the SCS-CN runoff model with 33 field-measured rainfall-runoff datasets for the mountainous area on the west bank of Dianchi Lake in Kunming City in 2019 and 2020. The curve number (CN) value was optimized and set according to the slope combined with previous rainfall. The initial abstraction coefficient (λ) was optimized by the exhaust method. Simulation accuracy and parameter applicability for the optimized SCS-CN model were verified by 19 field-measured rainfall-runoff datasets in 2021. [Results] ① The CN value obtained by the slope and previous rainfall classification optimization was only suitable for small and medium rainfall amounts (< 30 mm). For heavy rainfall (≥ 30 mm), the antecedent moisture condition (AMC) in the standard SCS-CN model should be modified by linear interpolation according to the total rainfall amount in the previous five days, and then

收稿日期: 2022-08-12

修回日期: 2022-10-12

资助项目: 国家重点研发计划政府间/港澳台重点专项项目“利用地理空间技术监测和评估土地利用/土地覆被变化对区域生态安全的影响”(2018YFE0184300)

第一作者: 李金梅(1997—), 女(汉族), 云南省楚雄市人, 硕士研究生, 研究方向为流域水文与遥感应用。Email: 2582358217@qq.com。

通信作者: 周京春(1972—), 女(汉族), 河北省新城县人, 博士, 教授, 主要从事空间信息服务和工程测量工作。Email: 1325539082@qq.com。

the corresponding slope CN correction value should be determined. ② The optimal λ values for small and medium rainfall events and for heavy rainfall events in the mountainous area on the west bank of Dianchi Lake were 0.15 and 0.20, respectively. ③ The NSE values after model verification for small and medium rainfall and for heavy rainfall were 0.852 2 and 0.797 8, respectively, and the model accuracy rates were 93.33% and 75%, respectively. [Conclusion] The optimized SCS-CN model was considered to be feasible for calculating runoff under the conditions of small and medium rainfall (< 30 mm) and heavy rainfall (≥ 30 mm) in the mountainous area on the west bank of Dianchi Lake, and therefore can provide a scientific basis and theoretical reference for the prediction of surface runoff and the further optimization of the SCS-CN model in this area.

Keywords: mountain flood; surface runoff; SCS-CN model; runoff curve number (CN); initial abstraction coefficient λ

山洪灾害一直是雨期灾害防治的关注重点,因其突发性、破坏性及成因未知性和复杂性导致及时准确预报预警难^[1],常造成巨大的人员伤亡和经济损失,目前已成为中国各城市经济发展所面临的严峻问题之一^[2]。昆明市滇池西岸地区多中高山体、地形地势复杂且坡度较大,同时受季风气候影响,雨季降雨强度大且集中,使得山洪灾害爆发频繁,且该区防洪截污系统不完善,蓄滞能力差,雨季大量雨污混流水携带着泥沙,翻过截污口,溢流至滇池,对滇池水环境带来了极为不利的影晌^[3]。因此,开展滇池西岸山地区域的地表径流预测研究具有重要意义。

地表径流预测常用的方法是水文模型,例如 SHE 模型、SWAT 模型和新安江模型等^[4],但这些模型都存在着因参数多且获取困难而无法准确预测的问题。美国农业部水土保持局在 1954 年提出的 SCS-CN 模型因其基本假设合理、所需参数少且容易获取而被广泛应用于小流域地表径流预测^[5],但该模型具有较强的区域相关性,需要根据特定区域的下垫面情况和气候条件来优化调整其参数径流曲线数 CN 和初损系数 λ ,才能达到所要求的预测精度。国内外关于 CN 值的优化研究大致可分为两类:①通过实测降雨径流数据求取 CN 值,如 Tomazse 等^[6]和 Hawkins 等^[7]采用渐进线法来求取 CN 值,随后 Soulis^[8]用多维群组方法改进了 CN 值渐进线法;符素华等^[9]采用平均值法等 5 种方法来反推北京地区的 CN 值,其中算术平均值法的模拟结果最好。②通过土壤含水量、坡度和降雨强度等因素来优化 CN 值,如罗棉心^[5]通过实测每场降雨前的土壤含水量推导出 CN 值随土壤含水量依次增加的规律;Huang Mingbin 等^[10]通过在黄土高原地区建立坡度与 CN 的关系式,改进了 Williams 的 CN 坡度修正法^[11],得到了适用于该区降雨径流的 Huang Mingbin 坡度修正公式;范彩霞^[12]利用降雨强度来优化羊坊闸流域不同土地利用方式下的 CN 值。同时,标准 SCS-CN

模型将初损系数 λ 值定为 0.2,但在实际应用中可以发现 λ 取值具有明显的区域差异性,如 Shi Zhihua 等^[13]、Woodward 等^[14]分别在中国三峡地区和美国 307 个径流区域的研究表明, λ 取值为 0.05 的模型预测精度要高于 λ 取值为 0.2 的模型;陈正维等^[15]在紫色土坡地产生流中发现 λ 取值 0.2 仅适用于中小降雨情况,对于强降雨(≥ 50 mm)的情况 λ 取值应为 0.3。因此,有很多学者对初损系数 λ 进行了修正,如徐赞等^[16]使用反算法和粒子群算法分别优化了 λ 参数;周淑梅等^[17]采用反算法和事件分析法确定了黄土丘陵沟壑区的 λ 值。

目前针对 SCS-CN 模型参数 CN 和 λ 的取值优化大多只考虑一种因素进行研究,但降雨径流过程受多种因素的共同影响,综合多种影响因子来优化改进模型参数才是科学合理的。本文以昆明滇池西岸山地区域为研究区,基于 2019 年、2020 年 5—9 月的实测降雨径流数据,综合考虑坡度、前期影响雨量、土地利用类型、土壤类型等因素多级优化设置 CN 参数值,并在此基础上采用穷举法确定研究区的最佳初损系数 λ 值,建立适用于该区的优化 SCS-CN 模型,再以 2021 年的降雨径流实测数据检验优化 SCS-CN 模型的参数适用性及模型模拟精度,据此对研究区的山洪产流量进行模拟计算,为该区面山截洪设施的修建,减少山洪灾害和保护滇池水环境提供科学决策的依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

滇池西岸山地区域($24^{\circ}45' - 25^{\circ}05'N, 102^{\circ}31' - 102^{\circ}40'E$)位于昆明市西南端(图 1),地处云贵高原,地势大致呈现中间高两侧低的趋势,流域面积约为 285.5 km^2 。该区的气候属于亚热带高原季风气候,其年平均气温和年平均降雨量分别为 15°C 和

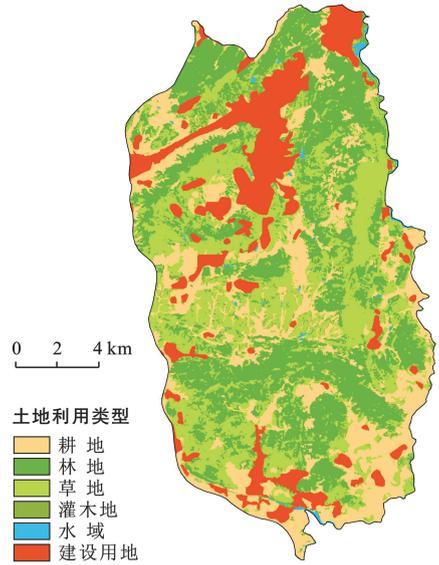
1 035 mm,降水主要集中在 5—10 月^[18],雨季多为大雨和暴雨。

1.2 数据来源

研究所用到的基本数据情况见表 1。利用 ArcGIS提取的研究区土地利用类型和水文土壤类型分布情况分别见图 2 和图 3,其中图 3 是根据 SCS-CN 模型土壤分类标准,结合土壤最小下渗率和土壤质地确定(见表 2)。

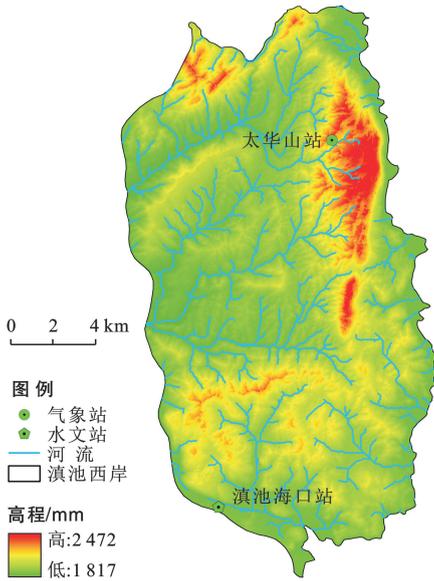
1.3 研究方法

1.3.1 SCS-CN 模型原理 SCS-CN 模型是根据水量平衡方程〔见公式(3)〕和两个基本假设方程建立的经验模型^[15,19],第一个基本假设是:流域实际地表径流深(Q)与流域可能潜在最大径流深($P - I_a$)的比值等于实际入渗量(F)与流域潜在最大蓄水能力(S)的比值〔见公式(1)〕;第 2 个基本假设是:初损量(I_a)与流域潜在最大蓄水能力(S)存在一定的比例关系,见公式(2)。



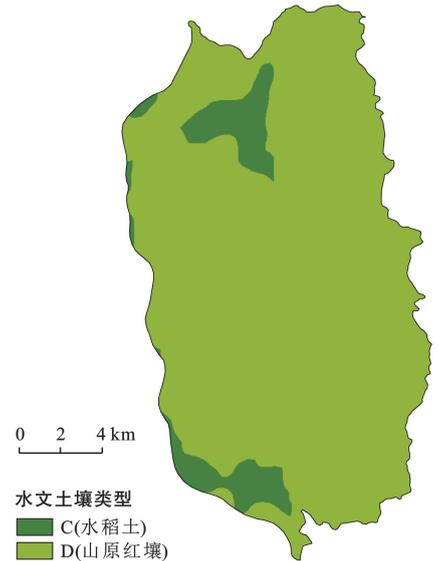
注:本图源于 GlobeLand 30,并基于自然资源部标准地图服务系统 GS(2019)1822 号标准地图校准制作。

图 2 滇池西岸山地区域土地利用类型分布
Fig.2 Distribution of land use types in mountainous area on western bank of Dianchi Lake



注:本图源于 ALOS-12.5 m DEM,并基于自然资源部标准地图服务系统 GS(2019)1822 号标准地图校准制作。

图 1 滇池西岸山地区域地理概况
Fig.1 Geography of mountainous region on west bank of Dianchi Lake



注:本图源于 30 m 的土壤类型分布数据,并基于自然资源部标准地图服务系统 GS(2019)1822 号标准地图校准制作。

图 3 滇池西岸山地区域水文土壤类型分布
Fig.3 Distribution of hydrological soil types in mountainous area on west bank of Dianchi Lake

表 1 滇池西岸山地区域基本数据

Table 1 Basic data of mountainous area on west bank of Dianchi Lake

类别	名称	数据来源	用途
DEM 数据	ALOS-12.5 m	NASA EARTHDATA	研究区流域的提取以及计算不同土地利用类型下的平均坡度
降雨径流数据	太华山站、滇池海口站、昆明站、蔡家村站、中和站、白邑站	地理遥感生态网	用于 SCS-CN 模型中 CN 和 λ 参数的优化及验证分析
土地利用数据	GlobeLand30	http://www.globallandcover.com/	提取研究区土地利用类型
土壤数据	30 m 的土壤类型分布数据	地理遥感生态网	提取研究区土壤类型

表 2 滇池西岸山地区域水文土壤类型

Table 2 Hydrological soil types in mountainous area on west bank of Dianchi Lake

水文土壤类型	最小下渗率(mm·h ⁻¹)	土壤质地	土壤类别
C	1.27~<3.81	砂黏壤土	水稻土
D	<1.27	黏壤土、粉砂黏壤土、砂黏土、粉砂黏土	山原红壤

两个基本假设方程:

$$\frac{Q}{P-Ia} = \frac{F}{S} \quad (1)$$

$$Ia = \lambda \times S \quad (2)$$

水量平衡方程:

$$P = Ia + F + Q \quad (3)$$

由式(1)(2)(3)可综合解得 Q 的表达式为:

$$\begin{cases} Q = \frac{(P-\lambda S)^2}{P+(1-\lambda)S} & (P > 0.2S) \\ Q = 0 & (P \leq 0.2S) \end{cases} \quad (4)$$

式中 S 可用 CN 表示为:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (5)$$

式中: P 为流域降雨量(mm); Q 为地表径流深(mm); I_a 为初损量(mm); F 为径流过程中累积下渗量或土壤入渗量,也称后损(mm); S 为流域潜在最大蓄水能力(mm); λ 为初损系数,无量纲; CN 为径流曲线数,无量纲。

CN 由流域内的降雨量、前期土壤湿度(AMC, antecedent moisture condition)、土地利用类型、土壤类型和地形坡度等因素共同决定,取值范围 [0,100]^[15,19]。标准 SCS-CN 模型将水文土壤类型划分为 4 类:A(透水)、B(较透水)、C(较不透水)和 D(不透水),AMC 根据降雨前 5 d 的降雨总量划分为 3 个等级(表 3):干旱(AMC I)、正常(AMC II)和湿润(AMC III),分别对应 CN₁、CN₂ 和 CN₃,其中 CN₁、CN₃ 可由 CN₂ 转换得到,转换公式^[20]见公式(6)~(7)。

表 3 标准 SCS-CN 模型前期土壤湿度(AMC)等级划分

Table 3 Classification of antecedent moisture condition (AMC) of standard SCS-CN model

前期土壤湿润等级	前 5 d 降雨总量/mm		
	植被生长期	植被休眠期	CN 值
AMC I (干旱)	<35.6	<12.7	CN ₁
AMC II (正常)	35.6~53.3	12.7~27.9	CN ₂
AMC III (湿润)	>53.3	>27.9	CN ₃

$$CN_1 = \frac{4.2 \times CN_2}{10 - 0.058 \times CN_2} \quad (6)$$

$$CN_3 = \frac{23 \times CN_2}{10 + 0.13 \times CN_2} \quad (7)$$

1.3.2 SCS-CN 模型优化

(1) 径流曲线数 CN 的优化。首先利用坡度修正 CN 值。标准 SCS-CN 模型中的 CN₂ 值是基于坡度为 5%(缓坡)的条件得到的^[15],未考虑坡度变化对地表径流产生的影响。陈正维等^[15]研究表明径流量随坡度的增大而增大,经坡度修正后的模型预测精度明显提高。研究区坡度在 15°~30°之间的地形比例较大,若不考虑坡度对产流的影响,则会造成径流模拟的不确定性。因此需将该区不同土地利用类型的地块结合土壤类型进行坡度等级划分,并统计每种土地利用类型下的平均坡度和所占面积,采用 Huang^[10,15]坡度修正公式〔见公式(8)〕来修正每种土地利用类型的 CN 值。

$$CN_{2slope} = CN_2 \times \frac{322.79 + 15.63 \times slope}{slope + 323.52} \quad (8)$$

式中:CN_{2slope} 为坡度修正后的 CN₂ 值; CN₂ 为 AMCII 条件下的初始 CN 值; slope 为平均坡度(%)。

其次在坡度修正 CN 的基础上,采用前期影响雨量 P_a^[21] 来确定前期土壤湿润度 AMC。因 AMC 受前期降雨量、蒸发量和径流量的影响而处于不断变化中,且根据美国气候条件提出的以每场降雨前 5 d 的降雨总量来反映 AMC 应用到中国时是有所偏差的。故本文采用公式(9)计算的 P_a 来代替标准 SCS-CN 模型中的前 5 d 降雨总量^[21]。

$$P_{a,t+1} = K(P_{a,t} + P_t) \quad (9)$$

式中:K 为土壤水的日消退系数,无量纲; P_t 为第 t 日的降雨量(mm); P_{a,t}、P_{a,t+1} 分别为第 t 日,t+1 日的前期影响雨量(mm)。

最后结合前期影响雨量 P_a,增加 CN 值的分级^[21]。标准 SCS-CN 模型中的 AMC 只分了 3 个等级,其跳跃性会降低模拟精度。本文根据公式(9)计算的每场降雨的 P_a 值来确定 AMC 等级,并采用线性内插法增加径流曲线数 CN 的分级,以此来减小 CN 值的离散度,提高模型的模拟精度。

(2) 初损系数 λ 的优化。初损系数 λ 的一般取值范围为 [0,0.4],Mockus^[22] 通过大量的实测数据推导出美国地区的最佳初损系数 λ=0.2,但不同区域间存在着地理空间差异,标准值不能满足实际的应用需求。为了进一步提高模型的模拟精度,本文基于前人

的研究^[20,23]将研究区 λ 的变化范围定义在 0.05 ~ 0.38 之间,基于实测降雨径流数据采用穷举法^[23-24]对 λ 进行优化,以 0.05 为步长依次计算变化范围内不同 λ 取值下的模拟径流深,从而推导出适用于研究区的最佳 λ 值。

1.3.3 模型模拟精度评价 采用纳什模型效率系数 NSE、标准均方根误差 NRMSE 以及模型合格率三项指标来评价参数优化后的 SCS-CN 模型的模拟精度。

纳什模型效率系数 NSE (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient) 用来检验水文模型模拟效果的好坏^[24],它反映了模拟径流深值与实测径流深值的线性接近程度。NSE 值的取值范围为 $(-\infty, 1)$, 该值越接近 1, 说明模型的模拟效果越好, 反之越差, $NSE > 0.75$ 时模型的模拟结果为优, 其计算公式见公式 (10)。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{cal_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (10)$$

式中: Q_{obs_i} 为第 i 场降雨的实测径流深 (mm); Q_{cal_i} 为第 i 场降雨的计算径流深 (mm); \bar{Q}_{obs} 为实测径流深的平均值 (mm)。

标准均方根误差 NRMSE 用于衡量模拟计算径流深值与实测径流深值之间的偏差^[24]。NRMSE 值越小代表模型的模拟精度和适用性越好, 反之越差, 其计算方法见公式 (11)。

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{cal_i})^2 \right]}}{\bar{Q}_{obs}} \quad (11)$$

式中: n 代表样本总数; 其他参数说明同公式 (10)。

模型合格率^[24]等于用于模拟径流深与实测径流深绝对误差 ≤ 2 mm 或相对误差 $\leq 30\%$ 的降雨场次占模拟的总降雨场次的百分数。

2 结果与分析

2.1 SCS-CN 模型优化

2.1.1 初始 CN 值的确定 在充分考虑研究区实际情况下, 通过参考美国国家工程手册^[19] 和有关学者^[20,24] 将 SCS-CN 模型用于山地区域所确定的 CN 值, 查得研究区不同土地利用类型—土壤类型下对应的初始 CN 值, 并利用 ArcGIS 统计各用地类型的面积及占比。表 4 给出了 AMC II 条件下研究区的 CN₂ 取值。

表 4 AMC II 条件下滇池西岸山地区域的 CN₂ 取值
Table 4 CN₂ values in mountainous area on the west bank of Dianchi Lake under AMCII conditions

土地利用类型	水土壤类型		土地利用类型 权重/%
	C	D	
耕地	82	85	22.05
林地	73	79	32.81
草地	71	78	28.98
灌木地	77	83	1.26
水域	98	98	0.53
建设用地	83	87	14.37
水土壤类型权重/%	7.66	92.34	100

注: C 为水稻土, D 为山原红壤。下同。

通过各土地利用类型和土壤类型的面积比例将 CN 值加权平均, 见公式 (12), 分别求得 3 种 AMC 等级下全流域的 $CN_1 = 64.34$, $CN_2 = 80.93$, $CN_3 = 90.65$ 。

$$CN = \sum_{i=1}^6 (CN_{C_i} \times A_C + CN_{D_i} \times A_D) A_i \quad (12)$$

式中: CN_{C_i} 和 CN_{D_i} 分别为 C 类土壤和 D 类土壤下 i 类土地利用类型对应的 CN 值; A_C 和 A_D 分别为 C 类土壤和 D 类土壤所占流域面积的百分比; A_i 为 i 类土地利用类型所占流域面积的百分比。

2.1.2 CN 参数的优化

(1) 坡度修正 CN 值。研究区的坡度范围为 $0^\circ \sim 78^\circ$, 根据《土地利用现状调查技术规程》和国际地理学会对于坡度划分标准^[25], 利用 ArcGIS 将该区的坡度划分为 7 个级别: $0^\circ \sim 2^\circ$ (极缓坡), $2^\circ \sim 5^\circ$ (缓坡), $5^\circ \sim 8^\circ$ (中等坡), $8^\circ \sim 15^\circ$ (斜坡), $15^\circ \sim 25^\circ$ (陡坡), $25^\circ \sim 35^\circ$ (急坡), $35^\circ \sim 78^\circ$ (险坡), 并将该区的土地利用类型、土壤类型和重分类的坡度图层进行叠加, 再统计叠加后各用地类型—土壤类型下每级坡度的面积和平均坡度 (表 5), 其中 $8^\circ \sim 15^\circ$ (斜坡) 所占的面积比例最大, 高达 30.23%, 其次是 $15^\circ \sim 25^\circ$ (陡坡) 占比 25.21%, 因此对研究区不同土地利用类型下的 CN 值进行坡度修正是必须的。优化后的 CN₂ 值见表 6。由表 6 可知 CN 值随着坡度的增大而增加, 说明随着坡度的增大会导致坡向势能增加^[15], 使地表径流水的流速增大, 水流入渗时间缩短, 入渗量减少, 最终使地表径流深随之增加。

(2) 结合前期影响雨量增加 CN 分级。由云南省暴雨洪水查算实用手册 1992 年版 (正式版) 得出研究区的流域蓄水量 W_m 值为 100 mm, 流域消退系数 K 按不同月份来取值, 5 月至 9 月的 K 值分别为 0.9, 0.92, 0.94, 0.95, 0.96, P_a 均从降雨前 15 d 开始计算, 其初始值根据前 5 d 降雨总量来设置, 把前 5 d 的降雨总量分为 < 41 mm, $41 \sim 80$ mm 和 > 80 mm 3 种情

况, P_a 的初始值分别设置为 0, 50, 100 mm。通过 P_a 来确定 AMC 时, P_a 值若按表 3 所示数值划分, 则查得的 CN 值会偏大或偏小, 导致模拟的径流深与实测值偏差较大。为了缩小各级别之间的差距, 本文采用

线性内插来增加 CN 分级, 因 $P_a \leq W_m$, 其取值范围为 [0, 100], 根据多次试验对比发现将 P_a 分为 10 个级别进行 CN 取值, 径流深模拟值更接近于实测值, 据此结合 P_a 再次修正坡度修正后的 CN 值, 结果见表 7。

表 5 滇池西岸山地区土地利用、土壤、坡度组成

Table 5 Regional land use, soil and slope composition of mountainous area on western bank of Dianchi Lake

坡度/(°)	项目	耕地		林地		草地		灌木地		水域		建设用地	
		C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D
0~2	面积/hm ²	52.38	533.61	6.3	93.06	11.97	145.71	3.15	16.65	0.81	57.33	133.65	329.13
	平均坡度/(°)	1.31	1.39	1.35	1.61	1.53	1.84	1.25	1.49	1.84	0.52	1.36	1.41
2~5	面积/hm ²	167.22	1629.72	30.87	365.85	50.58	818.28	8.28	53.82	1.62	38.88	425.88	1130.76
	平均坡度/(°)	3.33	3.42	3.69	4.03	3.76	3.94	3.54	3.77	3.74	3.33	3.35	3.46
5~8	面积/hm ²	86.4	1120.86	42.57	621	62.64	1263.06	8.91	59.76	1.44	21.24	206.01	736.83
	平均坡度/(°)	6.38	6.44	6.61	6.93	6.69	6.7	6.62	6.54	5.73	6.31	6.25	6.35
8~15	面积/hm ²	113.94	1660.41	111.15	2725.38	155.07	2828.88	19.35	109.71	1.17	15.39	164.16	727.29
	平均坡度/(°)	10.74	10.91	11.4	11.87	11.26	11.24	11.04	11.2	10.13	10.27	10.49	10.5
15~25	面积/hm ²	35.28	789.21	75.42	3950.46	87.03	1970.91	9.18	59.94	0.09	3.87	36.18	180.36
	平均坡度/(°)	17.58	18.21	18.88	19.23	18.78	18.93	17.26	18.28	16.73	16.76	17.82	17.93
25~35	面积/hm ²	2.43	93.33	29.34	1126.08	31.5	587.52	1.17	6.93	0	0.18	3.06	23.04
	平均坡度/(°)	27.42	27.55	29.02	28.25	28.96	28.76	26.47	28.03	0	24.55	26.5	28.49
35~78	面积/hm ²	0.09	6.12	3.15	192.15	5.13	264.96	0.27	0.72	0	0	0.18	6.12
	平均坡度/(°)	36.13	37.46	37.03	40.59	39.19	44.74	35.14	40.64	0	0	37.91	38.59
面积总和/hm ²		6 291		9 372.78		8 283.24		357.84		142.02		4 102.65	

表 6 滇池西岸山地区域不同坡度等级下的土地利用类型经坡度优化后的 CN₂ 值

Table 6 CN₂ values of land use types under different slope grades in mountainous area on west bank of Dianchi Lake

坡度/(°)	耕地	林地	草地	灌木地	水域	建设用地
0~2	84.63	78.54	77.41	81.95	97.82	85.75
2~5	84.76	78.60	77.66	82.26	98.04	85.94
5~8	85.03	78.87	77.91	82.46	98.27	86.36
8~15	85.35	79.33	78.16	82.65	98.58	86.79
15~25	85.94	79.95	78.73	83.24	99.11	87.40
25~35	86.73	80.58	79.39	83.91	99.80	88.44
35~78	87.70	81.77	81.16	84.18	0	89.82
权重 CN ₂ 值	85.15	79.73	78.38	82.65	98.08	86.30

表 7 滇池西岸山地区域不同土地利用类型 CN 值分级

Table 7 Classification of CN values for different land use types in mountainous area on west bank of Dianchi Lake

AMC	P_a 值	耕地	林地	草地	灌木地	水域	建设用地	流域 CN 值
干旱	0~10	70.67	62.30	60.37	66.68	95.55	72.58	65.28
	11~20	74.29	66.667 5	64.872 5	70.672 5	96.18	76.01	69.36
	21~30	77.91	71.015	69.375	74.665	96.82	79.44	73.44
	31~40	81.53	75.372 5	73.877 5	78.657 5	97.45	82.87	77.52
正常	41~50	85.15	79.73	78.38	82.65	98.08	86.3	81.60
	51~60	86.71	81.794	80.562	84.448	98.3	87.748	83.49
	61~70	88.27	83.858	82.744	86.246	98.52	89.196	85.38
湿润	71~80	89.83	85.922	84.926	88.044	98.73	90.644	87.26
	81~90	91.39	87.986	87.108	89.842	98.94	92.092	89.15
	91~100	92.95	90.05	89.29	91.64	99.16	93.54	91.04

注: P_a 为本次降雨的前期影响雨量。下同。

2.1.3 优化后的 CN 值适用性验证 基于研究区 2019,2020 年典型的 33 场实测降雨径流数据, $\lambda = 0.2$, 分别用标准 SCS-CN 模型以及优化 CN 值后的 SCS-CN 模型进行径流深的模拟计算, 并计算与实测径流深的差值, 结果见图 4。由图 4 可知与标准 SCS-CN 模型相比, 在大部分降雨情况下, 优化 CN 值后的 SCS-CN 模型计算的径流深值与实测径流深值较为接近, 模型合格率由 66.67% 提高到了 75.76%, 因此采用坡度结合前期影响雨量 P_a 增加 CN 分级的方法进行 CN 值优化可以提高 SCS-CN 模型模拟的精度。

但是从图 4 中可以发现有 3 场降雨(20190709, 20200816, 20200817)使用优化 CN 值后的 SCS-CN 模型计算的径流深值与实测径流深值的偏差较大, 分别为 5.53, 4.82, 6.16 mm, 其模拟精度还不如标准 SCS-CN 模型。分析其原因: 这三场降雨事件的降雨量都大于 30 mm, 而降雨量的多少会影响前期土壤湿润程度(AMC), 在前期降水量丰富的情况下, 留在土壤中的水分含量也会增加, 从而使土壤下渗能力变差, 土壤湿润程度就不能达到完全湿润, 因此 CN 值应根据 AMC 等级进行调整。

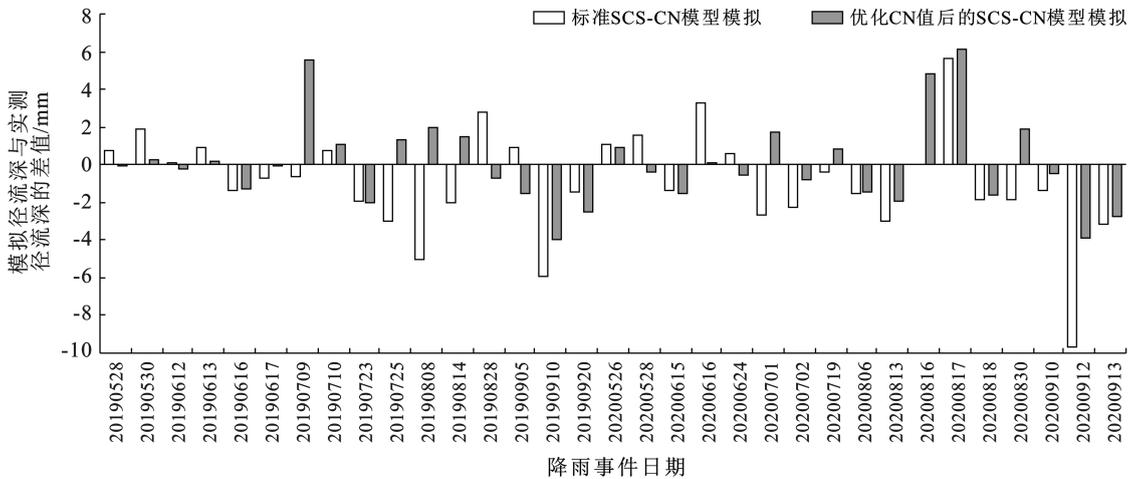


图 4 滇池西岸山地区域模拟径流深与实测径流深差值结果

Fig.4 Results of difference between simulated and measured runoff depths in mountainous area on western bank of Dianchi Lake

据此, 以 30 mm 降雨量为界将研究区的降雨分为中小型降雨和强降雨两个区间, 中小型降雨的 CN 值优化依旧采用坡度结合 P_a 增加 CN 分级的方法。对于 ≥ 30 mm 的强降雨情况, 在考虑坡度因素的基础上, 根据场次降雨前 5 d 的降雨总量采用线性内插法将标准 SCS-CN 模型中 AMC 等级进行适当修改, 在正常和湿润间增加中等湿润一级, 对应的坡度修正 CN 值也增加一级(表 8)。

因本文选用的是 5—9 月的降雨数据, 故只对植被生长期的 AMC 进行修改。采用优化 CN 值后的 SCS-CN 模型重新模拟计算 20190709, 20200816, 20200817 这 3 场降雨的径流深, λ 值仍为 0.2, 计算结果见表 9, 其模拟误差都在 1 mm 以内, 表明模拟的径流与实测径流具有较好的一致性。

表 8 滇池西岸山地区域植被生长期 AMC 的重新划分

Table 8 Vegetation of mountainous area on west bank of Dianchi Lake redistricting of AMC during growing season

前期土壤湿润等级	前 5 d 降雨总量/mm	坡度修正 CN 值
AMC I (干旱)	<35.6	65.28
AMC II (正常)	35.6~71.2	81.60
AMC III (中等湿润)	71.2~100	86.32
AMC IV (完全湿润)	>100	91.04

表 9 滇池西岸山地区域 ≥ 30 mm 降雨量(强降雨)的场次模拟计算径流深结果

Table 9 Runoff depth results of simulation calculation for rainfall (heavy rainfall) of ≥ 30 mm in mountainous area on west bank of Dianchi Lake

降雨事件	降雨量/mm	前 5 d 降雨总量/mm	坡度修正的 CN 值	优化 SCS 模型计算径流深/mm	实测径流深/mm
20190709	39.13	39.37	81.60	9.02	9.09
20200816	32.05	46.62	81.60	5.45	5.01
20200817	31.36	77.51	86.32	8.55	7.37

2.1.4 初损系数 λ 的优化 初损系数 λ 的优化也分为中小型降雨和强降雨两种情况进行。在上述 CN

值优化的基础上,将 2019,2020 年典型的 33 场降雨径流数据分别取 $\lambda = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.38$ 计算径流深,其计算结果的评价指标见表 10—11。结果表明:中小型降雨情况下的 λ 取值为

0.15 时,模型计算的径流深值与实测径流深值最接近,其 $NSE = 0.825 6, NRMSE = 0.456 8$,合格率为 83.33%;而 λ 取值为 0.2 最适合强降雨情况,此时 $NSE = 0.811 3, NRMSE = 0.101 5$,合格率达到 100%。

表 10 滇池西岸山地区域中小型降雨(< 30 mm 降雨量)不同 λ 取值的评价指标

Table 10 Evaluation indexes of small and medium-sized rainfall (rainfall < 30 mm) with different λ values in mountainous area on west bank of Dianchi Lake

项目	λ 取值							
	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.38
NSE	0.623 4	0.781 5	0.825 6	0.790 4	0.674 1	0.413 7	-0.153 5	-0.767 3
NRMSE	0.671 3	0.511 3	0.456 8	0.500 8	0.624 5	0.837 6	1.174 9	1.454 2
合格率/%	70	76.67	83.33	86.67	70	53.33	46.67	43.33

表 11 滇池西岸山地区域强降雨(≥ 30 mm 降雨量)不同 λ 取值的评价指标

Table 11 Evaluation indexes of heavy rainfall (rainfall ≥ 30 mm) with different λ values in mountainous area on west bank of Dianchi Lake

项目	λ 取值							
	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.38
NSE	-7.722 9	-3.130 1	-0.359 0	0.811 3	0.618 7	-0.681 3	-2.816 2	-4.378 7
NRMSE	0.690 2	0.474 9	0.272 4	0.101 5	0.144 3	0.303 0	0.456 5	0.542 0
合格率/%	0	0	66.67	100	100	66.67	0	0

2.2 优化后的模型验证

根据上述得到的 CN 值和 λ 值建立优化的 SCS-CN 模型,将 2021 年 15 场中小型降雨和 4 场强降雨数据代入其中进行径流深的模拟计算,并与实测径流深值作对比验证,结果见图 5—6。可见优化后的 SCS-CN 模型的模拟效果良好,模拟值与实测值的差值基本在 2 mm 以内,经计算得中小型降雨和强降雨的 NSE 值分别为 0.852 2, 0.797 8, NRMSE 值分别为 0.332 9, 0.164 6, 模型合格率分别为 93.33% 和 75%, 表明在总体模拟效果上模拟值与实测值基本吻合。

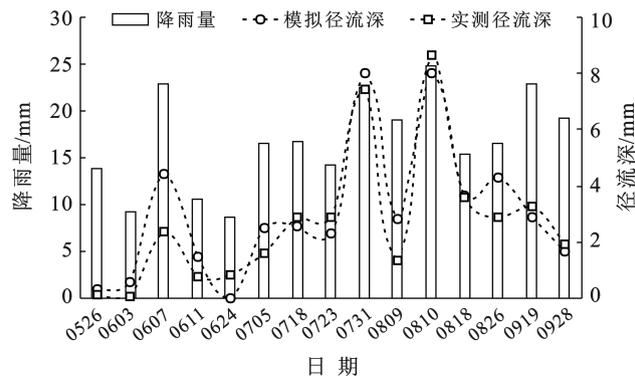


图 5 滇池西岸山地区域 2021 年中小型降雨场次验证期模拟径流深与实测径流深对比

Fig.5 Comparison of simulated runoff depth and measured runoff depth in verification period of small and medium-sized rainfall in mountainous area of western bank of Dianchi Lake in 2021

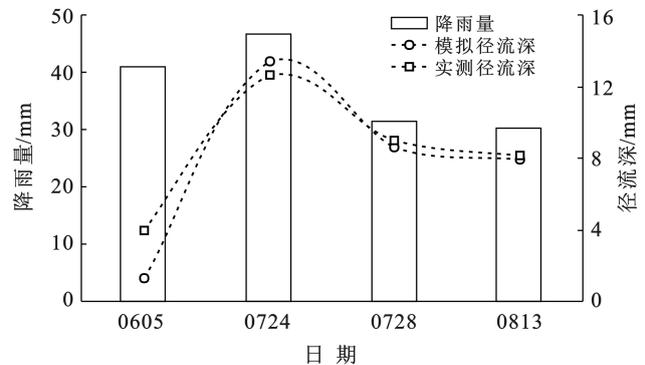


图 6 滇池西岸山地区域 2021 年强降雨场次验证期模拟径流深与实测径流深对比

Fig.6 Comparison of simulated runoff depth and measured runoff depth in verification period of heavy rainfall in mountainous area of western bank of Dianchi Lake in 2021

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 标准 SCS-CN 模型并不适用于滇池西岸山地区域的地表径流预测,且模型参数 CN 和 λ 的取值要分中小型降雨(< 30 mm)和强降雨(≥ 30 mm)两种情况进行优化。采用坡度及前期影响雨量对不同土地利用类型的 CN 值进行分级得到的 CN 优化值仅适用于中小型降雨;对于强降雨需根据场次降雨前 5 d 的降雨总量采用线性内插法将标准 SCS-CN 模型

中 AMC 等级进行适当的修改,再确定对应的坡度 CN 修正值。

(2) 在 CN 值优化基础上,依据 33 场实测降雨径流数据采用穷举法推导出适合滇池西岸山地区域中小型降雨和强降雨的最佳初损系数 λ 分别为 0.15, 0.2, 对应的 NSE 值分别为 0.825 6, 0.811 3, NRMSE 值分别为 0.456 8, 0.101 5, 模型合格率分别达到 83.33% 和 100%。

(3) 由优化后的 CN 值和 λ 值形成的 SCS-CN 模型,经 2021 年的 19 场实测降雨径流数据验证,在中小型降雨和强降雨条件下,计算得到 NSE 值分别为 0.852 2, 0.797 8, NRMSE 值分别为 0.332 9, 0.164 6, 模型合格率分别为 93.33% 和 75%, 表明优化的 SCS-CN 模型用于滇池西岸山地区域的降雨—径流模拟预测计算是可行的。

3.2 讨论

为使 SCS-CN 模型更适用于滇池西岸山地区域, 本文综合考虑了土壤类型、土地利用类型、坡度和前期土壤湿度等因子, 且以 30 mm 降雨量将降雨类型分为中小型降雨和强降雨, 对初损系数 λ 和径流曲线数 CN 进行了优化改进。研究发现按标准模型 CN 值计算的径流深与实测值误差很大, 是由于 CN 参数是基于美国地理条件得出的, CN 值反映下垫面径流产生能力, 较低 CN 值表示较多降雨将贮藏在土壤表面, 较高 CN 值表示较少降雨将贮藏在土壤表面。经坡度修正后的 CN 值随坡度的增加而增加, 且不同坡度等级下的用地类型 CN 值存在: 水域 > 建设用地 > 耕地 > 灌木地 > 林地 > 草地。优化的流域 CN 值与原值相比是有所增大的, 这与符素华等^[26] 的研究结论相同, 优化 CN 值后模型模拟精度要优于标准模型, 说明研究考虑土壤类型、土地利用类型、坡度和前期土壤湿度等来选择 CN 值, 可以降低不精确参数引起的模拟误差。在优化 CN 值的基础上优化 λ , 发现 λ 取值与降雨量有关, 较低 λ 表示较多降雨变成径流, 较高 λ 表示较少降雨变成径流, 中小型降雨和强降雨 λ 值分别取 0.15, 0.2, 这与陈正维等^[15] 的研究结果相似。优化所得 SCS-CN 模型在 33 场降雨条件下模拟的径流值与实测值的偏差较小, 整体效果良好, 显著提高了 NSE 值(0.825 3) 和合格率(84.85%), 降低了 NRMSE 值(0.395 8)。从验证结果来看, 模拟的径流深与实测值具有较好的一致性, 19 场降雨合格率达到 89.47%, 表明模型在参数的确定及优化上是较为合理的, 可以应用于滇池西岸山地区域。

降雨—径流是一个十分复杂的水文过程, 特别是山区的产流会受到各种因素的影响, 例如降雨历时、

降雨强度和植被等也会影响模型中的径流曲线数 CN 和初损系数 λ 的取值; 同时, 本文所选取降雨径流数据的时间序列还较短, 这也在一定程度上影响了模型的模拟精度, 后续还需针对更多的影响因子和更长的时间序列数据展开进一步的研究工作。

[参 考 文 献]

- [1] 李绅东, 宋昭义. 云南省小流域山洪灾害防治非工程措施建设实践[J]. 云南水力发电, 2020, 36(2): 198-201.
- [2] 张永明, 蒲秉华, 王鹏全, 等. 兰州新区 SCS 径流模型改进与应用研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(3): 24-28.
- [3] 许富奎. 昆明市滇池西岸面山洪水拦截工程及水环境综合整治环境影响报告表[EB/OL]. 昆明市西山区人民政府, (2020-09-27)[2022-09-27]. <https://www.kmxs.gov.cn/c/2020-09-27/4534807.shtml>.
- [4] 谷康民, 赵允格, 高丽倩, 等. 黄土高原生物结皮对 SCS-CN 模型初损率的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4186-4194.
- [5] 罗棉心. SCS-CN 模型参数在山地区域径流预测中的优化研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- [6] Kowalik T, Walega A. Estimation of CN parameter for small agricultural watersheds using asymptotic functions [J]. Water, 2015, 7(3): 939-955.
- [7] Hawkins R H. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1993, 119(2): 334-345.
- [8] Soulis K X, Valiantzas J D. SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds—the two-CN system approach [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(153): 1001-1015.
- [9] 符素华, 王向亮, 王红叶, 等. SCS-CN 径流模型中 CN 值确定方法研究[J]. 干旱区地理, 2012, 35(3): 415-421.
- [10] Huang Mingbin, Gallichand J, Wang Zhanli, et al. A modification to the soil conservation service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China [J]. Hydrological Processes, 2006, 20(3): 579-589.
- [11] 徐宗学. 水文模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [12] 范彩霞. 改进径流曲线模型在北京地区小流域地表径流计算中的应用[D]. 河北 邯郸: 河北工程大学, 2019.
- [13] Shi Zhihua, Chen Liding, Fang Nufang, et al. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China [J]. Catena, 2009, 77(1): 1-7.
- [14] Woodward D E, Hawkins R H, Jiang Ruiyun, et al. Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio[C]// World Water & Environmental Resources Congress 2003. Philadelphia, Pennsylvania, USA. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2003: 1-10.

- 化驱动力及分布预测[J].测绘通报,2022(2):83-89.
- [11] 陈心怡,谢跟踪,张金萍.海口市海岸带近 30 年土地利用变化的景观生态风险评价[J].生态学报,2021,41(3):975-986.
- [12] 于航,刘学录,赵天明,等.基于景观格局的祁连山国家公园景观生态风险评价[J].生态科学,2022,41(2):99-107.
- [13] 韩振华,李建东,殷红,等.基于景观格局的辽河三角洲湿地生态安全分析[J].生态环境学报,2010,19(3):701-705.
- [14] Wang Hong, Liu Xingming, Zhao Chuanyan, et al. Spatial-temporal pattern analysis of landscape ecological risk assessment based on land use/land cover change in Baishuijiang National Nature Reserve in Gansu Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021,124:107454.
- [15] Mondal B, Sharma P, Kundu D, et al. Spatio-temporal assessment of landscape ecological risk and associated drivers: A case study of Delhi [J]. *Environment and urbanization Asia*, 2021,12:S85-S106.
- [16] Liu Di, Chen Hai, Zhang Hang, et al. Spatiotemporal evolution of landscape ecological risk based on geomorphological regionalization during 1980—2017: A case study of Shaanxi Province, China [J]. *Sustainability*, 2020,12,941.
- [17] Ai Jingwen, Yu Kunyong, Zeng Zhen, et al. Assessing the dynamic landscape ecological risk and its driving forces in an island city based on optimal spatial scales: Haitan Island, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 137:108771.
- [18] 王洁,摆万奇,田国行.青藏高原景观生态风险的时空特征[J].资源科学,2020,42(9):1739-1749.
- [19] 高彬斌,李琛,吴映梅,等.川滇生态屏障区景观生态风险评价及影响因素[J].应用生态学报,2021,32(5):1603-1613.
- [20] Yang Jie, Huang Xin. 30 m annual land cover and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data Discussions*, 2021,2021:1-29.
- [21] 潘竟虎,刘晓.疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建[J].生态学杂志,2016,35(3):791-799.
- [22] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [23] 曾一笑.基于 CA-Markov 模型和景观格局的生态保护红线评估效果分析[J].测绘通报,2021(S2):244-249.
- [24] 齐麟,许东,朱琪,等.基于 GeoSOS-FLUS 平台的东北森林屏障带生态格局优化[J].生态学杂志,2021,40(11):3448-3462.
- [25] Liang X, Guan Q, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2021,85:101569.
- [26] 王保盛,廖江福,祝薇,等.基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置:以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例[J].生态学报,2019,39(12):4284-4298.
- [27] 胡丰,张艳,郭宇,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J].干旱区地理,2022,45(4):1125-1136.
- [28] 孙定钊,梁友嘉.基于改进 Markov-CA 模型的黄土高原土地利用多情景模拟[J].地球信息科学学报,2021,23(5):825-836.
- [29] 陈理庭,蔡海生,张婷,等.基于 Markov-FLUS 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J].生态学报,2022,42(10):3947-3958.

(上接第 147 页)

- [15] 陈正维,刘兴年,朱波.基于 SCS-CN 模型的紫色土坡地径流预测[J].农业工程学报,2014,30(7):72-81.
- [16] 徐赞,吴磊,吴永祥,等.SCS-CN 模型改进及其径流预测[J].水利水运工程学报,2018(3):32-39.
- [17] 周淑梅,雷廷武.黄土丘陵沟壑区典型小流域 SCS-CN 方法初损率取值研究[J].中国农业科学,2011,44(20):4240-4247.
- [18] 曹言,易琦,王杰,等.滇池流域雨水资源潜力与时空分布特征[J].水资源与水工程学报,2016,27(6):60-66.
- [19] Soil Conservation Service. National engineering handbook (Section 4: hydrology) [R]. Washington D C: US Department of Agriculture Soil Conservation Service, 1972.
- [20] 曹言,王杰,柴素盈,等.昆明市区地表径流影响因子分析[J].水土保持研究,2019,26(2):139-144.
- [21] 栾承梅,梁忠民,仇少鹏,等.山丘区小流域 SCS-Nash 产汇流模型应用[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(2):246-254.
- [22] Mockus V. Estimation of total (and peak rates of) surface runoff for individual storms [M] // Interim Survey Report Grand (Neosho) River Watershed, Exhibit A of Appendix B.U.S. Department of Agriculture C (United States Government Printing Office: Washington, D.C.), 1949:20-25.
- [23] 邓景成,高鹏,穆兴民,等.模拟降雨条件下黄土区 SCS 模型的参数率定[J].水土保持研究,2018,25(5):205-210.
- [24] 张晓涵,桑国庆.SCS-CN 模型在小流域产流计算中的应用[J].人民黄河,2022,44(5):35-39.
- [25] 陈运强,王荣远.土地利用空间格局与坡度坡向的关系[J].测绘与空间地理信息,2015,38(10):171-174.
- [26] 符素华,王红叶,王向亮,等.北京地区径流曲线数模型中的径流曲线数[J].地理研究,2013,32(5):797-807.