

# 黄土高原生物结皮对 SCS-CN 模型初损率的影响

谷康民<sup>1,2</sup> 赵允格<sup>2\*</sup> 高丽倩<sup>2</sup> 杨凯<sup>1,2</sup> 孙会<sup>2,3</sup> 郭雅丽<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; <sup>3</sup>西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 水文模型是水文过程研究的有效工具, 初损率( $\lambda$ )是径流模型 SCS-CN 模型的参数, 对模拟流域水文过程具有重要意义。为了确定生物结皮对 $\lambda$ 的影响, 提高该模型在黄土高原生物结皮广泛分布的退耕地的预测精度, 本研究以陕西省定边县鹰窝山涧流域不同盖度的生物结皮坡面为对象, 采用模拟降雨试验, 分析土壤潜在最大入渗量( $S$ )与实际入渗量( $F$ )的关系, 以及生物结皮盖度对 $\lambda$ 的影响, 并修订了 $\lambda$ ; 在此基础上, 采用陕西省安塞县纸坊沟流域生物结皮径流小区的模拟降雨试验数据校验了参数修订后的模型。结果表明: 生物结皮坡面 $S$ 与 $F$ 的关系式为:  $S/F = 2.5 \times 60/T$  (其中 $T$ 为降雨历时); 模型参数 $\lambda$ 与生物结皮盖度( $C_{BSC}$ )呈极显著负相关关系, 二者关系式为:  $\lambda = 0.0791 \times e^{(-0.015 \times C_{BSC})}$ ,  $R^2 = 0.60$ ; 较 $\lambda$ 取标准值, 依生物结皮盖度修订 $\lambda$ 后, SCS-CN 模型 Nash 效率系数提高 338.7%, 合格率提升 16.1%。研究结果为黄土高原生物结皮坡面 $\lambda$ 的确定提供了科学依据, 对准确评估黄土高原退耕还林(草)工程的水文效应具有重要意义。

**关键词** 生物结皮; 盖度; SCS-CN 模型; 初损率; 径流模型

**Effects of biological soil crusts on the initial abstraction ratio of SCS-CN model in the Loess Plateau.** GU Kang-min<sup>1,2</sup>, ZHAO Yun-ge<sup>2\*</sup>, GAO Li-qian<sup>2</sup>, YANG Kai<sup>1,2</sup>, SUN Hui<sup>2,3</sup>, GUO Ya-li<sup>1,2</sup> (<sup>1</sup>College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>3</sup>College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China).

**Abstract:** Hydrological model is an effective tool for hydrological research. The initial abstraction ratio ( $\lambda$ ) is a key parameter of SCS-CN model, a commonly used runoff model of great significance to simulate the hydrological process at the watershed scale. In order to examine the effects of biological soil crusts (biocrusts) on  $\lambda$  and improve the accuracy of the model used in the restored grasslands where biocrusts widely presented in the Loess Plateau region, we firstly determined the relationship between the amount of the potential maximum infiltration ( $S$ ) and the amount of the actual infiltration ( $F$ ), and then investigated the effects of biocrust coverage on  $\lambda$  by using the simulated rainfall experiment in the Yingwoshanjian watershed in Dingbian County, Shaanxi Province. The revised model was verified by the runoff results of the simulated rainfall experiments in the Zhifanggou watershed in Ansai County, Shaanxi Province. The results showed that the relationship between  $S$  and  $F$  on biocrust slope was described as  $S/F = 2.5 \times 60/T$  (where  $T$  was the rainfall duration). There was a negative correlation between  $\lambda$  and biocrust coverage ( $C_{BSC}$ ) described as  $\lambda = 0.0791 \times e^{(-0.015 \times C_{BSC})}$ ,  $R^2 = 0.60$ . Compared with that using the standard value of  $\lambda$ , the efficiency coefficient of the model was increased by 338.7% and the qualified rate was increased by 16.1% after revising  $\lambda$  according to the biocrust coverage. The results provided a scientific basis for the calibration of  $\lambda$  on biocrust slopes in the Loess Plateau region, and were of great significance to accurately assess the hydrological effects of the implementation of the "Grain for Green" Program on the Loess Plateau.

**Key words:** biological soil crust; coverage; SCS-CN model; initial abstraction ratio; runoff model.

本文由国家自然科学基金重点项目(41830758, 41571268)资助 This work was supported by the Key Project of the National Natural Science Foundation of China (41830758, 41571268)

2021-04-06 Received, 2021-07-23 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyunge@ms.iswc.ac.cn

我国黄土高原大部分地处半干旱气候区,土壤疏松、抗侵蚀性差,加之地形破碎,植被盖度有限,是我国土壤侵蚀与水土流失最严重的区域之一<sup>[1]</sup>。该地区气候易旱,雨季暴雨频发且强度大,降雨引发的径流既是珍贵的水资源,亦是诱发土壤侵蚀的驱动因子<sup>[2]</sup>。因此,通过水文模型准确预测地表径流,对黄土高原水土流失预测预报、洪涝灾害防治及水资源合理利用等均具有重要意义。

水文模型是通过数学方法模拟和预报地表水文过程的重要工具<sup>[3]</sup>。迄今,国内外已开发了多个可用于流域径流预测、洪水预报和水资源管理的水文模型,如新安江模型、TANK 模型和 SWAT 模型等<sup>[3]</sup>。然而,已有水文模型多有区域化、参数过量和参数精度要求高等问题<sup>[4]</sup>,限制了其推广应用。20 世纪 50 年代由原美国农业部水土保持局(USDA-SCS,现为自然资源保护局,NRCS)研发的径流曲线数方法(soil conservation service curve number method,SCS-CN),是估算不同区域给定降雨条件下流域径流量的经验模型。该模型具有结构简单、参数较少、注重反映流域土壤类型、土地利用方式、地表覆被状况及前期土壤湿度等特征<sup>[5]</sup>。有研究表明,SCS-CN 模型适用于无资料地区的地表径流估算,具有较大的应用前景。因此,诸多水文和泥沙模型将其作为模拟地表径流的基础模块<sup>[6]</sup>。

径流曲线数(CN)和初损率( $\lambda$ )是 SCS-CN 模型的重要参数。CN 值作为描述下垫面因素的综合参量,显著影响模型预测精度。目前,国内外学者对 CN 值的率定方法主要包括根据研究流域实测的降雨径流资料计算<sup>[7]</sup>和根据坡度、土壤含水量及蒸散发<sup>[8]</sup>等因素获取两方面。目前,学者们对 CN 值的取值方法未能形成一致的观点,但相关研究均根据针对的研究区域水文特征对 CN 值进行率定,区域化是 CN 值率定研究的重要方向。 $\lambda$  是 SCS-CN 模型在预测地表径流和洪峰流量时的重要参数,对模拟区域水文过程具有重要意义<sup>[9]</sup>。美国国家工程手册第四部分(NEH-4)<sup>[10]</sup>对模型的描述中,将其定义为初损量( $I_a$ )与潜在最大入渗量( $S$ )的比值,是二者线性关系的量化表达,标准值一般为 0.2。然而,诸多研究表明, $\lambda$  取标准值时模型的预测精度不能满足实际需求。1996 年,Ponce 等<sup>[5]</sup>对模型进行了全面论证,提出应将  $\lambda$  作为区域化参数,并对其合理取值。Elhakeem 等<sup>[11]</sup>发现, $I_a$  与  $S$  之间并非简单的线性关系,即  $\lambda$  不是定值。Mishra 等<sup>[12]</sup>分析美国 84 个小流域的降雨事件观测资料发现, $\lambda$  值随流

域的改变而变化,多数流域  $\lambda$  值小于标准值。国内针对 SCS-CN 模型在黄土高原的参数率定研究也有许多。如周淑梅等<sup>[13]</sup>采用反算法和事件分析法率定黄土丘陵沟壑区桥子西沟流域  $\lambda$ ,发现 2 种方法所得  $\lambda$  均低于标准值,确定黄土丘陵沟壑区桥子西沟流域  $\lambda$  为 0.1;邓景成等<sup>[14]</sup>采用穷举法率定了陕西省吴起县杨青川流域草地和裸地最适  $\lambda$  分别为 0.13 和 0.03。以上研究为 SCS-CN 模型在黄土高原地区径流预报的应用推广奠定了坚实基础。然而,目前  $\lambda$  的影响因素尚不明确。以黄土高原为例,迄今已有的  $\lambda$  率定结果运用于不同流域,SCS-CN 模型应用效果仍不理想, $\lambda$  率定研究仍有待深入。

黄土高原实施退耕还林(草)工程以来,生物结皮在该区退耕地广泛发育<sup>[15]</sup>。有研究表明,生物结皮作为黄土高原重要的地表覆盖物,显著影响土壤理化属性<sup>[15]</sup>、地表粗糙度<sup>[16]</sup>及土壤渗透性<sup>[17]</sup>等,是该区退耕地土壤水分入渗和产汇流的关键影响因素<sup>[18]</sup>,进而影响流域乃至区域的水文过程。然而,现有径流模型未考虑生物结皮的影响,对有生物结皮发育的退耕地的径流模拟精准度尚不清楚。为此,谷康民等<sup>[19]</sup>采用模拟降雨试验,研究了生物结皮盖度与 CN 值的关系,发现两者呈极显著负相关关系,根据生物结皮盖度修订 CN 值后的模型较标准模型 Nash 效率系数提高 112.0%,相对误差降低 103.1%。尽管如此,该模型在用于有生物结皮发育的退耕地时仍存在很大的误差。基于已有研究结果,模型拟合出现较大误差与  $\lambda$  选用标准值有关。考虑到生物结皮同时影响地表粗糙度<sup>[16]</sup>和土壤渗透性<sup>[17]</sup>,进而导致  $\lambda$  较标准值出现较大的变异。为此,本研究基于黄土高原自然发育的不同盖度生物结皮坡面上 121 场模拟降雨试验数据,计算不同盖度的生物结皮坡面  $\lambda$ ,解析生物结皮盖度对  $\lambda$  的影响及二者间的量化关系,以期为 SCS-CN 模型在黄土高原有生物结皮发育的坡面应用时  $\lambda$  的确定提供科学依据。本研究对明确黄土高原地区退耕还林(草)生态工程的水文效应具有重要的科学和实际意义。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

本研究分别采用陕西省定边县鹰窝山涧流域和陕西省安塞县纸坊沟流域的模拟降雨试验数据率定 SCS-CN 模型参数  $\lambda$  和校验修订后的模型。

陕西省定边县鹰窝山涧流域(37°34'33" N, 107°91'45" E)位于黄土高原北部,属于温带半干旱

大陆性季风气候,年均气温 7.9 °C,年均降水量 316.9 mm,降雨集中于6—9月,以 1.5 mm·min<sup>-1</sup>的暴雨常见。该区主要植被为:茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、早熟禾(*Poa annua*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza daurica*)、白莲蒿(*Artemisia sacrorum*)和长芒草(*Stipa bungeana*)等。退耕地上生物结皮广泛发育,平均盖度约 70%,类型主要为藻结皮、藓结皮及藻、藓混合结皮,其中,藓结皮优势种主要有土生对齿藓(*Didymodon vinealis*)、扭口藓(*Barbula unguiculata*)及银叶真藓(*Bryum argenteum*)。

陕西省安塞县纸坊沟流域(36° 51' 30" N, 109° 19' 30" E)位于黄土高原中部,属于暖温带半干旱气候,年均气温 8.8 °C,年均降水量 541.2 mm,全年 75%的降水量集中于6—9月,且以短历时的暴雨较为常见。主要植被为:柠条(*Caragana korshinskii*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、白莲蒿和白羊草(*Bothriochloa ischaemun*)等。生物结皮分布较广,平均盖度在 70%~80%,类型主要为藻、藓混合结皮,其中,藓结皮优势种主要有土生对齿藓、扭口藓等。

## 1.2 试验设计

**1.2.1 小区布设** 鹰窝山涧流域试验样地布设于生物结皮自然发育的退耕坡面,坡度 15°。本研究共设计 5 个试验样地,编号 1~5(表 1),并根据各样地实际地表覆被、地形等条件,分别在 1~5 号样地圈建 11、6、6、6 和 12 个径流小区,总计 41 个径流小区,小区规格 10 m×2.1 m。径流小区建成后,齐地表剪去草本植物地上部分。其中,不同盖度的生物结皮小区设 3 个重复,但自然条件下各径流小区的实际地形、地表覆被和土壤条件等均有明显差异,重复之间差异明显。因此,本研究数据分析均采用单个小区进行统计分析,即不同盖度小区无重复。

纸坊沟流域径流小区布设于生物结皮自然发育的退耕撂荒地,小区宽 2 m,分 2 个坡度。其中,坡度为 16°的坡面布设 8 个坡长 6 m 的小区;坡度为

25°的坡面布设 12 个坡长 6 m 的小区及坡长 2、4、8 和 10 m 的小区各 1 个,共 24 个径流小区(表 2)。

**1.2.2 降雨试验设计** 于 2018 年 7 月进行鹰窝山涧流域模拟降雨试验。该试验采用北京易科立德生态环境科技有限责任公司研发的 EL-RS3/5 模拟降雨系统,雨强为 90 mm·h<sup>-1</sup>,设计 40 和 60 min 的降雨历时,用于计算不同降雨历时条件下同一径流小区 λ,检验 λ 率定方法的可行性。每个径流小区分别进行 2 种历时的降雨试验各 1 次,总降雨 82 场。

降雨试验开始前,使用塑料布遮盖径流小区,进行预降雨,以检验模拟降雨系统是否正常工作并率定雨强至设计雨强。当雨强达到设计值时,撤走覆盖的塑料布,模拟降雨试验开始,使用秒表记录降雨历时。当坡面开始产流,且出水口有连续水流出时,视为坡面开始产流。此时刻记作初始产流时间。坡面产流后,在出水口每 3 min 收集径流并记录径流量。

于 2015 年 7 月进行纸坊沟流域模拟降雨试验。采用中国科学院水土保持研究所研制的侧喷式野外人工降雨装置,降雨历时 20 min,雨强为 60、90 和 120 mm·h<sup>-1</sup>,3 种雨强条件分别进行 9、24 和 6 场降雨试验,每个径流小区进行 1 次降雨试验,总降雨 39 场。此流域降雨试验的雨强、降雨历时与鹰窝山涧流域均有差异,且降雨条件更为复杂,可较好的对参数修定后的模型进行校验。模拟降雨操作同鹰窝山涧流域模拟降雨试验。

## 1.3 测定指标与方法

1)生物结皮盖度:25 点样方法;2)生物结皮厚度:游标卡尺多点测定取平均值;3)土壤容重:环刀法;4)生物结皮层容重:涂膜法;5)地表粗糙度:链条法;6)植被冠层盖度:目估法;7)初始产流时间:将降雨正式开始到坡面整体产流,且出水口有连续径流流出的时间记作初始产流时间;8)径流量:坡面初始产流时开始每 3 min 收集径流,直至降雨结束,所收集的径流记作径流量;9)径流深:根据

表 1 鹰窝山涧流域样地情况

Table 1 Overview of plots in Yingwoshanjan watershed

样地编号 Plot number	生物结皮盖度 Biocrust coverage (%)	生物结皮厚度 Biocrust thickness (mm)	土壤容重 Soil bulk density (g·cm <sup>-3</sup> )	生物结皮层容重 Biocrust bulk density (g·cm <sup>-3</sup> )	地表粗糙度 Surface roughness (%)
样地 1 Plot 1	62.6±5.1	5.23±0.44	1.32±0.06	1.08±0.17	1.3±0.2
样地 2 Plot 2	85.2±3.2	8.10±1.91	1.28±0.03	0.96±0.38	2.2±0.2
样地 3 Plot 3	78.2±1.7	12.64±1.47	1.28±0.05	0.97±0.05	1.4±0.1
样地 4 Plot 4	69.7±7.6	12.13±0.98	1.30±0.05	0.98±0.06	1.4±0.1
样地 5 Plot 5	30.0±15.2	8.39±0.60	1.56±0.28	1.07±0.17	1.3±0.2

表 2 纸坊沟流域样地情况

Table 2 Overview of sample plot in Zhifanggou watershed

坡长 Slope length (m)	坡度 Slope gradient (°)	生物结皮盖度 Biocrust coverage (%)	植被冠层盖度 Vegetation canopy coverage (%)
2	25	64.3	60
4		69.7	50
8		77.8	60
10		72.3	55
6		0	40
		0	40
		0	40
		72.2	60
		73.2	40
		74.8	35
		76.2	50
		78.4	40
		81.3	60
		81.9	30
		82.7	50
		86.8	35
	16	0	30
		65.7	60
		71.9	50
		83.9	50
		85.2	40
		85.8	50
		86.7	25
		87.5	40

各径流小区径流量与小区投影面积之比,得到各场降雨径流深。

#### 1.4 SCS-CN 模型与参数率定

##### 1.4.1 SCS-CN 模型介绍 SCS-CN 模型基本假设为:

$$F/S = Q/(P - I_a) \quad (1)$$

$$\lambda = I_a/S \quad (2)$$

式中:  $F$  为雨后实际入渗量 (mm);  $S$  为土壤潜在最大入渗量 (mm);  $Q$  为径流深 (mm);  $P$  为总降雨量 (mm);  $I_a$  为初损量 (mm);  $\lambda$  为初损率。

水分平衡方程如下:

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

联立公式 (1)、(3), 得到 SCS-CN 模型径流深表达式:

$$Q = (P - I_a)^2 / (P - I_a + S) \quad (P > I_a) \quad (4)$$

$$Q = 0 \quad (P \leq I_a) \quad (5)$$

$S$  与 CN 的表达式为:

$$S = 25400 / CN - 254 \quad (6)$$

CN 综合反映了下垫面土壤类型、土地利用方式及前期土壤湿度 (AMC)。SCS-CN 模型根据土壤最小下渗率将土壤类型分为 A、B、C、D 组, 最小下渗

率依次减小, 分别为  $>7.26$ 、 $3.81 \sim 7.26$ 、 $1.27 \sim 3.81$  和  $0 \sim 1.27 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。前期土壤湿度根据前期降水指数 (API) 确定, 分为 AMC I、AMC II 和 AMC III, 分别对应干旱、正常和湿润 3 种土壤湿度状态。

1.4.2  $\lambda$  的率定  $I_a$  与  $S$  的比值为初损率 ( $\lambda$ )。  $S$  主要受前期土壤含水量、土壤质地和土壤孔隙等因素的影响。因鹰窝山涧流域的模拟降雨试验中各径流小区地形相近, 模拟降雨试验中去除高等植物地上部分, 故地表填洼和植物冠层截留造成的水分损失基本一致, 各径流小区  $I_a$  的区别主要体现在降雨前期水分入渗。据此, 本研究将  $I_a$  简化为降雨开始至地表径流形成前的降雨量, 即:

$$I_a = R \times T_0 \quad (7)$$

式中:  $R$  为降雨强度 ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ );  $T_0$  为初始产流时间 (min)。

初始含水量<sup>[20]</sup>、总孔隙度、非毛管孔隙度、容重<sup>[21]</sup>和土壤有机质<sup>[22]</sup>等通过影响初始入渗速率和稳定入渗速率等因素, 进而影响土壤水分入渗。在 SCS-CN 模型中体现为对  $F$  和  $S$  形成影响。尽管土壤属性的差异导致水分入渗的不同, 但理论上若降雨历时足够长, 土壤最终均会达到水分饱和状态, 即降雨历时足够长,  $F$  终将等于  $S$ 。因此, 本研究假定  $S$  与  $F$  之间存在一个比例, 用  $\alpha$  表示, 即:

$$S/F = \alpha \quad (8)$$

$\alpha$  与降雨历时有关, 基于纸坊沟流域和鹰窝山涧流域模拟降雨试验数据分析确定。为获得可信的比例关系, 本研究采用鹰窝山涧流域和纸坊沟流域共 121 场模拟降雨试验数据, 在已知  $I_a$ 、 $P$  和  $Q$  的条件下, 根据水量平衡方程, 得到各场降雨  $F$ , 并计算  $S$ 。发现  $\alpha$  与降雨历时 ( $T$ ) 存在以下关系式:

$$\alpha = 2.5 \times (60/T) \quad (9)$$

式中: 数值 2.5 是根据降雨历时为 60 min 时,  $S$  约为  $F$  的 2.5 倍确定;  $60/T$  表示 60 min 与其他降雨历时的比例。因本研究降雨历时均不超过 60 min, 故此公式中  $T \leq 60$ 。

$I_a$  和  $S$  均确定后, 根据公式 (2) 确定  $\lambda$ 。

为对比上述  $\lambda$  率定方法, 本试验同时采用反算法计算  $\lambda$ , 计算公式如下:

$$I_a/S = (2P - Q - \sqrt{Q^2 - 4QS}) / (2S) \quad (10)$$

得到各径流小区  $\lambda$  后, 取中值作为流域  $\lambda$ 。

1.4.3  $\lambda$  率定方法的检验 各径流小区  $S$  为定值,  $I_a$  在地表产流后亦为定值。因此, 地表产流后,  $\lambda$  将不随降雨历时改变。据此, 为检验前述  $\lambda$  率定方法的

可行性,分别采用鹰窝山涧流域模拟降雨试验中历时 40 min 降雨试验的前 20 min 和完整 40 min 的降雨数据,计算各径流小区  $\lambda$ ,通过与降雨历时 60 min 时各径流小区  $\lambda$  对比,利用 Nash 效率系数和均方根误差检验其差异程度,以验证本研究  $\lambda$  率定方法的可行性。

**1.4.4 CN 值的率定** 采用谷康民等<sup>[19]</sup>的研究结果对 CN 值进行率定,计算公式如下:

$$CN = -0.2672 \times C_{\text{BSC}} + 79.0166 \quad (11)$$

式中:  $C_{\text{BSC}}$  为生物结皮盖度(%)。

### 1.5 模型评价方法

为检验 SCS-CN 模型参数修订效果及修订后模型在不同雨强、坡长条件下的预测精度,基于安塞纸坊沟流域模拟降雨径流数据,分别采用标准值、反算法计算和依据生物结皮盖度计算  $\lambda$ ,并采用 Nash 效率系数、均方根误差和合格率对其进行检验。

**Nash 效率系数:** 该方法广泛应用于评价实测径流深与预测径流深的一致性, $E$  值取  $-\infty \sim 1$ , $E=1$  表示模型完全拟合, $E$  值减小,表示模型拟合效率降低, $E \leq 0$  表明实测径流深的平均值优于模型预测值。计算公式如下:

$$E = [1 - \sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{com}})_i^2 / \sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}} - \bar{Q}_{\text{com}})_i^2] \quad (12)$$

式中:  $Q_{\text{obs}}$  为径流深观测值;  $Q_{\text{com}}$  为径流深计算值;  $\bar{Q}_{\text{obs}}$  为径流深观测值的平均值;  $n$  为降雨场次。

**均方根误差(RMSE):** 该方法可反映预测值偏离实测值的程度,能较好地反映模型预测的精准度。RMSE 值越高,模型拟合精度越低;反之则模型拟合精度越高。计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{(1/n) \sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{com}})_i^2} \quad (13)$$

**合格率(QR)及精度等级:** 根据《水文情报预报规范》(GB 22482—2008)<sup>[23]</sup> 中水文模型径流深预报许可误差和预报项目精度评定的相关规定,对模型精度进行评定。径流深预报的许可误差为实测值的 20%,当该值大于 20 mm 时,取 20 mm;当小于 3 mm 时,取 3 mm。当径流深预测值与实测值的误差小于许可误差时,视该次预报合格。合格率(QR,%)计算公式如下:

$$QR = n/m \times 100\% \quad (14)$$

式中:  $n$  为合格预报次数;  $m$  为预报总次数。预报精度按照合格率大小分为 3 个等级:  $QR \geq 85.0\%$ ,

为甲等;  $85.0\% > QR \geq 70.0\%$ ,为乙等;  $70.0\% > QR \geq 60.0\%$ ,为丙等。

### 1.6 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 软件整理、分析数据,采用 SPSS 26.0 软件对  $\lambda$  与生物结皮盖度、厚度等因素和土壤属性进行 Spearman 相关分析。各径流小区不同降雨历时下的  $\lambda$ 、生物结皮盖度与  $\lambda$  的关系、 $\lambda$  不同取值方法及处理条件下模型拟合效果采用 Origin 2019 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 $\lambda$ 率定方法可行性的检验

由图 1 可以看出,降雨历时 20 对比 60 min 条件下,各径流小区  $\lambda$  计算的  $E$  值为 0.72, RMSE 为 0.01;降雨历时 40 对比 60 min 条件下,各小区  $\lambda$  计算的  $E$  值为 0.94, RMSE 为 0.00。可见,不同降雨历时条件下,各小区  $\lambda$  计算结果虽有偏差,但整体效果较好,表明此方法可用来率定  $\lambda$ 。

### 2.2 生物结皮对 $\lambda$ 的影响

鹰窝山涧流域 41 场历时 60 min 的模拟降雨试验中,各径流小区  $\lambda$  的整体趋势是随生物结皮盖度增加而减小,最低(8.5%)和最高(89.6%)生物结皮盖度径流小区的  $\lambda$  分别为 0.09 和 0.02,与最低生物结皮盖度小区相比,最高盖度生物结皮径流小区的  $\lambda$  减小 77.8%。在生物结皮盖度 30.0% 左右之前,

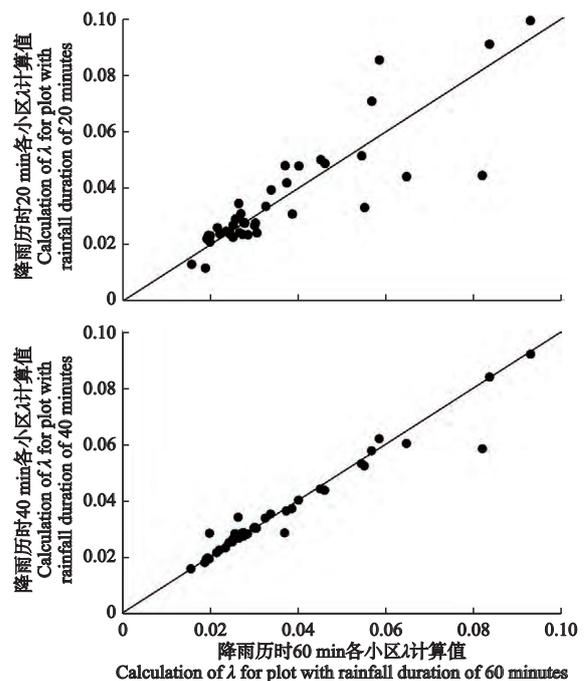


图 1 不同降雨历时条件下各径流小区的  $\lambda$  值  
Fig.1  $\lambda$  value of runoff plots under different rainfall durations.

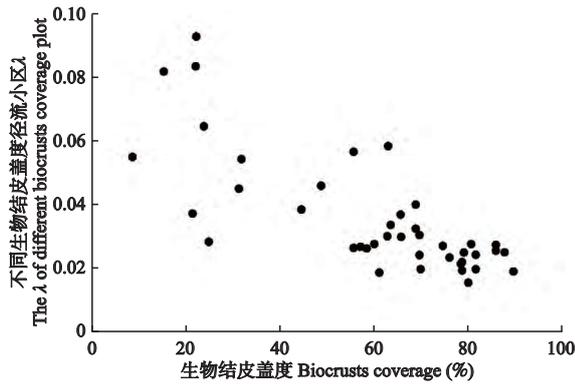


图 2 不同生物结皮盖度径流小区的  $\lambda$  值  
 Fig.2  $\lambda$  value of runoff plot with different biocrusts coverage.

$\lambda$  随生物结皮盖度增加而急剧减小,生物结皮盖度超过 30.0%后, $\lambda$  随生物结皮盖度增加呈较缓慢的降低趋势(图 2)。

2.3 生物结皮盖度对  $\lambda$  的影响

由表 3 可以看出, $\lambda$  与生物结皮盖度呈极显著负相关关系,相关系数为-0.74,与生物结皮厚度显著相关,与其他因素的相关性不显著。可见,生物结皮对  $\lambda$  作用的最主要因素是生物结皮盖度。生物结皮盖度和厚度均属生物结皮属性,考虑到修订后 SCS-CN 模型获取生物结皮盖度参数较厚度参数更便捷,故本研究重点分析生物结皮盖度对参数  $\lambda$  的影响。

生物结皮盖度与  $\lambda$  的关系式为:

$$\lambda = 0.0791 \times e^{(-0.015 \times C_{BSC})} \quad (R^2 = 0.60)$$

2.4 SCS-CN 模型校验

$\lambda$  采用标准值,SCS-CN 模型  $E$  值为 -0.21, RMSE 为 3.32, QR 为 66.7%, 预报精度为丙等(图 3a)。 $\lambda$  根据反算法计算并取中值,SCS-CN 模型  $E$  值为 0.28, RMSE 为 2.55, QR 为 79.5%, 预报精度为乙等(图 3b)。根据生物结皮盖度计算各径流小区  $\lambda$ , SCS-CN 模型  $E$  值为 0.51, RMSE 为 2.11, QR 为 79.5%, 预报精度为乙等(图 3c)。根据生物结皮盖度计算  $\lambda$  模型拟合效果更优,较  $\lambda$  取标准值,SCS-CN

表 3  $\lambda$  与生物结皮、土壤物理属性等因素的相关系数  
 Table 3 Correlation coefficients between  $\lambda$  and biocrust and soil physical properties

影响因素 Influencing factor	相关系数 Correlation coefficient
生物结皮盖度 Biocrust coverage	-0.736 **
生物结皮厚度 Biocrust thickness	-0.332 *
结皮层容重 Biocrust bulk density	0.266
土壤容重 Soil bulk density	0.219
地表粗糙度 Surface roughness	-0.063

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ .

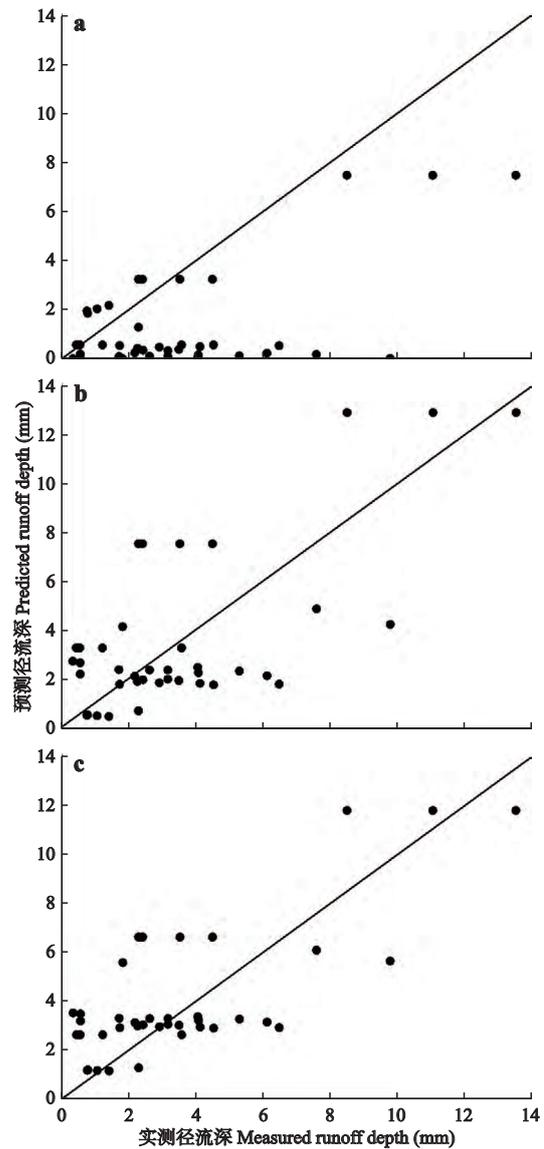


图 3 不同  $\lambda$  取值的模型拟合效果  
 Fig.3 Model fitting effect with different  $\lambda$  values.  
 a)  $\lambda$  为标准值  $\lambda$  was the standard value; b)  $\lambda$  根据反算法计算  $\lambda$  was calculated according to the back calculation method; c)  $\lambda$  根据生物结皮盖度计算  $\lambda$  was calculated according to biocrust coverage.

模型在纸坊沟流域的  $E$  值提高了 338.7%, RMSE 降低了 36.3%, QR 提升 16.1%, 而预报精度则由丙等上升为乙等。依据生物结皮盖度计算  $\lambda$ , SCS-CN 模型的径流估算精度显著提升。

3 讨 论

目前, $\lambda$  率定多采用穷举法和反算法等。穷举法一般对  $\lambda$  设定范围,在设定范围内以一定步长(多以 0.01 为步长)确定  $\lambda$ ,与 CN 值组合运算 SCS-CN 模型,以 Nash 效率系数、均方根误差和相对误差等方法检验模型预测效果,取最优结果确定  $\lambda$ 。该方法在设定  $\lambda$  取值范围时主观性较强,且计算繁

琐,具有一定局限性。反算法可根据已知的降雨-径流资料推算各研究样地的 $\lambda$ ,但该方法仍存在不足。如徐赞等<sup>[24]</sup>采用反算法确定陕西省榆林市绥德韭园沟小流域 $\lambda$ ,较标准 SCS-CN 模型  $E$  值提高 363.3%,但仅为 0.21,不能满足实际需求。本研究推断,因反算法率定 $\lambda$ 时需先确定 CN 值以计算  $S$ ,而一般情况均以 1 个定值给出 CN,故 CN 的取值将可能直接影响 $\lambda$ 的率定结果,进而影响模型拟合精度。周淑梅等<sup>[13]</sup>提出采用反算法计算 $\lambda$ 时,取 CN 为定值,而其研究结果显示,CN 值是变化的,此问题可能导致模型拟合出现较大误差,与本研究观点一致。因此,本研究率定 $\lambda$ 时,尝试以 $I_0$ 作为切入点,通过解析 $S$ 与 $F$ 的关系,进而根据 $F$ 直接获得 $S$ ,在 $\lambda$ 的率定过程中除去模型 CN 值的影响,根据模型定义计算 $\lambda$ ,以此探求提高 SCS-CN 模型拟合精度的方法。本试验根据模型参数 $\lambda$ 的定义对其率定,并分别采用 $\lambda$ 标准值、反算法取各径流小区 $\lambda$ 的中值对比根据生物结皮盖度计算 $\lambda$ 的模型拟合效果。结果表明,率定 $\lambda$ 后 SCS-CN 模型拟合效果均优于 $\lambda$ 取标准值,且根据生物结皮盖度计算 $\lambda$ ,模型拟合效果最佳。有研究提出,运用土壤侵蚀模型时需要考虑生物结皮的影响,本试验所得结果亦发现生物结皮盖度与 $\lambda$ 呈极显著相关,并根据二者间的关系式确定 $\lambda$ 后,提高了 SCS-CN 模型的预测精度,进一步证实了在生物结皮广泛发育的黄土高原运用 SCS-CN 模型时考虑生物结皮影响的必要性。

根据本研究所得 $\lambda$ 与生物结皮盖度的关系式,可知生物结皮坡面 $\lambda$ 值在 0.02~0.08,小于标准值 0.2。这可能与生物结皮对前期水分入渗的影响有关。 $\lambda$ 表征 $I_0$ 对 $S$ 的占比,前期水分入渗是 $I_0$ 的主要组成部分,与饱和导水率、渗透性相关。孙福海等<sup>[25]</sup>在黄土高原六道沟小流域研究了生物结皮覆盖对土壤积水入渗特征的影响,发现生物结皮覆盖降低了土壤入渗速率和饱和导水率。李宁宁等<sup>[26]</sup>在陕西省安塞县南沟小流域研究发现,生物结皮对土壤属性的影响与盖度有关,土壤紧实度、黏结力、团聚体稳定性随生物结皮盖度增加呈增大趋势,饱和导水率呈降低趋势。本研究发现, $\lambda$ 随生物结皮盖度增加而减小,二者之间存在极显著负相关关系。此规律在前人的研究中得到证实。此外,亦可从生物结皮对产流影响的方面分析本研究结论。有研究表明,坡面产流受生物结皮盖度的影响,如杨凯等<sup>[27]</sup>发现,降雨过程的前 15 min,生物结皮促进产流,高盖度生物结皮坡面径流量高于低盖度生物结

皮和裸土坡面径流量,同时,初始产流时间随生物结皮盖度增加而减小。其研究结果可理解为降雨初期,生物结皮抑制水分入渗,从另一个角度证实了本研究结论。有机质含量、土壤容重、孔隙度是土壤入渗的主要影响因素,诸多研究表明,以上因素均受生物结皮影响。此外,秦宁强等<sup>[28]</sup>研究指出,生物结皮的覆盖能降低雨滴动能,保护下层土壤结构。低盖度生物结皮坡面大面积裸露的表土受雨滴击溅的影响,导致土壤孔隙破坏,降低了水分入渗,而高盖度生物结皮覆盖下的情况相反,水分入渗相对稳定。这可能是高盖度生物结皮坡面 $\lambda$ 高于低盖度的重要原因。

为检验其他因素对修订 $\lambda$ 后 SCS-CN 模型预测精度的影响,本研究将纸坊沟流域的降雨数据分别按照不同坡度和植被冠层盖度处理校验模型,坡度设置 16°和 25°,各 11 场降雨。同时,设定植被冠层盖度低于 40.0%为低盖度,高于 40.0%为高盖度,分别各 19 场降雨。不同坡度处理下,模型拟合效果差异较大,25°坡度时模型拟合效果优于安塞纸坊沟流域整体预测效果, $E$  为 0.87, RMSE 为 1.31;16°坡度时模型  $E$  为 -0.50, RMSE 为 2.17(图 4),表明坡度可能是 SCS-CN 模型参数 $\lambda$ 的影响因素。有研究提出, $\lambda$ 值受坡度的影响<sup>[29]</sup>,并确定了其研究流域不同坡度条件下 $\lambda$ 的最适取值。因此,坡度对参数 $\lambda$

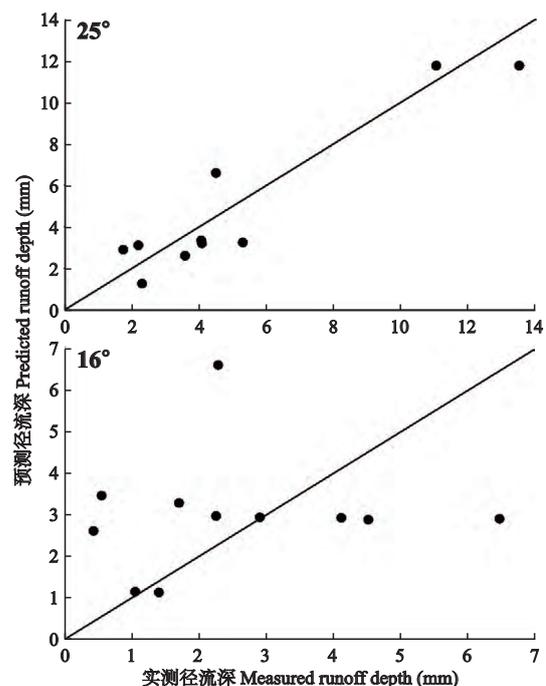


图 4 25°和 16°坡度条件下模型的拟合效果

Fig.4 Fitting effect of the model under the slope conditions of 25° and 16°.

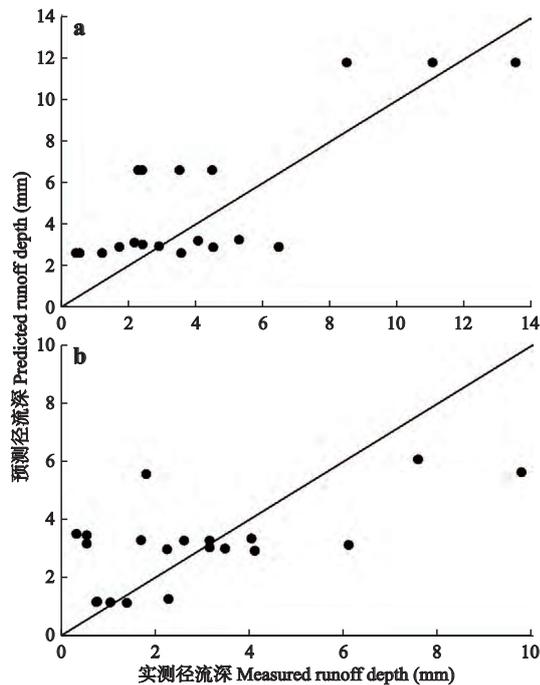


图5 植被冠层低盖度(a)和高盖度(b)条件下模型的拟合效果

Fig.5 Fitting effect of the model under the conditions of low canopy coverage (a) and high canopy coverage (b).

的影响还需要进一步深入。高、低盖度植被冠层模型的  $E$  分别为 0.37 和 0.54, RMSE 分别为 1.93 和 2.29(图 5), 相较于不同坡度处理, 不同植被冠层盖度下模型的拟合效果差异较小, 表明植被冠层盖度对模型参数的影响较小。

本试验通过分析纸坊流域和鹰窝山涧流域的模拟降雨试验的径流数据, 发现  $S$  与  $F$  之间的比值与降雨历时有关。然而, 降雨历时并非二者比值的唯一影响因素, 土壤属性、降雨类型等也会有所影响。本试验设计中, 研究区土壤属性差异较小, 且模拟降雨条件下雨型均匀稳定, 降雨历时不超过 60 min。当土壤属性、雨型发生改变或降雨历时超过 60 min 时, 本试验所得  $S$  与  $F$  关系式的正确性及依据生物结皮盖度计算  $\lambda$  的可行性仍需要进一步验证。此外, 坡度作为影响  $\lambda$  取值的潜在影响因素, 未来需对其进行深入研究, 以期提高 SCS-CN 模型在黄土高原退耕坡地的应用效果。

#### 4 结 论

SCS-CN 模型是目前应用最广泛的径流模型之一, 模型中实际入渗量( $F$ )占潜在最大入渗量( $S$ )的比例与降雨历时( $T$ )有关, 其关系式为:  $S/F = 2.5 \times 60/T$ 。生物结皮盖度是影响 SCS-CN 模型初损率( $\lambda$ )

在生物结皮坡面取值的因素之一。根据生物结皮盖度计算  $\lambda$  较标准值, 显著提高了模型 Nash 效率系数(338.7%)和合格率(16.1%), 降低了均方根误差(36.3%), 模型精度提升为乙等。研究结果为黄土高原生物结皮坡面径流的准确预测奠定了科学基础。

#### 参考文献

- [1] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 等. 黄土高原生态工程的生态成效. 中国科学院院刊, 2017, **32**(1): 11-19 [Liu G-B, Shanguan Z-P, Yao W-Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, **32**(1): 11-19]
- [2] 王占礼, 邵明安, 常庆瑞. 黄土高原降雨因素对土壤侵蚀的影响. 西北农业大学学报, 1998, **26**(4): 101-105 [Wang Z-L, Shao M-A, Chang Q-R. Effects of rainfall factors on soil erosion in Loess Plateau. *Acta Universitatis Agriculturae Boreali-Occidentalis*, 1998, **26**(4): 101-105]
- [3] 陈仁升, 康尔泗, 杨建平, 等. 水文模型研究综述. 中国沙漠, 2003, **23**(3): 15-23 [Chen R-S, Kang E-S, Yang J-P, et al. Research review of hydrological modeling. *Journal of Desert Research*, 2003, **23**(3): 15-23]
- [4] Perrin C, Michel C, Andréassian V. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*, 2001, **242**: 275-301
- [5] Ponce VM, Hawkins RH. Runoff curve number: Has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1996, **1**: 11-19
- [6] Tyagi JV, Mishra SK, Singh R, et al. SCS-CN based time-distributed sediment yield model. *Journal of Hydrology*, 2008, **352**: 388-403
- [7] Deshmukh DS, Chaube UC, Hailu AE, et al. Estimation and comparison of curve numbers based on dynamic land use land cover change, observed rainfall-runoff data and land slope. *Journal of Hydrology*, 2013, **492**: 89-101
- [8] Tessema SM, Lyon SW, Setegn SG, et al. Effects of different retention parameter estimation methods on the prediction of surface runoff using the SCS curve number method. *Water Resources Management*, 2014, **28**: 3241-3254
- [9] Mishra SK, Chaudhary A, Shrestha, et al. Experimental verification of the effect of slope and land use on SCS runoff curve number. *Water Resources Management*, 2014, **28**: 3407-3416
- [10] US Department of Agriculture-Soil Conservation Service. National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. Washington DC, USA: US Department of Agriculture, 1972
- [11] Elhakeem M, Papanicolaou AN. Estimation of the runoff curve number via direct rainfall simulator measurements in the state of Iowa, USA. *Water Resources Management*, 2009, **23**: 2455-2473

- [12] Mishra SK, Sahu RK, Eldho TI, *et al.* An improved  $I_a-S$  relation incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology. *Water Resources Management*, 2006, **20**: 643–660
- [13] 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. *中国农业科学*, 2011, **44**(20): 4240–4247 [Zhou S-M, Lei T-W. Calibration of SCS-CN initial abstraction ratio of a typical small watershed in the Loess Hilly-Gully region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, **44**(20): 4240–4247]
- [14] 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. *水土保持研究*, 2018, **25**(5): 205–210 [Deng J-C, Gao P, Mu X-M, *et al.* Study on calibrating parameters of SCS model in Loess area under simulated rainfall. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, **25**(5): 205–210]
- [15] 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮理化性状初报. *应用生态学报*, 2006, **17**(8): 1429–1434 [Zhao Y-G, Xu M-X, Wang Q-J, *et al.* Physical and chemical properties of soil bio-crust on rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, **17**(8): 1429–1434]
- [16] Rodríguez-Caballero E, Cantón Y, Chamizo S, *et al.* Effects of biological soil crusts on surface roughness and implications for runoff and erosion. *Geomorphology*, 2012, **145/146**: 81–89
- [17] Liu F, Zhang GH, Sun L, *et al.* Effects of biological soil crusts on soil detachment process by overland flow in the Loess Plateau of China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, **41**: 875–883
- [18] Kidron GK, Wang Y, Herzberg M. Exopolysaccharides may increase biocrust rigidity and induce runoff generation. *Journal of Hydrology*, 2020, **588**: 125081
- [19] 谷康民, 杨凯, 赵允格, 等. 黄土丘陵区不同盖度生物结皮对坡面产流及 SCS-CN 模型 CN 值的影响. *水土保持学报*, 2021, **35**(1): 132–137 [Gu K-M, Yang K, Zhao Y-G, *et al.* Effects of biological soil crusts' coverage on slope runoff and the CN value of SCS-CN model in hilly Loess Plateau region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, **35**(1): 132–137]
- [20] Prakash P. Grazing management in temperate grassland of Kumaun Himalaya for soil water conservation. *Journal of Applied and Natural Science*, 2013, **5**: 345–349
- [21] Fischer C, Roscher C, Jensen B, *et al.* How do earthworms, soil texture and plant composition affect infiltration along an experimental plant diversity gradient in grassland? *PLoS One*, 2014, **9**(2): e98987
- [22] 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响. *自然资源学报*, 2006, **21**(3): 441–448 [Zhao Y-G, Xu M-X, Wang Q-J, *et al.* Impact of biological soil crust on soil physical and chemical properties of rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau, China. *Journal of Natural Resources*, 2006, **21**(3): 441–448]
- [23] 水利部水文局. 水文情报预报规范: GB/T 22482—2008. 北京: 中国标准出版社, 2000 [Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources. Standard for Hydrologic Information and Hydrological Forecasting: GB/T 22482—2008. Beijing: China Standards Press, 2000]
- [24] 徐赞, 吴磊, 吴永祥, 等. SCS-CN 模型改进及其径流预测. *水利水电工程学报*, 2018(3): 32–39 [Xu Z, Wu L, Wu Y-X, *et al.* Improvement and runoff prediction of SCS-CN model. *Hydro-science and Engineering*, 2018(3): 32–39]
- [25] 孙福海, 肖波, 张鑫鑫, 等. 黄土高原生物结皮覆盖对土壤积水入渗特征的影响及其模型模拟. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2020, **48**(10): 82–91 [Sun F-H, Xiao B, Zhang X-X, *et al.* Effects of biocrusts covering on soil water infiltration characteristics on the Loess Plateau and its simulation. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science*, 2020, **48**(10): 82–91]
- [26] 李宁宁, 张光辉, 王浩, 等. 黄土丘陵沟壑区生物结皮对土壤抗蚀性能的影响. *中国水土保持科学*, 2020, **18**(1): 42–48 [Li N-N, Zhang G-H, Wang H, *et al.* Soil anti-erodibility influenced by biological crusts in Loess Hilly and Gully region. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, **18**(1): 42–48]
- [27] 杨凯, 赵军, 赵允格, 等. 生物结皮坡面不同降雨历时的产流特征. *农业工程学报*, 2019, **35**(23): 135–141 [Yang K, Zhao J, Zhao Y-G, *et al.* Characteristics of runoff on biological soil crust slope in different rainfall durations. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(23): 135–141]
- [28] 秦宁强, 赵允格. 生物土壤结皮对雨滴动能的响应及削减作用. *应用生态学报*, 2011, **22**(9): 2259–2264 [Qin N-Q, Zhao Y-G. Responses of biological soil crust to and its relief effect on raindrop kinetic energy. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(9): 2259–2264]
- [29] 张鑫, 张青峰, 周阳阳, 等. 不同坡度黄土微地形条件下 SCS-CN 模型参数研究. *水土保持研究*, 2019, **26**(2): 74–77 [Zhang X, Zhang Q-F, Zhou Y-Y, *et al.* SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data on microtopographic surfaces of different gradient loess slopes. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, **26**(2): 74–77]

作者简介 谷康民, 男, 1993 年生, 硕士研究生。主要从事生物结皮坡面水文效应和坡面径流模型模拟研究。E-mail: 18335464187@163.com

责任编辑 杨弘

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. *应用生态学报*, 2021, **32**(12): 4186–4194  
Gu K-M, Zhao Y-G, Gao L-Q, *et al.* Effects of biological soil crusts on the initial abstraction ratio of SCS-CN model in the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(12): 4186–4194