

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

谷康民^{1,2}, 杨凯^{1,2}, 赵允格², 高丽倩², 孙会^{2,3}, 郭雅丽^{1,2}

(1.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;2.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;3.西北农林科技大学林学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:以黄土丘陵区典型退耕地不同盖度的生物结皮坡面为研究对象,通过野外人工模拟降雨试验,研究不同盖度生物结皮对坡面产流的影响,解析了生物结皮盖度与 SCS—CN 径流模型参数 CN 值的关系。结果表明:(1)在 90 mm/h 雨强条件下,初始产流时间随生物结皮盖度增加而降低,低盖度(0~20%)生物结皮坡面初始产流时间分别为中盖度(40%~60%)和高盖度(80%~100%)的 1.64、2.46 倍;(2)降雨前 15 min,高盖度生物结皮较中、低盖度生物结皮促进产流,15 min 后,高盖度生物结皮较中、低盖度生物结皮抑制产流,降雨 45 min 后各处理小区径流系数趋于稳定;(3)径流深随生物结皮盖度增加呈对数函数降低($y = -13.87 \ln x + 73.515$, $R^2 = 0.7614$);(4)生物结皮盖度(C_{BSC} ,%)与 CN 值呈极显著负相关关系, $CN = -0.2672 \times C_{BSC} + 79.0166$, $R^2 = 0.6800$,通过调整 CN 值可使 SCS—CN 模型适于生物结皮坡面的径流估算。研究结果揭示了生物结皮对 SCS—CN 径流模型参数 CN 值的影响,对建立考虑生物结皮的水文模型奠定了基础。

关键词:生物结皮;径流;径流深;SCS—CN 模型;CN 值

中图分类号:S157.1;S181

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)01-0132-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.019

Effects of Biological Soil Crusts' Coverage on Slope Runoff and the CN Value of SCS—CN Model in Hilly Loess Plateau Region

GU Kangmin^{1,2}, YANG Kai^{1,2}, ZHAO Yunge², GAO Liqian², SUN Hui^{2,3}, GUO Yali^{1,2}

(1.College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University,

Yangling, Shaanxi 712100; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess

Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling,

Shaanxi 712100; 3.College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Runoff yield from revegetated grasslands with different coverage of biocrust was measured by simulating rainfall in the study. Meanwhile, the relationship between biocrust coverage and CN value of SCS—CN model was analyzed. The results showed that: (1) Under a 90 mm/h rainfall intensity, the initial runoff yield time decreased against the increase of biocrust coverage, and the initial runoff time with low biocrust coverage (0~20%) was 1.64 and 2.46 times of that with medium biocrust coverage (40%~60%) and high biocrust coverage (80%~100%), respectively. (2) In the first 15 minutes of rainfall, biocrusts with high coverage promoted runoff yield compared with medium and low biocrust coverage. After 15 minutes, high biocrust coverage inhibited runoff yield compared with medium and low biocrust coverage. After 45 minutes of rainfall, runoff coefficient of each treatment tended to be stable. (3) There was a significant negative correlation between biocrust coverage and runoff depth, and runoff depth decreased in the form of logarithmic function with the increase of biocrust coverage ($y = -13.87 \ln x + 73.515$, $R^2 = 0.7614$). (4) By adjusting CN value, SCS—CN model could be suitable for runoff estimation from biocrustal slope, and there was a significant negative correlation between biocrust coverage and CN value, the relational expression is that $CN = -0.2672 \times C_{BSC} + 79.0166$, $R^2 = 0.6800$. In which, C_{BSC} was the percentage coverage of biocrust. In this

收稿日期:2020-08-13

资助项目:国家自然科学基金项目(41830758,41571268)

第一作者:谷康民(1993—),男,在读硕士研究生,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

通信作者:赵允格(1971—),女,研究员,主要从事生物土壤结皮及其生态功能研究。E-mail:zyunge@ms.iswc.ac.cn

study, the influence of biocrust on the parameters of runoff model was revealed, which was of great significance to the establishment of hydrological model considering biological crust.

Keywords: biological soil crust; runoff; runoff depth; SCS-CN model; CN value

黄土高原是世界上水土流失最严重的区域之一,水资源分配不均,水土流失和水资源匮乏是当地生态环境面临的严峻挑战^[1]。地表径流既是重要的水资源,也是土壤侵蚀的主要驱动因子,认识坡面径流过程并预测不同条件下坡面径流量,对保持水土、改善生态环境具有重要意义。水文模型作为一种定量计算地表径流量的数学方法,是区域地表径流预测和研究的重要工具,目前已有多种水文模型,如 SCS-CN 模型、运动波模型和 SWAT 模型等在该区域广泛应用^[2-4]。

20 世纪 50 年代由美国农业部水土保持局开发^[5],并于 80 年代后引入我国的径流曲线法(soil conservation service curve number method, SCS-CN)^[6],是针对定雨强条件下小流域径流预测的经验模型,该模型重视土壤类型、前期水文条件和土地利用方式等下垫面因素对产流的影响,且将诸多复杂的环境因素对产流的影响概化为 1 个综合参量——CN 值,从而简化了模型结构,相比其他模型对降雨观测具有要求较低,所需资料更易获得的优势^[7],更适于在无资料地区的应用^[8]。因此,诸多水文模型如 CREAMS、ANSWERS、AGNPS、EPIC 模型以及国内外广泛应用的 SWAT 模型都将 SCS-CN 模型作为模拟地表径流的基础模块^[9]。CN 值是模型中的重要参数,早期研究^[10]发现,CN 值变化 $\pm 10\%$ 可引起预测径流量 $-45\% \sim 55\%$ 的变化;国内也有研究^[9]证明,该模型对 CN 值的准确性要求很高。所以,针对模型参数改进的研究中十分注重对 CN 值的率定。如张秀英等^[2]研究 SCS-CN 模型在黄土高原的适用性时发现,CN 值与降雨量存在 95% 以上的相关,并提出利用降雨量推算 CN 值的方法;王白陆^[11]在模型中加入相关变量和比例放大系数以改进模型参数,结果表明,模型计算精度得到明显提高;刘贤赵等^[12]基于土地利用、土壤类型和流域水文、气象资料等数据,利用 SCS-CN 模型对王东沟流域径流进行模拟,结果表明,模拟精度在 75% 以上,证明了该模型在黄土高原的适用性。迄今,对模型中 CN 值的率定研究仍在不断推进。徐赞等^[13]在模型中加入雨强修正函数,改进后模型效率系数 E 提高了 534%,决定系数 R^2 提高了 101%。在此基础上,邓景成等^[14]运用穷举法对参数率定,得到黄土区草地 CN 值的最适取值(65),以上研究为 SCS-CN 模型在黄土高原坡面产流预测预报的应用奠定了坚实基础。

生物土壤结皮(biological soil crusts,简称生物结皮),指由隐花植物如蓝藻、地衣、苔藓类和土壤中微生物以及其他生物体通过菌丝体、假根系和分泌物等与土壤表层颗粒胶结形成的复杂复合体^[15],是干旱、半干旱地区普遍存在的地被物^[16]。生物结皮在土壤表层成为一种特殊的下垫面,显著影响表层土壤理化属性^[17]、表面糙度^[18]和水分渗透性^[19],进而影响坡面产汇流^[20],是区域水文过程不可忽略的影响因素^[21]。Greene 等^[22]研究认为,生物结皮能够改善土壤结构,促进水分入渗,从而抑制坡面产流;Zhao 等^[23]采用放水试验的方法,研究了生物结皮对坡面产流的影响发现,与没有生物结皮的坡面相比,生物结皮增加 10%~15% 的径流量。生物结皮对坡面产流影响的成果^[20-23]已有许多,但生物结皮盖度与产流量之间的关系鲜见报道。水文模型是认识坡面产流规律和预测坡面径流的重要工具,但目前的水文模型,如 SCS-CN 模型、运动波模型、SWAT 模型等对生物结皮考虑不足,已有模型对生物结皮广泛发育的退耕地坡面产流预测的准确性尚不清楚,探明生物结皮对 SCS-CN 模型参数 CN 值的影响,提高 SCS-CN 模型在生物结皮坡面上预测径流的精准度,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。

为此,本文以黄土丘陵区退耕地不同盖度的生物结皮坡面为研究对象,采用人工模拟降雨手段,研究了 90 mm/h 雨强下不同盖度生物结皮对坡面产流的影响,并基于降雨—径流观测资料,反算了不同盖度生物结皮坡面 CN 值,解析了生物结皮盖度与 CN 值的量化关系,为 SCS-CN 模型在黄土丘陵区有生物结皮发育的坡面上应用时,参数的率定及预测精度的提高提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省榆林市定边县杨井镇(107° 51'45"E, 37°34'33"N),该区属温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温 7.9 °C,年平均降水量 316.9 mm,年平均蒸发量 2 490 mm。夏季暴雨频发,根据该区气象观测资料,雨强为 90 mm/h 的暴雨较为常见,且降雨历时多在 1 h 之内。杨井镇位于黄土丘陵区,土壤是由黄土母质发育形成的黄绵土,土层深厚。近年来,由于退耕还林(草)工程的实施和城镇化的推进,该区产生了大面积的退耕地,主要分布在远离村

镇的陡坡山地。本试验依据前期地表覆盖调查,选取生物结皮及植被均具有代表性的退耕地作为试验样地。研究区退耕地主要植被为达乌里胡枝子(*Lespedeza daurica*)、早熟禾(*Poa annua*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum ledeb*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、赖草(*Leymus secalinus*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等。研究区退耕地生物结皮平均盖度为 60%~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*)。

表 1 样地地表概况

指标	低盖度 生物结皮	中低盖度 生物结皮	中盖度 生物结皮	中高盖度 生物结皮	高盖度 生物结皮
藻、藓混合生物结皮盖度/%	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
前期体积含水量/%	14.78±0.56	16.31±0.22	13.24±1.03	11.89±0.62	8.81±0.43
生物结皮厚度/mm	12.67±2.01	13.13±0.14	7.76±0.41	9.46±1.22	9.39±1.21
粗糙度/cm	1.05±0.03	1.37±0.09	1.18±0.10	1.39±0.06	2.18±0.18
生物结皮层容重/(g·cm ⁻³)	11.82±0.54	12.72±0.78	1.06±0.05	1.01±0.05	0.98±0.17
结皮下层容重/(g·cm ⁻³)	1.37±0.01	1.31±0.03	1.30±0.03	1.33±0.01	1.29±0.01
饱和导水率/(mm·min ⁻¹)	0.36±0.01	0.46±0.05	0.41±0.07	0.42±0.04	0.32±0.04
有机质含量/(g·kg ⁻¹)	15.56±1.73	17.12±1.18	15.77±0.88	20.00±1.25	21.57±4.16

注:表中数据为平均值±标准差。

1.2.2 模拟降雨试验设计及实施 采用人工模拟降雨系统(EL-RS3/5,北京易科立德生态环境科技有限责任公司),该系统参照美国国家土壤侵蚀实验室人工模拟降雨装置,采用单种喷头、槽式间歇降雨结构,通过控制喷头的摆动频率、输水管道流量、供水压力及喷头开关,实现不同雨强、不同历时的人工模拟降雨过程。为控制雨强影响,将雨强统一设定为 90 mm/h。开始试验前,用遮雨布遮盖地表,率定降雨器雨强至目标雨强后正式开始降雨试验并计时,降雨历时 1 h。

1.2.3 SCS-CN 模型基本原理 SCS-CN 模型的提出最早追溯到 Ponce 等^[5]提出的假设方程,而后 Bough-ton^[10]指出早期模型未考虑初损量 I_a (降雨径流产生前的截留、填洼、渗透等),基于此认识,得到公式:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P_a} \tag{1}$$

式中: F 为次降雨实际损失量(mm); S 为潜在最大损失量(mm); Q 为次降雨径流量(mm); P_a 为有效降雨量(mm)。

基于水量平衡方程:

$$P = I_a + F + Q \tag{2}$$

联立公式(1)、公式(2)得到 SCS-CN 模型的数学表达:

$$Q = (P - I_a)^2 / (P - I_a + S) \tag{3}$$

1.2 试验设计及小区布设

1.2.1 试验设计 为了探明降雨条件下生物结皮盖度对坡面产流的影响,于 2018 年 7—9 月在研究区采用模拟降雨试验的方法,研究了不同盖度自然发育的生物结皮对坡面产流过程的影响。试验采用人工模拟降雨系统进行,雨强设为 90 mm/h。生物结皮盖度范围约为 10%~90%。径流小区面积 10.0 m×2.1 m,坡度 15°。试验小区用 1.5 mm 厚度的钢板围建,共 30 个。小区围建完成后,用剪刀除去维管植物地上部分以消除其对试验的影响。试验样地地表覆盖及土壤基本理化属性见表 1。

为简化模型参数,Mockus 根据大量降雨—径流资料,推导出 $I_a = 0.2S$,代入公式(3),得到 SCS-CN 模型经典表达式:

$$Q = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) \quad P > 0.2S \tag{4}$$

$$Q = 0 \quad P \leq 0.2S \tag{5}$$

由公式(4)、公式(5)可反推得到:

$$S = 5(P + 2Q - \sqrt{4Q^2 + 5PQ}) \tag{6}$$

$$CN = 25400 / 254 + S \tag{7}$$

根据公式(6)、公式(7)计算不同生物结皮盖度试验小区的实际 CN 值。

1.3 观测指标与方法

测定指标及方法为:(1)生物结皮盖度,采用 25 点样方法测定,样方规格 25 cm×25 cm,将样方随机置于地面,记录样方内生物结皮、植物根基、枯落物和裸土等出现的频次,以生物结皮频次占总调查数的百分比作为其盖度。同一试验小区重复测定 10 次,计算平均值。(2)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做初始产流时间。(3)径流量,坡面初始产流时开始收集径流,直至降雨结束所收集的径流记做径流量。(4)径流深是坡面薄层水流的水动力学特征之一,易受下垫面状况、地表覆盖以及降雨的影响,且野外试验条件有限,难以直接测定,故使用各试验小区径流量,除以小区投影面积,得到试验小区坡面径流深^[24]。

1.4 模型评价及数据处理

1.4.1 Nash 效率系数 常用于水文模型的评判指标, E 值变化范围 $-\infty \sim 1$, E 值越趋近 0, 表明预测径流深越接近平均实测径流深。 E 值越接近 1, 表明计算径流深与实测径流深越匹配。计算公式为:

$$E=1-\frac{\sum_{i=1}^n(Q_i-\hat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^n(Q_i-Q_c)^2} \quad (8)$$

式中: Q_i 为第 i 场降雨实测径流深(mm); $\hat{Q}_i$ 为第 i 场降雨计算径流深(mm); Q_c 为所有实测径流深的平均值(mm); n 为总降雨次数。

1.4.2 相对误差 r 可用于对模拟径流量的评价, r 值越小, 表明拟合精度越高, 且 r 值为正, 表示计算值高于实测值, 反之, 则计算值低于实测值。计算公式为:

$$r=\frac{\sum \hat{Q}_i-\sum Q_i}{\sum Q_i} \times 100 \% \quad (9)$$

式中: $\hat{Q}_i$ 为第 i 场降雨计算径流深(mm); Q_i 为第 i 场降雨实测径流深(mm)。

1.5 统计分析

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件整理、分析数据, 对坡面径流深和 CN 值与生物结皮盖度分别进行 Spearman 和 Pearson 相关性分析。不同生物结皮盖度条件下径流量、产流过程、初始产流时间以及与径流深和 CN 值关系采用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 生物结皮盖度对坡面产流的影响

为了明确生物结皮盖度对坡面产流的影响, 选取低、中、高盖度的生物结皮小区, 分析生物结皮盖度对初始产流时间、产流过程以及径流量的影响。通过分析 3 个不同盖度生物结皮坡面初始产流时间发现, 初始产流时间随生物结皮盖度增加而减少, 平均初始产流时间从小到大依次为高盖度生物结皮 2.8 min, 中盖度生物结皮 4.2 min, 低盖度生物结皮 6.9 min, 3 个不同生物结皮盖度条件下初始产流时间差异显著 ($P<0.05$)。低盖度生物结皮坡面初始产流时间分别是中盖度和高盖度生物结皮的 1.64, 2.46 倍。生物结皮盖度与初始产流时间的 Spearman 相关分析显示, 生物结皮盖度与初始产流时间呈显著负相关关系 ($R^2=0.694\ 0, P<0.01$); 而对生物结皮厚度、前期土壤含水量和粗糙度与产流特征参数的相关性分析发现其相关性均不显著。

图 1 为不同盖度生物结皮小区的径流系数在降雨过程中的变化过程。不同处理坡面的径流系数在初始产流时由小到大依次为低盖度生物结皮 0.04, 高盖度生物结皮 0.05, 中盖度生物结皮 0.06。不同盖度处理下, 其径流系数均随降雨历时的增加而增加, 而

后趋于稳定。其中低盖度生物结皮坡面初始的径流系数低于其他 2 个处理, 随着降雨历时的增加, 其径流系数分别在 13, 16 min 时超过高盖度和中盖度生物结皮, 并持续增加, 最终在 50 min 时基本稳定, 其径流系数达到 0.45, 分别为中盖度和高盖度生物结皮稳定后的 1.5, 2.8 倍。高盖度生物结皮小区的径流系数最为稳定, 随降雨历时缓慢增加后趋于稳定。中盖度生物结皮小区的径流系数增长幅度介于低盖度和高盖度生物结皮之间, 且其径流系数始终高于高盖度生物结皮。

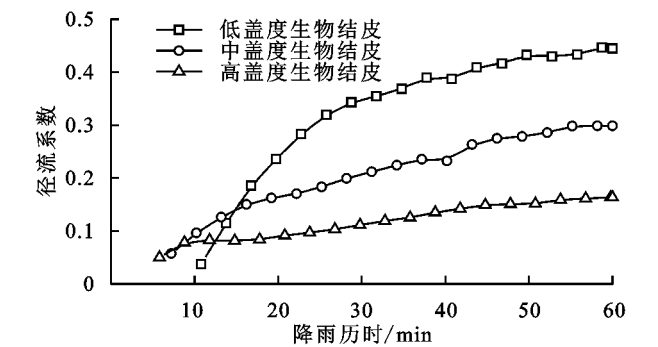


图 2 为降雨试验期间, 低、中、高盖度生物结皮小区的径流量。由图 2 可知, 高盖度生物结皮小区产流最早, 随着降雨过程的推进, 径流量仅缓慢增加, 并在 45 min 时趋于稳定, 总径流量为 204.22 L。中盖度生物结皮小区产流时间略晚于高盖度生物结皮小区, 在降雨过程前 15 min, 产流量均高于低、高盖度生物结皮小区。降雨 15 min 后, 其产流量介于高、低盖度生物结皮小区之间, 且在 45 min 后趋于稳定, 总径流量为 369.09 L。低盖度生物结皮小区最晚开始产流, 产流形成后径流量急剧增长。降雨 30 min 后, 径流量增长变慢, 但增长速率仍高于其他 2 个处理小区, 总径流量为 562.72 L。

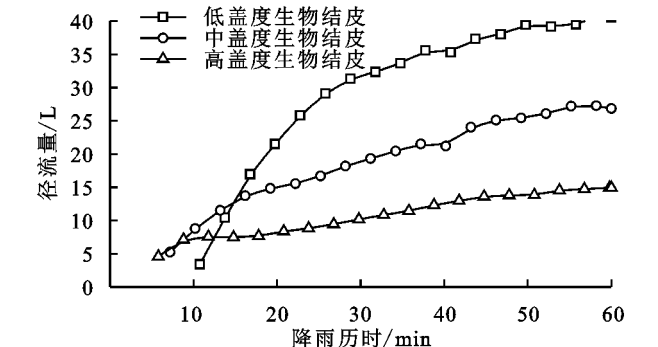


图 2 不同盖度生物结皮坡面径流量

2.2 生物结皮盖度对坡面径流深的影响

为解析生物结皮盖度对坡面径流深的影响, 对 30 场降雨—径流资料进行分析。不同盖度生物结皮坡面径流深随生物结皮盖度增加而产生的变化见图 3。坡面径流深随生物结皮盖度增加呈对数函数减小, 本试验中

生物结皮盖度最低的试验小区径流深达到最高盖度生物结皮试验小区的 9.72 倍。径流深与生物结皮盖度之间的 Spearman 相关性分析结果表明,二者呈显著负相关关系,相关性系数绝对值为 0.761 4 ($P < 0.01$)。

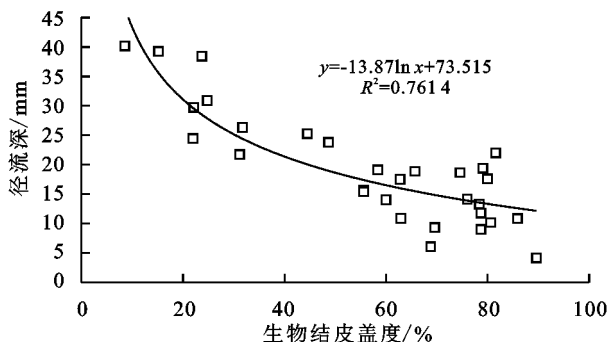


图 3 不同生物结皮盖度条件下径流深

2.3 生物结皮盖度与 CN 值的关系

根据降雨资料和 SCS—CN 模型公式计算得到各小区的反算 CN 值。为解析生物结皮盖度与 CN 值的量化关系,对其进行回归性分析。由图 4 可知,CN 值随生物结皮盖度增加而减小,二者关系为 $CN = -0.2672 \times C_{BSC} + 79.0166$, $R^2 = 0.6800$ (C_{BSC} 为生物结皮盖度,%)。生物结皮盖度与 CN 值的 Pearson 相关分析表明,二者存在极显著负相关关系 ($R^2 = -0.8310$, $P < 0.01$)。

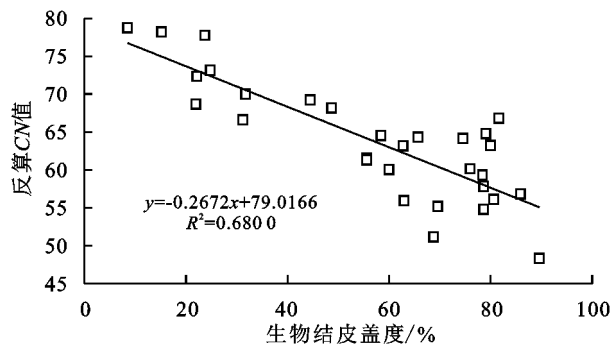


图 4 生物结皮盖度与 CN 值关系

2.4 SCS—CN 模型计算径流深

依据 SCS—CN 模型使用手册中 CN 值的判定方法,即土壤组分类(B类)、前期土壤湿度(AMC I)、土地利用方式(草地)等,选取与本试验样地情况最为接近的 CN 值为 65,运用 SCS—CN 模型对不同生物结皮盖度的 30 个试验小区径流深进行计算,得到全部试验小区径流深均为 19.68 mm,计算得到模型 Nash 效率系数为 -0.005 7,平均相对误差 r 为 55.55%。根据生物结皮盖度推算得到 CN 值,代入 SCS—CN 模型计算径流深,模型 Nash 效率系数达到 0.636 6,较模型修正前提高 112%;相对误差 r 达到 27.35%,较模型修正前降低 103.11%。

3 讨论

生物结皮是黄土丘陵区退耕地广泛发育的地被

物,显著影响入渗和产流等水文过程。目前,针对生物结皮坡面产流的研究,多关注其对径流量的影响,在产流过程与机理方面仍鲜见报道。因此,本文从初始产流时间、产流过程及径流量等方面,研究了生物结皮盖度对坡面产流的影响。结果表明,坡面初始产流时间随生物结皮盖度增加而降低,与前人^[25]研究结论类似,这可能与生物结皮的发育改变了土壤质地^[16]、有机质含量^[26]以及微生物数量^[27],进而改变其斥水性有关。生物结皮对产流过程的影响因盖度而异,初始产流形成后,低盖度的生物结皮坡面产流量迅速上升,产流曲线平均斜率最大,分别为中盖度和高盖度试验小区的 2.3、3.7 倍,这可能与藓结皮增大地表粗糙度有关,随着生物结皮盖度的增加,地表粗糙度有增大的趋势,可导致水流阻力变大^[18],抑制坡面产流;另外,有研究^[20]指出,结皮生物能够吸收自身体积 3~13 倍的水分,进而抑制坡面产流。同时,径流量随生物结皮盖度增加呈降低趋势。生物结皮盖度与径流深的 Spearman 相关性分析结果显示,盖度与径流深存在显著负相关关系,随着生物结皮盖度的增加,坡面径流量呈对数函数减少。本文研究结果与 Loope 等^[28]认为,生物结皮能抑制产流的结论一致,这可能与生物结皮对下层土壤结构的改善有关^[29];同时也有研究^[30]发现,随着退耕时间的延长,生物结皮覆盖的退耕地入渗速率增加,提出生物结皮能够促进入渗的观点。除此之外,对生物结皮层容重、结皮下层容重、饱和导水率及有机质含量等土壤理化属性与径流深进行 Pearson 相关性分析显示,径流深与生物结皮层容重显著相关,与其他理化属性相关性较弱或不相关。这可能是随着生物结皮的发育,结皮层容重显著降低,孔隙度增大,促进水分入渗,进而抑制坡面产流。但也有研究^[31]与本文结果相反,认为生物结皮能促进产流。这可能与降雨历时的差异有关。前期研究^[25]发现,以裸土为对照,降雨前 15 min 高盖度生物结皮促进产流,降雨 30 min 时各处理产流率差异不显著,降雨历时超过 45 min,生物结皮抑制产流。此结果较好地解释了生物结皮对产流影响的分歧。基于上述结论,本试验降雨历时 1 h,得到生物结皮抑制产流的结果是合理的。

本研究结果发现,生物结皮盖度与径流深存在显著负相关关系,而且生物结皮盖度与 CN 值的 Pearson 相关分析结果也表明二者存在显著负相关关系,表明在生物结皮坡面运用 SCS—CN 模型时应考虑生物结皮的影响。然而,目前在黄土丘陵区广泛应用的 SCS—CN 模型中并未考虑生物结皮的影响,很可能导致该模型在该地区的生物结皮坡面上运用时,预测精度低于无结皮坡面。采用考虑生物结皮盖度的

CN 值,运用 SCS-CN 模型预测不同盖度生物结皮坡面径流深,较修正前模型 Nash 效率系数提高 112%,相对误差降低 103.11%,证明了考虑生物结皮影响后可显著提高 SCS-CN 模型的精准度。

值得注意的是,SCS-CN 模型多用于流域尺度的径流量估算^[32],但坡面尺度是流域尺度的基本组成单元,以本试验运用原有的 SCS-CN 模型估算结果看,该模型在坡面尺度已产生较大误差,有理由推测在流域尺度上可能会产生更大误差。此外,已有研究^[11]表明,在黄土高原运用 SCS-CN 模型时,需对模型参数进行率定,同时有学者^[33]在运用土壤侵蚀模型时提出需要考虑生物结皮的影响。因此,在生物结皮坡面运用 SCS-CN 模型时,未考虑生物结皮因素的影响,很可能是造成模型预测精度不高的重要因素。

本文从初始产流时间、径流系数以及径流量等产流特征参数的角度出发,研究了生物结皮盖度对坡面产流的影响,同时证明在生物结皮坡面运用 SCS-CN 模型时考虑生物结皮因素的必要性,并将生物结皮盖度对坡面产流的影响量化于参数 CN 值上,进而提高 SCS-CN 模型在生物结皮坡面上的预测精度。除生物结皮盖度外,已有研究^[34-35]将坡度、降雨强度等因素引入 SCS-CN 模型参数率定中,并取得较好的预测效果,本试验中坡度和降雨强度均为定值,当其改变后,本试验得到的结论是否依然适用,还需后续研究进一步验证。

4 结论

(1)在 90 mm/h 的降雨强度下,初始产流时间与生物结皮盖度呈显著负相关,低盖度生物结皮坡面初始产流时间分别是中盖度和高盖度生物结皮的 1.64、2.46 倍。

(2)降雨 45 min 后各处理径流系数趋于稳定,由大到小依次为低盖度、中盖度、高盖度生物结皮小区,证明该雨强降雨超过此时长后,生物结皮抑制坡面产流。

(3)径流深随生物结皮盖度增加呈对数函数减小,生物结皮盖度最低小区的径流深达到生物结皮盖度最高小区的 9.72 倍。

(4)生物结皮盖度与 CN 值呈极显著负相关关系, $CN = -0.2672 \times C_{BSC} + 79.0166$, $P = 0$,证明生物结皮盖度是 CN 值的影响因素,未来在生物结皮坡面运用 SCS-CN 模型时需考虑生物结皮对其参数的影响。

参考文献:

[1] 王占礼,靳雪艳,马春艳,等.黄土坡面降雨产流产沙过程及其响应关系研究[J].水土保持学报,2008,22(2):24-28.

[2] 张秀英,孟飞,丁宁.SCS 模型在干旱半干旱区小流域径流估算中的应用[J].水土保持研究,2003,10(4):176-

178,253.

[3] 宋孝玉,白鹏,王娟,等.陕北黄土沟壑区降雨入渗产流产沙模型与应用[J].灌溉排水学报,2014,33(增刊 1):364-368.

[4] 刘卉芳,鲁婧,王昭艳,等.黄土区典型小流域降水变化下的水沙响应研究[J].水生态学杂志,2017,38(4):11-17.

[5] Ponce V M, Hawkins R H. Runoff curve number: Has it reached maturity? [J]. Journal of Hydrologic Engineering,1996,1(1):11-19.

[6] 穆宏强.SCS 模型在石桥铺流域应用研究[J].水利学报,1992(10):79-83.

[7] 罗利芳,张科利,符素华.径流曲线数法在黄土高原地表径流量计算中的应用[J].水土保持通报,2002,22(3):58-61,68.

[8] 刘春春,刘万青,王宁,等.SCS 模型在无资料地区径流模拟估算中的应用:以清河流域为例[J].中国农业资源与区划,2019,40(12):56-63.

[9] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development [J].Jawra Journal of the American Water Resources Association,1998,34(1):73-89.

[10] Boughton W C. A review of the USDA SCS curve number method [J].Journal of Soil Research,1989,27(3):511-523.

[11] 王白陆.SCS 产流模型的改进[J].人民黄河,2005(5):24-26.

[12] 刘贤赵,康绍忠,刘德林,等.基于地理信息的 SCS 模型及其在黄土高原小流域降雨—径流关系中的应用[J].农业工程学报,2005,21(5):93-97.

[13] 徐赞,吴磊,吴永祥.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.

[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[J].水土保持研究,2018,25(5):205-210.

[15] Belnap J, Büdel B, Lange O L. Biological soil crusts: Characteristics and distribution [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2003,8(4):1299-1301.

[16] 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[J].自然资源学报,2006,21(3):441-448.

[17] Belnap J. Biological soil crusts in deserts: A short review of their role in soil fertility, stabilization, and water relations [J].Algological Studies,2003,148(4):113-126.

[18] 王国鹏,肖波,李胜龙,等.黄土高原水蚀风蚀交错区生物结皮的地表粗糙度特征及其影响因素[J].生态学报,2019,38(10):3050-3056.

[19] 石亚芳,赵允格,李晨辉,等.踩踏干扰对生物结皮土壤渗透性的影响[J].应用生态学报,2017,28(10):3227-3234.

[20] Galun M, Bubrick P, Garty J. Structural and metabolic diversity of two desert lichen populations [J].Journal-Hattori Botanical Laboratory,1982,53:321-324.

(下转第 144 页)

降雨强度下初始产流耗时表现为 $R_0 < R_1 < R_2$, 而当降雨强度增大到 120 mm/h 时, 产流时间表现为 $R_0 < R_2 < R_1$, 且这种变化幅度随降雨强度的增大而变小。

(2) 2 种处理和对照组坡面产流过程都呈现出先迅速增加后趋于稳定的变化规律。在坡度较小 (25°) 或雨强较小 (60 mm/h) 时, 坡面的平均产流速率表现为 $R_0 > R_1 > R_2$; 但当坡度增至 35° 和雨强增至 120 mm/h 时, R_1 、 R_2 坡面的产流速率逐渐接近甚至超过 R_0 坡面。

(3) 2 种处理和对照组坡面的产沙速率随产流时间的增加而减小, 平均产沙速率大小表现为 $R_0 > R_1 > R_2$; 当降雨强度达到 120 mm/h 时, 径流路径调控措施的效果减弱, 降雨产生的土壤侵蚀现象并未得到有效改善。

(4) 与产流产沙过程对应, R_1 、 R_2 坡面在不同坡度和降雨强度组合中, 通常减沙效益大于减流效益, 且这种效益表现为 $R_2 > R_1$, 这种效益随雨强的增大而减小; 累积产沙量与累积径流量成幂函数关系。

参考文献:

- [1] 杜华明, 董廷旭. 川东盆地高温、暴雨特征及对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 147-151.
- [2] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7615-7622.
- [3] 姚冲, 黄少燕, 查轩, 等. 暴雨条件下典型红壤区不同恢复方式侵蚀过程与特征分析[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 58-63, 70.
- [4] 卫伟, 余韵, 贾福岩, 等. 微地形改造的生态环境效应研

究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6462-6469.

- [5] 秦伟, 曹文洪, 郭乾坤, 等. 植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述[J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4905-4912.
- [6] 赵西宁, 吴普特, 冯浩, 等. 降雨径流调控利用与流域保水减沙效应研究[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 46-53.
- [7] 王明超, 王珊, 刘颖, 等. 四川华蓥市旅游生态环境问题与可持续发展探讨[J]. 时代经贸, 2012(16): 163-164.
- [8] 李彩霞. 华蓥市矿山地质环境评价及防治措施研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- [9] 王燕, 宫渊波, 尹艳杰, 等. 不同林龄马尾松人工林土壤水土保持功能[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 23-27, 31.
- [10] 张利超, 刘窑军, 李朝霞, 等. 降雨侵蚀过程中红壤坡耕地地表汇流网络特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 53-60.
- [11] 车明轩, 宫渊波, 穆罕默德·纳伊姆·汉, 等. 人工模拟降雨条件下不同雨强、坡度对紫色土坡面产流的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 164-168.
- [12] 孙狂飙, 袁超, 周峙, 等. 人工模拟降雨条件下坡面侵蚀特性的模型试验研究[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(3): 62-69.
- [13] 汤珊珊. 覆沙坡面水蚀产沙动力过程与微地貌变化的响应研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [14] 汤珊珊, 李占斌, 李聪, 等. 模拟降雨条件下覆沙坡面产流产沙过程研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 139-146.
- [15] 王添, 任宗萍, 李鹏, 等. 模拟降雨条件下坡度与地表糙度对径流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 1-6.
- [28] Loope W L, Gifford G F. Influence of a soil microfloral crust on select properties of soils under pinyon-juniper in southeastern Utah [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1972, 27(4): 164-167.
- [29] 王浩, 张光辉, 刘法, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 117-123.
- [30] 陈瑶, 张科利, 罗利芳, 等. 黄土坡耕地弃耕后土壤入渗变化规律及影响因素[J]. 泥沙研究, 2005(5): 44-50.
- [31] 许明祥, 刘国彬, 温仲明, 等. 黄土丘陵区小流域土壤特性时空动态变化研究[J]. 水土保持通报, 2000, 20(1): 20-23.
- [32] 范彩霞, 王少丽, 路明, 等. SCS 模型在大红门流域径流量计算中的应用[J]. 人民珠江, 2019, 40(11): 16-20.
- [33] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤可蚀性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 105-112.
- [34] 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[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 74-77.
- [35] 王英, 黄明斌. 径流曲线法在黄土区小流域地表径流预测中的初步应用[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 87-91.

(上接第 137 页)

- [21] 李新荣, 张志山, 黄磊, 等. 我国沙区人工植被系统生态—水文过程和互馈机理研究评述[J]. 科学通报, 2013, 58(5): 397-410.
- [22] Greene R, Chartres C J, Hodgkinson K C. The effects of fire on the soil in a degraded semi-arid woodland. I. Cryptogam cover and physical and micromorphological properties [J]. Soil Research, 1990, 28(5): 755-777.
- [23] Zhao Y G, Xu M X. Runoff and soil loss from revegetated grasslands in the hilly Loess Plateau region, China: Influence of biocrust patches and plant canopies [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(4): 387-393.
- [24] 刘俊娥, 王占礼, 袁殷, 等. 黄土坡面薄层流产流过程试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(5): 223-227.
- [25] 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[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 135-141.
- [26] 孙福海, 肖波, 姚小萌, 等. 黄土高原生物结皮斥水性及其沿降水梯度的变化特征[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 1-13.
- [27] 陈丽萍, 陈青, 赵辉, 等. 贺兰山东麓生物土壤结皮早期发育过程中微生物群落演替研究[J]. 生态学报, 2020, 40(9): 3105-3114.