

DOI: 10.5846/stxb201912082665

冯憬, 王伟, 冯青郁. 黄土丘陵区 SCS-CN 模型径流曲线数的计算与校正. 生态学报, 2021, 41(10): 4170-4181.

Feng J, Wei W, Feng Q Y. The runoff curve number of SCS-CN method in loess hilly region. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4170-4181.

黄土丘陵区 SCS-CN 模型径流曲线数的计算与校正

冯 憬^{1,2}, 卫 伟^{1,*}, 冯青郁¹

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:由美国农业部土壤保持局开发的 SCS-CN 模型在其他国家地区使用过程中的适用性仍存在争议, 直接采用其给定的初损率 λ 来计算 CN 值易出现问题, 尤其对于中国黄土高原这样具有复杂自然环境的干旱半干旱生态系统来说, 有必要针对 CN 模型参数做进一步校正。基于地处黄土丘陵区的定西共计 47 个径流小区连续五年生长期的观测数据, 采用平均值法计算典型植被和整地类型下的 CN 值, 并结合前人在不同坡度下对初损率 λ 的率定结果进行校正, 同时运用经验公式法计算土壤饱和导水率、确定土壤水文组。结果表明: ①陇中地区土壤质地以壤土、粉砂壤土为主, 饱和导水率介于 18—180 mm/h 之间, 最小渗透率介于 3.81—7.26 mm/h 之间; ②土壤前期含水量、植被种类、植被盖度、土地利用、坡度以及整地工程措施等均对 CN 值存在影响, 依照坡度校正后的 CN 值与之前计算的存在较大差异; ③典型植被覆盖类型下的 CN_1 值为: 灌木林地(沙棘) < 撂荒地(冰草) < 人工草地(苜蓿) < 坡耕地(小麦) < 乔木林地(油松), 相同坡度的同类型植被措施下, CN 值随植被盖度增加而减小; ④水平沟、水平阶和反坡台等整地措施在不同土壤湿度条件下均降低了 CN 值, 有效提高了土壤饱和导水率。

关键词:SCS-CN 模型; 黄土丘陵区; 径流曲线数法; 坡面径流; 降雨; 初损率

The runoff curve number of SCS-CN method in loess hilly region

FENG Jing^{1,2}, WEI Wei^{1,*}, FENG Qingyu¹

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The applicability of SCS-CN model developed by Soil Conservation Service of United States Department of Agriculture (USDA) is still disputed. The calculation of curve number (CN) values in other countries or regions using assigned fixed initial abstraction ratio is inaccurate. It is necessary for the further calibration of parameters, especially when the model runs in the areas with complex natural environment, such as the Chinese Loess Plateau. In this study, based on the observed data of 47 runoff plots for five years during the growing season, the CN values of typical terracing and vegetation measures were determined by the arithmetic mean method, and the empirical equation method was used to identify the saturated hydraulic conductivity and hydrologic soil groups. The results indicate that ① the soil in middle region of Gansu Province is made up of loam and silty loam, whose saturated hydraulic conductivity is between 18 and 180 mm/h, and the minimum infiltration rate is between 3.81 and 7.26 mm/h. ② The CN was strongly affected by antecedent soil moisture, plant species, vegetation cover, land use, slope and terracing measures. There is an obvious difference between the calculation with correction in terms of slope and without. ③ The CN_1 values in different typical vegetation patterns sort by size: shrubland (*Hippophae rhamnoides*) < abandoned land (*Agropyron cristatum*) < artificial grassland (*Medicago Sativa*) < farmland (*Triticum aestivum*) < arboreal land (*Pinus tabulaeformis*), and the CN values decrease with increasing

基金项目:国家自然科学基金项目(41971129); 国家重点研发计划课题(2016YFC0501701); 中国科学院青年创新促进会优秀会员项目

收稿日期:2019-12-08; **网络出版日期:**2021-03-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weiwei@rcees.ac.cn

vegetation coverage among the same kind of plots with same slope gradient. ④ The terracing measures including zig terraces, leveled benches and leveled ditches all increased the saturated hydraulic conductivity and decreased the *CN* values in different antecedent moisture conditions remarkably.

Key Words: SCS-CN model; loess hilly region; curve number; slope runoff; rainfall; initial abstraction ratio

美国农业部土壤保持局(USDA-SCS)开发的径流曲线数法(Curve Number Method)广泛应用于估算无资料地区径流量或洪峰流量^[1-5]。SCS-CN 方法是一种以经验数据为支撑的暴雨水文抽象概念模型,该模型基于一个数值参数 *CN* 来估计直接径流量,与 Green-Ampt、Philip 和 Horton 入渗曲线等相比所需资料容易获取且计算过程简单^[6-8]。该方法能够解释流域产流的关键特征^[9],许多基于物理过程的水文模型,如 SWAT、EPIC、CREAMS、AGNAPS 和 HEC-HMS 等都采用 SCS-CN 模型来模拟地表径流量^[1,4,6,10]。

SCS-CN 模型也广泛用于我国水资源评价工作中,但由于地域特征差异等,直接采用美国农业部水土保持局提供的 *CN* 值来估算其他国家地区的径流量必定存在精度问题。由此,诸多学者就 *CN* 值的本土化区域化应用开展了大量的基础研究:Lian 等^[11]根据中国 55 个降雨径流监测点的数据修正了 *CN* 值,结果与美国提供的 *CN* 查算表存在较大差异。罗利芳等^[6]基于陕西安塞小流域的监测数据计算了不同下垫面的 *CN* 值。Chaudhary 等^[12]通过实验计算 *CN* 值,并探讨了流域内坡度对产流和 *CN* 值的影响。针对 *CN* 值计算的方法学比较研究也有涉猎:符素华等^[2]对 *CN* 值计算的 5 种方法进行比较研究,考虑相关系数和合格率算术平均法最佳;邓景成等^[7]利用黄土高原 3 个小流域 42 场模拟降雨的径流资料,应用 5 种不同方法计算 *CN* 值,并利用 *CN* 值反推径流深。也有学者开展了模型参数优化的相关研究:王英等^[13]利用黄土高原地区 3 个小流域的 303 场降雨径流资料,针对黄土高原降雨地表径流特点优化模型中的 λ 值,并提出降雨强度修正函数,将降雨强度因子引入径流曲线法;张钰娴等^[1]基于 62 场实测降雨数据探究了 λ 值与不同地表坡度的定量关系;徐赞等^[14]根据陕西榆林小流域的次降雨径流数据,优化了影响降水产流关系的参数(初速率和降雨强度);Shi 等^[15]通过对实测降雨径流事件的分析,确定三峡地区王家桥小流域的 λ 值。为强化对不同土壤湿度核算, Singh^[16]使用了熵理论重新审视了 SCS-CN 方法;Cho 和 Engel^[17]基于连续的 SCS-CN 模型,采用了修正的土壤水分核算方法来估计长期非连续暴雨事件的径流深。

作为 SCS-CN 模型中关键的区域与气候参数,初损率 λ 的取值对 *CN* 值预测精度有显著影响^[18]。在现有的 SCS-CN 模型中, λ 通常直接采用美国水土保持局所提出 0.2 来进行计算模拟,即假设初损量等于 20% 的最大土壤蓄水量。然而,选择固定的 λ 值本质上回避了不同区域地理气候条件存在差异的问题^[9]。该取值适用于美国大部分土壤结构和下垫面背景下 *CN* 值的计算,但对于中国黄土高原未必适用^[1,4,8,11]。同时该参数是针对湿润气候下的流域而率定的^[19],故应用于干旱半干旱区会造成较大误差。此外,坡度对产流具有重要影响,产流会随坡度的增加而增加^[20],陡坡通常会有更多的径流产生,尤其在丘陵区小流域的产流潜力评价中应该充分考虑坡度的影响^[21]。因此,采用不同坡度下 λ 校正的结果对计算 *CN* 值意义重大,精确的 *CN* 值对径流评估结果的准确性至关重要。

目前为止,针对陇中黄土丘陵区 SCS-CN 模型相关参数的率定工作仍不系统,缺乏统一的构架,有必要参照不同坡度下 λ 的校正结果对不同下垫面重新开展产流潜力的评价。此外,涉及不同整地措施下 *CN* 值的研究也较少。作为黄土高原治理水土流失的重要措施,整地通过改变和构建微地貌,能够有效滞留降雨,延缓径流的产生时间等,从而对土壤水文过程产生影响^[22],探讨不同整地-植被耦合系统下的 *CN* 值变化有利于科学评价和预测区域水土保持成效。鉴于此,本文在系统整理和分析陇中黄土区 47 个径流小区连续 5 年生长季的观测数据基础上,采用算术平均法^[2]计算了定西地区径流曲线数模型中的 *CN* 值,并借助黄土丘陵区不同坡度下率定的 λ 值^[1]进行校正和检验,同时使用经验公式法确定不同植被和整地类型下的饱和导水率以及水文土壤组类型,研究结果将为流域水资源评估以及水土保持技术优化提供科学依据。

1 研究区概况和数据收集

1.1 研究区概况

为获得陇中地区较完整的植被及整地类型的 CN 值,研究区选取了甘肃省定西市龙滩流域和安家坡流域(图 1)。安家沟流域位于定西市安定区凤翔镇,地处东经 $104^{\circ}38'—104^{\circ}40'$,北纬 $35^{\circ}33'—35^{\circ}35'$,该流域是黄河流域祖厉河水系关川河的一条小支沟,流域面积 8.54 km^2 。龙滩径流场地处定西市安定区岷口镇,地理位置为东经 $104^{\circ}27'—104^{\circ}31'$,北纬 $35^{\circ}43'—35^{\circ}46'$,流域总面积 16.10 km^2 ,属于黄河流域祖厉河水系三级支流。研究区地貌类型属黄土丘陵沟壑区,主要土壤类型为黄绵土。本研究选取了位于安家坡流域的 30 个径流小区,和位于龙滩流域的 17 个径流小区开展 SCS-CN 模型径流曲线数的研究工作。野外径流小区的基本概况详见表 4,其中涉及的土地利用类型包括坡耕地、灌木林地、乔木林地、撂荒地以及人工草地,涉及的植物种类包括苜蓿 (*Medicago Sativa*),小麦 (*Triticum aestivum*),沙棘 (*Hippophae rhamnoides*),油松 (*Pinus tabulaeformis*),柠条 (*Caragana microphylla*),侧柏 (*Platycladus orientalis*),冰草 (*Agropyron cristatum*),山杏 (*Prunus armeniaca*)。

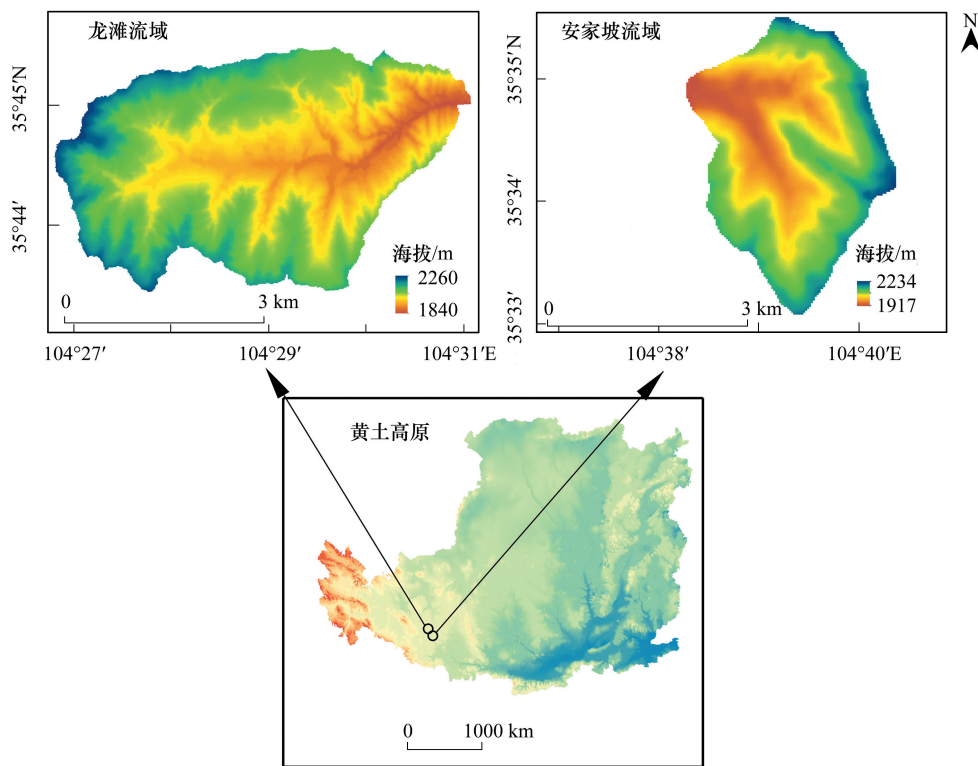


图 1 研究区分布图

Fig.1 Location of the study sites in the Loess Plateau of China

1.2 数据收集

本文基于 47 个径流小区 2014—2018 年连续 5 年生长期(5—10 月)的降雨和产流数据进行 CN 值的计算研究。此外,收集了径流小区土壤理化资料,包括土壤机械组成以及有机质含量等数据。基于 47 个径流小区的土壤理化资料,进一步计算得到饱和导水率并确定了该地区的水文土壤组类型。

1.3 方法原理

CN 值是一个无量纲参数,由前期土壤湿度、土壤类型、植被覆盖、土地利用和坡度等因素决定^[2-3,7],理论上取值范围为 $(0, 100)$ ^[23]。SCS-CN 模型在水平衡方程(公式(1))基础上结合了两个基本的前提假

设^[3,13,24]。第一个基本假设是:实际地表径流深(Q)与可能最大径流深的比值等于实际入渗量(F)与土壤潜在蓄水能力(S)之比(公式(2));另一个假设是:初损(I_a)是土壤潜在蓄水能力(S)的一部分(公式(3))。

$$P = I_a + F + Q \quad (1)$$

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (2)$$

$$I_a = \lambda S \quad (3)$$

式中, P 表示总降雨量, I_a 表示初损量, F 表示累积入渗量, Q 表示地表径流深, S 代表潜在最大蓄水量,而 λ 表示初损率。结合公式(1)和(2)可以得出现有 SCS-CN 最普遍的表达式:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (4)$$

在现有的 SCS-CN 模型中,为简化计算 λ 通常取值经验值 0.2。将公式(3)带入(4)可得:

$$Q = \begin{cases} \frac{(P - \lambda S)^2}{P + (1 - \lambda)S}, & P > \lambda S \\ 0, & P \leq \lambda S \end{cases} \quad (5)$$

有关参数 S 与 CN 值的经验转换表达式如下:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (6)$$

通过对 λ 不同的赋值,带入并整合公式(5)和(6)可计算得到一次降雨事件下相应前期土壤湿度条件下的 CN 值。

此外,借助美国农业部水土保持局提出的前期降水指数 API 来刻画前期土壤湿度条件^[3,7]。其中前期降水指数 API 等于降雨事件发生前 5 天的降雨量总和,据此,前期土壤湿度 AMC 可以分为三类 AMC_1 、 AMC_2 和 AMC_3 ,分别表示干旱、正常和湿润条件。三种湿度条件下分别对应 CN_1 、 CN_2 和 CN_3 ,转换关系如下:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 \times (100 - CN_2)}{100 - CN_2 + \exp[2.533 - 0.0636 \times (100 - CN_2)]} \quad (7)$$

$$CN_3 = CN_2 \times \exp[0.00673 \times (100 - CN_2)] \quad (8)$$

本文依照坡面变化针对初损率 λ 进行校正,参考张钰娴等^[1]在黄土丘陵区对参数 λ 的率定结果:曲线数模型所描述的参数 $\lambda=0.2$ 适合于黄土丘陵缓坡地,参数 λ 随坡度增大而减小。SCS-CN 模型中所描述的 $\lambda=0.2$ 适合于黄土丘陵缓坡地 $5^\circ-10^\circ$,当坡度 $\theta=15^\circ$ 时, $\lambda=0.1$; $20^\circ \leq \theta \leq 25^\circ$ 时, $\lambda=0.05$; $\theta=30^\circ$ 时, $\lambda=0.03$ 。

土壤类型分为 A、B、C、D 四类,由土壤最小下渗率和土壤质地确定,入渗能力依次减弱。前期土壤湿度由前期降水指数(API)确定(表 1)。划分定西地区水文土壤组时采用了 Soil Survey Manual^[25]中的标准,即根据土壤的饱和导水率(K_s)来划分(表 2)。饱和导水率通过经验公式得到:

$$K_s = 0.056 \times C + 0.016 \times S + 0.231 \times O_m - 0.693 \quad (9)$$

式中, K_s 代表饱和导水率(mm/min); C 表示土壤中黏粒含量(%); S 是土壤中砂粒含量(%); O_m 是土壤中有机质含量(%)。其中土壤粒径粒级分类标准采用美国制。带入土壤机械组成和有机质含量等数据可计算得到各径流小区的饱和导水率。

表 1 前期土壤湿度条件分类

Table 1 The classification of antecedent moisture conditions (AMC)

前期土壤湿度条件 Antecedent moisture conditions (AMC)	前 5 天降雨总量 Total rainfall over the past five days/mm	
	生长季 Growing season	休闲期 Fallow period
1	<35.6	<12.7
2	35.6—53.3	12.7—27.9
3	>53.3	>27.9

表 2 水文土壤组划分标准
Table 2 The classification standards of hydrologic soil group

饱和导水率 $K_s/(mm/h)$ Saturated hydraulic conductivity	>180	18—180	1.8—18	<1.8
水文土壤组 Hydrologic soil group	A	B	C	D
最小渗透率 Minimum infiltration rate/(mm/h)	>7.26	3.81—7.26	1.27—3.81	0.00—1.27
土壤质地 Soil texture	砂土、壤质砂土、砂质壤土	壤土、粉砂壤土	砂黏壤土	黏壤土、粉砂黏壤土、砂黏土、粉砂黏土、黏土

基于前期土壤湿度条件,对研究区连续 5 年生长季内的产流事件进行划分,龙滩和安家坡流域中前期土壤湿度条件为 AMC_1 的产流次数分别占 83% 和 78%。由此可见,定西降雨产流的前期湿度条件以干旱居多。为了让计算结果更具实用性,本文采用 AMC_1 条件下的 CN_1 作为径流预报参数。将各个小区的降雨数据代入公式(5)和(6),可得每次降雨产流事件对应的潜在最大蓄水量 S 以及 CN 值,通过取算术平均值计算得到每个小区最终的 CN 值。最终,将不同坡度下率定得到的 CN 值与直接采用美国水土保持局分析提出的 λ 值计算得到的 CN 值进行比较。

其中,35 个径流小区的监测结果中 AMC_1 占主导地位,且这 35 个径流小区均不涉及整地工程措施,故将此 35 个小区依照不同坡度校正前后 CN 值进行展示,结果可表征典型植被覆盖类型下的 CN 值。另外 12 个与整地措施相关的径流小区,不同 AMC 的情况均有监测,将在后续进行比较说明。

2 结果与分析

2.1 水文土壤组划分

基于研究区 47 个径流小区的监测资料以及相关计算结果对各径流小区以及定西地区的土壤进行了水文土壤组的划分。计算结果表明(表 3),定西地区大部分的土壤均属于 B 类水文土壤组。

表 3 定西径流小区的饱和导水率和水文土壤组
Table 3 The saturated hydraulic conductivity and hydrologic soil group of runoff plots in Dingxi

试验地点 Experimental sites	小区数量 The number of plots	饱和导水率/(mm/h) Saturated hydraulic conductivity				水文土壤组 Hydrologic group
		最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	差异系数/% Coefficient of variation	
安家坡	30	77.4	21.8	41.7	52.0	B
龙滩	17	47.8	34.4	43.0	9.7	B

2.2 不同植被措施下的 CN 值及校正

本研究中典型植被类型选取了人工草地(苜蓿),坡耕地(小麦),灌木林地(沙棘),撂荒地(冰草)和乔木林地(油松)。由计算结果可得(表 4),土地利用类型、植被恢复措施、前期土壤湿度条件、地形坡度以及植被覆盖度等均对径流曲线数有不同程度影响。相同坡度、相同植被措施的样地中,随植被覆盖度增加, CN 值减小。同时依照前人^[1]在黄土丘陵区不同坡度条件下的研究结果对 CN 值进行了校正(表 4)。其中,不同典型植被类型下校正后的 CN_1 值大小排序如下:灌木林地(沙棘)<撂荒地(冰草)<人工草地(苜蓿)<坡耕地(小麦)<乔木林地(油松)(图 2)。

2.3 不同整地措施下的 CN 值及校正

本研究一共选取六组整地小区:柠条水平阶、侧柏鱼鳞坑、山杏水平沟、侧柏反坡台、油松鱼鳞坑以及油松反坡台,同时包含各自的坡面对照(表 5)。研究结果发现, CN 值在不同整地措施下存在分异(表 6),其中,水平阶、水平沟以及反坡台这三类整地措施在不同土壤湿度条件下均降低了 CN 值,而对于鱼鳞坑整地则呈现

表 4 安家坡和龙滩流域径流小区基本情况

Table 4 Basic situation of runoff plots in Anjiapo and Longtan catchments																
小区号 No.	植被覆盖类型 Types of vegetation covering	坡度 Slope/(°)	坡长 Length/m	坡宽 Width/m	坡向 Aspect/(°)	坡位 Slope position	植被覆盖度 Vegetation coverage/%	校正前 Before calibration			校正后 After calibration					
								CN ₁	CN ₂	CN ₃	CN ₁	CN ₂	CN ₃			
1	人工草地(苜蓿)	5	20	5	330	坡中位	18	79.6	89.8	95.2	79.6	89.8	95.2	79.6	89.8	95.2
2	Artificial grassland	20	10	5	330	坡中位	30	78.7	89.4	95.0	58.2	74.7	86.4	58.2	74.7	86.4
3	(<i>Medicago Sativa</i>)	15	10	5	330	坡中位	36	77.9	89.0	94.8	67.2	82.1	91.1	67.2	82.1	91.1
4		5	20	5	170	上坡位	37	77.0	88.4	94.5	77.0	88.4	94.5	77.0	88.4	94.5
5		10	10	5	330	坡中位	40	77.9	89.0	94.8	77.9	89.0	94.8	77.9	89.0	94.8
6		15	20	5	330	坡中位	23	78.4	89.3	94.9	68.1	82.7	91.4	68.1	82.7	91.4
7		10	20	5	330	坡中位	26	77.9	89.0	94.8	77.9	89.0	94.8	77.9	89.0	94.8
8	坡耕地(小麦)	5	20	5	170	上坡位	41	77.3	88.5	94.6	77.3	88.5	94.6	77.3	88.5	94.6
9	Slope farmland	20	10	5	330	坡中位	49	78.8	89.5	95.0	58.2	74.8	86.5	58.2	74.8	86.5
10	(<i>Triticum aestivum</i>)	5	20	5	330	坡中位	50	75.6	87.6	94.1	75.6	87.6	94.1	75.6	87.6	94.1
11		15	10	5	330	坡中位	51	78.4	89.3	94.9	68.1	82.6	91.4	68.1	82.6	91.4
12		10	10	5	330	坡中位	53	78.1	89.1	94.8	78.1	89.1	94.8	78.1	89.1	94.8
13		15	20	5	330	坡中位	55	78.6	89.3	95.0	68.4	82.8	91.4	68.4	82.8	91.4
14		10	20	5	330	坡中位	57	79.0	89.5	95.1	79.0	89.5	95.1	79.0	89.5	95.1
15	灌木林地(沙棘)	15	20	5	330	坡中位	27	78.7	89.4	95.0	68.6	83.0	91.5	68.6	83.0	91.5
16	Shrubland	10	20	5	330	坡中位	37	79.1	89.6	95.1	79.1	89.6	95.1	79.1	89.6	95.1
17	(<i>Hippophae rhamnoides</i>)	5	20	5	330	坡中位	37	78.7	89.3	95.0	78.7	89.3	95.0	78.7	89.3	95.0
18		5	20	5	170	上坡位	47	78.1	89.0	94.9	78.1	89.0	94.9	78.1	89.0	94.9
19		15	10	10	330	坡中位	93	74.3	86.9	93.8	61.0	77.9	88.8	61.0	77.9	88.8
20		20	10	10	330	坡中位	95	74.8	87.2	93.9	47.6	66.7	81.4	47.6	66.7	81.4
21		10	10	10	330	坡中位	95	74.0	86.8	93.7	74.0	86.8	93.7	74.0	86.8	93.7
22	乔木林地(油松)	5	20	5	330	坡中位	35	78.8	89.5	95.0	78.8	89.5	95.0	78.8	89.5	95.0
23	Arboreal land	15	10	10	330	坡中位	53	77.9	89.0	94.8	67.1	82.1	91.1	67.1	82.1	91.1
24	(<i>Pinus tabulaeformis</i>)	10	10	10	330	坡中位	40	78.1	89.1	94.8	77.4	88.8	94.7	77.4	88.8	94.7
25		20	10	10	330	坡中位	55	78.2	89.2	94.9	56.7	73.9	86.0	56.7	73.9	86.0
26		15	20	5	330	坡中位	45	78.8	89.5	95.0	68.8	83.1	91.6	68.8	83.1	91.6
27		5	20	5	170	上坡位	40	78.5	89.2	94.9	78.5	89.2	94.9	78.5	89.2	94.9
28		10	20	5	330	坡中位	40	78.3	89.2	94.9	78.3	89.2	94.9	78.3	89.2	94.9
29	撂荒地(冰草)	10	20	5	330	坡中位	25	78.4	89.2	94.9	78.4	89.2	94.9	78.4	89.2	94.9
30	Abandoned land	15	20	5	330	坡中位	28	78.0	89.0	94.8	67.5	82.1	91.0	67.5	82.1	91.0
31	(<i>Agropyron cristatum</i>)	5	20	5	330	坡中位	30	77.8	88.9	94.7	77.8	88.9	94.7	77.8	88.9	94.7
32		5	20	5	170	上坡位	79	76.8	88.3	94.5	76.8	88.3	94.5	76.8	88.3	94.5
33		15	10	5	330	坡中位	83	77.7	88.9	94.7	66.9	81.9	90.9	66.9	81.9	90.9
34		10	10	5	330	坡中位	87	76.6	88.3	94.4	76.6	88.3	94.4	76.6	88.3	94.4
35		20	10	5	330	坡中位	87	77.9	89.0	94.8	56.1	73.3	85.5	56.1	73.3	85.5

CN:径流曲线数 Curve Number; CN₁:第一类前期土壤湿度条件(AMC₁)下的径流曲线数; CN₂:第二类前期土壤湿度条件(AMC₂)下的径流曲线数; CN₃:第三类前期土壤湿度条件(AMC₃)下的径流曲线数

表 5 不同整地小区及自然坡面对照小区的特征^[26]
Table 5 Characteristics of different terraced plots and their corresponding natural slopes

整地方式 Terracing techniques	样地 1 Site 1		样地 2 Site 2		样地 3 Site 3		样地 4 Site 4		样地 5 Site 5		样地 6 Site 6	
	样地 1 Site 1		样地 2 Site 2		样地 3 Site 3		样地 4 Site 4		样地 5 Site 5		样地 6 Site 6	
	水平阶 Leveled benches	自然坡面 Natural slope	鱼鳞坑 Fish-scale pits	自然坡面 Natural slope	水平沟 Leveled ditches	自然坡面 Natural slope	反坡台 Zig terraces	自然坡面 Natural slope	鱼鳞坑 Fish-scale pits	自然坡面 Natural slope	反坡台 Zig terraces	自然坡面 Natural slope
坡长/m Slope length	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
面积/ m ² Area	60	60	100	100	50	50	100	100	50	50	50	50
植被 Vegetation	柠条 <i>C. microphylla</i>	柠条 <i>C. microphylla</i>	侧柏 <i>P. orientalis</i>	侧柏 <i>P. orientalis</i>	山杏 <i>P. armeniaca</i>	山杏 <i>P. armeniaca</i>	侧柏 <i>P. orientalis</i>	侧柏 <i>P. orientalis</i>	油松 <i>P. tabulaeformis</i>	油松 <i>P. tabulaeformis</i>	油松 <i>P. tabulaeformis</i>	油松 <i>P. tabulaeformis</i>
树龄/a Tree age	41	41	41	41	49	49	51	51	47	47	47	47
高度/m Height	1.14±0.30	1.38±0.29	1.49±0.38	1.61±0.42	1.97±0.60	3.37±0.31	2.70±0.48	3.27±0.75	5.98±0.53	5.40±0.60	5.71±0.41	7.09±1.12
胸径/cm Diameter at breast height (DBH)	1.06±0.95	1.33±0.45	3.31±0.91	3.21 ±0.58	4.25±0.66	4.89±0.20	4.72±1.02	5.53±1.94	8.97±0.98	9.83±0.83	8.71±0.49	9.29±2.30
冠幅/m Crown diameter												
东西向 East & west	1.16±0.65	1.74±0.33	0.70±0.29	0.76±0.13	1.47±0.71	1.77±0.52	1.70±0.59	1.73 ±0.42	2.75±0.70	2.73±0.80	2.51±0.42	2.69±0.89
南北向 South & north	0.94±0.39	1.84±0.43	0.66±0.25	0.73±0.14	1.50±0.45	2.05±0.42	1.66±0.69	1.63±0.24	2.85±0.49	2.88±0.56	2.20±0.45	2.44±0.52
植被盖度/% Vegetation coverage	55	50	35	40	40	45	40	35	45	55	30	40

出了不同状态,鱼鳞坑-侧柏的组合降低了 CN 值,而鱼鳞坑-油松的组合增加了 CN 值(表 7)。对于 CN_1 而言,山杏水平沟和油松反坡台对 CN_1 的衰减率显著高于其他组合,而油松鱼鳞坑的衰减率为负且显著低于其他组合(图 3)。此外,整地措施均增加了土壤饱和导水率,其中侧柏反坡台和油松鱼鳞坑的增长率显著高于其他组合(图 4)。

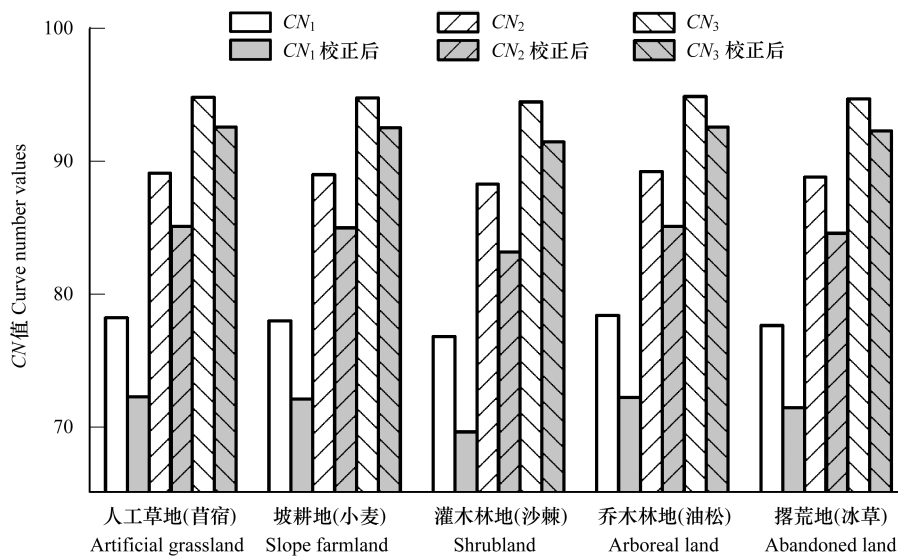


图 2 不同典型植被类型下的 CN 值

Fig.2 CN values under different typical vegetation patterns

CN :径流曲线数 Curve Number; CN_1 :第一类前期土壤湿度条件(AMC_1)下的径流曲线数; CN_2 :第二类前期土壤湿度条件(AMC_2)下的径流曲线数; CN_3 :第三类前期土壤湿度条件(AMC_3)下的径流曲线数

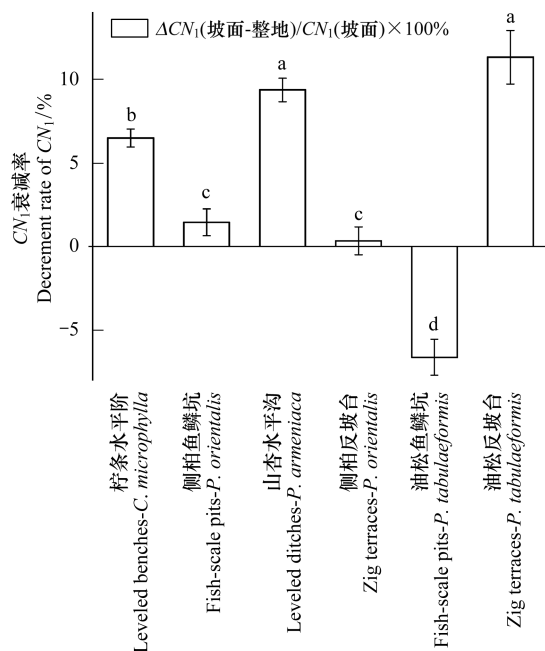


图 3 不同整地小区校正后的 CN_1 值衰减率(%)

Fig.3 The decrement (%) of corrected CN_1 values under terracing treatment

不同小写字母表示处理间的差异($P<0.05$)

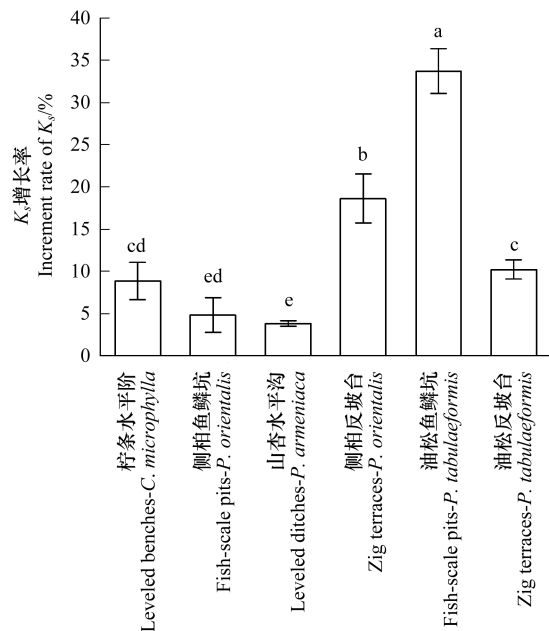


图 4 不同小区整地后饱和导水率的增长率(%)

Fig.4 The growth ratio (%) of saturated hydraulic conductivity under terracing treatment

不同小写字母表示处理间的差异($P<0.05$)

表 6 不同整地小区前期湿度条件对径路曲线数的影响以及公式验证
Table 6 Effect of antecedent moisture conditions on CN and the validation of Equations in plots with different terracing measures

小区 Plots	产流次数百分比/% Proportion of runoff events			校准前 Before calibration						λ 值校准后 After calibration					
				根据实测数据计算 Calculation based on measured data			根据公式计算 Calculation based on the formula			根据实测数据计算 Calculation based on measured data			根据公式计算 Calculation based on the formula		
	AMC ₁	AMC ₂	AMC ₃	CN ₁	CN ₂	CN ₃	CN ₁	CN ₂	CN ₃	CN ₁	CN ₂	CN ₃	CN ₁	CN ₂	CN ₃
柠条水平阶 Leveled benches- <i>C. microphylla</i>	83	13	5	84.7	83.7	92.6	92.7	96.6	96.6	58.3	59.1	74.8	75.6	87.2	87.2
坡面对照 Natural slope- <i>C. microphylla</i>	83	13	5	85.6	84.5	93.1	93.2	96.9	96.9	62.2	61.9	77.1	78.4	88.9	88.9
侧柏鱼鳞坑 Fish-scale pits- <i>P. orientalis</i>	86	11	3	84.7	83.5	92.6	92.7	96.6	96.6	58.5	57.9	74.2	75.7	87.2	87.2
坡面对照 Natural slope- <i>P. orientalis</i>	86	11	3	84.9	84.1	92.9	92.9	96.7	96.7	59.3	60.3	76.0	76.4	87.7	87.7
山杏水平沟 Leveled ditches- <i>P. armeniaca</i>	86	11	3	84.4	83.5	92.5	92.6	96.6	96.6	62.1	62.6	77.7	78.4	88.9	88.9
坡面对照 Natural slope- <i>P. armeniaca</i>	86	11	3	85.3	85.2	93.5	93.0	96.8	96.8	68.1	69.7	83.4	82.7	91.3	91.3
侧柏反坡台 Zig terraces- <i>P. orientalis</i>	86	11	3	83.2	82.0	91.7	91.9	96.2	96.2	61.7	61.7	76.9	78.2	88.7	88.7
坡面对照 Natural slope- <i>P. orientalis</i>	86	11	3	84.4	84.0	92.9	92.6	96.6	96.6	62.2	63.5	78.8	78.4	88.9	88.9
油松鱼鳞坑 Fish-scale pits- <i>P. tabulaeformis</i>	78	15	7	86.1	84.7	93.3	93.5	97.0	97.0	70.3	68.5	83.0	84.3	92.3	92.3
坡面对照 Natural slope- <i>P. tabulaeformis</i>	78	15	7	85.0	84.4	93.1	92.9	96.7	96.7	66.5	66.7	81.6	81.7	90.8	90.8
油松反坡台 Zig terraces- <i>P. tabulaeformis</i>	78	15	7	83.9	80.6	91.0	92.3	96.4	96.4	55.2	50.6	68.0	73.1	85.6	85.6
坡面对照 Natural slope- <i>P. tabulaeformis</i>	78	15	7	85.9	83.0	92.4	93.4	97.0	97.0	62.1	57.3	74.5	78.6	89.0	89.0

表 7 不同整地措施对 CN 值的影响
Table 7 Effect of different terracing measures on CN value

小区 Plots	根据坡度校准后的衰减率/% Decrement of CN after calibration				
	根据实测数据计算 Calculation based on measured data			根据公式计算 Calculation based on the formula	
	CN ₁	CN ₂	CN ₃	CN ₂	CN ₃
柠条水平阶 Leveled benches- <i>C. microphylla</i>	6.2	4.6	3.1	3.6	1.9
侧柏鱼鳞坑 Fish-scale pits- <i>P. orientalis</i>	1.3	4.0	2.4	0.9	0.5
山杏水平沟 Leveled ditches- <i>P. armeniaca</i>	8.8	10.2	6.9	5.1	2.7
侧柏反坡台 Zig terraces- <i>P. orientalis</i>	0.8	2.9	2.4	0.3	0.1
油松鱼鳞坑 Fish-scale pits- <i>P. tabulaeformis</i>	-5.8	-2.6	-1.7	-3.2	-1.6
油松反坡台 Zig terraces- <i>P. tabulaeformis</i>	11.1	11.7	8.7	6.9	3.9

3 讨论

本研究聚焦了黄土丘陵区典型的植被覆盖和整地-植被组合类型,分别计算得到不同前期土壤湿度条件下的径流曲线数。对典型植被覆盖而言,具有相同坡度的同类型植被措施下,CN 值随植被覆盖度增加而减小,植被和地表覆盖可以通过拦蓄降水、消减动能,达到减缓径流产生和泥沙运移速率的目的,从而有效调节集中水流^[26-27]。研究也聚焦了典型的整地-植被组合,包括水平沟,水平阶和反坡台在内的整地工程措施均能够有效提高土壤饱和导水率并减少地表产流。但同时整地措施的损毁和不规范的施工也会增加 CN 值,比如鱼鳞坑在日常使用中缺乏必要维护导致损毁、淤满,或者在建设中未能严格按照规格设计、以及施工中未能按照标准进行空间布局,都极易导致在高强度降雨下产生严重的冲沟侵蚀^[22,28]、并加剧产流产沙。所以在日常使用中应注重维护,提高鱼鳞坑整地的截流效益。就总体而言,水土保持的生物、工程措施增加了入渗,有效降低了地表径流量,与前人研究结果一致^[29]。黄土高原地区全年降雨集中且强降雨频发,因此土壤导水入渗性能的好坏直接决定该地区土壤水库的储水功能。由于整地措施提高了土壤有机质含量,促进了团聚体形成,通过改善土壤结构,间接提高了土壤饱和导水率^[30],故整地措施有利于土壤水分环境的改善^[31]。

本研究也基于前人不同坡度下初损率的率定结果对不同下垫面的 CN 值进行校正,校正前后的 CN 值存在一定差异。作为 SCS-CN 模型估算径流量的关键参数,径流曲线数值变化±10%,会引起径流量变化-45%—+50%^[32],由此可见 CN 值在计算中的敏感性导致精度的偏差对评估结果会有较大影响。本文进一步证实了土壤前期含水量、不同植被种类、植被盖度、土地利用、坡度以及水土保持工程措施等均对径流曲线数有明显影响。在模型使用时应充分考虑地理空间的差异,由于我国地形、土壤、气候、土地利用均与美国存在很大异质性,加之黄土高原复杂的自然环境,美国农业部土壤保护中心提供的径流曲线数值查找表以及计算中的相关参数在我国黄土高原的适用性有待进一步验证。此外,在不同的研究地区,相同的降雨量产生的径流量也可能会有差异;即使在同一个人研究地区,同样的降雨量在不同的时间或季节的产流差异也较大。这两个现象说明 CN 值的影响因素较为复杂。外部自然地理条件的相互作用会导致区域产流能力的差异,季节的周期性变化和降雨持续时间的长短也会引起这种差异^[11]。因此,在今后的研究中有必要更加系统地设计实验来校正 λ 值,同时参照校正结果重新计算 CN 值,这样才能够更加精确地评估土壤入渗能力的影响。

4 结论

本研究围绕黄土丘陵区“降雨-产流-土壤水”的联动关系,基于不同坡度下 λ 值的率定和校准结果,借助

SCS-CN 模型揭示降雨和典型植被及整地措施耦合下的生态水文响应机制,评估了典型植被和整地类型下的产流潜力。研究发现:①土壤前期含水量、植被种类、植被盖度、土地利用、坡度以及整地工程措施等均对 CN 值存在影响,鉴于坡度对产流的影响较大,实践中需结合更多环境变量的交互作用系统核算和校正 CN 值;②陇中地区土壤质地以壤土、粉砂壤土为主,饱和导水率介于 18—180mm/h 之间,最小渗透率介于 3.81—7.26mm/h 之间;③典型植被覆盖类型中灌木林地(沙棘)在前期土壤湿度较干旱情况下对降雨截流作用较好,而同等情况下乔木林地(油松)的减流效果较差,相同坡度的同类型植被措施下,CN 值随植被覆盖度增加而减小(即植被覆盖度的增加提高了降水的截留作用);④不同土壤湿度下,水平沟、水平阶和反坡台均能削减地表产流潜力,增强降水截留能力,从而有效地提高水分入渗。

参考文献(References):

- [1] 张钰娟, 穆兴民, 王飞. 径流曲线数模型(SCS-CN)参数 λ 在黄土丘陵区的率定. 干旱地区农业研究, 2008, 26(5): 124-128.
- [2] 符素华, 王向亮, 王红叶, 魏欣, 袁爱萍. SCS-CN 径流模型中 CN 值确定方法研究. 干旱区地理, 2012, 35(3): 415-421.
- [3] 符素华, 王红叶, 王向亮, 袁爱萍, 路柄军. 北京地区径流曲线数模型中的径流曲线数. 地理研究, 2013, 32(5): 797-807.
- [4] 王红艳, 张志强, 查同刚, 朱聿申, 张建军, 朱金兆. 径流曲线数(SCS-CN)模型估算黄土高原小流域场降雨径流的改进. 北京林业大学学报, 2016, 38(8): 71-79.
- [5] 王冬, 李丽, 王加虎, 余娇娇, 梁菊平, 赵永超. 径流曲线数(SCS-CN)模型在洪水预报中的应用研究. 中国农村水利水电, 2017, (8): 108-112.
- [6] 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. 水土保持通报, 2002, 22(3): 58-61, 68-68.
- [7] 邓景成, 高鹏, 穆兴民, 赵广举, 孙文义, 田鹏, 宋小燕. 黄土区 SCS-CN 模型径流曲线数计算方法研究. 人民黄河, 2018, 40(4): 9-14, 18-18.
- [8] 张鑫, 张青峰, 周阳阳, 刘金龙. 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.
- [9] Mishra S K, Singh V P, Singh P K. Revisiting the soil conservation service curve number method//Singh V P, Yadav S, Yadava R N, eds. Hydrologic Modeling. Singapore: Springer, 2018: 667-693.
- [10] Kousari M R, Malekinezhad H, Ahani H, Zarch M A A. Sensitivity analysis and impact quantification of the main factors affecting peak discharge in the SCS curve number method: an analysis of Iranian watersheds. Quaternary International, 2010, 226(1/2): 66-74.
- [11] Lian H S, Yen H, Huang J C, Feng Q Y, Qin L H, Bashir M A, Wu S X, Zhu A X, Luo J F, Di H J, Lei Q L. CN-China: revised runoff curve number by using rainfall-runoff events data in China. Water Research, 2020, 117: 115767.
- [12] Chaudhary A, Mishra S K, Pandey A. Experimental verification of effect of slope on runoff and curve numbers. Journal of Indian Water Resources Society, 2013, 33(1): 40-46.
- [13] 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. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 87-91, 97-97.
- [14] 徐赞, 吴磊, 吴永祥, 徐荣嵘. SCS-CN 模型改进及其径流预测. 水利水运工程学报, 2018, (3): 32-39.
- [15] Shi Z H, Chen L D, Fang N F, Qin D F, Cai C F. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. CATENA, 2009, 77(1): 1-7.
- [16] Singh V P. SCS-CN method revisited using entropy theory. Transactions of the ASABE, 2013, 56(5): 1805-1820.
- [17] Cho Y, Engel B A. Spatially distributed long-term hydrologic simulation using a continuous SCS CN method-based hybrid hydrologic model. Hydrological Processes, 2018, 32(7): 904-922.
- [18] Fu S, Zhang G, Wang L, Luo L. Initial abstraction ratio in the SCS-CN method in the Loess Plateau of China. Transactions of the ASABE, 2011, 54(1): 163-169.
- [19] Shadeed S, Almasri M. Application of GIS-based SCS-CN method in West Bank catchments, Palestine. Water Science and Engineering, 2010, 3(1): 1-13.
- [20] Lal M, Mishra S K, Pandey A. Physical verification of the effect of land features and antecedent moisture on runoff curve number. CATENA, 2015, 133, 318-327.
- [21] Deshmukh D S, Chaube U C, Hailu A E, Gudeta D A, Kassa M T. 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.
- [22] Sun L Q, Wu S F, Hill R L, Guo H L, Feng H. The effects of three micro-catchment practices on erosion and runoff dynamics for a typical soil

- slope on the Loess Plateau of China. *Canadian Journal of Soil Science*, 2018, 99(1): 46-59.
- [23] Ajmal M, Waseem M, Kim D, Kim T W. A pragmatic slope-adjusted curve number model to reduce uncertainty in predicting flood runoff from steep watersheds. *Water*, 2020, 12(5): 1469.
- [24] 罗琳, 张松, 郭胜男, 洪林. SCS 模型在中尺度流域和径流试区的应用比较. *灌溉排水学报*, 2014, 33(4): 394-398.
- [25] Soil Science Division Staff. Soil survey manual. Ditzler C, Scheffe K, and Monger H C eds. USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C., 2017, 83-233, 580-581.
- [26] Feng J, Wei W, Pan D L. Effects of rainfall and terracing-vegetation combinations on water erosion in a loess hilly area, China. *Journal of Environmental Management*, 2020, 261: 110247.
- [27] Cerdà A, Rodrigo-Comino J, Giménez-Morera A, Keesstra S D. Hydrological and erosional impact and farmer's perception on catch crops and weeds in citrus organic farming in Canyoles river watershed, Eastern Spain. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 258: 49-58.
- [28] Yu Y, Wei W, Chen L D, Feng T J, Daryanto S. Quantifying the effects of precipitation, vegetation, and land preparation techniques on runoff and soil erosion in a Loess watershed of China. *Science of the total Environment*, 2019, 652: 755-764.
- [29] 胡晓静, 吴敬东, 张耀方, 李添雨, 李世荣. 北京山区 SCS 模型参数研究. *中国给水排水*, 2018, 34(3): 125-128.
- [30] 张耀方, 赵世伟, 王子龙, 李晓晓, 李明瑞, 杜璨. 黄土高原土壤团聚体胶结物质的分布及作用综述. *中国水土保持科学*, 2015, 13(5): 145-150.
- [31] 王子龙, 赵勇钢, 赵世伟, 黄菁华, 杜璨, 尚应妮. 退耕典型草地土壤饱和导水率及其影响因素研究. *草地学报*, 2016, 24(6): 1254-1262.
- [32] Boughton W C. A review of the USDA SCS curve number method. *Australian Journal of Soil Research*, 1989, 27(3): 511-523.