

黄土高原玉米坡耕地 C 因子的估算研究

余倩^{1,2}, 姚冲^{1,2}, 付世琳^{1,2}, 吴发启^{1,3}

(1.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; 2.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: C 因子作为土壤侵蚀预报模型中人为可控制的一个重要的因子,对减少土壤侵蚀和控制水土流失有很大的影响。因此以黄土高原坡耕地典型作物玉米为研究对象,通过进行人工降雨模拟试验,研究了玉米 5 个不同生育期近地表状况的变化特征,根据玉米不同生育期产沙量计算 C 值。结果表明,植被覆盖度、株高和结皮厚度均随着玉米生育期的延长而逐渐增加,地表粗糙度随着生育期延长呈现先减小后增加的趋势。产沙量随着玉米的生长逐渐减小,减沙效益随着玉米生育期的延长不断增加。在前人以植被覆盖度计算 C 值模型的基础上,以植被覆盖度作为关键因子,将株高、土壤结皮、地表粗糙度作为调节因子建立当地 C 值模型,得到较好的玉米坡耕地的 C 值模型(模型 $R^2=0.94$, RMSE=0.017, MAE=0.014, NSE=0.992)。研究结果根据近地表状况变化特征建立 C 值计算公式,提高了 C 值估算的准确性和其在黄土高原的适用性,为提高黄土高原土壤侵蚀预报模型精度提供科学依据。

关键词: C 值; 土壤侵蚀; 玉米; 产沙量

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)06-0049-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.007

Study on the Estimation of the C-factor in Maize Sloping Cultivated Land on the Loess Plateau

YU Qian^{1,2}, YAO Chong^{1,2}, FU Shilin^{1,2}, WU Faqi^{1,3}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100;
2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;
3.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: The C factor is an important artificially controllable factor of soil erosion prediction model. It plays a vital role in reducing soil erosion and controlling water and soil loss. In this paper, the maize, a typical crop on sloping farmland of the Loess Plateau, was studied using an artificial rainfall simulation experiment. Besides, five change features of maize on near-surface conditions in different growth periods were analyzed and the C value was calculated according to the sediment yield of maize in different growth periods. The results showed that vegetation coverage, plant height and crusted thickness increased gradually with the prolongation of maize growth period and that the surface roughness decreased first and then increased with the prolongation of maize growth period. Besides, the sediment yield decreased gradually with the continuous growth of maize and sediment reduction benefit increased with the extension of maize growth period. Based on the previous C-value model calculated by vegetation coverage, the vegetation coverage was taken as the key factor and the plant height, soil crust and surface roughness as the adjusting factors to build a local C-value model. On the basis of that, a better C-value model for maize slope farmland (model $R^2=0.94$, RMSE=0.017, MAE=0.014, NSE=0.992) was obtained. Based on the research results, a C-value calculation formula was established according to change characteristics of near-surface conditions. This helped improve the accuracy of C-value estimation and its applicability to the Loess Plateau, which could provide a scientific basis for improving the accuracy of soil erosion prediction model on the Loess Plateau.

收稿日期: 2022-05-06

资助项目: 国家自然科学基金项目(41977065); 国家重点实验室开放基金项目(k3050219171)

第一作者: 余倩(2000—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 732639357@qq.com

通信作者: 吴发启(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持研究。E-mail: wufaqi@263.net

Keywords: C value; soil erosion; maize; sediment yield

黄土高原坡耕地占总耕地面积的 50%，是该区域水土流失的主要发生地。坡耕地水土流失约占流域总径流量和总产沙量的 60%^[1-2]，导致土地退化和粮食产量降低，严重威胁农业可持续发展和粮食安全。土壤侵蚀预报模型能够定量评价土壤侵蚀的过程与强度，为防治水土流失、合理利用土地资源和进行水土保持规划作出重要科学依据^[3]。美国通用土壤流失方程^[4-5]中模型形式为 $A = R \times K \times L \times S \times C \times P$ 。式中： A 为年平均土壤流失量； R 为降雨侵蚀力因子； K 为土壤可蚀性因子； C 为植被覆盖与管理因子； P 为水土保持措施因子。在该方程中， R 、 K 、 L 、 S 因子均依赖于自然地理条件，短期内的水土保持活动不易改变这些因子， P 因子在实施过程需要投入大量的资金和人力，与 P 因子不同， C 因子在实施过程中所投入资金少，人工成本低，可以通过调整土地利用方式和改善农田管理措施解决土壤侵蚀问题。同时 C 因子也被认为是对土壤侵蚀最敏感、对土壤侵蚀预报模型影响大的因子^[6-7]。

USLE(universal soil loss equation)定义 C 值为有植被覆盖和管理措施下的土壤流失量与同等条件下清耕的土壤流失量之比，其取值范围为 0~1。在对 C 因子的研究中，USLE 中考虑了降雨和作物生长阶段对 C 值的影响，随后在 RUSLE(revised universal soil loss equation)^[8]中，提出 C 值的计算需要考虑作物冠层及地表覆盖、前期土地利用、土壤水分和地表糙度等次因子的影响，这为 C 值计算提出了更精确的思路和方向。随着对 C 值计算及其影响因素的不断研究，我国学者^[9-10]针对不同地区总结了计算 C 值的主要方法，主要有手册查询法、标准小区法、次因子法、反算法和盖度法。但由于不同学者就不同地区进行 C 值计算的试验方法不同，涉及的径流小区规格不同等因素，其计算得到的 C 值也会不同，使得不同地区研究得到的 C 值计算公式只能在特定环境下使用^[11-15]。目前我国以植被覆盖度作为因子^[16-18]确定 C 值的方法被广泛应用，但这也仅仅体现了植被参数中的 1 个因子，未能对 C 定义中提出的植被覆盖和耕作管理措施做到详细阐述，一定程度上影响 C 值计算的准确性。在已有的研究中，植被地上部分可以拦截降雨，对降雨进行重新分配，调节地表径流，地下部分根系在土壤内穿插环绕，改善土壤孔隙，增加土壤入渗^[19]。作为植被的一种，作物虽相较于林地草地改善土壤流失的作用有限^[20-21]，但与裸地相比，能够有效缓解坡耕地的土壤侵蚀程

度^[22-23]。而作物生育期内的管理措施^[24-25]会扰动地表，使地表凹凸不平并形成结皮，影响坡面的土壤侵蚀。黄土高原坡耕地土质疏松，植被结构单一，玉米作为坡耕地上种植的典型作物之一，其减少土壤侵蚀的作用明显^[26]。因此，本研究以黄土高原坡耕地典型作物玉米为研究对象，通过人工模拟降雨试验，分析玉米不同生育期的近地表参数变化特征，并建立以植被覆盖度为关键因子，株高、地表粗糙度和土壤结皮为调节因子的新的模型，以期提高玉米坡耕地 C 值估算的准确性和其在黄土高原的适用性，为提高黄土高原土壤侵蚀预报模型精度提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

杨凌示范区，位于陕西关中平原中部，黄土高原南部(107°59′—108°08′E, 34°14′—34°20′N)，海拔高度 418.0~540.1 m，属于东亚暖温带半湿润半干旱气候区，大陆性季风气候，年均气温 12.9℃，年均降水量 635.1 mm，年际间降水量变化大，年度分布不均匀，其中 7—9 月降水量占全年的 50%。土壤主要为壤土，土质疏松，土层深厚，土壤较肥沃。

1.2 试验设计

试验于 2021 年 4—9 月在西北农林科技大学资源环境学院水土保持工程实验楼外的径流小区进行。布设径流小区面积为 7 m²(长 5 m, 宽 1.4 m)，设置坡度为 10°(为我国的标准小区坡度)，播种前通过整地塑造地表有糙度状态，播种后进行预降雨使地表形成结皮，径流小区呈作物+糙度+结皮处理，同时设置 10°裸地作为对照，进行 3 组重复试验。供试土壤为杨凌本地壤土。供试玉米为“郑单 958”，玉米播种的株行距为 25 cm×60 cm，按照关中秋季玉米的播种时间如期播种，其他农田管理措施与当地管理措施一致。试验开始，分别在玉米的 5 个生育期内(幼苗期、拔节初期、拔节中期、抽雄前期、抽雄后期)进行人工降雨模拟试验。降雨前测量玉米的植被覆盖度、株高、结皮厚度以及地表粗糙度，并在降雨后观察玉米的产流和产沙特征。

人工降雨模拟试验采用中科院水保所研制的侧喷式降雨机进行，降雨高度为 7.5 m，有效降雨面积为 5 m×7 m。由于该地夏季多发生暴雨，故设置降雨强度为 80 mm/h。试验共计进行 15 场降雨，降雨开始后，观察并记录径流小区的开始产流时间，随后用塑料小桶在径流小区的出口每隔 2 min 接取 1 min 的径流泥沙样

品,降雨历时 1 h。降雨结束后,将收集到的径流泥沙样品带回实验室沉淀 24 h 后,倒掉上面的清水,将沉淀的泥沙放入烘箱室烘干 24 h 并称重。

1.3 指标测定

测量株高时,在玉米的每个生长期分别随机挑选 5~10 株玉米,测量其冠层顶部到土壤表面的垂直距离,取平均值作为株高;采用拍照法^[27]测量植被覆盖度。先俯视拍照获得玉米的俯视照片,再用 Image J2x 软件处理照片,将彩色图片转为灰度图,并通过设置阈值提取得到照片上的植被像素点。照片上植被像素点占总像素点的比例即为植被覆盖度;采用游标卡尺测量结皮厚度。在每次模拟人工降雨前,取径流小区上、中、下部的结皮各 3 块,用游标卡尺进行测量,其平均值即为结皮厚度;采用“链条法”测量地表粗糙度。计算公式为:

$$C_r = (1 - \frac{L_2}{L_1}) \times 100 \quad (1)$$

式中: C_r 为某一方向的地表粗糙度指数,取值 0~100,无量纲; L_1 为链条原长(cm),取值 100; L_2 为放置在地表后链条两端之间的直线距离(cm)。

1.4 C 值计算

1.4.1 实测 C 值 本次试验中,降雨后种植玉米的径流小区的产沙量与裸地上的产沙量之比为实测 C 值。

1.4.2 预测 C 值 前人基于植被覆盖度在 C 因子建模的基础上得到能够反映当地土壤流失的公式,主要有刘秉正等^[16]、刘宝元等^[17]、蔡崇法等^[18],其中刘宝元等^[17]将株高纳入 C 值的计算公式。本次研究通过将试验测得的植被覆盖度及株高代入 3 位学者的 C 公式中,得到相应的 C 值,作为预测 C 值。

刘秉正公式:刘秉正等^[16]定义了“植被保土作用系数”的概念,通过统计西峰、淳化 2 地 1964—1996 年(西峰)和 1987—1994 年(淳化)17 个径流小区资料计算发现,C 值在任何情况下仅与植被覆盖度有关,与其他因素无关。通过统计回归分析建立了 C 因子的对数模型:

$$C = -0.595 \lg(0.01V) + 0.221 \quad (2)$$

式中: V 为植被覆盖度(%)。

刘宝元公式:刘宝元等^[17]通过人工降雨试验和径流小区观测资料建立了北京土壤流失方程。该方程考虑了冠层覆盖因子和地表覆盖因子,与其他学者公式不同的是,其体现了植被覆盖因素的群落层次结构。计算公式为:

$$C = C_c \cdot C_s \quad (3)$$

$$C_c = 1 - (0.01V_c + 0.0859)e^{-0.0033h} \quad (4)$$

$$C_s = 1.029e^{-0.0235V_R} \quad (5)$$

式中: C_c 为冠层覆盖因子,无量纲; C_s 为地表覆盖因子,无量纲; V_c 为作物冠层覆盖度(%); h 为冠层高度(cm); V_R 为地表枯落物覆盖度(%)。

蔡崇法公式:蔡崇法等^[18]通过分析径流小区人工降雨资料和部分天然降雨资料,计算了坡面产沙量与植被覆盖度的相关关系,建立了 C 因子与植被覆盖度之间的对数公式。

$$\begin{cases} V=0 & C=1 \\ 0 < V < 78.3 & C=0.6508-0.3436 \lg V \\ V > 78.3 & C=0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: V 为植被覆盖度(%)。

1.5 模型构建

本试验旨在研究不同生育期玉米近地表状况的变化特征,探讨其对土壤侵蚀的影响。在前人已知的利用植被覆盖度计算 C 因子模型的基础上,通过对得到的数据综合分析构建适宜黄土高原坡耕地的 C 因子模型。模型构建方法主要以植被覆盖度作为关键因子,株高、结皮厚度、地表粗糙度作为调节因子建立适宜的 C 因子估算模型。首先,将玉米不同生育期植被覆盖度代入 3 位学者的 C 值公式中,刘宝元公式还需将株高代入公式,得到预测 C 值。将 3 组预测 C 值与实测 C 值进行作图对比验证,计算均方根误差(RMSE),选出与实测 C 值最为接近、偏差最小的一位学者公式(不包括常数项)作为本次模型建立的基础函数形式,记为 A。其次,将植被覆盖度作为关键因子代入基础函数形式中形成 1 组数据集(a)。以株高、结皮厚度、地表粗糙度作为自变量,实测 C 值与数据集(a)的差值或比值作为因变量进行 2 个处理,回归分析得到因变量与株高、结皮厚度和地表粗糙度之间的最佳拟合公式。最后,通过计算均方根误差(RMSE)、纳什效率系数(NSE)、平均绝对误差(MAE)来比较得到的 2 个 C 因子模型的计算精度。

2 结果与分析

2.1 不同生育期玉米近地表状况的变化特征

玉米不同生育期的近地表状况变化特征见表 1。随着玉米生育期的不断推进,玉米的植被覆盖度和株高均显著增加,植被覆盖度从幼苗期到抽雄后期分别为 15.34%, 30.63%, 36.88%, 64.09%, 72.5%, 株高从幼苗期的 22.3 cm 迅速增加到成熟期的 216.12 cm。与裸地相比,玉米的结皮厚度从幼苗期开始增加,幼苗期、拔节初期、拔节中期、抽雄前期和抽雄后期的结皮厚度分别为 2.19, 2.23, 2.77, 3.62, 3.81 mm。地表粗糙度随着玉米的不断生长呈现先减小后增加的趋势,从幼苗期的 4.72 减小至拔节中期的

3.55,又从拔节中期开始增加,至抽雄后期地表粗糙度达到 3.76。

表 1 不同生育期玉米生长指标和地表状况的变化特征

生育期	植被覆盖度/%	株高/cm	结皮厚度/mm	地表糙度
幼苗期	15.34±0.12e	22.30±0.17e	2.19±0.05d	4.72±0.17a
拔节初期	30.63±0.32d	73.92±0.56d	2.23±0.03d	3.99±0.23b
拔节中期	36.88±0.74c	130.89±1.23c	2.77±0.06c	3.55±0.20c
抽雄前期	64.09±0.80b	195.45±0.40b	3.62±0.08b	3.58±0.23c
抽雄后期	72.05±1.10a	216.12±0.77a	3.81±0.05a	3.76±0.14bc

注:表中数值为平均值±标准差;不同小写字母表示各生育期差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 产沙量在玉米不同生育期的变化特征和实测 C 值

随着玉米的不断生长变化,径流小区产沙量从幼苗期开始不断减小,幼苗期产沙量达到 606.84 g/m²,至拔节初期、拔节中期、抽雄前期和抽雄后期产沙量分别为 503.04,407.22,247.53,215.59 g/m²,各阶段之间产沙量分别减少 103.8,95.82,159.70,31.94 g/m²;基于实测数据计算的 C 值在幼苗期、拔节初期、拔节中期、抽雄前期和抽雄后期分别为 0.76,0.63,0.51,0.31,0.27,实测 C 值从幼苗期开始逐渐变小,从幼苗期的 0.76 变为抽雄后期的 0.27,这说明玉米在生长过程中能够起到拦截泥沙的作用,其减沙效益在不断增强(表 2)。

表 2 玉米地实测 C 值及产沙量的变化特征

生育期	玉米地产沙量/ (g·m ⁻²)	C 值
幼苗期	606.84±88.37a	0.76±0.11a
拔节初期	503.04±62.59ab	0.63±0.02b
拔节中期	407.22±50.18b	0.51±0.08c
抽雄前期	247.53±63.15c	0.31±0.01d
抽雄后期	215.59±28.57c	0.27±0.02d

2.3 C 因子模型构建

2.3.1 基础函数形式的建立 将玉米不同生育期的植被覆盖度参数分别代入刘秉正等^[16]、刘宝元等^[17]和蔡崇法等^[18]3 位学者的公式中,此外刘宝元等^[17]公式还需将株高参数代入,进行计算得到相应的预测

表 3 C 因子模型评价

回归方程	R ²	均方根误差 (RMSE)	平均绝对误差 (MAE)	纳什效率系数 (NSE)
$C = -0.595\lg(0.01V) + 0.002H - 0.236T + 0.068R + 0.434$	0.895	0.024	0.019	0.984
$C = -0.595\lg(0.01V) \times (0.033H - 1.943T + 1.697R - 2.899)$	0.940	0.017	0.014	0.992

注:V 为植被覆盖度(%);T 为结皮厚度(mm);R 为地表糙度;H 为株高(cm)。

2.4 C 因子模型评价

表 3 为处理一和处理二 C 因子模型的拟合优度 (R^2)及 3 个模型精度的评价参数(RMSE、MAE 和 NSE), R^2 能够反映回归方程对于实测值的拟合优

C 值,并与实测 C 值对比,结果见图 1。

从图 1 可以看出,3 位学者公式计算得到的玉米 C 值均随着植被覆盖度的增加而减小,且大致趋势与实测 C 值一致,其中以刘秉正等^[16]趋势线与实测 C 值最为接近,同时通过计算 3 位学者公式的 RMSE,得到刘秉正等^[16]、刘宝元等^[17]和蔡崇法等^[18]公式的 RMSE 分别为 0.06,0.10,0.66,因为刘秉正等^[16]学者公式 RMSE 最小,且趋势线与实测 C 值最接近,因此选刘秉正等^[16]公式加入模型,保留刘秉正等^[16]公式包含植被覆盖度因子的函数类型及其系数,剔除其中的常数项,即为本次模型构建的基本形式。

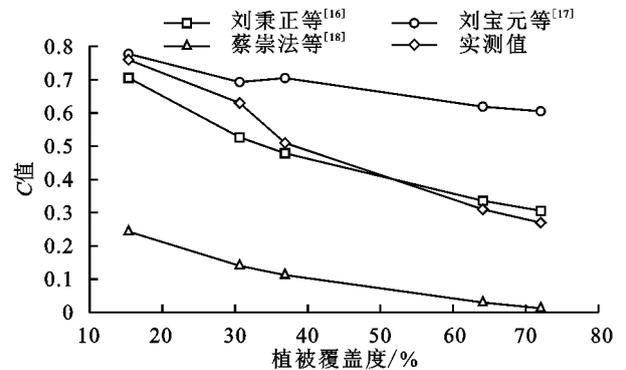


图 1 预测 C 值与实测 C 值对比

$$C = -0.595\lg(0.01V)$$

式中:V 为植被覆盖度(%).

2.3.2 加入调节因子的 C 因子模型 将株高、结皮

厚度和地表粗糙度加入模型中并进行 2 个处理,得到

$$\text{处理一: } \Delta_1 = 0.002H - 0.236T + 0.068R + 0.434$$

$$\text{处理二: } \Delta_2 = 0.033H - 1.943T + 1.697R - 2.899$$

式中: Δ_1 表示将植被覆盖度代入刘秉正等^[16]公式中所得的预测 C 值与实测 C 值相减所得的差值; Δ_2 为实测 C 值与将植被覆盖度代入刘秉正等^[16]公式中所得的预测 C 值相除所得的比值;H 为株高(cm);T 为结皮厚度(mm);R 为地表粗糙度,无量纲。

通过将以上 2 个处理与之前含有植被覆盖度的因式结合,得到本次构建的 C 因子模型(表 3)。

度, R^2 越接近于 1,表示拟合效果越好。RMSE、MAE 和 NSE 用来预测 2 种处理的精度,其中 RMSE 和 MAE 值越接近于 0 表明模型精度越高,NSE 值越接近于 1 表明模型越好。由表 3 可知,通过相减相除

进行优化后的C因子模型的 R^2 分别为0.895和0.940,拟合度均优。同时相减优化后的C因子模型RMSE、MAE和NSE分别为0.024,0.019,0.984,相减优化后的C因子模型RMSE、MAE和NSE分别为0.017,0.014,0.992,将2个处理进行比较,得到模型精度处理二大于处理一。综上,处理二拟合优度更接近于1,且3个评价参数值(RMSE、MAE和NSE)最优,选处理二作为本次构建的C因子模型。

$$C = -0.595 \lg(0.01V) \times (0.033H - 1.943T + 1.697R - 2.899) \quad (7)$$

3 讨论

坡耕地作物覆盖能够拦截降雨,削弱降雨动能,增加土壤入渗,减少地表径流,进而降低坡耕地土壤侵蚀速率。前人基于植被覆盖度得到较多计算C值的公式,但这仅体现了影响C因子的一个因素。株高是作物生长的主要的形态指标,作物距地面的垂直距离影响作物的降雨穿透量,改变茎秆流的大小,进而影响溅蚀^[28]。随着作物的不断生长,株高对边坡土壤侵蚀的抑制作用也在不断增强^[29]。除此之外,人们在进行田间管理时易使地表形成凹凸不平的微地形,地表粗糙度在一定程度上能够减小产流产沙量^[30-31]。在已有的研究^[32-34]中,土壤结皮能够促进地表径流,但对于是否促进产沙目前仍存在很大争议。相较于大多数研究就植被覆盖在不同月份和季节对C因子展开研究,本试验侧重于研究作物不同生育期内近地表状况参数和产沙量的变化特征,将植被覆盖度与株高、结皮厚度和地表粗糙度进行综合考虑建立新的C值估算模型,有利于提高C值准确性。同时本研究仍有许多不完善的地方可供后续学者继续深入研究,比如:(1)本研究中只考虑作物地上部分对土壤侵蚀的影响。根系能够增加土壤入渗,减少土壤侵蚀^[19],因此后续研究中可将根系作为主要因子加入模型。(2)不同作物对土壤侵蚀的抑制作用不同^[28],增加作物品种或作物混种优化当地的C值模型,能够提高C值公式的适用性。(3)在坡面处理上,除进行作物+结皮+糙度处理外,可增加不同的处理方式和坡度选择。(4)在建模方面,本研究关于C值的估算仅限于回归分析,更精确直观的数学建模公式可能对C因子有更深入的了解,更多学者进行C值估算建模提出更有效的思路。

坡耕地土壤侵蚀严重,随着C因子模型的不断建立与完善,可以根据已经得到的当地C因子模型来调节土壤地表状况以改善土壤侵蚀的情况,

比如:(1)通过增加地表覆盖—留茬。留茬是指在坡耕地表面保留覆盖一层作物残留物,Wang等^[35]通过研究黄土高原坡耕地残茬覆盖对土壤侵蚀的影响发现,小麦残茬覆盖处理的坡面较传统耕作措施能够减少径流和泥沙损失,增加土壤入渗;同时作物留茬方法节省资源,对环境无污染,符合改善生态环境的基本原则。(2)不同的耕作措施影响坡地糙度,进一步影响土壤的入渗速率,从而改变坡面的拦蓄能力。吴发启等^[24]通过模拟人工降雨研究了不同耕作措施对增强降水入渗速率的影响,在已知C因子模型条件下,改变耕作管理措施,如通过等高耕作、人工掏挖、人工锄耕等调节糙度大小来进行水土流失治理,改善土壤侵蚀。

4 结论

综上所述,本研究通过人工降雨模拟试验,研究了玉米5个不同生育期近地表状况的变化特征,得到随着玉米的不断生长,近地表参数不断变化,玉米拦截泥沙的作用增强,减沙效益增强。同时本研究提出了一种新型的C因子建模方式,即将植被覆盖、株高、地表粗糙度和土壤结皮等因素综合考虑,以植被覆盖度作为关键因子,株高、地表粗糙度和土壤结皮作为调节因子建立模型,通过对 R^2 和评价参数的分析,建立的模型拟合效果好,模型精度高,有利于提高C值估算的准确性以及在黄土高原的适用性,为精确黄土高原坡耕地土壤侵蚀预报模型提供科学依据。

参考文献:

- [1] 张科利,唐克丽,雷阿林.黄土丘陵区退耕上限坡度的研究论证[J].科学通报,1998,43(2):200-203.
- [2] 唐克丽.中国水土保持[M].北京:科学出版社,2004.
- [3] 张岩,袁建平,刘宝元.土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J].应用生态学报,2002,13(8):1033-1036.
- [4] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the rocky mountains [M].Guide for selection of practices for soil and water conservation. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 282. Washington D C: US Government Printing Office,1965:10-36.
- [5] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses[M].A guide to conservation Planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537. Washington D C: U S Government Printing Office, 1978:17-34.
- [6] Biesemans J, Meirvenne M V, Gabriels D. Extending

- the RUSLE with the Monte Carlo error propagation technique to predict long-term average off-site sediment accumulation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 55(1): 35-42.
- [7] Risse L M, Nearing M A, Laflen J M, et al. Error assessment in the Universal Soil Loss Equation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(3): 825-833.
- [8] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. Washington D C: United States Departments of Agriculture, 1997: 143-183.
- [9] 吴发启, 林青涛, 路陪, 等. 我国坡地土壤侵蚀影响因子 C 的研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(6): 1-11.
- [10] 冯强, 赵文武. USLE/RUSLE 中植被覆盖与管理因子研究进展[J]. *生态学报*, 2014, 34(16): 4461-4472.
- [11] 张岩, 刘宝元, 史培军, 等. 黄土高原土壤侵蚀作物覆盖因子计算[J]. *生态学报*, 2001, 21(7): 1050-1056.
- [12] 于东升, 史学正, 吕喜玺. 低丘红壤区不同土地利用方式的 C 值及可持续性评价[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(1): 71-76.
- [13] 林素兰, 黄毅, 聂振刚, 等. 辽北低山丘陵区坡耕地土壤流失方程的建立[J]. *土壤通报*, 1997, 28(6): 251-253.
- [14] 张宪奎, 许靖华. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. *水土保持通报*, 1992, 12(4): 1-9.
- [15] 唐寅, 代数, 蒋光毅, 等. 重庆市坡耕地植被覆盖与管理因子 C 值计算与分析[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 53-59.
- [16] 刘秉正, 刘世海, 郑随定. 作物植被的保土作用及作用系数[J]. *水土保持研究*, 1999, 6(2): 32-36.
- [17] 刘宝元, 毕小刚, 符素华. 北京土壤流失方程[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 70-81.
- [18] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 19-24.
- [19] 吴启发, 张洪江. 土壤侵蚀学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [20] 侯喜禄, 杜成祥. 不同植被类型小区的径流泥沙观测分析[J]. *水土保持通报*, 1985, 5(6): 35-37.
- [21] 李森, 宋孝玉, 沈冰, 等. 黄土沟壑区不同植被对产流产沙的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(1): 118-120.
- [22] 马波, 刘雨鑫, 吴发启. 植大豆对坡耕地径流侵蚀产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4): 32-36.
- [23] 马璠. 作物植被对坡耕地土壤侵蚀的影响研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2009: 25-48.
- [24] 吴发启, 赵西宁, 崔卫芳. 坡耕地耕作管理措施对降雨入渗的影响[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 115-117.
- [25] 吴发启, 赵西宁, 余雕. 坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J]. *水土保持通报*, 2003, 23(1): 16-18, 78.
- [26] 杨晓芬, 吴发启, 马波, 等. 黄土坡耕地玉米作物的防蚀作用研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(10): 97-102.
- [27] 章文波, 路炳军, 石伟. 植被覆盖度的照相测量及其自动计算[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(2): 39-42.
- [28] 孙增慧, 张卫华. 植被冠层对降雨空间分布特征及土壤侵蚀影响的研究[J]. *西部大开发: 土地开发工程研究*, 2016(6): 43-49.
- [29] Ma B, Liu G, Ma F, et al. Effects of crop-slope interaction on slope runoff and erosion in the Loess Plateau[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 2018, 69(1): 12-25.
- [30] 郑子成. 坡耕地地表糙度及其作用研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2002: 46-55.
- [31] 赵龙山. 黄土坡地地表糙度特征及其对入渗, 产流产沙的影响研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2015: 65-78.
- [32] 蔡强国. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [33] 吴发启, 范文波. 土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 97-101.
- [34] 陈正发, 夏清, 史东梅, 等. 基于模拟降雨的土壤表土结皮特征及坡面侵蚀响应[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 6-11.
- [35] Wang L H, Ma B, Wu F Q. Effects of wheat stubble on runoff, infiltration, and erosion of farmland on the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall[J]. *Solid Earth*, 2017, 8(2): 1-28.