

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.01.022

CSTR:32310.14.stbxb.2025.01.022

谢欣利, 李晴岚, 王林华, 等. 黄土高原作物 C 因子新方法[J]. 水土保持学报, 2025, 39(1): 294-302.

XIE Xinli, LI Qinglan, WANG Linhua, et al. A new method to estimate the cover management factor on the loess plateau in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 294-302.

## 黄土高原作物 C 因子新方法

谢欣利<sup>1,2,3</sup>, 李晴岚<sup>2</sup>, 王林华<sup>4</sup>, 张晖<sup>3</sup>, 吴发启<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学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.中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055; 3.深圳市自然资源与不动产评估发展研究中心, 广东 深圳 518055; 4.中国科学院华南植物园, 广州 510650)

**摘要:** [目的]为探究不同作物覆盖与管理措施下坡面土壤流失率、作物覆盖与管理因子的响应机制, 以便更精准地评价作物覆盖与管理措施对土壤侵蚀的抑制作用。[方法]以谷子为研究对象, 采用人工模拟降雨, 设置作物、有糙度作物、有结皮作物、裸露、有糙度、有结皮 6 个小区坡面条件, 分别记作 A1、A2、A3、B1、B2、B3。通过 Matlab 数值模拟得到 SLR 估算模型, 结合降雨侵蚀力分布曲线计算不同 C 因子值。[结果]地表糙度、土壤结皮均能进一步减弱作物小区的水土流失, 与作物小区相比, 有糙度作物小区 SLR 平均减少 21.00%, 有结皮作物小区平均减少 16.50%。得到的作物、有糙度作物、有结皮作物小区土壤侵蚀率模型 3 种土壤侵蚀率模型, 结合降雨侵蚀力分布情况可计算全生育期 C 因子值。经淳化野外数据验证, 作物、有糙度作物、有结皮作物小区土壤侵蚀率模型均可达到较精确的预测效果, 其全生育期估算 C 因子分别为 0.30、0.25、0.25, 纳什系数分别为 0.96、0.87、0.75。[结论]研究结果为开展全国性的 C 因子研究提供一定参考依据。

**关键词:** 土壤侵蚀; C 因子; 植被盖度; 地表糙度; 土壤结皮

中图分类号: S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0294-09

## A New Method to Estimate the Cover Management Factor on the Loess Plateau in China

XIE Xinli<sup>1,2,3</sup>, LI Qinglan<sup>2</sup>, WANG Linhua<sup>4</sup>, ZHANG Hui<sup>3</sup>, WU Faqi<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest Agriculture and Forest University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China; 3.Shenzhen Real Estate Assessment Center, Shenzhen, Guangdong 518055, China; 4.South China Botanical Gardens, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the combined effect of crop cover and crop management practices on preventing soil loss and improving the accuracy of C-factor estimation. [Methods] Six millet plots with different treatments, i. e., crop plot (C1), crop-roughness plot (C2), crop-crust plot (C3), bare plot (B1), roughness plot (B2), and crust plot (B3), were established and the soil loss at four growth stage was determined under simulated rainfall. The C factor was calculated using soil loss ratio (SLR). The major factors affecting SLR were also analyzed and their correlations with SLR were then regressed through numerical simulation using MATLAB. Subsequently, the SLR estimation models designed for soil erosion prediction on the Loess Plateau could be built. Finally, the C factor could be calculated using the proposed SLR estimation model combined with the distribution curve of rainfall erosivity. [Results] Surface roughness and soil crust could reduce soil loss in crop plot. Compared with  $SLR_{crop}$ ,  $SLR_{crop-roughness}$  and  $SLR_{crop-crust}$  were on average 21.00% and 16.50% lower, respectively. The model formulas of crop plot, crop-roughness plot,

收稿日期: 2024-07-07

修回日期: 2024-09-02

录用日期: 2024-10-15

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-12-09

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41977065, 41271288); 国家基础研究计划项目 (2007CB407201-5)

第一作者: 谢欣利 (1994—), 女, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: xinli-xie@nwafu.edu.cn

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

http://stbxb.alljournal.com.cn

crop-crust plot were obtained, through validating by field soil and water loss data conducted in Chunhua County, the model formulas could achieve accurate prediction. The estimated C values for the whole growth stage were 0.30, 0.25 and 0.25, respectively, with the Nash coefficients being 0.96, 0.87 and 0.75, respectively. [Conclusion] The results can provide some insights for estimating C values at national scales.

**Keywords:** soil erosion; C factor; vegetation coverage; surface roughness; soil crust

Received: 2024-07-07

Revised: 2024-09-02

Accepted: 2024-10-15

Online(www.cnki.net): 2024-12-09

土壤侵蚀造成水肥流失、降低作物产量,影响农业的可持续发展,且破坏水质,扰乱生态系统的生物多样性,是最严重的土壤退化形式之一。因此,世界范围对土壤侵蚀评估方法及土壤保护措施日益关注。通用土壤流失方程(USLE)<sup>[1]</sup>及其修订形式(RUSLE)<sup>[2]</sup>是应用最广泛的土壤侵蚀率估算方法。RUSLE 优于 USLE 的方面,在于前者能估算作物覆盖与管理因子(cover and management factor, C 因子)<sup>[3]</sup>。RUSLE 不再基于土壤流失率表计算 C 因子值,而是将代表土地利用程度的 PLU(prior-land-use factor)、冠层覆盖的 CC(crop-cover factor)、地表覆盖的 SC(surface-cover factor)、地表粗糙度的 SR(surface roughness factor)和土壤水分质量分数的 SM(soil moisture factor)5 个因子连乘得到土壤流失率 SLR(soil loss ratio),再进一步结合降雨侵蚀力计算不同的 C 因子值。C 因子评价的是作物覆盖与管理措施防止土壤侵蚀的能力,是准确估算土壤侵蚀率的重要参数。在农业生产中,人们可通过选择覆盖作物的种类、实施作物管理措施来调节 C 因子,减少土壤侵蚀程度,因此,C 因子是防治土壤流失,推动农业经济可持续发展必须研究的关键因子。

近几十年,一些研究<sup>[4-5]</sup>通过建立覆盖度与 C 因子关系式估算 C 因子。且随着 3S 技术的发展,在大尺度区域,C 因子的估算方法涉及 C 因子与植被盖度指数(normalized difference vegetation index, NDVI)间线性、非线性的回归模型<sup>[6]</sup>,利用高分辨率卫星图像绘制相应的 C 因子分布图等。然而,覆盖度只是表征作物覆盖的指标之一,并未体现 C 因子定义中的管理因素,如粗糙度、结皮等反映土壤微地形与地表结构的因子。替代方法并不能全面地评估 C 因子。

以往研究多分别从覆盖作物、管理措施防控土壤流失的角度开展研究,并取得重要研究成果。覆盖作物通过多种方式影响水土流失。作物冠层通过拦截雨滴动能减少土壤剥离<sup>[7]</sup>。株高与雨滴动能呈正相关,土壤溅蚀量随着株高增加而增加<sup>[8]</sup>。根系固结导致降雨入渗增加,土壤侵蚀减少<sup>[9]</sup>。地表粗糙度是农田管理措施导致的微地形结构,降低径流速度,截流泥

沙<sup>[10]</sup>,很多土壤侵蚀预报模型,如 WEPP 等均将地表糙度作为重要参数之一。但目前,关于地表糙度对坡面土壤侵蚀作用的认识仍不够全面,HAIRSINE 等<sup>[11]</sup>研究发现,地表糙度增加土壤抵抗雨滴击打的能力,提高地表的蓄水能力,从而削弱径流速度,减弱土壤流失量;HELMING 等<sup>[12]</sup>研究发现,相较于光滑地表,粗糙地表水流更集中,形成沟头,冲刷作用增强,进一步形成细沟,导致侵蚀力增强。降雨过程中,土壤结皮的形成严重阻碍土壤的通透性,制约土壤水分运动,直接影响作物生长发育。目前,关于结皮对土壤侵蚀的影响方面仍存在着争议。部分学者<sup>[13]</sup>认为,结皮通过降低土壤入渗率,增加地表径流的冲刷动能,加剧土壤的分散,促进土壤侵蚀;但也有研究<sup>[14]</sup>通过对比结皮、无结皮坡面的产流产沙情况发现,土壤结皮能够通过增强土壤抗蚀性有效减弱土壤侵蚀。C 因子估算模型发展过程中,WEPP 模型土壤模块的水文参数和土壤分离参数中均有考虑结皮因子<sup>[15]</sup>。因此,将覆盖作物参数、地表糙度、土壤结皮共同纳入 C 因子估算,对进一步完善 C 因子模型具有重要意义。

目前,我国对 C 因子的研究主要集中于现象观测,对造成严重水土流失的农地,覆盖作物与管理措施如何耦合交互地作用于侵蚀过程,影响 C 因子仍有待进一步研究。因此,以谷子(*Setaria italica* L.)为研究对象,通过人工模拟降雨试验,量化分析覆盖作物及管理措施对 SLR 的影响,建立适应于黄土高原地区的 SLR 估算模型,以便与降雨侵蚀力结合,估算不同的 C 因子,以期为区域侵蚀预报模型建立提供理论依据,同时为开展全国性 C 因子研究提供科学思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省咸阳市杨凌高新技术产业示范区,该区属于渭河流域关中平原(107°59'00"~108°08'00"E, 34°14'00"~34°20'00"N),海拔 468 m。地处黄土高原南部边缘地带,主要气候为大陆性季风型半湿润气候,年降雨量为 635~646 mm,区内 60%降雨集中在 7—10 月,

且多大到暴雨,平均气温常年为 12.9 ℃。土壤类型为关中地区典型的黄土,pH 为 7.85,有机质质量分数为 12.5 g/kg,速效磷、速效钾、碱解氮质量分数分别为 8.52、126.31、47.68 mg/kg,机械组成为砂粒、粉粒、黏粒质量分数分别为 9.25%、67.44%、23.21%。

## 1.2 试验设计

进行降雨模拟试验的径流小区用于分析覆盖作物、管理措施参数对土壤流失率的影响,进一步结合降雨侵蚀力资料,建立 C 因子估算模型。淳化径流场的田间小区用于验证新建模型。

1.2.1 径流小区试验设计 降雨模拟试验位于西北农林科技大学资源环境学院水土保持工程实验室的径流小区。本试验人工降雨装置采取中国科学院水利部水土保持研究所制造的侧喷式降雨机,喷头高度为 6 m,两侧喷头座架距离为 7 m,有效降雨面积为 5 m×7 m。径流小区规格为 4 m×1 m。由于黄土高原地区存在大量 3°~8°的缓坡耕地<sup>[16]</sup>,试验坡度设置为 5°。根据当地降雨多集中于夏秋两季,且多有大到暴雨的特点,设计 80 mm/h 模拟暴雨条件,每次降雨时间为 1 h。为避免天然降雨对试验结果产生影响,天然降雨时,所有小区均需进行遮盖处理。

下设 6 个径流小区。在其中 3 个径流小区上种

植谷子(A1、A2、A3),并设相同条件裸坡对照 3 个(B1、B2、B3)。供试谷子品种为“晋谷 29”,定苗后的行距为 20 cm,株距为 10 cm,等高种植,条播。选用有机肥(为腐熟羊粪和鸡粪)和磷酸钙作为底肥,用量分别为 25 000、1 000 kg/hm<sup>2</sup>;并于同一时间种植于径流小区旁的试验田,以供根系样本采集。对其中作物小区(A1)和裸地小区(B1)翻耕后,用耙耧平整地表;作物小区(A2)和裸地小区(B2)翻耕平整后,进行人工锄耕形成地表糙度;作物小区(A3)和裸地小区(B3)翻耕平整后,通过预降雨形成结皮,降雨强度 80 mm/h,历时 20 min,为防止坡面产流对地表形态造成较大改变,预降雨采用间断降雨的形式,以避免坡面径流的产生。预降雨间断次数和间断时间均根据坡面实际产流情况而定,最终保证各径流小区预降雨总时间为 20 min 即可。依据谷子的生长情况将生育期划分为拔节期、抽穗初期、灌浆初期、籽粒成熟前期 4 个生长阶段,分别进行人工降雨试验,谷子不同生育期的观测时间及覆盖作物参数变化特征见表 1。在小区出口处用塑料小桶收集径流和泥沙样品,每隔 2 min 收集 1 min,直至产流结束。将径流泥沙样本静置 24 h,取出上清液,然后将沉淀物在 105 ℃烘干,并测定其重量。求算产沙量(g/m<sup>2</sup>)。

表 1 谷子生育期观测时间及覆盖作物参数变化特征

Table 1 Changes in the characteristics of crop cover parameters and AMC at each observation date during millet growth stage

观测日期(年-月-日)	生育期	记号	覆盖度	株高/m	前期水分体积分数/%
2016-06-10	拔节期	R1	0.47±0.20b	0.85±0.03d	23.13±0.017a
2016-06-20	抽穗初期	R2	0.92±0.04a	1.11±0.02c	24.02±0.002a
2016-06-30	灌浆初期	R3	0.97±0.01a	1.51±0.04b	23.33±0.004a
2016-07-10	籽粒成熟前期	R4	0.99±0.01a	1.73±0.04a	22.89±0.006a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同生育期间差异显著( $p < 0.05$ )。

1.2.2 淳化径流场侵蚀量数据收集 淳化泥河沟径流场设在泥河沟流域上游的塬面上。径流场谷子于 5 月左右播种,然后发芽生长,7 月覆盖率最高。根据谷子生长情况,以 10 d 为 1 个步长将全生育期划分为 4 个时间段(R1、R2、R3、R4)。为与本研究试验设计一致,作物试验中,降雨在作物不同生长期仅进行 1 次;裸地试验中,在对应的生长期,至少重复 3 次降雨。于 6—8 月,从 4 组田间小区(每组 3 个重复)中选取 82 个土壤流失量观测数据来计算 SLR 实测值,后期结合王万忠等<sup>[17]</sup>提出的降雨侵蚀力分布曲线,加权得到全生育期 C 因子实测值。所选的径流小区坡度均为 5°,面积为 5 m×20 m,具体特征见表 2。

## 1.3 考虑管理措施因素的 C 因子模型构建

1.3.1 SLR 模型构建方法 确定关键参数模型步骤。首先从作物指标(盖度、株高、根系)、土壤前期水分体积分数出发,分析作物小区(A1)的主要影响参数,基于

Matlab 多元回归功能,建立作物小区 SLR 关键参数模型,记为  $SLR_{crop}$ 。加入调节参数模型, $SLR_{crop}$  形式确定后,进一步结合有糙度、有结皮作物小区侵蚀特征,加入调节参数,提出有糙度、有结皮作物小区 SLR 估算模型。首先,分析有糙度(A2)、有结皮(A3)作物小区 SLR 的显著影响指标。进一步基于 USLE 的定义,将有糙度小区(A2)、有结皮小区(A3)与裸露小区(B1)土壤侵蚀量的比值分别定义为  $SLR_{roughness}$ 、 $SLR_{crust}$ ,分别为  $SLR_{roughness}$  与显著糙度指标间的函数关系式, $SLR_{crust}$  与显著结皮指标间的函数关系式。本研究在  $SLR_{crop}$  的基础上,进一步通过乘积的形式,结合地表糙度、土壤结皮的调节参数关系式,得到有糙度、有结皮作物小区 SLR 估算模型,分别记为  $SLR_{crop-roughness}$ 、 $SLR_{crop-crust}$ ,计算公式为:

$$SLR_{crop-roughness} = SLR_{crop} \times SLR_{roughness} \quad (1)$$

$$SLR_{crop-crust} = SLR_{crop} \times SLR_{crust} \quad (2)$$

结合不同生育期降雨侵蚀力百分比估算全生育期 C 因子值。

1.3.2 C 因子值计算 基于小区试验观测值的 C 因子值计算。依据 USLE 的定义,C 因子由不同生长阶段的 SLR 加权降雨侵蚀力算得,WISCHMEIER 等<sup>[1]</sup>提出,SLR 为有作物覆盖与管理措施的农地与相应清耕休闲地或裸地的土壤流失量之比,其值大小取决于具体的作物覆盖、管理措施及轮作顺序等<sup>[18]</sup>。本研究将作物小区(A1)、有糙度作物小区(A2)、有结皮作物小区

(A3)土壤流失量与裸露小区(B1)土壤流失量的比值分别定义为  $SLR_{crop}$ 、 $SLR_{crop-roughness}$ 、 $SLR_{crop-crust}$ 。

不同试验措施的 C 因子值计算公式为:

$$C_i = \frac{SLR_i \times R_i}{R} \quad (3)$$

式中:SLR<sub>i</sub> 为第 i 个生育期的土壤流失率,i 为生育期;R<sub>i</sub> 为第 i 个生育期降雨侵蚀力,(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a);R 为全生育期的总降雨侵蚀力,(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)。

表 2 所选径流小区特征

Table 2 Characteristics of selected runoff plots

g/m<sup>2</sup>

小区编号	小区类型	试验措施	土壤流失量			
			R1	R2	R3	R4
1	裸地	翻耕后,耙平地表	58.58	35.06	36.73	31.15
2						
3						
4						
5	谷子	翻耕耙平地表,等高点种谷子	44.52	13.32	9.18	5.61
6						
7						
8	谷子糙度	种植谷子,于株行距间锄耕形成糙度	47.45	7.36	5.14	3.43
9						
10	谷子结皮	种植谷子,保护土壤不受破坏,获取暴露于自然降雨条件下的物理结皮坡面	41.01	8.41	6.98	5.31
11						
12						

注:降雨流失量是 3 个重复试验小区 10 d 总降雨流失量的平均值。R1 为 1 月、6 月 1 日至 6 月 10 日;R2 为 2 月、6 月 11 日至 6 月 20 日;R3 为 3 月、6 月 21 日至 6 月 30 日;R4 为 4 月、7 月 1 日至 7 月 10 日。

1.4 管理措施评价指标测定方法

1.4.1 作物指标的测定 株高:定苗后,任选 5~10 株作物,测量其顶端至地面的距离,取平均值。

盖度:植被盖度采用“照相法”测量,借助 Image J 软件处理于覆盖作物上方 2 m 高处拍摄的数字图像。

根系:在备用种植地块中,分层采集根样。在坡的上、中、下各选一点采用剖面法,按 0~5、5~10、10~20 cm 土层采集土样。将含根土样装入致密的尼龙网袋中,用水冲洗,挑选出所有根系。利用“WinRHIZO 根系分析系统”对根系进行扫描分析,得到不同土层的根重密度、根系平均直径密度、根系体积密度、根系表面积密度,根长密度参数。最后于 80 °C 烘干 72 h 后称量根系干重。

1.4.2 地表糙度指数的测定 采用链条法测定糙度。降雨前后于小区坡面随机测取 5 组数据,取平均值,计算公式为:

$$C_r = (1 - L2/L1) \times 100 \quad (4)$$

式中:C<sub>r</sub> 为任意方向上的地表糙度;L1 为链条原长,m;L2 为放置地表之后的链条两端直线距离,m。

1.4.3 土壤结皮指数的测定 降雨前后于小区不同部位随机采集结皮样本 10 块,用游标卡尺测量结皮厚度。同时在坡面不同位置(坡上、坡中、坡下)各选

择 1 处垂直拍摄地表结皮状况,用 Image J 勾绘地表结皮区域面积,取平均值获得结皮覆盖面积。

1.4.4 土壤水分体积分数的测定 在每一观测阶段(表 1),采用土钻法(φ=5 cm)对小区表层土壤水分体积分数进行测量。

1.5 统计分析

采用 Excel 2013 软件进行数据整理和作图,SPSS 20.0 软件进行数据统计。谷子不同生育期 SLR 的差异显著性采用单因素方差分析和 LSD 法确定(p<0.05,双尾),谷子根系特征参数与 SLR 的关系采用相关性分析确定。最后采用 MATLAB 2018 多元回归函数功能,建立适应于黄土高原地区的 SLR 估算模型。新建模型在实地中的应用精度由纳什系数(NSE)衡量,纳什系数计算公式为:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q'_t - Q_m)^2}{\sum_{t=1}^T (Q'_t - Q_o)^2} \quad (5)$$

式中:NSE 为纳什系数;Q<sub>o</sub> 为观测值平均值;Q<sub>o</sub> 为观测值;Q<sub>m</sub> 为估算值;t 为时间。当 NSE 趋近于 1,表明模型质量好,可信度高;当 NSE 趋近于 0,表明模拟结果接近观测值的平均水平,总体结果可信,但模拟过程误差大;NSE 远小于 0,表明模型不可信。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同试验措施 SLR 值变化

图 1 为不同试验措施 SLR 的变化情况,  $SLR_{crop}$  比  $SLR_{crop-roughness}$ 、 $SLR_{crop-crust}$  大。ANOVA 分析结果表明, 不同试验措施、不同生育期间 SLR 存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。拔节期(R1)SLR 相应较高, 随着生育期推进, SLR 呈逐渐减小趋势。对于同一生育期, SLR 值大小分别为有糙度作物小区 < 有结皮作物小区 < 作物小区。从拔节期(R1)到子粒成熟前期(R4),  $SLR_{crop-roughness}$  与  $SLR_{crop}$  相比, 分别减少 9%、42%、32%、19%; 同时,  $SLR_{crop-crust}$  与  $SLR_{crop}$  相比, 分别减少 9%、38%、19%、0。

### 2.2 $SLR_{crop}$ 与作物指标、前期水分体积分数的关系

作物指标由地上部分的作物盖度、株高及地下部分的根系参数组成。根系参数显著影响  $SLR_{crop}$  (表 3)。除根系平均直径与  $SLR_{crop}$  间呈正相关, 其余根系特征参数均与  $SLR_{crop}$  负相关。除根系平均直径、根系体积、根长 > 1 mm 外, 其余根系参数均与  $SLR_{crop}$  呈极显著性相关 ( $p < 0.01$ ), 且最大相关系数多位于 0~5 cm。

表 3  $SLR_{crop}$  与谷子根系特征参数的相关性

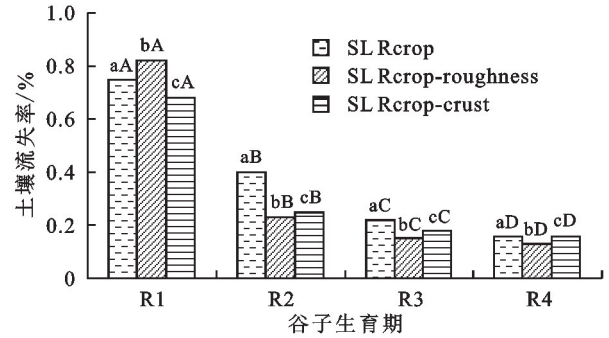
Table 3 Correlations between  $SLR_{crop}$  and crop cover parameters

土层深度/cm	RWD	RD	RVD	RSAD	RLD			N
					<0.5 mm RLD1	0.5~1.0 mm RLD2	>1.0 mm RLD3	
0~5	-0.95**	0.65**	-0.22	-0.66**	-0.90**	-0.91**	-0.54*	36
5~10	-0.70**	0.64**	-0.46	-0.76**	-0.86**	-0.89**	-0.39	
10~20	-0.90**	0.34	-0.63**	-0.83**	-0.94**	-0.96**	-0.52*	

注: RWD 为根重密度,  $g/cm^3$ ; RD 为根系平均直径密度,  $cm/cm^3$ ; RVD 为根系体积密度,  $cm^3/cm^3$ ; RSAD 为根系表面积密度,  $cm^2/cm^3$ ; RLD 为根长密度,  $cm/cm^3$ ; \* 和 \*\* 分别表示显著相关和极显著相关。

采用拟合回归分析其余作物指标对  $SLR_{crop}$  的贡献 (表 4)。  $SLR_{crop}$  除与株高指数相关外, 与其余指标均呈线性相关。总体而言, 除前期水分质量分数 ( $R^2 = 0.02$ )

0~5 cm 根重密度 ( $R = -0.95, p < 0.01$ ), 0~5 cm 0.5~1 mm 根长 ( $R = -0.91, p < 0.01$ ) 代表根系特征参数对  $SLR_{crop}$  的影响。



注:  $SLR_{crop}$ 、 $SLR_{crop-roughness}$ 、 $SLR_{crop-crust}$  分别为不同试验措施的 SLR 值。R1、R2、R3、R4 分别代表拔节期、抽穗初期、灌浆初期、子粒成熟前期。图中不同小写字母表示试验措施间在  $p < 0.05$  水平上差异显著, 不同大写字母表示生育期间在  $p < 0.05$  水平上差异显著。

图 1 谷子季不同试验处理 SLR 值

Fig.1 Soil loss ratio (SLR) recorded in different treatments during the millet experimental period

表 4  $SLR_{crop}$  与作物指标关系方程

Table 4 Equations of the relationships between  $SLR_{crop}$  and crop cover parameters, AMC

作物指标	标记	关系方程	$R^2$	N
盖度	CC	$SLR_{crop} = -0.758 5CC + 0.972 6$	0.899	36
株高/m	PH	$SLR_{crop} = 1.948 9 e - 1.425 PH$	0.898	60
前期水分质量分数/%	AMC	$SLR_{crop} = -4.111 7 AMC + 1.351 8$	0.020	36

注:  $R^2$  为方程的决定系数。

### 2.3 $SLR_{crop-roughness}$ 与地表糙度、 $SLR_{crop-crust}$ 与土壤结皮参数的关系

土壤流失率与测得的地表糙度、土壤结皮参数间的相关性不同 (表 5)。  $SLR_{crop-roughness}$  与糙度参数均呈负相关, 其中, 与雨前糙度 ( $C_m$ ) 相关性最低, 与雨后糙度 ( $C_{r1}$ ) 间的相关系数最大 ( $R^2 = -0.74, p < 0.01$ )。  $SLR_{crop-crust}$  与初始结皮覆盖度 ( $C_{c0}$ )、结皮厚度差异率 ( $T'_c$ ) 不相关, 与其余结皮指标呈极显著相关 ( $p < 0.01$ ), 其中, 与初始结皮厚度 ( $T_{c0}$ )、雨后结皮

外, 其余指标均与  $SLR_{crop}$  显著相关,  $R^2$  均为 0.9。因此, 盖度、株高、根重密度 (0~5 cm)、0.5~1 mm 根长 (0~5 cm) 可代表覆盖作物对  $SLR_{crop}$  的影响。

厚度 ( $T_{c1}$ ) 呈负相关, 与雨后结皮覆盖度 ( $C_{c1}$ )、结皮覆盖度差异率 ( $C'_c$ ) 呈正相关。

### 2.4 C 因子估算模型的建立

综上所述, 不同生育期, 覆盖作物、地表糙度、土壤结皮均对土壤流失有显著影响。综合考虑作物、地表糙度、土壤结皮参数来建立适应于黄土高原地区的 C 因子估算模型理论可行, 由表 6 可知, 多元回归分析结果表明新建模型具有统计学意义,  $R^2$  为 0.52~0.98。

表 5 糙度、结皮指标测量情况及与土壤流失率的相关性

Table 5 The measured roughness and crust parameters and their correlation coefficients with SLR values

小区	测量因子	R1	R2	R3	R4	$p$	$N$
有糙度作物(A2)	$C_{r0}$	1.82	3.21	3.63	2.17	-0.46	
	$C_{r1}$	1.28	2.88	3.13	2.28	-0.74**	60
	$C'_r$	30.08	14.62	13.96	10.48	-0.65**	
	$T_{C0}$	3.50	3.61	3.92	3.39	-0.65**	120
	$T_{C1}$	3.63	3.89	4.12	3.66	-0.68**	120
有结皮作物(A3)	$C_{c0}$	98.41	98.22	97.32	96.35	-0.29	36
	$C_{c1}$	98.51	97.71	96.93	95.99	0.91*	36
	$T'_c$	3.71	7.75	5.11	8.08	0.36	120
	$C'_c$	0.10	-0.51	-0.40	-0.37	0.79**	36

注: $C_{r0}$ 、 $C_{r1}$ 、 $r$  分别为初始、雨后糙度; $C'_r$  为糙度差异率,%; $T_{C0}$ 、 $T_{C1}$  分别为初始、雨后结皮厚度,mm; $C_{c0}$ 、 $C_{c1}$  分别为初始、雨后结皮覆盖度,%; $T'_c$ 、 $C'_c$  分别为结皮厚度、结皮覆盖度差异率,%; $p$  为皮尔逊相关系数;\*、\*\* 分别表示差异在 0.05,0.01 级别显著。

表 6 土壤流失率(SLR)估算公式

Table 6 The novel SLR factor estimation equations

小区	模型	公式	$R^2$	$N$
作物(A1)	SLR <sub>crop</sub>	SLR=0.99-0.20CC-0.45PH-174.99RWD+0.84RLD2	0.98	108
有糙度(A2)	SLR <sub>roughness</sub>	SLR=-0.09C <sub>r1</sub> +1.06	0.65	60
有结皮(A3)	SLR <sub>crust</sub>	SLR=-0.15T <sub>c1</sub> +1.42	0.52	120
有糙度作物(B2)	SLR <sub>crop-roughness</sub>	SLR=(0.99-0.20CC-0.45PH-174.99RWD+0.84RLD2)×(-0.09C <sub>r1</sub> +1.06)	0.92	108
有结皮作物(B3)	SLR <sub>crop-crust</sub>	SLR=(0.99-0.20CC-0.45PH-174.99RWD+0.84RLD2)×(-0.15T <sub>c1</sub> +1.42)	0.90	108

### 3 讨论

作物覆盖和管理措施对减弱土壤侵蚀发挥着显著影响,同一生育期为  $SLR_{crop} > SLR_{crop-crust} > SLR_{crop-roughness}$ 。PREITI 等<sup>[19]</sup>定量分析多种农作制度下的 C 因子表明,种植饲料作物,同时施加耕作措施的农作制度 C 因子值最低,为 0.089,与其他农作制度相比,该农作制度具有最强的土壤抗侵蚀能力。覆盖作物参数和前期水分体积分数对土壤侵蚀的影响存在差异(表 3、表 4)。覆盖作物参数包括覆盖度(CC)、株高(PH)、0~5 cm 根重密度(RWD)、0~5 cm 0.5~1 mm(RLD2)根长均与 SLR<sub>crop</sub> 显著相关,而前期水分质量分数(AMC)与 SLR<sub>crop</sub> 无明显相关性。从前期水分方面来看,高军侠<sup>[20]</sup>对黄土高原坡耕地的研究表明,前期水分体积分数越大,起流历时越短。本研究前期水分体积分数为 21%~25%,起流历时短,在 80 mm/h 强降雨条件下,土壤迅速达到水分体积分数饱和点,在降雨开始后的 3~5 min 内出现超渗产流。TANYASH 等<sup>[21]</sup>研究表明,当超渗产流情况存在时,C 因子估算不考虑前期含水量。从覆盖作物方面来看,覆盖作物对土壤流失的防治作用可归因于覆盖度、株高及根系参数。KORT 等<sup>[22]</sup>研究发现,100%冠层覆盖时,C 因子值仅为 0.15;无冠层覆盖时,C 因子值增至 1;蔡强国等<sup>[23]</sup>研究表明,株高在防止土壤侵蚀与溅蚀产沙过程中有着重要作用;GUO 等<sup>[24]</sup>对黄土高原沟头侵蚀的研究表明,根长是显著影响土壤侵蚀的重要参数。

地表糙度、土壤结皮是影响土壤侵蚀过程的地表特征因子(表 5)。从地表糙度方面来看,已有研究<sup>[25]</sup>表明,与光滑坡面相比,粗糙坡面较高位置的部分侵蚀泥沙沉积在洼地处,导致径流侵蚀率和土壤流失量减少。从土壤结皮方面来看,结皮厚度可增强土壤强度<sup>[26]</sup>来防止水土流失。本研究分析降雨前后的地表糙度、土壤结皮参数与相应土壤流失率的相关性,进一步证明雨后糙度( $C_{r1}$ )、雨后结皮厚度( $T_{c1}$ )分别是代表地表糙度、土壤结皮减弱土壤侵蚀的衡量参数。

现有研究成果中,USLE 和 RUSLE 仍然是 C 因子计算最广泛使用的经验模型,然而模型所需输入参数往往难以准确获取,一定程度上限制了模型的应用和推广。在中国,C 因子估算的替代方法通常仅考虑覆盖度。针对农作物覆盖度估算 C 因子值,蔡崇法等<sup>[4]</sup>、毕小刚等<sup>[5]</sup>、刘秉正等<sup>[18]</sup>均给出不同的计算公式。毕小刚等<sup>[5]</sup>在盖度的基础上,还将株高纳入北京地区 C 因子估算模型。然而盖度和株高仅能体现出作物此方面,不能代表地下根系和 C 因子定义中的管理因素<sup>[27]</sup>,如地表糙度、土壤结皮等反映微地形起伏与地表结构的参数。以此为启发,本研究尝试考虑综合考虑地上、地下植被,糙度及结皮对 C 因子的影响,将覆盖度(CC)、株高(PH)、0~5 cm 根重密度(RWD)、0~5 cm 0.5~1 mm 根长(RLD2)、雨后糙度( $C_{r1}$ )、雨后结皮厚度( $T_{c1}$ )纳入 C 因子值预测模型,共同拟合 C 因子值,理论上可提高精度。

本文利用纳什系数(NSE),对模型(新建模型、文献公式)输出的全生育期估算 C 因子值、基于淳化土壤流失数据计算的全生育期实测 C 因子值比较。其中,RUSLE 模型输入参数的数据查表<sup>[2]</sup>可知,其余模型输入参数的数据来源于淳化径流场谷子全生育期的实地监测数据。本研究不同生育期的降雨侵蚀力(EI)百分比来源于王万忠等<sup>[17]</sup>提出的西安地区降雨侵蚀力分布曲线。C 因子值的计算结果、各模型的精度分析结果见表 7。当 NSE 趋近于 1 时,模型可信度高。精度分析结果表明,基于文献公式的 C 因子值预报中,刘秉正等<sup>[18]</sup>模型有较高的精度,纳什系数为 0.55,其余文献模型估算的全生育期 C 因子值与实测全生育期 C 因子值有一定的差异,纳什系数较低,可能与模型适应的研究区域及研究区的作物种类有关。

本研究得到的作物小区  $SLR_{crop}$  的 NSE 为 0.96,有

糙度作物小区  $SLR_{crop-roughness}$  的 NSE 为 0.87,有结皮作物小区  $SLR_{crop-crust}$  的 NSE 为 0.75,均趋近于 1,新建模型是合理可行的。基于  $SLR_{crop}$ 、 $SLR_{crop-roughness}$ 、 $SLR_{crop-crust}$  估算的全生育期 C 因子值分别为 0.30、0.25、0.25。不同于张岩等<sup>[28]</sup>通过分析安塞站、天水站侵蚀观测资料计算得到的谷子地年 C 因子值为 0.53;张宪奎等<sup>[29]</sup>对黑龙江省克山县黑土区 1985—1989 年 21 个径流试验区侵蚀资料分析得到,谷子地的年 C 因子值为 0.28;BORRELLI 等<sup>[30]</sup>依据土壤覆盖率将不同国家 170 种作物分为 14 组,其中,谷物组的 C 因子值为 0.15~0.38;LIU 等<sup>[31]</sup>利用黄土丘陵区径流小区观测资料,建立中国土壤流失预报模型 CSLE(chinese soil loss equation),其中,引入 B 因子表达生物措施对土壤侵蚀的影响,查赋值表得到谷子地的年估算 B 因子值为 0.55,可能与生育期的划分及计算依据的降雨侵蚀力百分比资料不同有关。

表 7 全生育期 C 因子值的计算与模型精度分析

Table 7 Calculation of C factor values throughout the entire period and analysis of model accuracy

小区	模型	生育期	生育期 EI 百分比	生育期 估算 SLR 值	全生育期 估算 C 因子值	全生育期 实测 C 因子值	纳什系数 (NSE)
作物	$SLR_{crop}$	R1	23.39	0.68	0.30		0.96
		R2	22.48	0.37			
		R3	19.65	0.24			
		R4	5.20	0.19			
	蔡崇法等 <sup>[4]</sup>	R1	23.39	0.71	0.17		-0.29
		R2	22.48	0			
		R3	19.65	0			
		R4	5.20	0			
	毕小刚等 <sup>[5]</sup>	R1	23.39	0.91	0.64	0.32	-5.59
		R2	22.48	0.90			
		R3	19.65	0.90			
		R4	5.20	0.90			
	刘秉正等 <sup>[18]</sup>	R1	23.39	0.51	0.29		0.55
		R2	22.48	0.38			
		R3	19.65	0.34			
		R4	5.20	0.30			
RUSLE <sup>[2]</sup>	R1	23.39	0.35	0.14		-0.41	
	R2	22.48	0.18				
	R3	19.65	0.07				
	R4	5.20	0.03				
有糙度作物	$SLR_{crop-roughness}$	R1	23.39	0.61	0.25	0.27	0.87
		R2	22.48	0.29			
		R3	19.65	0.18			
		R4	5.20	0.15			
有结皮作物	$SLR_{crop-crust}$	R1	23.39	0.58	0.25	0.26	0.75
		R2	22.48	0.31			
		R3	19.65	0.18			
		R4	5.20	0.15			

在进一步的研究中,可通过增加试验作物种类代替单一试验作物,探索间作制度下 C 因子的变化。黄土高原的地形起伏较大,不同坡度等级对 C 因子的影响程度也有差异,进一步考虑对 C 因子计算时应针对缓坡和陡坡采取不同的方法,加强对坡度 $>5^\circ$ 以上范围的进一步细化研究。

## 4 结论

1) 在谷子地条件下,作物小区  $SLR_{crop} >$  有结皮作物小区  $SLR_{crop-crust} >$  有糙度作物小区  $SLR_{crop-roughness}$ 。除覆盖作物外,地表糙度、土壤结皮也是抑制侵蚀的重要因素。

2) 新建模型综合考虑作物覆盖参数(盖度、株高、0~5 cm 根重密度、0~5 cm 0.5~1 mm 根长)、地表糙度参数(雨后糙度)和土壤结皮参数(雨后结皮厚度)对 C 因子值的影响。

3)  $SLR_{crop}$ 、 $SLR_{crop-roughness}$ 、 $SLR_{crop-crust}$  估算的全生育期 C 因子值分别为 0.30、0.25、0.25,与基于淳化水土流失数据计算的全生育期实测 C 因子值基本一致,纳什系数(NSE)分别为 0.96、0.87、0.75。与传统基于覆盖度来估算 C 因子值的方法相比,新建模型具有更高的精度。本研究为进一步建立不同作物和种植制度下的 C 因子估算模型提供理论依据。

### 参考文献:

- [1] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning[M]. U. S. Department, Agriculture Handbook No.537,1978.
- [2] 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]. USDA ARS Agriculture Handbook No.703,1997.
- [3] MERRITT W S, LETCHER R A, JAKEMAN A J. A review of erosion and sediment transport models[J]. Environmental Modelling and Software,2003,18(8/9):761-799.
- [4] 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.
- CAI C F, DING S W, SHI Z H, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J].Journal of Soil and Water Conservation,2000,14(2):19-24.
- [5] 毕小刚,段淑怀,李永贵,等.北京山区土壤流失方程探讨[J].中国水土保持科学,2006,4(4):6-13.
- BI X G, DUAN S H, LI Y G, et al. Study on soil loss equation in Beijing[J].Science of Soil and Water Conservation,2006,4(4):6-13.
- [6] ZHOU P, LUUKKANEN O, TOKOLA T, et al. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed[J].Catena,2008,75(3):319-325.
- [7] MOSS A J, GREEN T W. Erosive effects of the large water drops(gravity drops)that fall from plants[J].Soil Research,1987,25(1):e9.
- [8] MA B, LIU Y X, LIU X J, et al. Soil splash detachment and its spatial distribution under corn and soybean cover[J].Catena,2015,127:142-151.
- [9] 李勇,朱显谟,田积莹.黄土高原植物根系提高土壤抗冲性的有效性[J].科学通报,1991,36(12):935-935.
- LI Y, ZHU X M, TIAN J Y. The effectiveness of plant roots in improving soil erosion resistance on the Loess Plateau[J].Chinese Science Bulletin,1991,36(12):935-935.
- [10] RÖMKENS M J M, HELMING K, PRASAD S N. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes[J].Catena,2002,46(2/3):103-123.
- [11] HAIRSINE P B, MORAN C J, ROSE C W. Recent developments regarding the influence of soil surface characteristics on overland flow and erosion[J].Soil Research,1992,30(3):e249.
- [12] HELMING K, RÖMKENS M J M, PRASAD S N. Surface roughness related processes of runoff and soil loss: A flume study[J].Soil Science Society of America Journal,1998,62(1):243-250.
- [13] CHAMIZO S, CANTÓN Y, LÁZARO R, et al. Crust composition and disturbance drive infiltration through biological soil crusts in semiarid ecosystems[J].Ecosystems,2012,15(1):148-161.
- [14] 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.
- WU F Q, FAN W B. Effects of soil encrustation on rainfall infiltration, runoff and sediment generation[J]. Science of Soil and Water Conservation,2005,3(2):97-101.
- [15] 史婉丽,杨勤科,张光辉.WEPP 模型的最新研究进展[J].干旱地区农业研究,2006,24(6):173-177.
- SHI W L, YANG Q K, ZHANG G H. Current progress in water erosion prediction project[J].Agricultural Research in the Arid Areas,2006,24(6):173-177.
- [16] 吴发启,赵晓光,刘秉正.缓坡耕地降雨、入渗对产流的影响分析[J].水土保持研究,2000,7(1):12-17.
- WU F Q, ZHAO X G, LIU B Z. Analysis of the effect of rainfall and infiltration on runoff in gently sloping farmland[J].Research of Soil and Water Conservation,2000,7(1):12-17.



- [17] 王万忠,焦菊英,郝小品,等.中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(Ⅱ)[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(1):29-39.  
WANG W Z, JIAO J Y, HAO X P, et al. Distribution of rainfall erosivity R value in China(Ⅱ)[J].Journal of Soil Erosion and Soil Conservation,1996,2(1):29-39.
- [18] 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.  
LIU B Z, LIU S H, ZHENG S D. Soil conservation and coefficient of soil conservation of crops[J].Research of Soil and Water Conservation,1999,6(2):32-36.
- [19] PREITI G, ROMEO M, BACCHI M, et al. Soil loss measure from Mediterranean arable cropping systems: Effects of rotation and tillage system on C-factor[J].Soil and Tillage Research,2017,170:85-93.
- [20] 高军侠.黄土高原坡耕地超渗产流及作用研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2002.  
GAO J X. Study on the role of over infiltration runoff in sloping farmland on the Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University,2002.
- [21] TANYAŞH K, KOLATÇ, SÜZEN M L. A new approach to estimate cover-managemen factor of RUSLE and validation of RUSLE model in the watershed of Kartalkaya Dam[J].Journal of Hydrology,2015,528:584-598.
- [22] KORT J, COLLINS M, DITSCH D. A review of soil erosion potential associated with biomass crops[J].Biomass and Bioenergy,1998,14(4):351-359.
- [23] 蔡强国,王贵平,陈永宗.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.  
CAI Q G, WANG G P, CHEN Y Z. Process and simulation of erosion and sediment yield in small watersheds on the Loess Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [24] GUO M M, WANG W L, SHI Q H, et al. An experimental study on the effects of grass root density on gully headcut erosion in the Gully Region of China's Loess Plateau[J]. Land Degradation and Development,2019,30(17):2107-2125.
- [25] ZHAO L S, LIANG X L, WU F Q. Soil surface roughness change and its effect on runoff and erosion on the Loess Plateau of China[J].Journal of Arid Land,2014,6(4):400-409.
- [26] BEDAIWY M N A. Mechanical and hydraulic resistance relations in crust-topped soils[J].Catena,2008,72(2):270-281.
- [27] 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.  
ZHANG Y, YUAN J P, LIU B Y. Advance in researches on vegetation cover and management factor in the soil erosion prediction model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2002,13(8):1033-1036.
- [28] 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.  
ZHANG Y, LIU B Y, SHI P J, et al. Crop cover factor estimating for soil loss prediction [J]. Acta Ecologica Sinica,2001,21(7):1050-1056.
- [29] 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.  
ZHANG X K, XU J H. A study on the soil loss equation in Heilongjiang Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,1992,12(4):1-9.
- [30] BORRELLI P, ROBINSON D A, FLEISCHER L R, et al. An assessment of the global impact of 21 st century land use change on soil erosion[J].Nature Communications,2017,8:e2013.
- [31] LIU B Y, ZHANG K L, XIE Y. An empirical soil loss equation.// Proceedings of the 12 th international soil conservation organization conference[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2002:2-15.