

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.02.001

廖俊, 焦菊英, 严增, 等. RUSLE 模型对黄土高原退耕植被恢复坡面土壤侵蚀的模拟效果分析[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 97-108.

LIAO Jun, JIAO Juying, YAN Zeng, et al. Simulation effect analysis of RUSLE model on slope soil erosion restored by reclaimed vegetation in loess lateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 97-108.

RUSLE 模型对黄土高原退耕植被恢复坡面 土壤侵蚀的模拟效果分析

廖俊¹, 焦菊英^{1,2}, 严增¹, 李建军¹, 张世杰³

(1. 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;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

3. 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 水利水资源安徽省重点实验室, 合肥 230088)

摘要: [目的] 为了探究 RUSLE 模型对黄土高原退耕植被恢复坡面土壤侵蚀模拟的效果。[方法] 基于陕北安塞区坊塌小流域内 10 个径流小区 2016—2022 年的降雨产流产沙监测资料, 通过 RUSLE 模型中各因子在黄土高原的不同常用算法之间的变换组合, 模拟 144 种因子组合下各退耕植被恢复坡面的土壤侵蚀量, 采用纳什效率系数(NSE)和均方根误差(RMSE)评价模型模拟结果的有效性。[结果] 利用 RUSLE 模型 144 种因子组合模拟的退耕植被恢复坡面土壤侵蚀量, NSE 范围为 $-38.47 \sim 0.19$, RMSE 范围为 $1.92 \sim 12.65 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 模拟效果较差, 所选各因子算法难以适应退耕植被恢复坡面上的土壤流失量的评估, 还需要对 RUSLE 模型各因子进一步改进。运用 RUSLE 模型对黄土高原退耕植被恢复坡面土壤侵蚀模拟时, 建议尽可能采用时间分辨率高的数据减小对 R 因子的计算误差, 综合考虑土壤有机质含量、土壤粒径与团粒结构组成和容重等土壤理化性质对 K 因子的影响, 以及植被覆盖度、植被高度、枯落物、生物结皮等对 C 因子的影响, 充分考虑 10° 以上的坡度, 细化其 LS 因子的算法。[结论] RUSLE 模型无法很好地适用于黄土高原退耕植被恢复坡面土壤侵蚀的模拟。研究结果为土壤侵蚀模型的研发及 RUSLE 模型在黄土高原植被恢复坡面的应用提供一定参考依据。

关键词: RUSLE 模型; 土壤侵蚀; 退耕坡面; 植被恢复; 径流小区; 黄土高原

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0097-12

Simulation Effect Analysis of RUSLE Model on Slope Soil Erosion Restored by Reclaimed Vegetation in Loess Plateau

LIAO Jun¹, JIAO Juying^{1,2}, YAN Zeng¹, LI Jianjun¹, ZHANG Shijie³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Hefei 230088, China)

Abstract: [Objective] To explore the effectiveness of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model in simulating soil erosion on slope surfaces during vegetation restoration in the Loess Plateau. [Methods] This study utilized rainfall—runoff and sediment data from ten runoff plots in Ansai Fangta small watershed in northern Shaanxi Province during 2016—2022. Utilizing various commonly used algorithms for RUSLE model factors specific to the Loess Plateau, a total of 144 combinations of factors were simulated to estimate soil erosion on restored slopes. The Nash—Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) and root mean square error (RMSE) were used to evaluate the effectiveness of the model simulations. [Results] The results

收稿日期: 2023-04-20

修回日期: 2023-06-08

录用日期: 2023-07-17

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-12-13

资助项目: 国家自然科学基金项目(42077078, U2243213)

第一作者: 廖俊(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事流域土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: A13677076290@outlook.com

通信作者: 焦菊英(1965—), 女, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事流域侵蚀产沙、土壤侵蚀与植被关系及水土保持效益评价研究。E-mail: jyjiao@ms.iswc.ac.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

indicated that the simulated soil erosion on restored slopes using the 144 factor combinations ranged from -38.47 to 0.19 for NSE and from 1.92 to $12.65 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ for RMSE, suggesting limited model performance. The selected algorithms for RUSLE model factors appeared to be inadequate for assessing soil erosion on slopes undergoing vegetation restoration. Further improvements are needed for the individual factors within the RUSLE model. When applying RUSLE model to simulate soil erosion on restored slopes in the Loess Plateau, it is recommended to utilize data with high temporal resolution to reduce errors in calculating the R -factor, and comprehensively consider the effects of soil physical and chemical properties such as soil organic matter content, soil particle size and aggregate structure and bulk density on K -factor, and the effects of vegetation coverage, vegetation height, litter, and biological crust and C -factor, full consider to slopes steeper than 10° in refining the LS -factor. [Conclusion] The RUSLE model is not well-suited for simulating soil erosion in the context of vegetation restoration on abandoned slopes in the Loess Plateau. This study provides some reference for the research and development of soil erosion model and the application of RUSLE model on the slope of vegetation restoration in the Loess Plateau.

Keywords: RUSLE model; soil erosion; degraded slope; vegetation restoration; runoff plot; Loess Plateau

Received: 2023-04-20

Revised: 2023-06-08

Accepted: 2023-07-17

Online(www.cnki.net): 2023-12-13

土壤侵蚀一直是困扰世界各国的主要环境问题,不仅造成水土流失,而且水土中携带的各种污染物以及营养物质,造成水土中污染物聚集和营养物质的富集,导致环境的恶化和土地生产力的破坏,对环境造成长期的负面影响^[1-2]。

土壤侵蚀模型是预报土壤侵蚀状况的有力工具,可为土壤侵蚀有效防控、水土保持措施合理配置提供支撑。因此,土壤侵蚀模型受到国内外学者的广泛关注,成为国内外研究的热点领域,其中目前应用最为广泛的是 USLE 和 RUSLE 模型。1965 年, WISCHMEIER 等^[3]以美国 8 000 多个试验小区数据为基础,提出 USLE 模型,用于预报农田土壤侵蚀情况。但此时的模型却存在众多的局限性,例如,落基山脉以西降雨环境受地形因素影响显著,降雨特征随机性强,加之该地区海拔相对较高,积雪融化形成的融雪径流冲刷地表,土壤侵蚀量急剧增加,由融雪径流造成的土壤侵蚀量占据全年的 90% 以上,所以该地区必须拥有更多的降水资料才能对该地区的侵蚀进行模拟^[4]。因而,美国农业部对模型中的各个侵蚀因子继续进行研究,考虑融雪侵蚀的影响,将原来只适用于玉米作物种植带的 USLE 模型拓展至落基山脉以东的 37 个州,将应用范围扩展到其他土地利用类型的土壤侵蚀预报过程中^[4],并于 1978 年发布新的土壤流失方程。

1993 年,美国又颁布修正的通用土壤流失方程 RUSLE,此时的 RUSLE 模型相较于 USLE 进行了许多修订^[5]。例如,将降雨侵蚀力的计算拓展到落基山脉西部地区,考虑该地区的融雪及洼地集水的影响;克服 USLE 只能模拟平缓坡土壤侵蚀的缺点,考虑较陡坡中坡度、坡长因子的计算,以及前期土地利

用、地表覆盖、地表糙度、作物覆盖和土壤水分 5 个次因子对植被覆盖与管理因子(C)的影响,将 C 因子的大小以 5 个次因子的乘积形式表示^[6]。在多年的研究中,许多地区以 USLE 和 RUSLE 模型为蓝本,结合当地的实际情况,对各因子进行修正,研发出适用于本地区特点的土壤侵蚀预报模型,如中国土壤流失方程 CLSE^[7]。

黄土高原位于我国中部偏北,属于黄河流域中游地区,地形破碎,沟壑纵横,生态环境恶化严重,是我国乃至世界上土壤侵蚀最为严重的地区之一^[8]。我国众多学者通过一系列的修正,将 RUSLE 模型引入中国不同地区,也包括黄土高原地区,对于该地区的水土保持工作起到至关重要的作用。同时,国家针对黄土高原的侵蚀现状,实施退耕还林(草)、三北防护林、天然保护林等一系列工程^[9],使得黄土高原生态系统质量得到明显的改善,土壤侵蚀量急剧减小^[10-11]。虽然 RUSLE 模型在黄土高原地区不乏使用案例^[12-14],但是由于黄土高原地区同美国的地形地貌特征存在很大的差异性,并且伴随着黄土高原退耕还林还草工程的实施,该地区的生态环境、土壤侵蚀等特征也发生一系列的变化,RUSLE 模型在黄土高原退耕植被恢复坡面上的模拟效果有待进一步验证。为此,本研究旨在通过 RUSLE 模型各侵蚀因子在黄土高原常用算法之间的变换组合,基于野外自然降雨条件下径流小区的多年原位监测数据,验证 RUSLE 模型对黄土高原退耕植被恢复坡面土壤侵蚀的模拟效果,从而探究 RUSLE 模型的适应性,为未来黄土高原退耕植被恢复的土壤侵蚀防控效应评价提供一定参考依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况与数据来源

陕西省延安市安塞区是退耕还林还草政策实施的第 1 批示范区域,自 1999 年开始实施退耕还林(草)工程以来,在减少水土流失和生态环境改善方面取得显著的成效^[15-16]。因此,本研究区选取位于安塞区沿河湾镇的坊塌小流域(36°47′19″—36°49′35″N, 109°14′40″—109°17′09″E)(图 1)。坊塌小流域是延河流域以及支流杏子河下游的一级支沟。流域总面积约为 10.54 km²,属于暖温带半湿润气候向半干旱气候过渡的区域,年平均气温 8.8 ℃,无霜期 158~195 天。年平均降水量 546.6 mm,降水年际变化较大,且年内分配不均,主要集中在每年 7—9 月,多发生暴雨。海拔 1 006~1 362 m,陡坡占流域面积较大,流域的沟壑密度为 3.8 km/km²。研究区为典型黄土丘陵沟壑地貌,有新第三纪三趾马红土、侏罗纪砂岩和白垩纪砂岩露,黄绵土是流域主要的土壤类型。流域内草本植物主要有铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、白羊草(*Bothriochloa korshinskii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等;灌木主要有狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、柠条(*Caragana intermedia*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等;乔木主要为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)^[17]。

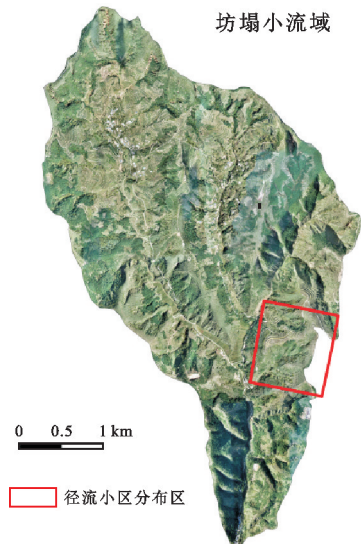


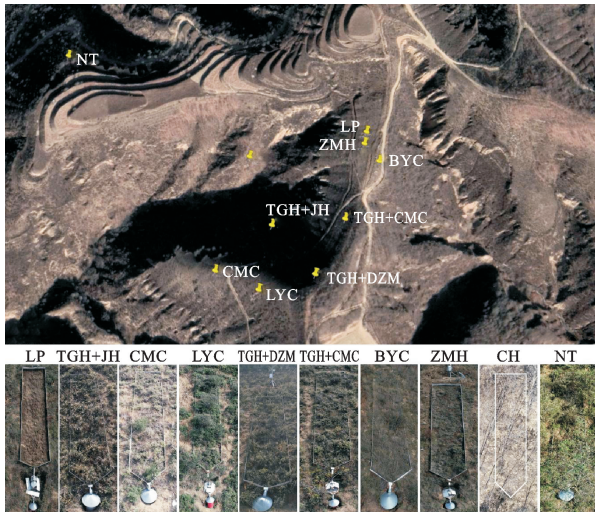
图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

在退耕植被恢复坡面修建 9 个径流小区,小区长 10 m,宽 2.5 m,加上径流小区下部的梯形汇流部分,径流小区面积为 25.625 m²。小区基本情况见图 2 和表 1。其中的狼牙刺小区为自然灌木小区,柠条小区为人工灌木小区,刺槐小区为人工林地小区,其余小区为处在不同自然恢复阶段的草地小区,包括长芒草小区、白羊草小区、猪毛蒿小区和 3 个铁杆蒿小区,并

布设 1 个裸地坡面作为对照。小区下方设置 1 个径流桶,其中裸地小区除一级径流桶外,另外设置 1 个二级径流桶,用以收集径流泥沙。每次产流发生后,使用量筒测量径流量,将径流和泥沙搅拌均匀后采集 2 个 500 mL 的含沙水样,带回实验室采用烘干法(105 ℃,24 h)测量含沙量,含沙量与径流体积的乘积即为泥沙量。采样完成后,将径流桶打扫干净以备收集下 1 场径流和泥沙。目前已得到 2016—2022 年历次降雨后径流小区的降雨径流泥沙监测数据。

关于各退耕植被恢复坡面的土壤性质,课题组于 2015 年 4 月和 2018 年 6 月在坊塌小流域内选择各退耕植被恢复坡面表层 0—10 cm 土壤进行采样,采用激光粒度仪测定土壤各级粒度,采用重铬酸钾氧化法测定土壤的有机质含量,用于计算土壤可蚀性(K)值。



注:ZMH 为猪毛蒿;CMC 为长芒草;BYC 为白羊草;TGH+CMC 为铁杆蒿+长芒草;TGH+DZM 为铁杆蒿+大针茅;TGH+JH 为铁杆蒿+茭蒿;LYC 为狼牙刺;CH 为刺槐;NT 为柠条。

图 2 径流小区位置分布

Fig. 2 Location distribution of runoff plot

表 1 径流小区基本信息

Table 1 Basic information of runoff plot

植被类型	恢复年限/a (2016—2022 年)	坡度/(°)	植被 盖度/%	枯落物 盖度/%	结皮 盖度/%
铁杆蒿+茭蒿群落	40~47	32	49±19	19±13	23±19
长芒草群落	10~17	21	36±18	16±14	37±22
狼牙刺群落	40~47	35	45±19	20±13	18±17
铁杆蒿+大针茅群落	40~47	29	41±17	19±13	37±27
铁杆蒿+长芒草群落	25~32	25	40±17	18±12	45±28
白羊草群落	15~22	23	43±21	24±15	21±20
猪毛蒿群落	5~12	27	27±17	8±7	56±30
刺槐群落	30~37	23	45±16	60±35	3±5
柠条群落	20~27	43	49±20	41±26	13±14
裸地	—	29	0	0	0

注:表中植被盖度、枯落物盖度和结皮盖度数据为平均值±标准差。

1.2 RUSLE 模型中因子算法的选取

为了验证 RUSLE 模型对退耕植被恢复坡面土壤侵蚀的模拟效果,选取各因子在黄土高原的常见算法,通过各因子间的交叉组合,得到不同的模拟结果,基于径流小区原位监测数据,评判 RUSLE 模型是否能在黄土高原退耕植被恢复坡面应用。RUSLE 模型的计算采用 5 个侵蚀因子的乘积形式表示:

$$A = RKLSCP \quad (1)$$

式中: A 为土壤侵蚀模数 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; R 为降雨侵蚀力因子 [$(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$]; K 为土壤可蚀性因子 [$(t \cdot h)/(MJ \cdot mm)$]; LS 为地形因子,无量纲; C 为植被覆盖与管理因子,无量纲; P 为水土保持措施因子,无量纲。

1.2.1 降雨侵蚀力因子(R) 降雨侵蚀力是 RUSLE 模型中首要的基础因子,可以表征降雨对土壤流失产生的潜在影响力,反映降雨对土壤侵蚀的作用能力^[18]。本研究针对次降雨、日降雨、月降雨、年降雨的数据来源,各选取 1 个在黄土高原常用的算法。

(1) 基于次降雨数据的算法

WISCHEMEIER^[19] 依据径流小区资料分析发现,降雨侵蚀力因子(R)可用降雨总动能(E)与最大 30 min 降雨强度(I_{30})的乘积表示,并将其应用于通用土壤流失方程中。表达式为:

$$R = E I_{30} \quad (2)$$

式中: I_{30} 为次降雨最大 30 min 降雨强度 (mm/h); E 为次降雨总动能 (MJ/hm^2),采用江忠善等^[20]在黄土地区降雨动能经验公式计算:

$$E = \sum e p \quad (3)$$

$$e = 27.83 + 11.55 \log_{10} i \quad (4)$$

式中: E 为一次降雨的总动能 (J/m^2); e 为次降雨过程中某时段的降雨动能 [$J/(m^2 \cdot mm)$]; p 为相应某时段的降雨量 (mm); i 为相应某时段的降雨强度 (mm/min)。

(2) 基于日降雨数据的算法

章文波等^[21]通过参考 Richardson 建立的半月降雨侵蚀力模型,采用日降雨资料,建立用于估算半月降雨侵蚀力的幂函数公式:

$$R = \alpha \sum_{j=1}^n P_j^\beta \quad (5)$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.177}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (6)$$

$$\alpha = 21.586 \beta^{-7.1891} \quad (7)$$

式中: P_j 为半月时段内第 j 日的侵蚀性降雨量 ($P_j \geq 12 mm$); n 为该半月时段内侵蚀性降雨的天数; α 、 β 为考虑区域降雨特征的模型参数,通过研究区多年降

雨数据计算获得; P_{d12} 为日平均侵蚀性降雨量 (mm); P_{y12} 为年平均侵蚀性降雨量 (mm)。

(3) 基于月降雨数据的算法

采用 ARNOLDUS 等^[22]提出的使用月降雨资料推求的经验公式,且胡春艳^[23]验证了该模型在黄土高原具有较好的适宜性,其计算公式为:

$$R = 17.02 \times 10^{1.5 \lg \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i}{P} - 0.8188} \quad (8)$$

式中: P_i 为第 i 个月的降雨量 (mm); P 为年降雨量 (mm)。

(4) 基于年降雨数据的算法

ZHANG 等^[24]利用黄河流域 31 年 (1955—1986 年) 的平均年降水量和降雨侵蚀力数据,建立黄河中下游流域降雨侵蚀力(R)与年降雨量(P)的关系:

$$R = 5.3595 P^{1.2396} \quad (9)$$

本研究分别利用次、日、月、年降雨数据的算法,计算不同时间尺度的降雨侵蚀力(R)因子,再通过相加得到监测期内每年的年降雨侵蚀力,分别以 $R_{次}$ 、 $R_{日}$ 、 $R_{月}$ 、 $R_{年}$ 表示。

1.2.2 土壤可蚀性因子(K) 土壤可蚀性因子表征土壤对侵蚀的敏感性,主要与土壤质地、有机质含量、土体结构、渗透性等土壤理化性质有关。本文用于计算土壤可蚀性因子(K)的土壤性质数据均由实测资料获取,采用的 K 因子算法有 3 种。

(1) EPIC 模型

WILLIAMS 等^[25]提出的 EPIC 模型是计算土壤可蚀性最为常见的方法之一,基于土壤的粒级组成以及土壤有机碳含量进行 K 值的估算,具体公式为:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 \text{SAN} \left(1 - \frac{\text{SIL}}{100} \right) \right] \right\} \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \left[1 - \frac{0.7\text{SN1}}{\text{SN1} + \exp(-5.51 + 22.9\text{SN1})} \right] \quad (10)$$

式中: SAN 、 SIL 、 CLA 分别为砂粒、粉粒、黏粒含量 (%); C 为有机质含量 (%); $\text{SN1} = 1 - \text{SAN}/100$ 。 K 值为美制单位 [$(t \cdot h)/(100 \cdot \text{feet} \cdot \text{tonf} \cdot \text{inch})$], 将其乘以 0.1317 转化为国际制单位 [$(t \cdot h)/(MJ \cdot mm)$]。

(2) TORRID 模型

TORRID 等^[26]根据土壤粒径和有机质含量建立 1 个估算土壤可蚀性因子(K)的计算模型,具体为:

$$K = 0.0293(0.65 - D_g + 0.24 D_g^2) e^{-0.0021 \frac{OM}{CLA} - 0.00037 \left(\frac{OM}{CLA} \right)^{2-4.02+1.72CLA^2}} \quad (11)$$

$$D_g = \sum f_i \lg \sqrt{d_i d_{i-1}} \quad (12)$$

式中: C 为有机质含量 (%); CLA 为土壤黏粒 (<0.002

mm)含量(0~1); d_i 为第*i*级土壤颗粒的最大值(mm); d_{i-1} 为第*i*等级土壤颗粒的最小值(mm);当*i*=1时, $d_0=0.000\ 05\text{ mm}$; f_i 为相应粒径等级土壤颗粒含量(0~1)。本文基于砂粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)3个粒径计算 D_g 。 K 值单位为国际制单位 $[(t \cdot h)/(MJ \cdot mm)]$ 。

(3)SHIRAZI模型

某些地区由于特殊原因可能无法获取详细的土壤理化性质资料,针对这些地区,SHIRAZI等提出一种只考虑土壤平均粒径来计算土壤可蚀性因子(K)的公式:

$$K = 7.594 \times \{0.001\ 7 + 0.049\ 4 e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\log(D_g + 1.675)}{0.698\ 6} \right]^2} \} \quad (13)$$

$$D_g = e^{0.01 \sum f_i \ln m_i} \quad (14)$$

式中: f_i 为原土壤中第*i*等级粒径的土壤颗粒含量(%); m_i 为第*i*等级粒径两端数值的算术平均值(mm)。同上,本文基于砂粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)将粒径等级分为3类。此公式中的 K 值单位是美国制,将计算的 K 值乘以0.131 7可换算为国际制。

通过EPIC模型、TORRID模型、SHIRAZI模型计算得到的 K 因子分别以 K_E 、 K_T 、 K_S 表示。

1.2.3 地形因子(LS) 在RUSLE模型中,地形对土壤侵蚀的影响是通过坡度和坡长2个因子表示。在坡面尺度上,地形因子被定义为其他条件一致的情况下,某一坡长或坡度的坡面土壤侵蚀量与标准径流小区(坡长为22.13 m,坡度为9%或5°)的土壤侵蚀量之比。本研究中,采用LIU等^[27]、金争平等^[28]和ZHAO等^[29]的算法进行 LS 因子的计算。

(1)刘宝元算法

LIU等^[27]为适应黄土高原的地形地貌,提出针对陡坡的地形因子算法,具体公式为:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (15)$$

$$S = \begin{cases} 10.80 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.80 \sin \theta - 0.50 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.91 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (16)$$

式中: L 为坡长因子; λ 为坡长(m);22.13为标准径流小区坡长; m 为坡长指数; S 为坡度因子; θ 为坡度(°);当 $\theta \leq 5^\circ$, $m=0.15$;当 $5^\circ < \theta \leq 12^\circ$, $m=0.2$;当 $12^\circ < \theta \leq 22^\circ$, $m=0.35$;当 $\theta > 22^\circ$, $m=0.45$ 。

(2)金争平算法

金争平等^[28]利用黄土高原中游皇甫川流域的径流泥沙观测资料,提出一个适合西北地区的地形因子

算法,公式为:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{20} \right)^{0.24} \left(\frac{\theta}{6} \right)^{1.6} \quad (17)$$

式中: λ 为坡长(m); θ 为坡度(°)。

(3)赵晓光算法

ZHAO等^[29]以黄土高原南部淳化县泥河沟流域径流场实测资料为基础,结合邻近地区的实测资料,运用数理统计和理论推演的方法,提出一个预测地形因子的算法,具体公式为:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{20} \right)^{0.14} \left(\frac{S}{9} \right)^{1.2} \quad (18)$$

式中: λ 为坡长(m); S 为坡度(%)。

通过以上3种算法计算得到的 LS 因子分别以 $LS_{刘}$ 、 $LS_{金}$ 、 $LS_{赵}$ 表示。

1.2.4 植被覆盖因子(C) 植被覆盖因子(C)由植被的覆盖度、管理措施、轮作顺序等共同决定。定义为在一定条件的植被覆盖与管理作用下土壤侵蚀量与相同条件下裸地土壤侵蚀量的比值。 C 因子取值越小,表明植被阻碍土壤侵蚀的作用越强。本研究除采用江忠善等^[30]、刘宝元等^[31]以及蔡崇法等^[32]算法对植被覆盖因子(C)计算外,同时也采用直接赋值的方法。

(1)江忠善算法

研究^[33]表明,土壤流失量与植被覆盖度之间呈一定的指数下降趋势。江忠善等^[30]在安塞区利用观测资料,建立植被覆盖因子与草地及林地植被覆盖度之间的指数关系。

对于人工草地:

当 $V \leq 5\%$ 时,

$$C = 1$$

当 $V > 5\%$ 时,

$$C = e^{-0.041\ 8(V-5)} \quad (19)$$

对于人工林地:

当 $V \leq 5\%$ 时,

$$C = 1$$

当 $V > 5\%$ 时,

$$C = e^{-0.008\ 5(V-5)1.5} \quad (20)$$

式中: V 为植被覆盖度(%)。

(2)刘宝元算法

刘宝元等^[31]通过对照有植被或枯落物覆盖小区与裸地小区的土壤流失量,考虑植被覆盖度、植被高度、地表枯落物覆盖度对 C 因子取值的影响,提出 C 因子的算法,其数学表达式为:

$$C = C_c C_s \quad (21)$$

$$C_s = 1.029 e^{-0.023\ 5V_R} \quad (22)$$

草地:

$$C_C = 1 - (0.01 V_C + 0.0859) e^{-0.0033h} \quad (23)$$

林地:

$$C_C = 0.988 e^{-0.11V_C} \quad (24)$$

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 为植被盖度(%); h 为植被高度(cm); V_R 为地表枯落物盖度(%).

(3) 蔡崇法算法

蔡崇法等^[32]基于对三峡库区径流小区土壤侵蚀模型各因子取值的研究发现,当植被覆盖度的取值范围不同时, C 值的取值也发生变化,进而提出计算 C 因子的数学表达式:

$$C = \begin{cases} 0 & V = 0 \\ 0.6508 - 0.3436V & 0 < V < 78.3 \\ 1 & V > 78.3 \end{cases} \quad (25)$$

式中: V 为植被覆盖度(%).

(4) 赋值法

总结前人^[34-36]在本区域的研究结果,获得不同土地利用类型的 C 因子(表 2), C 因子的取值是根据植物盖度进行直接赋值的。

表 2 不同土地利用类型植被盖度下的 C 因子

Table 2 C factor of vegetation coverage under different land use types

土地利用类型	盖度/%	C 值	土地利用类型	盖度/%	C 值
林地	0~20	0.100	草地	0~20	0.450
	20~40	0.080		20~40	0.240
	40~60	0.060		40~60	0.150
	60~80	0.020		60~80	0.090
	80~100	0.004		80~100	0.043
灌木	0~20	0.280	果园	0~20	0.308
	20~40	0.116		20~40	0.297
	40~60	0.067		40~60	0.285
	60~80	0.019		60~80	0.264
坡耕地	—	0.476	裸地	—	1.000

通过上述 4 种方法得到的 C 因子分别以 $C_{江}$ 、 $C_{刘}$ 、 $C_{蔡}$ 、 $C_{赋}$ 表示。

1.2.5 水土保持措施因子(P) 在 RUSLE 模型中,水土保持措施因子的定义是指在其他条件相同的前提下,实施特定水土保持措施的地块土壤侵蚀量与未实施水土保持措施的地块土壤侵蚀量之比。 P 因子取值越小,表明水土保持措施防止土壤侵蚀的作用越强。

本研究中,10 个径流小区均未设置水土保持措施,因而所有小区的水土保持措施因子 P 取值均为 1。

1.3 土壤侵蚀模拟效果评价

采用 4 种 R 因子算法、3 种 K 因子算法、3 种 LS 因子算法和 4 种 C 因子算法对 RUSLE 模型中

的各因子进行计算,并对各因子进行组合,得到 144 种不同因子组合下的土壤侵蚀模拟结果。

为了验证模型模拟土壤侵蚀模数的效果,本文采用纳什效率系数(NSE),以及均方根误差(RMSE)作为评价模型有效性的判断指标。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})^2} \quad (26)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (27)$$

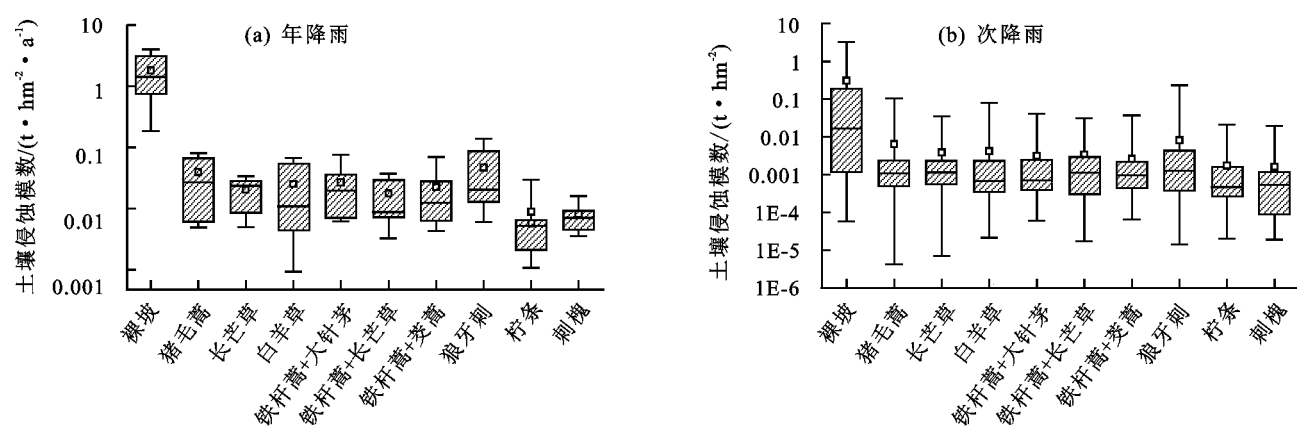
式中: n 为实测值的数量; O_i 为实测值; O_{ave} 为实测均值; P_i 为预测值。纳什效率系数(NSE)的取值为 $-\infty \sim 1$,取值越接近 1,说明模型模拟效果越好,可信度越高;当 NSE 取值出现负值时,则表明模型变异比观测得大,模拟结果是不可信的。一般情况下, $NSE > 0.5$ 时,模型的模拟效果可以接受; $NSE > 0.7$ 时,模型的模拟效果非常好^[37]。均方根误差的取值为 $0 \sim +\infty$,当取值为 0 时,表明模型模拟值和实测值之间不存在误差,模拟效果完美, RMSE 的取值越小,误差越小,模型模拟效果越好。

2 结果与分析

2.1 基于原位监测的植被恢复坡面土壤侵蚀特征

2016—2022 年监测期间的年土壤侵蚀模数见图 3(a)。裸坡小区的年均土壤侵蚀模数为 4.614 t/($hm^2 \cdot a$);猪毛蒿小区、长芒草小区、白羊草小区以及 3 个铁杆蒿小区的年均土壤侵蚀模数为 0.025~0.059 t/($hm^2 \cdot a$);狼牙刺小区和柠条小区的年均土壤侵蚀模数分别为 0.074, 0.011 t/($hm^2 \cdot a$);刺槐小区的年均土壤侵蚀模数为 0.010 t/($hm^2 \cdot a$)。裸坡小区的年均土壤侵蚀模数远高于其他退耕植被恢复小区,而狼牙刺小区的年均土壤侵蚀模数在所有退耕植被恢复小区中最大。对于灌木地,人工恢复的柠条小区年均土壤侵蚀模数显著低于自然恢复的狼牙刺小区。刺槐小区是人工恢复乔木地,其年均土壤侵蚀模数是所有退耕植被恢复坡面中最低的。

2016—2022 年监测期间的次降雨条件下的土壤侵蚀模数见图 3(b)。裸坡小区次降雨条件下的平均土壤侵蚀模数为 0.310 t/ hm^2 ;猪毛蒿小区、长芒草小区、白羊草小区以及 3 个铁杆蒿小区的次降雨条件下的平均土壤侵蚀模数变化为 0.002 6~0.006 5 t/ hm^2 ;狼牙刺小区和柠条小区在次降雨条件下的平均土壤侵蚀模数分别为 0.008 1, 0.001 7 t/ hm^2 ;刺槐小区次降雨条件下的平均土壤侵蚀模数为 0.001 6 t/ hm^2 。次降雨条件下,裸坡的土壤侵蚀模数高出退耕植被恢复坡面 2 个数量级。



注:每个箱线图中间的横线为中位数,最高和最低短横线为最大值和最小值,正方形代表平均值,箱体上下边界为 25%和 75%。下同。

图 3 裸坡及各退耕植被恢复坡面年、次降雨土壤侵蚀特征

Fig. 3 Characteristics of soil erosion in annual and second rainfall on bare slope and reclaimed vegetation

2.2 植被恢复坡面土壤侵蚀的模型模拟结果

基于 4 种 *R* 因子算法、3 种 *K* 因子算法、3 种 *LS* 因子算法和 4 种 *C* 因子算法,得到 144 种因子算法组合,通过利用 RUSLE 模型 144 种因子组合算法模拟各小区在监测期内的年均土壤侵蚀模数,其结果见图 4。通过与实测资料的对比,144 种组合下的 RUSLE 模型总体上高估各小区的土壤侵蚀模数。裸地小区的实际年均土壤侵蚀模数接近箱体的下边界,6 个自然恢复草地小区的实际年均土壤侵蚀模数基本与下缘线齐平,狼牙刺小区、柠条小区和刺槐小区的实际年均土壤侵蚀模数均位于箱体下边界和下缘线之间,表明 RUSLE 模型对退耕草地小区年均土壤侵蚀模数的高估程度是最大的,灌木小区和林地小区次之,高估程度最低的是裸地小区。不同算法下各小区的土壤侵蚀模数模拟结果跨度较大,说明即使各种算法组合下的 RUSLE 模型都是以 5 个侵蚀因子乘积的形式计算,但是各侵蚀因子的算法不同,也对模型模拟效果产生较大影响。

2.3 植被恢复坡面土壤侵蚀模型模拟效果评价

通过与实测数据的对比,计算得到 144 种不同因子算法组合下各小区的纳什效率系数(NSE)和均方根误差(RMSE),结果见表 3。

RUSLE 模型在裸地小区模拟的 NSE 系数范围为-1.41~0.21,RMSE 的范围为 1.94~3.41 t/(hm²·a);在退耕植被恢复坡面的 NSE 系数范围为-38.47~0.19,RMSE 的范围为 1.92~12.65 t/(hm²·a)。裸地小区的 NSE 系数平均值为-0.41,系数区间在 0 值左右,表明 RUSLE 模型对裸地小区的模拟结果接近观测值的平均水平,总体结果可信,但模拟误差较大。9 个退耕植被恢复坡面的 NSE 系数平均值介于-3.55~-8.48,均未达到理想水平;RMSE 平均值介于 4.57~6.20 t/(hm²·a),模拟误差较大。

表 3 RUSLE 模型在裸坡及各退耕植被恢复坡面模拟的评价指标特征

Table 3 Evaluation index characteristics of RUSLE model simulation on bare slope and each reforestation slope

小区植被类型	NSE			RMSE/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)		
	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
裸地	-0.41	0.21	-1.41	2.57	3.41	1.94
猪毛蒿群落	-6.18	0.19	-17.58	5.74	9.23	1.92
长芒草群落	-6.42	0.07	-27.80	5.49	10.81	2.95
白羊草群落	-7.25	0.09	-38.47	5.78	12.65	2.92
铁杆蒿+大针茅群落	-8.48	0.07	-30.13	6.20	11.24	2.45
铁杆蒿+长芒草群落	-6.48	0.08	-28.29	5.51	10.90	2.93
铁杆蒿+芨芨草群落	-5.70	-0.06	-33.50	5.21	11.83	2.07
狼牙刺群落	-3.55	-0.10	-31.93	4.57	11.29	2.25
柠条群落	-4.62	-0.25	-19.88	5.08	9.78	2.29
刺槐群落	-3.90	-0.02	-18.08	4.20	8.76	2.03

RUSLE 模型在退耕植被恢复小区的模拟效果比裸地小区的模拟效果差。对于草地、灌木地、林地不同植被类型,草地的 NSE 系数平均值最小,而 RMSE 平均值最大,表明 RUSLE 模型对退耕草地的模拟效果最差(表 4)。

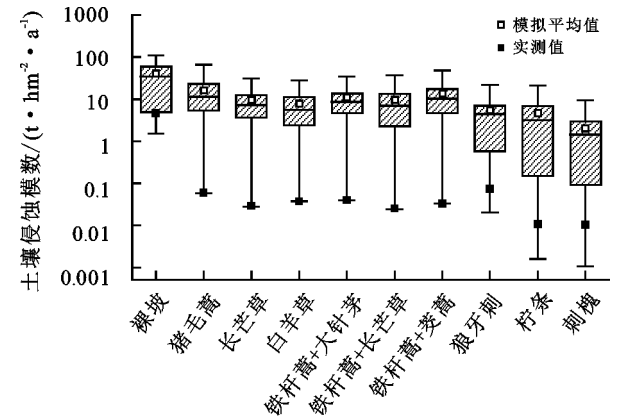


图 4 RUSLE 模型对裸坡及退耕植被恢复坡面土壤侵蚀的模拟结果

Fig. 4 Simulation results of soil erosion on bare slope and reforestation slope by RUSLE model

表 4 RUSLE 模型在不同植被类型退耕坡面的模拟评价指标特征

Table 4 Characteristics of RUSLE model simulation evaluation indexes on different vegetation types of reclaimed slope

植被 类型	NSE			RMSE/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)		
	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
草地	-6.24	-0.37	-24.08	5.55	10.73	2.51
灌木地	-3.66	-0.11	-20.85	4.38	10.02	2.26
林地	-3.90	-0.02	-18.08	4.20	8.76	2.03

NSE 系数与 RMSE 2 种评价指标的结果表明, RUSLE 模型在预测退耕植被恢复坡面土壤侵蚀模数时出现比较大的误差, 所选因子算法难以模拟退耕植被恢复坡面上的土壤侵蚀情况。

3 讨论

3.1 R 因子不同算法对土壤侵蚀模拟效果的影响

由图 5 可知, 相较于其他因子, R 因子对模型模拟效果的影响更为明显。运用 RUSLE 模型在裸地小区进行模拟时, 基于不同时间尺度的降雨资料计算降雨侵蚀力因子(R), NSE 系数和 RMSE 评价模拟结果的精度为日降雨资料>次降雨资料>月降雨资料>年降雨资料。R 因子模型对不同植被类型小区土壤侵蚀模拟效果的影响同裸地小区一致, 当降雨侵蚀力因子(R)是基于日降雨资料和次降雨资料计算所得时, NSE 系数和 RMSE 总体优于用月降雨和年降雨资料计算的 R 因子, 表明降雨数据的时间分辨率高低决定着 RUSLE 模型模拟的效果。各国学者通过研究比较发现, 基于不同时间尺度的模型计算降雨侵蚀力时, 日尺度的模型对降雨侵蚀力模拟精度较高^[38-40]。因此, 使用 RUSLE 模型对退耕植被恢复坡面的土壤侵蚀模拟时, 在降雨资料允许的情况下, 应优先选取时间分辨率高的降雨数据计算 R 因子。

3.2 K 因子不同算法对土壤侵蚀模拟效果的影响

土壤可蚀性因子(K)计算方法的选择也对 RUSLE 模型的模拟效果产生较大的影响。SHIRAZI 模型利用土壤机械组成计算土壤可蚀性, EPIC 模型和 TORRI.D 模型还需土壤有机质含量数据用以估计 K 因子, 模型基于的理化性质指标不同, 因此, 其计算结果存在差异。 K_E 、 K_T 、 K_S 的取值范围分别为 0.023~0.027, 0.022~0.029, 0.032~0.039 (t·h)/(MJ·mm), EPIC 模型和 TORRI.D 模型对 K 因子的预测结果相似, SHIRAZI 模型预测的 K 值大于其他 2 种模型。研究区内土壤类型均为黄绵土, 同种土壤类型情况下, SHIRAZI 模型计算的 K 值变动幅度最大, 其次为 TORRI.D 模型, EPIC 模型的变动幅度最小。林芳等^[41]研究发现, EPIC 模型和 TORRI.D 模型在延河流域具有更高的可信度, 更加适用于该地区土壤可蚀性(K)因子的计算。利用

EPIC 模型和 TORRI.D 模型计算 K 因子时, NSE 系数和 RMSE 表现效果都优于 SHIRAZI 模型。因为通过 Shirazi 模型计算 K 因子时, 仅考虑土壤粒径大小对土壤可蚀性的影响, K 值预测结果相较于其他 2 种模型更大, 致使 RUSLE 模型模拟结果产生较大的误差, 模拟效果较差。

3.3 LS 因子不同算法对土壤侵蚀模拟效果的影响

由于研究小区位于地形坡度较陡的山坡, 而 LIU 等^[27]提出 3 种坡度范围 LS 因子的计算方法, 其中就包含针对较陡坡度情况下的算法, 而金争平等^[28]和 ZHAO 等^[29]提出的单一算法计算所有坡度条件下的 LS 因子。裸坡和 9 个退耕植被恢复坡面的坡长均为 10 m, 坡度分布为 21°~43°, $LS_{刘}$ 、 $LS_{金}$ 、 $LS_{赵}$ 的取值区间分别为 5.22~9.78, 6.25~19.67, 5.17~15.01。当坡度<12°时, 随坡度增加, 3 种算法下的 LS 因子计算结果相差较小, 计算结果相近; 当坡度>12°且<22°时, 随坡度增加, 金争平等^[28]算法与其他 2 种算法的 LS 因子计算结果差距逐渐增大; 当坡度>22°时, ZHAO 等^[29]算法与 LIU 等^[27]算法的 LS 因子计算结果差距也开始逐渐增大。造成这种差异的原因是金争平等^[28]和 ZHAO 等^[29]的算法中 LS 因子计算结果与坡度呈指数增长关系, LS 因子对坡度的敏感性较高, 当位于陡坡时, LS 因子的变化幅度较大, 未区分缓坡和陡坡对于地形因子的不同影响, 在一定程度上高估黄土高原陡坡条件下的 LS 因子。因此, 图 5 中选取 LIU 等^[27]算法计算黄土高原的地形因子 LS 较为合理, 模型模拟的效果较其他 2 种算法好。

3.4 C 因子不同算法对土壤侵蚀模拟效果的影响

计算方法不同, 对植被覆盖因子(C)的取值产生较大的差异, 从而影响 RUSLE 模型的模拟结果。针对草地小区, 根据植被覆盖程度直接对 C 因子赋值时, 其模拟结果的 NSE 系数取值范围为 -0.37~-15.79, RMSE 取值范围为 2.51~8.78 t/(hm²·a); 采用其他模型对 C 因子进行计算时, 其模拟结果的 NSE 系数取值范围为 -1.89~-24.08, RMSE 取值范围为 3.65~10.73 t/(hm²·a), 所以在草地小区宜采用赋值法对 C 因子赋值。灌木小区和林地小区存在覆盖度较高的枯落物, 增加径流入渗量, 可减轻土壤侵蚀的发生^[42]。因此, 针对灌木小区和林地小区, 仅利用植被覆盖度计算 C 因子是不够完善的。由图 5 可知, 当采用刘宝元等^[27]的算法对灌木小区和林地小区的 C 因子进行计算时, 其模拟结果的 NSE 系数和 RMSE 是 4 种 C 因子算法中表现最好的, 这是由于 LIU 等^[27]算法考虑地表的枯落物以及植被高度对土壤侵蚀的影响, 在一定程度上提高灌木小区和林地小区 C 因子计算的准确性^[32]。

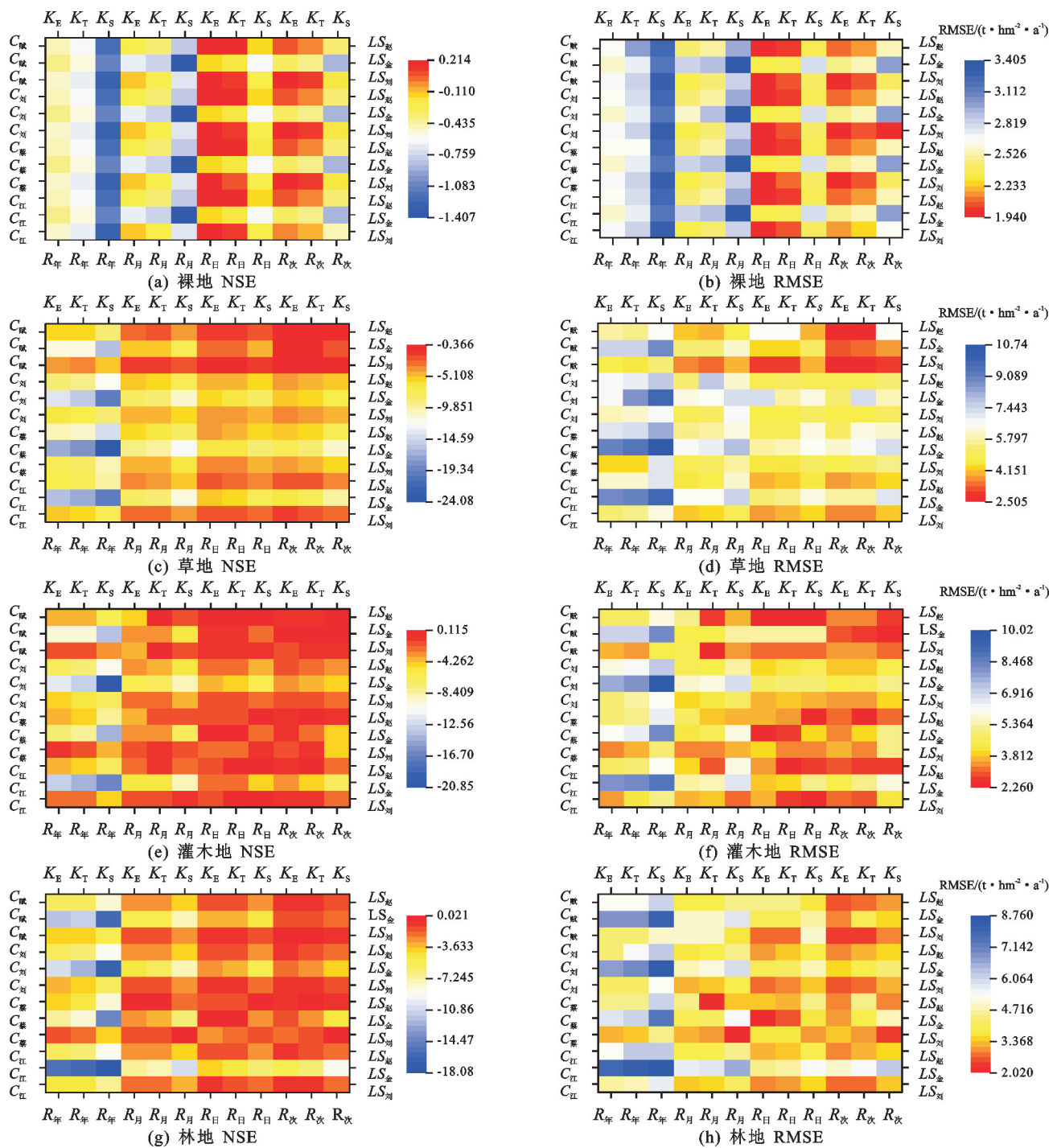


图 5 RUSLE 模型各因子不同算法对裸坡及不同植被类型退耕坡面的模拟效果

Fig. 5 Simulation effects of RUSLE model with different factors and algorithms on bare slope and degraded slope with different vegetation types

3.5 不同因子算法组合对土壤侵蚀模拟效果的影响

基于 RUSLE 模型 144 种组合算法,预测退耕植被恢复坡面上的土壤侵蚀模数,模拟结果之间差异较大,说明不同侵蚀因子算法的组合也影响 RUSLE 模型模拟效果。在 144 种 RUSLE 模型计算组合中,针对裸地、草地、灌木地和林地 4 种不同土地利用方式,模拟精度相对较高、模拟误差较小的侵蚀因子组合算法(表 5)。4 种土地利用方式的 R 因子均选取为以

时间分辨率更高的次降雨和日降雨算法;EPIC 模型均适用于 4 种土地利用方式的 K 因子计算,TORRI、D 模型适用于退耕植被恢复小区的 K 因子计算;对于 LS 因子计算,LIU 等^[27]模型适用于 4 种土地利用方式,在灌木地和林地也可以利用 ZHAO 等^[29]的算法;草地上宜采用赋值法对 C 因子赋值,而 LIU 等^[27]模型考虑枯落物盖度对 C 因子的影响,适用于枯落物盖度较高的灌木地和林地。基于上述的组合

算法, RUSLE 模型在 4 种土地利用方式坡面模拟土壤侵蚀模数, 其 NSE 和 RMSE 结果均优于 144 种组合算法的模拟平均值。

表 5 RUSLE 模型对不同土地利用方式土壤侵蚀模拟精度较高的因子算法组合

Table 5 Combination of factor algorithms with high accuracy for soil erosion simulation of different land use modes by RUSLE model

土地利用 方式	侵蚀因子				NSE	RMSE/ ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)
	R	K	LS	C		
裸地	R_H	K_E	$LS_{刘}$	—	0.21	1.94
草地	$R_{次}$	K_E, K_T	$LS_{刘}$	$C_{赋}$	-0.37~-1.02	2.51~3.05
灌木地	$R_{次}, R_H$	K_E, K_T	$LS_{刘}, LS_{赵}$	$C_{刘}$	-0.11~-2.34	2.26~4.02
林地	$R_{次}$	K_E, K_T	$LS_{刘}, LS_{赵}$	$C_{刘}$	-0.02~-1.01	2.03~3.46

综上所述, 使用 RUSLE 模型对黄土高原退耕植被恢复坡面的土壤侵蚀进行模拟时, 需要对因子算法进一步改进。当降雨数据时间分辨率足够高时, R 因子算法的改进应精确到次降雨或日降雨, 减小因时间尺度问题对 R 因子取值造成的误差。仅利用土壤粒径计算 K 因子是不够合理的, 不能完全呈现土壤的可蚀性, 还应综合考虑土壤有机质含量、团粒结构组成和容重等土壤理化性质对 K 因子的影响。随着退耕年限的增加, 退耕植被恢复坡面的植被也在发生演替, 对 C 因子算法的改进不仅考虑植被覆盖度, 还要同时考虑枯落物、植被高度等对 C 因子取值的影响。黄土高原的地形起伏较大, 不同坡度等级对 LS 因子的影响程度不同, 对 LS 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 $>10^\circ$ 以上范围的进一步细化研究。

4 结论

(1) 为了探究 RUSLE 模型在黄土高原退耕植被恢复坡面适应性, 本文基于 RUSLE 模型各侵蚀因子不同算法交叉组合, 对 144 种因子组合下退耕植被恢复坡面的土壤侵蚀进行模拟。结合原位实测数据, 纳什效率系数(NSE)和均方根误差(RMSE)对模型模拟结果的评价显示, RUSLE 模型对退耕植被恢复坡面土壤侵蚀的模拟出现较大的误差, 且高估退耕植被恢复坡面的土壤侵蚀。

(2) RUSLE 模型在退耕植被恢复坡面的模拟效果比裸地的模拟效果差, 其中对退耕草地的模拟效果最差。侵蚀因子的不同算法对 RUSLE 模型模拟退耕植被恢复坡面土壤侵蚀效果造成不同程度的影响, 现有因子算法难以评价退耕植被恢复坡面上的土壤侵蚀情况, 需针对退耕植被恢复坡面特点, 对侵蚀因子算法进一步改进。

(3) 通过本研究分析, R 因子算法的改进尽可能精确到次降雨或日降雨, 可减小对 R 因子的计算误

差; 利用土壤粒径计算 K 因子是不够的, 还应综合考虑土壤有机质含量、团粒结构组成和容重等土壤理化性质的影响; 对 C 因子算法的改进不仅要考虑植被覆盖度, 而且还要考虑植被高度、枯落物、生物结皮等的影响; 黄土高原的地形起伏较大, 不同坡度等级对 LS 因子的影响程度不同, 仍需对坡度 $>10^\circ$ 以上范围的进一步细化等级, 研究其 LS 因子的算法。

参考文献:

- [1] SHI Z H, CHEN L D, FANG N F, et al. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China [J]. Catena, 2009, 77(1): 1-7.
- [2] ZHAO G J, MU X M, WEN Z M, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the loess plateau of China [J]. Land Degradation and Development, 2013, 24(5): 499-510.
- [3] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains [J]. Agricultural Handbook, 1965, 282: 47.
- [4] WISCHMEIER W H, SMITH D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.
- [5] YODER D, LOWN J. The future of RUSLE: Inside the new Revised Universal Soil Loss Equation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 50: 484-489.
- [6] 刘宝元, 谢云, 张科利. 土壤侵蚀预报模型 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [7] LIU B Y, XIE Y, ZHANG K L. Soil loss prediction model [M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2001.
- [8] LIU B Y, ZHANG K L, XIE Y. An empirical soil loss equation [C]. Proceedings of the 12th International Soil Conservation Organization Conference, Beijing, China, 2002, 26: 21-25.
- [9] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策 [J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [10] LI Z S, YANG L, WANG G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [11] 李愿会, 路秋玲. 我国旱区造林绿化的战略思考 [J]. 林业资源管理, 2020(4): 1-6.
- [12] LI Y H, LU Q L. Strategic thinking on afforestation in arid areas of China [J]. Forest Resources Management, 2020(4): 1-6.
- [13] 许文强, 陈曦, 罗格平, 等. 土壤碳循环研究进展及干旱区土壤碳循环研究展望 [J]. 干旱区地理, 2011, 34(4): 614-620.
- [14] XU W Q, CHEN X, LUO G P, et al. Progress of research on soil carbon cycle and perspectives of soil car-

- bon cycle in arid region[J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(4): 614-620.
- [11] LAL R. Forest soils and carbon sequestration[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 220(1/2/3): 242-258.
- [12] 史文海. 黄土高原坡面及流域尺度水-土-养分流失耦合模拟研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2018.
- SHI W H. Simulations of water, soil and nutrient losses at slope and watershed scales of the Loess Plateau [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [13] 闫瑞, 张晓萍, 李够霞, 等. 基于 RUSLE 的北洛河上游流域侵蚀产沙模拟研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 32-37.
- YAN R, ZHANG X P, LI G X, et al. Soil erosion and sediment yield assessment based on RUSLE in Beiluo River on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(4): 32-37.
- [14] XU Z, ZHANG S H, ZHOU Y, et al. Characteristics of watershed dynamic sediment delivery based on improved RUSLE model[J]. *Catena*, 2022, 219: e106602.
- [15] 刘志超, 杜英, 徐丽萍, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕还林(草)工程的经济效应: 以安塞县为例[J]. *生态学报*, 2008, 28(4): 1476-1482.
- LIU Z C, DU Y, XU L P, et al. Analysis on economical effect of project of "returning farmland to forest and grassland" in the Loess Hilly and Gully Area: A case study in Ansai County[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1476-1482.
- [16] 周德成, 赵淑清, 朱超. 退耕还林工程对黄土高原土地利用/覆被变化的影响: 以陕西省安塞县为例[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(11): 1866-1878.
- ZHOU D C, ZHAO S Q, ZHU C. Impacts of the sloping land conversion program on the land use/cover change in the Loess Plateau: A case study in Ansai County of Shaanxi Province, China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(11): 1866-1878.
- [17] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区不同坡向及坡位草本群落生物量及多样性研究[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(1): 67-73.
- ZHOU P, LIU G B, HOU X L. Biomass and species diversity of herbosa at different position and aspects of slope in the Hilly-gully Region of Loess Plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(1): 67-73.
- [18] 何绍浪, 李凤英, 何小武. 水蚀预报中降雨侵蚀力研究进展[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(2): 262-270.
- HE S L, LI F Y, HE X W. Research progress of rainfall erosivity for water erosion prediction[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(2): 262-270.
- [19] WISCHMEIER W H. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1959, 23(3): 246-249.
- [20] 江忠善, 李秀英. 黄土高原土壤流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究[J]. *水土保持研究*, 1988(1): 40-45.
- JIANG Z S, LI X Y. Study on the rainfall erosivity and the topographic factor of predicting soil loss equation in the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1988(1): 40-45.
- [21] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. *地理科学*, 2002, 22(6): 705-711.
- ZHANG W B, XIE Y, LIU B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(6): 705-711.
- [22] ARNOLDUS H, BOODT M D, GABRIELS D. An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation[M]. New York: John Wiley and Sons, 1980: 127-132.
- [23] 胡春艳. 基于 GIS 和 RS 的黄土丘陵区梯田动态监测及驱动力分析: 以关川河流域为例[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- HU C Y. Dynamic monitoring and driving forces analysis of terraces in the Hilly Loess Plateau Region based on GIS and RS: A study in Guanchuan River Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [24] ZHANG G H, NEARING M A, LIU B Y. Potential effects of climate change on rainfall erosivity in the Yellow River Basin of China[J]. *Transactions of the ASAE*, 2005, 48(2): 511-517.
- [25] WILLIAMS J, RENARD K, DYKE P. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity[J]. *Journal of Soil water Conservation*, 1983, 38(5): 381-383.
- [26] TORRI D, POESEN J, BORELLI L. Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset[J]. *Catena*, 1997, 31(1/2): 1-22.
- [27] LIU B Y, NEARING M A, SHI P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1759-1763.
- [28] 金争平, 赵焕勋, 和泰, 等. 皇甫川区小流域土壤侵蚀量预报方程研究[J]. *水土保持学报*, 1991, 5(1): 8-18.
- JIN Z P, ZHAO H X, HE T, et al. Research on prediction equation of soil erosion in small watershed of Huangfuchuan District[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 5(1): 8-18.
- [29] ZHAO X G, SONG S J, GUAN Y Y. Analysis of runoff and soil loss on the gentle fallow slope land in gully region loess plateau[C]. // 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment. IEEE, 2010: 1-4.
- [30] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 10(1): 1-9.

- JIANG Z S, WANG Z Q, LIU Z. Quantitative study on spatial change of soil erosion in small watershed in loess hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, 10(1): 1-9.
- [31] 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.
- LIU B Y, BI X G, FU S H. Beijing soil loss equation [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [32] 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.
- [33] PODWOJEWSKI P, JANEAU J L, GRELLIER S, et al. Influence of grass soil cover on water runoff and soil detachment under rainfall simulation in a sub-humid South African degraded rangeland [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(7): 911-922.
- [34] ZHAO J, YANG Y Z, ZHAO Q X, et al. Effects of ecological restoration projects on changes in land cover: A case study on the Loess Plateau in China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: e44496.
- [35] 于悦, 章文波, 王国燕. 果园植被盖度季节变化监测及生物措施因子测算[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 761-768.
- YU Y, ZHANG W B, WANG G Y. Monitoring of seasonal variation of vegetation cover and evaluation of biological-control factor in orchards of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 761-768.
- [36] 程琳, 杨勤科, 谢红霞, 等. 基于 GIS 和 CSLE 的陕西省土壤侵蚀定量评价方法研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 61-66.
- CHENG L, YANG Q K, XIE H X, et al. GIS and CSLE based quantitative assessment of soil erosion in Shaanxi, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(5): 61-66.
- [37] 吕明权, 吴胜军, 温兆飞, 等. 基于 SCS-CN 与 MUSLE 模型的三峡库区小流域侵蚀产沙模拟[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(5): 860-867.
- LV M Q, WU S J, WEN Z F, et al. Modelling soil erosion and sediment yield in a small watershed of three gorges reservoir area based on SCS-CN and MUSLE model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(5): 860-867.
- [38] 鲁向晖, 张海娜, 白桦, 等. 赣江流域 1986—2015 年降雨侵蚀力时空变化特征[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(10): 51-58.
- LU X H, ZHANG H N, BAI H, et al. Spatial and temporal variations in rainfall erosivity during 1986—2015 in the Ganjiang River basin [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2020, 37(10): 51-58.
- [39] 李喻鑫. 江西省平江流域降雨侵蚀力简易算法及时空分布研究[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2019.
- LI Y X. Simple algorithm of rainfall erosivity and its temporal and spatial distribution in Pingjiang basin of Jiangxi Province[D]. Nanchang: Nanchang Institute of Technology, 2019.
- [40] RENARD K G, FREIMUND J R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE[J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 157(1/2/3/4): 287-306.
- [41] 林芳, 朱兆龙, 曾全超, 等. 延河流域三种土壤可蚀性 K 值估算方法比较[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1136-1146.
- LIN F, ZHU Z L, ZENG Q C, et al. Comparative study of three different methods for estimation of soil erodibility K in Yanhe watershed of China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1136-1146.
- [42] 李想. 北京山区树冠和枯落物结构对幼林水文防蚀功能动态影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- LI X. Effect of tree crown and leaf litter structure on related hydrological and anti-erosion functions of small trees on a process basis in Beijing Mountainous Area, China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.