

基于 SCS-CN 与 MUSLE 模型耦合的 微地形侵蚀预测

屈加琪, 饶文利, 任凡斐, 钱振宇, 张青峰

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712199)

摘要: [目的] 探究耦合模型在不同坡度、雨强、时间和地表措施条件下定量微地形土壤流失量的预测精度, 为微地形侵蚀量的精确预测提供科学参考。[方法] 以黄土裸坡微地形为研究对象, 提出根据地表实测径流(Q_T)和地表粗糙度(SR)对径流曲线法模型(SCS-CN)进行修正以预测径流量, 并与修正通用土壤流失方程(MUSLE)耦合进行侵蚀量预测。[结果] ①与原始 SCS-CN 模型径流量预测结果 Q_O ($R^2=0.7056$) 相比, 通过 Q_T 反算 CN 值的修正模型 SCS-Q 和通过 SR 修正模型 SCS-SR 的径流量 Q_{CN} ($R^2=0.9338$) 和 Q_{SR} ($R^2=0.7691$) 预测精度分别提高了 32% 和 9%; ②在微地形条件下耦合模型精度与传统 RUSLE 因子组合模型相比有了明显提升, 且相较 SCS-Q 与 MUSLE 的耦合模型(MUSLE-Q) ($NSE \in [0.23, 0.94]$), SCS-SR 与 MUSLE 的耦合模型(MUSLE-SR)表现出更高的预测精度 ($NSE \in [0.50, 0.94]$); ③在微地形侵蚀量预测中, 地表措施对耦合模型精度的影响 ($\Delta NSE=63\%$) 显著大于雨强 ($\Delta NSE=52\%$) 和坡度 ($\Delta NSE=40\%$) 的影响。[结论] 在微地形条件下, 耦合模型的预测精度随降雨时间显著提高, 降雨前 20 min 精度较低 ($R^2 < 0.5$), 而降雨 20 min 后精度显著提升 ($R^2 > 0.8$)。

关键词: 微地形; 地表粗糙度; SCS-CN 模型; MUSLE 模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0081-10

中图分类号: S157.1

文献参数: 屈加琪, 饶文利, 任凡斐, 等. 基于 SCS-CN 与 MUSLE 模型耦合的微地形侵蚀预测[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 81-90. Qu Jiaqi, Rao Wenli, Ren Fanfei, et al. Predicting microtopography erosion by coupling SCS-CN and MUSLE models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 81-90. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.032; CSTR:32312.14.stbctb.2025.05.032.

Predicting microtopography erosion by coupling SCS-CN and MUSLE models

Qu Jiaqi, Rao Wenli, Ren Fanfei, Qian Zhenyu, Zhang Qingfeng

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712199, China)

Abstract: [Objective] The precision of using coupled prediction models in quantifying microtopographic soil loss was evaluated for varying slopes, rainfall intensities, temporal scales, and surface treatments in order to provide scientific references for microtopographic soil loss prediction. [Methods] The microtopography of bare loess slopes was studied. The soil conservation service curve number (SCS-CN) model was modified according to measured surface runoff (Q_T) and surface roughness (SR) values for predicting runoff volume. The modified model was then coupled to the revised universal soil loss equation (MUSLE) for predicting soil erosion. [Results] ① The modified models, SCS-Q (using CN values back-calculated from Q_T) and SCS-SR (modified via SR), predicted runoff (Q_{CN} and Q_{SR} , respectively) with R^2 values of 0.9338 and 0.7691, respectively. The developed models were more accurate by 32% and 9%, respectively, than the original SCS-CN model, which predicted runoff, Q_O , with an R^2 of 0.7056. ② The coupled models produced more accurate microtopographic erosion predictions than the RUSLE models. The MUSLE-SR model (combining SCS-SR with MUSLE) was more accurate ($NSE \in [0.50, 0.94]$) than the MUSLE-Q model (combining SCS-Q with MUSLE) ($NSE \in [0.23,$

收稿日期: 2025-04-07

修回日期: 2025-06-23

采用日期: 2025-06-27

资助项目: 中国陕西省自然科学基金基础研究计划项目“陕北黄土高原侵蚀分形特征”(2021JZ-17); 中国陕西省农业关键科学与核心技术项目(2024NYGG011); 中国陕西农业协同创新与推广联盟项目(LMR202204)

第一作者: 屈加琪(2000—), 女(汉族), 内蒙古自治区巴彦淖尔市人, 硕士研究生, 土地资源与空间信息技术专业。Email: qujiaqi@nwfau.edu.cn.
通信作者: 张青峰(1974—), 男(汉族), 山西省孝义市人, 博士, 教授, 主要从事土地资源与空间信息技术方面的研究。Email: zhqf@nwsuaf.edu.cn.

0.94]). ③ During the microtopographic soil loss prediction, the surface measures more strongly affected the microtopographic erosion prediction accuracy of the coupled model ($\Delta\text{NSE}=63\%$) than the rainfall intensity ($\Delta\text{NSE}=52\%$) or slope ($\Delta\text{NSE}=40\%$). [Conclusion] The microtopographic soil erosion prediction accuracy of the coupled models considerably increased with rainfall duration: accuracy was low in the first 20 min of rainfall ($R^2<0.5$) but markedly increased after 20 min ($R^2>0.8$).

Keywords: microtopographic; surface roughness; soil conservation service curve number model; revised universal soil loss equation; soil erosion

根据《水土保持术语(GB/T 20465—2006)》和《中华人民共和国水土保持法》,水土流失是指在水力、风力、重力及冻融等自然营力和人类活动共同作用下,水土资源和土地生产能力的破坏和损失,包括土地表层侵蚀和水的损失。这一概念强调了水土共生系统的功能性损失,特别是地表径流和表土的损失,故又可称其为水土损失^[1]。除人为因素外,水力侵蚀主要由于自然降水无法就地消纳,地表径流顺势下流,造成了水分和土壤同时流失。水土流失是一个高度非线性、多尺度的地理过程。在过去的 10 a 间,对水土流失的预测主要集中在流域和坡面尺度^[2]。随着研究尺度向微地形尺度(如生产建设项目中的临时堆土)的深入,研究者们开始采用更高分辨率的地形数据和多源数据融合来实现降尺度的侵蚀预测。然而,传统侵蚀模型(如 USLE/RUSLE)因参数化方案和计算单元的限制,难以直接适用于微尺度场景^[3]。要实现精准的微地形侵蚀模拟,必须将模型与微地形特征因子(如地表粗糙度、微坡度等)进行耦合重构,以解决尺度转换中的参数适配性问题。其中地表粗糙度(surface roughness, SR)作为在不同空间尺度具有不同量级^[4]可以综合表征微尺度地表高低起伏和坡面高程空间变异的物理量^[5],是影响微地形侵蚀的主导因子。现有微地形侵蚀模型的研究集中在微地形因子与其他因子的互动影响机制和不同方法在不同尺度的优越性比较上,如韩克秋等^[6]研究了在不同分辨率下不同地形因子对水土流失预测的影响,唐辉等^[7]研究了黄土坡面微地形因子(如微坡度、地形起伏度、地表切割度、洼地蓄积量、地表粗糙度)的变化特征及其与产流产沙的响应关系,其研究结果表明微地形因子与产流产沙之间具有较好的线性关系,周庆梓等^[8]基于多源数据融合的深度学习方法开展了多尺度径流预报模型及其优化研究。但目前对于微地形尺度的水土侵蚀量化预测方面仍存在明显不足。针对这一空白,本研究尝试将地表粗糙度这一关键微地形参数与传统侵蚀模型相结合以实现微地形水土侵蚀量的精确预测。

在径流预测方面,常用的模型包括基于统计关系或经验公式的经验模型 SCS-CN、基于水文过程

的简化物理关系模型 HBV^[9]以及适用于高精度径流预测的物理模型 SWMM 和 MIKE SHE 等^[10]。SCS-CN 模型通过曲线数(CN)综合反映影响径流预测的各个因子,能够在不同条件下实现径流预测。在实际操作中,CN 值可以通过实测径流量反推,或者通过建立地形因子与 CN 值的关系曲线进行修正^[11]。例如,高扬等人^[12]在投影面积为 6.75 m²的西南紫色土坡耕地径流量预测误差最大为 10.22%;冯家伟^[13]在 2 m²土槽微地形条件下径流预测的相对误差最大为 5.24%。因此,SCS-CN 模型具有较高的可操作性、广泛的适用性和较高的模拟结果准确性^[14],可适用于微地形径流量预测研究。在侵蚀预测方面,常用的模型包括基于物理过程模拟径流侵蚀和沉积过程的物理模型 WEPP、估算年均土壤流失量的数学模型 USLE 以及适用于不同地理条件和土地利用类型的数学模型 MUSLE 等^[15]。MUSLE 模型主要用于评估不同地区、不同尺度下土壤流失量与其主要影响因子间定量关系,具有结构简单,易于使用和广泛适用的特点。然而,该模型主要用于流域尺度年降水条件下的水土流失预测^[16],在某些特定地区或特殊情况下(如坡面微地形尺度和次降水条件),预测结果可能存在一定偏差^[17],仍需要结合实地调查和监测数据进行修正。如吕全明等^[18]采用 SCS-CN 与 MUSLE 模型结合的方法得到了精度在可接受范围内的模拟值,但由于未引入微地形因子其预测尺度仍为公里级别。基于此,本研究提出通过微地形因子 SR 与 CN 值之间的线性关系构建尺度转换桥梁——SCS-SR 模型。将 SR 通过 SCS-SR 模型引入 MUSLE 模型,探究耦合预测模型在不同坡度、雨强、时间和地表措施的具体精度表现。本研究突破了传统侵蚀模型的尺度限制,实现微地形侵蚀量的精准预测。

1 试验布设与数据获取

1.1 试验布设

供试土壤选择陕西省杨凌农业高新技术产业示范区耕地表层土(0—20 cm),质地为砂壤土(根据 NRCS 水文土壤类型定义表,属 C 类土壤),土壤容重

为 1.30 g/cm^2 , 土壤含水率为 10% , pH 值为 8.2 , 土壤结构疏松, 易受水蚀影响。试验土壤从野外采集后过筛碾碎。根据试验土样土壤含水率和土壤容重计算所需水量和土样重量。配水过程以多翻少喷的原则使用喷壶均匀喷洒确保土样能够均匀受水。配水后的土样放入大塑料桶中, 盖上桶盖并且封上塑料膜静置 24 h , 让水分扩散均匀后分层填入试验槽。为确保试验更接近自然状况, 土壤分层填装时模拟自然压实过程布设。本试验于 2023 年 6 月在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室进行。试验槽规格为 $2.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$, 可在 $0^\circ \sim 25^\circ$ 调节, 分别设置 2 个不同的坡度 ($5^\circ, 15^\circ$), 雨强 ($60 \text{ mm/h}, 90 \text{ mm/h}$), 地表措施 [人工掏挖 (AB)、平坦裸地对照 (CK)] 共 8 个试验组 (图 1), 降雨历时均为 90 min ; 每组试验设置 3 次重复并取平均值。微地形设置和人工降雨试验方法参见张鑫等^[14]研究结果。

1.2 数据获取

径流开始产生后每隔 30 s 进行收集, 称重、静置。分离上部清液后, 将泥沙样品放置于 105°C 的烘箱内 24 h 烘干, 再次称重, 用于计算径流量和产沙量; 取 3 次试验的平均值作为实测径流量 Q_T 和实测产沙量 A_T 。通过试验设计的实际降雨量、雨强计算得出不同降雨条件下的降雨侵蚀力 R_K ^[19]。使用相机在降雨试验前对试验土槽进行重叠度大于 80% 的环绕拍

摄, 使用 Context Cation 软件对相片进行三维重建并提取点云, 利用 ArcGISPro 软件将点云处理为高精度 DEM 得到地表粗糙度 SR。使用符素华等^[20]开发的 LS 计算工具得到坡长坡度因子 LS。



a AB措施(模拟人工掏挖) b CK对照(模拟平坦裸地)

图 1 模拟不同地表措施填装后土壤

Fig.1 Simulate soil after filling with different surface measures

2 研究方法

2.1 技术路线图

基于 SCS-CN 与 MUSLE 耦合模型的微地形侵蚀预测技术路线如图 2 所示。

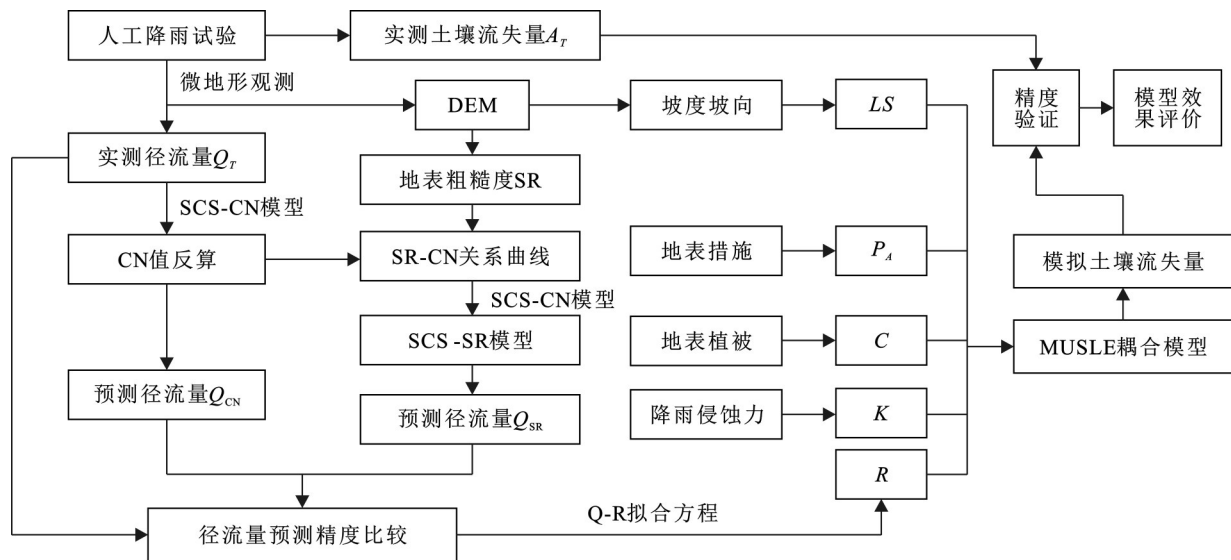


图 2 耦合模型侵蚀预测技术路线图

Fig.2 Technical roadmap of erosion prediction with coupled model

2.2 SCS-CN 模型及径流预测

2.2.1 标准 SCS-CN 模型与其预测径流量 (Q_0)

标准 SCS-CN 模型基于水量平衡方程建立, 即:

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

式中: P 为降雨量 (mm); I_a 为降雨初损 (mm); F 为实

际入渗量 (mm); Q 为实际直接地表径流量 (mm)。

SCS-CN 模型有两个基本假定: ① 实际地表径流量 Q 与流域可能最大径流量的比值等于实际入渗量 F 与潜在蓄水能力 S (mm) 之比; ② 降雨初损 I_a 是 S 的一部分。计算公式为:

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

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

式中: λ 为初损系数(无量纲)。由式(1)–(2)可得:

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

根据公式(3)–(4) 得出:

$$Q = \frac{(P - \lambda \times S)^2}{P + (1 - \lambda)S}, P > \lambda S$$

$$Q = 0, P < \lambda S \quad (5)$$

无量纲曲线数 CN 是反映流域特性的综合参数, 其与 S 的经验转换关系为

$$CN = 25400 / (S + 254) \quad (6)$$

美国土壤保持局(SCS)经大量降雨径流试验数据得到公式(3)中 $\lambda = 0.2$ 。通过公式(3)–(4)可以推出 S 值的反算公式:

$$S = 5 \left[P + 2Q - (4Q^2 + 5PQ)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (7)$$

根据公式(6)–(7) 可反推出 CN 值反算公式:

$$CN = \frac{25400}{254 + 5 \left[P + 2Q - (4Q^2 + 5PQ)^{\frac{1}{2}} \right]} \quad (8)$$

根据 SCS 曲线数表, 有保护措施的 C 类土壤 CN 值为 78, 无保护措施的 C 类土壤 CN 值为 88, AB 措施试验组 CN 值设为 78, CK 措施试验组 CN 值设为 88, 代入标准 SCS-CN 模型就得到其预测径流量(Q_o)。

2.2.2 SCS-Q 模型及其预测径流量 Q_{CN}

考虑到数据样本的总量以及计算的准确性与便捷性, 根据公式(8)反算每一组重复试验的实测降雨径流数据所对应的 CN 值, 并采用算术平均值法计算其平均值就得到反算 CN 值, 将其代替 SCS-CN 模型中的 CN 值即可得到修正模型 SCS-Q 及其预测径流量 Q_{CN} 。

2.2.3 SCS-SR 模型及其预测径流量(Q_{SR})

地表粗糙度(SR)是三维表面积与平面面积之比, 使用 ArcGIS 中 ABOVE 工具得到 DEM 的三维表面积, 用表面面积除以 DEM 投影面积即为 SR。以 SR 作为自变量, 反算 CN 值作为因变量, 建立二者的线性关系:

$$CN = 17.455SR + 64.593 \quad (R^2 = 0.574) \quad (9)$$

将公式(9)代入公式(5)可得:

$$Q_{SR} = \frac{\left[P - \lambda \left(\frac{25400}{17.455SR + 64.593} - 254 \right) \right]^2}{P + (1 - \lambda) \left(\frac{25400}{17.455SR + 64.593} - 254 \right)} \quad (10)$$

公式(10)即为 SCS-CN 模型引入 SR 后得到的 SCS-SR 模型。通过该模型利用实测地表粗糙度和降雨量计算得出的径流量即为 Q_{SR} 。

2.3 SCS-CN 模型与 MUSLE 模型的耦合

MUSLE 模型公式为

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P_A \quad (11)$$

式中: A 为单次降雨土壤流失量(t); K 为土壤可蚀性因子, 计算方法参见陈红等^[21]研究; LS 为地形因子; C 为植被覆盖与管理因子; P_A 为水土保持措施因子, 反映水土保持措施对坡面土壤流失量的控制作用, 变化范围为 0~1。 $P_A = 0$ 代表不发生侵蚀的地区, $P_A = 1$ 代表未采取任何水土保持措施的地区。 P_A 被认为是 USLE 方程中最难确定的因子, 可根据试验需求进行设置和估算^[22]。本试验中, 根据 Wischmeier 提出的典型设置方式, P_A 取值的原则无保护措施设为 1, 坡度影响参考 Wener 经验方程中坡度与 P 因子线性关系式常数为 0.2^[23] 设为 0.2; 地表措施影响值参考 P 因子通用赋值参考中免耕地与坡耕地赋值差为 0.1 设为 0.1; 降雨 60 mm/h 和降雨 90 mm/h 试验组的实测土壤流失量几乎相差 1 倍, 雨强的变化显著影响试验区的水土流失敏感性^[24], 根据水土流失敏感性影响因子划分标准, 不同敏感性的 P_A 因子平均差为 0.2, 因此本试验中雨强对 P_A 影响值设为 0.2。综上所述, 本试验具体 P_A 设值规则为试验组 90CK15 (雨强为 90 mm/h, 平坦裸地, 坡度为 15°) 为无保持措施组 P_A 值设为 1, 其余组 P_A 值与 90CK15 相比: 雨强更小则减 0.2, 坡度更小减 0.2, 具有地表措施减 0.1。据此决定每个试验组的 P_A 值。 R 为径流因子, 可通过与径流量 Q 的关系式^[25] 进行计算:

$$R = 11.8 \times (Q \cdot q_p)^{0.56} \quad (12)$$

式中: q_p 为峰值径流量(m^3/s)。计算公式为

$$q_p = C_q \cdot i_q \cdot A_q \quad (13)$$

式中: C_q 表示径流系数(无量纲); i_q 表示降雨强度(m/s); A_q 表示产流面积(m^2)。

因此, 可以通过径流量 Q 将 SCS-CN 与 MUSLE 模型耦合, 耦合后的侵蚀预测模型为

$$A = 11.8 \times (Q \cdot q_p)^{0.56} \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P_A \quad (14)$$

不同的 Q 取值, 对应不同的耦合模型和侵蚀量预测结果, 即通过 Q_{CN} 可得到耦合模型 MUSLE-Q 及其预测土壤流失量 A_Q , 通过 Q_{SR} 可得到耦合模型 MUSLE-SR 及其预测结果 A_{SR} 。

2.4 精度验证方法

2.4.1 径流模型精度验证

计算实测径流量 Q_T 与 SCS-CN 模型预测的径流量 Q_o , SCS-SR 模型预测的径流量 Q_{SR} , SCS-Q 模型

预测的径流量 Q_{CN} 三者的误差值, 并进行拟合优度 (R^2) 分析, 以评估模型的预测精度。

2.4.2 耦合模型精度验证

用不同降雨时段(降雨 20 min, 40 min, 60 min, 90 min)内收集的实测产沙量 A_T 对耦合模型所预测的产沙量 A_Q, A_{SR} 进行精度验证。同时, 使用 NASH 效率系数(NSE)对不同耦合模型的预测结果进行分析。NSE $\in (-\infty, 1]$, NSE 值越接近 1, 表示模型可信度越高, NSE 大于 0.5 即说明模型可信度很高; NSE 接近 0, 表示模拟结果接近观测值的平均值水平, 即

总体结果可信。在得出 NSE 后控制其他条件, 计算仅雨强(60 mm/h 和 90 mm/h)、坡度(5° 和 15°)、地表措施(AB 和 CK)改变引发的 NSE 值变化率, 导致的 NSE 变化率越高即说明该因素对模型精度的影响越大。

3 结果与分析

3.1 SCS-CN 模型精度分析

不同 SCS-CN 模型 CN 值与其径流量预测误差对比分析结果详见表 1。

表 1 SCS-CN、SCS-Q 以及 SCS-SR 预测径流量及其误差对比
Table 1 Comparison of runoff predicted by SCS-CN, SCS-Q and SCS-SR and their errors

试验组	实测径流 Q_T	SCS-CN			SCS-Q			SCS-SR		
		原始 CN 值	预测径流量 Q_O/mm	相对误差 %	反算 CN 值	预测径流量 Q_{CN}/mm	相对误差 %	SR 值	预测径流量 Q_{SR}/mm	相对误差 %
60AB5	47.91	78	38.87	27.6	81.86	45.92	4.1	1.14	51.08	8.2
60CK5	53.70	88	58.63	22.4	83.72	49.56	7.7	1.51	65.27	19.7
60AB15	62.64	78	38.87	37.9	88.58	59.93	4.3	1.13	50.89	30.2
60CK15	76.05	88	58.63	22.9	95.97	78.36	3.0	1.45	62.82	22.6
90AB5	82.23	78	76.26	7.3	83.91	90.18	9.7	1.11	90.40	10.7
90CK5	84.72	88	100.81	19.0	87.00	88.17	15.2	1.41	104.12	19.2
90AB15	95.91	78	76.26	20.5	85.11	93.26	2.8	1.12	90.94	6.5
90CK15	109.11	88	100.81	7.6	90.52	107.62	1.4	1.54	110.47	1.3

注: ①试验组的命名规则为雨强+地表措施+坡度, 如 60AB5 表示雨强 60mm/h, 坡度为 5° , 地表措施为人工开挖。②表中误差为相对误差百分比。下同。

由表 1 可知, 两种修正模型 SCS-Q, SCS-SR 虽对 90AB5, 90CK5 两试验组精度影响不大, 但总体上均提升了径流量预测精度。

SCS-Q 模型对雨强为 60 mm/h 时的径流量预测精度提升更为明显, 而 SCS-SR 模型在雨强为

90 mm/h 时的预测效果更好。不同 SCS-CN 模型拟合优度 (R^2) 对比结果如图 3 所示。由图 3 可知, 与原始 SCS-CN 模型 R^2 为 0.769 1 相比, SCS-Q 模型和 SCS-SR 模型 R^2 分别提高了 32% 和 9%, SCS-Q 模型表现出更好的模型拟合效果。

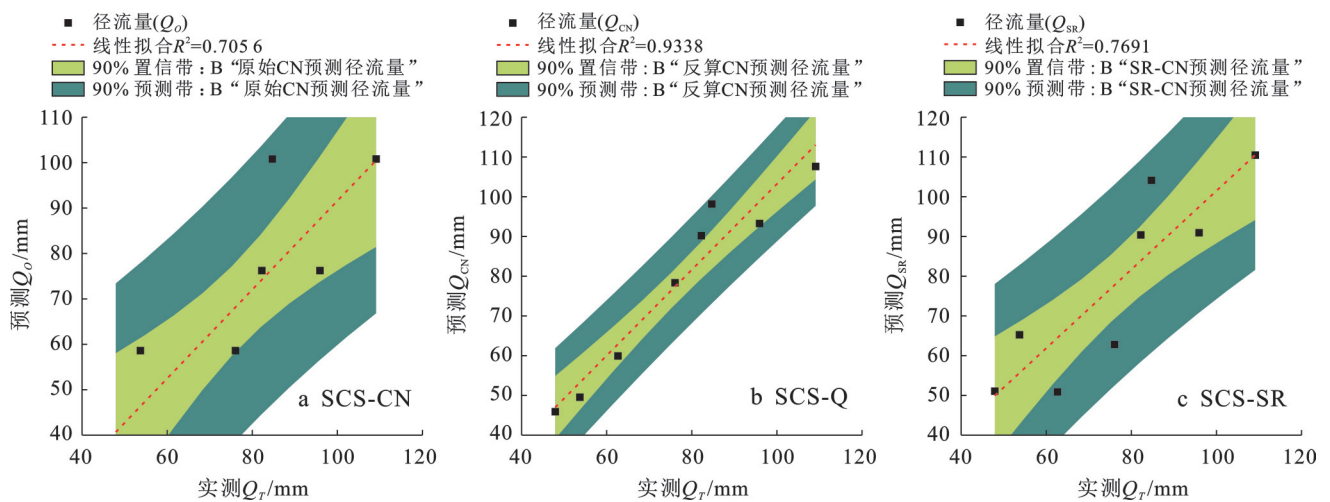


图 3 不同径流预测模型拟合精度对比

Fig.3 Comparison of prediction accuracy of different runoff prediction models

3.2 MUSLE 模型因子

将 Q_{SR} 和 Q_{CN} 代入公式(11), 得到对应径流因子 R_{SR} 和 R_{CN} (表 2)。土壤可侵蚀因子 K 详见表 3。LS

计算结果详见表 4。植被覆盖与管理因子 C 均设为 1。根据雨强、地表措施和坡度的不同, 设置各试验组 P_A 值(表 5)。

表 2 不同条件下径流因子 R 计算结果Table 2 Calculation results of runoff factor R under different conditions

试验组	峰值流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	降雨强度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	产流面积/ m^2	径流系数	径流因子 R_{SR}	径流因子 R_{CN}
60AB5	0.001 1	0.001 0	2	0.532	0.049	0.046
60CK5	0.001 2	0.001 0	2	0.597	0.059	0.051
60AB15	0.001 4	0.001 0	2	0.778	0.056	0.062
60CK15	0.001 7	0.001 0	2	0.845	0.070	0.062
90AB5	0.001 8	0.001 5	2	0.609	0.089	0.089
90CK5	0.001 9	0.001 5	2	0.628	0.099	0.096
90AB15	0.002 1	0.001 5	2	0.710	0.097	0.099
90CK15	0.002 4	0.001 5	2	0.808	0.117	0.116

表 3 不同条件下土壤可侵蚀因子 K 计算结果
Table 3 Calculation results of soil erodible factors K under different conditions

试验组	土壤流失量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	降雨侵蚀力 R_k	土壤可侵蚀 因子 K
60AB5	11.801 6	41.134 8	0.286 9
60CK5	12.636 6	41.134 8	0.307 2
60AB15	13.825 4	41.134 8	0.336 1
60CK15	16.622 6	41.134 8	0.404 1
90AB5	26.927 9	97.741 8	0.275 5
90CK5	28.960 9	97.741 8	0.296 3
90AB15	37.464 4	97.741 8	0.383 3
90CK15	41.110 2	97.741 8	0.420 6

3.3 SCS-Q 模型和 SCS-SR 模型与 MUSLE 耦合精度比较

根据 MUSLE-Q 和 MUSLE-SR 预测得到土壤

流失量 A_Q 和 A_{SR} , 将其单位吨(t)换算为克(g), 结果详见表 6。

3.3.1 不同时间预测精度

4 个时间段不同条件下 MUSLE-SR 和 MUSLE-Q 的预测精度对比如图 4 所示。由图 4 可知, 模型预测精度的时间演变特征为在降雨初期($t=20 \text{ min}$), MUSLE-SR 与 MUSLE-Q 两种耦合模型的确定系数(R^2)均低于 0.50, 显示此时段模型预测可靠性不足; 随着降雨持续, 至 $t=40 \text{ min}$ 和 60 min 时段, 两模型 R^2 值显著提升至 0.85 以上, 其中 MUSLE-SR 模型($R^2 > 0.95$)较 MUSLE-Q 模型($R^2 > 0.85$)表现出更优的预测性能; 虽然在 $t=90 \text{ min}$ 时出现精度衰减现象(R^2 降幅约 0.03~0.05), 但仍维持较高预测水平($R^2 > 0.85$)。这一时序特征表明耦合模型具有时间累积效应, 其预测效能随模拟时长增加而增强。

表 4 不同条件地形因子 (LS)Table 4 Topographic factor (LS) under varied experimental conditions

数据组	60AB5	60CK5	60AB15	60CK15	90AB5	90CK5	90AB15	90CK15
LS	0.259	0.184	0.187	0.144	0.257	0.189	0.183	0.133

表 5 水土保持措施因子 (P_A)Table 5 Soil and water conservation practice factor (P_A)

数据组	60AB5	60CK5	60AB15	60CK15	90AB5	90CK5	90AB15	90CK15
P_A 值	0.5	0.6	0.7	0.8	0.7	0.8	0.9	1

3.3.2 不同雨强和地表措施

表 7 为不同试验组的两种耦合模型的 NSE 值。由表 7 可见, MUSLE-SR 在各种条件下的 NSE 值均 ≥ 0.5 , 其性能要优于 MUSLE-Q 模型。除 MUSLE-Q 在 90AB15, 90CK15 外, 两种耦合模型均在 AB 措施下表现更佳。两种耦合模型在 AB 措施下的侵蚀预测精度受雨强条件影响不明显, 而在 CK 措施下预测精度与雨强成正比。除 MUSLE-Q 模型在 60CK5, 60CK15 试验组外, 坡度越大耦合模型的精度越低。

表 8 为不同地表措施、雨强和坡度导致的耦合模型预测精度 NSE 值的变化率, 及不同耦合模型和两个模型总的平均变化率。由表 8 可见, 在两种耦合模型中, 地表措施在不同模型和两个模型总的 ΔNSE 均大于对应雨强和坡度的 ΔNSE , 可见地表措施对模型精度的影响比坡度和雨强更明显。此外 MUSLE-SR 模型中不同因素造成的精度变化率要小于 MUSLE-Q 模型, MUSLE-SR 模型在不同条件下的稳定性要优于 MUSLE-Q 模型。

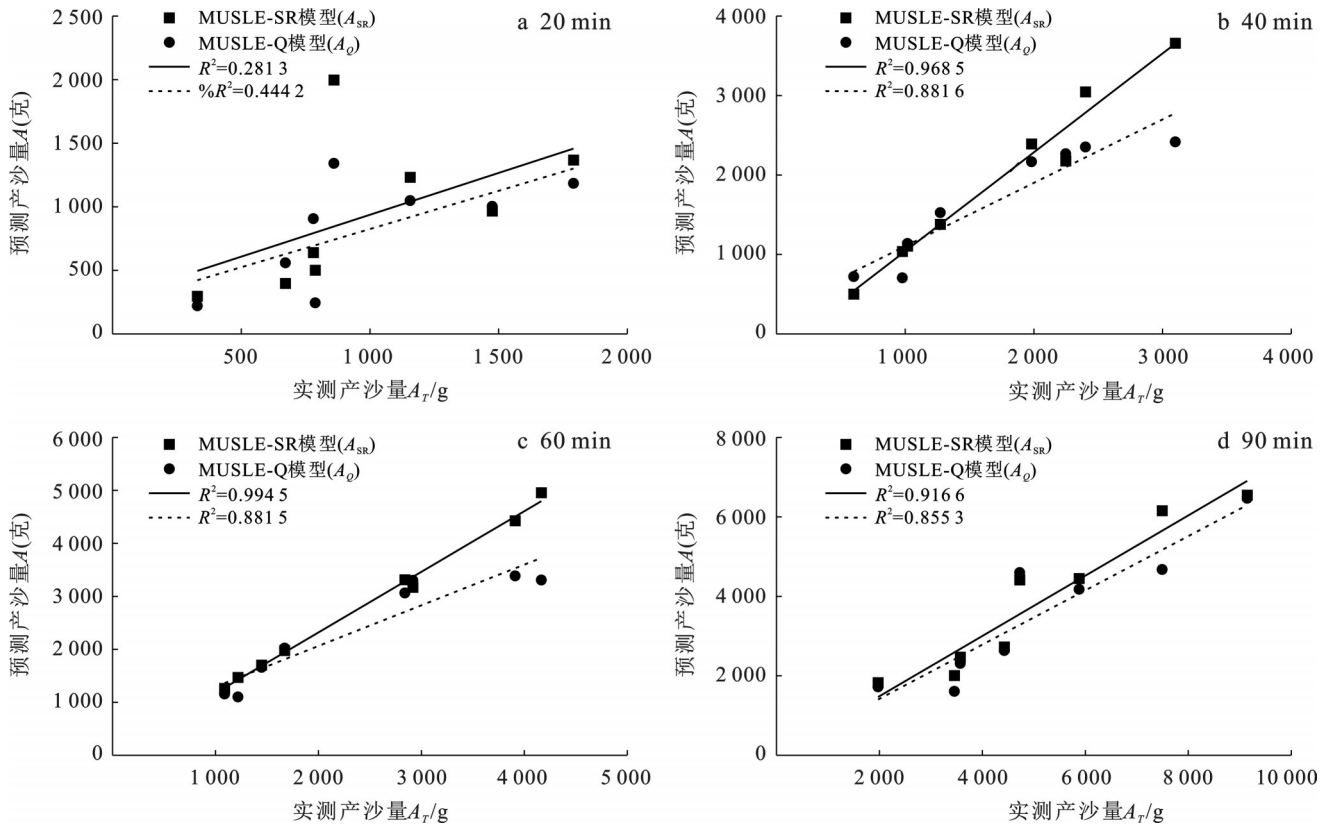


图 4 MUSLE-SR 和 MUSLE-Q 模型模拟不同时间土壤流失量预测精度对比

Fig.4 Prediction accuracy of soil erosion at different times predicted with MUSLE-SR and MUSLE-Q

表 6 实测总产沙量与预测总产沙量研究结果

Table 6 Results of measured and predicted total sediment yield 单位:g

试验组	实测产沙量 A_T/g	MUSLE-SR 模型 预测土壤流失量 A_{SR}/g	MUSLE-Q 模型 预测土壤流失量 A_Q/g
60AB5	1 974	1 828	1 721
60CK5	3 456	2 008	1 608
60AB15	3 570	2 470	2 312
60CK15	4 427	2 726	2 636
90AB5	4 724	4 412	4 599
90CK5	5 880	4 450	4 178
90AB15	7 493	6 155	4 676
90CK15	9 145	6 548	6 468

表 7 不同耦合模型侵蚀量 NSE

Table 7 NSE of erosion volume by different coupling models

试验组	MUSLE-Q	MUSLE-SR
60AB5	0.94	0.94
60CK5	0.23	0.50
60AB15	0.69	0.73
60CK15	0.58	0.62
90AB5	0.94	0.93
90CK5	0.84	0.81
90AB15	0.60	0.86
90CK15	0.77	0.76

表 8 不同因素导致的预测精度 (NSE) 变化率

Table 8 Change rate of prediction accuracy (NSE) resulted by different factors

耦合模型	雨强 $\Delta NSE/\%$	坡度 $\Delta NSE/\%$	地表措施 $\Delta NSE/\%$
MUSLE-Q	0	36	309
	265	152	19
	15	57	12
	33	9	28
NSE 平均变化率	78	64	92
MUSLE-SR	1	29	88
	62	24	18
	18	8	15
	23	7	13
NSE 平均变化率	26	17	33
总平均变化率	52	40	63

4 讨论

径流量作为桥梁实现了径流预测模型和侵蚀预测模型的耦合。其中使用反算法 SCS-Q 预测的径流量 Q_{CN} 相比 SCS-CN 预测的 Q_o 预测精度大幅提高, 这与吕鹏^[26] 研究结果中反算法修正 CN 值能够提升 SCS-CN 模型径流预测精度相符。引入 SR 的 SCS-SR 模型径流预测精度对比原始 SCS-CN 模型径流预测

精度同样有所提升,说明加入SR对于提升径流模型精度有效果。

其中SCS-SR的修正效果在更大坡度(15°)和更大雨强(90 mm/h)条件下更优,与谭青芳等^[27]的研究结果“微地形因子对径流量的影响力随坡度和流量的增大而增大”也较为一致。

两个耦合模型均在降雨初期预测效果较差,在降雨中后期预测精度大幅提高。这是由于不同时间段坡面产流产沙特征存在差异^[28],降雨初期坡面产沙率高且波动剧烈,随着降雨时长增加,产沙进入波动稳定状态,预测精度也随之上升。这与明俊男等^[29]通过人工降雨试验研究得出的坡面侵蚀特征一致。MUSLE-SR在后3次预测精度验证中均比MUSLE-Q耦合模型精度更高且 R^2 大于0.90,是由于地表粗糙度与产流产沙之间的密切联系随着产沙进入稳定状态开始得以体现,引入SR的耦合模型MUSLE-SR精度也随之上升,这与董晓宇等^[30]研究的地表粗糙度与土壤侵蚀过程的关系一致。

刘壮壮等^[31]、郭天雷等^[32]研究揭示,降雨强度与坡度对侵蚀过程的交互影响呈正向协同效应,即雨强增大会增强侵蚀对坡度响应的敏感性。与此机制一致,本研究构建的耦合侵蚀模型在大雨强条件下(90 mm/h),于15°坡面表现出更优的预测精度。值得注意的是,即使坡度和雨强都会影响侵蚀模型的预测效果,但通过不同因素导致的NSE变化率显示,在相同条件雨强和坡度造成的模型精度差异小于不同地表措施导致的差异。这一现象归因于在微地形尺度中,高SR值地表降低水流剪切力同时增加阻力系数,削弱了雨强和坡度对产沙的影响,从而使微地形因子SR与产沙的关系在模型中占据主导。

在同一坡度和降雨条件下,AB措施通过掏挖提升了地表粗糙度同时延长了径流路径,增大了径流与泥沙接触面积与滞留时长,促进泥沙输移饱和态的形成,致使产沙过程稳定性提升。因此相同雨强坡度时AB措施的NSE值总体高于CK措施。同样,即使微地形因子SR与CN的线性拟合效果一般,对径流预测精度的提升效果也不明显。但由于SR与泥沙含量和径流路径之间的内在关联,SR与侵蚀模型中的土壤可蚀性因子、径流因子等会产生交互作用,SR在通过径流模型进入侵蚀模型后可以为模型预测精度带来较大提升。

廖俊等^[33]利用RUSLE模型144种因子组合模拟的侵蚀量NSE范围是-38.47~0.19,表明传统方法在微地形侵蚀预测中存在局限性。相比之下,本研究通过径流模型与侵蚀模型的耦合方法,使两个耦

合模型的NSE值提升至0.23~0.94,与传统模型组合方法相比精度大幅提升。这一结果证实,径流-侵蚀过程耦合机制显著优化了微地形尺度侵蚀量的预测精度。在此基础上MUSLE-SR模型的过程精度总体优于MUSLE-Q模型,说明地表粗糙度进入耦合模型,对模型精度提升有效果。因此利用微地形因子修正径流模型,利用径流模型将微地形因子引入侵蚀模型的模型耦合方法,对于提升微尺度微地形的侵蚀预测具有积极意义。

本研究基于人工模拟降雨试验,对两种SCS-CN修正径流模型和两种耦合模型在不同降雨、坡度与坡面条件下的水土流失预测能力做出初步探索。但是,本研究仅设计了不同地表措施的裸地作为变量进行试验,实际降雨侵蚀中还存在植被覆盖等方面的影响;模型对于微地形因子较小的地表预测能力不足。后期研究还需要从不同植被覆盖等方面着手,进一步研究不同条件下坡面微地形产流产沙规律及不同模型的适用范围,为微地形水土流失精确预测提供新的研究方法和思路。

5 结论

(1) 径流模型修正效果量化分析表明,基于反算CN值的SCS-Q模型与基于SR-CN关系式的SCS-SR模型较基准SCS-CN模型分别实现32%和9%的径流预测精度提升,验证了两种径流预测模型修正方法的有效性。

(2) NSE精度验证结果比较显示,MUSLE-SR($NSE \in [0.50, 0.94]$)与MUSLE-Q($NSE \in [0.23, 0.94]$)模型预测性能显著优于传统RUSLE因子组合模型($NSE \in [-38.47, 0.19]$)。其中微地形因子(地表粗糙度系数SR)的引入使MUSLE-SR模型获得额外的精度增益,证实了引入微地形因子SR和模型耦合对土壤侵蚀模拟的协同优化作用。

(3) 由NSE变化率可见,在微地形条件下,地表粗糙度与水流剪切力和阻力的关系削弱了坡度和雨强对侵蚀的影响,地表措施在耦合模型的预测精度变化中占据主导。

(4) 耦合模型预测精度受不同降雨时间段坡面产流产沙特征差异的影响。两种耦合侵蚀模型在降雨初期的预测效果均不理想,随着降雨时间的增长预测精度大幅提高。

参考文献(References)

- [1] 国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会. 水土保持术语:GB/T 20465—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

- Standardization Administration of the People's Republic of China. Terminology of soil and water conservation: GB/T 20465—2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [2] 李明伟. 基于LSTM模型预测不同水保工程措施条件下土壤侵蚀量:以辽西北地区为例[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4):162-169.
- Li Mingwei. Estimating soil erosion under different soil and water conservation engineering measures using LSTM model: A case study in northwest Liaoning Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4):162-169.
- [3] Rao Wenli, Zhang Qingfeng, Zhang Fengbao, et al. An overview of water erosion modeling in China: A bibliometric and statistical analysis [J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2025, 12(2):337-354.
- [4] 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.
- Zhao Longshan. Laboratory study on soil surface roughness effect on soil infiltration, runoff and sediment production at the loess hillslope [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2015.
- [5] Bahddou S, Otten W, Whalley W R, et al. Changes in soil surface properties under simulated rainfall and the effect of surface roughness on runoff, infiltration and soil loss [J]. Geoderma, 2023, 431:116341.
- [6] 韩克秋. 基于地形因子的北票市水土流失特征分析[J]. 水土保持应用技术, 2025(3):13-15.
- Han Keqiu. Analysis of soil and water loss characteristics in Beipiao City based on topographic factors [J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2025(3):13-15.
- [7] 唐辉, 李占斌, 李鹏, 等. 模拟降雨下坡面微地形量化及其与产流产沙的关系[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24):127-133.
- Tang Hui, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Surface micro topography quantification and its relationship with runoff and sediment under simulated rainfall [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(24):127-133.
- [8] 周庆梓, 何自立, 吴磊, 等. 多源数据融合的深度神经网络预测模型[J]. 水力发电学报, 2023, 42(5):43-52.
- Zhou Qingzi, He Zili, Wu Lei, et al. Deep learning runoff prediction model based on multi-source data fusion [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(5):43-52.
- [9] 马秋梅, 桂绪, 熊立华, 等. 气候变化对HBV水文模型参数敏感性和不确定性的影响[J]. 水科学进展, 2024, 35(4):556-568.
- Ma Qiumei, Gui Xu, Xiong Lihua, et al. Impact of climate change on the sensitivity and uncertainty of HBV hydrologic model parameters [J]. Advances in Water Science, 2024, 35(4):556-568.
- [10] Neumann A, Dong Feifei, Shimoda Y, et al. A review of the current state of process-based and data-driven modelling: Guidelines for Lake Erie managers and watershed modellers [J]. Environmental Reviews, 2021, 29(4):443-490.
- [11] 李金梅, 周京春, 王金亮. 滇池西岸山地区域SCS-CN模型优化[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3):139-147.
- Li Jinmei, Zhou Jingchun, Wang Jinliang. Optimization of SCS-CN model in a mountainous area on west bank of Dianchi Lake [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3):139-147.
- [12] 高扬, 朱波, 缪驰远, 等. SCS模型在紫色土坡地降雨径流量估算中的运用[J]. 中国农学通报, 2006, 22(11):396-400.
- Gao Yang, Zhu Bo, Miao Chiyuan, et al. Application of SCS model to estimate the volume of rainfall runoff in sloping field of purple soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(11):396-400.
- [13] 冯家伟. 微地形条件下典型径流及产沙模型应用研究[D]. 四川 雅安:四川农业大学, 2023.
- Feng Jiawei. Study on typical runoff model and soil erosion prediction model under microrelief conditions [D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2023.
- [14] 张鑫, 张青峰, 周阳阳, 等. 不同坡度黄土微地形条件下SCS-CN模型参数研究[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2):74-77.
- Zhang Xin, Zhang Qingfeng, Zhou Yangyang, et al. SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data on microtopographic surfaces of different gradient loess slopes [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2):74-77.
- [15] Shi Wenhai, Bao Jiachi, Wang Miaomiao, et al. A modified CSLE for soil loss prediction under different vegetation patterns at slope scale in China [J/OL] (2025-06-22). International Soil and Water Conservation Research, <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2025.06.003>.
- [16] Wang Jing, Lu Pingda, Valente D, et al. Analysis of soil erosion characteristics in small watershed of the loess tableland Plateau of China [J]. Ecological Indicators, 2022, 137:108765.
- [17] Gao Guangyao, Liang Yue, Liu Jianbo, et al. A modified RUSLE model to simulate soil erosion under different ecological restoration types in the loess hilly area [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2024, 12(2):258-266.
- [18] 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 Mingquan, Wu Shengjun, Wen Zhaoifei, 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.
- [19] Wang Lihong, Li Yuechen, Gan Yushi, et al. Rainfall erosivity index for monitoring global soil erosion [J]. Catena, 2024,234:107593.
- [20] 符素华,刘宝元,周贵云,等.坡长坡度因子计算工具[J].中国水土保持科学,2015,13(5):105-110.
- Fu Suhua, Liu Baoyuan, Zhou Guiyun, et al. Calculation tool of topographic factors [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015,13(5):105-110.
- [21] 陈红,江旭聪,任磊,等.基于RUSLE模型的淮河流域土壤侵蚀定量评价[J].土壤通报,2021,52(1):165-176.
- Chen Hong, Jiang Xucong, Ren Lei, et al. Quantitative evaluation of soil erosion in the Huaihe River basin based on RUSLE model [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021,52(1):165-176.
- [22] 黄杰,姚志宏,查少翔,等.USLE/RUSLE中水土保持措施因子研究进展[J].中国水土保持,2020(3):37-39.
- Huang Jie, Yao Zhihong, Zha Shaoxiang, et al. Progress of study on soil and water conservation measure factors in USLE/RUSLE [J]. Soil and Water Conservation in China, 2020(3):37-39.
- [23] Lufafa A, Tenywa M M, Isabirye M, et al. Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a GIS-based universal soil loss model [J]. Agricultural Systems, 2003,76(3):883-894.
- [24] Liu Jianbo, Liang Yue, Gao Guangyao, et al. Quantifying the effects of rainfall intensity fluctuation on runoff and soil loss: From indicators to models [J]. Journal of Hydrology, 2022,607:127494.
- [25] Williams J R, Berndt H D. Sediment yield prediction based on watershed hydrology [J]. Transactions of the ASAE, 1977,20(6):1100-1104.
- [26] 吕鹏.基于SCS-CN模型的临桂地区地表径流预测研究[D].广西桂林:桂林理工大学,2024.
- Lv Peng. Prediction of surface runoff in Lingui area based on SCS-CN model [D]. Guilin, Guangxi: Guilin University of Technology, 2024.
- [27] 谭青芳,陈峰庭,黄钰涵,等.饱和黄绵土坡面细沟侵蚀微地形变化及其对水力学特征参数的响应[J/OL](2024-12-05).土壤学报, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20241204.1136.002.html>.
- Tan Qingfang, Chen Fengting, Huang Yuhan, et al. Change of rill erosion microtopography on saturated loess slope and its response to hydraulic parameters [J/OL] (2024-12-05). Acta Pedologica Sinica, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20241204.1136.002.html>.
- [28] Shi Dongmei, Jiang Guangyi, Peng Xudong, et al. Relationship between the periodicity of soil and water loss and erosion-sensitive periods based on temporal distributions of rainfall erosivity in the Three Gorges Reservoir Region, China [J]. Catena, 2021,202:105268.
- [29] 明俊男,王泉泉,袁再健,等.基于人工模拟降雨试验的粤北典型牛肝土坡耕地坡面侵蚀特征[J].水土保持学报,2025,39(3):88-96.
- Ming Junnan, Wang Quanquan, Yuan Zaijian, et al. Characteristics of slope erosion on typical lateritic slope farmland in northern Guangdong Province based on artificially simulated rainfall experiments [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(3):88-96.
- [30] 董晓宇,秦富仓,李龙,等.裸露砭砂岩区坡面侵蚀过程中地表粗糙度与水力侵蚀特征参数的关系[J].水土保持学报,2022,36(2):33-41.
- Dong Xiaoyu, Qin Fucang, Li Long, et al. Relationship between surface roughness and hydraulic erosion characteristic parameters during slope erosion in exposed Pisha sandstone area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(2):33-41.
- [31] 刘壮壮,和继军,段光耀,等.不同降雨-坡度条件下黄土坡面侵蚀泥沙颗粒特征研究[J/OL](2025-04-28).生态学报, <https://link.cnki.net/doi/10.20103/j.stxb.202412313210>.
- Liu Zhuangzhuang, He Jijun, Duan Guangyao, et al. Study on the particle characteristic of slope erosion sediment on loess under varied rainfall-slope conditions [J/OL] (2025-04-28). Acta Ecologica Sinica, <https://link.cnki.net/doi/10.20103/j.stxb.202412313210>.
- [32] 郭天雷,梅雪,任顺华,等.紫色土弃渣体坡面产流产沙对坡度和降雨强度的响应分析[J].水土保持研究,2025,32(4):11-17.
- Guo Tianlei, Mei Xue, Ren Shunhua, et al. Response of runoff and sediment yield on purple soil spoil heaps to slope and rainfall intensity [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(4):11-17.
- [33] 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 Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(2):97-108.