

雷泽勇,刘腾,韩艳刚,等.辽西薄层土区垂直垄向随机粗糙度的降雨响应与稳糙阈值[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(2):232-241.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250407
LEI Zeyong,LIU Teng,HAN Yangang,et al.Response mechanism of vertical ridge random roughness to rainfall and identification of stable roughness threshold in thin soil region of western Liaoning Province[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2026,45(2):232-241.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250407

辽西薄层土区垂直垄向随机粗糙度的降雨响应与稳糙阈值

雷泽勇^{1,2,3}, 刘 腾¹, 韩艳刚¹, 周凤艳^{1*}

(1. 辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 阜新振兴发展研究院, 辽宁 阜新 123000; 3. 辽宁工程技术大学 退化土地生态治理研究院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要:为揭示辽西低山丘陵区垂直垄向随机粗糙度 C_r 在“久旱-暴雨-薄土”耦合条件下的动态响应规律,以2022年6—9月的4场自然降雨为研究对象,对7种水保措施下坡面的 C_r 进行动态监测,并结合径流系数 R 与土壤理化性质,分析 C_r 对降雨的响应机制及其稳定机制。研究表明: C_r 呈现初雨主导效应,首次降雨前后 ΔC_r 为90.40%;当降雨强度大于等于18.82 mm/h时, C_r 进入高雨强饱和阶段,其变化率趋于稳定; R 与 C_r 仅在降雨强度大于等于18.82 mm/h时呈极显著负相关($p<0.01$),其机制可归因于径流的“填平效应”;土壤黏粒含量始终与 C_r 呈极显著负相关($p<0.01$);土壤有机质SOM的抑制粗糙效应随降雨历时延长而衰减,土壤容重(BD)的抑制粗糙效应则随累积雨量增加而增强,二者形成动态互补的屏障作用;林地和果树台田由于具备高黏粒、高有机质、低容重、低径流系数的组合特征,其 C_r 基线值与 ΔC_r 均最低,表现出最优的稳糙性能。研究结论为薄层土区土壤侵蚀预报与水土保持措施优化提供理论依据。

关键词:低山丘陵区;垂直垄向随机粗糙度;降雨特征;径流系数;土壤黏粒含量;土壤有机质;水保措施

中图分类号:S157.1

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2026)02-0232-10

Response mechanism of vertical ridge random roughness to rainfall and identification of stable roughness threshold in thin soil region of western Liaoning Province

LEI Zeyong^{1,2,3}, LIU Teng¹, HAN Yangang¹, ZHOU Fengyan^{1*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Fuxin Revitalization and Development Research Institute, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 3. Institute of Ecological Restoration of Degraded Land, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: To investigate the dynamic response law of vertical ridge random roughness (C_r) under the coupling condition of “prolonged drought-rainstorm-thin soil” in the low mountain and hilly area of western Liaoning, four natural rainfalls from June to September 2022 were analyzed, and the C_r values of slope surface under seven soil and water conservation measures were dynamically monitored. Combined with runoff coefficient (R) and soil physical and chemical properties, the response mechanism and stability mechanism of C_r to rainfall were analyzed. The results showed that the C_r value showed a dominant effect of early rain, and the ΔC_r before and after the first rainfall was 90.40%. When the rainfall intensity is greater than or equal to 18.82 mm/h, C_r enters the ‘high rainfall intensity saturation’ stage, and its change rate tends to be stable. There was a significant negative correlation between R and C_r only when the rainfall intensity was greater than or equal 18.82 mm/h ($p<0.01$), and the mechanism could be attributed to the filling effect of runoff. Soil clay content was always significantly negatively correlated with C_r ($p<0.01$). The inhibitory roughness effect of soil organic matter (SOM) decreased

收稿日期: 2025-09-29 修回日期: 2025-11-17 接受日期: 2025-11-28 责任编辑: 朱含露

基金项目: 辽宁省教育厅基本科研项目面上项目(JYTMS20230808); 辽宁省教育厅大学生创新训练项目(S202310147038)

作者简介: 雷泽勇(1971-),男,湖北孝感人,硕士,教授,主要从事水土流失与荒漠化防治方面的研究。E-mail: zeyonglei@163.com

通信作者: 周凤艳(1969-),女,辽宁阜新人,教授,主要从事固沙林经营与管理方面的研究。E-mail: fengyanzhou@sohu.com

with the extension of rainfall duration, while the inhibitory roughness effect of soil bulk density (BD) increased with the increase of cumulative rainfall, forming a dynamic complementary barrier effect. Because of the combination characteristics of 'high clay, high organic matter, low bulk density and low runoff coefficient', the C_r baseline value and ΔC_r of forest land and fruit tree terrace are the lowest, showing the best stability. The research conclusions provide a theoretical basis for soil erosion prediction and optimization of soil and water conservation measures in thin soil areas.

Keywords: low mountain and hilly region; vertical ridge-oriented random roughness; rainfall characteristics; runoff coefficient; soil clay content; soil organic matter; soil and water conservation measures

0 引言

垂直垄向随机粗糙度 C_r 是反映坡面水沙过程的关键指标,其动态变化直接影响径流形成、泥沙输移及养分流失^[1]。在辽西低山丘陵生态脆弱区,年均降水量不足480 mm,且70%以上降水集中于6—9月,多表现为短历时暴雨,浅薄土层(土层厚度小于50 cm)覆盖于低渗透性基岩之上^[2],构成前期干旱-高强度降雨-薄层土体的易蚀系统^[3]。干旱期土壤水分亏缺易引起表土收缩、裂隙发育,并削弱土粒间黏结力,一旦遭遇强降雨,极易诱发超渗产流,导致地表微地形剧烈变化,进而影响侵蚀-沉积全过程^[4]。然而,目前关于辽西低山丘陵生态脆弱区 C_r 在自然降雨序列下的动态响应规律与驱动机制仍缺乏系统研究,尤其缺少基于原位观测的实证数据,制约了区域土壤侵蚀预报的精度与水土保持措施的优化配置。

现有研究多聚焦于耕作-降雨耦合作用驱动的粗糙度时空演变^[5]及粗糙度衰减模型构建^[6]等方面,揭示了坡面粗糙度对水力侵蚀的调控机制^[1,7],并通过优化链条测量法^[8]为 C_r 的高精度测定提供了技术支持。然而,这些成果大多基于单次模拟降雨或黄土高原深厚土层的情景,其参数化方案难以直接推广至具有“薄层土-高砾石-基岩阻渗”特征的辽西土石山区。此外,传统模型常将 C_r 视为静态参数^[9],未能充分考虑前期干旱通过“收缩-裂隙-压实”路径降低土壤抗蚀性,以及后续暴雨对地表微地形再塑造效应之间的非线性耦合机制。同时,土壤黏粒含量、土壤有机质等抗蚀关键因

子与降雨特征之间的交互作用对 C_r 的影响,以及不同水土保持措施在“稳定粗糙度”方面的实际效能,仍有待进一步定量研究。

基于此,以阜新蒙古族自治县二道岭小流域7种典型措施坡面为对象,依托2022年6—9月捕获的4场自然降雨(中雨-大暴雨梯度),实现辽西薄层土区 C_r 的动态捕捉,并同步测定降雨特征、 R 及关键土壤因子。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

阜新蒙古族自治县国华乡二道岭小流域位于辽西低山丘陵核心区(41°49'N, 121°42'E),平均海拔约265 m,流域面积21.28 km²,坡向东南,平均坡度为13°。该区域土壤为浅薄土层腐殖质酸性棕壤性土(质地以砂壤至壤砂为主),直接覆盖于侏罗系安山岩之上,基岩面具有瞬时阻渗作用。研究区为温和半干旱季风大陆性气候,年均气温8.3℃,年均降水量480 mm,其中75%降水集中于6—9月;暴雨日(日降水量超过50 mm)年均出现0.8次,最大10 min降雨强度可达1.52 mm/min。

2004年,依据水利部相关标准,在二道岭试点流域内布设7个独立径流小区(长×宽为30 m×5 m,坡度13°),各小区之间以混凝土隔板(厚度10 cm,埋深30 cm)分隔。2022年6—9月,在每个径流小区的上、中、下三个点位测定降雨前后的 C_r 数据及相关土壤性质,该小区基本情况见表1。

表1 径流小区基本情况
Tab.1 basic information of runoff plots

小区编号	水土保持措施	植被类型	备注
1	裸地	无	
2	横坡垄作	玉米	垄距0.5 m,平行等高线布置
3	顺坡垄作	玉米	垄距0.6 m,垂直等高线布置
4	地埂植物带	玉米、柠条锦鸡儿	区内共5条埂,埂距6 m
5	水平梯田	玉米	水平田面6台,台宽5 m,田坎均高0.9 m
6	果树台田	李子、杂草	10台李子,台宽3 m,株距3 m
7	林地	油松	设水平平台10个,均宽3 m,每台果坑2个,坑距3 m,坑深0.8 m,直径0.7 m,每坑栽植李子1株

1.2 研究方法

(1) 降雨观测

试验采用全自动气象站连续记录降雨过程。选取平均雨强、日降雨量及降雨历时作为特征指标。研究观测的4场典型自然降雨(按降雨的时间顺序排列)的相关数据见表2。

表2 降雨特征
Tab.2 rainfall characteristics

降雨日期	降雨 场次	降雨 等级	平均雨强 (mm·h ⁻¹)	日降雨量 /mm	降雨 历时/h
2022-06-27	N1	暴雨	7.21	70.2	9.8
2022-07-21	N2	大雨	8.89	41.2	4.6
2022-07-23	N3	中雨	18.82	13.8	0.7
2022-07-28	N4	大暴雨	54.55	180.0	3.3

(2) 垂直垄向随机粗糙度

采用优化链条法^[10]测定垂直垄向随机粗糙度 C_r 来表征地表随机起伏的微观地形特征(简称地表粗糙度)。将轴径为1 cm、长度为1 m的滚轴链于降雨前24 h至降雨后12 h内紧贴地表放置,链条因地表起伏而两端抬升,通过测量其实际跨度计算 C_r 值。为减少定向垄沟干扰并突出随机起伏,在横坡与顺坡垄作区沿垂直垄向(即横坡方向)布设测线,其他措施区则沿顺坡方向布设。每个径流小区在上、中、下3个坡位各设置4条间距为1 m的固定测线。每条测线重复测量20次,取平均值,最终以3个坡位所有测线的平均值代表该小区的 C_r 值,表达式为

$$C_r = (1 - L_2/L_1) \times 100\%, \quad (1)$$

式中: L_1 为链条原始长度,取100 cm; L_2 为链条紧贴地表后,其两端点之间的直线跨度。 C_r 值越大,表明地表随机起伏越显著。

地表粗糙度相对变化率为

$$\Delta C_r = \left| (C_{r2}/C_{r1} - 1) \times 100\% \right|, \quad (2)$$

式中: C_{r1} 为雨前地表粗糙度; C_{r2} 为雨后的地表粗糙度。

(3) 径流系数

采用堰口电磁流量计(seametrics MJ-Series, $\pm 1\%$)自动记录径流量,辅以人工量水尺校核,得到径流系数为

$$R = Q_1/P_1, \quad (3)$$

式中: Q_1 为径流量; P_1 为降雨量。

(4) 土壤样品采集与测定

使用100 cm³环刀,于雨前24 h与雨后12 h分别在每个 C_r 测点旁采集0~10 cm和10~20 cm土层的样品,每层设置3组平行样。

由于N2和N3两次降雨间隔仅24 h,前期实验测得,N2降雨24 h后(即N3降雨前),土壤含水率(质量分数)仍未恢复至N2降雨前的初始水平。因此,采用N2降雨前与N3降雨后的实测含水率进行线性插值,以估算N3雨前的土壤含水率。土壤容重(BD)采用环刀法测定。此外,土壤机械组成使用Mastersizer 2000激光粒度仪测定;土壤有机碳含量采用重铬酸钾容量法测定;土壤含水率采用烘干法测定。

(5) 土壤有机碳和土壤有机碳变化量

土壤有机碳含量为

$$SOC = SOM/1.724, \quad (4)$$

式中,SOM为土壤有机质含量。

土壤SOC变化量为

$$\Delta SOC = SOC_{post} - SOC_{pre}, \quad (5)$$

式中, SOC_{pre} 和 SOC_{post} 分别为降雨前和降雨后土壤有机碳含量。

1.3 数据处理与统计分析

采用SPSS 20.0软件进行统计分析。数据以“平均值 $\pm$ 标准差”表示。使用单因素方差分析(ANOVA)检验不同水土保持措施间 C_r 的差异显著性。若整体检验显著($p < 0.05$),则进一步采用Tukey HSD法进行多重比较。

为揭示 C_r 动态变化的驱动因素,针对每次降雨事件进行两类Pearson相关分析,分析降雨后的 C_r 值与对应降雨场次的 R 、土壤黏粒含量(质量分数)之间的相关关系;分析 C_r 的相对变化率 ΔC_r 与受降雨过程影响的土壤属性(0~20 cm土壤有机质含量、BD)以及降雨特征(降雨历时、降雨量)之间的相关关系。显著性水平均设置为 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 自然降雨下 C_r 的阶段性演化、措施分异与雨强影响

自然降雨条件下裸地的 C_r 值变化情况见表3。可知,随着降雨的进行, C_r 呈现“首次骤变-后续趋稳”两阶段演化模式。首次降雨(N1)对裸地 C_r 值变化起主导作用,平均 C_r 值由初始的2.12增至2.56, ΔC_r 显著高于后续降雨事件,呈“初雨主导效应”。在N2至N4降雨过程中,平均 C_r 值持续下降,当平均雨强超过18.82 mm/h时(N3), C_r 的下降幅度显著减小并趋于稳定,表明地表微地形的改变速率不再随雨强增加而无限增大,即进入“高雨强饱和”状态。这一临界阈值低于在深厚土层区的报道^[11],体现辽西薄层土区“快速饱和-快

速产流”侵蚀系统的独特性。

表 3 裸地 C_r 值对降雨序列的响应 Tab.3 response of vertical ridge-oriented random roughness (C_r) to rainfall sequence on bare land					
降雨场次	C_r 值				变异系数 $C_v/\%$
	最小值	最大值	均值	标准方差	
初始	0.31	7.15	2.12	0.99	45.93
N1	0.22	6.61	2.56	1.23	47.39
N2	0.13	7.52	1.89	1.12	47.39
N3	0.12	6.31	1.66	1.07	59.42
N4	0.16	5.44	1.52	0.93	60.35

2.2 C_r 对降雨响应及土壤本底属性的影响

各场次降雨下 C_r 的变异系数介于 45.93%~67.33% 之间, 属中等变异强度, 表明 C_r 在空间上

具有显著的空间异质性^[12]。

由于不同水土保持措施对降雨的响应存在极显著差异 ($p<0.01$), 其稳糙性能主要取决于措施本身对土壤结构及地表覆盖的改变, 具体见表 4。由表 4 可知, 横坡垄作、地埂植物带与水平梯田 3 种水保措施下, 土壤在 N1 降雨后表现出明显的“增糙”现象, 这可能与其土壤物理性质的差异有关, 特别是较低的 BD 可能使表层更易受降雨扰动。后续分析表明, 此类措施的确呈现出相对较低的 BD (详见 3.3 节讨论及图 1 (d))。相比之下, 受植被覆盖保护的林地和果树台田稳糙性能最优, N1 后 ΔC_r 最低, 裸地与顺坡垄作的增糙幅度则介于二者之间。上述 C_r 值的差异与动态, 主要受径流过程和土壤本底属性的调控。

表 4 不同水土保持措施下 C_r 对降雨序列的动态响应 Tab.4 dynamic response of C_r to rainfall sequence under different soil and water conservation measures						
水土保持措施	降雨前 C_r	N1 雨后 C_r	N1 $\Delta C_r/(\%)$	N2 雨后 C_r	N3 雨后 C_r	N4 雨后 C_r
裸地	2.11±1.06ab	3.00±1.02ab	42.18	2.15±0.79ab	2.16±1.07a	2.15±0.94a
横坡垄作	1.25±0.64c	2.38±1.28c	90.40	2.29±1.77a	2.17±1.56a	1.69±0.92b
顺坡垄作	2.78±0.82ab	3.05±1.10ab	9.71	2.16±0.80ab	1.97±0.89a	1.79±0.71b
地埂植物带	2.25±1.17bc	2.65±1.49bc	17.78	1.48±1.03c	1.24±0.81b	1.22±0.79c
水平梯田	3.15±1.47a	3.34±1.32a	6.03	1.95±1.00ab	1.31±0.80b	1.24±1.02c
果树台田	1.81±0.73d	1.95±0.82d	7.14	1.74±1.02bc	1.47±0.68b	1.22±0.82c
林地	1.50±0.66d	1.87±0.59d	24.67	1.47±0.89c	0.79±0.53c	1.21±0.51c

注: 同列小写字母表示差异显著 ($p<0.05$); 不同小写字母表示同一场降雨同一深度不同水土保持措施之间的差异性显著 ($p<0.05$)。仅列出相关性显著的指标。

为量化影响 C_r 值的关键因子, 进一步分析 C_r 与 R 及土壤本底属性 (黏粒含量) 的相关性, 各场降雨后 C_r 与上述指标的相关系数见表 5。

表 5 C_r 与 R 、土壤黏粒含量的相关系数 Tab.5 correlation coefficient between C_r and R , soil clay content			
降雨场次	平均雨强/(mm·h ⁻¹)	相关系数	
		C_r 与 R	C_r 与土壤黏粒含量
N1	7.21	-0.063	-0.511**
N2	8.89	-0.306*	-0.355**
N3	18.82	-0.329**	-0.255**
N4	54.55	-0.342**	-0.254**

注: *表示在 0.05 水平上显著相关; **表示在 0.01 水平上显著相关。

由表 5 可见, C_r 与 R 的负相关性随雨强增大而显著增强。当降雨强度为 7.21 mm/h (N1) 时, C_r 与 R 无显著相关; 当降雨强度超过 8.89 mm/h (N2) 时, 呈现显著负相关 ($p<0.05$); 而当降雨强度达到并超过 18.82 mm/h (N3 与 N4) 时, 二者则表现为极显著的负相关关系 ($p<0.01$)。这证实了高雨强条件下径流填平效应是导致 C_r 降低的关键直接动力。此外, 土壤黏粒含量作为稳定的结构因子, 在所有降雨事件中均与 C_r 保持极显著负

相关 ($p<0.01$), 由此表明土壤的黏粒含量是 C_r 长期稳定的基础。

2.3 ΔC_r 对降雨特征及土壤过程变量的响应

ΔC_r 主要受降雨过程特征及其引发的土壤性状动态变化所驱动。 ΔC_r 与降雨特征 (历时、雨量) 以及土壤过程变量 (SOM、BD) 的相关系数见表 6。

表 6 ΔC_r 与降雨特征、SOM 及 BD 的相关系数 Tab.6 correlation coefficients between ΔC_r , rainfall characteristics, SOM and bulk density				
降雨场次	降雨历时/h	降雨量/mm	相关系数	
			ΔC_r 与 SOM	ΔC_r 与 BD
N1	9.8	70.2	-0.769*	-0.758*
N2	4.6	41.2	-0.510	-0.361
N3	0.7	13.8	-0.018	-0.080
N4	3.3	180.0	-0.438	-0.765*

注: *表示在 0.05 水平上显著相关。

由表 6 可知, SOM 与 BD 对 ΔC_r 的抑制效应表现出强烈的降雨特征依赖性, 且二者作用呈现显著的动态互补关系。一方面, SOM 的抑糙效应随降雨历时延长而衰减, 在长历时降雨事件 (N1,

历时 9.8 h) 中, SOM 与 ΔC_r 呈显著负相关, 表明其能有效抑制地表糙度的变化; 而在较短历时的降雨事件 (N2、N3、N4) 中, 相关性均不显著。另一方面, BD 的抑糙效应则随累积降雨量增加而增强。在高降雨量事件 (N1 与 N4) 中, BD 与 ΔC_r 呈显著负相关; 而在低降雨量事件 (N2、N3) 中, 相关性不显著。

这种“SOM 效应随历时衰减”与“BD 效应随降雨量增强”在时间上的此消彼长, 构成了一个随降雨进程演变的“动态互补屏障”。

2.4 水土保持措施削减 C_r 的效能排序

各水保措施下径流系数与土壤性质见图 1。结

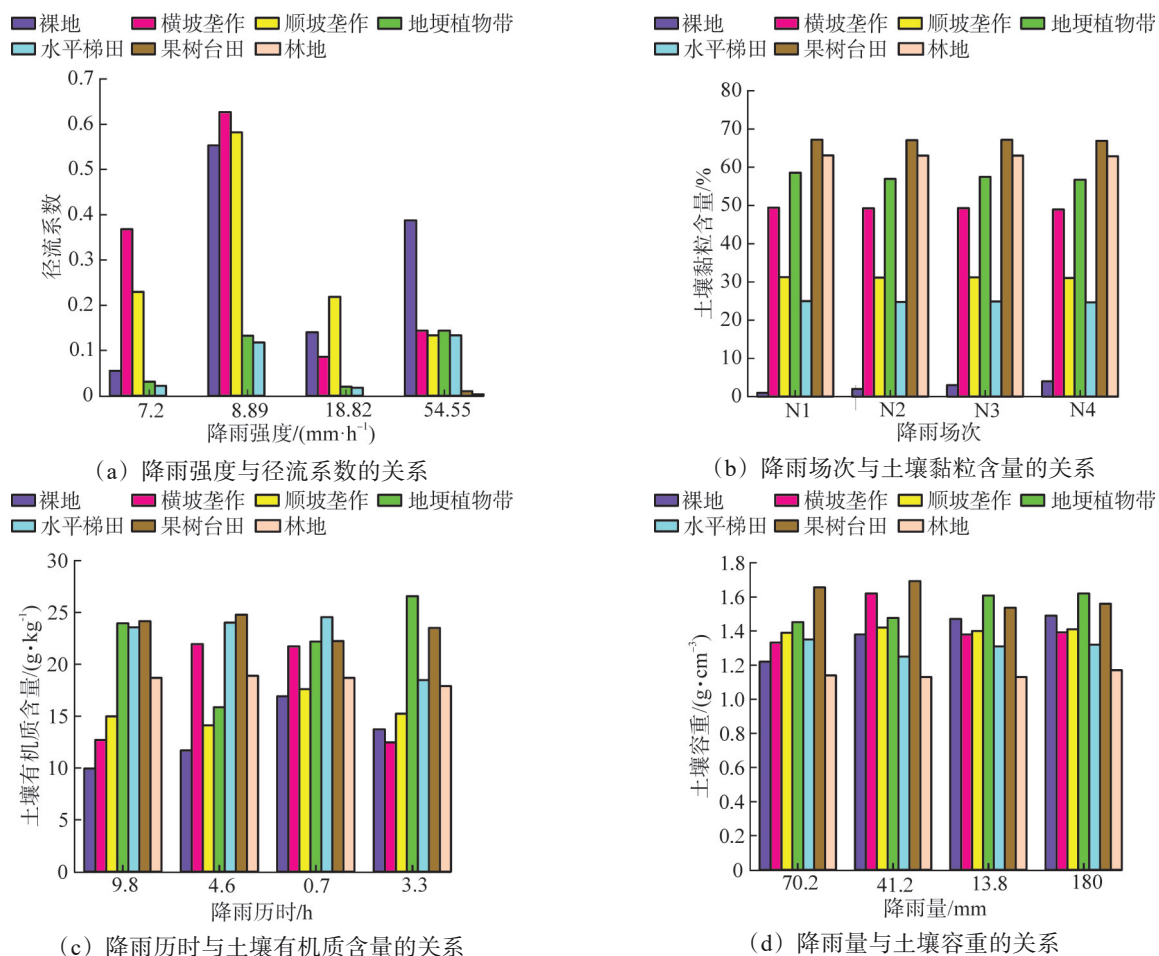


图 1 不同降雨条件下各水保措施的 R 与土壤性质对比

Fig.1 comparison of R and soil properties of soil and water conservation measures under different rainfall conditions

3 讨论

3.1 C_r 对降雨响应的两阶段机制及雨强阈值

根据 2.1 节的研究可知, 辽西低山丘陵区薄层土坡面中的 C_r 在自然降雨序列下呈现明显的两阶段演变特征, 即“初雨主导效应”与“高雨强饱和现象”, 两者之间的转换受降雨强度调控。这一

合 C_r 动态响应数据 (表 4), 可对其稳糙效能进行排序。首先, 林地和果树台田措施在图 1 中呈现出高黏粒、高 SOM、低 BD、低 R 的优良性状组合。结合表 4 数据, 这两种措施在各降雨事件中均能维持最低的 C_r 绝对值与变化幅度, 表明其在辽西低山丘陵区具有最优的稳糙性能与水土保持功能。其次, 地埂植物带和水平梯田的性状与径流水平介于中间, 其 C_r 波动相对较小, 稳糙效能次之。再次, 横坡与顺坡垄作措施由于土壤结构相对较差且径流系数 R 较高, 其 C_r 在各场降雨间的波动较大, 稳定性较弱。最后, 裸地因完全缺乏植被和工程保护, 其 C_r 变化最为剧烈, 稳糙能力最差。

响应模式反映了研究区在“薄层土-基岩阻渗-干旱暴雨交替”这一特殊立地条件下, 地表微地形动态的独特机制。

初雨主导效应及其区域特异性在本研究区尤为突出, 其根本原因在于薄层土体与下伏基岩共同构成的易蚀系统^[2]。前期长期干旱导致土壤水分严重亏缺, 引发表层土壤收缩、裂隙发育 (深度

可达5~7 cm),团聚体间的黏结力显著削弱。当首次降雨发生时,雨滴动能集中于浅薄的表层,使已松散的团聚体迅速崩解并发生位移,从而急剧增大地表的随机起伏。这与黄土高原深厚土层区的情况形成鲜明对比。已有研究表明,在黄土区,降雨对地表糙度的影响是一个渐进过程^[7];而在本文研究中,初雨引发的 C_r 突变幅度远高于黄土区已报道的降雨所致糙度变化率^[1,7],也高于室内定床试验中观测到的糙度变化幅度^[17],这凸显了野外自然条件下“干湿交替”与“薄层土”耦合作用的特殊性。作者首次在辽西薄层土区量化了初雨主导效应的敏感阈值,为区域土壤侵蚀预报提供了关键的初始条件参数,同时印证了该区域前期干旱-高强度降雨-薄层土体耦合系统具有极高的侵蚀风险^[3]。

研究区高雨强饱和现象的临界阈值,明显低于东北黑土区起垄沟流水力学特征的相关报道^[12-14],也低于黄土高原模拟研究中不同雨强对糙度影响的较高阈值^[15-16],且与紫色土横垄坡面研究中发现的递增型降雨更易造成侵蚀的结论相呼应^[18],进一步说明不同土壤类型对降雨的响应阈值存在显著差异。这凸显了辽西薄层土区侵蚀系统具有“快速饱和-快速产流”的特征^[2],其机制主要源于双重过程的协同作用。一是径流填平效应的强化。薄层土下伏基岩阻渗,导致土壤下渗容量极小,迅速达到饱和状态,从而显著提前产流时间。高雨强下径流功率迅速增强,一旦达到能够搬运泥沙、削平微地形的临界条件,凸起部位将被快速侵蚀,凹陷部位则被填塞^[14]。该机制与贾莲莲等^[14]和梁心蓝等^[15]提出的“较高雨强下径流对地表形态的塑造作用更为主导”结论一致,但本研究揭示的阈值更小。二是土壤表层板结的加速。研究区土壤质地偏砂,在高强度雨滴击溅下,土壤颗粒迅速重新排列、孔隙度降低,BD增加,地表形成相对致密的结皮,从而限制了微地形的可塑性。张瑞豪等^[9]在黑土侵蚀沟研究中提出,土壤结构压实会影响其抗蚀性。这一点在表4中得以印证:裸地、顺坡垄作等高BD措施在后续降雨中 C_r 变化率更低。因此,高雨强饱和现象实质上是径流填平与雨滴板结共同作用下,地表微地形改造速率达到动态平衡的表现。该临界雨强值应视为由土层厚度-基岩渗透性-土壤质地共同决定的动态阈值,在薄层土区水土流失模型中需进行独立校正。

由表4可知,水保措施对两阶段响应具有不同的调控作用。不同措施显著影响了 C_r 在两阶段的

响应强度。对于初雨主导效应,植被覆盖措施(林地、果树台田)表现出优异的抑制效果,其 ΔC_r 值最低。这主要得益于冠层对降雨动能的截留与消散,以及地表枯落物层的缓冲作用,直接保护了表层土壤结构免受雨滴击溅。然而,对于高雨强饱和现象,植被措施的缓冲能力则相对有限。当雨强超过18.82 mm/h(N3、N4)后,所有措施下的 ΔC_r 均同步下降并趋于稳定。这表明,一旦雨强突破临界阈值,由径流功率主导的填平效应和全域性的雨滴板结作用将成为主导机制,其影响超越了植被对地表的局部保护。

这一发现与黑土区高植被盖度可抬升临界雨强的结论^[12]不同,说明在辽西薄层土区,植被措施的主要作用在于削减初雨侵蚀峰值,而非改变高雨强下的系统饱和行为。因此,区域水土流失治理宜采取生物措施与工程措施相结合的策略:通过植被覆盖有效缓解初期侵蚀,同时借助工程措施(如台田、梯田)缩短坡长、分散径流,从而延缓或阻断填平效应的发生条件。

3.2 R 与 C_r 的耦合机制

根据2.2节的研究发现, R 与 C_r 的相关性并非恒定,而是受降雨强度严格调控的动态耦合过程。这一发现表明,在辽西薄层土区,径流对地表微地形的重塑作用存在明确的动力启动阈值,深化了对“水文过程-地表形态”反馈机制的认识。

(1) 雨强调控下的耦合关系与动力阈值

当平均雨强低于8.89 mm/h(N1)时, R 与 C_r 无显著相关性。随着雨强增加,二者呈现显著负相关(N2, $p<0.05$)乃至极显著负相关(N3、N4, $p<0.01$),具体见表5。值得注意的是,当雨强达到并超过18.82 mm/h时, R 成为驱动 C_r 下降的直接动力。该耦合关系的激活阈值(约18.82 mm/h)显著低于黄土高原模拟研究中报道的30~35 mm/h^[15-16],印证了辽西薄层土区侵蚀系统具有“快速饱和-快速产流”的特性^[2]。其机制在于薄层土与基岩界面阻渗,导致土壤剖面储水容量极小,在中等偏高雨强下即可迅速饱和,产流时间大幅提前。产流后,径流功率迅速累积;相关研究表明,当径流功率达到足以启动泥沙搬运的临界条件时,会触发对地表凸起部位的优先侵蚀和对凹陷部位的填充,即“填平效应”^[14],砒砂岩区的研究也证实,降雨后坡顶被冲刷、坡底被填充,且地表粗糙度的变化与黏粒含量密切相关^[9],这从微地形的角度印证了径流的填平机制。本研究结果显示,该临界动力条件在本区域于雨强18.82 mm/h时即可满足。因此,在侵蚀预报模型中,18.82 mm/h应作

为 $R-C_r$ 耦合模块的关键启动参数。该阈值较深厚土层区更为敏感,体现了模型参数区域化的必要性。

(2) 土壤属性与降雨特征对耦合关系的间接调控

R 与 C_r 的耦合强度不仅受雨强控制,还受土壤本底属性和降雨特征的深刻影响。首先,土壤黏粒含量作为稳定的抗蚀因子,在所有降雨事件中与 C_r 均呈极显著负相关(表 5),这与核素示踪技术的研究结论一致,即黏粒含量较高的林地,其土壤侵蚀量和养分流失量均显著低于黏粒含量较低的耕地^[20],充分说明了黏粒在维持土壤结构稳定中的核心作用。高黏粒含量通过增强团聚体稳定性和抗剪强度,提升了地表微地形抵抗径流剪切

破坏的能力,从而削弱了相同 R 条件下的填平效率。其次,降雨历时和雨量通过改变土壤过程变量,间接调控 $R-C_r$ 的耦合路径。长历时降雨(如 N1, 历时 9.8 h)可能导致 SOM 淋溶流失(表 7),削弱其胶结团聚体和稳定结构的功能,使地表物质更易被径流剥离,从而可能在相同 R 下加剧 C_r 的下降趋势。高累积雨量(如 N1 和 N4, 雨量大于等于 70 mm)通过雨滴击实作用显著增加 BD, 促进地表板结(表 6)。板结层可能因地表硬化而在短期内抑制进一步变形,但也可能通过减少入渗、增加径流而增强后续的径流侵蚀力,形成复杂反馈。这种“SOM 淋失”与“BD 板结”随降雨特征变化的动态互补作用,构成了调控 $R-C_r$ 耦合关系的土壤内部缓冲或放大机制。

表 7 典型降雨事件下不同水土保持措施土壤有机碳(SOC)分层变化

Tab.7 layered changes in soil organic carbon (SOC) under different soil and water conservation measures during typical rainfall events

水土保持措施	降雨场次	土层厚度/cm	SOC _{pre} /(g·kg ⁻¹)	SOC _{post} /(g·kg ⁻¹)	ΔSOC/(g·kg ⁻¹)
裸地	N1	0~10	13.35±2.49b	10.60±1.63b	-2.75±0.88a
		10~20	11.99±1.34a	9.28±0.62b	-2.71±0.86a
	N3	0~10	10.03±0.95c	18.05±1.97c	8.02±1.03a
		10~20	9.11±0.45d	14.44±0.67a	5.33±0.98ab
横坡垄作	N1	0~10	18.99±1.00b	8.56±1.24b	-10.43±1.70c
		10~20	15.74±2.19a	9.23±1.16b	-6.51±1.75a
	N3	0~10	14.38±3.53bc	15.93±2.16c	1.55±4.46b
		10~20	12.84±2.80cd	14.50±2.16a	1.66±3.92c
顺坡垄作	N1	0~10	18.80±1.31ab	16.28±1.22ab	-2.52±0.46a
		10~20	15.93±2.50a	13.69±2.86b	-2.24±0.50a
	N3	0~10	12.03±2.84bc	18.80±1.32bc	6.76±2.65a
		10~20	10.89±2.07d	16.40±2.55a	5.51±1.31a
地埂植物带	N1	0~10	18.70±1.86ab	17.36±1.71ab	-1.34±0.16a
		10~20	17.27±2.50a	16.16±2.48ab	-1.11±0.03a
	N3	0~10	15.41±2.92bc	16.88±2.83c	1.46±0.15b
		10~20	12.09±2.18cd	14.19±2.46a	2.10±0.48bc
水平梯田	N1	0~10	18.89±1.44ab	17.82±1.50ab	-1.07±0.19a
		10~20	17.17±2.07a	15.99±2.09ab	-1.18±0.03a
	N3	0~10	16.85±1.66b	16.28±1.22c	-0.58±1.72b
		10~20	15.30±1.53bc	14.85±1.62a	-0.45±2.01c
果树台田	N1	0~10	27.39±12.90a	26.48±13.25b	-0.92±0.35a
		10~20	21.56±10.00a	20.63±9.82a	-0.93±0.36a
	N3	0~10	29.12±4.24a	31.32±0.60a	2.20±4.17b
		10~20	17.19±1.47b	17.76±2.19a	0.57±1.34c
林地	N1	0~10	28.73±4.65a	22.78±5.49b	-5.95±4.19b
		10~20	19.65±2.24a	14.61±5.14ab	-5.05±7.01a
	N3	0~10	31.35±6.31a	22.78±5.63b	-8.57±1.35c
		10~20	21.44±3.81a	14.60±5.46a	-6.83±2.14d

注: SOC 数据为“平均值±标准差”;不同小写字母表示同一场降雨同一深度不同水土保持措施之间的差异性显著($p < 0.05$)。

(3) 水保措施通过调控 R 影响 C_r 稳定的路径
不同措施通过改变下垫面性质, 显著影响 R 的

大小, 进而决定其介入 $R-C_r$ 耦合链的位置与强度(图 1(a))。林地和果树台田凭借高植被覆盖与

丰富的枯落物层,有效截留降雨、促进入渗,从而将 R 维持在较低水平(图1(a))。较低的径流功率难以达到重塑微地形的临界条件,因此 C_r 保持高度稳定。这与陶佳等^[16]的研究结论“植被措施可有效减少径流与养分流失”在机理上一致,且本研究将这种保土效益追溯至维持地表微起伏这一更初始的环节。相比之下,顺坡垄作因垄沟走向与等高线垂直,具有汇集坡面流、放大局部 R 的作用^[12],使径流功率易突破临界阈值,导致 C_r 被快速“填平”。横坡垄作与地埂植物带虽旨在拦截径流,但在高强度降雨下,其拦蓄容量可能被超越,仍会产生一定径流并影响 C_r 。裸地则因缺乏任何调控, R 值高且波动大, C_r 变化最为剧烈。

综上,在辽西薄层土区, R 与 C_r 的耦合是一种受降雨强度阈值激活、受土壤属性调节、并可被水土保持措施显著干预的动态过程。未来水土保持实践与侵蚀模型优化,应以将 R 控制在临界径流功率对应的水平以下为核心目标。这不仅需要通过提升植被覆盖以减少径流产生,还需结合微地形改造工程(如台田、梯田)来分散和滞蓄坡面流,从而从动力源头阻断 R 对 C_r 的侵蚀性耦合,实现地表微地形与土壤资源的长期稳定。

3.3 土壤性质对 C_r 稳定性的调控作用

土壤质地对地表微地形稳定性的影响机制分析表明,土壤性质是调控地表微地形稳定性的内在基础,其作用体现在静态抗蚀与动态响应层面(表5、表6)。土壤黏粒含量作为核心的结构性因子,提供了抵御侵蚀的静态基石;SOM和BD则作为关键的过程性变量,其效应随降雨特征发生动态变化,二者共同构成了维持 C_r 稳定的动态互补屏障。这一认识对于理解辽西薄层土区侵蚀过程的内在机制至关重要。

(1) 黏粒含量是维持微地形稳定的静态基石

在所有观测的降雨事件中,土壤黏粒含量均与 C_r 呈极显著负相关($p<0.01$,表5),且这一关系不受降雨强度或历时的干扰。这证实了黏粒是维持地表微地形长期相对稳定的核心物质基础。其机制在于:黏粒颗粒具有较大的比表面积和活跃的理化活性,能通过物理吸附和化学键合作用促进土壤微团聚体的形成与稳定^[8]。较高的黏粒含量意味着土壤具有更强的内聚力和结构稳定性,能够有效抵抗雨滴击溅的分散作用和径流冲刷的剪切力,从而抑制由降雨引发的 C_r 剧烈波动。本文研究区土壤源自酸性岩风化,含量相对较高(平均黏粒含量大于35%),这为解释其微地形变化相较于内蒙古沙质土区(黏粒含量小于10%)^[17]更为缓和提供了关键依据。内蒙古砧砂岩区的研究

同样发现,土壤质地较粗的区域,即使有植被覆盖,其微地形(地表粗糙度)对降雨的响应也更为敏感^[21],从反面印证了黏粒作为“静态基石”的重要性。该结论也与已有研究结果一致,即黏粒含量较高的林地,其土壤侵蚀量和养分流失量均显著低于黏粒含量较低的耕地^[20],充分印证了黏粒作为土壤抗蚀性关键指标的核心作用。

(2) SOM与BD是构成抑糙的动态互补屏障

与黏粒的稳定作用不同,SOM和BD对 C_r 的抑制效应表现出强烈的降雨特征依赖性,具体见表6。SOM的抑糙效应随降雨历时延长而衰减。在长历时降雨事件(N1,历时9.8 h)中,SOM与 ΔC_r 呈显著负相关,发挥了明显的抑糙作用;然而,在较短历时的降雨中(N2、N3、N4),这种相关性不显著。这主要是因为SOM在持续降雨淋溶下会发生流失,如表7所示。作为团聚体的主要胶结物质,SOM的淋失直接削弱了土壤结构的稳定性,使团聚体更易在后续雨滴打击或径流冲刷下崩解,从而导致 C_r 稳定性下降。

BD的抑糙效应则随累积雨量增加而增强。在高降雨量事件(N1与N4,雨量大于等于70 mm)中,BD与 ΔC_r 呈显著负相关。高强度或高雨量的降雨通过雨滴的连续击实作用,促使土壤颗粒重新排列、孔隙减少,导致表层BD升高、土壤板结。室内模拟降雨研究同样证实,递减降雨后期因前期雨强较大引发的土壤压实和结皮作用,会显著削弱后续降雨对地表微地形的扰动程度^[22]。虽然板结过程本身可能暂时性地“固定”地表形态,但其致密的表层降低了土壤的入渗能力,进而影响坡面流体力学特性,可能间接改变后续的产汇流过程^[17]。

SOM随降雨历时衰减与BD随雨量增强的效应,共同构成了随降雨进程而切换主导因子的动态互补屏障。这一机制与紫色土小流域水文与养分过程的综述观点一致,即土壤内部性质的动态变化是调控地表过程的关键^[23]。但本研究首次在辽西薄层土区明确了其关键触发阈值(降雨历时约9.8 h或降雨量约70 mm),这对区域侵蚀过程的阶段划分具有指示意义。

(3) 水土保持对土壤性质调控功能的优化

不同的管理措施通过改变土壤性质,显著影响了上述调控机制的运行效率(图1、表7)。林地和果树台田等措施,通过持续的有机质归还(如枯落物)和较少的土壤扰动,维持了较高的SOM库容和良好的团聚体结构(图1(c))。同时,植被根系和有机质改善了土壤孔隙状况,使其保持了适宜的较低BD(图1(d))。这种“高SOM-低

BD”的理想组合,确保了在降雨初期SOM能有效发挥抑糙作用,而在高雨量阶段,土壤又不易过度板结,从而使 C_r 的波动被限制在较小范围内。

相比之下,裸地和顺坡垄作等措施由于缺乏有机质补充且易受扰动,SOM含量低,土壤结构差。在干早期易形成坚硬结皮(高BD),在雨期又易因SOM缺乏而结构溃散,导致 C_r 对降雨响应剧烈且不稳定。横坡垄作和地埂植物带等措施在初雨后的“增糙”现象(表4),与其较低的初始BD有关;低BD土壤更易受雨滴击溅扰动而产生起伏。然而,这种由松散状态引发的“增糙”是不可持续的,随着降雨继续、BD升高和SOM可能淋失,其微地形最终仍会趋于不稳定。

综上,在辽西薄层土区,土壤性质对 C_r 稳定性的调控是一个静、动态因子协同作用的系统。黏粒含量奠定了抗蚀的静态基础,而SOM和BD则通过随降雨特征变化的动态互补机制,共同缓冲或放大降雨对微地形的改造作用。水土保持措施的优劣,在很大程度上取决于其能否培育并维持“高黏粒、高SOM、低BD”这一优化的土壤性状组合,从而最大化土壤自身的内在抗蚀潜能,实现地表微地形的长期稳定。这一特性为筛选适宜的水土保持措施和针对性改良土壤提供了直接的理论依据。

3.4 水土保持措施对 C_r 稳定的综合效果

水土保持措施对 C_r 稳定性的调控效能存在显著差异,这与其对土壤结构、径流过程及地表覆盖的综合改良程度密切相关。

对比可知,黄土高原宽幅梯田因汇流路径较长,在遭遇辽西短历时暴雨时易形成股流切割,其 C_r 降幅可达10%~12%;而本区果树台田通过窄台面设计缩短坡长,复层冠幅有效截留降雨动能,使径流功率被持续压制在临界值以下,因此 ΔC_r 仅为宽幅梯田的1/2。结合同一区域(二道岭小流域)泥沙连通性的研究^[24],这种低 ΔC_r 意味着坡面泥沙的“源-汇”路径被有效阻断,泥沙连通性显著降低,从而实现了从微地形稳定到流域产沙减少的级联效应。相关小流域泥沙连通性研究指出,复合植被措施可将泥沙传递系数降至较低水平^[24]。本文从微地形视角进一步揭示了其底层机制:维持 C_r 的低波动,即是从源头切断了“侵蚀-搬运-连通”的泥沙输移链条。因此,在薄层土区推广“窄台面+复层植被”模式,可同时实现地形稳定与养分保持的双重目标,这是对关于“养分流失最优”结论^[20]在空间上的外延和过程机理上的深化。

值得关注的是,不同措施对 C_r 的调控机制存在差异。横坡垄作、地埂植物带等地表措施在初

雨中表现出“增糙”效应,这与其较低的BD($BD \leq 1.34 \text{ g/cm}^3$)有关。雨滴击溅引起表层颗粒位移,从而增大了地表起伏度。然而,这种“增糙”效应在高降雨强度下难以持续,随着BD升高和径流“填平效应”的增强,地表最终仍趋于平整。这表明,短期的“增糙”并不等同于长期的“稳糙”,从水动力学角度看,室内试验研究表明,粗糙度的增加虽然能减缓流速,但如果土壤结构本身不稳定(如低SOM),这种增糙效应难以持久,最终仍会被径流的“填平效应”所覆盖^[17]。只有从根本上改善土壤结构并提升植被覆盖,才能实现微地形的持续稳定。

综上,在辽西低山丘陵区, C_r 对降雨的响应是降雨动力、径流作用与土壤属性共同调控的结果。初雨阶段以雨滴击溅为主导,土壤初始状态与BD决定了 C_r 的变化方向;高雨强阶段径流“填平效应”凸显,R成为关键调控因子;而土壤黏粒、SOM和BD则通过其静态抗蚀能力与动态响应行为,共同维持微地形的相对稳定。在水土保持实践中,建议优先推广植被恢复与微地形改造相结合的措施,如果树台田与林地复合模式,以协同提升地表稳定性和土壤养分保持功能。

4 结论

辽西低山丘陵区 C_r 变化呈现显著的“初雨主导效应”与“高雨强饱和效应”,其雨强阈值约为18.82 mm/h。当雨强达到或超过该阈值时,会触发径流“填平效应”,显著降低 C_r 。同时,较高的土壤黏粒含量具有稳定的抗蚀作用,有助于维持地表微地形稳定。SOM与BD在抑制糙度变化方面表现出动态互补关系:SOM的抑糙效应随降雨历时延长因淋溶流失而减弱,BD的抑糙效应则随累积降雨量增加(雨量大于等于70 mm)因土壤板结而增强。在各类水土保持措施中,林地和果树台田凭借“高黏粒、高SOM、低BD、低R”的优化条件,表现出最低的 C_r 值与 ΔC_r ,成为该区域控制土壤侵蚀的最佳模式。

参考文献(References):

- [1] 郑子成. 坡面水蚀过程中地表糙度的作用及变化特征研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2007: 1-15.
 - [2] 李亚栖. 辽西低山丘陵区不同水土保持措施下坡面土壤侵蚀特征[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022: 9-11.
 - [3] 王云泽, 周凤艳, 韩艳刚, 等. 不同水土保持措施对地表粗糙度及其变化的影响[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(3): 77-81.
- WANG Yunze, ZHOU Fengyan, HAN Yangang, et al. Effects of different soil and water conservation measures on land surface roughness and its changes[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2025, 53(3): 77-81.

- [4] 董亮, 吕刚, 傅昕阳, 等. 辽西低山丘陵区褐土和棕壤坡耕地溅蚀过程模拟[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 78-83.
- DONG Liang, LYU Gang, FU Xinyang, et al. Simulation study on splash erosion process of cinnamon soil and brown soil slope farmland in low mountain and hilly region of western Liaoning Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 78-83.
- [5] ZOBECK T M, ONSTAD C A. Tillage and rainfall effects on random roughness: a review[J]. Soil and Tillage Research, 1987, 9(1): 1-20.
- [6] ZHENG Z C, HE S Q, WU F Q. Changes of soil surface roughness under water erosion process[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(12): 3919-3929.
- [7] 郑子成, 何淑勤, 吴发启. 降雨对地表糙度影响的研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(2): 151-154.
- ZHENG Zicheng, HE Shuqin, WU Faqi. Research on rainfall effect on surface roughness[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(2): 151-154.
- [8] 张娜娜, 王兵, 张宝琦, 等. 地表糙度测定方法研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 135-140, 148.
- ZHANG Nana, WANG Bing, ZHANG Baoqi, et al. Study on determination method of surface roughness[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 135-140, 148.
- [9] 张瑞豪, 肖洋, 徐金忠, 等. 坡耕地黑土侵蚀沟演变对土壤结构及抗蚀性的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 69-75.
- ZHANG Ruihao, XIAO Yang, XU Jinzhong, et al. Effect of black soil erosion gully evolution on soil structural features and anti-erodibility in sloping farmland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 69-75.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 14-38.
- [11] 张思琪, 马芊红, 朱彤, 等. 基于三维激光扫描技术的喀斯特地表微地形特征及其侵蚀响应[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 8-14.
- ZHANG Siqi, MA Qianhong, ZHU Tong, et al. Micro topography characteristic of Karst Slope and its response to soil erosion based on 3D laser scanning technique[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 8-14.
- [12] 李坤衡, 焦剑, 秦伟, 等. 东北典型黑土区土壤侵蚀过程顺坡起垄垄沟水力特征分析[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 77-82.
- LI Kunheng, JIAO Jian, QIN Wei, et al. Hydraulic characteristics of longitudinal ridges and furrows in soil erosion in the typical black soil area of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 77-82.
- [13] 谷方正, 张会兰, 王铃涵, 等. 基于PIV的渐变地表粗糙度对坡面流水动力特性的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(6): 18-24, 33.
- GU Fangzheng, ZHANG Huilan, WANG Linghan, et al. The influence of gradient surface roughness on the hydrodynamic characteristics of overland flow based on PIV[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6): 18-24, 33.
- [14] 贾莲莲, 李占斌, 李鹏, 等. 降雨过程对地表糙度的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 30-33.
- JIA Lianlian, LI Zhanbin, LI Peng, et al. The course rainfall effect on surface roughness[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 30-33.
- [15] 梁心蓝, 赵龙山, 吴佳, 等. 模拟条件下不同耕作措施和雨强对地表糙度的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(24): 4840-4849.
- LIANG Xinlan, ZHAO Longshan, WU Jia, et al. Effects of different tillage treatments and rainfall intensities on soil surface roughness under simulated condition[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(24): 4840-4849.
- [16] 陶佳, 张帆, 周凤艳, 等. 辽西山地不同水土保持措施对坡面土壤养分流失的影响[J]. 生态学杂志, 2025, 44(8): 2515-2521.
- TAO Jia, ZHANG Fan, ZHOU Fengyan, et al. Effects of different soil and water conservation measures on soil nutrient loss on slope in mountainous region of western Liaoning[J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(8): 2515-2521.
- [17] 张旖璇, 马岚, 薛梦华, 等. 不同地表粗糙度坡面流体力学特性试验研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 1-10.
- ZHANG Yixuan, MA Lan, XUE Menghua, et al. Experimental study on hydraulic characteristics of overland flow under different surface roughness[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2023, 51(6): 1-10.
- [18] 钱秋颖, 秦富仓, 李龙, 等. 自然降雨条件下坡面侵蚀地表粗糙度的空间异质性[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 46-52.
- QIAN Qiuying, QIN Fucang, LI Long, et al. Spatial heterogeneity of surface roughness of slope erosion under natural rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 46-52.
- [19] JIA Y H, SHAO M G. Dynamics of deep soil moisture in response to vegetational restoration on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 523-531.
- [20] 王永平, 周子柯, 滕昊蔚, 等. 滇南小流域3种土地利用方式下土壤侵蚀及养分流失特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 11-18.
- WANG Yongping, ZHOU Zike, TENG Haowei, et al. Characteristics of soil erosion and nutrient losses in three land use patterns in the small watershed of southern Dianchi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(1): 11-18.
- [21] 朱志卓, 李龙, 张鹏, 等. 水力侵蚀下砒砂岩区植被格局对微地形和侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 10-18, 26.
- ZHU Zhizhuo, LI Long, ZHANG Peng, et al. Influence of vegetation pattern on microtopography and erosion under hydraulic erosion in feldspathic sandstone region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 10-18, 26.
- [22] 罗键, 尹忠, 郑子成, 等. 不同降雨条件下紫色土横垄坡面地表微地形变化特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(16): 3162-3173.
- LUO Jian, YIN Zhong, ZHENG Zicheng, et al. Variation characteristics of microtopography of ridge tillage of purple soil under different rainfall patterns[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(16): 3162-3173.
- [23] STOLTE J, SHI X Z, RITSEMA C J. Introduction: soil erosion and nutrient losses in the Hilly Purple Soil area in China[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 105(2): 283-284.
- [24] 王佳楠, 贾燕锋, 范昊明. 辽西低山棕壤丘陵区小流域泥沙连通性与土壤侵蚀的空间分布特征[J]. 应用生态学报, 2023, 34(3): 726-732.
- WANG Jianan, JIA Yanfeng, FAN Haoming. Spatial distribution characteristics of sediment connectivity and soil erosion in small watershed in brown soil hilly region of low mountains in western Liaoning Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(3): 726-732.