

黄棕壤耕作坡面的侵蚀能量分配与耗散机理

刘洋¹, 王文渝¹, 侯平川¹, 王杰¹, 郑子成², 梁心蓝¹

(1. 四川农业大学水利水电学院, 四川 雅安 625014; 2. 四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘要: [目的] 为定量解析黄棕壤坡面耕作措施对侵蚀能量的分配与耗散机理, 并阐明其抑制土壤剥离的物理阈值。 [方法] 本研究选取典型黄棕壤, 设置8°、15°、25° 3个坡度, 通过室内模拟降雨试验, 对比研究顺垄+横垄(LR&CR)、垄台(FR)、垄向区田(SR)及平坡对照(CK)4种措施的产流产沙及能量动态特征, 构建基于能量指标的侵蚀量化模型。 [结果] 保护性耕作(LR&CR、SR)通过延长径流路径和促进入渗, 构建“源头减能-过程耗散”双路径系统, 其减能效果显著优于FR, LR&CR在各坡度下减沙率最高(8°时达74.9%)。侵蚀速率与径流能量呈幂函数关系($R^2 \geq 0.80$), 其中LR&CR的指数 b 值最大(2.123), 显示强烈的非线性能量累积效应。侵蚀能耗与土壤流失量呈极显著线性相关($R^2 > 0.98$), 揭示保护性耕作主要通过大幅提高侵蚀发生的启动能量阈值来实现减沙。 [结论] 径流能量较传统水沙指标具有更强的侵蚀表征能力, 能更准确地捕捉非稳态流在复杂微地形下的动力特征。研究结果从能量动力学视角量化耕作措施的控蚀机理, 揭示黄棕壤坡面侵蚀对能量响应的非线性特征, 为黄棕壤区坡耕地水土保持模型的物理参数优化及措施精准配置提供科学依据。

关键词: 黄棕壤坡面; 耕作措施; 侵蚀能量分配; 启动能量阈值; 加剧能量阈值

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0095-09

Energy Distribution and Dissipation Mechanisms of Soil Erosion on Slope Farmland with Yellow-Brown Soil

Liu Yang¹, Wang Wenyu¹, Hou Pingchuan¹, Wang Jie¹, Zheng Zicheng², Liang Xinlan¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China;

2. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: [Objective] This study aims to quantitatively analyze the distribution and dissipation mechanisms of erosive energy under different tillage practices on yellow-brown soil slopes and to elucidate the physical threshold at which soil detachment is effectively suppressed. [Methods] Typical yellow-brown soil was selected, and indoor simulated rainfall experiments were conducted on three slope gradients of 8°, 15°, and 25°. Four treatments were compared: longitudinal ridge & cross ridge (LR & CR), flat ridge (FR), ridge-directional interval rainwater storage (SR), and a flat slope control (CK). The runoff and sediment yield dynamics and energy characteristics were investigated, and an erosion quantification model based on energy indicators was developed. [Results] Conservation tillage practices (LR & CR and SR) established a dual-pathway system of "source reduction-process dissipation" by extending runoff pathways and promoting infiltration. Their energy reduction effects were significantly superior to those of FR. LR & CR exhibited the highest sediment reduction rate across all slope gradients (reaching 74.9% at 8°). The erosion rate and runoff energy followed a power function relationship ($R^2 \geq 0.80$), with LR&CR showing the largest exponent b value (2.123), indicating a strong nonlinear energy accumulation effect. A highly

收稿日期: 2026-01-18

修回日期: 2026-03-11

录用日期: 2026-03-18

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-05-07

资助项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2022YFF1302903)

第一作者: 刘洋(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 2292319069@qq.com

通信作者: 梁心蓝(1983—), 女, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: liangxinlan@sicau.edu.cn

significant linear correlation ($R^2 > 0.98$) was observed between energy consumption for erosion and soil loss, revealing that conservation tillage primarily reduced sediment yield by substantially raising the initiation energy threshold required to initiate erosion. [Conclusion] Runoff energy has a stronger capability for characterizing erosion compared to traditional indicators and can more accurately capture the dynamic characteristics of non-steady flow under complex micro-topography. From the perspective of energy dynamics, this study quantifies the erosion control mechanisms of tillage practices, reveals the nonlinear response characteristics of yellow-brown soil slope erosion to energy, and provides a scientific basis for optimizing physical parameters in soil and water conservation models and for the precise configuration of conservation measures on slope farmland in yellow-brown soil regions.

Keywords: yellow-brown soil slope; tillage practices; erosion energy distribution; initiation energy threshold; aggravation energy threshold

Received: 2026-01-18

Revised: 2026-03-11

Accepted: 2026-03-18

Online(www.cnki.net): 2026-05-07

土壤侵蚀是导致全球耕地退化和粮食安全受损的关键诱因^[1-2]。在气候变化背景下,极端强降雨频发导致坡面侵蚀过程愈加复杂^[3]。黄棕壤区土层薄,石砾多,有机质积累慢,抗扰动能力弱。有效的耕作措施(如等高耕作^[4]、垄沟耕作^[5]等)被公认为是阻控水土流失、保障土地生产力^[6]的核心手段。

长期以来,针对耕作措施的减沙效益已开展大量研究,多聚焦于径流量与产沙量的统计学关系^[7-8]。在东北黑土区的长期定位观测^[9]发现,免耕、等高耕作等措施相较于裸地可减少径流 55.8%~92.2%,减少土壤流失 92.5%~99.9%^[10],明确了措施的有效性,但尚未揭示其影响侵蚀过程的物理本质。径流所携带的侵蚀能力及其在输移过程中的实际能耗,是驱动侵蚀产沙的本质因素。可见,耕作措施对侵蚀的影响本质上是一个能量转换过程,即从降雨与径流的物理能转化为土壤颗粒的剥离与输移能量^[11]。尽管传统的动力学指标在^[12]平坦坡面具有较好的适用性,但多数工作仍集中于描述减流减沙^[13]的表观现象,或应用单一指标进行解释^[14]。目前,关于耕作措施如何通过重构地表能量景观来调控侵蚀规律的定量研究仍显不足。

能量动力学理论为理解侵蚀过程提供整体性的视角。径流总能量在克服地表摩擦、产生湍流耗散及剥离土壤颗粒之间的分配比例,直接决定侵蚀强度。将能量平衡理论引入耕作侵蚀研究,不仅能更本质地解释保护性耕作的防蚀机理,还能有效解决现有模型在模拟复杂耕作边界条件下参数拟合度不高的难题^[15]。基于此,本文通过室内降雨模拟试验,拟解决的核心科学问题为:1)定量解析不同耕作措施下径流能量的产生与分配特征;2)构建基于能量指标的坡面侵蚀量化模型,并评价其预测精度;3)阐明耕作措施通过能量耗散抑制土壤剥离的物理阈值。研究结果旨在为黄棕壤区水土保持措施的优化设计提供物理机制支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究以西南高山峡谷区坡耕地耕层典型山地黄棕壤作为研究对象,试验土壤采自四川省康定市($30^{\circ}13' \sim 30^{\circ}22'N$, $102^{\circ}13' \sim 102^{\circ}18'E$)。该区域为峡谷地貌典型代表,属高原山地气候,年平均气温 $8 \sim 10^{\circ}C$,年降水量 $600 \sim 800\text{ mm}$ (其中 70% 集中在 4—9 月),年蒸发量 $800 \sim 1\,000\text{ mm}$,无霜期约 120 d。地形以陡坡为主($5^{\circ} \sim 25^{\circ}$),海拔 $2\,000 \sim 2\,500\text{ m}$,土地利用类型包括坡耕地、果园、林地及草地。其中,坡耕地传统耕作方式以顺坡耕作为主,也存在垄向区田等保护性耕作措施。供试土壤基本理化性质为:表层($0 \sim 20\text{ cm}$)土壤体积质量为 1.34 g/cm^3 ,总孔隙度为 44.4%,土壤有机质质量分数为 38.59 g/kg ,土壤颗粒组成中黏粒占 21.9%,粉粒占 14.2%,砂粒占 63.9%。

1.2 试验设计

本研究采用完全试验设计,共 2 个因素、3 个坡度水平和 4 个耕作措施。通过室内人工模拟降雨系统开展控制试验。试验土槽规格为长 5 m、宽 2 m、深 0.5 m,坡度可在 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 内调节。模拟降雨装置(南京南林电子科技有限公司)采用喷头式降雨系统,降雨高度为 5.0 m,降雨强度为 $30 \sim 150\text{ mm/h}$,均匀系数 $> 95\%$,其雨滴粒径分布和动能特征与自然降雨相近。试验土样为采自康定市的山地黄棕壤,土样风干过筛(筛孔 10 mm)后,采用分层填装法回填至土槽:每层铺土 665 kg,人工夯实至 5 cm,控制土壤体积质量使其接近原状土体积质量,约 1.33 g/cm^3 。

为探究坡度与耕作措施对坡面侵蚀的影响,试验设置 8° 、 15° 、 25° 3 个坡度,4 种耕作措施为顺垄+横垄(longitudinal ridge & cross ridge, LR & CR)、垄台(flat ridge, FR)、垄向区田(ridge-directional interval rainwater storage, SR)及平坡对照(flat slope control,

CK), 每种处理重复 3 次, 具体布设见表 1。

本研究选取 90 mm/h 作为试验雨强, 该强度处于当地夏季 30 min 最大雨强(80~100 mm/h)的统计范围内^[16], 能够模拟典型强降雨事件, 同时设定 60 min 降雨历时, 可充分激发不同耕作措施在径流能量耗散与产沙响应上的差异, 以揭示其动力学机制。

表 1 各耕作措施布设参数
Table 1 Layout parameters of different tillage practices

耕作措施	结构描述	尺寸参数
顺垄+横垄(LR & CR)	沿坡面前 4 m 为顺垄, 后 1 m 为横垄	顺垄长 4 m, 横垄长 2 m, 垄高 10 cm, 沟深 10 cm, 垄距 30 cm
垄台(FR)	连续的垄和沟结构	垄高 10 cm, 沟深 10 cm, 垄距 30 cm, 垄幅 45 cm
垄向区田(SR)	在顺坡垄的基础上, 沿垄沟等距离设置土挡	横向土挡间距 1 m, 土挡高度 15 cm
平坡对照(CK)	无任何垄形结构	保持平整、裸露的土地表面

试验开始前, 采用 30 mm/h 的降雨强度对每个小区进行预降雨, 至坡面产流时停雨; 随后覆盖薄膜静置 24 h, 确保每个处理的前期土壤含水率保持一致, 约 17%; 之后再行正式降雨试验。降雨开始后计时, 自产流发生时起, 每隔 2 min 收集 1 次径流泥沙全样。当产流稳定后, 每隔 30 min 采用高锰酸钾示踪法测量 1 次坡面流流速。每次测量都在试验小区的上、中、下 3 个坡位分别进行。在坡面上取 1 m 距离作为测段, 测段顶端瞬时注入高锰酸钾溶液染色剂, 用秒表记录染色剂随坡面径流流至测段底端的时间, 重复测量 5 次并取平均值作为该测段的表观流速以减小误差。对所有流速测量值取平均值作为坡面流流速(u_0)。

降雨结束后对径流泥沙样称重, 后将样品置于阴凉处静置沉淀 24 h。泥沙完全沉积后移除上层清液, 将下层泥沙置于烘箱中于 105 ℃ 烘干 24 h 至恒重, 称重, 计算得径流量与泥沙量。

1.3 土壤侵蚀的能量平衡与计算

本研究基于 2 min 间隔采集的径流泥沙数据, 计算平均流量($\bar{Q}$)、径流深(R)、土壤侵蚀速率(E_r)、减流率(RRM)及减沙率(SRM)等水沙指标。

根据能量守恒定律, 坡面侵蚀系统的能量输入包括降雨动能与泥沙初始重力势能。输出为在观测时段内, 通过出口断面的径流与泥沙所携带的动能。为量化侵蚀过程中消耗的能量, 本研究采用 Li 等^[17]提出的方法, 计算坡面泥沙在侵蚀和输移过程中的动能与势能变化(表 2)。

表 2 水动力指标及公式
Table 2 Hydrodynamic indicators and formulas

水动力指标	符号	计算公式	单位
流量	$\bar{Q}$	$\bar{Q} = \frac{W}{T}$	m^3/s
径流深	h	$R = \frac{W}{1\,000\,F} = \frac{\bar{Q}T}{1\,000\,F}$	mm
单位降雨能量	e	$e = 2.98 + 12.13 \lg I$	$\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$
土壤侵蚀速率	E_r	$E_r = \frac{S}{Ft_0}$	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$
减流率	RRM	$\text{RRM} = \frac{(R_0 - R_i)}{R_0} \times 100\%$	%
减沙率	SRM	$\text{SRM} = \frac{(S_0 - S_i)}{S_0} \times 100\%$	%
径流势能	E_p	$E_p = (1/4) \rho g B L^2 p h \sin 2\theta$	J
径流动能	E_K	$E_K = (1/2) \rho Q u_{0,k}^2$	J
泥沙动能	E_b	$E_b = (1/2) m_s \bar{u}_0^2$	J
泥沙势能	E_c	$E_c = (1/4) m_s g L \sin \theta$	J
侵蚀能耗	E_0	$E_0 = E_a + E_c + E_p - E_b - E_K$	J

注: W 为时段内径流量, m^3 ; T 为降雨历时, s ; I 为降雨强度, mm/min ; S 为沉积物干重, g ; t_0 为取样持续时间, min ; R_0 、 S_0 分别为对照的产流量和产沙量, m^3/kg ; R_i 为各耕作措施处理的产流量, m^3 ; S_i 为各耕作措施处理的产沙量, kg ; h 为平均水深, m ; $u_{0,k}$ 为时段 k 的出口断面平均流速, m/s ; $\bar{u}_0$ 为场次平均流速, m/s ; Q 为流量, m^3/s ; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; m_s 为泥沙质量, kg ; B 为小区宽度, m ; L 为顺坡长度, m ; θ 为坡度角, ($^\circ$); 投影面积 $F = B L \cos \theta$ 。

2 结果与分析

2.1 不同坡度与耕作措施的水沙调控规律

本研究在 8°、15° 和 25° 3 种坡度条件下系统评估 4 种耕作措施的水土保持效应。对各处理下的减流率、径流深、径流流速、减沙率及土壤侵蚀速率等关键指标进行定量分析与比较。结果表明,所有耕作措施均能有效减少坡面径流产生与土壤流失,但其保持效果受坡度变化的显著影响,且不同措施在径流调控和泥沙拦截方面表现出不同的优势与稳定性特征。

与 CK 相比,在径流调控方面,3 种耕作措施均表现出显著的减流效果(图 1),其减流效益为 $FR > LR\&CR > SR$ 。在 8° 缓坡条件下,各措施减流率为 14%~24%。随着坡度升高至 15° 和 25°,各处理减流率整体呈下降趋势并逐渐趋于稳定,其中 FR 仍保持最强的减流能力,LR&CR 与 SR 的降幅相对较小,可能与后二者在高坡度下入渗能力趋于极限有关,说明坡度对减流效应具有重要影响。

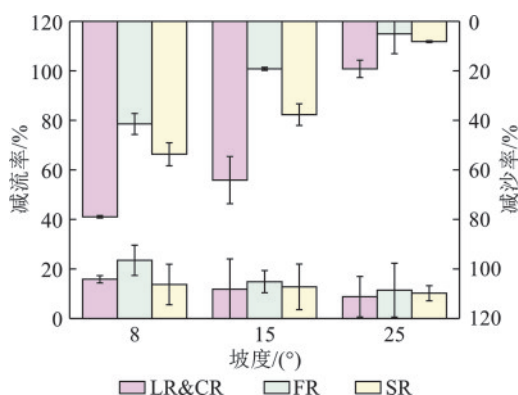


图 1 不同耕作措施的减流减沙效益

Fig.1 Runoff and sediment reduction benefits of different tillage practices

与减流规律一致,各处理径流深依次为 $CK > LR\&CR > SR > FR$,其中 FR 在 8° 坡度下使径流深较 CK 降低约 23.3%,表现出最佳的径流削减效果与稳定性(图 2)。随着坡度从 8° 增至 25°,所有处理径流深均显著上升(CK 增幅为 24.9%),且在高坡度下各措施间差异明显缩小,表明在陡坡条件下各措施的径流调控能力均受到制约。

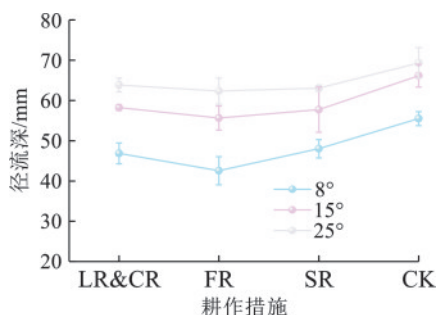


图 2 不同耕作措施的径流深

Fig.2 Runoff depth under different tillage practices

在流速方面,所有耕作措施均能有效降低地表径流流速,缓流效果表现为 $SR > LR\&CR \approx FR > CK$ (图 3)。坡度是影响流速的关键环境因子,CK 处理的平均流速由 8° 时的 7.83 cm/s 升高至 25° 时的 9.78 cm/s。其中,SR 在不同坡度下流速增幅最小,表现最为稳定;而 LR&CR 在 25° 陡坡下流速超过 FR,表明其高坡度条件下缓流功能可能出现退化。

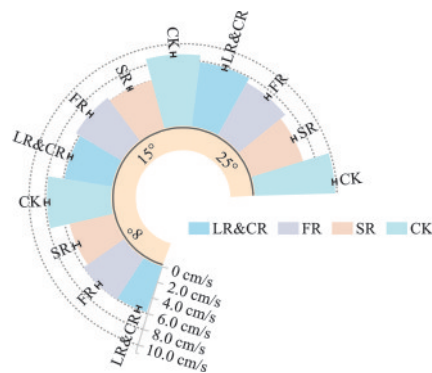


图 3 不同耕作措施的平均流速对比

Fig.3 Comparison of average flow velocity under different tillage practices

在泥沙控制方面,LR&CR 在 3 个坡度下均表现出最高的减沙率(图 1),说明其通过改变地表微地形、拦截泥沙并延长其输移路径,具有较强的控沙潜力。然而,其效益随坡度升高显著下降,尤其当坡度由 15° 升至 25° 时,减沙率降幅达 45%,可能与陡坡下径流冲刷力增强导致垄沟结构受损有关。FR 的减沙率随坡度上升呈现先快后慢的下降趋势,显示其拦沙能力在 15° 以上坡度可能逐渐趋于饱和。土壤侵蚀速率的变化进一步验证上述趋势(图 4),整体表现为 $CK > FR > SR > LR\&CR$ 。LR&CR 在 8° 坡度下的侵蚀速率较 CK 下降 74.9%,显示出优越的控蚀效果,但在坡度增至 25° 时,其侵蚀速率增幅最大(达 461.5%),表明其控蚀能力在高坡度下稳定性不足。相比之下,SR 在各坡度下的侵蚀速率标准差最小,表现出最为稳定的泥沙调控性能。

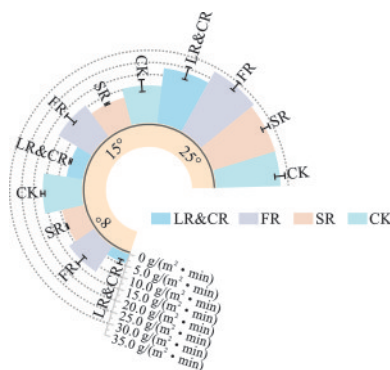


图 4 不同耕作措施的土壤侵蚀速率

Fig.4 Soil erosion rates under different tillage practices

2.2 径流能量与侵蚀能耗的动态响应特征

不同坡度与耕作措施对地表径流能量的影响见图 5a。分析表明,径流能量随坡度增加呈显著上升趋势,其中 CK 的径流能量从 8°坡度的 76.51 J 增至 25°坡度的 288.55 J,增幅达 277%。在不同坡度条件下,各耕作措施对径流能量的削减效果呈现一致规

律,即 LR&CR 与 SR 处理的削减效果相近且优于 FR 处理,而 CK 处理的径流能量始终最高。在 15°坡度下,SR 处理径流能力的变异程度最高,表明其在该条件下的效果可能存在不确定性。相比之下,LR&CR 处理在各坡度下均表现出较低的差异性,说明其减能效果更为稳定可靠。

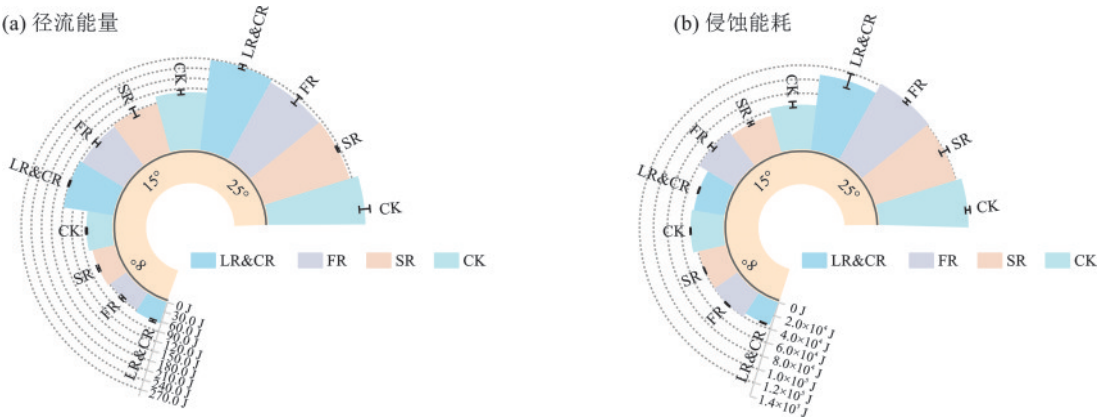


图 5 不同耕作措施的径流能量和侵蚀能耗
Fig.5 Runoff energy and erosion energy consumption under different tillage practices

坡度增加直接提升水流重力势能,进而加快流速,显著提高径流动能与剪切力。与 CK 相比,所有保持耕作措施均能降低径流能量,表明通过耕作改变微地形是缓解土壤水蚀的有效途径。其中,LR&CR 在各坡度下均表现出最优或接近最优的减能效果,且差异性最小,说明其减能效果显著且稳定。SR 的减能效果与 LR&CR 相近,尤其在 8°和 25°坡度下,表明垄和土挡作为物理屏障对拦截径流、减缓流速具有重要作用。FR 虽优于 CK,但效果明显逊于其他耕作措施,因为 FR 会形成汇流通道,加速水流,因而限制能量削减效果。

不同坡度与耕作措施对侵蚀能耗的影响呈现出与径流能量相似的变化规律(图 5b)。侵蚀能耗随坡度急剧上升,CK 处理的侵蚀能耗从 8°坡度的约 4.71×10^4 J 增至 25°坡度的约 1.28×10^5 J,增幅达 171.00%。在 25°坡度下,所有处理的侵蚀能耗均出现跃升,其中 LR&CR 处理的能耗达到 15°坡度时的 2.4 倍以上。各坡度下,不同耕作措施的侵蚀能耗排序保持一致:LR&CR<SR<FR<CK,且 SR 与 FR 之间的差异明显。在 15°坡度条件下,各处理侵蚀能耗表现出较高的差异性,表明该坡度可能是侵蚀过程发生显著变化的阈值。相比之下,LR&CR 在 8°和 15°坡度下稳定性最佳。

各耕作处理的侵蚀能耗均显著低于 CK,这为耕作措施的侵蚀控制效应提供能量学依据。侵蚀能耗的变化趋势与观测到的土壤流失量减少规律相吻合。LR&CR 处理在所有坡度条件下均表现出最低的侵

蚀能耗,尤其在 25°坡度下,其优势最为显著,表明该措施在强侵蚀环境下具有突出的水土保持能力。

2.3 径流能量与侵蚀速率的函数关系

土壤侵蚀速率与径流能量之间的回归分析表明,二者在所有耕作措施下均呈现出幂函数关系($E_r = aE^b$)(表 3)。该函数关系从动力学角度反映不同地表条件下侵蚀过程对径流能量的非线性响应特征。其中,指数 b 表征侵蚀速率对能量变化的非线性响应程度,而系数 a 则反映单位径流能量输入下对应的基准侵蚀速率。

表 3 径流能量与土壤侵蚀速率回归方程
Table 3 Regression equations between runoff energy and soil erosion rate

耕作措施	回归方程	R^2
LR&CR	$E_r = 1.718 \times 10^{-4} E^{2.123}$	0.97
FR	$E_r = 0.185 E^{0.906}$	0.94
SR	$E_r = 0.026 E^{1.253}$	0.95
CK	$E_r = 0.831 E^{0.628}$	0.80

比较不同耕作措施发现,LR&CR 处理的 b 值最高(2.123),显示出强烈的非线性响应特征,表明其侵蚀过程存在明显的能量累积效应与临界阈值行为(图 6)。在低径流能量阶段,由于垄沟系统的有效拦截与地表结构的保护作用,侵蚀受到显著抑制;仅当径流能量积累至足以填满垄沟、击穿地表结皮并形成连续径流时,侵蚀速率才急剧上升,此过程与细沟发育及沟头溯源侵蚀密切相关。FR 和 SR 处理的 b 值分别为 0.906 和 1.253,表明其侵蚀速率随能量增加

基本呈线性或略超线性增长,未表现出明显的能量阈值效应。CK处理的 b 值最低(0.628),呈亚线性增长特征,说明在高能量条件下侵蚀速率的增长趋于平缓,可能与表层松散物质被冲刷后下层土壤抗蚀性增强,或输移能力逐渐趋于饱和有关。从表征土壤抗蚀性的系数 a 来看,其排序为CK>FR>SR>LR&CR,反映LR&CR通过优化地表微地形、增加糙率与入渗能力,显著降低单位能量输入下的土壤可蚀性。

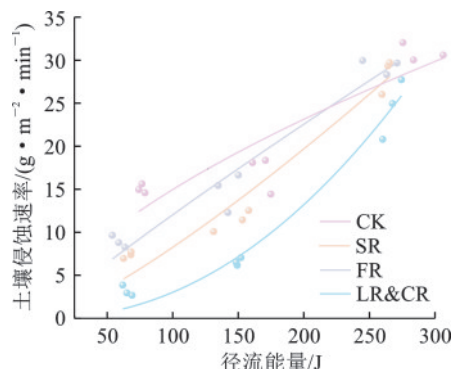


图 6 不同耕作措施的径流能量与土壤侵蚀速率拟合
Fig.6 Fitting between runoff energy and soil erosion rate under different tillage practices

分析侵蚀能耗与单位面积土壤流失量之间的关系,二者在所有处理中均存在线性相关($y=cx+d$) (图 7),表明在本试验条件下土壤流失主要受径流在侵蚀过程中所消耗的能量控制。该线性关系的斜率 c 代表单位侵蚀能耗所能搬运的土壤质量,即能量侵蚀效率,其排序为LR&CR>SR>FR>CK。LR&CR处理表现出最高的能量侵蚀效率,可能与其垄沟系统促进细颗粒的选择性迁移有关,细颗粒在输移过程中单位能量可输移的质量更大。截距 d 则具有明确的物理意义,反映产生可观测土壤流失所需的最小侵蚀能耗阈值。各措施的 d 值排序为CK>FR>SR>LR&CR,其中LR&CR与SR表现为负截距。此现象在物理上对应于侵蚀发生的“无效能耗阶段”:在侵蚀初始阶段,输入的能量优先用于克服地表摩擦阻力、填充垄沟微地形、湿润表层土壤及破坏地表结皮等过程,这些耗散并未直接转化为泥沙的剥离与输移,所以只有当累积侵蚀能耗足够大,使 $c \times E$ 超过截距绝对值时,才可能发生可测的土壤流失。相比之下,CK的正截距表明其在较低能量输入下极易发生侵蚀。因此,有效的水土保持措施主要通过大幅提高侵蚀发生的能量阈值来实现减沙效益,而非降低其能量利用效率。LR&CR在提升侵蚀能量阈值方面最为突出,与其最优的田间水土保持表现相一致。

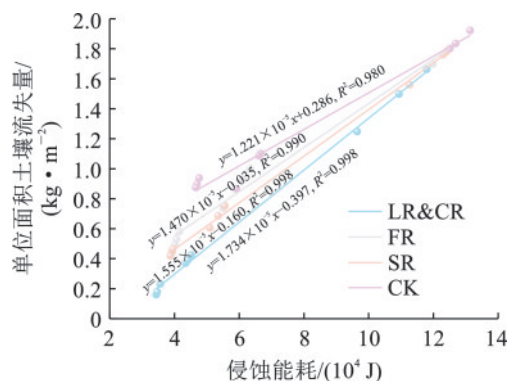


图 7 不同耕作措施的侵蚀能耗与单位面积土壤流失量拟合
Fig.7 Fitting between erosion energy consumption and soil loss per unit area under different tillage practices

3 讨论

3.1 耕作措施调控侵蚀的能量耗散路径解析

本研究证实,黄棕壤坡面耕作措施的水土保持效应本质上是对径流能量分配路径的差异化调控。相比平坡对照(CK),保护性耕作通过构建多层次耗散系统,显著降低单位径流能量与侵蚀能耗^[18-19]。

研究发现,LR&CR和SR形成“源头减能-过程耗散”的双路径机制。首要路径是通过微地形重塑增强摩擦耗散:横垄与土挡作为物理屏障分割坡长,迫使径流路径曲折化并增大水力糙率^[20],将机械动能转化为热能耗散^[21],解释SR在各坡度下流速增幅最小且最为稳定的原因。第2路径是通过微型蓄水空间促进水分入渗^[22],从源头削弱重力势能向侵蚀动能的转化。LR&CR在8°坡下减沙率高达74.9%且侵蚀能耗最低,印证该协同控制策略的有效性。

相比之下,FR构成“能量集中”的反例。尽管通过蓄水在一定程度上降低径流深,但其形成的顺垄沟槽具有“输运效应”,最小化径流的侧向耗散,导致局部能量高度集中,从物理上解释为何FR在减流方面优于SR,但在减沙率和能量削减稳定性上却显著逊于保护性耕作。

3.2 能量指标在侵蚀预测中的机理优势与效能

相较于张龙齐等^[23]关于径流功率与侵蚀速率的拟合($y=301.41x^{-4}-4.6037$, $R^2=0.64$)统计模型,本研究构建的能量动力学模型展现出更高的拟合系数($R^2>0.80$)和普适性。径流能量作为一个融合流量、流速、水深及坡度的复合指标,能更本质地量化径流剥离土壤的物理潜力。

能量指标的优越性在于其卓越的机理区分能力。传统的减流减沙指标往往掩盖过程差异,而能

量分析能够识别出“等效异质”的防蚀特性。例如,FR与LR&CR在某些坡度下的减流率虽接近,但能量模型清晰揭示LR&CR在能量耗散效率上的巨大优势。这种区分能力对于改进WEPP等物理过程模型具有重要价值,例如,Tu等^[24]利用WEPP模型,基于中国南方红土丘陵地区的径流与沉积物观测数据及能量指标模拟了山坡形状对年度径流和土壤侵蚀的影响。将径流能量或单位水流功率作为模型校准的约束条件,可以显著增强模型对耕作边界条件下水力过程演变的表征精度;贾路等^[25]在流域尺度的泥沙输移模型研究中指出基于径流侵蚀功率的模型在预测精度上优于传统的降雨侵蚀力指标,从更大尺度上验证能量指标连接水文过程与泥沙动力学过程的优越性。

3.3 侵蚀能量阈值的物理意义及应用价值

本研究发现,侵蚀能耗(E_0)与土壤流失量(SL)之间的高度线性相关($R^2 > 0.98$)揭示能量利用效率的一致性。LR&CR与SR呈现的负截距具有明确物理意义,即这些措施大幅提高侵蚀发生的启动能量阈值(指径流能量累积至足以克服地表摩擦、填注微地形、湿润表层并破坏结皮,从而启动可观测土壤剥离所需的最小能量输入值)。有效的水土保持并非单纯降低能量利用效率,而是通过大幅提升侵蚀启动能量阈值来实现减沙。本研究发现,随坡度增加,该启动能量阈值相应降低,解释了保护性耕作在25°陡坡下稳定性下降的动力学成因。

侵蚀过程对能量的响应则存在明显的非线性特征。径流能量与侵蚀速率间的幂函数关系反映侵蚀过程的加剧能量阈值(指当径流能量累积超过某一临界值时,侵蚀速率呈指数级跃升的临界能量点)。LR&CR表现出最高且超过临界值的指数 $b(2.123)$,说明其侵蚀过程存在显著的加剧能量阈值:当能量未填满垄沟或击穿地表保护结构时,侵蚀受到强烈抑制,即处于启动能量阈值以下;一旦突破加剧能量阈值,能量释放将导致侵蚀速率呈幂函数式急剧增长,从动力学角度解释细沟侵蚀的启动机制^[26]和细沟发育的突发性特征^[27]。根据该发现,在黄棕壤区防治策略上,缓坡区应重点通过耕作优化提升启动阈值,而陡坡区则需通过多级阻控体系分散径流能量,防止能量累积突破加剧能量阈值。

黄棕壤能量阈值的这种坡度响应,与其区别于黄绵土的理化特性密切相关:黄棕壤透水性较差,在坡地上易产生地表径流;同时土壤可蚀性参数低于

黄绵土^[28],表明黄棕壤需要更高的能量输入才能启动显著侵蚀。

将二者置于同一能量框架下分析可知,黄棕壤表现出典型的“高启动阈值”特性:其启动侵蚀所需的最小能量输入高于黄绵土^[29]。然而,黄棕壤土层浅薄且结构脆弱,一旦能量累积突破其较高的启动阈值,更易越过能量阈值而导致侵蚀的快速加剧。因此,黄棕壤区保护性耕作的核心在于能量累积突破加剧能量阈值前实现有效耗散,正是LR&CR等措施在缓坡区通过提升启动能量阈值成效显著、在陡坡区因能量累积过快而易突破加剧能量阈值导致稳定性下降的物理本质。

4 结论

1)耕作措施通过重构能量耗散路径实现减沙。垄台(FR)侧重于通过蓄水减流来削减能量输入,但在高坡度下易因汇流导致能量集中;顺垄+横垄(LR&CR)与垄向区田(SR)则通过增加微地形复杂度和水力糙率,构建高效的能量耗散系统,在拦截泥沙和削减径流流速方面表现更优。

2)能量指标具有更强的侵蚀表征力与预测精度。坡面侵蚀过程本质上是径流能量对土壤的做功过程。基于径流能量构建的幂函数模型和基于侵蚀能耗构建的线性模型,其拟合效果均优于传统径流量指标,能够有效解释不同耕作措施下土壤剥离的物理差异。

3)解析侵蚀发生的物理阈值特征。明确“启动能量阈值”与“加剧能量阈值”的区分。侵蚀速率对径流能量的响应具有非线性特征,尤其是LR&CR措施表现出明显的能量累积效应,其加剧能量阈值较高。有效的水土保持措施主要通过大幅提高侵蚀发生的能量启动阈值来实现减沙效益,而非单纯降低能量利用效率。

4)坡度是调控能量转换的关键边界因子。随坡度增加,径流能量呈显著增加趋势,导致各耕作措施的调控能力受限。在实际应用中,缓坡区优先采用LR&CR,该措施与中小型微耕机作业相适应,可在山地丘陵区有效提升侵蚀的能量启动阈值;陡坡区LR&CR稳定性下降,建议采用SR或LR&CR+生物埂组合,并搭配红薯、大豆等低秆密植作物,通过多级阻控分散径流能量,使其难以突破侵蚀加剧能量阈值,控制土壤侵蚀在轻度范围,实现水土保持与农业生产协同优化。

参考文献:

- [1] Zhang Xinyu, Zhang Shouhong, Zhang Fan, et al. Rain-fall amount shapes the soil erosion and vegetation protection effectiveness in soil conservation [J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 663: e134219.
- [2] 田芷源, 卢慧中, 马瑞, 等. 东北黑土区耕地侵蚀退化空间分异特征[J]. *土壤学报*, 2025, 62(4): 931-945.
Tian Zhiyuan, Lu Huizhong, Ma Rui, et al. Spatial differentiation characteristics of soil erosion and degradation in black soil cropland of northeast China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(4): 931-945.
- [3] 陈静, 张扬, 王苗苗, 等. 种植多年生草本植物对黑土抗侵蚀能力的综合影响[J]. *中国水土保持科学*, 2025, 23(3): 194-202.
Chen Jing, Zhang Yang, Wang Miaomiao, et al. The comprehensive effect of planting perennial grass on the erosion resistance of black soil [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(3): 194-202.
- [4] 王嘉琦, 王勇, 张泽洪, 等. 西南高山峡谷区人为耕作扰动对典型坡耕地坡面坡形和微地形的影响[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(1): 152-159, 169.
Wang Jiaqi, Wang Yong, Zhang Zehong, et al. Effects of tillage disturbance on slope shape and micro-topographic features on typical sloping cropland of southwestern alpine-canyon area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(1): 152-159, 169.
- [5] 梁德平. 旱地环保型液膜覆盖和垄沟耕作技术的水土保持效应研究[J]. *山西水土保持科技*, 2025(3): 23-26.
Liang Deping. Study on the soil and water conservation effects of environmentally friendly liquid film coverage and ridge gully cultivation techniques in dryland [J]. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi*, 2025(3): 23-26.
- [6] 盖子涵, 崔志超, 张仁政, 等. 耕作措施与秸秆还田对麦田土壤腐殖质、铁氧化物及小麦产量的影响研究[J]. *农业科技与装备*, 2024(3): 18-20.
Gai Zihan, Cui Zhichao, Zhang Renzheng, et al. Research on the effects of tillage measures and straw returning to the field on soil humus, iron oxides, and wheat yield in wheat fields [J]. *Agricultural Science and Technology and Equipment*, 2024(3): 18-20.
- [7] 金森, 徐文玉, 杨伟, 等. 水土保持重点工程典型小流域治理效益分析与评价: 以竹山县太和小流域为例[J]. *水土保持*, 2025(2): 14-20.
Jin Miao, Xu Wenyu, Yang Wei, et al. Analysis and evaluation of benefits from typical small watershed management in key soil and water conservation projects: A case study of Taihe small watershed in Zhushan County [J]. *Open Journal of Soil and Water Conservation*, 2025(2): 14-20.
- [8] Zhang Qingyu, Wang Ziyin, Wang Xinwei, et al. Relationship among runoff, soil erosion, and rill morphology on slopes of overburdened stockpiles under simulated rainfall [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 633: e130991.
- [9] Li Yong, Zheng Shufeng, Wang Liping, et al. Systematic identification of factors influencing the spatial distribution of soil organic matter in croplands within the black soil region of northeastern China across multiple scales [J]. *Catena*, 2025, 249: e108633.
- [10] Chen Zhuoxin, Guo Mingming, Chen Yuan, et al. Utilizing an 11-year runoff plot dataset to evaluate the regulation of six land management practices on runoff and sediment on mollisols slopes and the applicability of the WEPP model [J]. *Soil and Tillage Research*, 2025, 252: e106601.
- [11] 刘珏, 肖秀珠, 林梦凡. 基于次降雨侵蚀力估算模型的精细化降雨侵蚀力特征分析: 以长汀县为例[J]. *海峡科学*, 2023(10): 28-34.
Liu Jue, Xiao Xiuzhu, Lin Mengfan. Analysis on the characteristics of fine rainfall erosivity based on the estimation model of secondary rainfall erosivity: Taking Changting County as an example [J]. *Straits Science*, 2023(10): 28-34.
- [12] 王建羽, 林哲, 廖达兰, 等. 花岗岩红壤坡面沟头高度对沟床跌穴发育过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 1-11.
Wang Jianyu, Lin Zhe, Liao Dalan, et al. Influence of headcut height on the developmental processes of gully bed plunge pool on a granite red soil slope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 1-11.
- [13] 张蒙, 胡桂清, 张文太, 等. 长期植被覆盖对紫色土坡面减流减沙能力的影响[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(5): 164-172.
Zhang Meng, Hu Guiqing, Zhang Wentai, et al. Effect of long-term vegetation coverage on runoff and sediment reducing ability of purple soil slope [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(5): 164-172.
- [14] Liang Xinlan, Song Ke, Zhang Youheng, et al. Effects of different tillage practices on slope erosion characteristics of peanut field [J]. *Agronomy*, 2023, 13(10): e2612.
- [15] Wang Qingyuan, Zhang Letao, Cen Yunfeng, et al. Determination and energy-sediment relationship analysis of erosive runoff events on the entire slope of the Chinese Loess Plateau [J]. *Catena*, 2025, 257: e109155.
- [16] 马真真. 西南高山峡谷区垄作对坡耕地侵蚀产沙的影响及MUSLE模型优化[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2025.
Ma Zhenzhen. Effect of ridge cultivation on erosion and

- sediment yield of sloping farmland in southwest alpine canyon area and optimization of MUSLE model [D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2025.
- [17] Li Yang, Zhang Jianjun, Hu Yawei, et al. Contributions of flow discharge, slope gradient, and scouring time on rill erosion: A quantitative study of exposed slopes in the loess region[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2025, 40(3):500-511.
- [18] Zhao Xinkai, Song Xiaoyu, Wang Danyang, et al. Mechanisms of hydraulic erosion control in different microrelief patterns of loess sloped farmland under continuous rainfall[J]. *Catena*, 2025, 249: e108630.
- [19] Wang Qingyuan, Zhang Letao, Wei Yiyuan, et al. Spatial scale effects on erosive runoff and sediment flow behavior on loessial slopes: An erosive energy basis[J]. *Land Degradation and Development*, 2025, 36(5):1513-1526.
- [20] Li Jingjiang, Zhang Hanyu, Zhao Yajie, et al. Temporal variation and multiscale correlation between runoff and sediment on sloping farmland under straw incorporation in the northern rocky mountainous area of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 657: e133069.
- [21] 陈玉章, 吴松果, 卢成霖, 等. 条带垄覆对西南黄壤坡耕地径流和高粱水分利用的影响[J]. *作物学报*, 2024, 50(5):1325-1340.
- Chen Yuzhang, Wu Songguo, Lu Chenglin, et al. Effects of strip-mulching ridges on runoff and soil water use for sorghum in southwest yellow soil slope farmland [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(5):1325-1340.
- [22] 舒海苑, 王克勤, 宋娅丽, 等. 等高反坡阶对赤水河流域上游坡耕地氮磷化学计量比与流通过量的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2025, 46(6):851-862.
- Shu Haiyuan, Wang Keqin, Song Yali, et al. Effects of contour reverse-slope terrace on nitrogen/phosphorus stoichiometric ratios and loss fluxes of sloping cropland in the upper reaches of Chishui River basin[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2025, 46(6):851-862.
- [23] 张龙齐, 贾国栋, 吕相融, 等. 黄土高原典型地区不同植被覆盖下坡面土壤侵蚀阈值研究[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2):187-198.
- Zhang Longqi, Jia Guodong, Lü Xiangrong, et al. Research of soil erosion thresholds on the lower slopes of different vegetation cover in typical areas of Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2):187-198.
- [24] Tu Anguo, Zheng Haijin, Mo Minghao, et al. Effect of hillslope profile shape on runoff and soil erosion in red soil hilly areas of China using the WEPP model[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 655: e132914.
- [25] 贾路, 李占斌, 于坤霞, 等. 基于径流侵蚀功率的长江典型流域能沙关系模型及改进[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(5):128-140.
- Jia Lu, Li Zhanbin, Yu Kunxia, et al. Energy-sediment relationship model based on runoff erosion power and its improvement in typical Yangtze River basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(5):128-140.
- [26] 李文强. 不同坡度不同雨强下的棕壤坡面侵蚀特征研究[J]. *黑龙江水利科技*, 2023, 51(3):31-34.
- Li Wenqiang. Study on slope erosion characteristics of brown soil under different slope and rain intensity[J]. *Heilongjiang Hydraulic Science and Technology*, 2023, 51(3):31-34.
- [27] 董敬兵, 时鹏, 李占斌, 等. 植被和梯田措施对坡沟系统细沟侵蚀调控作用[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(20):96-104.
- Dong Jingbing, Shi Peng, Li Zhanbin, et al. Effects of the role of vegetation and terraced measures on the rill erosion in slope-gully system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(20):96-104.
- [28] 黄钰涵, 杨梦格, 雷廷武, 等. 饱和状态下黄绵土坡面细沟侵蚀可蚀性和临界剪切应力特征[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(17):83-90.
- Huang Yuhan, Yang Mengge, Lei Tingwu, et al. Characteristics of soil erodibility parameter and critical shear stress on saturated loess soil slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(17):83-90.
- [29] 苏远逸. 解冻期覆沙黄土坡面侵蚀动力过程试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- Su Yuanyi. Experimental study on erosion dynamic process of sand covered loess slope in thawing period [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.