

引用格式:侯宁,王勇,赵虎,张校棱,梁心蓝.耕作侵蚀对不同坡度下紫色土侵蚀产沙的影响[J].山地学报,2021,39(4):495-505.

HOU Ning, WANG Yong, ZHAO Hu, ZHANG Xiaoling, LIANG Xinlan. Effects of tillage erosion on sediment yield of purple soil under different slopes [J]. Mountain Research, 2021, 39(4):495-505.

# 耕作侵蚀对不同坡度下紫色土侵蚀产沙的影响

侯宁<sup>1</sup>,王勇<sup>2\*</sup>,赵虎<sup>1</sup>,张校棱<sup>1</sup>,梁心蓝<sup>1</sup>

(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 林学院,成都 611130)

**摘要:**川中丘陵紫色土在长期耕作侵蚀与水蚀的交互作用下侵蚀严重,在不同地形条件下紫色土耕作侵蚀坡面在二者相互作用的内在机理,以及水力学特征随坡度的变化规律尚不明晰。本文选取四川盆地典型紫色土坡地土壤为研究对象,以10 m<sup>2</sup>土槽坡面坡顶裸露2 m<sup>2</sup>母岩代表受耕作侵蚀严重的坡面(TE),以坡顶未发生母岩裸露作为对照坡面(CG),设计5种不同坡度(5°、10°、15°、20°和25°)坡面,在室内人工降雨大厅进行60 min强度为90 mm·h<sup>-1</sup>的模拟降雨。试验结果表明:(1)当坡度从5°逐渐增加到25°时,TE坡面较CG坡面累计产沙量分别增加了17.73%、49.91%、83.95%、57.70%、29.56%,在坡度为15°时增长比例最大。(2)TE和CG坡面平均流速和弗劳德数随着坡度增加而增加,阻力系数和雷诺数随着坡度增加而减小。与CG相比,TE坡面的流速、弗劳德数和雷诺数均显著增加,而阻力系数在10°~20°坡面显著减小。(3)在TE和CG坡面上,产沙速率和流速、弗劳德数均呈显著正相关关系,产沙速率和阻力系数呈显著负相关关系,产沙速率与雷诺数相关性不明显,拟合结果表明平均流速可以很好地预测坡面产沙速率和水力学变化趋势。研究显示不同坡度条件下耕作侵蚀均加剧了坡面水蚀的发生,15°可能是耕作-水复合侵蚀坡面产沙的临界坡度。本研究结果不仅丰富了耕作侵蚀对水蚀影响的理论,也为川中丘陵紫色土区土壤侵蚀防治提供了科学依据。

**关键词:**紫色土;坡度;模拟降雨;产流产沙;水力学参数;四川盆地

**中图分类号:** S157.1

**文献标志码:** A

紫色土是我国西南丘陵地区肥力较高的土壤,质地适中、矿质养料丰富,是长江上游珍贵的耕地资源,但由于该地区雨水充沛、地形起伏及不当耕作方式等因素,导致其受水力侵蚀(简称水蚀)和耕作侵蚀影响严重<sup>[1]</sup>,紫色土区已成为土壤流失最严重的地区之一<sup>[2]</sup>。在西南丘陵地区开展土壤侵蚀相关研究和预防治理具有重大意义。

紫色土区坡面侵蚀地貌景观是由耕作侵蚀与水力侵蚀对其共同作用或交替作用塑造的。耕作侵蚀

是指在耕作工具和重力作用下,耕作导致净余土壤量向下坡或上坡(依赖于耕作方向)运移、堆积、重新分配的过程,严重可造成基岩裸露<sup>[3]</sup>。水力侵蚀(水蚀)是指表层土壤在降雨作用下被剥离、冲刷、搬运和沉积的过程。耕作侵蚀与水蚀这两种侵蚀过程并不是相互独立的,而是存在着明显的交互作用。近年来已有学者通过示踪剂法<sup>[4-5]</sup>、模拟降雨<sup>[6]</sup>、冲刷试验<sup>[7]</sup>等方法对耕作侵蚀与水蚀之间的耦合关系进行了探究,研究发现:(1)坡耕地土壤表面在降

收稿日期(Received date):2020-11-11;改回日期(Accepted date):2021-05-28

基金项目(Foundation item):国家自然科学基金(41701324);四川省教育厅资助科研项目(17ZB0343)。[National Natural Science Foundation of China(41701324); Science Foundation of Ministry of Education of Sichuan Province(17ZB0343)]

作者简介(Biography):侯宁(1997-),男,山西运城人,硕士研究生,主要研究方向:水土保持。[HOU Ning(1997-), male, born in Yuncheng, Shanxi province, M. Sc. candidate, research on water and soil conservation] E-mail: houningsoil@foxmail.com

\*通讯作者(Corresponding author):王勇(1985-),男,陕西安康人,博士,副教授,主要研究方向:土壤侵蚀与水土保持。[WANG Yong(1985-), male, born in Ankang, Shaanxi province, Ph. D., associate professor, research on soil erosion and soil and water conservation] E-mail: wangyong2015@sicau.edu.cn

雨发生后可能会形成细小的侵蚀沟,虽然耕作活动会将表土填入细沟中,看似破坏了侵蚀沟,但耕作会使得坡面土壤疏松,致使填入沟中的土壤质地松散,为下一次水蚀的发生提供大量源物质<sup>[8]</sup>,从而加剧坡面水土流失;(2)坡面土壤再分布会影响到坡耕地的土壤水文变化,从而导致水力侵蚀和耕作侵蚀之间发生复杂的耦合作用以及与其他地貌过程的协同作用。另外耕作活动还会通过改变径流水力学特性从而影响坡面产流产沙进程,深入分析坡面水力学参数的变化规律将有助于从源头探索坡面侵蚀影响机制<sup>[9]</sup>。在长期耕作侵蚀与水蚀的交互作用下,坡顶或上坡土壤变得十分浅薄,甚至出现母岩裸露,显著改变了坡面水文过程,且不同坡度条件下变化规律可能存在较大差异,但目前关于不同地形条件下二者相互作用的内在机理尚不明晰。

本研究以四川盆地紫色土坡耕地为研究对象,通过室内模拟降雨试验,对 5 种坡度(5°、10°、15°、20°和 25°)条件下耕作侵蚀对水蚀的影响过程展开研究,探究耕作侵蚀作用下,不同坡度对坡面产流过程、产沙过程的影响程度,并查明紫色土受耕作侵蚀严重的坡面水力学特征随坡度的变化规律,研究结果有助于推进不同地形条件下耕作侵蚀和水蚀关系的探索,也可改进川中丘陵地区土壤抗蚀能力、提高紫色土生产力提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

人工降雨试验用土于 2019 年 3 月份采自四川省雅安市名山区前进乡清河村(103°2'40"~103°24'01"E,29°57'36"~30°16'15"N),该区地处成都平原西南边缘,四川盆地与青藏高原过渡地带。气候属亚热带季风性湿润气候,终年温暖湿润。年均气温 15.4℃,年均降雨量 1500 mm,年均无霜期 298 d,年均日照 1018 h。土壤母质主要是第四纪和白垩纪等地层的紫色岩石风化的坡积物、近代河流冲积物等。土壤 PH 呈中性到微碱性,结构性差、抗蚀性较弱,在耕作和降雨条件下易于侵蚀。研究区属于紫色土主要分布区域之一,坡耕地分布广泛、降雨丰富、地形起伏大,所选土壤具有良好代表性。

土壤采集深度 40 cm,按照国际制进行土壤颗粒组成划分,其中土壤砂粒(2~0.02 mm)、粉粒

(0.02~0.002 mm)与粘粒(<0.002 mm)含量分别为 29.05%、28.33% 和 42.62%,属于粘土。土壤容重为 1.44 g·cm<sup>-3</sup>,有机质含量 10.71 g·kg<sup>-1</sup>。装填试验土槽前首先将野外采集的土样在室内铺平、晾干,去除根系、石块等杂物,随后将土块粉碎通过 10 mm 筛。试验土壤处理完后在变坡土槽底部铺上一层透水板,透水板底部每隔 1 cm 设有直径 1 cm 的透水孔,板的上方铺有一层棉纱布,保证变坡土槽的透水性,又防止土粒从透水板上渗漏下去,土槽填土深度为 40 cm。填土部分结束后,开始正式降雨工作。

降雨设备为南京南林电子科技有限公司生产的井架式人工模拟降雨系统(NLJY-10-03),降雨均匀度系数大于 86%,雨强连续变化范围 30~150 mm·h<sup>-1</sup>。试验区有效降雨面积 10 m×6 m。试验土槽为长 5 m、宽 2 m、深 0.45 m 的液压升降土槽,坡度范围为 0°~30°。

### 1.2 试验设计

研究已证实耕作侵蚀最显著特征是上坡土层不断变薄,直至母岩裸露<sup>[10]</sup>。基于此,本试验在变坡土槽上坡 1 m 处土壤表面铺设花胶纸,用于模拟发生了耕作侵蚀的坡面<sup>[9]</sup>,作为试验组(TE)。将上坡不做任何措施的坡面作为对照组(CG)(图 1)。利用耕作侵蚀速率公式<sup>[11]</sup>和土壤损失量计算耕作次数,耕作侵蚀速率可通过下式进行计算:

$$R_t = \frac{10DB(k_1 + k_2 S_1)}{L} \quad (1)$$

式中, $R_t$ 为单次耕作侵蚀速率(t·ha<sup>-1</sup>); $D$ 为耕作深度(m); $B$ 为土壤容重(kg·m<sup>-3</sup>); $k_1$ 和 $k_2$ 为单次土壤传输系数(kg·m<sup>-1</sup>),根据张建辉等<sup>[11]</sup>在简阳测定得 $k_1$ 和 $k_2$ 分别为 0.1066 和



注:TE 为试验组,CG 为对照组。

图 1 变坡土槽内试验设计

Fig. 1 Experimental design in the slope adjustable soil pan

0.4902;  $S_1$  为坡度 ( $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ );  $L$  为坡长 ( $\text{m}$ )。

耕作次数可通过下式进行计算:

$$T = \frac{S_L}{R_T} \quad (2)$$

式中,  $T$  为耕作次数;  $S_L$  为土壤损失速率 ( $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ )。

通过公式(1)、(2)可以计算不同土层厚度所代表的实际耕作次数,根据数据得出,在紫色土坡耕地连续耕作 42 次即可造成上坡 40 cm 土壤全部流失。若每年耕作一次,连续 42 年即可导致坡耕地上坡基岩裸露。

### 1.3 降雨模拟与样品采集

试验过程分为前期降雨和后期样品处理两部分。为了保证试验前土壤含水量接近一致,每次降雨前需进行预降雨。土壤含水量采用便携式土壤水分测定仪测量,本试验控制土壤含水量保持在 25% ~ 30%, 目的在于消除土壤初始含水量对试验结果的影响<sup>[12]</sup>。整场降雨持续 60 min, 降雨强度为  $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。降雨初期记录地表径流初始产流时间,随后每隔 2 min 用体积为 10 L 的白水桶接取 20 s 水样,静置 2 h 后将上清液倒出,剩余泥沙样品转入 500 mL 铝盒,放入 105 °C 烘箱烘至恒重,称重并记录。流速的测量采用染色剂法。

### 1.4 水力学参数计算

(1) 产沙速率计算:

$$S = \frac{m_s}{t} \quad (3)$$

式中,  $S$  为产沙速率 ( $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ );  $t$  为接取样品所用时间 ( $\text{min}$ );  $m_s$  为  $t$  时段接取的泥沙质量 ( $\text{g}$ )。

(2) 产流速率计算:

$$V_c = \frac{Q_R}{t} \quad (4)$$

式中,  $V_c$  为产流速率 ( $\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $Q_R$  为  $t$  时段接取的径流量 ( $\text{mL}$ )。

(3) 水力半径计算:

$$R = \frac{B_1 h}{B_1 + 2h} \quad (5)$$

式中,  $R$  为水力半径 ( $\text{m}$ ), 水力半径指输水断面过流面积与湿周的比值;  $h$  为坡面平均径流深 ( $\text{m}$ );  $B_1$  为过水断面宽度 ( $\text{m}$ )。

(4) 雷诺数计算:

$$Re = \frac{VR}{v} \quad (6)$$

式中,  $Re$  为雷诺数, 雷诺数是一种可用来表征流体流动情况的无量纲数,  $Re < 500$  为层流,  $500 \leq Re < 2000$  为过渡流,  $Re > 2000$  为紊流;  $V$  为平均流速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $v$  为水流运动粘滞系数 ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )。

(5) 弗劳德数计算:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (7)$$

式中,  $Fr$  为弗劳德数, 弗劳德数是一种可用来表征流体动态的无量纲数,  $Fr < 1$  时为缓流,  $Fr = 1$  时为临界流,  $Fr > 1$  时为急流;  $g$  为重力加速度, 取  $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

(6) 阻力系数计算:

$$f = \frac{8gRJ}{V^2} \quad (8)$$

式中,  $f$  为阻力系数, 阻力系数是一种可用来表征流体流动所受阻力大小的参数;  $J$  为水力坡度, 一般以  $\sin\beta$  代替,  $\beta$  为坡度 ( $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ )。

### 1.5 数据处理

本文利用 SPSS 23 中 Kolmogorov - Smirnov 检验进行正态检验, 若符合正态分布, 则两组间采用配对样本 T 检验比较, 多组间两两采用 LSD 检验比较; 若不符合正态分布, 两组间采用 Mann-Whitney U 检验比较, 多组间两两采用 Dunnett's T3 检验比较<sup>[13]</sup>。本文显著性水平设置为  $P < 0.05$  为显著差异,  $P < 0.01$  为极显著差异。采用 SigmaPlot 14.0 软件绘图。

## 2 试验结果

### 2.1 耕作侵蚀对不同坡度坡面产流的影响

不同坡度条件下, 坡面初始产流时间如图 2 所示。当坡度为 5°、10°、15°、20° 和 25° 时, TE 初始产流时间分别为 111、80、56、47、21 s, CG 初始产流时间分别为 113、88、67、62、49 s。对于 TE 和 CG, 当坡度增大时, 两组初始产流时间均不断提前, 当坡度从 5° 逐渐增加到 25° 时, TE 初始产流时间较 CG 分别减少了 2、8、11、15 和 28 s, 减少比例分别为 1.60%、9.52%、16.96%、24.27% 和 57.32%。由此可见, 耕作侵蚀导致坡面初始产流时间提前, 并且随着坡度增加, 耕作侵蚀对坡面初始产流时间的影响不断增大。

不同坡度下坡面产流速率随降雨历时变化过程

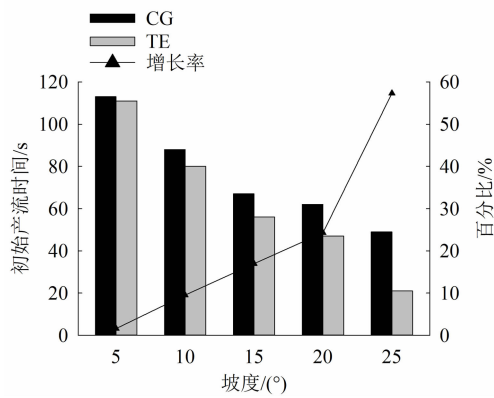


图 2 不同坡度坡面初始产流时间

Fig. 2 Initial runoff time with different slope gradients

如图 3 所示。整体上看,TE 和 CG 降雨初期产流速率快速增大,随后逐渐趋于稳定。同一坡度下,TE 的平均产流速率整体上大于 CG ( $P < 0.01$ ),且增长百分比随着坡度的增加而减小,当坡度由 5° 增加到

25°,TE 平均产流速率较 CG 增加了 4.45%、3.69%、3.87%、2.45% 和 1.95%,这表明耕作侵蚀导致的土层变薄促使坡面产流速率增大,耕作侵蚀对坡面产流速率的影响随坡度增加而减小。当坡度升高时,CG 和 TE 平均产流速率不断减小,TE 25°、20°、15°、10° 坡面平均径流率分别较 5° 减小了 0.82%、3.05%、6.33% 和 8.14%,CG 25°、20°、15°、10° 坡面平均径流率分别较 5° 减小了 0.09%、2.50%、4.50% 和 5.89%。将累计产流量与降雨历时进行回归分析,拟合结果见表 1,结果显示两种坡面各坡度下累计径流量均随着降雨历时的增加而不断增大,且呈幂函数增长趋势,拟合效果良好。

## 2.2 耕作侵蚀对不同坡度坡面产沙的影响

不同坡度下坡面产沙速率随降雨历时变化过程如图 4 所示。整体上看,TE 和 CG 在降雨初期产沙速率均快速增加,达到峰值后逐渐下降。TE 10° ~

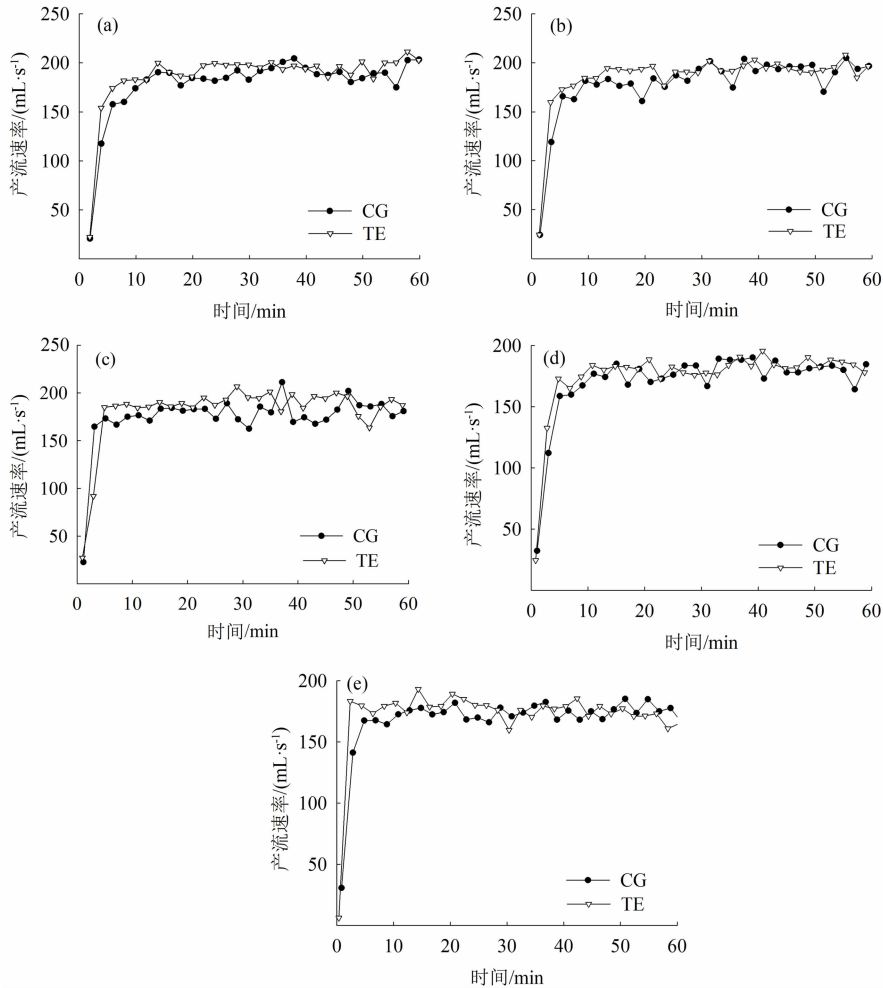


图 3 不同坡度产流速率随降雨历时变化:(a) 5°; (b) 10°; (c) 15°; (d) 20°; (e) 25°

Fig. 3 Variations of runoff rate with rainfall duration on different slope gradients:(a) 5°; (b) 10°; (c) 15°; (d) 20°; (e) 25°

表 1 不同坡度累计产流量与降雨历时相关关系

Tab. 1 Correlation between cumulative runoff and rainfall duration under different slope gradients

坡面类型	坡度/(°)	函数表达式	$R^2$	$P$
TE	5	$Y = 490.413X^{1.368}$	0.966	<0.001
	10	$Y = 691.361X^{1.275}$	0.979	<0.001
	15	$Y = 775.450X^{1.239}$	0.993	<0.001
	20	$Y = 923.318X^{1.182}$	0.994	<0.001
	25	$Y = 927.076X^{1.194}$	0.978	<0.001
CG	5	$Y = 395.931X^{1.411}$	0.972	<0.001
	10	$Y = 547.277X^{1.323}$	0.983	<0.001
	15	$Y = 777.332X^{1.230}$	0.981	<0.001
	20	$Y = 804.254X^{1.209}$	0.996	<0.001
	25	$Y = 1026.254X^{1.142}$	0.996	<0.001

注:  $X$  为降雨历时 (min);  $Y$  为累计径流量 (mL); TE 为试验组, CG 为对照组。

25°坡面平均产沙速率分别是 5°坡面的 7.01、9.49、10.26、11.54 倍, CG 10°~25°坡面平均产沙速率分别是 5°坡面的 5.51、6.08、7.66、10.49 倍, 可以得出两组产沙速率均随着坡度的增加而增大, 并都在 5°~10°发生剧增, TE 平均产沙速率增长速率在 10°~25°时逐渐变缓, CG 平均产沙速率在 10°~20°时平缓增长, 20°~25°时剧烈增加。经显著性检验得到 TE 平均产沙速率显著大于 CG ( $P < 0.05$ ), TE 平均产沙速率在 5°、10°、15°、20°、25°时分别为 CG 的 1.18、1.50、1.84、1.58、1.30 倍, 表明耕作侵蚀对坡面平均产沙速率的影响随坡度升高呈先增加后减小的趋势, 在 15°时增长比例最大。

不同坡面累计产沙量随坡度的变化如图 5 所示。由图可知两组累计产沙量均随着坡度的增加而增加, TE 的累计产沙量总是大于 CG。TE 累计产沙

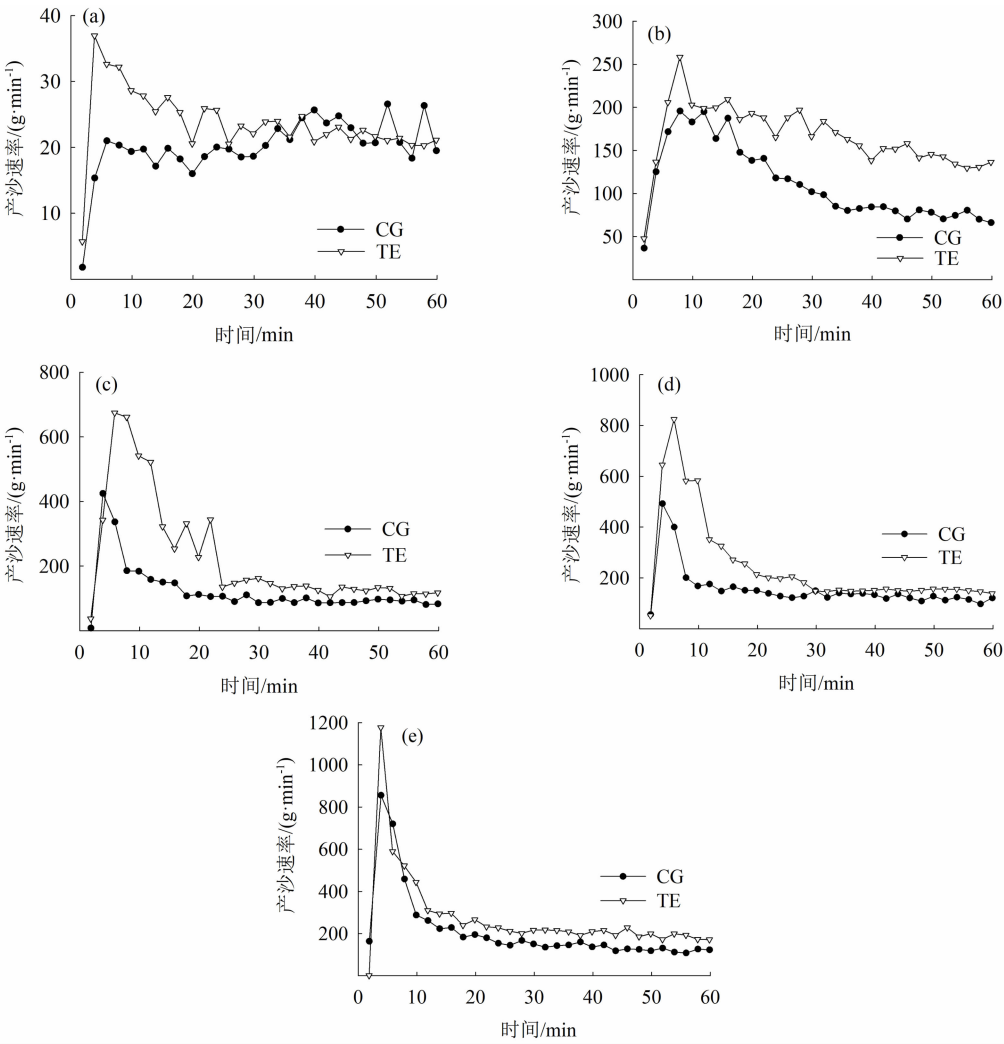


图 4 不同坡度产沙速率随降雨历时变化: (a) 5°; (b) 10°; (c) 15°; (d) 20°; (e) 25°

Fig. 4 Variations of sediment yield rate with rainfall duration on different slope gradients: (a) 5°; (b) 10°; (c) 15°; (d) 20°; (e) 25°

量在 5°、10°、15°、20°和 25°时较 CG 分别增长了 17.73%、49.91%、83.95%、57.70%和 29.56%，表明耕作对坡面累计产沙量的影响随着坡度的变化而变化，增长百分比表现为随着坡度先增加后减小，并在 15°时达到最大值。

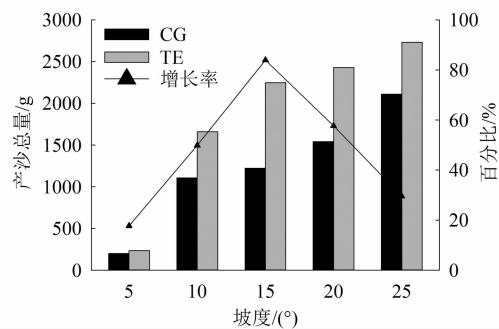


图5 不同坡度坡面累计产沙量

Fig. 5 Cumulative sediment yield with different slope gradients

2.3 耕作侵蚀和坡度对坡面水力学特性的影响

不同坡度下坡面水力学参数详见表 2。TE 和 CG 坡面径流平均流速均随着坡度的增加而增加，TE 10°~25°区间内相邻两坡度径流平均流速增加不显著，CG 径流平均流速随坡度增加显著 ( $P < 0.05$ )。受耕作侵蚀严重的坡面径流平均流速在 10°~20°显著增加 ( $P < 0.05$ )，TE 5°、10°、15°、20°和 25°坡面径流平均流速分别比 CG 增加了 14.72%、45.98%、36.31%、28.52%和 20.00%。

CG 和 TE 雷诺数均随着坡度的增加而减小，TE 雷诺数随着坡度的增加显著减小 ( $P < 0.05$ )，CG 5°~10°雷诺数减小不显著，10°~25°雷诺数显著减小 ( $P < 0.05$ )。当坡度一定时，TE 雷诺数显著大于 CG ( $P < 0.05$ )。由  $Re < 500$  可知本试验条件下水流均为层流，相对于紊流，层流紊动程度更低，流体运动更规则。

TE 和 CG 坡面弗劳德数均随着坡度的增加而增大，TE 相邻两坡度弗劳德数增加不显著，CG 弗劳德数随坡度显著增加 ( $P < 0.05$ )。TE 坡面除了 5°和 25°外，其余坡度弗劳德数均显著增加 ( $P < 0.05$ )，TE 5°、10°、15°、20°和 25°坡面弗劳德数分别比 CG 增加了 20.22%、73.17%、56.11%、43.82%和 29.85%。由  $Fr > 1$  可知 TE 从 15°开始水流由缓流转为急流，CG 则从 20°流态发生变化。TE 和 CG 阻力系数均随着坡度的增加而减小，且两种坡面在 10°~25°阻力系数较 5°均显著减小 ( $P < 0.05$ )，在 5°和 25°差异不明显，TE 坡面在 10°、15°和 20°阻力系数显著小于 CG 坡面 ( $P < 0.05$ )。

将每场降雨的平均产沙速率和平均水力学参数进行拟合，详见图 6。整体上看，产沙速率和流速、弗劳德数呈显著正相关关系 ( $P < 0.01$ )，产沙速率和阻力系数呈显著负相关关系 ( $P < 0.01$ )，产沙速率与雷诺数相关性不明显。根据拟合效果  $R^2$  来看， $f > V > Fr > Re$ 。根据表 3 Pearson 相关性分析发现

表2 不同坡度水力学参数

Tab. 2 Hydraulic parameter with different slope gradients

坡面类型	坡度/(°)	平均流速/(m·s <sup>-1</sup> )	雷诺数	弗劳德数	阻力系数
TE	5	0.053 ± 0.006dA	104.612 ± 0.020aA	0.405 ± 0.069dA	4.468 ± 1.353aA
	10	0.096 ± 0.015cA	103.836 ± 0.018bA	0.987 ± 0.232cdA	1.618 ± 0.859bA
	15	0.122 ± 0.007bcA	101.526 ± 0.004cA	1.434 ± 0.121bcA	1.021 ± 0.177bA
	20	0.149 ± 0.012abA	98.102 ± 0.004dA	1.976 ± 0.241abA	0.720 ± 0.160bA
	25	0.167 ± 0.035aA	96.217 ± 0.010eA	2.372 ± 0.745aA	0.722 ± 0.403bA
CG	5	0.046 ± 0.010eA	100.129 ± 0.039aB	0.34 ± 0.112eA	7.212 ± 3.649aA
	10	0.065 ± 0.003dB	100.104 ± 0.007aB	0.567 ± 0.041dB	4.370 ± 0.656abB
	15	0.090 ± 0.001cB	97.721 ± 0.001bB	0.918 ± 0.017cB	2.457 ± 0.089bcB
	20	0.116 ± 0.007bB	95.743 ± 0.004cB	1.372 ± 0.119bB	1.475 ± 0.257bcB
	25	0.139 ± 0.009aA	94.366 ± 0.004dB	1.804 ± 0.178aA	1.059 ± 0.210cA

注：不同小写字母表示相同坡面类型不同坡度水力学参数间差异显著 ( $P < 0.05$ )；不同大写字母表示同一坡度不同坡面类型水力学参数间差异显著 ( $P < 0.05$ )。



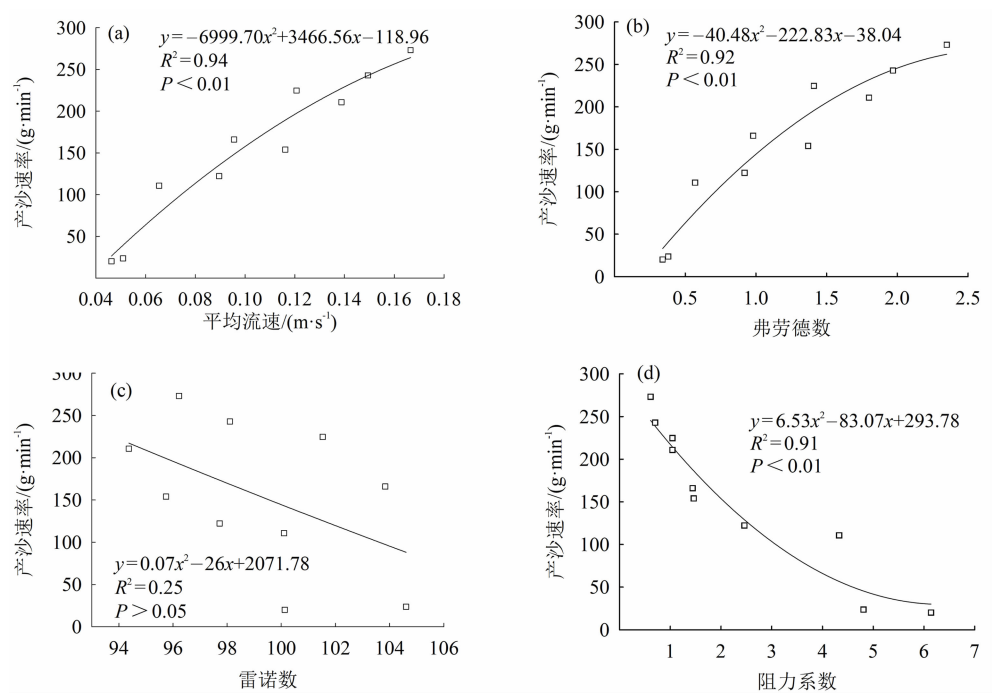


图6 不同坡面产沙速率和水力学参数拟合:(a) 平均流速;(b) 弗劳德数;(c) 雷诺数;(d) 阻力系数

Fig. 6 Fitting of sediment yield rate and hydraulic parameter on different slopes:  
(a) average flow velocity; (b) Froude number; (c) Reynolds number; (d) resistance coefficient

表3 Pearson 相关性分析  
Tab. 3 Pearson correlation analysis

参数	TE					CG				
	<i>Dr</i>	<i>Re</i>	<i>Fr</i>	<i>f</i>	<i>V</i>	<i>Dr</i>	<i>Re</i>	<i>Fr</i>	<i>f</i>	<i>V</i>
<i>Dr</i>	1	-0.874	0.957 *	-0.967 **	0.980 **	1	-0.895 *	0.952 *	-0.940 *	0.960 **
<i>Re</i>		1	-0.977 **	0.740	-0.953 *		1	-0.986 **	0.930 *	-0.984 **
<i>Fr</i>			1	-0.863	0.995 **			1	-0.940 *	0.997 **
<i>f</i>				1	-0.907 *				1	-0.964 **
<i>V</i>					1					1

注:\*\*表示在0.01级别相关性显著,\*表示在0.05级别相关性显著;*Dr*为单位面积侵蚀率( $\text{g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )。

CG和TE不同坡度坡面单位面积侵蚀率与平均流速相关性最好,且平均流速与其余参数相关性较高。由此看出,本试验流速可以很好地预测紫色土坡面产沙速率和水力学变化趋势。

3 讨论

3.1 耕作侵蚀对水力侵蚀的影响

根据耕作侵蚀造成坡耕地上坡土层不断变薄的特性,本研究通过上坡基岩裸露来模拟强烈耕作侵

蚀,结果显示受耕作侵蚀严重的坡面更易产流,坡面汇流量更大,这是因为土层变薄导致水分入渗<sup>[14-15]</sup>、土壤水贮量显著降低<sup>[16]</sup>所致。随着降雨历时的推移,产沙速率呈先快速增加、后逐渐减小的趋势,这是因为降雨初期坡面侵蚀主要是雨滴直接打击坡面薄层水流和土壤表面,导致土粒分散所致,加之表层土壤大颗粒稳定性较差,易被冲刷。而在降雨后期,坡面侵蚀力逐渐稳定,因此产沙速率逐渐降低<sup>[17]</sup>。

在耕作侵蚀的作用下,上坡基岩光滑的表面更

利于坡面产汇流的形成,导致坡面更早的由溅蚀、面蚀转为细沟侵蚀,加快坡面侵蚀进程,导致平均产沙速率增大,因此 TE 累计产沙量在各个坡度下均大于 CG。图 7 为 15°坡面降雨后地表微地貌变化,从图中亦可以看出受耕作侵蚀严重的坡面在降雨后出现两条极为明显的细沟,说明在降雨条件下受耕作侵蚀严重的坡面相较于对照坡面细沟发育更为严重。分析数据可知 TE 累计产沙量较 CG 增加比例随坡度呈先增加后减小的趋势,在 15°达到最大值,这是由于 15°时耕作侵蚀导致弗劳德数  $Fr > 1$ ,坡面水流由缓流变为急流,侵蚀急剧增加。贾立志等<sup>[18]</sup>与 Wang 等<sup>[9]</sup>均通过试验证实了耕作侵蚀会加剧坡面水蚀的发生。戴佳栋等<sup>[7]</sup>通过对金沙江干热河谷地区坡耕地进行放水冲刷试验得出雷诺数相较于弗劳德数、阻力系数和剪切力可以更好的描述耕作侵蚀作用下坡面水力侵蚀状态。这与本研究结果不同,究其原因可能是因为戴佳栋等<sup>[7]</sup>的试验条件为野外放水冲刷,且径流属于紊流状态,雷诺数的变化对坡面影响较大所致。

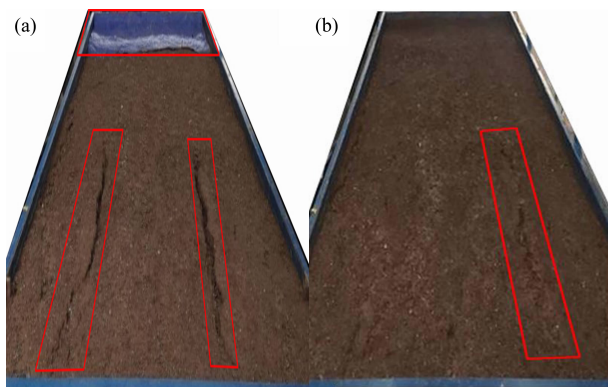


图 7 15°坡面降雨后地表微地貌变化:(a) TE; (b) CG

Fig. 7 Changes of surface micro-topography on 15°slope after rainfall:(a) TE; (b) CG

### 3.2 耕作侵蚀作用下坡度对水力侵蚀的影响

坡度增大会加剧水力侵蚀的作用。雨滴击溅和径流冲刷是坡面侵蚀发生的两大主要因素<sup>[19]</sup>。坡度增大会改变雨滴击打坡面的角度,导致土壤颗粒之间更容易被分离、分散,破坏土壤结构,增加径流紊动性,进而溅蚀强度增大<sup>[20]</sup>。随着坡度不断增大,水流在重力方向的分力不断增大,径流流速增大,径流动能更大,冲刷力更强,这必将引起中下坡侵蚀量增大<sup>[21]</sup>。由于坡面的不平整性,径流不断向

低洼处汇集,当细辫状径流不断冲刷坡面,细沟出现,侵蚀量相对于面蚀急剧增加。当坡度由 5°增加到 10°时,TE 累计产沙量发生突变,这是由于 5°坡面侵蚀类型以溅蚀、面蚀为主,侵蚀量较小,随着坡度不断增大,侵蚀冲刷力相对增强<sup>[22]</sup>,径流动能增大,紊动性增加,导致流速、弗劳德数、阻力系数均急剧变化。同时坡面细沟发育更深、更长、更宽,导致坡面侵蚀量不断增大,因此 25°时坡面侵蚀产沙最严重。

受耕作侵蚀强烈的土壤坡面水文过程随着坡度变化变得更加复杂<sup>[23]</sup>。通过数据对比分析发现,在耕作侵蚀的影响下,地表径流随坡度增加更早出现,这是由于耕作侵蚀导致上坡土层变薄,入渗降低,加之坡度增大进一步延缓了坡面入渗进程所致。从水力学特征角度分析 TE 累计产沙量随坡度增加而不断增大的原因,主要为坡度增大使得水流沿重力方向分力增大,以及耕作侵蚀造成坡面入渗能力降低、径流量增大,二者共同导致径流平均流速增大,导致弗劳德数增大<sup>[24]</sup>,阻力系数减小。地表径流沿坡面梯度方向产生的冲刷力增强,使得土壤颗粒在较大径流冲刷下更容易分散、冲刷,同时进一步减小土壤颗粒对水流的阻滞作用,径流搬运土粒所受阻力减小,土壤侵蚀越严重。TE 和 CG 累计产沙量在 5°~10°均急剧增加,和 TE 不同的是,CG 在 20°~25°又发生一次剧增,这主要是由于坡度增加的同时削弱了耕作侵蚀对土壤入渗的影响<sup>[25]</sup>,使得在坡度较大时两组产沙量差距逐渐缩小。田培等<sup>[26]</sup>通过降雨试验发现阻力系数随坡度增加不断减小,流速可以很好地预测坡面产沙率,这与本文的结论一致。本研究存在坡度升高、产流量略微减小的现象,这与郭军权等<sup>[27]</sup>的研究结果不同,这可能是因为郭军权等<sup>[27]</sup>的研究为放水冲刷试验,坡面来水量不受坡度的影响所致。

## 4 结论

(1)耕作侵蚀导致坡面在降雨条件下侵蚀产沙量显著增大( $P < 0.05$ ),并且随坡度增大呈先增加后减小的趋势,在 15°达到峰值。受耕作侵蚀严重的坡面累计产沙量在 5°、10°、15°、20°和 25°较对照坡面分别增加了 17.73%、49.91%、84.00%、57.70%、29.56%,表明坡度对耕作侵蚀与水蚀复



合侵蚀影响显著,15°可能是耕作-水复合侵蚀坡面的一个临界坡度。

(2)坡面平均流速和弗劳德数随着坡度增加而增加,阻力系数和雷诺数随着坡度增加呈减小趋势,各坡度条件下水流流态均为层流,受耕作侵蚀严重的坡面、对照坡面分别从15°、20°开始径流由缓流转为急流。耕作侵蚀会显著影响坡面水力学参数,流速、弗劳德数和雷诺数在耕作侵蚀作用下显著增加( $P < 0.05$ ),阻力系数在10°~20°会显著减小( $P < 0.05$ )。

(3)通过产沙速率与水力学参数拟合发现,产沙速率和流速、弗劳德数均呈显著正相关关系( $P < 0.01$ ),产沙速率和阻力系数呈显著负相关关系( $P < 0.01$ ),产沙速率与雷诺数相关性不明显( $P > 0.05$ )。且由拟合可决系数和Pearson相关性分析发现,流速可以很好地预测坡面产沙速率和水力学变化趋势。

## 参考文献 (References)

- [1] ZHANG Jianhui, NI Shijun, SU Zheng'an. Dual roles of tillage erosion in lateral SOC movement in the landscape [J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, **63**(2):165-176. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2012.01432.x
- [2] 苏正安, 张建辉, 聂小军. 紫色土坡耕地土壤物理性质空间变异对土壤侵蚀的响应[J]. *农业工程学报*, 2009, **25**(5):54-60. [SU Zheng'an, ZHANG Jianhui, NIE Xiaojun. Response of spatial variability of soil physical properties to soil erosion in purple soil slope farmland [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, **25**(5):54-60] DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.05.010
- [3] XU Haichao, ZHANG Jianhui, WEI Yuhang, et al. Bedrock erosion due to hoeing as tillage technique in a hilly agricultural landscape, southwest China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, **45**(6):1418-1429. DOI: 10.1002/esp.4813
- [4] WILKEN F, KETTERER M, KOSZINSKI S, et al. Understanding the role of water and tillage erosion from <sup>239+240</sup>Pu tracer measurements using inverse modelling [J]. *Soil*, 2020, **6**(2):549-564. DOI: 10.5194/soil-6-549-2020
- [5] WANG Yong, ZHANG Zehong, ZHANG Jianhui, et al. Effect of surface rills on soil redistribution by tillage erosion on a steep hillslope [J]. *Geomorphology*, 2021, **380**:107637. DOI: 10.1016/j.geomorph.2021.107637
- [6] 殷爽, 李毅然, 李露, 等. 黑土团聚体有机碳对耕作与水蚀的响应差异[J]. *中国水土保持科学*, 2020, **18**(3):67-73. [YIN Shuang, LI Yiran, LI Lu, et al. Different responses of aggregates-associated organic carbon to tillage and water erosion in the black soil region [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, **18**(3):67-73] DOI: 10.16843/j.sswc.2020.03.008
- [7] 戴佳栋, 张泽洪, 张建辉, 等. 干热河谷区耕作侵蚀作用下坡面水力侵蚀特性[J]. *水土保持学报*, 2021, **35**(1):116-124+131. [DAI Jiadong, ZHANG Zehong, ZHANG Jianhui, et al. Effect of tillage erosion on characteristics of hydraulic erosion in the dry-hot valley region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, **35**(1):116-124+131] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.01.017
- [8] WANG Linhua, DALABAY N, LU Pei, et al. Effects of tillage practices and slope on runoff and erosion of soil from the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, **166**:147-156. DOI: 10.1016/j.still.2016.09.007
- [9] WANG Yong, ZHANG Jianhui, ZHANG Zehong, et al. Impact of tillage erosion on water erosion in a hilly landscape [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **551-552**:522-532. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.045
- [10] PROKOP P, KRUCZKOWSKA B, SYIEMLIH H J, et al. Impact of topography and sedentary swidden cultivation on soils in the hilly uplands of North-East India [J]. *Land Degradation and Development*, 2018, **29**(8):2760-2770. DOI: 10.1002/ldr.3018
- [11] ZHANG Jianhui, LOBB D A, LI Yong, et al. Assessment of tillage translocation and tillage erosion by hoeing on the steep land in hilly areas of Sichuan, China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, **75**(2):99-107. DOI: 10.1016/j.still.2003.08.003
- [12] 姜义亮, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 降雨和汇流对黑土区坡面土壤侵蚀的影响试验研究[J]. *生态学报*, 2017, **37**(24):8207-8215. [JIANG Yiliang, ZHENG Fenli, WEN Leilei, et al. An experimental study on the impacts of rainfall and inflow on hillslope soil erosion in typical black soil regions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(24):8207-8215] DOI: 10.5846/stxb201611032241
- [13] 张智勇, 艾宁, 刘广全, 等. 陕北黄土区退耕还林(草)地土壤质量特征及其对降水的响应[J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(24):73-80. [ZHANG Zhiyong, AI Ning, LIU Guangquan, et al. Soil quality characteristics of forests and grasslands returned from farmland and their responses to precipitation in the Loess Region of northern Shaanxi, China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(24):73-80] DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.24.009
- [14] 苏正安, 张建辉. 耕作导致的土壤再分布对土壤水分入渗的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(3):194-198. [SU Zheng'an, ZHANG Jianhui. Impacts of soil redistribution by tillage on soil water infiltration [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(3):194-198] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2010.03.036
- [15] ZHANG Jianhui, JIA Lizhi, WANG Yong, et al. Tillage erosion

- effect on soil hydrological properties in a hilly landscape [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2017, **22**(9):04017034. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001565
- [16] 王勇, 张建辉, 李富程. 耕作侵蚀对坡耕地土壤水稳定性团聚体和水分特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, **29**(1):180-185. [WANG Yong, ZHANG Jianhui, LI Fucheng. Tillage erosion influences on soil water-stable aggregate and moisture properties on the hillslope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, **29**(1):180-185] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2015.01.036.
- [17] 袁和第, 信忠保, 蒋秋玲, 等. 连续降雨作用下褐土坡面侵蚀及其水动力学特征[J]. *水土保持学报*, 2020, **34**(4):14-20+30. [YUAN Hedi, XIN Zhongbao, JIANG Qiuling, et al. Slope erosion and its hydrodynamic characteristic of cinnamon soil under continuous rainfall [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34**(4):14-20+30] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.04.003
- [18] 贾立志, 张泽洪. 不同逆坡耕作强度对于热河谷区坡耕地水蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, **34**(3):14-19+27. [JIA Lizhi, ZHANG Zehong. Effect of different upslope tillage intensity on water erosion on sloping farmland in the dry-hot valley of Jinsha River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34**(3):14-19+27] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.03.003
- [19] 张光辉. 对土壤侵蚀研究的几点思考[J]. *水土保持学报*, 2020, **34**(4):21-30. [ZHANG Guanghui. Several ideas related to soil erosion research [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34**(4):21-30] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.04.004
- [20] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀特征的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, **46**(8):104-112+89. [SHEN Haiou, ZHENG Fenli, WEN Leilei, et al. Effects of raindrop impact on rill erosion characteristics on loess hillslope [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, **46**(8):104-112+89] DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.016
- [21] ZHANG Xunchang. Determining and modeling dominant processes of interrill soil erosion [J]. *Water Resources Research*, 2019, **55**(1):4-20. DOI: 10.1029/2018WR023217
- [22] 陈晓安, 蔡强国, 张利超, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度[J]. *山地学报*, 2010, **28**(4):415-421. [CHEN Xiaon, CAI Qiangguo, ZHANG Lichao, et al. Research on critical slope of soil erosion in a hilly loess region on the Loess Plateau [J]. *Mountain Research*, 2010, **28**(4):415-421] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2010.04.013
- [23] DAI Jiadong, ZHANG Jianhui, ZHANG Zehong, et al. Effects of water discharge rate and slope gradient on runoff and sediment yield related to tillage erosion [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2020: 1766676. DOI: 10.1080/03650340.2020.1766676
- [24] 丁文峰, 李亚龙, 王一峰, 等. 人工模拟降雨条件下紫色土坡面流水动力学参数特征[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(2):66-69. [DING Wenfeng, LI Yalong, WANG Yifeng, et al. Study on runoff hydrodynamics of purple soil slope under the rainfall simulation experiment [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(2):66-69] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2010.02.024
- [25] 卫喜国, 严昌荣, 魏永霞, 等. 坡度和降雨强度对坡耕地入渗的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2009, **28**(4):114-116. [WEI Xiguo, YAN Changrong, WEI Yongxia, et al. Influence of slope gradient and rainfall intensity on infiltration in sloping farm land [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, **28**(4):114-116] DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2009.04.024
- [26] 田培, 仇浩然, 冯宇, 等. 雨强和坡度对红壤坡面产流产沙及侵蚀动力过程影响[J]. *水土保持研究*, 2020, **27**(6):1-8. [TIAN Pei, QIU Haoran, FENG Yu, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment production and erosion dynamic process on red soil slope [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, **27**(6):1-8] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.20200611.001
- [27] 郭军权, 王文龙. 坡度对浅沟侵蚀产沙的野外放水冲刷试验影响[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(4):87-92+212. [GUO Junquan, WANG Wenlong. Experimental study on the effects of field scouring slope on ephemeral gully erosion and sediment yield [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(4):87-92+212] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.04.013

## Effects of Tillage Erosion on Sediment Yield of Purple Soil under Different Slopes

HOU Ning<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>2\*</sup>, ZHAO Hu<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoling<sup>1</sup>, LIANG Xinlan<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** The purple soil in the hilly area of central Sichuan basin of China is seriously affected by the interaction of long-term tillage erosion and water erosion, and the internal mechanism of the interaction between the two erosions and the variation law of hydraulic parameters with slope under different topographic conditions is still unclear. In this study, purple soil in the Sichuan Basin was selected as the research object. Two test plots of 10 m<sup>2</sup> in the rainfall simulation laboratory, one with bare bedrock areas of 2 m<sup>2</sup> in the summit positions and the other with no bedrock exposure were chosen for tillage erosion (TE) and the control group (CG) respectively. Five different slope gradients (5°, 10°, 15°, 20° and 25°) were designed to perform rainfall simulation experiments with 90 mm · h<sup>-1</sup> rainfall intensity for 60 minutes. The results show that: (1) Compared with CG, as the slope gradually increased from 5° to 25°, TE cumulative sediment yield increased by 17.73%, 49.91%, 83.95%, 57.70% and 29.56%, with the growth rate being the largest at 15°. (2) For TE and CG, the average flow velocity and Froude number increased with an increase in slope gradient, whereas resistance coefficient and Reynolds number gradually decreased with an increase in slope gradient. Compared with CG, TE flow velocity, Froude number, and Reynolds number increased significantly, yet the resistance coefficient decreased significantly for slope gradients ranging from 10° to 20°. (3) Sediment yield rate was positively correlated with flow velocity and Froude number, but it was negatively correlated with resistance coefficient. There was no significant correlation between sediment yield rate and Reynolds number. The fitting results indicate that the average flow velocity could well predict sediment yield rate and the trend of hydraulics. The findings confirmed that tillage erosion would aggravate the occurrence of water erosion. Observation also suggested that 15° was the critical slope gradient of sediment yield under tillage- water joint erosion. This study not only supports the theory of the effect of tillage erosion on water erosion, but also provides a scientific basis for prevention and control of soil erosion in hilly purple soil areas in the central Sichuan basin.

**Key words:** purple soil; slope gradient; rainfall simulation; runoff and sediment yield; hydraulic parameter; the Sichuan Basin