DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.011 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.011
吴文福, 张泽洪. 西南干旱河谷区农作物种植环境下耕作侵蚀对水蚀的影响[J]. 水土保持研究,2026,33(6):30-39.
Wu Wenfu, Zhang Zehong. Impact of tillage erosion on hydraulic erosion under crop cultivation conditions in arid valley region of Southwest China[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):30-39.

西南干旱河谷区农作物种植环境下耕作侵蚀对水蚀的影响

吴文福, 张泽洪
(西华师范大学 地理科学学院, 四川 南充 637009)

摘 要:[目的]研究农作物种植对坡耕地耕作侵蚀及水力侵蚀的影响机制,为该区坡耕地水土流失治理和生态修复提供对策和建议。[方法]以四川省凉山州喜德县干旱河谷坡耕地为研究对象,通过模拟耕作与冲刷试验,结合磁性示踪法,测定了玉米地、荞麦地和裸地的耕作位移与侵蚀速率,并分析了不同作物类型及流量条件下的产流产沙特征。[结果](1)农作物种植显著降低了土壤耕作位移与侵蚀速率,其中玉米地平均耕作位移(11.82 cm)和侵蚀速率(38.15 t/hm^2)分别仅为裸地(26.38 cm,75.85 t/hm^2)的44.8%和50.3%。(2)作物种植明显延缓坡面产流时间,在10 L/min流量下,玉米地和荞麦地产流时间(30,33 min)较裸地(12 min)延长1.5倍以上。(3)显著降低产流率与产沙率,尤其在中等及低流量(7.5,5 L/min)下减流减沙效果更为突出。[结论]农作物种植在削弱耕作侵蚀和水力侵蚀方面起着关键作用,通过固土增渗作用,增强土壤抗剪强度与入渗能力,减少了松散物源。

关键词:耕作侵蚀; 农作物种植; 干旱河谷区; 水力侵蚀
中图分类号:S157.1; S157.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0030-10

Impact of tillage erosion on hydraulic erosion under crop cultivation conditions in arid valley region of Southwest China

Wu Wenfu, Zhang Zehong
(*School of Geographical Sciences, China West Normal University, Nanchong, Sichuan* 637009, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study aims to investigate the mechanisms by which crop planting affects tillage erosion and hydraulic erosion on sloping farmland, thereby providing countermeasures and recommendations for soil erosion control and ecological restoration of sloping farmland in the region. [**Methods**] Taking the sloping farmland in the arid valley of Xide County, Liangshan Prefecture, Sichuan Province, as the research object, this study conducted simulated tillage and scouring experiments, combined with the magnetic tracer method, to measure tillage displacement and erosion rates in maize fields, buckwheat fields, and bare land and analyzed the characteristics of runoff and sediment yield under different crop types and flow conditions. [**Results**] (1) Crop cultivation significantly reduced soil tillage displacement and erosion rate, and the average tillage displacement (11.82 cm) and erosion rate (38.15 t/hm^2) of maize fields were only 44.8% and 50.3% of those of bare land (26.38 cm and 75.85 t/hm^2), respectively. (2) Crop cultivation markedly delayed slope runoff yield time. At a flow rate of 10 L/min, the runoff yield times of maize and buckwheat fields (30 min and 33 min) were more than 1.5 times longer than that of bare land (12 min). (3) Crop cultivation significantly reduced runoff and sediment yield rates, and the runoff and sediment reduction effects were more pronounced at medium and low flow rates (7.5 L/min and 5 L/min). [**Conclusion**] Crop cultivation plays a crucial role in reducing tillage erosion and

收稿日期:2026-01-16 **修回日期:**2026-02-16 **接受日期:**2026-03-09
资助项目:西华师范大学校级基本科研业务费资金资助"西南干旱河谷区坡耕地土-根复合体对土壤侵蚀的阻控机制研究"(465062)
第一作者:吴文福(2002—),男,四川南充人,硕士研究生,研究方向为坡耕地水土保持。E-mail:3205979095@qq.com
通信作者:张泽洪(1977—),男,四川宜宾人,博士,副教授,主要从事农业生态与土壤质量研究。E-mail:zhangzehong2001@126.com

hydraulic erosion. Crops enhance soil shear strength and infiltration capacity through soil stabilization and enhanced infiltration, thereby reducing loose material sources.

Keywords: tillage erosion; crop cultivation; arid valley region; hydraulic erosion

西南干旱河谷作为我国横断山区的特殊地貌单元,以其独特的“山高谷深”“干旱燥热”的地理气候特征,构成了典型的生态脆弱区与水土流失敏感区。该区域虽仅占西南国土面积的13.5%[1],却是连接山地生态系统与平原农业系统的重要过渡带,其生态安全直接关系到长江上游生态屏障功能的稳定性。四川省凉山彝族自治州(简称凉山州)绝大部分区域位于西南干旱河谷区,也是四川省干旱河谷主要分布区域,由于特殊的气候和人类活动影响,暴雨集中,使得该区成为我国水土流失最为严重的地区之一[2]。凉山州幅员辽阔,各小流域自然条件复杂多样,其中安宁河谷区是凉山州主要的干旱河谷分布区域,亦是凉山州重要的农业产出地带。该区地质条件复杂(安宁河大断裂带),地形破碎,气候干燥,降雨集中,坡耕地分布面积广,加之不合理的耕作措施,使得该区泥石流频发,给水土流失治理带来极大困难[3]。因此,研究该区坡耕地土壤侵蚀特征及发生机理,对合理开展坡耕地农业生产,加强水土流失治理和生态环境修复,提高农业生产的生态环境效应具有重要意义。近年来,在气候变化与人类活动的双重胁迫下,该区水土流失问题日益突出,其中坡耕地作为区域农业生产的主要载体,成为水土流失的主要策源地。值得注意的是,在这一区域传统农耕实践中,耕作侵蚀与水力侵蚀并非孤立存在,而是形成了相互加剧的复合侵蚀系统,导致坡面土壤质量退化与土地生产力下降的恶性循环。因此,深入探究农作物种植环境下耕作侵蚀对水蚀的驱动机制与互馈关系,对于破解区域土壤侵蚀治理难题具有重要科学价值。

坡耕地在农业生产过程中,为了改善土壤质量和便于种植农作物,农民需要进行耕作后再种植。在坡耕地的耕作过程中,由于农耕工具和重力作用导致上坡土壤不断向下坡移动,净余土壤量不断向下坡传输,进行重新分配,从而产生耕作侵蚀[4]。水蚀研究已开展多年并取得了丰硕成果,耕作侵蚀研究近年已得到国内外学者广泛重视[5-6]。但是,已有研究有关耕作侵蚀影响因子中还没有考虑到农作物种植的影响,耕作侵蚀与水蚀相互作用机制研究中也未考虑农作物的影响[7]。农作物种植究竟对坡面耕作侵蚀产生多大影响,在坡面上耕作侵蚀与水蚀相互作用过程中农作物扮演什么角色还有待研究,在本研究中“作物种植”指在试验前曾种植玉米或荞麦的坡耕地,其地上部分虽已收割,但土壤中仍保留作物根系及由其形成的土壤结构,用以代表有作物种植历史的土地覆被状态。

西南干旱河谷区坡耕地土壤再分布主要受耕作侵蚀和水蚀的影响,坡耕地在土壤结构受到农作物种植的影响,农作物可以固结土壤,增强土壤抗剪强度,影响土壤耕性,同时在耕作过程中,也可以抑制土体的分解,从而影响土体在坡面的运动距离,影响坡耕地土壤耕作侵蚀,最终影响坡面水力学性质和产流产沙特征[8-9]。西南干旱河谷坡耕地的耕作侵蚀与水力侵蚀常形成复合侵蚀系统,但现有研究存在两大局限:第一是多聚焦单因子侵蚀过程(如单一耕作侵蚀或水蚀),忽略了两者的耦合效应;第二是虽关注农作物的水土保持作用,但未明确农作物如何通过影响耕作侵蚀进而调控水蚀。本研究以凉山州喜德县干旱河谷坡耕地为研究对象,利用磁性示踪法,在玉米、荞麦种植的坡耕地,采用传统耕作方式(顺坡耕作),测定耕作位移和侵蚀速率,用以探索作物类型对耕作位移的影响机制。通过研究不同用地类型、不同降雨强度下的模拟冲刷试验条件下坡面产流产沙特征,探索农作物种植的耕作侵蚀作用下土壤位移变化对水力侵蚀的影响机制。用以探究农作物收获后残留物是否通过削弱耕作侵蚀,进而调控后续水蚀过程。为该区坡耕地水土流失治理提供理论依据,也为凉山州干旱河谷区坡耕地水土流失治理和生态修复提供对策和建议。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区地处四川省凉山彝族自治州喜德县李子乡(28°2′5″N,102°12′35″E),属深切河谷低山丘陵地貌,海拔约1 700 m。该区域气候为低纬度高海拔型中亚热带季风气候,年均气温介于20～27 ℃,冬季温暖干燥,夏季凉爽湿润,四季区分不明显。降水主要集中于5—10月,约占全年总降水量的90%;10月—次年4月为旱季。多年平均降水量为1 006 mm,年均蒸发量达1 945 mm,除雨季外,蒸发量显著高于降水量。喜德县耕地面积占全县土地的10.6%,其中常耕地仅占6%,坡耕地分布广泛,25°以上坡耕地占比超过60%。耕地总体呈现面积狭小、分布碎片化、垦殖难度大的特征,坡耕地利用方式相对单一,作物以玉米和红薯的单一种植为主。土壤类型为发育于第四

纪松散堆积物上的山地黄棕壤，质地较细，土层厚度最高可达1 m。区域地形破碎，传统耕作以锄耕为主，耕作方向多为顺坡进行，试验地土壤容重和水分含量差异较小，因此忽略二者因素的影响[2]（表1）。

表1 不同土地作物类型土壤的基本信息

Table 1 Basic information of soils under different crop types

土地利用类型	坡度/%	海拔/km	土壤容重/(kg·m^{-3})	土壤含水量/%	土壤组成/%		
					砂粒(0.02～2 mm)	粉粒(0.002～0.02 mm)	黏粒(<0.002 mm)
裸地	0～60	1.3～1.6	1.525	12.7	28.78	16.27	54.95
玉米地	0～60	1.9	1.423	11.2	29.34	16.21	54.45
荞麦地	0～60	1.2	1.453	11.8	28.59	15.65	55.76

注：数据源于文献[2]。

1.2 研究方法

本次研究于2020年11月在四川省凉山州喜德县李子乡坡耕地进行模拟耕作试验，2024年11—12月在大、小凉山干旱河谷土壤侵蚀与生态修复野外科学观测研究站进行模拟冲刷试验。

模拟耕作试验中为测量不同地类耕作位移距离，试验分别选取种植玉米、荞麦的坡地以及裸地3种地类，玉米和荞麦的地上部分秸秆已收割，另外裸地则选择当年未种植农作物、全年无杂草、土壤中无根系作为对照地。为了准确反映该坡度范围的耕作侵蚀，每种地类的坡度选择控制间隔3°以内，每种地类的耕作试验的坡地样本为12～14个。在试验坡耕地上布设示踪小区（图1），示踪小区布设于坡面中上部，避开坡顶区域和坡底堆积区，每个小区间距≥2 m，减少相互干扰，挖出长1.0 m，宽0.2 m，深0.2 m，即1.0 m×0.2 m×0.2 m的土坑，将挖出的土壤用磁强计测定磁性强度本底值后与磁铁粉（1.5 kg）充分混合，混合后的土壤磁性强度为土壤磁性本底值的20～30倍[10]，多次测定混合土壤的磁强，保证土壤和磁铁粉混合均匀，将混合了磁铁粉的土壤回填至示踪小区中，并进行压实。按当地顺坡耕作习惯，采用锄具人工耕作，翻土方向为“顺坡向下翻转”，即锄头从坡上向坡下用力，将土壤翻至下坡侧，耕作深度控制在0.2 m（与示踪小区深度一致），耕作方向由示踪小区下方1.0 m处垂直于小区方向向上坡耕作，耕作宽度超过示踪区，耕作深度为0.2 m，直到耕过示踪小区0.2 m为止。耕作后，用直径5 cm的土钻取样，以0.1 m为间距在示踪小区下方连续进行取样，每个样点取3次重复取样，深度为0.2 m，取样直至测定采集的土壤磁性强度与土壤本底磁性值一致为止（误差不超过5%）。

模拟冲刷试验中将裸地、玉米地和荞麦地均进行顺坡模拟耕作，每种地类设置3个重复小区，共计冲刷试验9个小区，试验坡面长10 m、宽2 m，坡度为10°，其中裸地保持无杂草、无作物。在试验坡面顶部附近建立储水池，储水池连接供水软管放水，在软管末端安装定水头以控制流量（图2）。在坡面顶部设置水平溢流槽，采用PVC（聚氯乙烯）工程塑料制成，防止水流下渗。溢流槽出水口铺设宽2 m、长10 m的塑料薄膜以缓冲水流并使水流均匀溢出，以保证上方冲刷水流均匀、平稳，并以薄层水流形式进入坡面，以模拟自然条件下的坡面上方汇水。坡底设置倒三角形集水槽，用来收集坡面径流和泥沙，以观测在不同放水流量处理条件下坡面产流产沙变化特征。根据观测站建立的气象站降水数据，发生频率最高的降雨强度为30，45，60 mm/h，经换算本次研究设计单宽流量为5.0，7.5，10.0 L/min，每次冲刷试验前多次测定出水端流量，直到出水流量稳定并到达设计流量，误差不超过5%。

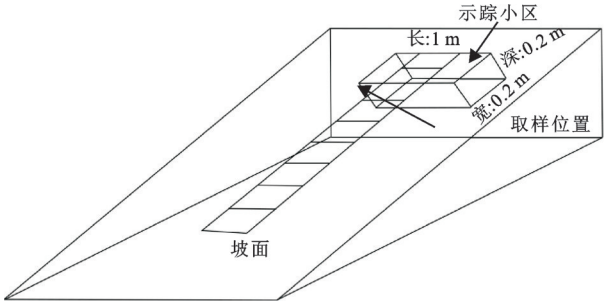


图1 取样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling

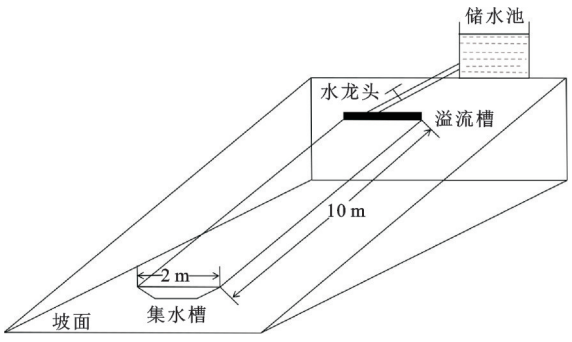


图2 冲刷试验坡面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of slope in scouring test

1.3 数据计算及分析

对于模拟耕作试验，耕作引起的土壤位移距离可依据测定的磁强值在坡面的重新分布来计算，依

据 Lobb[11] 和 zhang 等[12] 建立的土壤位移计算方式，可由以下公式计算：

$$D_d = \int_0^L \left[1 - \frac{C(x)}{C_0}\right] dx \quad (1)$$

式中：D_d 为平均耕作位移(m)；$C(x)$ 表示耕作后沿坡面水平距离 x 处测得的磁性示踪剂强度($\times 10^5$SI)；C_0 为耕作前标记小区初始的磁性示踪剂强度($\times 10^5$SI)；L 为采样的最大距离(m)。

耕作位移与传输量运用下面模型计算[12]：

$$D_d = k_1 + k_2 S \quad (2)$$

$$Q_s = k_3 + k_4 S \quad (3)$$

$$k_3 = D_t \rho_b k_1 \quad (4)$$

$$k_4 = D_t \rho_b k_2 \quad (5)$$

式中：D_d 为平均耕作位移(m)；Q_s 为单次耕作引起的位移量(kg/m)；S 为坡度(m/m)；k_1 和 k_2 为位移距离系数(m)；k_3 和 k_4 为耕作传输系数(kg/m)；D_t 为耕作深度(m)；ρ_b 为土壤容重(kg/m^3)。

耕作侵蚀速率由单位坡宽的向下坡传输量除以坡长，因此，耕作侵蚀速率公式为[2]：

$$E = \frac{10 Q_s}{L_d} \quad (6)$$

式中：E 为耕作侵蚀速率(t/hm^2)；Q_s 为单次耕作引起的位移量(kg/m)；L_d 为向下坡长(m)。

对于模拟冲刷试验，所有处理下坡出水产流时间均持续 30 min，径流泥沙每间隔 2 min 采用 500 ml 塑料瓶收集，用秒表记录收集时间，直到冲刷试验结束。采集的泥沙样完全澄清后，分离上层清水和下层水沙样品，水沙样沉淀分离后，洗入铁皮盒内，泥沙样品在恒温烘箱内以 105 ℃烘干后称重，并做好记录。

利用 SPSS 26.0 中的相关分析、回归分析等模块，判断不同作物类型坡面耕作土壤位移、耕作侵蚀速率是否存在显著差异；通过 Origin 2024 软件建立不同作物类型坡面耕作土壤位移、耕作侵蚀速率与坡度的关系以及坡面产流、产沙随时间变化的关系，并通过 Origin 2024 软件建立图表。

2　结果与分析

2.1　不同农作物种植坡耕地耕作位移特征

根据计算结果，裸地、玉米地和荞麦地的耕作位移距离与坡度间均呈显著的线性正相关关系($p<0.05$)(图 3)，并随坡度增大而增加。位移距离系数 k_1 大小关系为裸地＞玉米地＞荞麦地，裸地 k_1 分别比玉米地和荞麦地大 47.8%，48.6%；耕作位移距离系数 k_2 表现出裸地分别比玉米地和荞麦地大 55.2%，49.3%。其中，玉米地和荞麦地的位移距离系数(k_1)则没有明显差异(表 2)，说明裸地耕作位移距离随坡度增加幅度要大于玉米地和荞麦地。平均耕作位移：裸地＞荞麦地＞玉米地，裸地的平均耕作位移距离(26.38 cm)明显大于玉米地(11.82 cm)和荞麦地(12.41 cm)，玉米地和荞麦地之间的耕作位移距离则没有明显差异($p>0.5$)，但荞麦地的耕作位移距离略大于玉米地(表 2)。裸地平均耕作土壤位移量(71.79 kg/m)显著大于玉米地(34.83 kg/m)和荞麦地(36.49 kg/m)(表 2)。以上结果说明在裸地上耕作造成的土壤位移距离明显大于玉米地和荞麦地，玉米地和荞麦地减少了耕作造成的土壤位移，即种植农作物耕作造成的土壤顺坡耕作位移距离要小于未种植农作物耕作造成的土壤顺坡耕作位移距离。

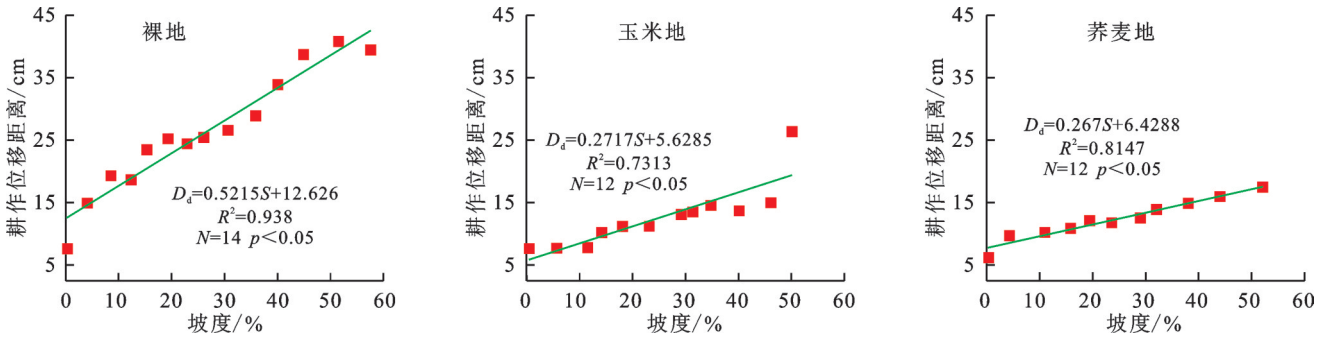


图 3　耕作位移距离与坡度关系

Fig. 3　Relationship between tillage displacement distance and slope gradient

2.2　不同农作物种植坡耕地侵蚀差异

计算可得，3 种地类耕作侵蚀速率与坡度之间呈线性正相关关系($p<0.05$)(图 4)，并随坡度增大而增加。裸地的耕作侵蚀速率的斜率为 1.649 8，分别是玉米地(0.764 4)和荞麦地(0.781 1)的 2.2 倍和 2.1 倍(图 3)，表明裸地耕作侵蚀速率随坡度变化的幅度大于玉米地和荞麦地，说明农作物种植下弱化了耕作侵蚀随坡度变化的强度。方差分析结果显示，裸地的耕作侵蚀速率明显大于玉米地和荞麦地的耕作侵蚀速率($p<0.01$)(表 3)，其中裸地单次平均耕作侵蚀速率为 75.85 t/hm^2，分别是玉米地(38.15 t/hm^2)、荞麦地(40.62 t/hm^2)的 1.99 倍和 1.88 倍。以上结果表明未种植农作

物的耕作侵蚀速率明显比种植了玉米和荞麦的大，在坡耕地种植农作物能有效减少坡耕地耕作侵蚀。

表 2 不同作物类型的耕作侵蚀特征

Table 2 Tillage erosion characteristics of different crop types

耕地地类	平均耕作位移距离/cm	平均耕作土壤位移量/(kg·m^{-1})
裸地	26.38±9.28a	71.79±27.15a
玉米地	11.82±3.19b	34.83±9.64b
荞麦地	12.41±3.00b	36.49±10.33b

注：同一字母相同表示无显著差异，字母不同表示存在显著差异（$p<0.05$）。

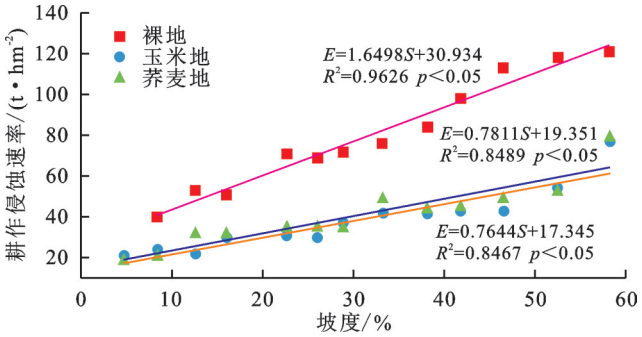


图 4 耕作侵蚀速率与坡度之间关系

Fig. 4 Relationship between tillage erosion rate and slope gradient

表 3 不同地类耕作侵蚀速率

Table 3 Tillage erosion rates of different land types

坡度/%	侵蚀速率/(t·hm^{-2})		
	裸地	玉米地	荞麦地
0	20	21	19
4	40	24	21
8.5	53	22	32
12.2	51	30	32
19.3	71	31	35
23	69	30	35
26	72	37	35
30.7	76	42	49
36	84	42	44
40	98	43	45
45	113	43	49
51.5	118	54	53
57.7	121	77	79
方差结果	75.85±30.80a	38.15±15.21b	40.62±15.53b

注：同一字母相同表示无显著差异，字母不同表示存在显著差异（$p<0.01$）。

2.3 不同农作物种植坡耕地产流特征

2.3.1 *坡面开始产流时间* 开始产流时间，随放水流量减小而增大（图 5）。3 种放水流量情况下，裸地的开始产流时间比玉米地和荞麦地提前。单宽放水流量为 10 L 时，玉米地（30 min）和荞麦地（33 min）的开始产流时间分别比裸地（12 min）慢 18 min 和 21 min；单宽放水流量为 7.5 L 时，玉米地（54.08 min）和荞麦地（58 min）的开始产流时间分别比裸地（19 min）慢 35.08 min 和 39 min；单宽放水流量为 5 L 时，玉米地（65 min）和荞麦地（72 min）的开始产流时间分别比裸地（24 min）慢 41 min 和 48 min。与裸地相比，有农作物种植的坡耕地可以延缓开始产流时间。

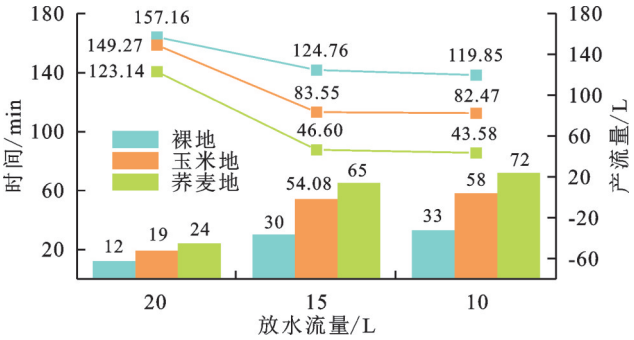


图 5 产流相关特征

Fig. 5 Characteristics of runoff yield

以上结果表明，在农作物的影响下，耕作侵蚀减小，下坡土壤堆积未明显增加，中上坡土壤未显著减少，相比裸地而言入渗量较大，坡面开始产流时间比裸地延后。可能由于农作物的固结作用，土壤和农作物形成复合体，虽有破坏但部分农作物根系和土壤形成土根复合体有利于增加土壤的入渗，也使得开始产流时间延后。

2.3.2 *坡面产流率* 在 3 种放水流量情况下，随冲刷持续，坡面产流先快速增大，后逐渐平稳（图 6）。裸地的产流率均比玉米地和荞麦地大，荞麦地产流率均比玉米地小，并且随放水流量减小，产流率相应减小。其中，荞麦地在 3 种放水流量下，平均产流率由 7.05 L/min 减少到 2.74 L/min，减小幅度为 61.13%，而裸地平均产流率由 9.24 L/min 减少到 7.24 L/min，减小幅度为 21.64%，荞麦地减小幅度为裸地的 3 倍，差异显著（$p<0.05$）（表 4）。裸地、玉米地和荞麦地在 20 L，15 L 放水流量下，产流率随流量减小而减小，没有明显差异，但在 10 L 放水流量下差异显著，其中以荞麦地为例，在 3 种放水流量回归方程斜率（0.157 7，0.114 1，0.068 3）（图 7），减小幅度为 56.69%，说明有农作物种植的坡耕地能显著减小坡面产流率。以上结果表明，裸地的产流率差异不显著，玉米地和荞麦地的产流率随流量变化差异显著，表明坡耕地种植农作物使得耕作后的土壤入渗明显增大，产流率减小明显。

在 3 种放水流量下，3 种用地的累计产流量随放水流量减小（图 5），差异明显增大，裸地的累计产流量均比玉米地和荞麦地大，在单宽流量 5 L 时最为显

著,分别是玉米地和荞麦地的2.64倍和2.83倍,但玉米地和荞麦地累计产流量减小幅度(62.65%,63.64%)比裸地(21.65%)更大,表明种植农作物使得耕作后的土壤入渗明显增大,减小累计产流量。

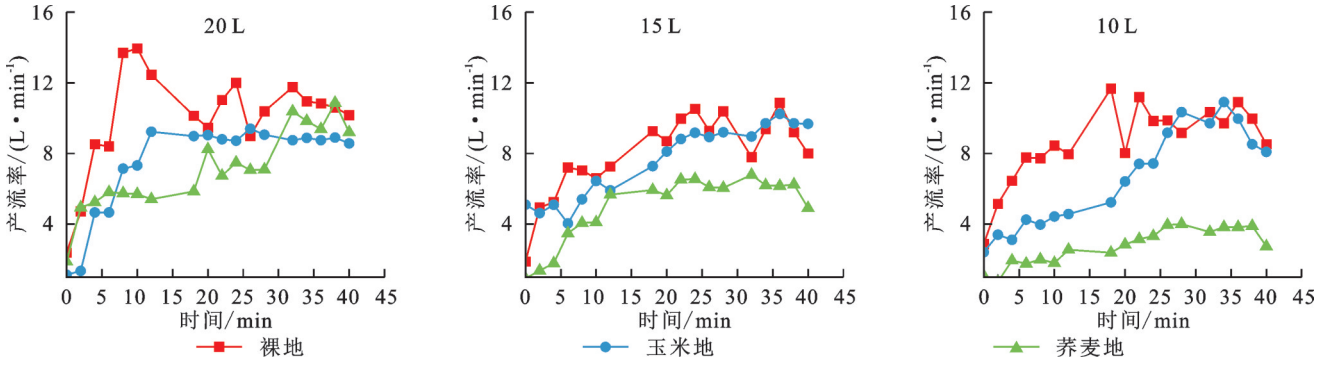


图 6　产流率与时间之间关系

Fig. 6　Relationship between runoff yield rate and time

表 4　不同放水单宽流量产流率

Table 4　Runoff yield rates of different unit discharge widths

用地类型	不同放水单宽流量产流率/(L·min⁻¹)		
	10 L	7.5 L	5 L
裸地	9.24±2.81Aa	8.78±2.16Aa	7.24±3.20Aa
玉米地	7.34±2.72Aa	6.81±1.94Aa	5.37±1.06Bb
荞麦地	7.05±2.29Aa	4.91±1.88Bb	2.74±1.03Bb

注:不同小写字母表示不同用地类型的产流率存在显著差异($p<0.05$);不同大写字母表示不同流量的产流率存在显著差异($p<0.05$)。

以上结果表明,随放水流量减小,玉米地和荞麦地耕作后,土壤入渗明显增大,主要原因可能是农作物固结土壤增强了土壤稳定入渗。相比于裸地,种植农作物的土地顺坡耕作后,开始产流时间延长,且随流量减小而增长。在3种放水流量下,种植农作物的土地平均产流率均比裸地的产流率小,且随流量减小而明显减小;在3种放水流量下,裸地的累计产流量均比种植农作物的土地大,随放水流量减小,玉米和荞麦的累计产流量减小幅度比裸地更大。

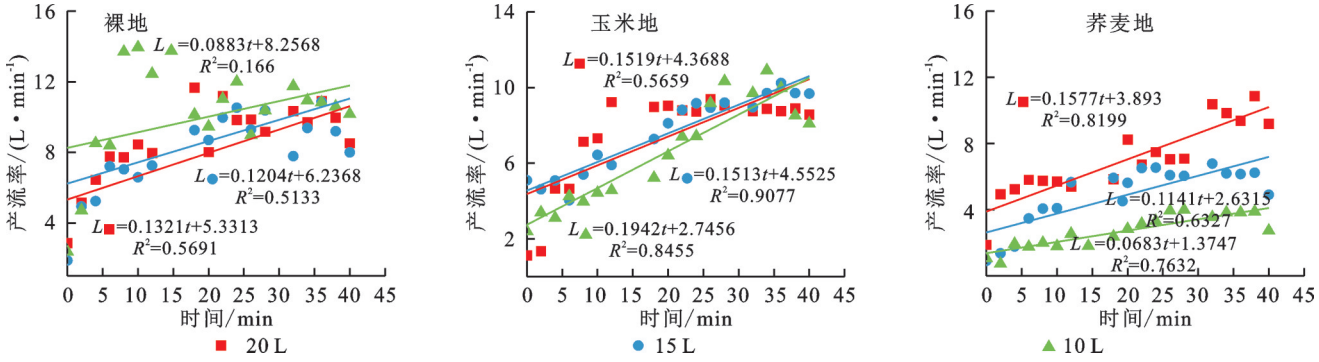


图 7　不同流量产流率与时间关系

Fig. 7　Relationship between different runoff yield rates and time

2.4　不同农作物种植坡耕地产沙特征

3种放水流量情况下,随冲刷持续,坡面产沙先快速增大,后逐渐减少至平稳(图8)。3种放水流量下裸地的平均产沙率均大于玉米地和荞麦地,玉米地平均产沙率在单宽流量10 L到5 L由2 551.4 g/min减少到484.37 g/min,减小幅度为81.02%,荞麦地平均产沙率在单宽流量10 L到5 L由2 055.58 g/min减少到384.37 g/min,减小幅度为81.3%,而裸地平均产沙率在单宽流量10 L到5 L由3 022.2 g/min减少到1 242.18 g/min,减小幅度为58.9%,减小幅度分别为裸地的1.37倍和1.38倍,裸地的产沙率均显著大于玉米地和荞麦地($p<0.05$)(表5),且裸地和玉米地及荞麦地的平均产沙率随放水流量减小而明显减小。

3种放水流量下,裸地的累计产沙量均大于玉米地和荞麦地(图9),3种用地类型下,累计产沙量均随放水流量减小而减少,在单宽流量7.5 L最为显著,分别是玉米地和荞麦地的4.1倍和4.4倍,但玉米地和荞麦地累计产沙量减小幅度(84.94%,84.17%)比裸地(58.9%)更大,表明农作物固结土壤,减少中下坡松散物质集聚,并使耕作后的土壤入渗明显增大,减小坡面径流,从而导致累计产流量显著减小。

以上结果表明,3种放水流量情况下,随冲刷持续,坡面产沙先快速增大,后逐渐减少至平稳;裸地的平均产沙率均大于玉米地和荞麦地,其中7.5 L,5 L单宽流量下,裸地的产沙率均显著大于玉米地和荞麦地,玉米地和荞麦地的平均产沙率随放水流

量减小而明显减小。3种放水流量下，裸地的累计产沙量均大于玉米地和荞麦地，3种用地类型下，累计产沙量均随放水流量减小而减少，荞麦地累计产沙减小幅度最大，说明农作物增强了土壤稳定入渗，减小了坡面径流的产生，从而减小产沙率和累计产沙量。

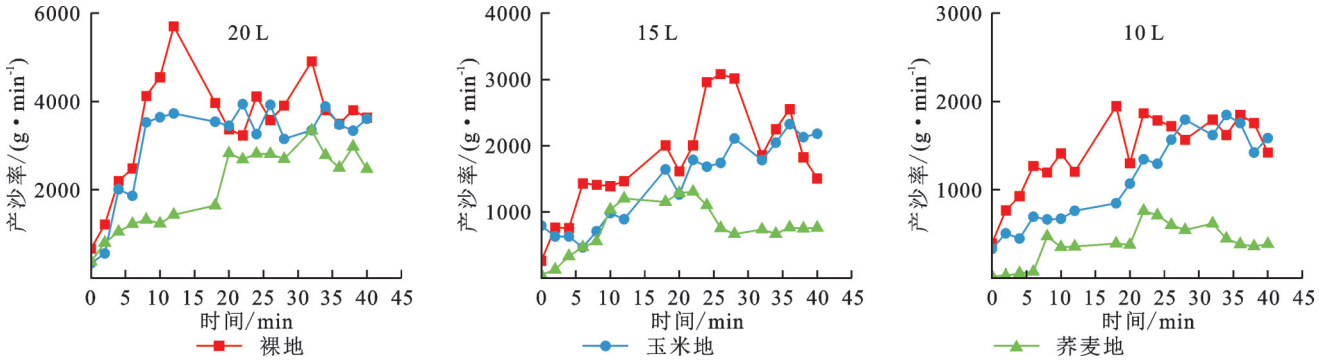


图8 产沙率与时间之间关系

Fig. 8 Relationship between sediment yield rate and time

表5 不同单宽放水流量产沙率

Table 5 Sediment yield rates under different unit discharge widths

用地类型	不同单宽放水流量产沙率/(g·min⁻¹)		
	10 L	7.5 L	5 L
裸地	3022.20±1471.32Aa	3338.13±1418.60Aa	1242.18±600.78Ba
玉米地	2551.40±1199.51Aa	810.99±405.80Bb	484.37±231.47Bb
荞麦地	2055.58±902.15Aa	761.06±371.17Bb	384.37±224.54Bb

注：不同小写字母表示不同用地类型的产沙率存在显著差异($p<0.05$)；不同大写字母表示不同流量的产沙率存在显著差异($p<0.05$)。

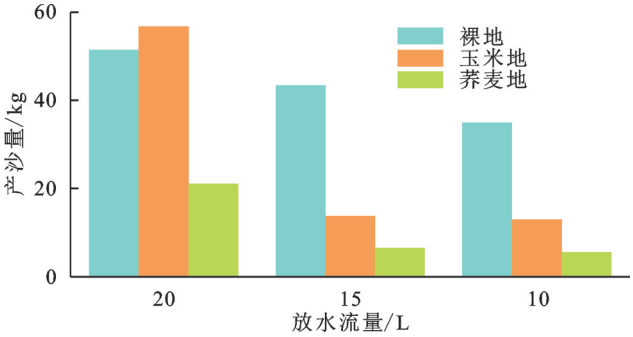


图9 不同放水流量累计产沙量

Fig. 9 Cumulative sediment yield of different discharge flow rates

3 讨 论

3.1 农作物对坡耕地耕作位移的影响

本研究通过模拟耕作与冲刷试验，发现农作物种植对坡耕地耕作侵蚀及后续水力侵蚀的显著调控作用。结果表明，玉米地和荞麦地的平均耕作位移(11.82 cm和12.41 cm)显著低于裸地(26.38 cm)，且耕作侵蚀速率也相应降低，进而影响坡面产流产沙过程，说明农作物在改善土壤结构、增强抗蚀性方面的重要功能，这一发现与既有研究中关于农作物固土效应的认识一致，植物根系可通过物理缠结和生物化学作用增强土壤抗侵蚀性[13]，说明土壤-农作物复合体具有更高的抗剪强度与水稳性[8]。

值得注意的是，本研究强调耕作活动本身是作为一种重要侵蚀营力的角色。相关研究虽深入揭示了坡度对产流产沙的显著影响，但试验前提多为已耕作或裸坡状态，没有说明坡面耕作扰动对后续坡度效应的放大或修正作用，如在紫色土坡耕地20°左右存在产沙峰值，但没有解释在达到此坡度前，频繁耕作导致的土壤持续下移与上坡土层变薄是否提前加剧了侵蚀风险。本研究发现，在相同坡度下，有无作物覆盖而导致的耕作位移差异显著(裸地位移是玉米地的2.2倍)，说明在侵蚀过程的物质准备阶段，作物种植通过抑制耕作侵蚀，显著降低了坡面(尤其是中下坡)松散物质的堆积量，减少了水蚀的物质来源。

本研究发现玉米地和荞麦地在各项指标中表现尤为突出，其根系系统可能更具韧性或分布更为密集，从而更有效地固结土壤、抑制土粒分离与运移[14]。与以往单一侵蚀过程或单一植被作用的研究相比，本研究明确区分了玉米与荞麦两种常见作物在调控耕作侵蚀方面的细微差异，并指出荞麦的减蚀效果更为显著。此外，相较于Wang[15]和戴佳栋[16]等在类似区域探讨耕作侵蚀对水蚀影响的研究，本研究突出了农作物种植在侵蚀链中的前置性调控作用，从源头削弱后续水蚀发生的物质基础。

3.2 农作物对坡耕地产流的影响

在水力侵蚀响应中，农作物种植显著延缓了坡面

产流时间,降低了径流率,在中等及较小流量条件下(15 L/min与10 L/min),减流效益更为明显。这进一步印证了耕作扰动与水力冲刷之间存在的内在联系,农作物通过减少耕作扰动,间接降低了坡面松散物质的来源,削弱了水蚀发生的物质基础,说明农作物在提升土壤力学性质的同时,也改善了水文特性[17-18],说明两种侵蚀过程的耦合效应[19],作物种植可降低耕作侵蚀和水蚀,说明农作物固土效应具有一定的普适性[20-21]。耕作会改变坡面微地形和水流路径[22-23],本研究进行顺坡耕作,作物残留根系仍可在一定程度上维持土壤结构的连续性,延缓水流汇集,说明作物种植可部分抵消耕作对入渗的负面影响[24]。此外,作物根系在减少土壤位移的同时,很可能也保护了土壤有机质和团聚体,从而提升土壤抗蚀性和持水性[25]。

然而,大多数现有研究将农作物减流效应主要归因于植被冠层截留、地表粗糙度增加以及根系改善入渗等直接因素[26-27]。这些研究通常默认坡面初始条件均一,未考虑耕作活动导致的地形与物质空间异质性。本研究通过设置符合当地耕作习惯(顺坡耕作)的试验序列,清晰揭示了耕作侵蚀的关键中介作用,在裸地,强烈的顺坡耕作导致大量上坡土壤向下坡搬运,造成上坡土层变薄、压实,入渗能力下降;同时下坡土壤堆积、疏松,虽初始入渗可能略高,但极易在径流冲刷下迅速形成地表细沟,加速径流汇集。因此,裸地在耕作后呈现出产流快、径流率高的特点。

相反,在玉米地和荞麦地,由于农作物作用显著抑制了耕作侵蚀,坡面土壤的再分布程度大为减轻。这有助于维持相对均一的土层厚度和土壤结构,特别是保护了上坡区域的土壤资源和水源涵养功能。作物残留根系在耕作后仍部分存留于土壤中,继续发挥改善孔隙结构、增加稳渗率的作用。因此,作物种植区的坡面能够更有效地吸收降雨,延缓地表径流的产生和汇集,这与观测到的产流时间显著延后、径流率降低的结果一致。本研究则进一步阐明,这种延缓作用部分源于作物抑制耕作侵蚀,从而维持了坡面较高的整体入渗能力,减少了地表径流总量,间接影响了壤中流和地下流的分配比例。

3.3　农作物对坡耕地产沙的影响

本研究发现,裸地的平均产沙率在3种放水流量下均显著高于玉米地和荞麦地,尤其在15 L/min与10 L/min流量下,玉米地和荞麦地的产沙率降幅为裸地1.37～1.38倍。大量研究[26-27]证实植被覆盖对减少泥沙分离和搬运的直接作用,在坡耕地的长期观测中发现,合理的种植制度和种植模式提高覆盖度后能有效降低产沙量[27-28]。这些研究主要从植被覆盖削弱雨滴溅蚀、减缓径流流速、提高土壤抗冲性等方面解释减沙机制。而本研究的区别在于,从物质来源源头揭示了耕作侵蚀的贡献,在无作物覆盖的裸地进行顺坡耕作,其本身就是一个大范围的供沙过程。耕作活动不仅直接搬运土壤,更重要的是在耕作层内创造了大量松散土壤,为后续水力侵蚀提供了极为丰富的近源物质。

作物种植直接减少了因耕作引起的土壤向下坡的净位移量,降低了中下坡的松散堆积物总量。其次,“土-根复合体”增强了土壤团聚体的水稳性和抗破碎能力,即使在耕作扰动后,土壤团聚体也不易分离。因此,在后续的冲刷试验中,作物种植的坡面不仅径流量小,而且产沙率也相应下降,可供冲刷的松散物源也较少,坡面径流中的含沙率也显著降低。

耕作侵蚀作为前期微地形塑造的重要外营力。在裸地上,耕作造成的土壤位移和不均匀堆积,可能提前预设了细沟发育的潜在路径和物质条件,加速细沟侵蚀的发生。而在作物地上,相对均匀的土壤分布和稳定的结构延迟细沟发育,使侵蚀在更长时间内保持在面蚀阶段,从而降低了总产沙量。这体现出耕作侵蚀与水蚀之间存在紧密的耦合关系,而作物种植是切断这种不利耦合的有效途径[28]。

同时,本研究也存在一定的局限性,研究还未涉及坡耕地耕作侵蚀过程中,不同农作物种类根系特征差异的影响需要进一步研究,刘静[29]在研究土壤-根系复合体对耕作位移量的影响时,已开始关注根系力学参数,未来可结合根系构型进行定量分析。此外,本研究采用的模拟放水试验虽能控制变量,但未能涵盖天然降雨中的溅蚀、雨滴打击等因素,这与实际降雨侵蚀过程存在差异。Wang等[30]在研究细沟发育对耕作侵蚀的影响时,已注意到地表微地形变化的作用,在后续研究中,若能结合模拟降雨设备,并监测坡面细沟发育动态,将能更真实地揭示耕作侵蚀与水蚀在作物种植条件下的复合效应。同时,本研究主要关注顺坡耕作方式,而其他耕作方式(如等高耕作)对耕作侵蚀和水蚀的影响也值得探讨。

4　结　论

(1) 农作物种植可减缓坡耕地上土壤顺坡迁移及耕作侵蚀速率。玉米地与荞麦地的土壤顺坡位移及耕作侵蚀速率明显低于裸地,特别是玉米种植明显有利于降低坡面土壤耕作位移,减小耕作侵蚀速率。

(2) 农作物种植通过减少耕作导致的土壤顺坡迁移,降低了坡面产流。上坡相对更多的松散土壤和土根系统增加了水分入渗,使得平均产流率和累计产流量均比裸地坡面小。

（3）农作物种植通过减轻耕作侵蚀，有效降低了坡面产沙。农作物种植坡面耕作后，产流减小明显会降低产沙率。此外，相比于裸地，下坡松散土壤少，物源减小随径流迁移的土壤也减少，同时土根系统也阻止土壤随径流流失，从而使得坡面产沙量明显降低。

参考文献（References）：

[1] 范建容，杨超，包维楷，等.西南地区干旱河谷分布范围及分区统计分析[J].山地学报，2020，38(2)：303-313.
Fan J R, Yang C, Bao W K, et al. Distribution scope and district statistical analysis of dry valleys in Southwest China[J]. Mountain Research, 2020, 38(2): 303-313.

[2] 罗辅燕，张泽洪，葛秋伶，等.金沙江流域干旱河谷区坡耕地作物类型对耕作侵蚀的影响[J].水土保持研究，2023，30(2)：22-28.
Luo F Y, Zhang Z H, Ge Q L, et al. Effects of crop types on tillage erosion in the dry valleys of Jinsha River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 22-28.

[3] 黄梦思，阎建忠，吴雅，等.西南高山峡谷区水土保持变化及驱动因素分析[J].西南大学学报（自然科学版），2025，47(11)：121-135.
Huang M S, Yan J Z, Wu Y, et al. Analysis on the change of soil and water conservation capacity and its driving factors in southwest alpine-canyon area[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2025, 47(11): 121-135.

[4] 许海超，张建辉，戴佳栋，等.耕作侵蚀研究回顾和展望[J].地球科学进展，2019，34(12)：1288-1300.
Xu H C, Zhang J H, Dai J D, et al. Review and prospect of tillage erosion research [J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(12): 1288-1300.

[5] Kaminskyi V, Kolomiiets L, Bulgakov V, et al. An investigation into the state of agricultural lands under water erosion conditions[J]. Agronomy Research, 2021, 19(2): 458-471.

[6] Li S, Zhao B, Wu H, et al. Three decades of tillage driven topsoil displacement and soil erosion attenuation on Loess Plateau slope farmlands[J]. Agriculture, 2025, 15(10): 1084.

[7] 邓继峰，张淞.土壤侵蚀研究新结合点：水蚀对耕作侵蚀的影响[J].新农业，2015(23)：14-16.
Deng J F, Zhang S. A new combination of soil erosion research: the effect of water erosion on tillage erosion[J]. Xin Nongye, 2015(23): 14-16.

[8] 滕培基，雷琬莹，王博，等.不同类型作物根系对黑土物理特性和根际土壤性质的影响[J].土壤与作物，2024，13(4)：391-403.
Teng P J, Lei W Y, Wang B, et al. Influences of different crop root systems on physical properties and rhizosphere soil properties in black soil[J]. Soils and Crops, 2024, 13(4): 391-403.

[9] 王勇，张建辉，张泽洪，等.长期向上耕作对坡耕地土壤水稳定性团聚体的影响[J].水土保持研究，2016，23(1)：44-49.
Wang Y, Zhang J H, Zhang Z H, et al. Impacts of long-time upslope tillage systems on soil water-stable aggregates on a steep hillslope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 44-49.

[10] 张泽洪，张建辉，王勇，等.两种土壤磁性特征及其对磁性示踪试验的影响[J].水土保持学报，2016，30(1)：58-61.
Zhang Z H, Zhang J H, Wang Y, et al. Magnetic characteristics of two soils and their effects on magnetic tracer test[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 58-61.

[11] Lobb D A, Quine T A, Govers G, et al. Comparison of methods used to calculate tillage translocation using plot-tracers [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 56(4): 321-328.

[12] Zhang J H, Su Z A, Nie X J. An investigation of soil translocation and erosion by conservation hoeing tillage on steep lands using a magnetic tracer[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 105(2): 177-183.

[13] 潘文，王强.植物根系强化土壤抗蚀性机制研究述评[J].水土保持应用技术，2024(4)：65-68.
Pan W, Wang Q. A review of the research on the mechanism of plant root system strengthening soil erosion resistance[J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2024(4): 65-68.

[14] Li J, Li L, Wang W, et al. Hydrological and erosion responses of steep spoil heaps to taproot and fibrous root grasses under simulated rainfalls[J]. Journal of Hydrology, 2023, 618: 129169.

[15] Wang Y, Zhang J H, Zhang Z H, et al. Impact of tillage erosion on water erosion in a hilly landscape[J]. Science of the Total Environment, 2016, 551: 522-532.

[16] 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 J D, Zhang Z H, Zhang J H, 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.

[17] Tagarelli V, Cotecchia F, Bottiglieri O. Preliminary field data of selected deep-rooted vegetation effects on the slope-vegetation-atmosphere interaction: results from an in-situ test[J]. Ital. Geotech. J, 2022, 1(22): 62-83.

[18] Meng T, Sun P. Variations of deep soil moisture under different vegetation restoration types in a watershed of the Loess Plateau, China[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 4957.

[19] 赵鹏志，陈祥伟，王恩姮.黑土坡耕地有机碳及其组分累积-损耗格局对耕作侵蚀与水蚀的响应[J].应用生

态学报,2017,28(11):3634-3642.
Zhao P Z, Chen X W, Wang E H. Responses of accumulation-loss patterns for soil organic carbon and its fractions to tillageand water erosion in black soil area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(11):3634-3642.

[20] 侯宁,王勇,赵虎,等.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 N, Wang Y, Zhao H, et al. Effects of tillage erosion on sediment yield of purple soil under different slopes[J]. Mountain Research, 2021,39(4):495-505.

[21] 陈梦圆.紫色土耕作侵蚀与有机碳分布过程模拟[D].四川绵阳:西南科技大学,2023.
Chen M Y. Process simulation of tillage erosion and organic carbon distribution in purple [D]. Mianyang, Sichuan: Southwest University of Science and Technology, 2023.

[22] 张泽洪.干热河谷区坡面水蚀与耕作侵蚀的交互作用机制[D].北京:中国科学院大学,2017.
Zhang Z H. The interaction mechanism between slope water erosion and tillage erosion in dry hot valley areas [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.

[23] 张校棱.耕作强度对紫色土坡面水文连通性及侵蚀产沙的影响研究[D].成都:四川农业大学,2023.
Zhang X L. The effects of tillage intensity on hydrological connectivity and erosion and sand production of purple soil slope [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2023.

[24] 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 Z A, Zhang J H. Impacts of soil redistribution by tillage on soil water infiltration [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,24(3):194-198.

[25] 樊红柱,张建辉,王勇,等.川北山区坡耕地侵蚀耕作对土壤团聚体碳的影响[J].农业机械学报,2015,46(11):157-164.
Fan H Z, Zhang J H, Wang Y, et al. Tillage erosion impacts on soil aggregate associated carbon in mountainous region slope farmland of Northern Sichuan [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(11):157-164.

[26] 吴光琴,戴全厚,王勇,等.喀斯特玉米坡耕地产流产沙对坡度的响应[J].水土保持学报,2024,38(6):13-22.
Wu G Q, Dai Q H, Wang Y, et al. Response of runoff and sediment yield from maize slope farmland in karst areas to slope gradient [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(6):13-22.

[27] 韦荣婷,安吉平,蔡雄飞,等.不同作物种植模式下坡耕地产流产沙的模拟研究[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2024,42(1):19-26,75.
Wei R T, An J P, Cai X F, et al. Simulation study on runoff and sediment of sloping farmland under different crop planting patterns [J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences,2024,42(1):19-26,75.

[28] 奚宏,唐继斗,史东梅,等.坡度对紫色土坡耕地产流产沙特征的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(4):19-25.
Xi H, Tang J D, Si D M, et al. Effects of slope on the runoff and sediment yield in purple soil sloping farmland of Chongqing[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(4):19-25.

[29] 刘静.土壤-根系复合体对紫色土坡地耕作位移量的影响[D].成都:四川农业大学,2020.
Liu J. Impact of soil-root composites on soil displacement by tillage on the hillslopeof purple soil [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2020.

[30] Wang Y, Zhang Z H, Zhang J H, et al. Effect of surface rills on soil redistribution by tillage erosion on a steep hillslope[J]. Geomorphology, 2021,380:107637.

(上接第 29 页)

[25] 顾小华,杨智,张兰兰,等.滇中高原不同土地利用类型产流产沙特征及影响因素:以尖山河小流域为例[J].水土保持通报,2024,44(5):75-82.
Gu X H, Yang Z, Zhang L L, et al. Characteristics of runoff and sediment yield under different land uses and its influencing factors in central Yunnan Plateau: a case study at Jianshan River small catchment[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(5):75-82.

[26] Benito E, Santiago J L, de Blas E, et al. Deforestation of water-repellent soils in Galicia (NW Spain): Effects on surface runoff and erosion under simulated rainfall [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003,28(2):145-155.

[27] 倪世民,杨伟,王杰,等.不同类型土壤团聚体斥水性及其对溅蚀的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):167-173.
Ni S M, Yang W, Wang J, et al. Soil water repellency of different types of soils aggregate and its effect on the splash erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(1):167-173.

[28] Sochan A, Beczek M, Mazur R, et al. Splash erosion and surface deformation following a drop impact on the soil with different hydrophobicity levels and moisture content[J]. PLoS One, 2023,18(5):e0285611.

[29] Doerr S H, Ferreira A J D, Walsh R P D, et al. Soil water repellency as a potential parameter in rainfall-runoff modelling: experimental evidence at point to catchment scales from Portugal[J]. Hydrological Processes, 2003,17(2):363-377.